

การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมและความสัมพันธ์ของปัจจัย
การควบคุมหัวเจาะอุโมงค์สำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน

EVALUATION OF ANN PERFORMANCE AND SHIELD OPERATIONAL
FACTOR'S CORRELATION FOR PREDICTING SURFACE SETTLEMENTS



T121417



พิสุทธิ โชติดีลก

PISUT CHOTIDILOK

เลขหมู่.....121417
เลขทะเบียน.....
วัน, เดือน, ปี..1.0.ค.ค..2555

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

**EVALUATION OF ANN PERFORMANCE AND SHIELD OPERATIONAL
FACTOR'S CORRELATION FOR PREDICTING SURFACE SETTLEMENTS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2009

KMITL-2009-EN-M-093-134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมและความสัมพันธ์ของปัจจัยการควบคุม
หัวเจาะอุโมงค์สำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน

Thesis Title Evaluation of ANN Performance and Shield Operational Factor's Correlation for
Predicting Surface Settlements

นักศึกษา นายพิสุทธิ โชติดีติก

รหัสประจำตัว 49061520

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์
KMUTT-2009-BN-M-093-134

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.สุพจน์	ศรินี	
ผศ.ดร.สกุ	ห่อว โนทยาน	
ผศ.สมเกียรติ	ขวัญฤกษ์	
ผศ.ดร.พรเกษม	จงประดิษฐ์	
รศ.ดร.สุชัชวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2552 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพ โครงข่ายประสาทดัดเทียมและ ความสัมพันธ์ของปัจจัยการควบคุมหัวใจอูโมงค์สำหรับ พยากรณ์การทรุดตัวของผิวหนัง
นักศึกษา	นาย พิสุทธิ โชติคิลก
รหัสประจำตัว	49061520
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอูโมงค์ด้วยหัวใจแบบปรับแรงดันคินสมดุล จะส่งผลกระทบต่อการสูญเสีย มวลคินในขณะที่ทำการก่อสร้างอูโมงค์ ด้วยเหตุนี้ หลักวิธีการต่างๆประกอบไปด้วย หลักการ สังเกต หลักการวิเคราะห์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ จึงนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์เพื่อหาการ เคลื่อนตัวของคินทั้งในระดับลึกและที่ผิวหนัง แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการวิเคราะห์เหล่านี้ ยังคงไม่สามารถที่จะจำลองพฤติกรรมของการชูดหัวใจอูโมงค์ได้อย่างครบถ้วน อันเนื่องมาจากความ ซับซ้อนของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการ โครงข่ายประสาทดัดเทียมมา ใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวหนังแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอูโมงค์ และ ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดย ใช้ข้อมูลจาก 2 โครงการก่อสร้างอูโมงค์ขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ ได้แก่ โครงการรถไฟฟ้ามหานคร สาย เฉลิมรัชมมงคล และโครงการอูโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำ เจ้าพระยา เป็นกรณีศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและหาความสัมพันธ์ของ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทรุดตัว ผลปรากฏว่า ในกรณีที่แยกข้อมูลตามสภาพทางธรณีวิทยาและ ข้อมูลมีปริมาณที่มากเพียงพอ โครงข่ายประสาทดัดเทียมสามารถพยากรณ์การทรุดตัวได้อย่างมี ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมดล้วนแต่มีความสัมพันธ์ ต่อค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น

Thesis Title	Evaluation of ANN Performance and Shield Operational Factor's Correlation for Predicting Surface Settlements
Student	Mr. Pisut Chotidilok
Student ID.	49061520
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suchatvee Suwansawat

ABSTRACT

Earth pressure balance (EPB) shield has been used in most of soft ground tunneling projects. It was found that ground loss and related excessive surface settlements caused by EPB shield tunneling could damage existing buildings adjacent to tunneling area. Although, numerous empirical principles and 2-D and 3-D numerical analyses have been applied to tunnel-induced ground movement problems. However, fewer approaches have been developed for EPB shield tunneling. Therefore, this thesis applied artificial neural networks (ANN) for predicting surface settlements and evaluating relation of factors affecting surface settlements including tunnel geometry, geological conditions and shield operation factors by correlation coefficient with data from Bangkok MRTA and BMA flood protection tunnel projects. As a result, an appropriately trained ANN model in each geological condition can effectively predict surface settlements well. All introduced factors affecting were found to be associated with surface settlements.

กิตติกรรมประกาศ

คงไม่มีคำกล่าวใดที่จะเหมาะสมเทียบเท่ากับคำว่าขอบคุณจากหัวใจของข้าพเจ้าแก่ รศ.ดร. สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความกรุณา ความอนุเคราะห์ คำชี้แนะ และการดูแลเป็นอย่างดีตลอดมา ทั้งในเรื่องของการศึกษารวม ไปถึงการใช้ชีวิตในสังคมที่ต้องมี พร้อมทั้งความสามารถ การมีสัมมาคารวะ การอ่อนน้อมถ่อมตน และคุณลักษณะที่ดีอีกมากมาย ที่ข้าพเจ้าได้เรียนรู้จากตัวของอาจารย์ ทำให้ข้าพเจ้ามีพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นในหลายๆด้านภายในตัวของข้าพเจ้าเอง

ขอขอบคุณอย่างยิ่งสำหรับ รศ.สุพจน์ ศรีนิล ผศ.ดร.สฤต ห่อวโนทยาน ผศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร ดร.อุมา สีนุญเรือง อ.สมเกียรติ ขวัญพฤกษ์ และ อ.พรเกษม จงประดิษฐ์ ที่คอยสั่งสอนและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา นอกจากนี้ ขอขอบคุณบรรดาอาจารย์ทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณ พี่พิชากร พี่อนันต์ พี่พีรบุษ และน้องชวลิต ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียม รวมถึงคุณชินวุฒิ และคุณสุรจิต สำหรับข้อมูลที่มีค่าเป็นอย่างยิ่งที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณเป็นอย่างสูงแก่ อ.กนกกัณฑ์ อ.ทศวรรษ พี่สุรชุน พี่กิตติ และ พี่ขวัญ ในการถ่ายทอดประสบการณ์การทำงาน การเป็นคนที่มีคุณภาพในสังคม และให้คำปรึกษาในงานก่อสร้างอุโมงค์ต่อข้าพเจ้า

ขอบคุณพี่ศิริพงษ์ พี่ชัชว นื่องประทีป นื่องเสฏฐวุฒิ นื่องภัทรวรรณ บรรดาเพื่อนร่วมรุ่นทั้งหมดของข้าพเจ้าตั้งแต่ปริญญาตรี รวมทั้งเพื่อนที่เรียนในระดับปริญญาโททั้งหมด สำหรับความช่วยเหลือ ความรัก ความห่วงใย กำลังใจ ที่ปรึกษายามทุกข์และสุข ทำให้รู้จักและซาบซึ้งถึงคำว่า “เพื่อน” ซัดเจนเสมอมา

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถานที่บ่มเพาะและประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่ระดับปริญญาตรีจนถึงระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งสำนักหอสมุดกลาง สจล. ที่ได้จัดหาหนังสือและวารสารอันทรงคุณค่ายิ่งสำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายแต่ความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนสำหรับคำขอบคุณจากหัวใจแก่คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาว ที่คอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา ท้ายที่สุด ขอส่งมอบความสำเร็จของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ไปให้คุณปู่ คุณย่า คุณตา และคุณยาย ของข้าพเจ้าที่อยู่บนสวรรค์ได้รับรู้ ข้าพเจ้าเชื่อว่าท่านจะเห็นและสัมผัสได้ถึงความสำเร็จอีกก้าวหนึ่งของหลานชายคนนี้

พิสุทธิ์ โชติฉิลก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 หัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balanced Shield).....	4
2.2.1 หลักการขุดเจาะอุโมงค์ (Excavation).....	6
2.2.2 ผนังอุโมงค์ (Tunnel lining).....	9
2.2.3 การติดตั้งผนังอุโมงค์ (Segment erection).....	9
2.2.4 การอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้น (Tail void grouting).....	10
2.2.5 ระบบนำทางของหัวเจาะ (Guidance system).....	13
2.3 การสูญเสียมวลดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล.....	15
2.3.1 การสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะ (Face loss).....	15
2.3.2 การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ (Over-cutting).....	16
2.3.3 การสูญเสียมวลดินจากการก้มหรือเียงหัวเจาะ (Pitching loss).....	17
2.3.4 การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน (Ground disturbance).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5 การสูญเสียมวลดินจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่างส่วนหางของหัวเจาะ (Tail void closure).....	18
2.4 กลไกการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ และประเมินความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมาในอดีต.....	20
2.5 หลักวิธีการพยากรณ์การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์.....	23
2.6 วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) เพื่อการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project).....	24
2.6.1 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	25
2.6.2 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project).....	29
2.6.2.1 กรณีที่ 1 เรียนรู้จากข้อมูลในแต่ละส่วนเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนเดียวกัน.....	31
2.6.2.2 กรณีที่ 2 เรียนรู้จากข้อมูลในการก่อสร้างช่วงครึ่งทางแรกเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลัง.....	34
2.6.2.3 กรณีที่ 3 เรียนรู้จากข้อมูลของทั้งโครงการเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้าง.....	37
บทที่ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน.....	41
3.1 กล่าวนำ.....	41
3.2 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry).....	42
3.2.1 ความลึกของอุโมงค์ (Tunnel depth).....	42
3.2.2 ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station).....	43
3.2.3 เส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ (Tunnel diameter).....	45
3.3 สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions).....	46
3.4 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors).....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1 ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure).....	49
3.4.2 ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate).....	52
3.4.3 มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle).....	54
3.4.4 คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting quality).....	56
บทที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียม.....	61
4.1 กล่าวนำ.....	61
4.2 ระบบประสาทของสิ่งมีชีวิตและเซลล์ประสาทเทียม.....	61
4.3 รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม.....	63
4.3.1 โครงข่ายแบบไปข้างหน้า (Feedforward network).....	63
4.3.1 โครงข่ายแบบส่งค่ากลับ (Recurrent network).....	64
4.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า.....	65
4.5 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	68
4.5.1 การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised learning).....	68
4.5.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised learning).....	69
4.6 การเรียนรู้ด้วยกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ (Feedforward back-propagation).....	69
4.7 ชั้นแฝงของโครงข่ายประสาทเทียม.....	71
4.8 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training set).....	72
4.9 ปัญหาการคำนวณมากเกินไป (Overfitting).....	73
บทที่ 5 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	74
5.1 กล่าวนำ.....	74
5.2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานคร.....	74
5.2.1 โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project).....	74
5.2.2 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่ แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project).....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดิน.....	78
5.3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลลักษณะทั่วไปของอุโมงค์.....	79
5.3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยา.....	79
5.3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลการควบคุมหัวเจาะ.....	79
5.3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวผิวดิน.....	84
5.4 การสร้างระบบฐานข้อมูลรายละเอียด.....	87
5.4.1 ฐานข้อมูล โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project database).....	87
5.4.2 ฐานข้อมูล โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าว ลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project database).....	89
5.5 เปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดิน ของทั้ง 2 โครงการ.....	89
5.6 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	93
5.6.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูล (Input layer) ของโครงข่าย.....	93
5.6.2 การแบ่งข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training data) และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing data).....	95
5.6.3 การ Normalization ข้อมูล.....	96
5.6.4 การหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	97
บทที่ 6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว.....	100
6.1 กล่าวนำ.....	100
6.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว โดยสัมพันธ์กับ.....	100
6.2.1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในทุกสภาพทางธรณีวิทยา.....	101
6.2.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของฝูวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	104
6.2.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของฝูวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย.....	105
6.2.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของฝูวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินทราย.....	107
บทที่ 7 การทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	115
7.1 กล่าวนำ.....	115
7.2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดิน โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	115
7.2.1 กรณีศึกษาที่ 1 เรียนรู้ข้อมูลในทุกส่วนก่อสร้างเพื่อพยากรณ์ การทรุดตัวของฝูวดิน ในทุกส่วนก่อสร้าง.....	117
7.2.2 กรณีศึกษาที่ 2 เรียนรู้ข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกันเพื่อพยากรณ์ การทรุดตัวของฝูวดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน.....	122
7.2.2.1 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดินในการก่อสร้าง อุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง.....	124
7.2.2.2 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดินในการก่อสร้าง อุโมงค์ในชั้น ดินเหนียวแข็ง.....	128
7.2.2.3 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดินในการก่อสร้าง อุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย.....	132
7.2.2.4 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดินในการก่อสร้าง อุโมงค์ในชั้นดินทราย.....	136
7.2.3 กรณีศึกษาที่ 3 พยากรณ์การทรุดตัวของฝูวดินในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียว แข็ง เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว.....	143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.2.4	กรณีศึกษาที่ 4 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินเหนียวแข็ง เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว.....	148
7.2.5	กรณีศึกษาที่ 5 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว.....	152
7.2.6	กรณีศึกษาที่ 6 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินทราย เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว.....	156
บทที่ 8	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	160
8.1	รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม.....	160
8.2	ประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	161
8.3	ข้อเสนอแนะ.....	163
เอกสารอ้างอิง.....		165
ภาคผนวก.....		169
ประวัติผู้เขียน.....		176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อได้เปรียบทั่วไประหว่างหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลและหัวเจาะแบบอื่น.....6
2.2	รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากวิธีการลองผิดลองถูก.....26
2.3	โครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน..... 28
2.4	กรณีศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวของดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม..... 31
3.1	ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน..... 41
4.1	ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)..... 67
5.1	ตัวอย่างของข้อมูลในโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล..... 88
5.2	ตัวอย่างของข้อมูลในโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าว ลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา..... 89
5.3	เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะ..... 90
5.4	ปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ..... 94
5.5	ปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์ การทรุดตัวของผิวดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน..... 95
5.6	รายละเอียดในการแบ่งข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training data) และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing data)..... 96
5.7	รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากวิธีการลองผิดลองถูก..... 99
6.1	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในทุกสภาพทางธรณีวิทยา..... 101
6.2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง..... 103
6.3	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง..... 104
6.4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย..... 106
6.5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินทราย..... 107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของอาคารก่อสร้างอุโมงค์ ในสภาพดินต่างๆ.....110
7.1	กรณีศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....116
7.2	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ.....119
7.3	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง.....125
7.4	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....129
7.5	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย.....133
7.6	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินทรายเฉพาะข้อมูลจากโครงการรถไฟใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล.....137
7.7	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ.....141
7.8	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์.....146
7.9	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์.....150
7.10	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะขุดเจาะ.....154
7.11	แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ ในชั้นดินทรายที่ไม่มีควมดันของการฉีดน้ำปูน.....158
8.1	ผลของค่า RMSE จากการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลโดยบริษัท Sato Kogyo..... 5
2.2	สายพานลำเลียงดินที่ขุดออกจากเกลียวหมุนลำเลียงดิน.....7
2.3	ท่อสูบลำเลียงดินเชื่อมต่อ โดยตรงกับเกลียวหมุนลำเลียงดิน.....7
2.4	รูดรางลำเลียงดินที่ขุดออกจากอุโมงค์.....8
2.5	ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล.....9
2.6	การเชื่อมต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ด้วยสลักเกลียวโค้ง.....10
2.7	ส่วนปิดผิวบริเวณด้านท้ายหัวเจาะด้วยแปรงลวดเหล็ก (Wire brush).....12
2.8	การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์.....12
2.9	การอัดฉีดน้ำปูน โดยการผสมวัสดุ A และ B เข้าด้วยกัน..... 13
2.10	ส่วนประกอบของระบบนำทาง..... 14
2.11	การสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะ.....16
2.12	การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ..... 16
2.13	การสูญเสียมวลดินจากการกัมหรือเงยหัวเจาะ..... 17
2.14	การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน.....17
2.15	การสูญเสียมวลดินจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่างส่วนหางของหัวเจาะ.....18
2.16	การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินที่เป็นลักษณะการทรุดตัวของผิวดิน แบบร่องตัวยู..... 19
2.17	การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินที่เป็นลักษณะ การปูดหรืออูดขึ้น (Heave) ของผิวดิน..... 19
2.18	แผนภาพแสดงรูปตัดการทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์.....20
2.19	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing)..... 28
2.20	รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจาก การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล..... 30
2.21	ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง A..... 32
2.22	ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง B..... 33
2.23	ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง C.....33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง D.....	34
2.25 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง A.....	35
2.26 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง B.....	35
2.27 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง C.....	36
2.28 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง D.....	36
2.29 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้าง.....	38
2.30 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้างโดยเพิ่มปัจจัยชนิดของหัวเจาะ...38	
2.31 การก่อสร้างอุโมงค์แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	40
3.1 รายละเอียดลักษณะทั่วไปของอุโมงค์.....	42
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA.....	43
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA.....	44
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA.....	45
3.5 รายละเอียดปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยา.....	46
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพทางธรณีวิทยาและค่าการทรุดตัวของผิวดิน ของโครงการ MRTA.....	47
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA.....	48
3.8 ความดันน้ำในโพรงดิน (Pore water pressure) โดยทั่วไปของกรุงเทพฯ.....	49
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA.....	51
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดิน แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	51
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดิน แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	53
3.13 การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากมุมกัมหรือมุมเฉยของหัวเจาะ.....	54
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกัมหรือมุมเฉยของหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวของผิวดินใน โครงการ MRTA และ BMA.....	55
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกัมหรือมุมเฉยของหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดิน แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	55
3.16 ช่องว่างที่เกิดขึ้นหลังผนังอุโมงค์ (Tail void).....	57
3.17 ความดันของการฉีดน้ำปูนและเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน.....	57
3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA.....	58
3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดิน แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	58
3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA.....	59
3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดิน แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	59
4.1 โครงสร้างเซลล์ประสาทชีวภาพ.....	62
4.2 โครงสร้างเซลล์ประสาทเทียม.....	63
4.3 โครงข่ายแบบไปข้างหน้าประเภท Multi-layer perceptron	64
4.4 โครงข่ายแบบส่งค่ากลับประเภท Hopfield.....	65
4.5 การประมวลผลของหน่วยย่อยในแต่ละชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า.....	66
4.6 แผนภาพการทำงานของการเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised learning).....	68
4.7 แผนภาพการทำงานของการเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised learning).....	69
4.8 แผนผังสัญญาณกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ (Feedforward back-propagation)....	69
4.9 โครงสร้างการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียม.....	70
4.10 ตัวอย่างขอบเขตข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training set) ที่มีประสิทธิภาพ.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	เส้นทางและการแบ่งส่วนก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล..... 75
5.2	สภาพชั้นดินของอุโมงค์สัญญาส่วนเหนือ..... 76
5.3	สภาพชั้นดินของของอุโมงค์สัญญาส่วนใต้..... 76
5.4	เส้นทางโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่ แม่น้ำเจ้าพระยา..... 77
5.5	สภาพชั้นดินโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่ แม่น้ำเจ้าพระยา..... 78
5.6	ข้อมูลความคืบหน้าหัวเจาะ โครงการ MRTA..... 80
5.7	ข้อมูลความเร็วขณะขุดเจาะโครงการ MRTA..... 80
5.8	ข้อมูลมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะโครงการ MRTA..... 81
5.9	ข้อมูลความคืบหน้าของการฉีดน้ำปูนโครงการ MRTA..... 81
5.10	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนโครงการ MRTA..... 81
5.11	ข้อมูลความคืบหน้าหัวเจาะโครงการ BMA..... 82
5.12	ข้อมูลความเร็วขณะขุดเจาะโครงการ BMA..... 82
5.13	ข้อมูลมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะโครงการ BMA..... 83
5.14	ข้อมูลความคืบหน้าของการฉีดน้ำปูนโครงการ BMA..... 83
5.15	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนโครงการ BMA..... 84
5.16	การติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวผิวดิน..... 85
5.17	แผนภาพแสดงรูปตัดการทรุดตัวผิวดินตามแนวยาวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์..... 87
5.18	เปรียบเทียบความคืบหน้าหัวเจาะ..... 91
5.19	เปรียบเทียบความเร็วขณะขุดเจาะ..... 91
5.20	เปรียบเทียบมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ..... 92
5.21	เปรียบเทียบความคืบหน้าของการฉีดน้ำปูน..... 92
5.22	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน..... 93
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความคืบหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดิน จากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพทางธรณีวิทยา..... 102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความคั่นหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง.....	103
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความคั่นหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	105
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความคั่นหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย.....	106
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย.....	108
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความคั่นหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย.....	108
6.7 แผนภูมิการกระจายตัวของเม็ดดินสัมพันธ์กับการเลือกใช้หัวเจาะ.....	111
6.8 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความลึกอุโมงค์ในแต่ละสภาพดิน.....	111
6.9 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะในแต่ละสภาพดิน.....	111
6.10 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของระดับน้ำใต้ดินในแต่ละสภาพดิน.....	112
6.11 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความคั่นหน้าหัวเจาะในแต่ละสภาพดิน.....	112
6.12 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความเร็วขณะขุดเจาะในแต่ละสภาพดิน.....	113
6.13 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะในแต่ละสภาพดิน.....	113
6.14 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความคั่นของการถีดน้ำปูนในแต่ละสภาพดิน.....	114
6.15 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนในแต่ละสภาพดิน.....	114
7.1 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ.....	118
7.2 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ.....	120
7.3 ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ.....	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4 ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกส่วนก่อสร้างของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล.....	121
7.5 การก่อสร้างอุโมงค์แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา.....	122
7.6 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทดัดเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเดียวกัน.....	123
7.7 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง.....	126
7.8 ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง.....	126
7.9 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งในส่วนความเร็วขณะขุดเจาะ และความดันของการฉีดน้ำปูน.....	127
7.10 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	130
7.11 ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง.....	130
7.12 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งในส่วนความลึกอุโมงค์ และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน.....	131
7.13 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งในส่วนความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ และความดันหน้าหัวเจาะ.....	132
7.14 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ชั้นทราย.....	134
7.15 ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย.....	134
7.16 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายในส่วนความลึกอุโมงค์ และความดันหน้าหัวเจาะ.....	135
7.17 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายในส่วนความดันของการฉีดน้ำปูน และมุมกัมมูเมงของหัวเจาะ.....	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.18	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย..... 138
7.19	ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายเฉพาะข้อมูลจาก โครงการรถไฟใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล..... 138
7.20	โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เพิ่มปัจจัยเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ในหน่วยย่อยของชั้นรับข้อมูล..... 140
7.21	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ..... 140
7.22	ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ..... 142
7.23	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง..... 143
7.24	โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์..... 145
7.25	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์..... 145
7.26	ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์..... 147
7.27	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง..... 148
7.28	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์..... 149
7.29	ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์..... 151
7.30	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย..... 152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

7.31	โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน ที่ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความเร็วขณะจุดเจาะ.....	153
7.32	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบ ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะจุดเจาะ.....	153
7.33	ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะจุดเจาะ.....	155
7.34	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูน และค่าการทรุดตัวผิวดินจากการ ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย.....	156
7.35	โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน ที่ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความดันของการฉีดน้ำปูน.....	157
7.36	ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบ ในชั้นดินทรายที่ไม่มีความดันของการฉีดน้ำปูน.....	157
7.37	ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ในชั้นดินทรายที่ไม่มีความดันของการฉีดน้ำปูน.....	159

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

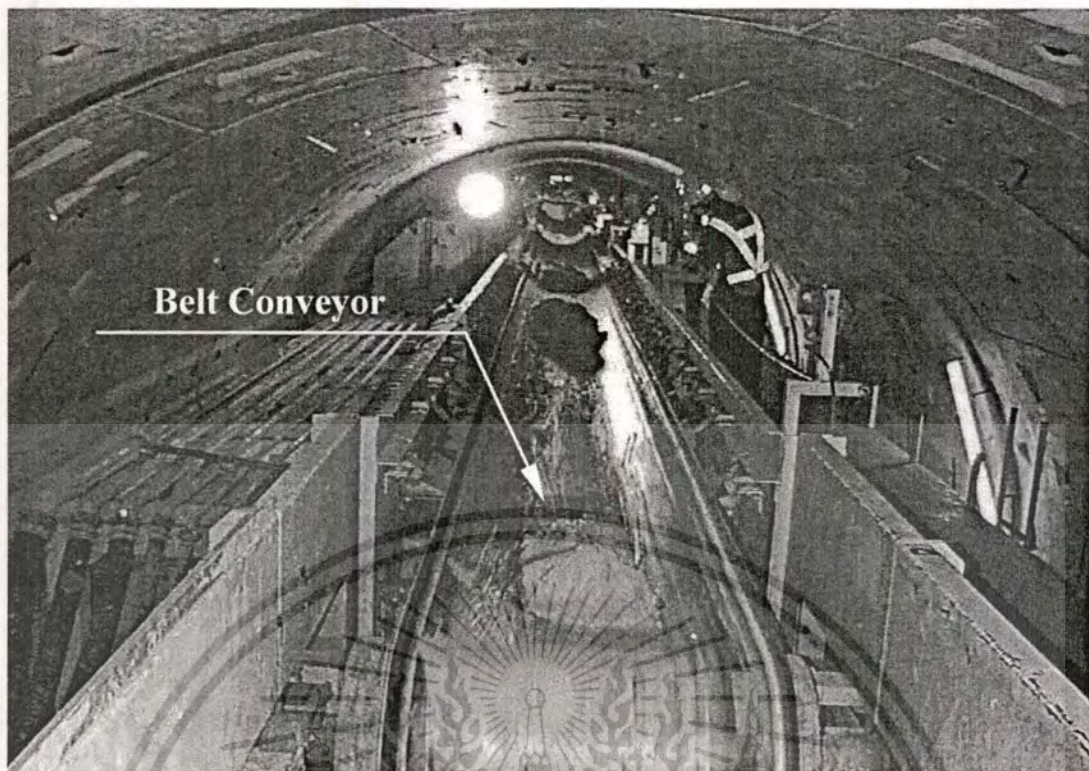
กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงของประเทศไทยที่มีความเจริญพร้อมในทุกๆด้าน แต่ความเจริญของเมืองหลวงก็ต้องมาควบคู่กับปัญหาทางด้านต่างๆด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาทางด้านการจราจรที่มีความหนาแน่นเป็นอย่างมาก รวมทั้ง ปัจจัยทางด้านของราคาน้ำมันในปัจจุบันที่มีราคาสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ ระบบขนส่งมวลชนจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้ามามีบทบาทในการแก้ไขปัญหาให้กับประชาชนได้มีทางเลือกในการเดินทางมากยิ่งขึ้น จึงนำมาสู่การก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งถือว่าเป็นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่และใช้งบประมาณมหาศาล แต่อย่างไรก็ตามการจะทำการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินก็จะพบกับปัญหาที่สำคัญในงานก่อสร้าง นั่นก็คือ การสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ซึ่งจะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดิน ส่งผลกระทบเสียหายต่ออาคารข้างเคียงตลอดแนวเส้นทางที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์

ในปัจจุบันยังคงไม่มีวิธีการใดที่สามารถพยากรณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น ขนาดของอุโมงค์ ความลึกของระดับอุโมงค์ คุณสมบัติของดิน พารามิเตอร์ควบคุมหัวเจาะ เป็นต้น ซึ่งทุกปัจจัยล้วนแต่มีความสัมพันธ์กับปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน ทำให้เกิดความซับซ้อนจนยากแก่การพยากรณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้น จึงควรมีการหาวิธีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว ไปสู่ค่าการทรุดตัวของผิวดินที่มีความถูกต้อง แม่นยำ เพื่อที่จะนำไปป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งปลูกสร้างเหนือบริเวณที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

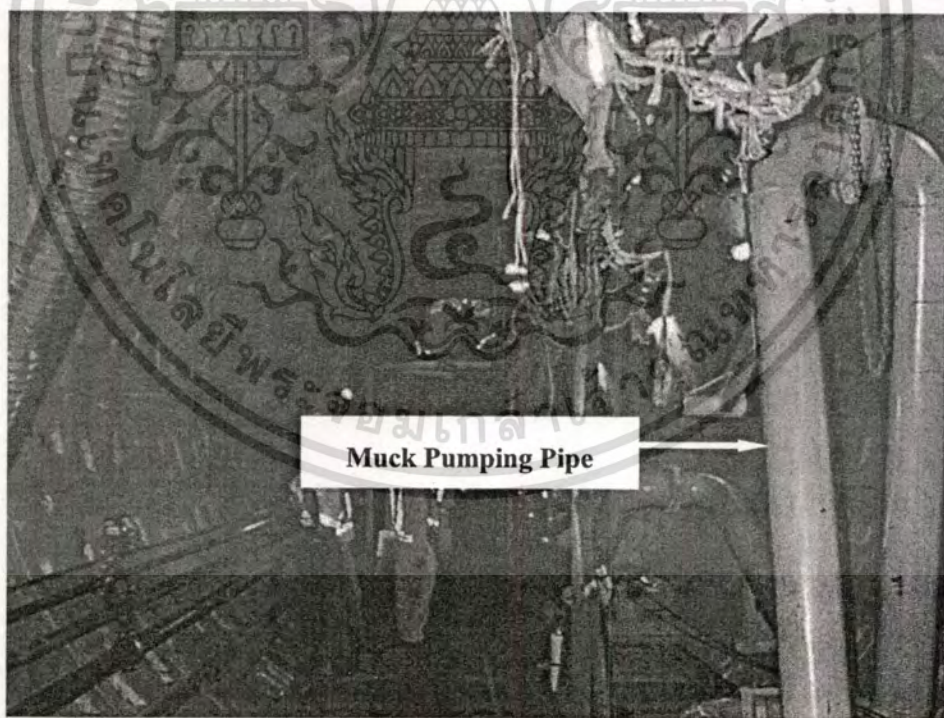
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield, EPB shield) ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น และนำโครงข่ายประสาทเทียมมาศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแยกตามสภาพทางธรณีวิทยา ว่าปัจจัยใดที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะมีความสำคัญต่อค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถที่จะสรุปรายละเอียดของวัตถุประสงค์ได้ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สายพานลำเลียงดินที่ขุดออกจากเกลียวหมุนลำเลียงดิน



รูปที่ 2.3 ท่อสูบลำเลียงดินเชื่อมต่อโดยตรงกับเกลียวหมุนลำเลียงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รรรางลำเลียงดินที่ขุดออกจากอุโมงค์

ความดันที่กำหนดจะใช้เป็นปัจจัยควบคุมในระหว่างการขุดเจาะ ซึ่งการปฏิบัติการของหัวเจาะจะถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการของหัวเจาะอยู่ภายใต้การควบคุมของความดันที่กำหนด นอกจากนี้ ผลการปฏิบัติการของหัวเจาะภายในห้องควบคุมก็จะต้องมีการติดตามปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอื่นในขณะที่การขุดเจาะเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ กรณีที่ใช้วิธีท่อสูบในการลำเลียงดินออกจะมีประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา อันเนื่องมาจากท่อสูบลำเลียงดินจะถูกเชื่อมต่อโดยตรงกับเกลียวหมุนลำเลียงดิน ความเร็วในการลำเลียงดินผ่านท่อสูบจะต้องสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการอุดตันเนื่องจากตะกอนดิน และก็จะต้องไม่สูงเกินไปที่จะทำให้ท่อสีก แต่เนื่องด้วยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล อัตราของการลำเลียงดินจะต้องมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับความดันที่ถูกควบคุมบริเวณส่วนหน้าของห้องกักดิน โดยการปฏิบัติการของหัวเจาะจะต้องทำการรักษาสมดุลของอัตราการลำเลียงดินและการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะเพื่อที่จะควบคุมความดันหน้าหัวเจาะตามที่กำหนด

โดยปกติ การขุดเจาะและการเคลื่อนไปด้านหน้าของหัวเจาะจะเกิดขึ้นพร้อมกัน เมื่อหัวไบพัตต์ด้านหน้าหัวเจาะเริ่มทำการหมุนตัดดิน แม่แรงไฮดรอลิกด้านหลังหัวเจาะก็จะยืดออกและดันด้านกับผนังอุโมงค์เพื่อผลักดันให้หัวเจาะเคลื่อนต่อไปข้างหน้า ยกตัวอย่างเช่น ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project) แรงของแม่แรงหัวเจาะหรือแรงผลักดันจะอยู่ที่ระหว่าง 600 ถึง 1000 ตัน และระยะยืด (Stroke) ของแม่แรงอยู่ที่ 1.60 เมตร อย่างไรก็ตามการควบคุมของตำแหน่งที่ตั้ง การเบี่ยงเบนทางแนวราบและแนวตั้ง และการวางแนวก็มีความจำเป็นในตลอดการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะ โดยปัจจัยเหล่านี้ก็จะถูกบันทึกไว้ในขณะทำการขุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ผนังอุโมงค์ (Tunnel lining)

ผนังอุโมงค์มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ โดยที่จะทำการติดตั้งบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ผนังอุโมงค์ที่เป็นระบบแบบ One-pass เป็นระบบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขในการรักษาเสถียรภาพของการก่อสร้าง และใช้เป็นผนังอุโมงค์ถาวรในส่วนเดียวกัน โดยรูปที่ 2.5 แสดงผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลที่เป็นระบบแบบ One-pass ในส่วนผนังอุโมงค์ที่เป็นระบบแบบ Two-pass จะประกอบด้วยผนังอุโมงค์ชั่วคราวที่ติดตั้งขึ้นเพื่อเสถียรภาพในการก่อสร้างเท่านั้น แล้วหลังจากนั้นจึงทำการติดตั้งผนังอุโมงค์ถาวร โดยทั่วไป ผนังอุโมงค์ที่ประกอบกันเป็นอุโมงค์จะมีขนาดเล็กกว่าหัวเจาะ เพราะว่าการติดตั้งจะเกิดขึ้นภายในส่วนท้ายของหัวเจาะ ดังนั้น ช่องว่างที่เกิดขึ้นโดยรอบจะถูกเติมเต็มด้วยการฉีดน้ำปูน ในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินเปียก ผนังอุโมงค์จะถูกยึดด้วยสลักเข้าหากันเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ตรงกันข้ามในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินแห้ง ผนังอุโมงค์อาจจะไม่จำเป็นต้องยึดเข้าหากันด้วยสลัก

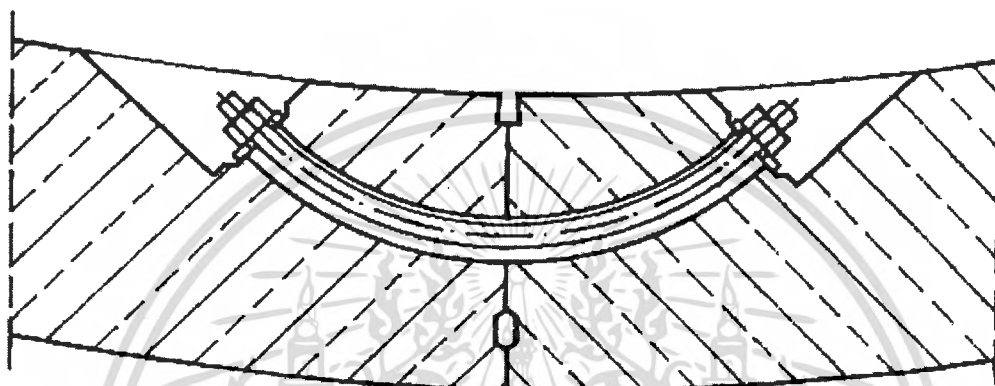


รูปที่ 2.5 ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

2.2.3 การติดตั้งผนังอุโมงค์ (Segment erection)

ผนังอุโมงค์จะถูกแบ่งเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งเรียกว่า “ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์” โดยการติดตั้งจะเกิดขึ้นที่ส่วนท้ายของหัวเจาะ ยกตัวอย่างในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะมีความยาว 1.2 เมตร ตลอดแนวแกนอุโมงค์ และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก 6 ชิ้นส่วน สำหรับอุโมงค์ในสัญญาส่วนใต้ และชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก 7 ชิ้นส่วน สำหรับอุโมงค์ในสัญญาส่วนเหนือ โดยที่ในทั้งสองสัญญาจะรวมชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่เป็นรูปลิ้ม (K-segment) ด้วย และในแต่ละชิ้นส่วนจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสลักเกลียวโค้ง (Curve bolt) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ภายหลังจากติดตั้งหนึ่งวงรอบผนังอุโมงค์เสร็จสิ้นลงการตรวจสอบตำแหน่งจะต้องทำในทุกครั้งเพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ด้วยสลักเกลียวโค้ง

2.2.4 การอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้น (Tail void grouting)

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์อันเนื่องมาจาก 1) ผิวของหัวเจาะจะต้องซ้อนกับแนวอุโมงค์เพื่อให้การประกอบผนังอุโมงค์เกิดขึ้นได้ในบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ และ 2) จะต้องมีช่องว่างระหว่างบริเวณผิวด้านนอกผนังอุโมงค์และบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะ เพื่อที่จะทำให้หัวเจาะสามารถขุดเจาะอุโมงค์เป็นแนวโค้ง และแก้ไขการวางแนวที่ผิดพลาดให้ทำขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้เกิดช่องว่างโดยรอบผนังอุโมงค์ขณะที่หัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้า นำมาซึ่งการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อปิดช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินเข้าสู่อุโมงค์

ที่บริเวณด้านท้ายหัวเจาะจะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายเพื่อป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดิน ดินโดยรอบ และน้ำปูนจากการอัดฉีดเพื่ออุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ ส่วนปิดผิวด้านท้ายหัวเจาะจะแยกออกมาจากส่วนท้ายหัวเจาะ และถูกออกแบบขึ้นเพื่อปิดรอยต่อระหว่างส่วนท้ายและผนังอุโมงค์เพื่อให้สามารถที่จะทนต่อแรงดันดิน แรงดันน้ำ และแรงดันน้ำปูนที่ค่อนข้างสูงดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนปิดผิวด้านท้ายในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลคือ แปรงลวดเหล็ก (Wire brush) ที่ได้ทำการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่น โดยหัวเจาะ Kawasaki และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Herrenknecht ที่ใช้ในโครงการนี้จะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายที่เป็นแปรงลวดเหล็กจำนวน 3 แถว ช่องว่างในแต่ละแถวจะมีน้ำมันหล่อลื่นความดันสูงบรรจุอยู่เพื่อป้องกันน้ำ ดินหรือน้ำปูนจากการแทรกซึมเข้ามาสู่พื้นที่ปิดผิวด้านท้าย

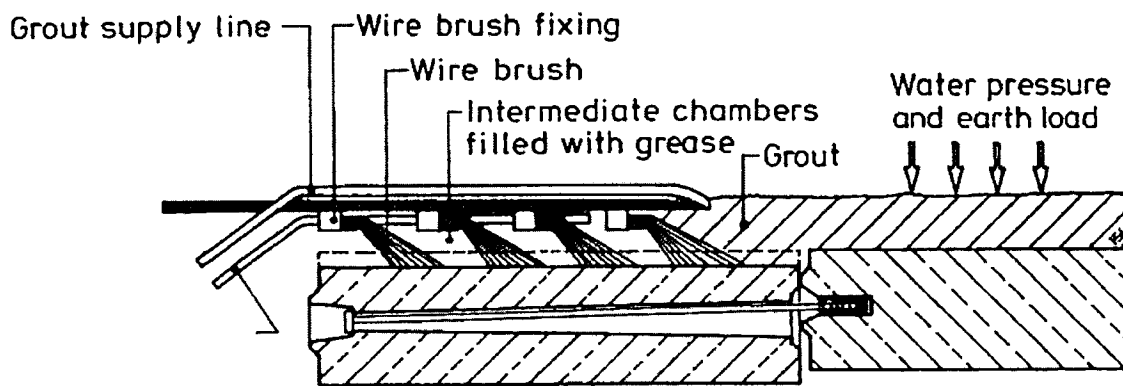
น้ำปูนจะทำการฉีดพ่นผ่านรูของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ในระหว่างการฉีดพ่น น้ำปูนจะถูกฉีดพ่นจากบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์เพื่อที่จะทำให้น้ำปูนสามารถเคลื่อนที่ปิดช่องว่าง โดยรอบผนังอุโมงค์ด้วยแรงดันของการฉีดพ่นที่สูง และแรงโน้มถ่วงของตัวน้ำปูนเอง การฉีดพ่นจะถูกทำอย่างต่อเนื่องด้วยแรงดันที่สูงในช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ สิ่งที่ควบคุมการฉีดพ่นนอกเหนือไปจากปริมาณของน้ำปูนก็คือ ความดันในการอัดฉีดน้ำปูน ซึ่งจะทำการตรวจวัดค่าจากภายในท่อน้ำปูนหรือจากแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ค่าความดันดังกล่าวจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 3 บาร์ (300 กิโลปาสกาล) ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่สามารถรับได้ ด้วยความดันในการฉีดพ่นที่สูงทำให้ช่องว่างรอบอุโมงค์ถูกเติมเต็มภายในระยะเวลาอันสั้น และสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณด้านท้ายหัวเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ การติดตามตรวจวัดปริมาณและความดันในการอัดฉีดน้ำปูนจะถูกบันทึกค่าไว้ในทุกรอบของการขุดเจาะ

ปริมาณของน้ำปูนที่ฉีดพ่นเพื่อปิดช่องว่างจะถูกควบคุมเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ช่องว่างทั้งหมดนั้นถูกเติมเต็มด้วยน้ำปูน ซึ่งปริมาณของน้ำปูนจะทำการกำหนดด้วยเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนสามารถคำนวณได้จาก

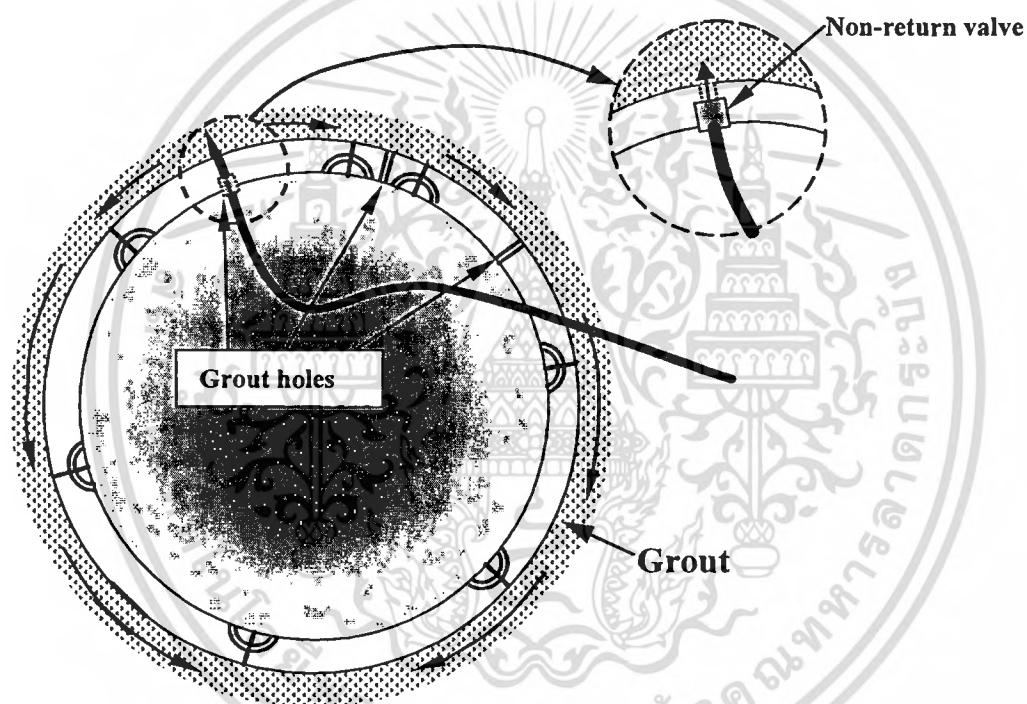
$$\text{เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำปูน}}{\text{ปริมาตรช่องว่างรอบผนังอุโมงค์}} \times 100$$

ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล น้ำปูนจะเกิดจากการผสมกันระหว่างวัสดุ A และวัสดุ B โดยวัสดุ A ประกอบด้วย ซีเมนต์ เบนโทไนท์ และน้ำ วัสดุ B เป็นของเหลวที่ใช้เร่งปฏิกิริยาในการแข็งตัวของน้ำปูน (โซเดียมซิลิเกต) ที่บริเวณส่วนท้ายหัวเจาะ วัสดุ A และ B จะผสมกันก่อนที่จะถูกฉีดพ่นเข้าสู่รูของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ (พอดีกับวาล์วพลาสติกที่ไม่หมุนคืน) แสดงไว้ในรูปที่ 2.9

โดยทั่วไป การอัดฉีดน้ำปูนหลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์แล้วเสร็จที่เรียกว่า การอัดฉีดน้ำปูนหลัก (Primary grouting) ยังต้องมีการอัดฉีดน้ำปูนอีกครั้งเป็นครั้งที่สองที่เรียกว่า การอัดฉีดน้ำปูนรอง (Secondary grouting) ที่ใช้สำหรับอุดช่องว่างที่ยังเหลืออยู่รอบผนังอุโมงค์และเพื่อความแน่นอนว่าการอัดฉีดน้ำปูนครั้งแรกนั้นมีความเพียงพอ การอัดฉีดน้ำปูนครั้งที่สองจะถูกทำขึ้นเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไปแล้วประมาณ 40-120 เมตร ดังนั้น ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล การอัดฉีดน้ำปูนจะเสร็จสิ้นลงในเวลา 14 วันหลังจากการติดตั้งผนังอุโมงค์ ซึ่งความดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูนรองจะไม่มากเกินกว่า 3 บาร์

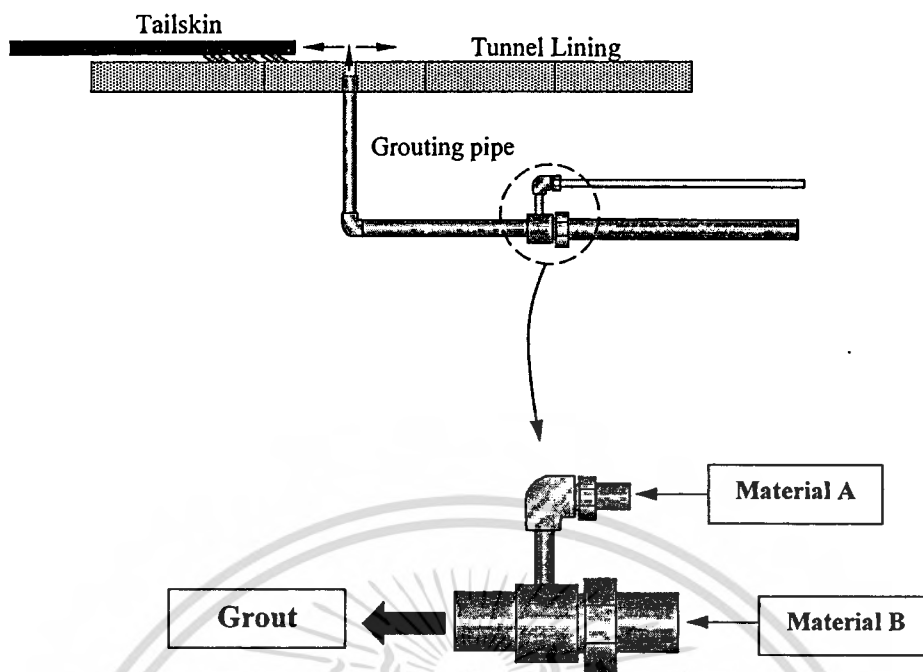


รูปที่ 2.7 ส่วนปิดผิวบริเวณด้านท้ายหัวเจาะด้วยแปรงลวดเหล็ก (Wire brush)



รูปที่ 2.8 การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



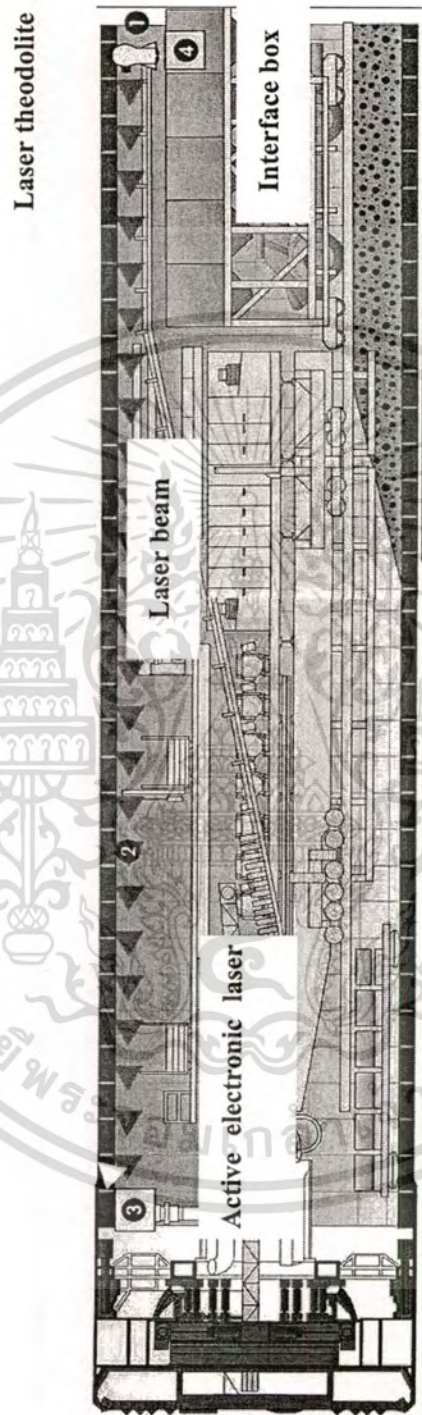
รูปที่ 2.9 การอัดฉีดน้ำปูน โดยการผสมวัสดุ A และ B เข้าด้วยกัน

2.2.5 ระบบนำทางของหัวเจาะ (Guidance system)

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะจะไม่สามารถขุดเจาะตามแนวอุโมงค์ที่วางไว้ได้หากปราศจากความชัดเจนของแนวเส้นทางที่ถูกต้อง ผู้ควบคุมหัวเจาะจึงมีความจำเป็นที่จะต้องได้รับข้อมูลตำแหน่งของหัวเจาะตลอดเวลาที่อยู่ภายในห้องควบคุม เพื่อการวางแผนงานให้การขุดเจาะที่กำลังจะดำเนินต่อไปอยู่ในแนวเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งการวางแผนเส้นทางอุโมงค์ที่แม่นยำจะต้องคำนึงถึงการควบคุมแนวอุโมงค์ การควบคุมหัวเจาะ การสำรวจ และระบบนำทางที่มีประสิทธิภาพ

ระบบการสำรวจและนำทางในปัจจุบันสามารถติดตามตำแหน่งของหัวเจาะได้อย่างต่อเนื่อง โดยรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบระบบนำทางของหัวเจาะ นอกจากนี้ การควบคุมทิศทางด้วยแสงเลเซอร์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นแสงเลเซอร์แบบลำแสงเดี่ยวหรือเครื่องมือที่ติดตั้งเลเซอร์ โดยเครื่องมือที่ติดตั้งเลเซอร์จะติดตั้งขนานไปกับแกนหัวเจาะในช่องสำหรับการสำรวจเพื่อให้เป็นอิสระจากความยาวทั้งหมดของหัวเจาะรวมไปถึงระบบสำรวจ ในการกำหนดตำแหน่งของหัวเจาะด้วยลำแสงเลเซอร์ ระบบการกำหนดเป้าหมายจะถูกติดตั้งไว้กับหัวเจาะเพื่อหาตำแหน่งที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ ข้อมูลที่ถูกป้อนกลับไปจะอยู่ในรูปของพิกัดแนวนอนและแนวตั้งที่ระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งตั้งอยู่ที่ผู้ทำการควบคุมเครื่อง ระบบนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกในการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ อย่างไรก็ตาม ระบบการสำรวจและระบบการ

นำทางหัวเจาะยังคงต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อช่วยในการควบคุมหัวเจาะให้สามารถก่อสร้างอุโมงค์ให้ถูกต้องตามแนวที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของระบบนำทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การสูญเสียมวลดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล

การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการใดๆ ในดินอ่อนพบว่า ดินจะมีการเคลื่อนตัวเข้าไปสู่พื้นที่เปิด อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน (Stress relief) เกิดขึ้น ยิ่งไปกว่านี้ หากทำการก่อสร้างอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ก็จะทำให้เกิดการไหลเข้าของน้ำมาสู่พื้นที่เปิดเช่นเดียวกัน การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการก่อสร้างอุโมงค์ที่นำมาใช้ โดยวัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้นี้จะนำเสนอถึงหลักพื้นฐานของการเคลื่อนตัวของดินจากวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล เพื่อที่จะได้ศึกษาถึงที่มาของการทรุดตัวของผิวดินจากการเคลื่อนตัวของดินดังกล่าว

โดยทั่วไปการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อนจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน 2 ประเภท คือ

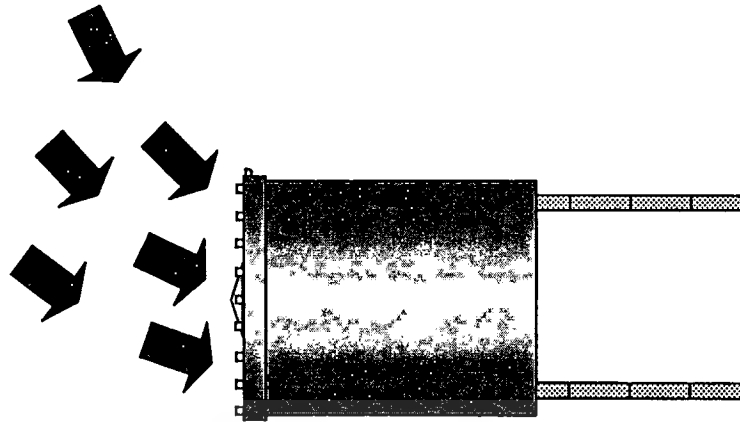
1) การเคลื่อนตัวของดินในขณะที่ทำการก่อสร้าง (Short-term deformation) เป็นการเคลื่อนตัวของดินที่มีสาเหตุโดยตรงมาจาก “การสูญเสียมวลดิน” (Ground loss) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในปริมาณที่มากและอันตรายที่สุด และทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินที่เรียกว่า “การทรุดตัวทันที” (Immediate settlement)

2) การเคลื่อนตัวของดินในระยะยาวหรือหลังจากทำการก่อสร้าง (Long-term deformation) มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) และสภาพทางธรณีวิทยาโดยรอบอุโมงค์ที่ทำการก่อสร้าง หรือที่เรียกว่า “การทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัวของดิน” (Consolidation settlement)

ในงานวิจัยนี้ การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจะพิจารณาเฉพาะ “การทรุดตัวทันที” (Immediate settlement) ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของดินในขณะที่ทำการก่อสร้างที่มีสาเหตุโดยตรงมาจาก “การสูญเสียมวลดิน” (Ground loss) เท่านั้น โดยการสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 5 กรณี ดังต่อไปนี้ [2]

2.3.1 การสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะ (Face loss)

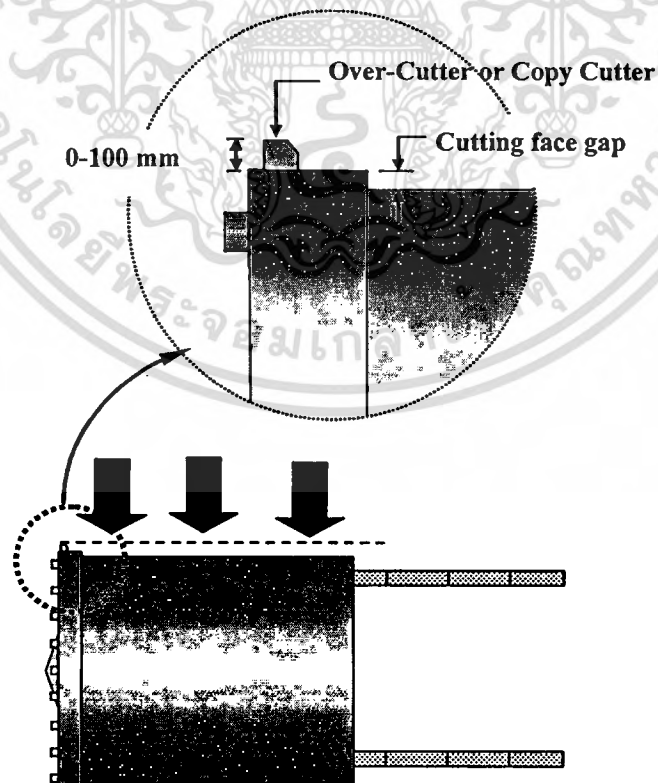
การสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะมีสาเหตุมาจากการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้หัวเจาะอุโมงค์แบบหน้าเปิด (Open-faced shield) หรือในกรณีที่หัวเจาะทำการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ที่ต่ำ ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินเข้ามาทางด้านหน้าของหัวเจาะ แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ในกรณีที่เกิดการสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะจะทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างปริมาตรดินและปริมาตรหัวเจาะ (มีการสูญเสียปริมาตรดินที่มากกว่า) อีกทั้งการสูญเสียมวลดินในลักษณะนี้ยังพบได้ชัดเจนกรณีการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย เนื่องจากธรรมชาติของดินทรายมีระยะเวลาการคงตัว (Stand-up time) ที่น้อยกว่า รวมทั้งแรงดันน้ำใต้ดินที่สูงในชั้นดินทรายก็ส่งผลเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.11 การสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะ

2.3.2 การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ (Over-cutting)

การขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงทางโค้ง หัวเจาะจำเป็นต้องตัดดินเกินเส้นรอบวงเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเสียวให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ใบตัด (Copy cutter) ที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่จะติดตั้งอยู่บริเวณส่วนหน้าหัวเจาะ สามารถยึดหัดได้โดยมีช่วงระยะอยู่ที่ 0 ถึง 100 มม. แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ดังนั้นดินโดยรอบจะเคลื่อนตัวเข้าหาช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการตัดดินเพื่อเพิ่มพื้นที่

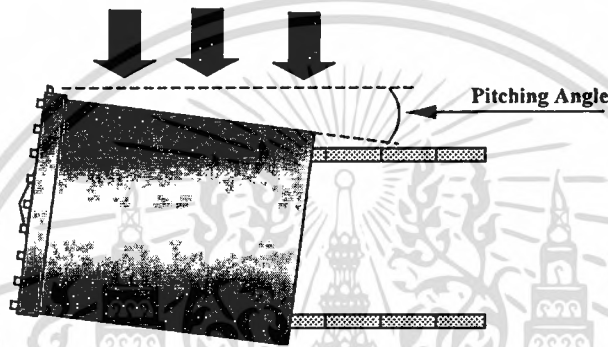


รูปที่ 2.12 การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การสูญเสียมวลดินจากการก้มหรือเงยหัวเจาะ (Pitching loss)

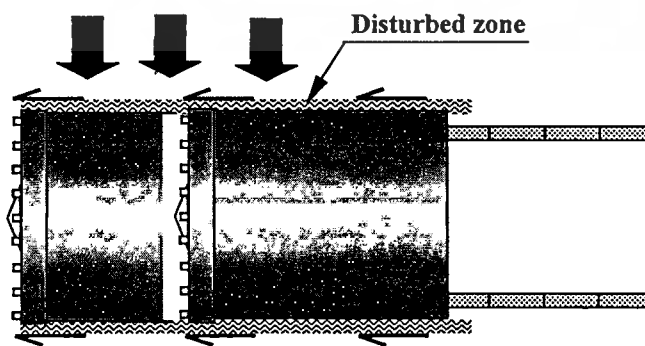
หัวเจาะต้องเคลื่อนตัวไปข้างหน้าตามแนวอุโมงค์ที่ได้ออกแบบไว้ แต่อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะควบคุมแนวระดับของหัวเจาะให้มีมุมก้มหรือมุมเงยคงที่ตลอดเวลา (มีมุม 0 องศา) ด้วยเหตุนี้ หากเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมก้มหรือมุมเงยจะทำให้พื้นที่หน้าตัดขณะทำการขุดเจาะมีรูปร่างลักษณะเป็นวงรีที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะที่เป็นวงกลมแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินขึ้น และกรณีที่หัวเจาะมีความยาวมากสามารถคาดคะเนได้ว่าจะเกิดช่องว่างที่มีขนาดใหญ่เหนือหัวเจาะมากกว่าหัวเจาะที่มีความยาวน้อยกว่า



รูปที่ 2.13 การสูญเสียมวลดินจากการก้มหรือเงยหัวเจาะ

2.3.4 การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน (Ground disturbance)

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างดินเดิมหรือรบกวนสภาพดินอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ทำให้เกิดการทำลายคุณสมบัติของดินและเกิดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบหัวเจาะเข้าสู่อุโมงค์ ยิ่งหัวเจาะมีขนาดใหญ่มากเท่าไรก็ยิ่งรบกวนสภาพดินมากขึ้นเท่านั้น

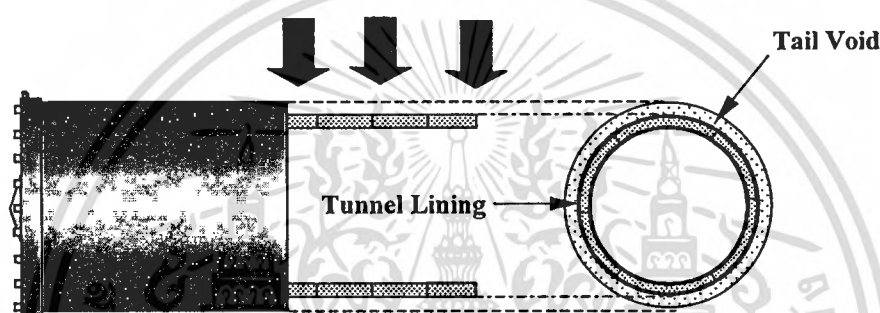


รูปที่ 2.14 การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงในสื่อออนไลน์ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 การสูญเสียมวลดินจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่างส่วนหางของหัวเจาะ (Tail void closure)

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยหัวเจาะจะเกิดช่องว่างขึ้นบริเวณส่วนหางของหัวเจาะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 อันเนื่องมาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวอุโมงค์ เพื่อให้มีพื้นที่ในการติดตั้งผนังอุโมงค์ภายในหัวเจาะ ดังนั้น หากไม่หาวิธีการป้องกันจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินโดยรอบอุโมงค์เพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว ในปัจจุบันการแก้ไขจะใช้วิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) ที่มีแรงดันสูงเพื่อปิดช่องว่างที่เกิดขึ้น หรือการใช้ผนังอุโมงค์แบบขยายตัว (Expanding lining) เพื่อป้องกันการแทนที่ของดินบริเวณช่องว่างนั้น

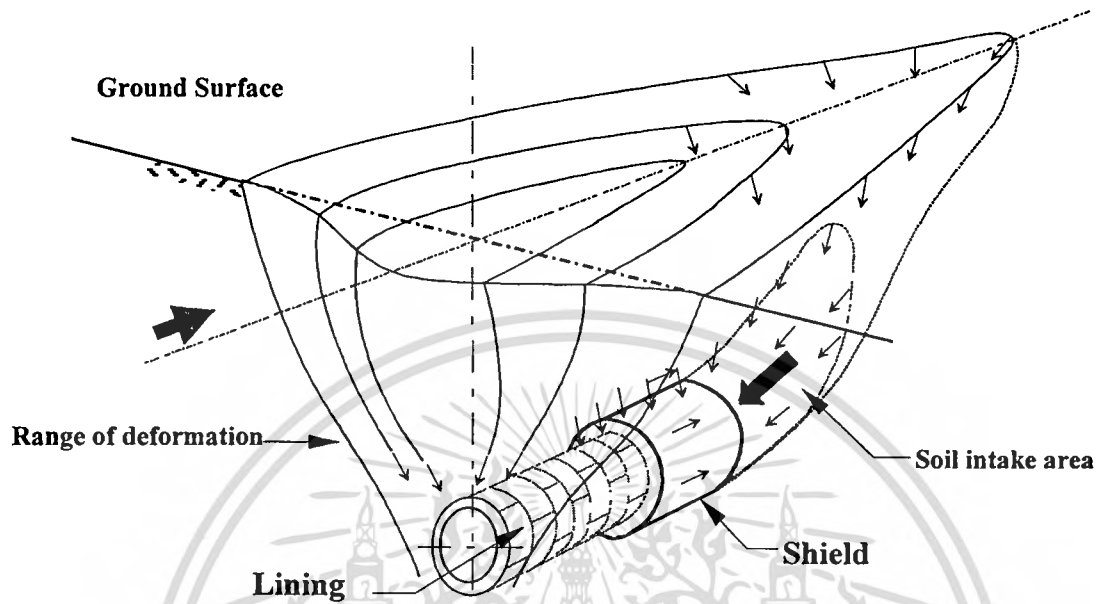


รูปที่ 2.15 การสูญเสียมวลดินจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่างส่วนหางของหัวเจาะ

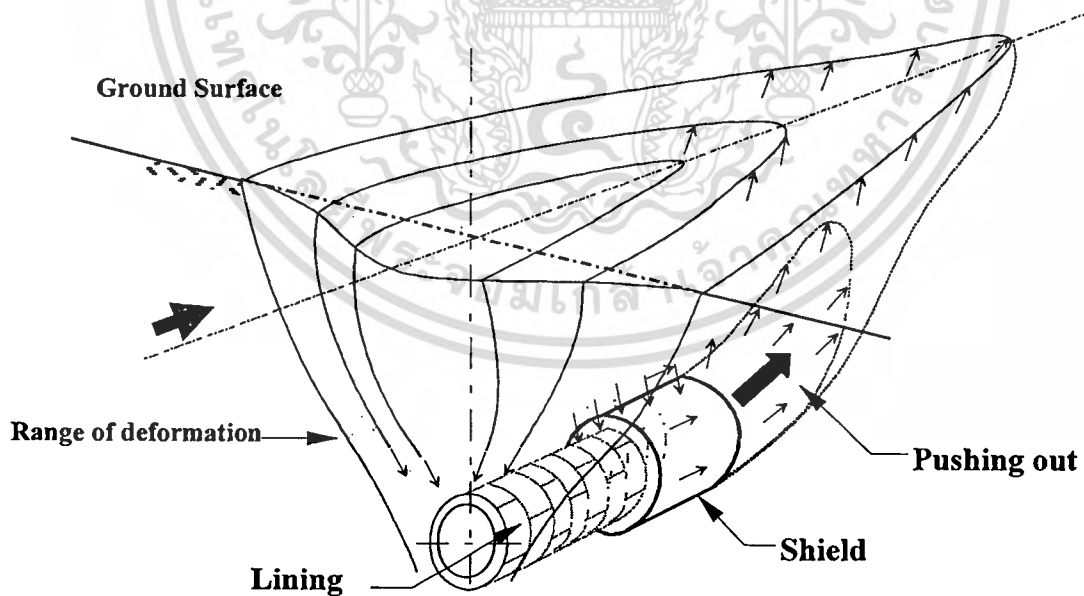
การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะทั้ง 5 กรณีที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเกิดขึ้นในปริมาณที่มากน้อยเพียงใดก็จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียมวลดิน ได้แก่ สภาพทางธรณีวิทยา วิธีการก่อสร้าง และปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ ซึ่งในส่วนของปัจจัยการควบคุมหัวเจาะก็จะต้องคำนึงถึงการควบคุมความดันบริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะ การควบคุมแนวเส้นทางของหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ และท้ายที่สุดก็คือคุณภาพของผู้ปฏิบัติงาน ทั้งหมดนี้ล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้การสูญเสียมวลดินที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลนั้น การสูญเสียมวลดินที่เกิดขึ้นจะแสดงให้เห็นชัดเจนที่ผิวดินในลักษณะการเคลื่อนตัวของดินเป็นร่องตัวยู (Trough) ออกทางด้านข้าง โดยเริ่มต้นจากบริเวณส่วนหน้าหัวเจาะแล้วจึงค่อยขยายปริมาณไปเรื่อยๆจนกระทั่งหัวเจาะเคลื่อนผ่านไป รูปที่ 2.16 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินที่เป็นลักษณะการทรุดตัวของผิวดินแบบร่องตัวยูจากการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ปริมาตรดินที่ขุดออกหรือลำเลียงออกมีปริมาตรน้อยกว่าปริมาตรของหัวเจาะที่แทนที่ดิน สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ การปูดหรืออูดขึ้น (Heave) ของผิวดิน

แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 การเกิดขึ้นในลักษณะนี้อาจมีสาเหตุมาจากการใช้ความดันหน้าหัวเจาะที่สูง ในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินที่เป็นลักษณะการทรุดตัวของผิวดินแบบร่องตัวยู



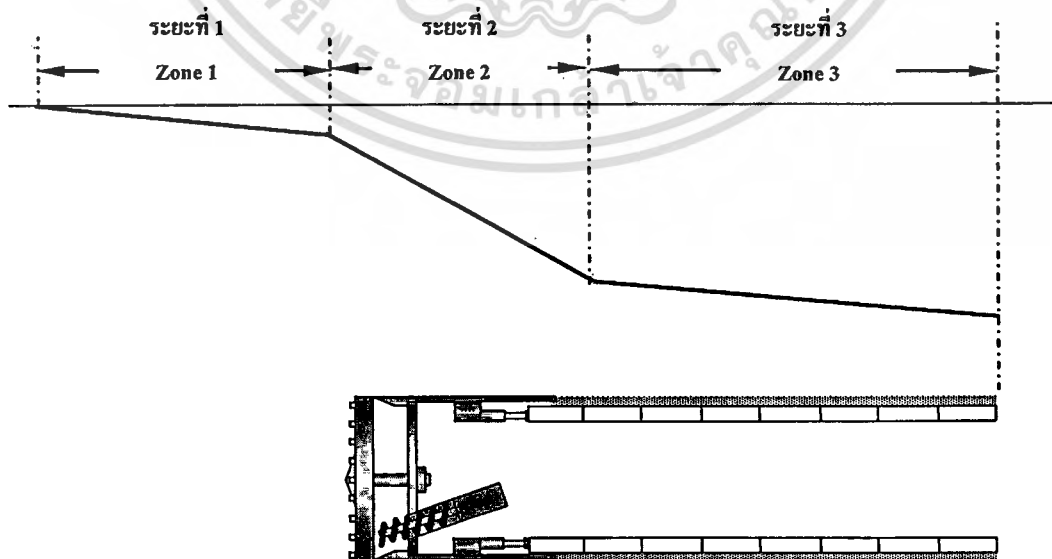
รูปที่ 2.17 การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินที่เป็นลักษณะการปูดหรืออูดขึ้น (Heave) ของผิวดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กลไกการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ และประเมินความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมาในอดีต

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งขัดแย้งกับข้อมูลที่มีเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับกลไกผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างหัวเจาะกับการเคลื่อนตัวของดินบริเวณที่ทำการก่อสร้าง การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลเป็นสิ่งที่เข้าใจได้ยาก ไม่เพียงที่จะต้องศึกษาการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้น แต่จะต้องมีการติดตามปัจจัยการควบคุมหัวเจาะควบคู่ไปด้วยด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมาในอดีต เพื่อนำไปกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมาในอดีต พบว่า การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งการทรุดตัวออกได้เป็น 3 ระยะหรือ Zone ได้แก่ การทรุดตัวบริเวณหน้าหัวเจาะ การทรุดตัวบริเวณเหนือหัวเจาะ และการทรุดตัวหลังจากที่หัวเจาะผ่าน แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 โดยปริมาณการทรุดตัวในแต่ละระยะจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวประกอบไปด้วย สภาพทางธรณีวิทยา การควบคุมหัวเจาะ (ความดันหน้าหัวเจาะ ความเร็วขณะเจาะ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ และคุณภาพการอัดฉีดน้ำปูน) และลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (ความลึกของอุโมงค์ เส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์) การรวมกันของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้ ทำให้ปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลจึงมีความซับซ้อน



รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงรูปตัดการทรุดตัวผิวดินตามแนวยาวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยา (Geological condition) จะมีความเด่นชัดในผลกระทบที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล และปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน ในกรณีอุโมงค์ทำการขุดเจาะในชั้นทรายภายใต้ระดับน้ำใต้ดินที่สูง สามารถคาดการณ์ได้ว่าการเคลื่อนตัวของดินจะเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าหัวเจาะ นอกจากนี้ ในกรณีที่ส่วนหน้าของหัวเจาะอุโมงค์ทำการขุดเจาะในชั้นดินที่มีความแตกต่างกัน อาทิเช่น ชั้นทรายบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์จะสังเกตพบการทรุดตัวในปริมาณที่สูง ในทางตรงกันข้าม การขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวจะพบการทรุดตัวในปริมาณที่น้อยกว่า

3) ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะที่ 1 (Zone 1) บริเวณหน้าหัวเจาะ และในระยะที่ 2 (Zone 2) บริเวณเหนือหัวเจาะ จากการสังเกตโดย Clough et al. (1982) [3] Matsushita et al. (1995) [4] และ Chiorboli and Marcheselli (1996) [5] พบว่า การทรุดตัวของผิวดินจะเกิดขึ้นในปริมาณที่สูงเมื่อหัวเจาะใช้ความดันหน้าหัวเจาะที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม การประยุกต์ใช้ความดันหน้าหัวเจาะที่สูง อาจพบกับการปูดหรืออูดยขึ้น (Heave) ของผิวดินเห็นได้จากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในเมืองซาน ฟรานซิสโก และมิลาน

4) ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน [5] กล่าวว่าการใช้ความเร็วขณะขุดเจาะที่มีการเคลื่อนตัวของหัวเจาะที่มีความเร็วไม่สูงมากนัก จะทำให้เกิดการทรุดตัวในปริมาณที่สูงกว่าการใช้ความเร็วขณะขุดเจาะที่เคลื่อนตัวได้เร็วกว่า นอกเหนือจากงานวิจัยดังกล่าว ข้อมูลที่นำมาใช้อ้างอิงในปัจจัยนี้ยังคงมีไม่มากเพียงพอ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและการทรุดตัวของผิวดินยังคงมีความน่าสงสัยในประเด็นดังกล่าว

5) ตำแหน่งของหัวเจาะแสดงไว้ในลักษณะของมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle) ในระหว่างการขุดเจาะ พบว่า มีความสัมพันธ์กับการทรุดตัวเหนือหัวเจาะจากการสังเกตของ [4] ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในเมืองฟูกูโอกะ

6) คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting quality) แสดงไว้ในลักษณะของความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure) และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent grout filling) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการลดการทรุดตัวของผิวดินในระยะที่ 3 (Zone 3) เป็นการทรุดตัวหลังจากที่หัวเจาะผ่านไป โครงการก่อสร้างอุโมงค์ WMATA และฟูกูโอกะ พบว่า การทรุดตัวหลังจากที่หัวเจาะผ่านไปจะลดลงหากมีการอุดช่องว่างด้านท้ายของหัวเจาะด้วยการอัดฉีดน้ำปูน และจะเป็นในลักษณะนี้ในทุกๆ ส่วนก่อสร้างของทั้งโครงการ

7) ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของหัวเจาะ และปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน โดยที่การพังทลายหรือการทรุดตัวในปริมาณที่สูงมากจะเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ณ บริเวณที่เป็นจุดเริ่มต้นของการก่อสร้างอุโมงค์ สังเกตได้จากในโครงการ TRTS (Ju et al. 1999 [6]) ที่แม้จะมีการปรับปรุงคุณภาพดินในบริเวณดังกล่าวก็ตาม การตรวจวัด ติดตาม การทรุดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเริ่มต้นของการขุดเจาะอุโมงค์จะพบกับปริมาณการทรุดตัวที่มากหรือปริมาณการทรุดตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาจากสถานะเริ่มต้นของการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ทั้งหลายเหล่านี้มีสาเหตุมาจากผลกระทบของการเรียนรู้เพื่อกำหนดปัจจัยการควบคุมหัวเจาะให้มีประสิทธิภาพในช่วงเริ่มต้นของระยะทาง

8) อย่างไรก็ตาม ยังคงมีการโต้แย้งเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ในความสำคัญต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ยกตัวอย่างเช่น Moh et al. (1996) [7] และ [3] เสนอว่า การทรุดตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านไป ดังนั้น การปิดช่องว่างบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะจึงเป็นสิ่งสำคัญ ต่อมา Matsushita et al. (1995) [4] เสนอว่า การเติมเต็มช่องว่างด้วยน้ำปูนจะสามารถป้องกันการทรุดตัวบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะได้ นอกจากนี้ ในกรณีที่มีการควบคุมปัจจัยคุณภาพการอัดฉีดน้ำปูนที่ดี การทรุดตัวภายหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านจะคงที่โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยา (Leca (1989) [8] และ [4]) ในระยะหลังของงานวิจัยได้ให้ความสนใจไปที่ความดันหน้าหัวเจาะ และการรบกวนดินในระหว่างที่หัวเจาะเคลื่อนผ่าน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดินในปริมาณที่สูงกว่ากรณีการปิดช่องว่างบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ

9) ปัญหาสำคัญในการศึกษาวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล และผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดิน ก็คือ การเก็บรวบรวมข้อมูลที่มีความครอบคลุม และความต่อเนื่องในการบันทึก และการสังเกตพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นของข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวของผิวดินอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งถือว่ามีผลสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2.5 หลักวิธีการพยากรณ์การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการคาดการณ์การทรุดตัวของผิวดิน นำมาสู่ความเข้าใจที่มากขึ้นเกี่ยวกับปัญหาดังกล่าว วิธีการประเมินการเคลื่อนตัวของดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ประกอบไปด้วย

1) *วิธีการทางสถิติและการสังเกต (Stochastic and empirical methods)* เริ่มมาจากหลักการทางคณิตศาสตร์สำหรับการพยากรณ์การลดน้อยลงของ Stochastic medium ที่มีการนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Litwinisyn [9] ในปี ค.ศ.1956 ซึ่งเป็นต้นแบบของการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน หลังจากนั้นในปี ค.ศ.1969 Peck [10] นำเสนอ การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่อธิบายได้โดยสมการความน่าจะเป็นปกติ หรือ Gaussian curve ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้อยู่ในรูปของ Error function โดยรวบรวมจากการสังเกต (Empirical solution) การวัดค่าในสนามจากอุโมงค์ที่มีสภาพทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน วิธีการนี้ถูกสนับสนุนโดยการศึกษาของ O'Reilly and New [11] ในปี ค.ศ. 1982 นอกจากนี้ Attewell and Woodman [12] ในปี ค.ศ.1982 ยังได้พัฒนาทฤษฎีทางสถิติสำหรับการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาว (Longitudinal surface settlement) โดยมาจากสมมติฐานเดียวกัน

2) *วิธีสมการเชิงวิเคราะห์ (Analytical methods)* ความเค้นและการเคลื่อนตัวของดินสามารถคำนวณได้จากสมการเชิงวิเคราะห์ ซึ่งทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของดินรอบผนังอุโมงค์ โดยปัจจุบันมีหลายทฤษฎี อาทิเช่น Sagaseta [13] ในปี ค.ศ.1987 ได้แสดงการวิเคราะห์สองมิติของการเคลื่อนตัวของดินในลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตร (Incompressible medium) และ Isotropic homogenous โดยพัฒนามาจากวิธี Strain path ของ Baligh [14] ในปี ค.ศ.1985 ต่อมา Verruijt and Booker [15] ในปี ค.ศ.1996 ได้ปรับปรุงวิธีการประมาณที่เคยนำเสนอโดย Sagaseta เพื่อที่จะหาวิธีแก้ปัญหาสำหรับกรณีการสูญมวลเสียดินที่ไม่เฉพาะเพียงแต่สำหรับกรณีไม่มีการระบายน้ำ (Undrained case) ที่มี Poisson's ratio เท่ากับ 0.5 แต่ยังสามารถประมาณค่าของ Poisson's ratio ที่ไม่เท่ากับ 0.5 ได้ ในปี ค.ศ.1998 Loganathan and Poulos [16] ได้ปรับปรุงวิธีการแก้ปัญหาของ Verruijt and Booker โดยนำเสนอ Gap parameter เพื่อจำลองพฤติกรรมการขูดเจาะอุโมงค์ให้ใกล้เคียงสภาพจริงมากขึ้นแต่ยังคงมีข้อจำกัด และในปี ค.ศ.1999 Pinto [17] ได้พัฒนาวิธีการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์ เพื่ออธิบายทั้งการเคลื่อนตัวบริเวณผิวดินและทางด้านข้างจากการก่อสร้างอุโมงค์

3) *วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีเชิงตัวเลข (Finite element and numerical methods)* เป็นวิธีการที่นำมาใช้ด้วยเหตุผลจากความซับซ้อนในการกำหนดสูตรที่เหมาะสมจากวิธีสมการเชิงวิเคราะห์ ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของดินและหิน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็ยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับความถูกต้องของตัวแปรเชิงวัสดุ (Material

parameters) และข้อเท็จจริงที่ว่า การจำลองความเค้นในระนาบสองมิติในอุโมงค์ใต้ดินไม่ได้คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของดินทางด้านหน้าผิวอุโมงค์ (Mair and Taylor, 1997 [18]) นอกจากนี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องมีการพิจารณาถึงข้อจำกัดของปัญหา ในการได้มาซึ่งตัวแปรที่มีความถูกต้องอย่างแท้จริงที่จะป้อนเข้าไปสู่กระบวนการคำนวณของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ถึงแม้ว่าจะเป็นเช่นนั้นก็ตามการพยากรณ์การเคลื่อนตัวของดินด้วยวิธีดังกล่าว ก็ยังคงมีประโยชน์ในการคาดการณ์รูปแบบต่างๆไปของการเสียรูปที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการก่อสร้างจริง

4) **วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experiments)** เป็นการทดลองในห้องทดสอบในสภาพดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive) และดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless) เพื่อเป็นส่วนช่วยในการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดินและการพังทลาย ซึ่งมีการทดสอบมากมายจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต (Atkinson et al. (1975) [19] Atkinson and Potts (1977) [20] Kimura and Mair (1981) [21] และ Nomoto et al. (1999) [22]) จากผลของการศึกษาพบว่า ตัวแปรการเคลื่อนตัวที่กำหนดมาจากการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการประมาณรูปการทรุดตัวแบบร่องตัว และการทรุดตัวของผิวดินสูงสุดที่อาจจะเกิดขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น ผลลัพธ์ของวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบความถูกต้องของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.6 วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) เพื่อการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project)

จากหัวข้อที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงหลักวิธีการการพยากรณ์การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งประกอบไปด้วย วิธีการสังเกต (Empirical solution) วิธีสมการเชิงวิเคราะห์ (Analytical solutions) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element and numerical methods) และวิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experiments) ที่มีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ ไปสู่การหาค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการวิเคราะห์ต่างๆเหล่านี้ ก็ยังคงไม่มีความใกล้เคียงต่อรูปแบบการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) ทั้งนี้เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น ขนาดของอุโมงค์ ความลึกของระดับอุโมงค์ คุณสมบัติของดิน ระดับน้ำใต้ดิน ความดันน้ำหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ และคุณภาพของงานฉีดน้ำปูน (Grouting) บริเวณช่วงทางของหัวเจาะเพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ เป็นต้น โดยทุกปัจจัยหรือทุกตัวแปรที่ได้กล่าวนี้ ล้วนมีความสัมพันธ์กับปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน แต่ก็ไม่สามารถแยกความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปรกับการทรุดตัวของผิวดิน ได้อย่างชัดเจน ทำให้เกิดความซับซ้อนจนยากแก่การวิเคราะห์หรือพยากรณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) ได้มีการพัฒนาขึ้น เพื่อให้มีความสามารถในการนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางด้านต่างๆที่มีความซับซ้อน โดยหลักวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks, ANN) ที่เป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆสำหรับการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมอุโมงค์ (Shi (1998) [23] Sonmez et al. (2004) [24] Benardos and Kaliampakos (2004) [25] Kahraman et al. (2006) [26] Tiryaki (2007) [27] Alimoradi (2008) [28] และ Santos and Celestino (2008) [29])

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี ค.ศ.2006 Suwansawat and Einstein [30] ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมมาพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project) เป็นครั้งแรก โดยโครงข่ายสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรายละเอียดของหลักวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินของ Suwansawat and Einstein มีดังต่อไปนี้

2.6.1 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ความซับซ้อนของการคำนวณ โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมนอกจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยย่อย (Node) ของชั้นรับข้อมูล ชั้นแฝงและชั้นแสดงผลแล้ว ยังขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของการคำนวณ (Epochs) ซึ่งทั้งหมดนี้จะประกอบขึ้นเป็นรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม ทั้งนี้โครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN) จะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ โดยต้องตรวจสอบด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and error method) เท่านั้น ในกระบวนการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมนี้ ฐานข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์ทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบไปด้วย

- 1) ฐานข้อมูลส่วนที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ (Training set)
- 2) ฐานข้อมูลส่วนที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ (Testing set)

กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบนี้ จะทำการใช้โครงข่ายประสาทเทียมจำนวน 18 รูปแบบ โดยแต่ละแบบจะมีจำนวนชั้นแฝง (Hidden layer) จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) และจำนวนรอบการคำนวณ (Epochs) ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากวิธีการลองผิดลองถูก [30]

รูปแบบที่	รูปแบบ โครงข่ายประสาทเทียม	จำนวนรอบการคำนวณ (epochs)
1	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	1,000
2	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	1,000
3	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 20 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	1,000
4	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	2,000
5	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	2,000
6	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 20 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	2,000
7	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 10 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	3,000
8	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 15 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	3,000
9	ชั้นแฝง 1 ชั้น มี 20 หน่วยย่อยในชั้นแฝง	3,000
10	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 10 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	1,000
11	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 15 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	1,000
12	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 20 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	1,000
13	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 10 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	2,000
14	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 15 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	2,000
15	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 20 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	2,000
16	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 10 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	3,000
17	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 15 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	3,000
18	ชั้นแฝง 2 ชั้น มี 20 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	3,000

รูปแบบโครงข่ายที่เหมาะสมโดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method) ประกอบไปด้วย 18 รูปแบบที่มีความแตกต่างกันในจำนวนของชั้นแฝง หน่วยย่อยในชั้นแฝง และจำนวนรอบการคำนวณ ดังต่อไปนี้

- 1) จำนวนชั้นแฝง (Hidden layers): 1 และ 2
- 2) จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) : 10 15 และ 20
- 3) จำนวนรอบการคำนวณ (Epochs) : 1,000 2,000 และ 3,000

ฐานข้อมูลส่วนที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้จะถูกนำมาป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบ เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของคิวดิน และปริมาณการทรุดตัว โดยค่าความสัมพันธ์นี้จะอยู่ในค่าน้ำหนัก (Weight, w) และค่าเบี่ยงเบน (Bias, b) เพื่อใช้ในการประมวลผลภายในโครงข่าย ซึ่งจะเก็บและนำมาใช้ในกระบวนการทดสอบด้วยฐานข้อมูลส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน หากรูปแบบโครงข่ายใดสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องแม่นยำที่สุดในกระบวนการทดสอบ จะถือว่าเป็นรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุด กระบวนการทั้งหมดนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน โดยการตัดสินใจความแม่นยำของแต่ละรูปแบบโครงข่ายจะใช้ ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (*Root Mean Square Error, RMSE*) เป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถหาได้ด้วยสมการที่ 2-1

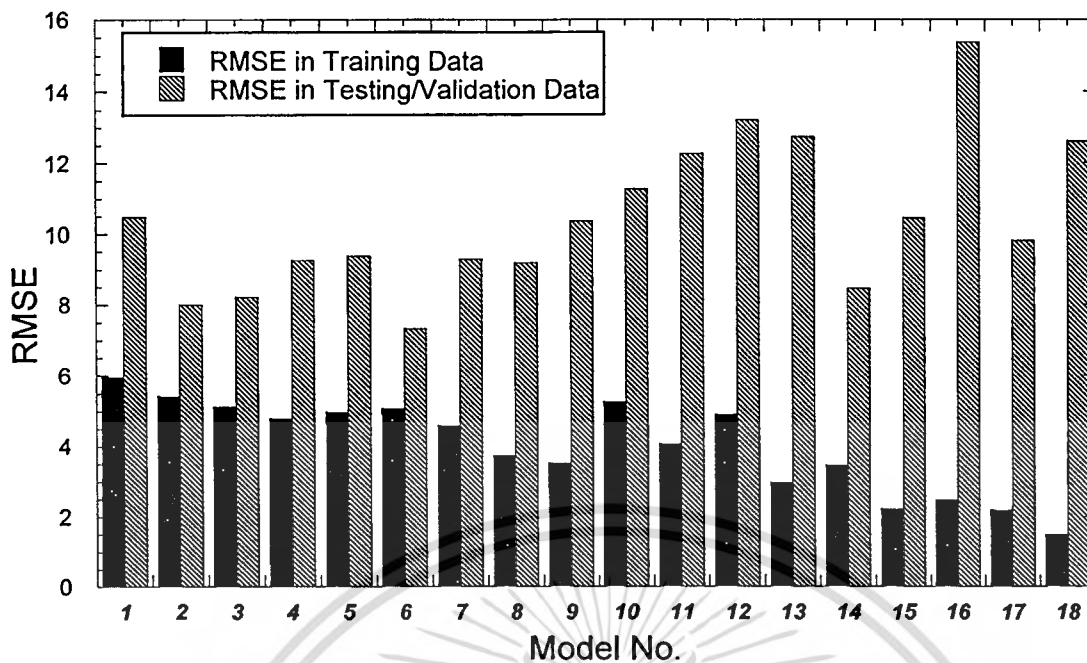
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - t_i)^2}{N}} \quad (2-1)$$

โดย N คือ จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในกระบวนการคำนวณ

O คือ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

t คือ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการวัดค่าจริง

ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ [30] ที่ทำการทดสอบจากส่วน A ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ได้สรุปดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 พบว่า รูปแบบที่ 6 สามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ที่ต่ำที่สุด คือ 7.33 มิลลิเมตรในกระบวนการทดสอบ นอกจากนี้แล้วจะสังเกตได้ว่ารูปแบบโครงข่ายที่ซับซ้อนมาก เช่น รูปแบบที่ 18 ซึ่งมีจำนวนชั้นแฝง 2 ชั้น จำนวนหน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง 20 หน่วยย่อย และรอบการคำนวณ 3,000 รอบ จะสามารถปรับค่าความสัมพันธ์ในกระบวนการเรียนรู้ได้แม่นยำ โดยมีค่า RMSE เพียง 1.48 มิลลิเมตรเท่านั้น แต่กลับไม่สามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้ ซึ่งมีค่าความผิดพลาด RMSE มากถึง 12.61 มิลลิเมตรในกระบวนการทดสอบ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ปัญหาการคำนวณมากเกินไป (Overfitting) เป็นกรณีที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนมากเกินไป ซึ่งถึงแม้จะเรียนรู้และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับผลลัพธ์ได้ดี แต่ไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.19 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) [30]

ดังนั้น โครงข่ายประสาทเทียมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวขุดเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) โดยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องเช่น ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา การควบคุมหัวขุดเจาะ กับค่าการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียม 18 รูปแบบ ถูกนำมาใช้ทดสอบ เพื่อหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพบว่าจะมีโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 โครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน [30]

ชนิดของโครงข่าย	Feedforward - Backpropagation
ฟังก์ชันแปลงค่าความสัมพันธ์	Tangent Sigmoid
จำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล	13
จำนวนชั้นแฝง	1
จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง	20
จำนวนรอบการคำนวณ	2,000

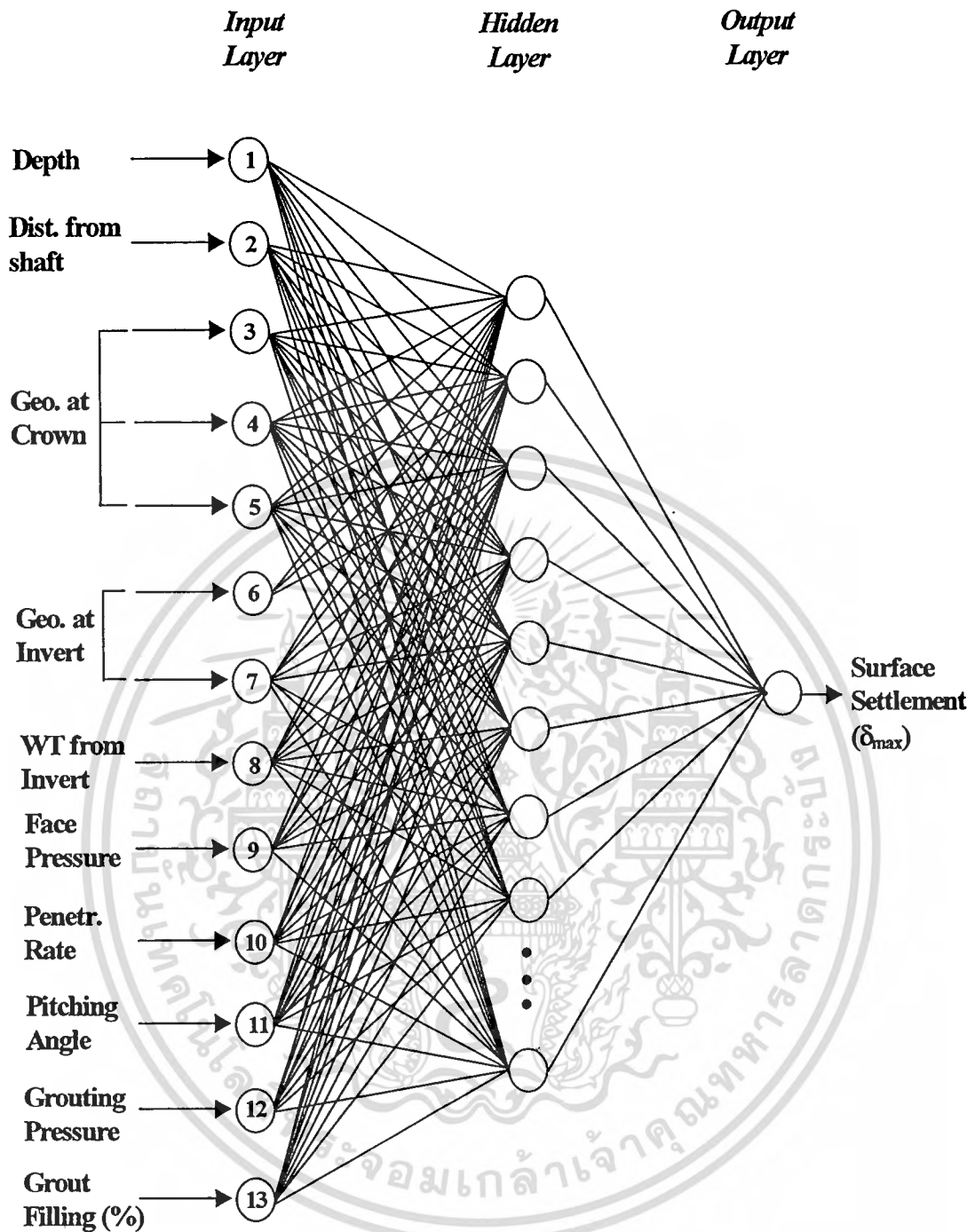
2.6.2 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project)

ดังที่ได้อธิบายไว้ใน [30] มีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุล เช่น ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวขุดเจาะ แต่ยังคงไม่สามารถใช้วิธีธรรมชาติหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยดังกล่าวกับการทรุดตัวได้ ทั้งนี้ เนื่องจากมีความซับซ้อนมาก ดังนั้น โครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างความสัมพันธ์และนำไปสู่การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน โครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้นี้เป็นรูปแบบที่ได้พิสูจน์ว่าเหมาะสมที่สุด [30] โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งมี 13 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 1 ชั้นแฝง (Hidden layer) 20 หน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) และจำนวนรอบการคำนวณ 2,000 รอบ (epochs)

ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล การก่อสร้างจะแบ่งเป็น 2 สัญญา คือ (1) สัญญาส่วนเหนือ และ (2) สัญญาส่วนใต้ นอกจากนี้ จากทั้งสองสัญญาดังกล่าวได้ทำการแบ่งส่วนก่อสร้างออกเป็น 4 ส่วนย่อยตามการขุดเจาะของแต่ละผู้ทำการก่อสร้าง คือ (1) ส่วน A (2) ส่วน B (3) ส่วน C และ (4) ส่วน D มีการใช้หัวเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุลทั้งหมด 8 หัวเจาะ โดย 6 หัวเจาะที่ใช้ในส่วน A B และ C ผลิตโดยบริษัท Kawasaki ประเทศญี่ปุ่น และส่วน D ถูกผลิตโดยบริษัท Herrenknecht ประเทศเยอรมนี อย่างไรก็ตามขนาดของหัวเจาะและหลักการทำงานมีความคล้ายคลึงกัน แต่วิธีการควบคุมหัวเจาะจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแต่ละผู้ควบคุม ดังนั้น ค่าปัจจัย เช่น ความดันหน้าหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ คุณภาพของงานฉีดอัดน้ำปูนจึงแตกต่างกัน ซึ่งทำให้ค่าการทรุดตัวของผิวดินแตกต่างกันไปด้วย

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมนี้กับงานอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล จะแบ่งเป็นหลายกรณีศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทั้งนี้เพื่อทดสอบความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมว่าจะพยากรณ์การทรุดตัวได้ถูกต้องเพียงใดในแต่ละกรณี โดยกรณีศึกษาทั้งหมดจะประกอบไปด้วย

- (1) การพยากรณ์การทรุดตัวโดยเรียนรู้จากข้อมูลในแต่ละส่วนการก่อสร้างเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินในส่วนเดียวกัน
- (2) กรณีเรียนรู้จากข้อมูลในการก่อสร้างช่วงครึ่งทางแรกเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินในช่วงครึ่งทางหลัง
- (3) การเรียนรู้จากข้อมูลของทั้ง โครงการเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินในทุกส่วนก่อสร้าง



รูปที่ 2.20 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล [30]

ตารางที่ 2.4 กรณีศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวของดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

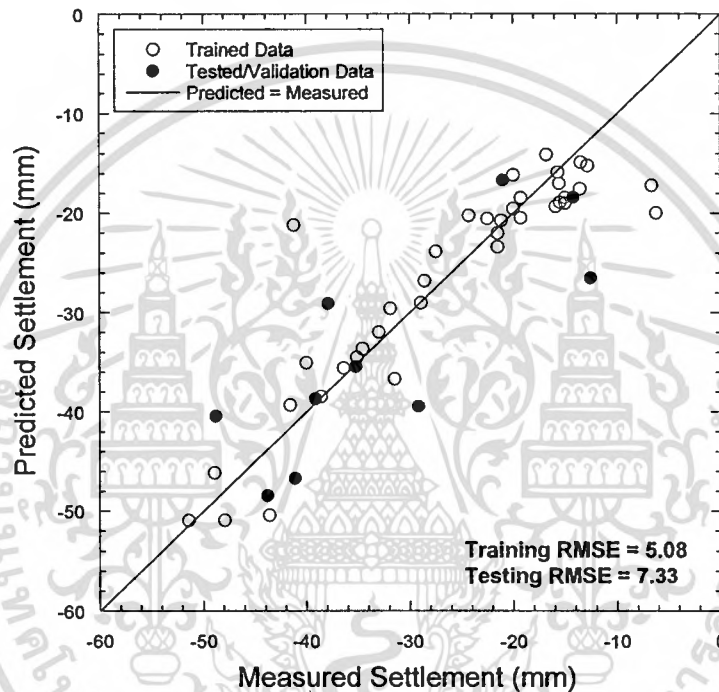
กรณี	จุดประสงค์	ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้	ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ
1	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในส่วนเดียวกัน		
1.1		ส่วน A	ส่วน A
1.2		ส่วน B	ส่วน B
1.3		ส่วน C	ส่วน C
1.4		ส่วน D	ส่วน D
2	เรียนรู้เฉพาะช่วงเริ่มต้นเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวช่วงที่เหลือ	ช่วงครึ่งทางแรก	ช่วงครึ่งทางหลัง
2.1		ส่วน A	ส่วน A
2.2		ส่วน B	ส่วน B
2.3		ส่วน C	ส่วน C
2.4		ส่วน D	ส่วน D
3	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในทุกส่วนก่อสร้าง		
3.1		ทุกส่วน (A – D)	ทุกส่วน (A – D)
3.2		ทุกส่วนโดยเพิ่มหนึ่งหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลสำหรับปัจจัยชนิดของหัวเจาะ	ทุกส่วน (A – D)

2.6.2.1 กรณีที่ 1 เรียนรู้จากข้อมูลในแต่ละส่วนเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนเดียวกัน

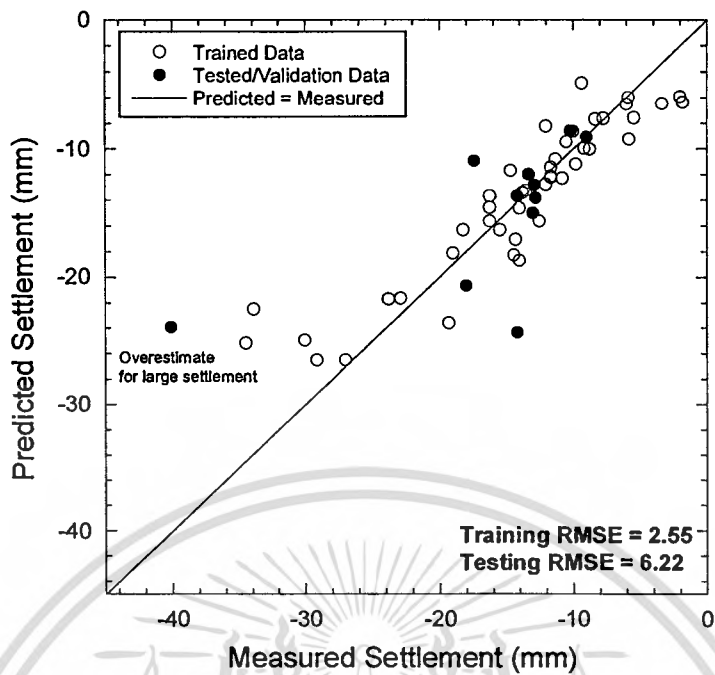
ในกรณีแรก รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum neural networks) ที่เรียนรู้จากข้อมูลในส่วนก่อสร้าง A ปรากฏว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้อย่างแม่นยำในส่วนของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ โดยมีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 5.08 มิลลิเมตร และเมื่อนำมาพยากรณ์การทรุดตัวในส่วน A ของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ พบว่ามีความถูกต้องสูงคือ มีค่า RMSE ในส่วนของข้อมูลที่ใช้ทดสอบเพียง 7.33 มิลลิเมตร ซึ่งผลลัพธ์ของสองกระบวนการ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 โดยแกน X ของกราฟแสดงค่าการทรุดตัวที่ได้จากการวัดค่าจริง (Measured

settlement) จากหมวดวัดการทรุดตัวของดิน และแกน Y แสดงค่าการทรุดตัวที่ได้จากการพยากรณ์ (Predicted settlement) ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

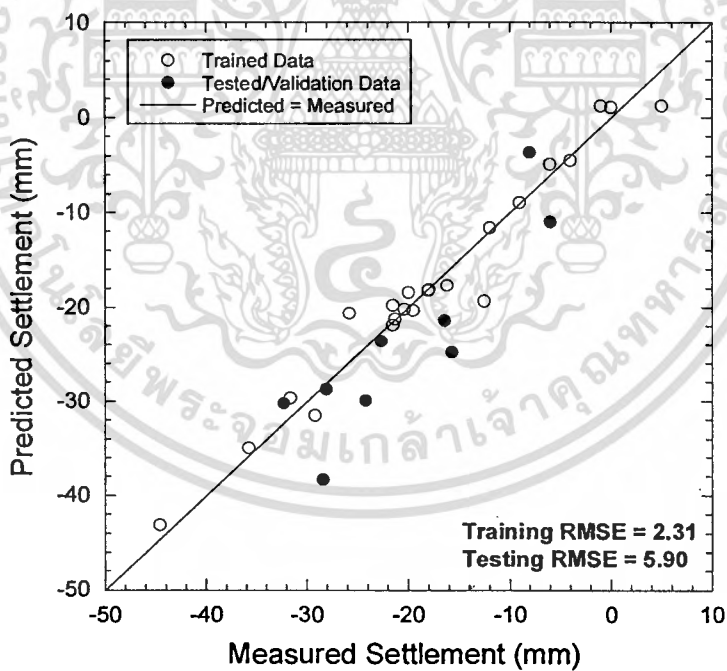
กรณีนี้ยังใช้กับข้อมูลในส่วนก่อสร้าง B C และ D ด้วยเช่นกัน โดยผลลัพธ์จากการเรียนรู้และการพยากรณ์ได้แสดงในรูปที่ 2.22 ถึง 2.24 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียมมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง โดยมีค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของข้อมูลที่ใช้ทดสอบอยู่ในระดับต่ำ



รูปที่ 2.21 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง A

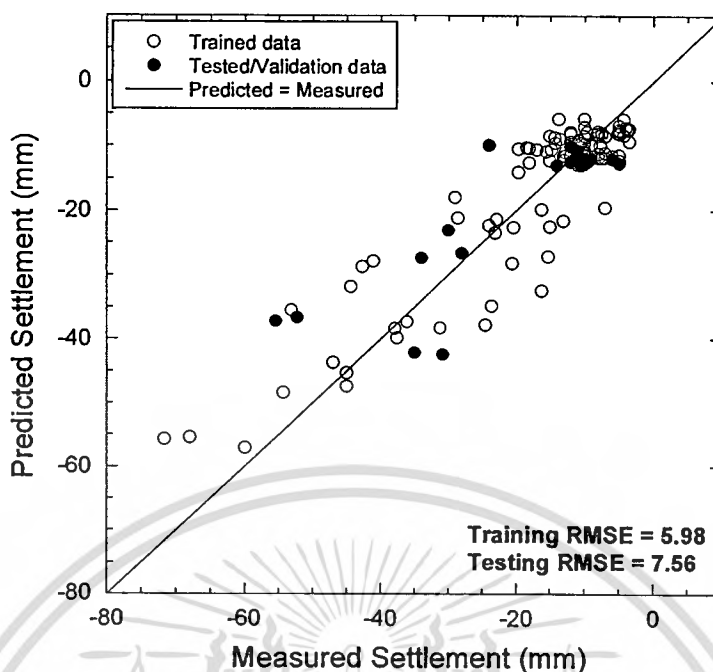


รูปที่ 2.22 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง B



รูปที่ 2.23 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

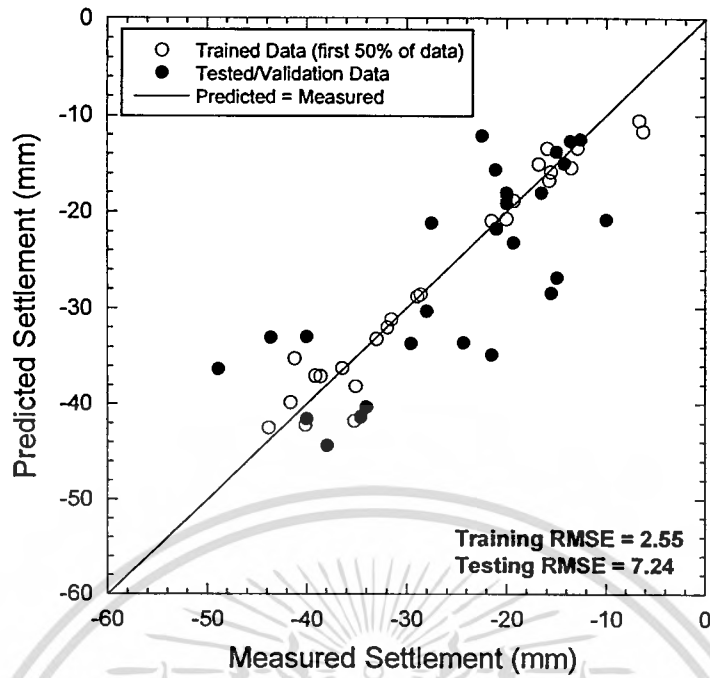


รูปที่ 2.24 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในส่วนก่อสร้าง D

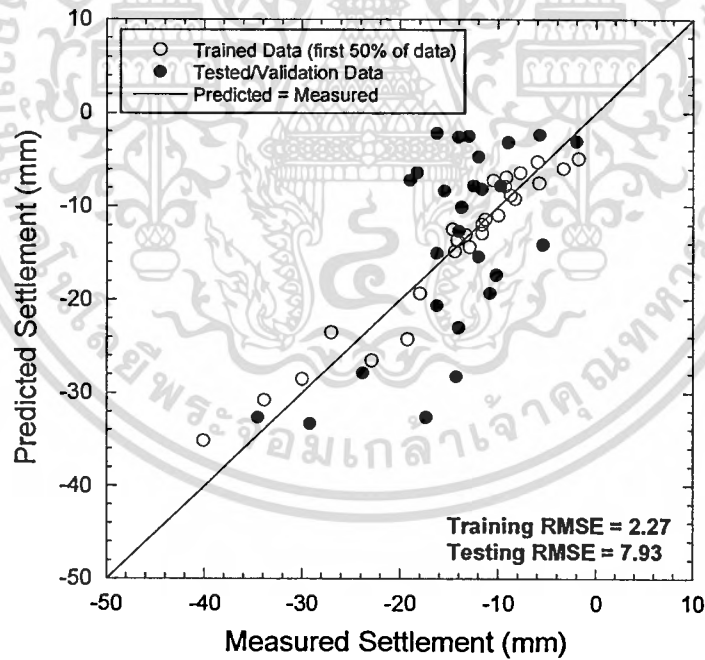
2.6.2.2 กรณีที่ 2 เรียนรู้จากข้อมูลในการก่อสร้างช่วงครึ่งทางแรกเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลัง

ในกรณีที่ 1 โครงข่ายประสาทเทียมได้พิสูจน์ว่าสามารถพยากรณ์การทรุดตัวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากได้เรียนรู้จากข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินในส่วนเดียวกัน อย่างไรก็ตาม หากสามารถใช้ข้อมูลเพียงช่วงครึ่งทางแรก และนำมาพยากรณ์ในช่วงที่เหลือได้ ย่อมจะเป็นผลดีต่อการก่อสร้างอุโมงค์มาก เนื่องจากจะติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัวของดินเพียงครึ่งทางแรกเท่านั้น เพื่อตรวจสอบและนำข้อมูลดังกล่าวที่ได้มาในช่วงครึ่งทางแรกให้โครงข่ายได้เรียนรู้ แต่ครึ่งทางหลังจะใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบแทน ซึ่งจะประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก

ดังนั้น กรณีที่ 2 จึงนำมาพิสูจน์ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งพบว่า ผลการพยากรณ์ใกล้เคียงพอใช้ได้กับค่าที่วัดได้ในส่วน A B และ C แสดงไว้ในรูปที่ 2.25 ถึง 2.27 แต่จะพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำในส่วน D แสดงไว้ในรูปที่ 2.28 ทั้งนี้เพราะว่า ข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้มีจำนวนมากกว่าส่วนอื่นมาก เนื่องจากเป็นส่วนก่อสร้างที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการทรุดตัวมากที่สุด

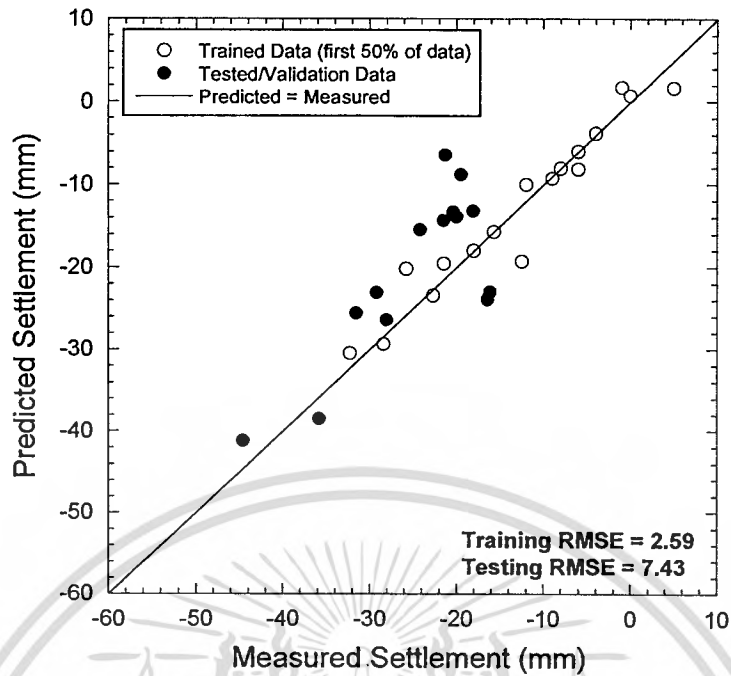


รูปที่ 2.25 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง A

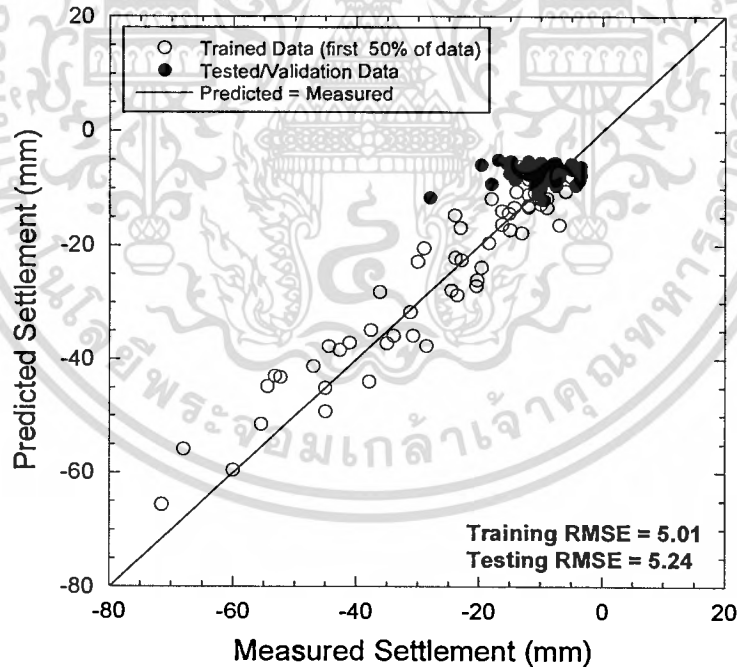


รูปที่ 2.26 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง C



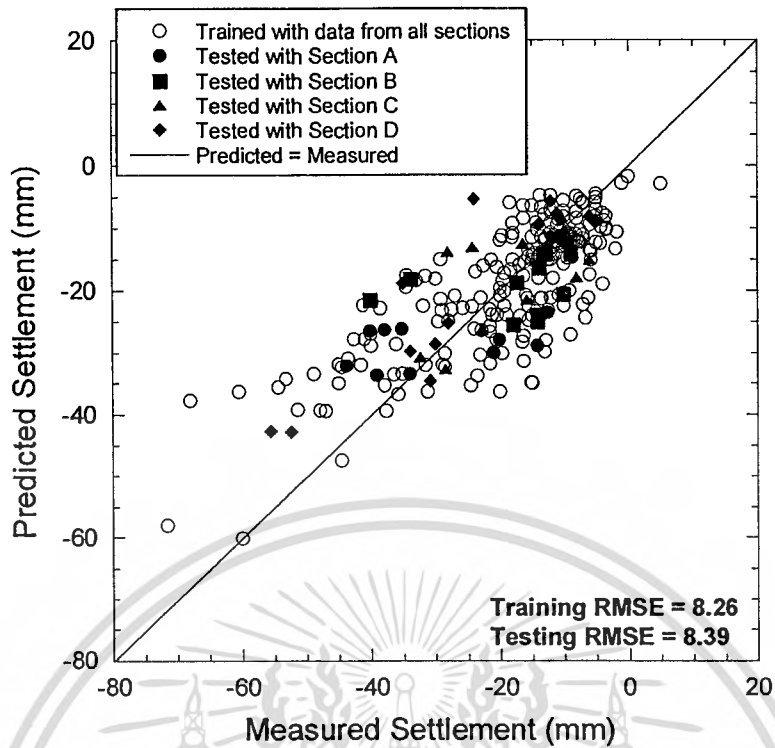
รูปที่ 2.28 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงครึ่งทางหลังของส่วนก่อสร้าง D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

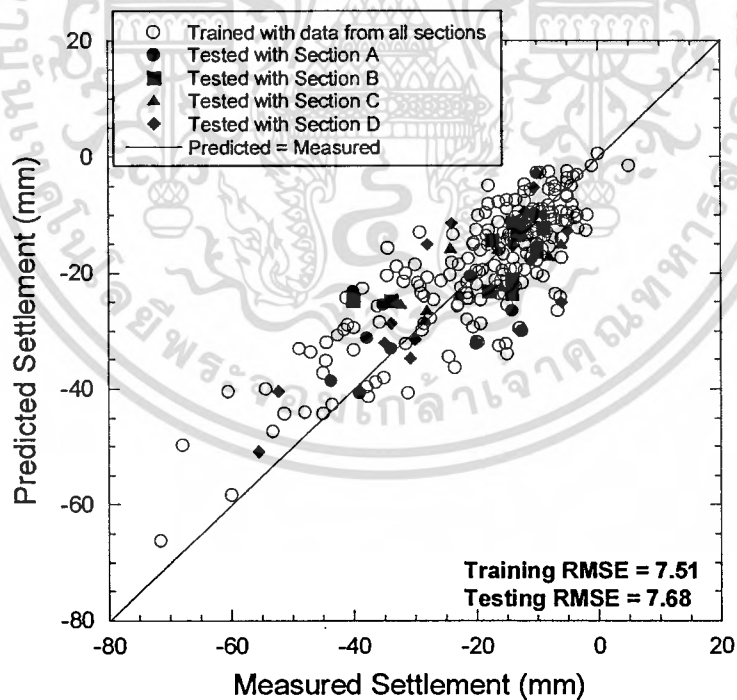
2.6.2.3 กรณีที่ 3 เรียนรู้จากข้อมูลของทั้ง โครงการเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุก ส่วนก่อสร้าง

ในกรณีนี้ โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้จากข้อมูลที่ได้รับจากทุกส่วนการก่อสร้าง คือ ส่วนก่อสร้าง A ถึงส่วนก่อสร้าง D และนำความสัมพันธ์ที่สร้างจากการเรียนรู้ข้อมูลในทั้งหมดทุก ส่วน มาใช้เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 โครงข่ายประสาทเทียม สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และการทรุดตัวได้ดี โดยมีค่า RMSE ของข้อมูลที่ใช้ เรียนรู้ 8.26 มิลลิเมตร และเมื่อนำมาใช้พยากรณ์ในฐานข้อมูลทดสอบ (Testing Set) พบว่า RMSE มีค่า 8.39 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่ามีความผิดพลาดไม่มาก

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้พยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินให้ดีขึ้น จึงเพิ่มหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลอีก 1 หน่วยจาก 13 หน่วยเป็น 14 หน่วย คือ หน่วย ปัจจัยชนิดของหัวเจาะ ทั้งนี้เนื่องจากสมมุติฐานที่ว่า ความแตกต่างของหัวเจาะอาจเป็นปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องด้วยเช่นกัน จากชนิดของหัวเจาะที่มีความแตกต่างกันของผู้ผลิต ในที่นี้ได้แก่ หัวเจาะ ที่ผลิตจากบริษัท Kawasaki ประเทศญี่ปุ่น และหัวเจาะที่ผลิตจากบริษัท Herrenknecht ประเทศ เยอรมนี จะพบความแตกต่างกันประกอบไปด้วย (1) ความยาวของหัวเจาะ โดยที่หัวเจาะที่ผลิตจาก บริษัท Herrenknecht มีความยาว 6.19 เมตร และหัวเจาะที่ผลิตจากบริษัท Kawasaki มีความยาว 8.33 เมตร (2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหัวเจาะที่ผลิตจากบริษัท Herrenknecht (6.46 เมตร) มีขนาดใหญ่กว่าหัวเจาะที่ผลิตจากบริษัท Kawasaki (6.43 เมตร) นั่นก็แสดงให้เห็นว่า หัว เจาะของ Herrenknecht จะทำให้เกิดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์มากกว่าหัวเจาะของ Kawasaki ซึ่ง ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้น ดังนั้นปัจจัยชนิดของหัวเจาะจึงมีความ จำเป็นที่ต้องเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อให้โครงข่ายสามารถสร้างความสัมพันธ์ให้สอดคล้องกับสภาพความ เป็นจริงตามการก่อสร้างมากยิ่งขึ้น โดยการก่อสร้างที่ใช้หัวเจาะที่ผลิตจากบริษัท Kawasaki ประเทศญี่ปุ่น การป้อนข้อมูลเข้าไปในโครงข่ายจะมีค่าเป็น “1” แต่ถ้าการก่อสร้างใช้หัวเจาะที่ผลิต จากบริษัท Herrenknecht ประเทศเยอรมนี การป้อนข้อมูลเข้าไปในโครงข่ายจะมีค่าเป็น “0” พบว่า โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ (RMSE = 7.51 มิลลิเมตร) และการพยากรณ์ในกระบวนการทดสอบ (RMSE = 7.68 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้าง

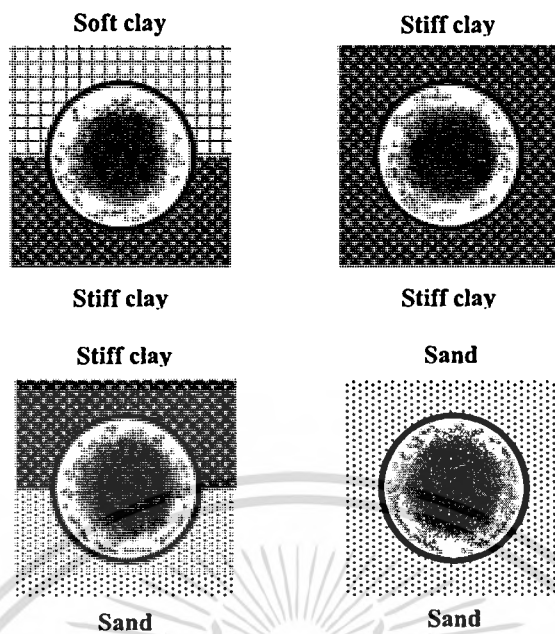


รูปที่ 2.30 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้าง โดยเพิ่มปัจจัยชนิดของหัวเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Suwansawat and Einstein [30] ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมได้นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล โดยการกำหนดปัจจัยในชั้นรับข้อมูลได้ทำการแบ่งหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลออกมาจาก 3 กลุ่มปัจจัยหลักประกอบไปด้วย ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry) สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions) และการควบคุมหัวเจาะ (Tunnel geometry) ทำให้มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลทั้งสิ้น 13 หน่วยย่อยดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ในส่วนการแบ่งกลุ่มปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยาได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ประกอบด้วย ดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และดินทราย และ (2) ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ ประกอบด้วย ดินเหนียวแข็งและดินทราย โดยการป้อนข้อมูลในส่วนนี้ ถ้าอุโมงค์อยู่ในสภาพดินชนิดใดจะถูกป้อนค่าเป็น "1" ในทางตรงกันข้ามถ้าอุโมงค์ไม่ได้อยู่ในดินชนิดนั้นก็จะถูกป้อนค่าเป็น "0" ซึ่งการป้อนข้อมูลในโครงข่ายประสาทเทียมรูปแบบนี้จะใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินที่หลากหลาย

ดังนั้น วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาประกอบไปด้วยการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพ 1) ชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง 2) ชั้นดินเหนียวแข็ง 3) ชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย และ 4) ชั้นดินทรายแสดงไว้ในรูปที่ 2.31 โดยมีแนวคิดที่ว่าหากให้โครงข่ายประสาทเทียมพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยา ผลการพยากรณ์การทรุดตัวที่แสดงด้วยค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) จะมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น เหตุผลมาจากในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ น่าจะมีลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน ทำให้การสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพที่ดีว่าการพยากรณ์การทรุดตัวในสภาพชั้นดินที่หลากหลาย [30] นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของ Suwansawat and Einstein [30] ที่กำหนดขึ้น ว่ามีความสัมพันธ์กับค่าการทรุดตัวของผิวดินหรือไม่ โดยจะทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์น้อยที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ แล้วจึงนำไปประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้กับกรณีที่ไม่มีการตัดปัจจัยใดๆ ออกไปในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยา ซึ่งจะได้ทำการนำเสนอไว้ในบทต่อไปของวิทยานิพนธ์เล่มนี้



รูปที่ 2.31 การก่อสร้างอุโมงค์แยกตามสภาพดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน

3.1 กล่าวนำ

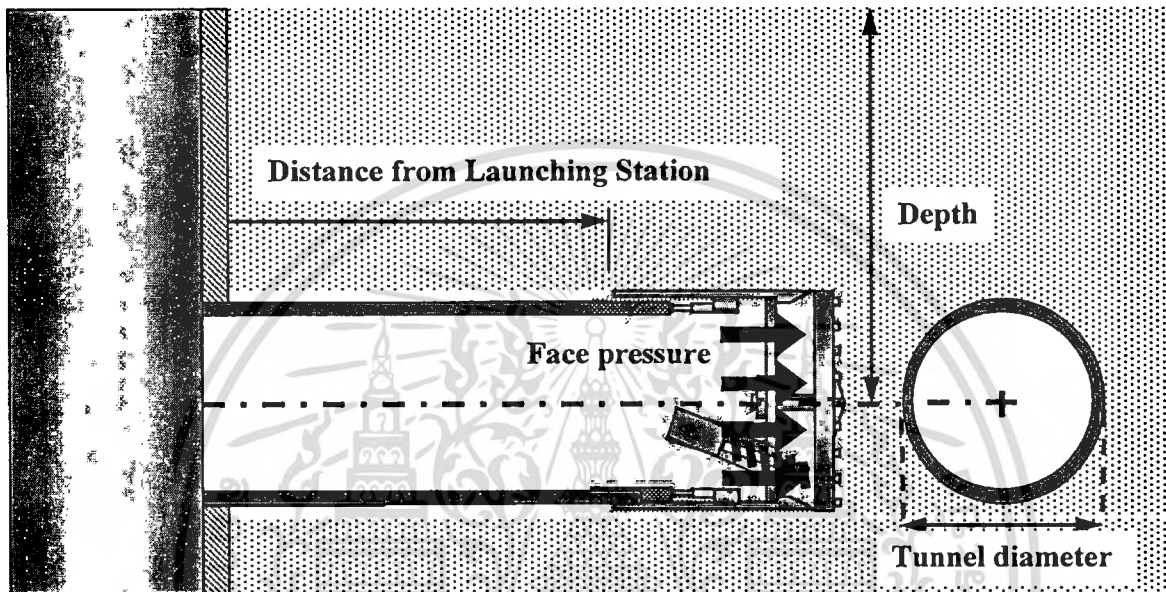
การเคลื่อนตัวของดินที่ส่งผลทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดิน อันเนื่องมาจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (EPB shield) ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานคร พบว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นล้วนมาจากปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวหลากหลายปัจจัยซึ่งประกอบไปด้วย ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะ โดยที่มาของปัจจัยมาจากหลักการสังเกตจากข้อมูลพื้นฐานในอดีต [3-8] และข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project) [31] รายละเอียดของปัจจัยเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลสำคัญ เพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการคำนวณ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่าการทรุดตัวของผิวดินต่อไป

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน

กลุ่มปัจจัย	ปัจจัยย่อย
1. ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry)	1.1 ความลึกของอุโมงค์ (Tunnel depth, m) 1.2 ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station, m) 1.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (Tunnel diameter, m)
2. สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions)	2.1 ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ (Geology at tunnel crown) 2.2 ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ (Geology at tunnel invert) 2.3 ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (Ground water level from tunnel invert, m)
3. การควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors)	3.1 ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure, kPa) 3.2 ความเร็วขุดเจาะ (Penetration rate, mm/min) 3.3 มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle, degree) 3.4 ความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure, bar) 3.5 เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent grout Filling, %)

3.2 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry)

ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry) ที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ในที่นี้ประกอบไปด้วย ความลึกของอุโมงค์ ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งแสดงลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ไว้ในรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดคังต่อไปนี้



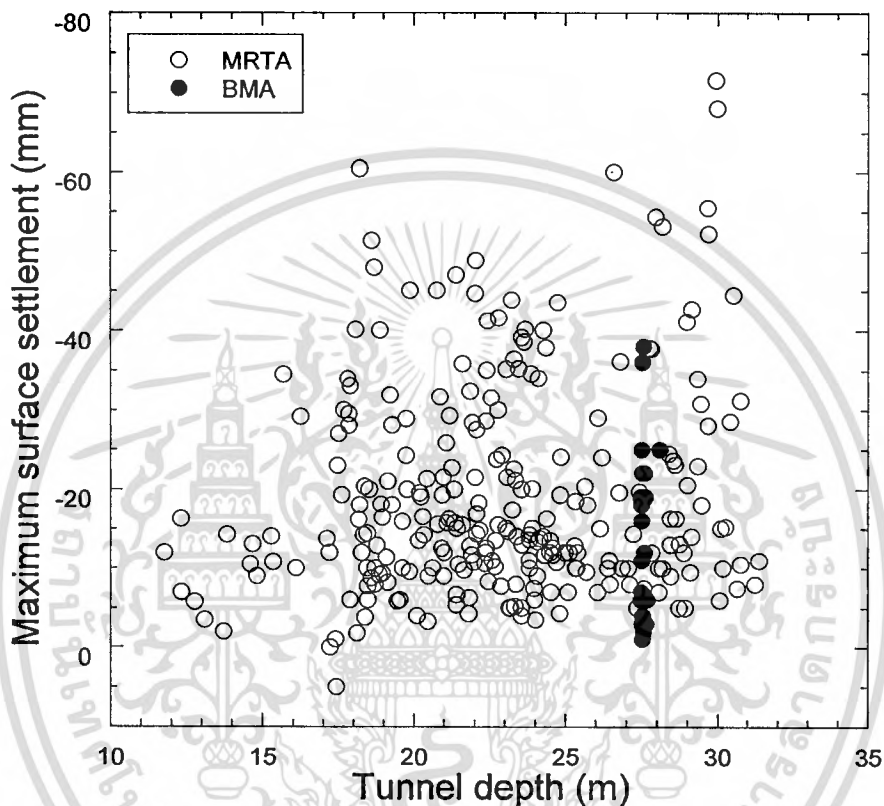
รูปที่ 3.1 รายละเอียดลักษณะทั่วไปของอุโมงค์

3.2.1 ความลึกของอุโมงค์ (Tunnel depth)

ความลึกของอุโมงค์เป็นปัจจัยหนึ่งในลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ที่มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยรูปที่ 3.2 ได้แสดงความสัมพันธ์ของความลึกของอุโมงค์กับการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project) และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA Project) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ตามหลักทฤษฎี ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์คงที่ตลอดแนวเส้นทาง อุโมงค์ที่ทำการก่อสร้างในระดับความลึกที่มากจะเกิดการทรุดตัวน้อยกว่าอุโมงค์ที่ทำการก่อสร้างในระดับที่ตื้น แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์กับการทรุดตัวยังไม่สามารถคาดการณ์ได้ตามหลักทฤษฎี ยกตัวอย่างเช่น ในการขุดเจาะอุโมงค์ที่ลึกประมาณ 30 เมตร เกิดการทรุดตัวในปริมาณที่สูง อาจเนื่องมาจากการที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างอยู่ในชั้นดินทรายเป็นส่วนใหญ่ของส่วน C ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และในทางตรงกันข้ามสำหรับอุโมงค์ตื้น (10-15 เมตร) ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับอยู่ในปริมาณที่เล็กน้อย ซึ่งสาเหตุอาจมาจากมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แม้ความลึกของอุโมงค์จะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการทรุดตัวของผิวดิน แต่ทั้งนี้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยอื่นๆ อาทิเช่น ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ และสภาพทางธรณีวิทยา จึงทำให้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความลึกของอุโมงค์กับการทรุดตัวของผิวดินได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA

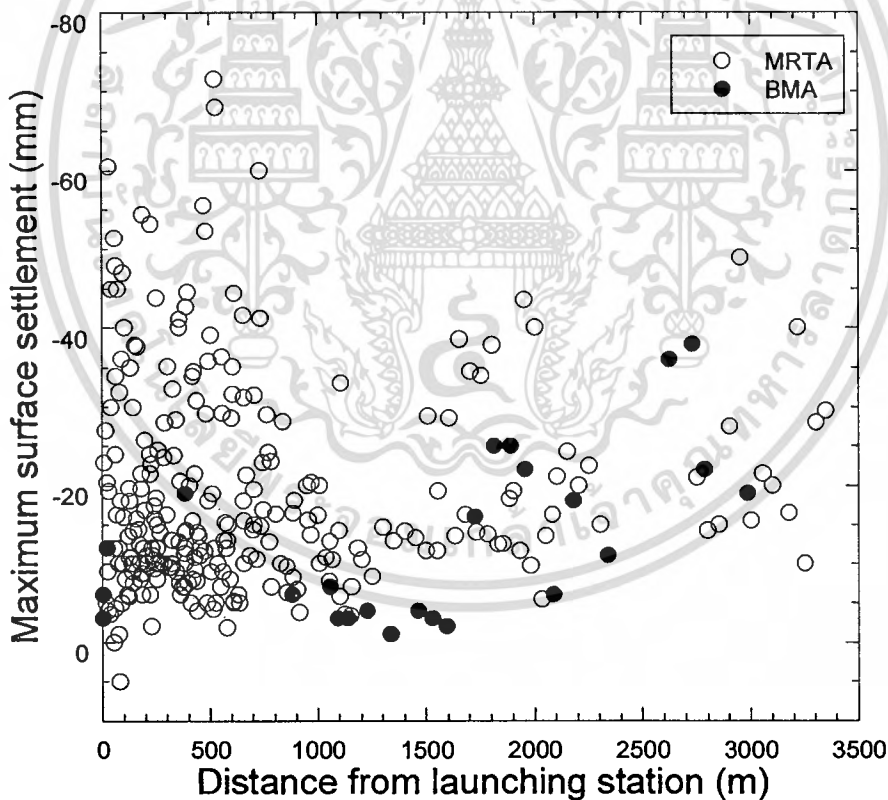
3.2.2 ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station)

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 โดยระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีผลกระทบต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดินนั้น อันเนื่องมาจากปัจจัยนี้จะมีความสัมพันธ์ควบคู่ไปกับทักษะในการควบคุมหัวเจาะหรือระยะเวลาการเรียนรู้ (Learning curve) และประสิทธิภาพของหัวเจาะ จะเห็นได้จากช่วงเริ่มต้นของการขุดเจาะ ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะจะมีการปรับเปลี่ยนค่าควบคุมต่างๆ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ในการปฏิบัติงานไม่ว่าจะเป็น ความดันน้ำหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ และปัจจัยควบคุมหัวเจาะอื่นๆ นอกเหนือจากปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะดังกล่าว ปัญหาในส่วนของ การควบคุมแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทาง การติดตั้งผนังอุโมงค์ และกระบวนการลำเลียง ก็อาจจะมีผลกระทบด้วยจากการขาดประสิทธิภาพในช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะ ทั้งหมดนี้จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้บริเวณจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์เกิดการทรุดตัวในปริมาณที่สูง หรืออาจเกิดการยกขึ้นของผิวดินเนื่องมาจากการใช้ค่าความดันน้ำหัวเจาะที่สูง

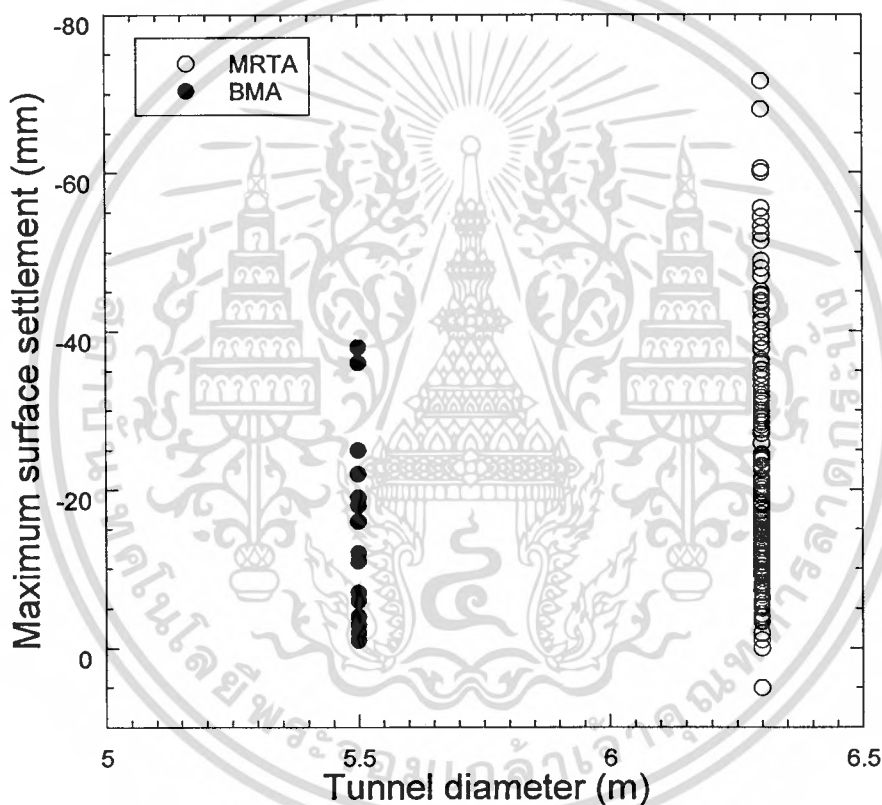
ภายหลังจากที่หัวเจาะได้ขับเคลื่อนผ่านมาจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ พร้อมกับกับความชำนาญของบุคลากรที่มีประสบการณ์ผ่านมาจากช่วงเริ่มต้น หัวเจาะจะสามารถควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทำให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 3.3 การทรุดตัวของผิวดินในช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ยังคงไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มที่แน่นอนได้ แต่ก็เห็นค่าการทรุดตัวสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องติดตามและตรวจวัดปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ในช่วงเริ่มต้นที่หัวเจาะขับเคลื่อนออกจากกำแพงกันดินของสถานี เพราะจากโครงการในอดีตที่ผ่านมาการพังทลายส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่จุดเริ่มต้นของการขุดเจาะอุโมงค์ [6]



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดิน ในโครงการ MRTA และ BMA

3.2.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (Tunnel diameter)

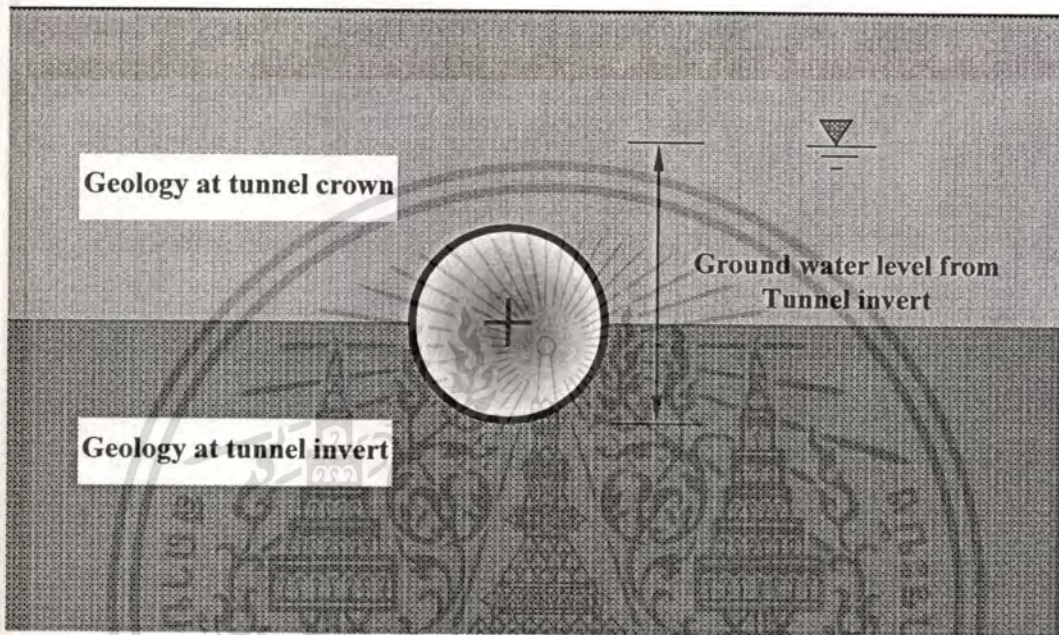
เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน อุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ย่อมส่งผลให้เกิดการทรุดตัวมากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก อันเนื่องจากอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ ปริมาตรในการขุดเจาะจะยิ่งมาก ก็มักก่อให้เกิดการสูญเสียมวลดินเป็นปริมาณที่มากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นธรรมดา โดยรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดิน พบว่า ในโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (5.5 เมตร) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์เล็กกว่าโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (6.3 เมตร) มีแนวโน้มของค่าการทรุดตัวของผิวดินที่น้อยกว่า



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA

3.3 สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions)

สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions) ที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลในที่นี้ประกอบไปด้วย ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ และความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ซึ่งแสดงปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยาไว้ในรูปที่ 3.5 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

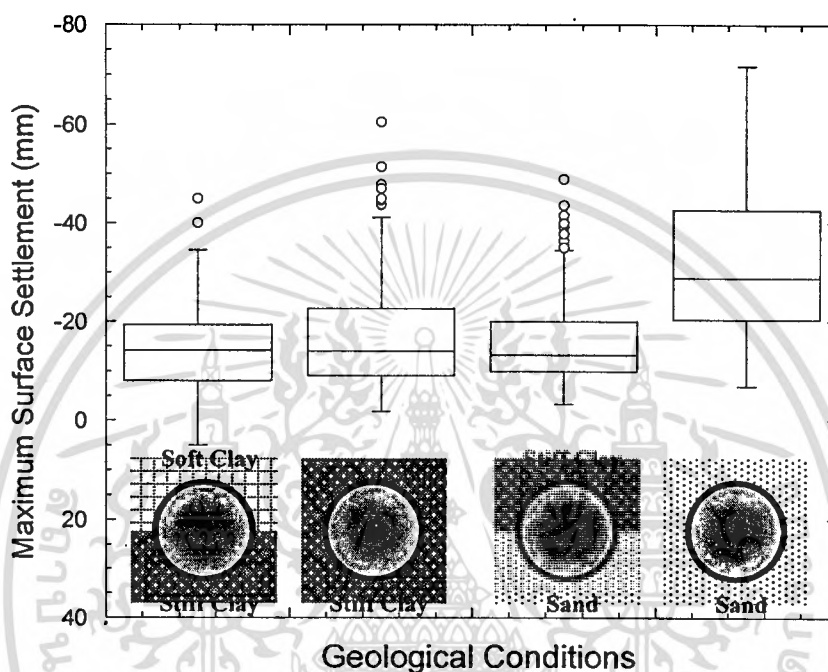


รูปที่ 3.5 รายละเอียดปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยา

สภาพทางธรณีวิทยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างในกรณีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล โดยที่ “ชนิดของดิน (Soil type)” จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของหัวเจาะในการขุดเจาะอุโมงค์ รวมถึงต่อปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น สภาพทางธรณีวิทยาที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมากที่สุดคือ ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay layer) โดยมีที่มาจาก การสังเกตในโครงการที่ผ่านมาในอดีต และ โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล [31] ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 3.6 สาเหตุที่ชั้นดินเหนียวแข็งมีความเหมาะสมอันเนื่องมาจากมีค่ากำลังรับแรงเฉือน (S_u) ที่สูง ทำให้ดินมีเสถียรภาพในระหว่างที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ รวมทั้งกระบวนการการขนถ่ายดินผ่านสายพานลำเลียงก็เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การซึมผ่านของน้ำในดินมีค่าที่ต่ำ ทำให้ลดปัญหาการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater seepage) เข้าสู่พื้นที่ที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ อันจะส่งผลทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินเนื่องมาจากการเกิดช่องว่างในเมื่อดิน ในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

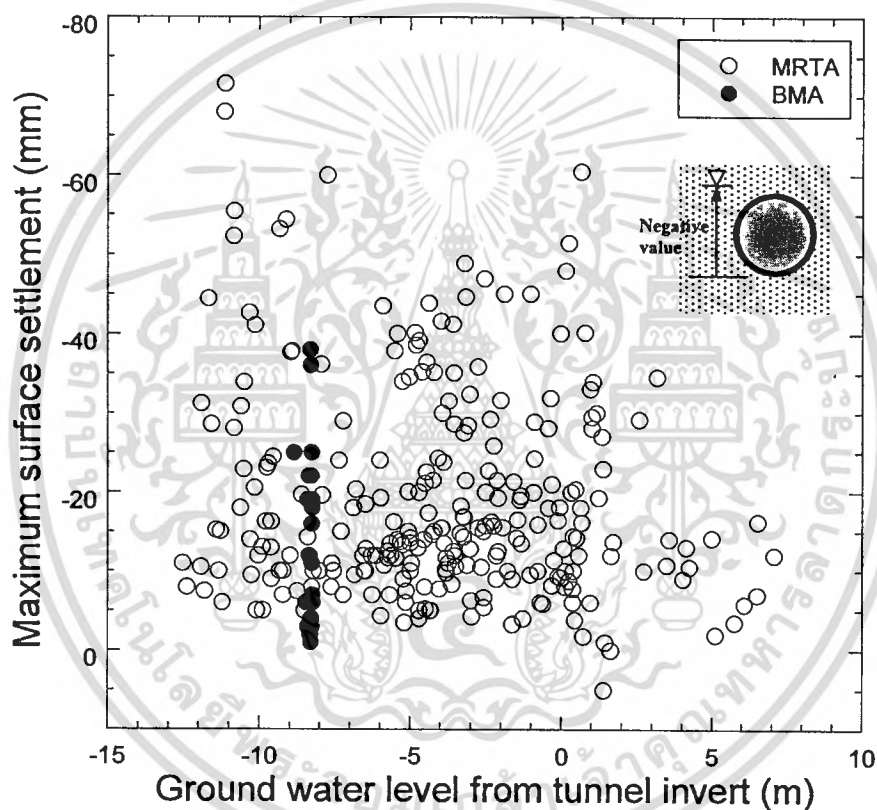
การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายถือว่าเป็นอุปสรรคในการควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพในการก่อสร้างที่จะส่งผลต่อปริมาณการทรุดตัวของดินที่ลงไปจนถึงการพังทลายของดิน พบว่า ความดันน้ำหัวเจาะจะมีแนวโน้มลดลงจากการควบคุมเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินทราย และจะเกิดการทรุดตัวในปริมาณที่สูง ในกรณีที่ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์เป็นชั้นดินทรายและชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์เป็นชั้นดินเหนียว



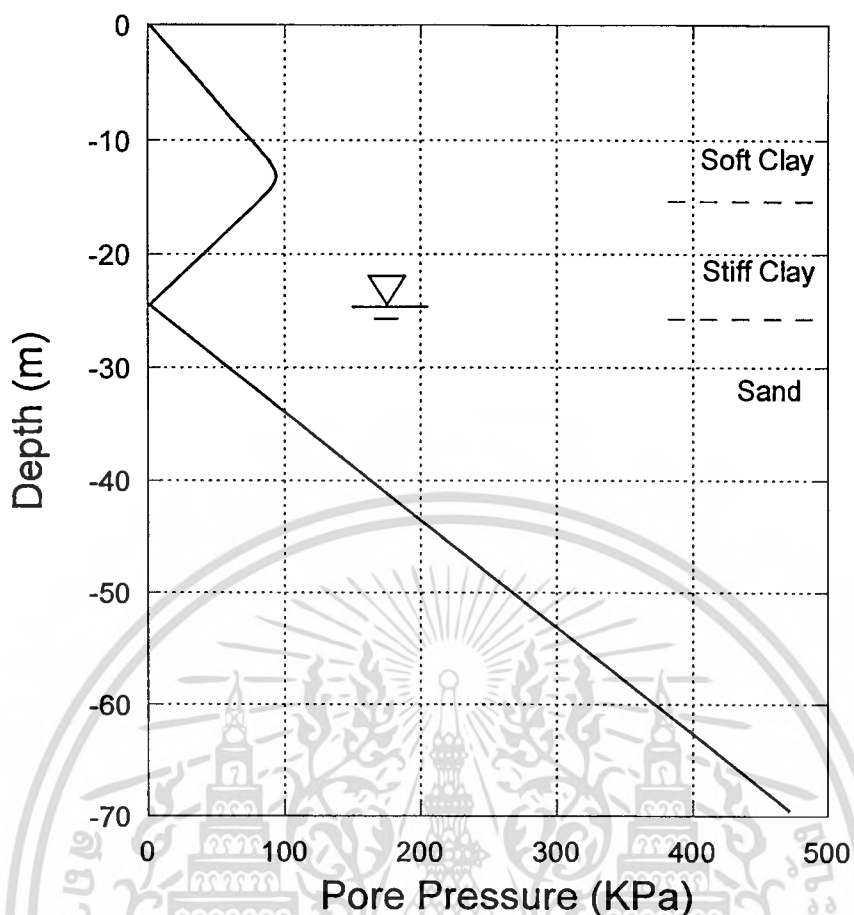
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพทางธรณีวิทยาและค่าการทรุดตัวของผิวดินของโครงการ MRTA

“ระดับน้ำใต้ดิน (Water table level)” ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งระดับน้ำใต้ดินเป็นเรื่องที่น่าเป็นห่วงมากสำหรับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระดับความลึกมากจากผิวดิน ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ มีความเป็นไปได้อย่างมากที่จะมีน้ำไหลเข้ามาทางส่วนหน้าของอุโมงค์ ทำให้เป็นอุปสรรคในการควบคุมความดันน้ำหัวเจาะ และกระบวนการขนถ่ายดิน จนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินในปริมาณที่สูงไปจนถึงการพังทลายของดิน อีกทั้งการไหลเข้ามาของระดับน้ำใต้ดินจะนำมาสู่การทรุดตัวที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ของดินบริเวณเหนืออุโมงค์ได้อีกด้วย รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินในทั้ง 2 โครงการ จะเห็นว่า บางส่วนของข้อมูลเมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ มีค่าเป็นลบ) ในส่วน D ของ

โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลที่อุโมงค์เป็นแบบซ้อนกัน (Stacked tunnel) จะมีปริมาณการทรุดตัวที่สูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ มีค่าเป็นบวก) จะมีปริมาณการทรุดตัวที่น้อยตามไปด้วย จากรูปที่ 3.7 แต่อย่างไรก็ตาม ในบางส่วนของข้อมูลที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับอยู่ในปริมาณที่ต่ำ นั่นก็แสดงให้เห็นว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังคงมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นๆด้วย โดยระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำใต้ดินของกรุงเทพฯ ยังคงไม่ปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงจากปี พ.ศ. 2522 จนถึงปัจจุบันคือ อยู่ที่ประมาณ 22-24 เมตรจากผิวดิน [2] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์และค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA



รูปที่ 3.8 ความดันน้ำในโพรงดิน (Pore water pressure) โดยทั่วไปของกรุงเทพฯ [2]

3.4 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors)

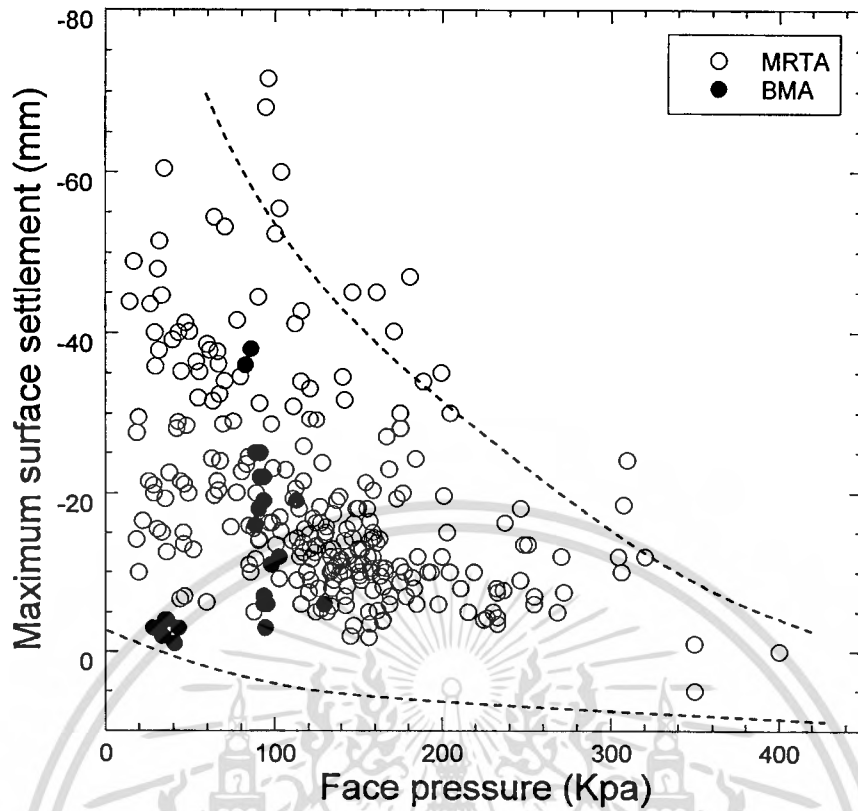
วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลเป็นวิธีการที่ได้นำมาใช้ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งอาศัยหลักการขุดและลำเลียงดินออกโดยรักษาเสถียรภาพบริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะ ซึ่งปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะประกอบไปด้วย ความดันหน้าหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ มุมก้มหรือมุมเอียงของหัวเจาะ ความดันของการฉีดน้ำปูน และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure)

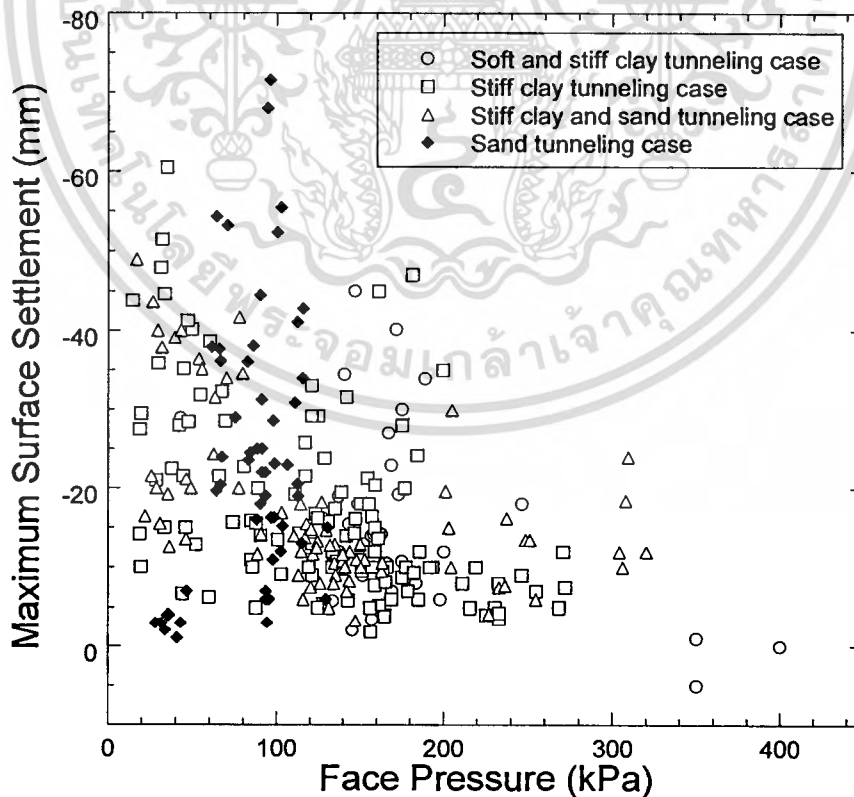
หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลมีลักษณะการทำงานโดยการควบคุมปริมาณการขุดดินออก ในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ การลำเลียงดินจะเริ่มขึ้นที่บริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะด้วยสายพานลำเลียง (Screw conveyor) ในปริมาณที่เหมาะสม พร้อมกับการควบคุมแรงดันที่ห้องกักดิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Chamber) บริเวณส่วนหน้าหัวเจาะให้สามารถต้านทานปริมาณดินที่จะทะลักเข้ามาได้ ในทางปฏิบัติการควบคุมแรงดันดังกล่าวก็คือ การควบคุมความดันหน้าหัวเจาะซึ่งเป็นปัจจัยที่ถือว่ามีความสำคัญที่สุดเป็นลำดับแรก โดยมีบทบาทที่สำคัญในการรักษาเสถียรภาพของการขุดเจาะอุโมงค์ และการควบคุมปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นให้ลดลง

พื้นฐานของวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ในส่วนความดันหน้าหัวเจาะอาจกล่าวได้ว่าเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในปัจจัยการควบคุมหัวเจาะทั้งหมด ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดินแสดงให้เห็นได้จากข้อมูลพื้นฐานในอดีต [3-8] และข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project) [31] ซึ่งได้มีการอธิบายไว้ว่า ความดันหน้าหัวเจาะที่ต่ำจะทำให้เกิดการทรุดตัวในปริมาณที่สูง และในทางตรงกันข้าม ความดันหน้าหัวเจาะที่สูงจะทำให้เกิดการทรุดตัวในปริมาณที่ต่ำ ซึ่งจากรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินในทั้ง 2 โครงการ พบว่าความดันหน้าหัวเจาะที่เพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้ปริมาณการทรุดตัวของผิวดินมีค่าลดลง แต่ในกรณีที่ความดันหน้าหัวเจาะมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำคือ 0-100 กิโลปาสกาล ยังเป็นการยากที่จะคาดคะเนความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่อค่าการทรุดตัว ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากพฤติกรรมระหว่างตัวหัวเจาะ และดิน โดยรอบที่มีความซับซ้อนในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ทำให้มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวอื่นๆมาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ในรูปที่ 3.10 ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยา พบว่า ในการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย เมื่อความดันหน้าหัวเจาะมีค่าที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้การทรุดตัวมีปริมาณที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ในการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินทรายความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างความดันหน้าหัวเจาะ และปริมาณการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นนั้น กับ ไม่มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับหลักการพื้นฐาน นั่นอาจจะแสดงให้เห็นว่า ความดันหน้าหัวเจาะอาจไม่ใช่ปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในชั้นดินทราย ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไป



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตาม

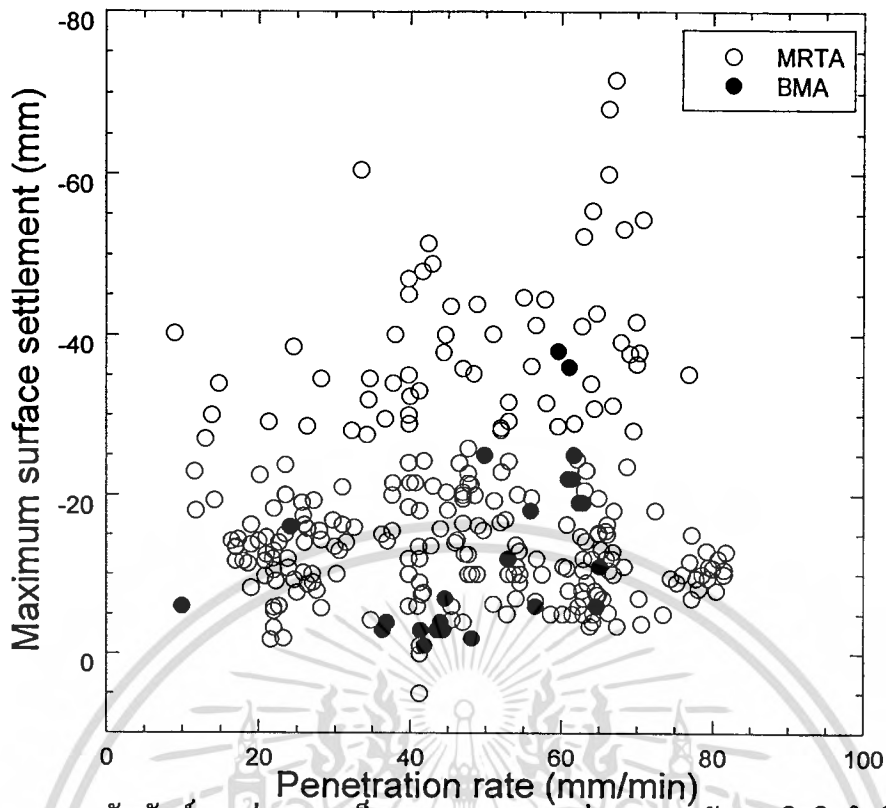
สภาพทางธรณีวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate)

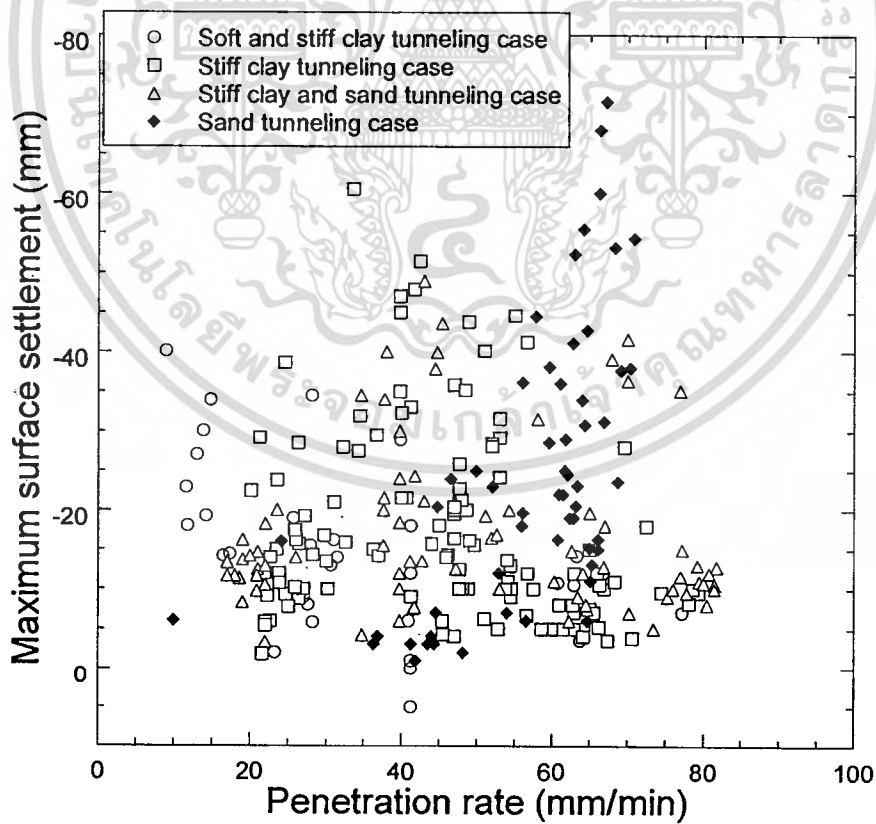
ความเร็วขณะขุดเจาะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน โดยมีการติดตามตรวจวัดความเร็วขณะขุดเจาะที่พิจารณาจากการเคลื่อนตัวของหัวเจาะในที่นี้มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งในการปฏิบัติงานของหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลจะมีการควบคุมหัวเจาะให้อัตราการลำเลียงดินมีความสัมพันธ์สอดคล้องไปกับความเร็วขณะขุดเจาะ ถ้าหากอัตราการลำเลียงดินมีค่าสูงกว่าความเร็วขณะขุดเจาะจะทำให้หัวเจาะขุดดินออกในปริมาณที่มากเกินไปกว่าการที่หัวเจาะจะเคลื่อนเข้าไปแทนที่ช่องว่างของดินที่ถูกขุดออกไป ทำให้เกิดความไม่สมดุลกันระหว่างอัตราการลำเลียงดินและความเร็วขณะขุดเจาะในกรณีนี้ ผลลัพธ์ก็คือ จะเกิดการสูญเสียมวลดินขึ้นในปริมาณที่มาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากอัตราการลำเลียงดินมีค่าต่ำกว่าความเร็วขณะขุดเจาะจะทำให้หัวเจาะสามารถขุดดินออกได้ในปริมาณที่น้อย จนทำให้หัวเจาะต้องมีการควบคุมความดันหน้าหัวเจาะไว้ให้มีค่าที่สูงเพื่อรักษาเสถียรภาพในส่วนหน้าของหัวเจาะให้เหมาะสม

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วขณะขุดเจาะก็คือ อัตราการลำเลียงดิน ซึ่งในกรณีที่หัวเจาะมีความเร็วขณะขุดเจาะเพิ่มขึ้น อัตราการลำเลียงดินก็จะต้องทำให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะที่แปรผันตามกันเพื่อรักษาความดันหน้าหัวเจาะให้เหมาะสม สำหรับในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้มีการบันทึกผลการปฏิบัติงานของ 6 หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลพบว่า โดยทั่วไปค่าความเร็วขณะขุดเจาะที่ใช้ในโครงการจะอยู่ที่ประมาณ 40-70 มม./นาที่ แต่จะมีใน 2 หัวเจาะจากบริษัท Kawasaki ที่ใช้ในส่วน B ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลที่มีการใช้ค่าความเร็วขณะขุดเจาะอยู่ในระดับค่ามากคือ 10-30 มม./นาที่ และในส่วน B นี้ได้มีการนำเทคนิคท่อสูบลำเลียงดินออกจากห้องกักดินแทนที่การลำเลียงดินผ่านระบบสายพานลำเลียงที่แตกต่างจากส่วนก่อสร้างอื่นภายในโครงการ แต่ข้อเสียของระบบท่อสูบลำเลียงก็คือ การลำเลียงดินได้ช้ากว่าระบบสายพานลำเลียงเป็นสาเหตุทำให้ในส่วน B มีอัตราการลำเลียงดินที่ต่ำ จึงเป็นเหตุทำให้ในส่วน B มีความเร็วขณะขุดเจาะที่ต่ำตามไปด้วยเพื่อรักษาความดันหน้าหัวเจาะให้สอดคล้องกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจากรูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินในทั้ง 2 โครงการ พบว่า ในกรณีที่ความเร็วขณะขุดเจาะมีค่าที่ต่ำ (ส่วน B และบางส่วนของโครงการ BMA) มีแนวโน้มทำให้การทรุดตัวมีค่าที่ต่ำลง แต่ในส่วนก่อสร้างอื่นก็ยังคงไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินได้ นอกจากนี้ ในรูปที่ 3.12 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยา พบว่า ในการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ยังคงไม่สามารถเห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนได้เช่นกัน แต่ในการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินทรายกับเห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวแปรผันตามกัน



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ

MRTA และ BMA



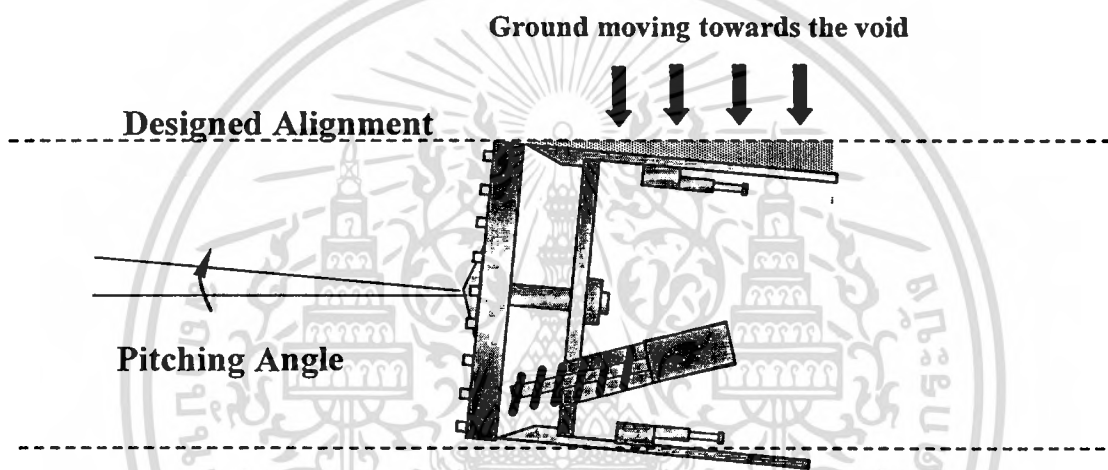
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตาม

สภาพทางธรณีวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

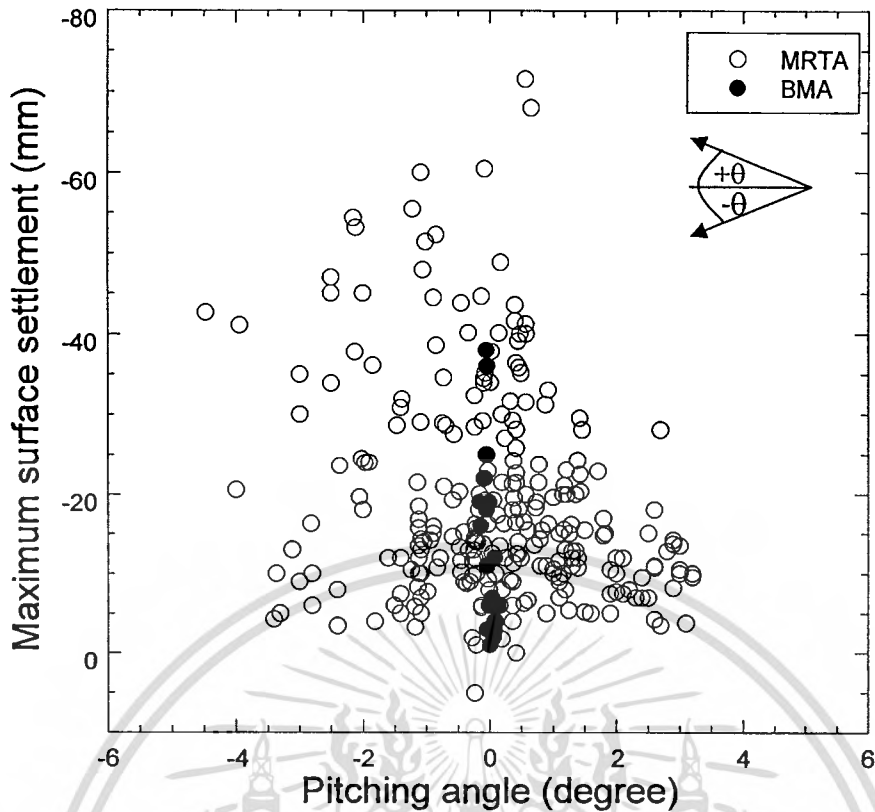
3.4.3 มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle)

การวางตำแหน่งของหัวเจาะแทนด้วยมุมก้มหรือมุมเงย ซึ่งจะแสดงให้เห็นแนวการเคลื่อนตัวที่แท้จริงของหัวเจาะในระหว่างที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ตามหลักทฤษฎีแนวการเคลื่อนตัวของหัวเจาะจะต้องวางแนวให้ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่ในทางปฏิบัตินั้น เป็นไปได้ยากที่จะรักษาระดับไว้ให้คงที่ได้ตลอดเวลา เพราะฉะนั้น เมื่อมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะมีการเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลให้เกิดได้ทั้งการทรุดตัวของผิวดินหรือการยกขึ้นของผิวดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเปลี่ยนแนวหัวเจาะที่มีมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะที่สูง ย่อมจะทำให้เกิดช่องว่างในปริมาณมากด้านหลังอุโมงค์ ซึ่งเป็นเหตุให้ดินโดยรอบเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ช่องว่างนั้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13

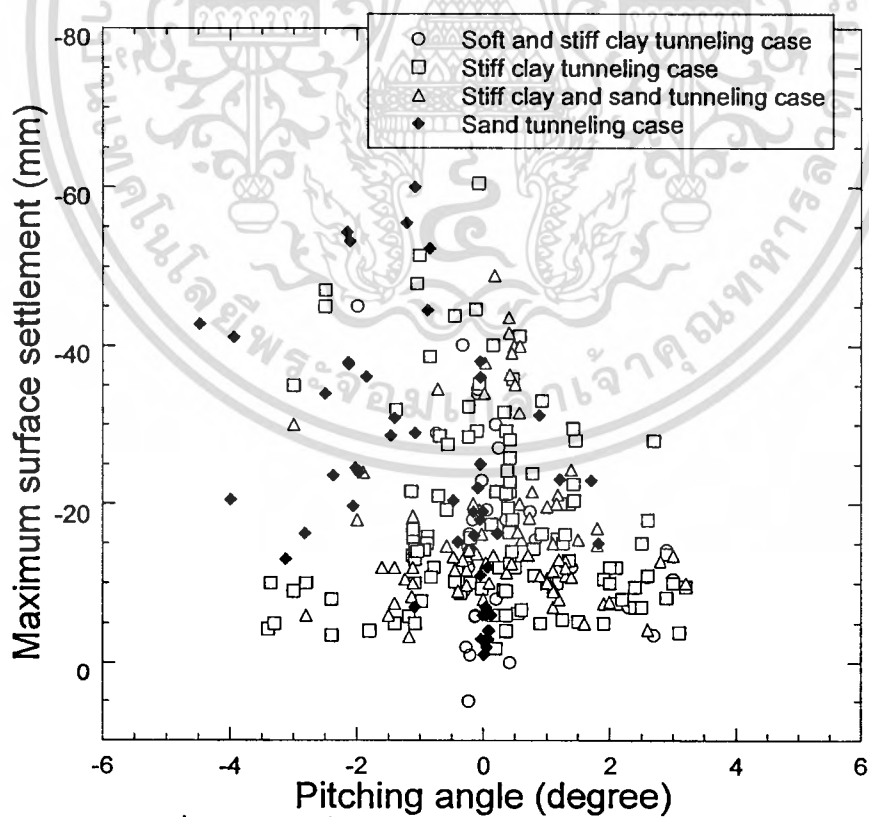


รูปที่ 3.13 การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ

ในทั้ง 2 โครงการ (โครงการ MRTA และ BMA) ได้ทำการบันทึกค่ามุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ทำการวัดด้วยหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement markers) ขณะหัวเจาะเคลื่อนผ่าน ซึ่งนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมก้มหรือมุมเงยและค่าการทรุดตัวของผิวดินในทั้ง 2 โครงการ และแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาไว้ในรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองก็ยังคงไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัด ถึงแม้ว่ามุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะจะมีอิทธิพลต่อการทรุดตัวของผิวดินก็ตาม โดยกรณีที่เป็นมุมเงยจะมีค่าเป็นบวกและมุมก้มมีค่าเป็นลบ ซึ่งมุมดังกล่าวเป็นมุมที่เทียบจากแนวราบไปยังแนวของหัวเจาะ



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting quality)

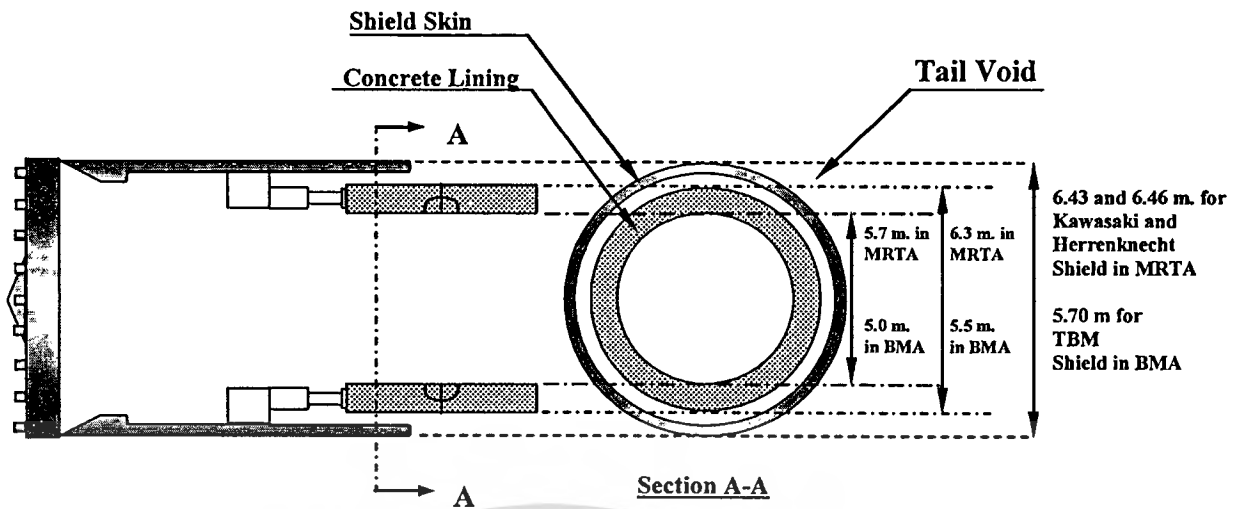
คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูนถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดขอบเขตการทรุดตัวของผิวดินจะประกอบไปด้วย ความดันของการฉีดน้ำปูน และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน ในขณะที่หัวเจาะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าจะทำให้เกิดช่องว่างบริเวณด้านหลังของหัวเจาะ โดยรอบของผนังอุโมงค์ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 3.16 ดังนั้น การฉีดน้ำปูนบริเวณช่องว่างด้านหลังที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินลงมาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว

ในทางปฏิบัติ “ความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure)” จึงต้องมีแรงดันที่สูงเพียงพอที่จะทำให้มีน้ำปูนมีแรงในการไปด้านทานการเคลื่อนที่ของดินที่จะลงมาสู่ช่องว่างที่เกิดขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.17 นอกจากนี้ อีกปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพในการฉีดน้ำปูนก็คือ “เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent grout filling)” ซึ่งจะต้องใช้ในปริมาณที่สูงมากกว่าปริมาณของช่องว่างที่เกิดขึ้นแสดงไว้ในรูปที่ 3.17 โดยค่าเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนหาได้จากสมการที่ 3-1

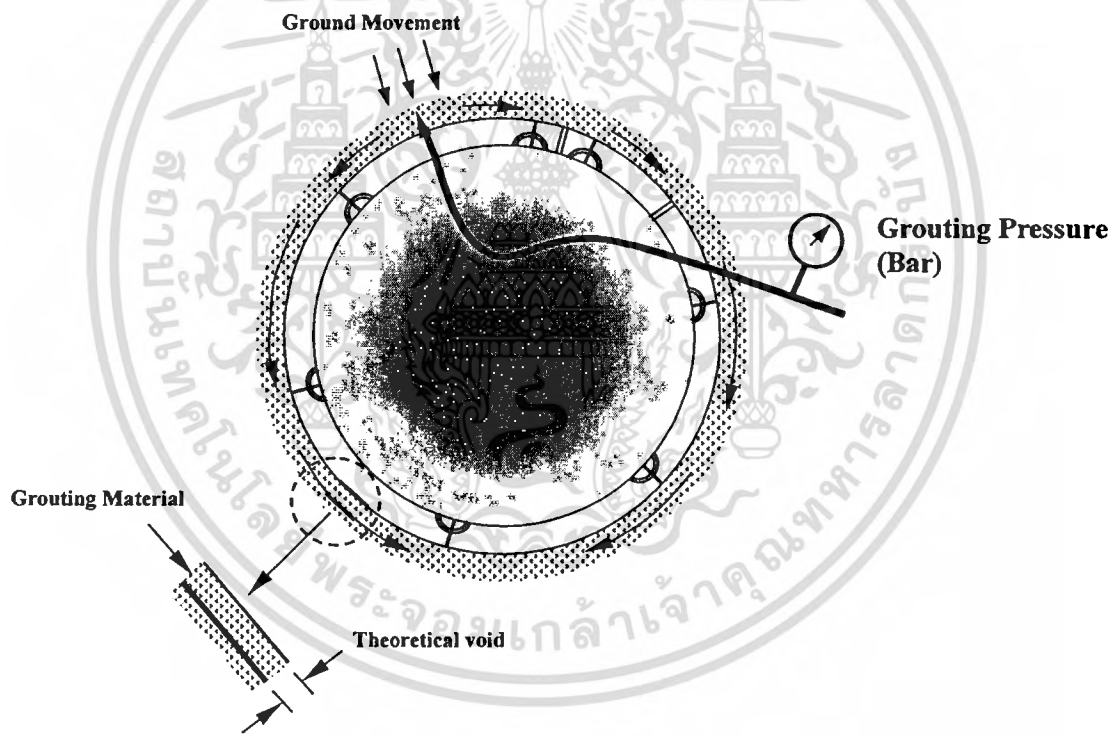
$$\text{เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรของน้ำปูนที่เติม} \times 100}{\text{ปริมาตรของช่องว่างที่เกิดขึ้น}} \quad (3-1)$$

คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูนที่มาพร้อมกับความดันของการฉีดน้ำปูน และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนที่มีค่าสูง สามารถที่จะลดปริมาณการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นได้

โดยทั่วไปการควบคุมคุณภาพการอัดฉีดน้ำปูนจะเป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งค่าความดันของการฉีดน้ำปูน และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ในระหว่างที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ โดยจากรูปที่ 3.18 และ 3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดินในทั้ง 2 โครงการ และแยกตามสภาพทางธรณีวิทยา ตามลำดับ พบว่า แม้ความดันของการฉีดน้ำปูนบางส่วนจะมีค่าคงที่ แต่ค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีความผันผวนหาความสัมพันธ์ที่แน่ชัดไม่ได้จากทั้ง 2 โครงการ นั่นอาจแสดงให้เห็นว่า การทรุดตัวของผิวดินอาจจะมีผลมาจากปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวอื่น แต่ในกรณีความดันของการฉีดน้ำปูนที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย จะเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ของทั้งสองค่าแปรผกผันกัน ในส่วนเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนที่บางส่วนมีค่าคงที่ ก็ยังคงต้องพบกับความสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอนต่อค่าการทรุดตัวเช่นเดียวกันในทั้ง 2 โครงการ (รูปที่ 3.20) แต่ในกรณีเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวแข็ง จะเห็นแนวโน้มความสัมพันธ์ของทั้งสองค่าดังกล่าวแปรผกผันกัน (รูปที่ 3.21)

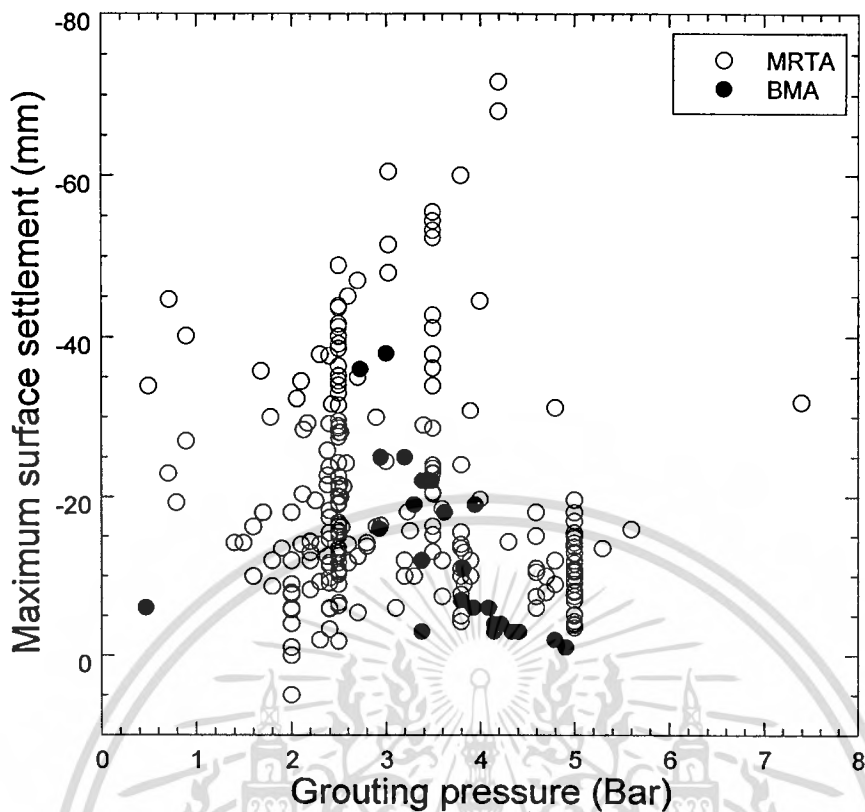


รูปที่ 3.16 ช่องว่างที่เกิดขึ้นหลังผนังอุโมงค์ (Tail void)

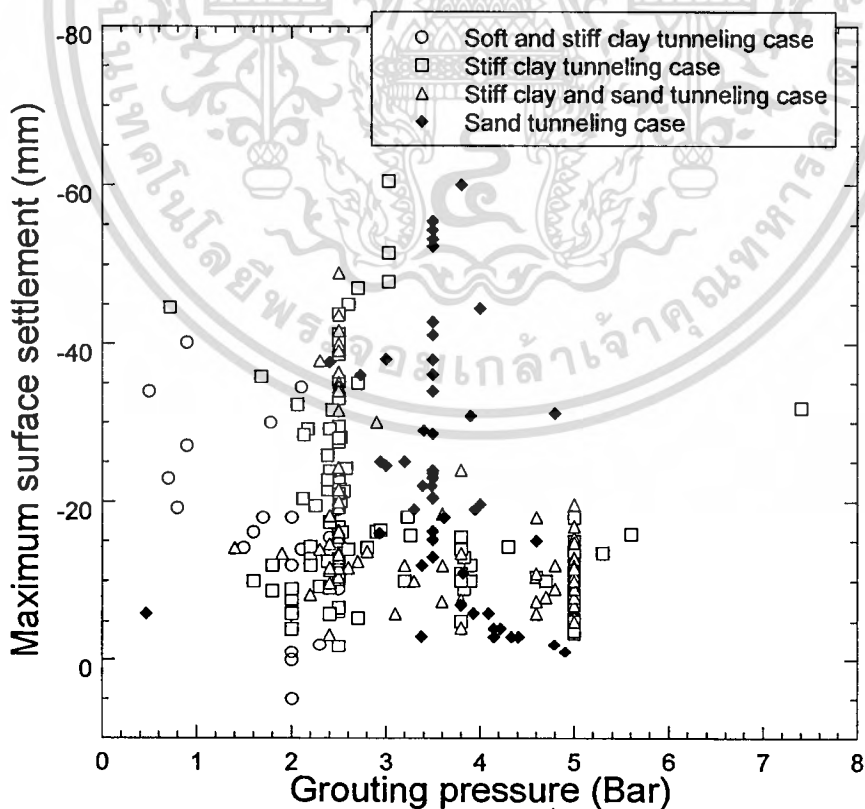


รูปที่ 3.17 ความดันของการฉีดน้ำปูนและเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



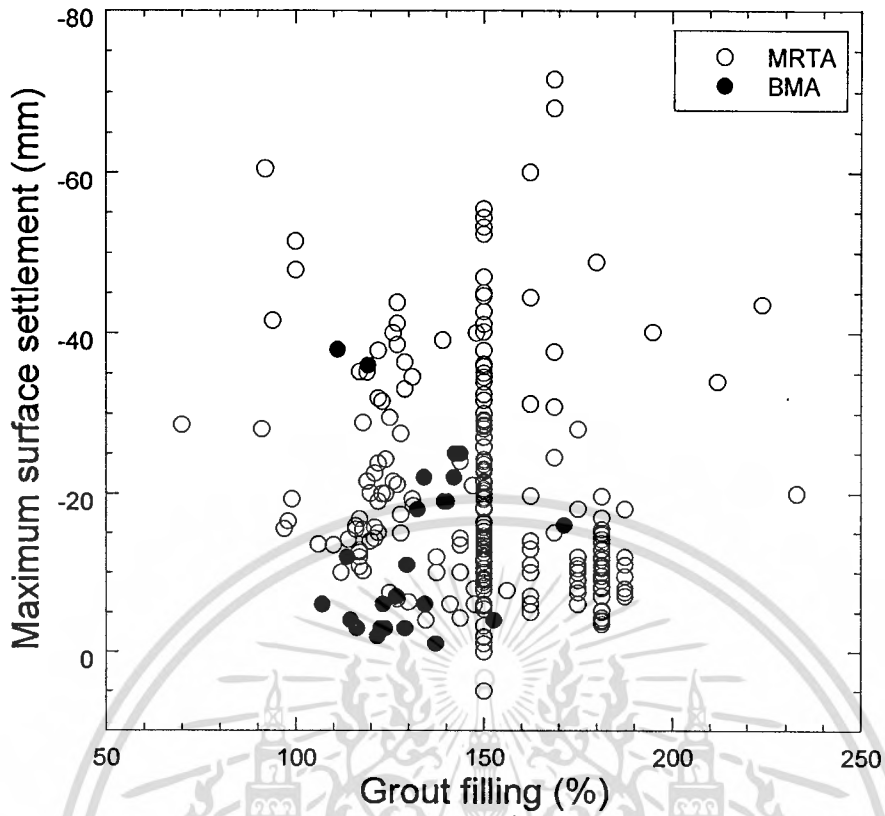
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA



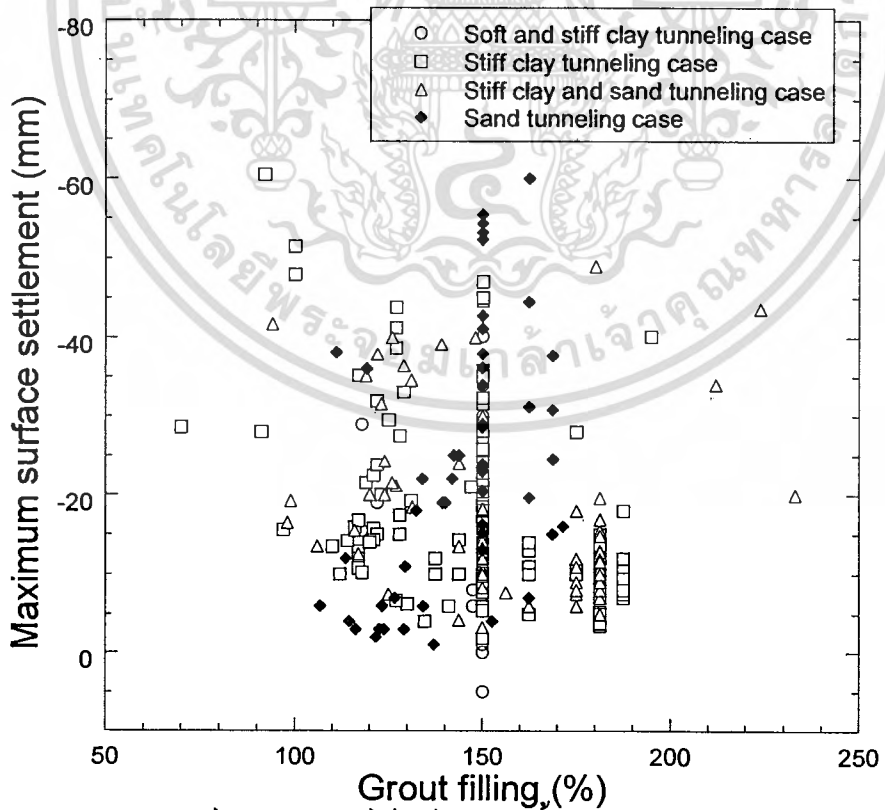
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตาม

สภาพทางธรณีวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดินในโครงการ MRTA และ BMA



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนและค่าการทรุดตัวของผิวดินแยกตาม

สภาพทางธรณีวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวบรวมข้อมูลทั้งหมดของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวประกอบไปด้วย ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะ จากโครงการรถไฟใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวต่างๆและค่าการทรุดตัวของผิวดิน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและปริมาณการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้น ซึ่งได้ผลสรุปที่ตรงกันจากแต่ละปัจจัยคือ ยังคงไม่สามารถสร้างความสัมพันธ์ที่แน่นอนของปัจจัยต่างๆต่อการทรุดตัวของผิวดินได้ เว้นแต่เพียงบางส่วนของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวหรือในบางกรณีที่แบ่งแยกย่อยตามสภาพทางธรณีวิทยาที่พอจะให้เห็นแนวโน้มของความสัมพันธ์อยู่บ้าง แต่ก็ยังเป็นเพียงแค่เล็กน้อยเท่านั้น นั่นก็แสดงให้เห็นว่า มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน แต่ในทางปฏิบัติไม่มีทางเป็นไปได้ ที่จะทำให้ปัจจัยอื่นๆคงที่ขณะที่ปัจจัยที่เราสนใจจะศึกษาเพียงปัจจัยเดียวมีค่าที่แปรผันได้ เพื่อนำไปศึกษาผลกระทบต่อการทรุดตัวของผิวดินในปัจจัยนั้น ยิ่งกว่านั้นแม้จะมีข้อมูลมากมายทำการเก็บบันทึก แต่การวิเคราะห์ก็มีขีดจำกัดในผลลัพธ์ อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลดังที่ได้กล่าวมา ด้วยเหตุนี้ จึงนำมาสู่วิธีการ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) ที่มีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อน โดยอาศัยหลักการเรียนรู้สู่ค่าผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

บทที่ 4

โครงข่ายประสาทเทียม

4.1 กล่าวนำ

พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสติปัญญาในการวิเคราะห์และความสามารถในการจดจำบางสิ่งบางอย่างเป็นเรื่องยาก แต่ถึงกระนั้นสิ่งมีชีวิตบางชนิดก็สามารถที่จะกระทำสิ่งเหล่านี้ได้อย่างง่ายดาย ยกตัวอย่างเช่น มนุษย์ที่มีความสามารถที่จะจดจำหลายสิ่งหลายอย่างที่เกิดขึ้นในอดีตรวมทั้งยังสามารถคาดการณ์สิ่งต่าง ๆ ล่วงหน้าจากประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้มา โดยอยู่ในหลักการของเหตุและผล ด้วยเหตุนี้ นักวิทยาศาสตร์จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบประสาทของมนุษย์ที่มีความซับซ้อน โดยทำการจำลองจากระบบวิธีการคิดของมนุษย์ จนท้ายที่สุดจึงนำมาซึ่งการประยุกต์ใช้หลักวิธีการใหม่ที่เรียกว่า “โครงข่ายประสาทเทียม” (Artificial neural networks, ANN)

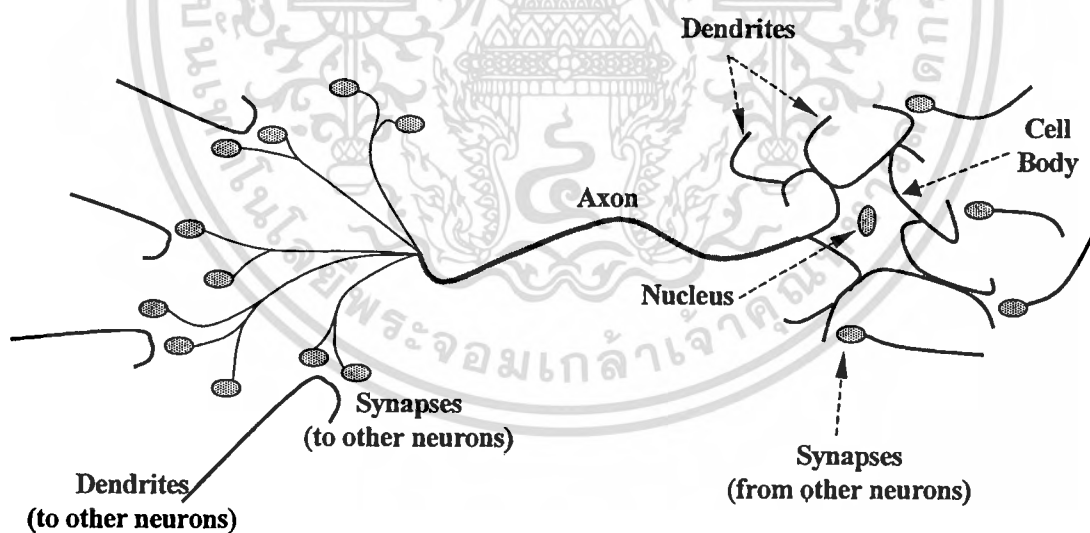
โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) ซึ่งมีโครงสร้างเชิงสถาปัตยกรรม และการทำงานคล้ายคลึงกับการทำงานของเซลล์สมอง หรือระบบประสาทของมนุษย์ โดยสามารถเรียนรู้และปรับตัวตามข้อมูลที่รับจากสภาพแวดล้อมภายนอก และให้คำตอบในปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างน่าเชื่อถือ [32-34] ซึ่งคุณสมบัติสำคัญของโครงข่ายคือ ความยืดหยุ่นในการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านเข้า (Input) กับผลลัพธ์ (Output) ที่มีความซับซ้อน และสามารถตอบสนองกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นได้ดี ทำให้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาทางจริงหลายด้านอย่างกว้างขวาง เช่น การเงินการธนาคาร อวกาศ ระบบป้องกันประเทศ ระบบรักษาความปลอดภัย การแพทย์ ระบบสื่อสาร ระบบขนส่ง การบันเทิง รวมทั้งงานทางด้านวิศวกรรม โดยนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการจดจำรูปแบบ (Recognition) การจัดกลุ่ม (Clustering) การจัดหมวดหมู่ (Classification) และการพยากรณ์ (Forecasting) เป็นต้น ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าโดยใช้การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Feedforward network with back propagation algorithm) มาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวและหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

4.2 ระบบประสาทของสิ่งมีชีวิตและเซลล์ประสาทเทียม

ระบบประสาทมีหน้าที่ควบคุมรักษาสมดุลภายในร่างกายให้คงที่ ระบบประสาทของมนุษย์เป็นระบบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งจะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neurons) ประมาณ 10^{11} เซลล์ และเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทตัวอื่นอีกประมาณ 10^4 เซลล์ ในแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

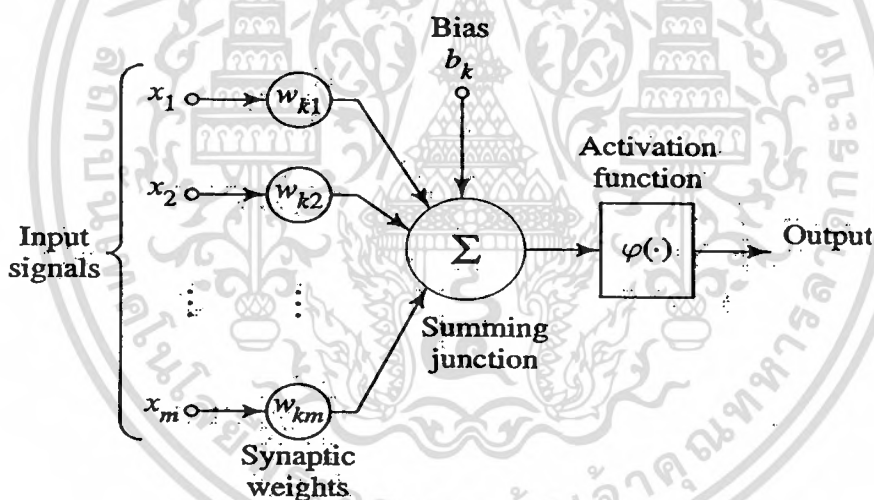
ละเซลล์ประสาทจะมีคุณลักษณะแตกต่างกันออกไปโดยมีการทำงานคล้ายกันคือ รับสัญญาณเข้าประมวลผล และส่งสัญญาณไฟฟ้าเคมีผ่าน ไปยังเซลล์ประสาทอื่น ระบบประสาทมียู่ด้วยกัน 3 ส่วน ประกอบไปด้วย 1) ระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system) 2) ระบบประสาทรับความรู้สึก (Sensory system) และ 3) ระบบประสาทมอเตอร์ (Motor system) โดยทั้ง 3 ส่วนดังกล่าว นั้น ระบบประสาทส่วนกลางจะทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่รับมาจากระบบประสาทรับความรู้สึก ซึ่งจะรับรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมรอบตัวและจะส่งข้อมูลไปยังระบบประสาทส่วนกลาง หลังจากนั้นประสาทส่วนกลางจะทำการประมวลผลแล้วก็จะส่งสัญญาณไปควบคุมสั่งการให้ระบบประสาทมอเตอร์ของอวัยวะแสดงผล (Effectors) ให้ทำงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งภายในและภายนอกร่างกาย จากรูปที่ 4.1 เซลล์ประสาทประกอบด้วยเดนไดรต์ (Dendrites) ซึ่งเป็นส่วนแขนงที่ขยายออกจากตัวเซลล์เพื่อรับสัญญาณจากเซลล์ประสาทอื่นที่ส่งมาทางจุดเชื่อมต่อที่เรียกว่าซินแนปส์ (Synapse) และปลายในการส่งกระแสประสาทเรียกว่าแอกซอน (Axon) เซลล์ประสาททำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกัน กระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรต์เข้าสู่ตัวเซลล์ (Cell body) ซึ่งจะเป็นตัวตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่นๆ ต่อหรือไม่ ถ้ากระแสประสาทแรงพอตัวเซลล์ก็จะกระตุ้นเซลล์อื่นโดยส่งผ่านทางแอกซอน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างเซลล์ประสาทชีวภาพ

แบบจำลองของเซลล์ประสาททางชีวภาพ หรือที่เรียกว่าเซลล์ประสาทเทียม (Artificial neuron) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญคือ หน่วย (Node) หรือ ยูนิต (Unit) ตัวแปรด้านเข้า (Input) ตัวแปรด้านออก (Output) และค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาททางชีววิทยาและเซลล์ประสาทเทียมดังนี้

- การประมวลผล จะเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อยคือ หน่วย (Node) หรือ ยูนิต (Unit) ซึ่งจำลองมาจากลักษณะการทำงานของตัวเซลล์
- การส่งสัญญาณระหว่างหน่วยด้วยส่วนที่เชื่อมติดกัน จำลองมาจากการเชื่อมต่อของเดนไดรต์ และแอกซอน
- แต่ละการเชื่อมต่อประกอบด้วยค่าน้ำหนักที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับอิทธิพลที่หน่วยจะได้รับจากหน่วยอื่นๆ ซึ่งจำลองมาจากซิแนปส์ โดยค่าน้ำหนักที่ได้รับจะทำหน้าที่เสมือนความรู้ที่ถูกรวบรวมไว้ใช้แก้ปัญหาเฉพาะอย่างของมนุษย์
- ภายในหน่วยมีฟังก์ชันที่ใช้ในการกำหนดสัญญาณด้านออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) หรือ ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างเซลล์ประสาทเทียม

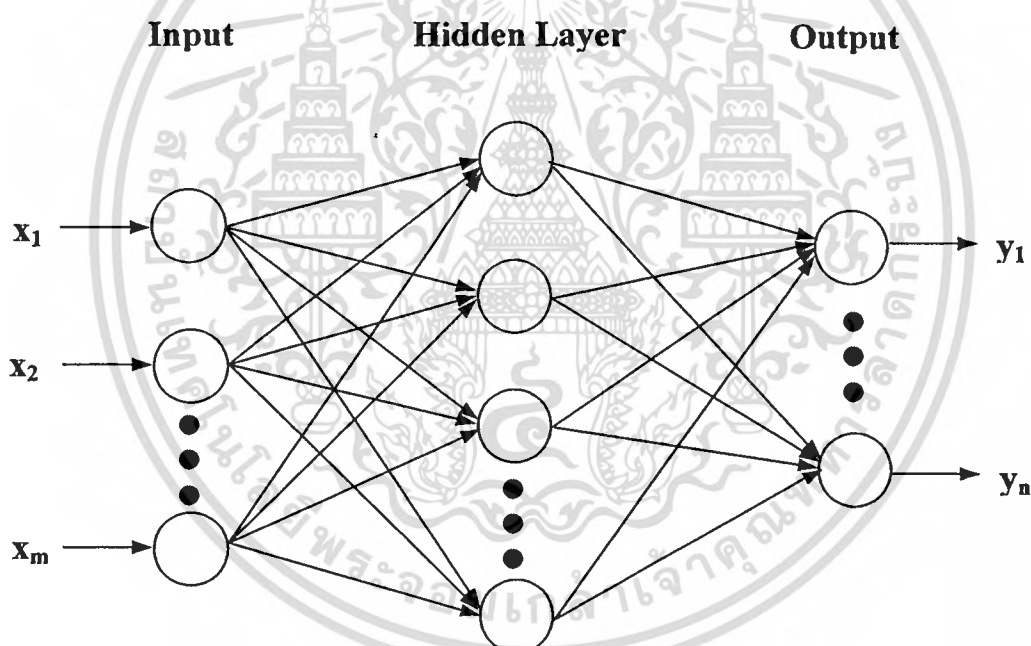
4.3 รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจำแนกตามลักษณะทางโครงสร้างออกได้เป็น 2 โครงข่าย คือ โครงข่ายแบบไปข้างหน้า (Feedforward network) และโครงข่ายแบบส่งค่ากลับ (Recurrent network) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 โครงข่ายแบบไปข้างหน้า (Feedforward network)

ในโครงข่ายแบบไปข้างหน้า (Feedforward network) หน่วยย่อย (Neurons) จะถูกจัดแบ่งออกไปตามชั้นต่างๆ ในส่วนการเคลื่อนที่ของสัญญาณจะส่งผ่านจากชั้นรับข้อมูล (Input layer) ไปสิ้นสุดที่ชั้นแสดงผล (Output layer) โดยหน่วยย่อยจะทำการเชื่อมโยงจากชั้นสู่ชั้น แต่จะไม่เชื่อมโยงภายในชั้นข้อมูลเดียวกัน โครงข่ายแบบไปข้างหน้าประกอบด้วย 1) โครงข่าย Multi-layer perceptron (MLP) 2) โครงข่าย Learning vector quantization (LVQ) 3) โครงข่าย Cerebellar model articulation control (CMAC) และ 4) โครงข่าย Group method of data handling (GMDH) โดยรูปที่ 4.3 จะแสดงรายละเอียดของโครงข่ายแบบไปข้างหน้าประเภท Multi-layer perceptron (MLP) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด อันเนื่องมาจากโครงข่ายรูปแบบนี้ไม่ค่อยมีความซับซ้อนมากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายรูปแบบอื่นๆ อีกทั้งโครงข่ายนี้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในการนำไปวิเคราะห์กับงานทางด้านวิศวกรรม

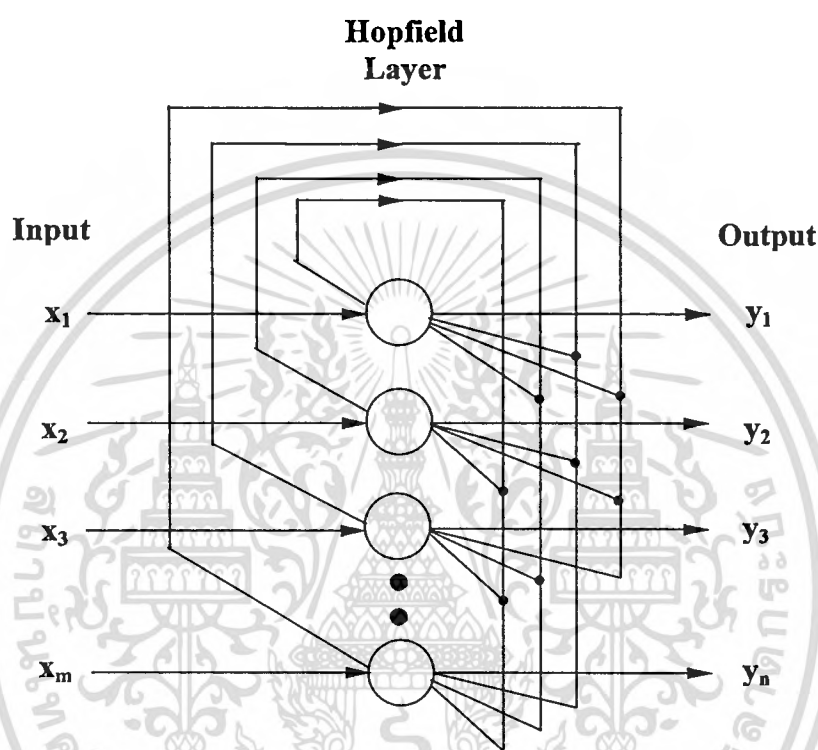


รูปที่ 4.3 โครงข่ายแบบไปข้างหน้าประเภท Multi-layer perceptron

4.3.2 โครงข่ายแบบส่งค่ากลับ (Recurrent network)

สำหรับโครงข่ายแบบส่งค่ากลับ (Recurrent network) ผลลัพธ์จากการประมวลผลของหน่วยย่อยบางหน่วยจะทำการป้อนค่ากลับไปยังหน่วยย่อยเดิมหรือหน่วยย่อยอื่นในชั้นประมวลผลเดียวกัน ดังนั้น การเคลื่อนที่ของสัญญาณก็จะมีทั้งทิศทางไปข้างหน้าและย้อนกลับ โครงข่ายแบบส่งค่ากลับ ประกอบด้วย 1) โครงข่าย Hopfield 2) โครงข่าย Elman และ 3) โครงข่าย Jordan โครงข่ายแบบส่งค่ากลับจะมีหน่วยความจำเป็นแบบ Dynamic นั่นคือ ผลลัพธ์จากหน่วยย่อยที่ส่งค่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับมายังส่วนรับข้อมูลเริ่มต้นของหน่วยย่อยจะมีค่าใกล้เคียงกันกับการประมวลผลค่าในส่วนการรับข้อมูลเริ่มต้นและส่วนแสดงผลก่อนหน้า โดยรูปที่ 4.4 จะแสดงรายละเอียดของโครงข่ายแบบส่งค่ากลับประเภท Hopfield ที่มีลักษณะพิเศษ คือ มีชั้นประมวลผลเพียงชั้นเดียว (ไม่มีชั้นแฝง) และแต่ละหน่วยย่อยในชั้นเดียวกันจะทำการเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน นั่นจึงแสดงให้เห็นว่าเป็นโครงข่ายแบบส่งค่ากลับ



รูปที่ 4.4 โครงข่ายแบบส่งค่ากลับประเภท Hopfield

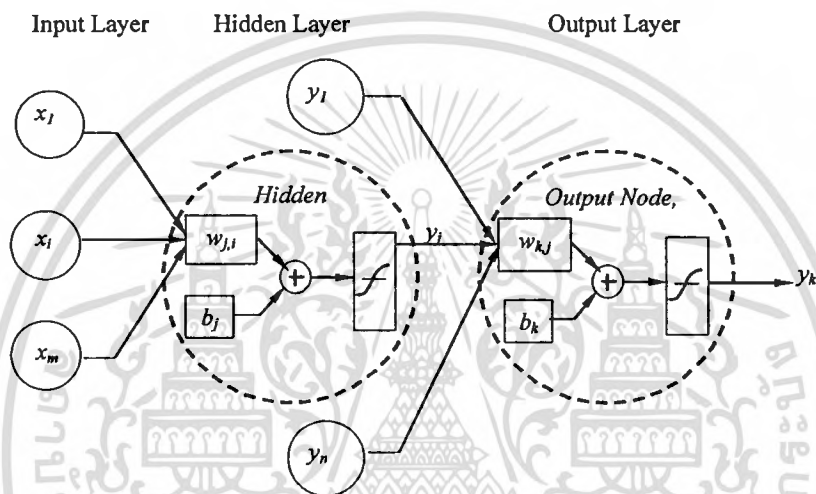
4.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว รูปแบบของโครงข่ายจะแบ่งออกเป็น 2 โครงข่าย คือ โครงข่ายแบบไปข้างหน้า และ โครงข่ายแบบส่งค่ากลับ แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า เนื่องจากโครงข่ายรูปแบบนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมได้เหมาะสมที่สุด โครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้าจะประกอบด้วยชั้นดังต่อไปนี้

- 1) ชั้นรับข้อมูล (Input layer)
- 2) ชั้นแฝง (Hidden layer) ซึ่งในโครงข่ายจะมีหรือไม่มีชั้นแฝงก็ได้ ถ้าไม่มีชั้นแฝงเรียกโครงข่ายว่า Single-layer feedforward network ส่วนโครงข่ายที่มีชั้นแฝงเรียกว่า Multilayer feedforward network ซึ่งจำนวนชั้นแฝงอาจมีจำนวน 1 ชั้น หรือมากกว่า
- 3) ชั้นแสดงผล (Output layer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในแต่ละชั้นจะประกอบด้วย หน่วยย่อย (Nodes) ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผล และเชื่อมต่อผลลัพธ์ไปยังชั้นถัดไป การเชื่อมต่อของแต่ละชั้นจะเป็นแบบถึงกันหมดจึงทำให้สัญญาณข้อมูลเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียว คือ เคลื่อนที่ไปข้างหน้าจากชั้นรับข้อมูลไปยังชั้นแสดงผล โดยจำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝงจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา ส่วนจำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลจะขึ้นกับจำนวนตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าที่จะพยากรณ์ และจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแสดงผลคือผลลัพธ์ที่ต้องการจากโครงข่าย โครงสร้างเบื้องต้นในการประมวลผลของหน่วยย่อยในแต่ละชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า แสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การประมวลผลของหน่วยย่อยในแต่ละชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้า

ค่าผลลัพธ์จากแต่ละหน่วย จะสามารถหาได้จากสมการที่ 4-1 และ 4-2 ดังนี้

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{j,i} \cdot x_i) + b_j\right) \quad (4-1)$$

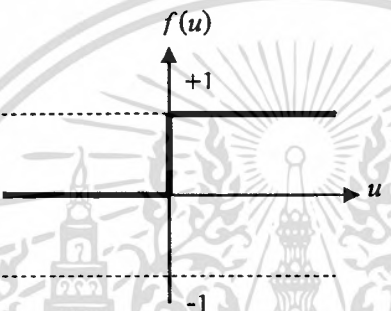
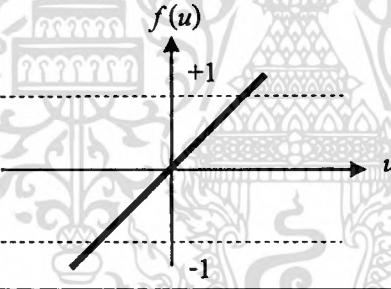
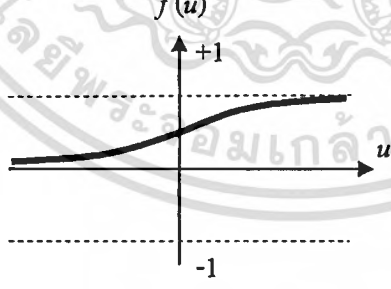
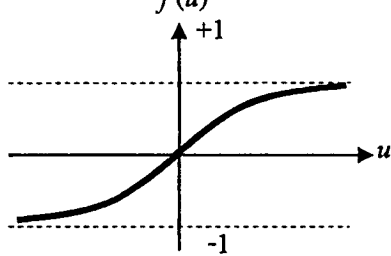
$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^n (w_{k,j} \cdot y_j) + b_k\right) \quad (4-2)$$

- โดยที่ x_i คือ ตัวแปรด้านเข้า (Input)
 y_j คือ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากชั้นแฝง (Hidden layer)
 y_k คือ ค่าผลลัพธ์จากชั้นแสดงผล
 w คือ ค่าน้ำหนัก (Weight)
 b คือ ค่าเบี่ยงเบน (Bias)
 $f(c)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ ฟังก์ชันกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) หรือ ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) จะเป็นตัวกำหนดค่าผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่หลายชนิด การที่จะเลือกฟังก์ชันชนิดใดขึ้นอยู่กับรูปแบบปัญหา, ลักษณะของผลลัพธ์ว่าเป็นค่าต่อเนื่องหรือไม่, ขอบเขตของผลลัพธ์ เป็นต้น แต่ในที่นี้จะเสนอเฉพาะฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้กันทั่วไป 3 ชนิด ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน	รูปแบบ	สมการฟังก์ชันถ่ายโอน	ขอบเขตของ $a(n)$
1) Threshold or step function		$f(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u \geq 0 \\ 0 & \text{if } u < 0 \end{cases}$	0, 1
2) Linear transfer function		$f(u) = w \cdot u + b$	$[-\infty, \infty]$
3) Sigmoid function 3.1) Log-sigmoid transfer function		$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-wu}}$	[0, 1]
3.2) Tangent - sigmoid transfer function		$f(u) = \frac{e^{wu} - e^{-wu}}{e^{wu} + e^{-wu}}$	[-1, 1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

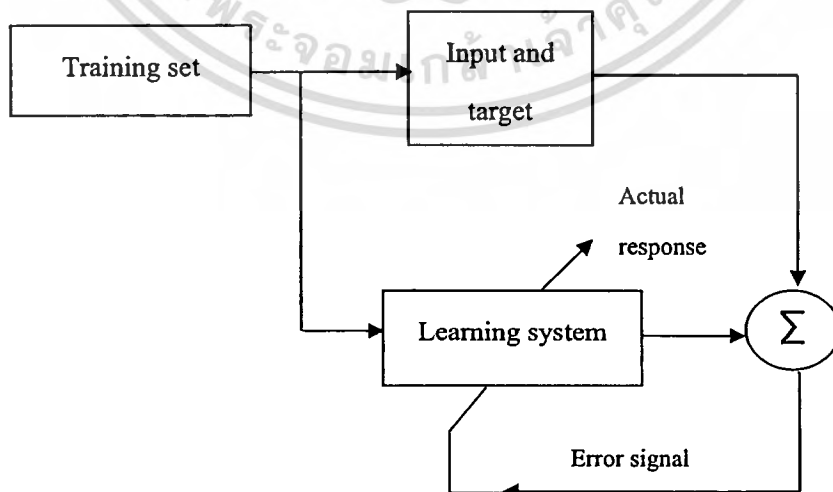
โดย ฟังก์ชัน Sigmoid ถือว่าเป็นฟังก์ชันที่มีข้อได้เปรียบกว่าฟังก์ชันชนิดอื่นๆ เนื่องจากกราฟมีความต่อเนื่องปราศจากช่องว่างใดๆ และสามารถหาอนุพันธ์ได้ทุกที่ของฟังก์ชัน และใน ส่วนค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) เป็นค่าที่ได้จากกระบวนการเรียนรู้ โดยกระบวนการเรียนรู้ที่นิยมใช้กับโครงข่ายประสาทเทียมแบบไปข้างหน้าคือการเรียนรู้ด้วยกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ (Backpropagation algorithm)

4.5 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละชนิดจะต้องมีวิธีการเรียนรู้ (Learning rule) เพื่อที่จะเป็นตัวกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักในการประมวลผลไปสู่ผลลัพธ์ของโครงข่ายนั้นๆ ซึ่งวิธีการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 2 รูปแบบ ดังนี้

4.5.1 การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised learning)

การเรียนรู้รูปแบบนี้ต้องมีชุดข้อมูลในการเรียนรู้ (Training set) ประกอบด้วย ตัวแปรด้านเข้า (Input) และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง (Target) เพื่อแสดงวัตถุประสงค์ที่แท้จริงในการประมวลผลของโครงข่ายนั้นๆ โดยหลักการเรียนรู้ด้วยวิธีนี้เริ่มจากการป้อนตัวแปรด้านเข้า (Input variable) ในชั้นรับข้อมูลของโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายทำการประมวลผล ไปสู่ผลลัพธ์ในที่นี้คือ ตัวแปรด้านออก (Output variable) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง เพื่อที่จะนำค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างผลลัพธ์ทั้งสองไปใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในการประมวลผลของโครงข่ายโดยอาศัยกฎการเรียนรู้ และวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) ดังรูปที่ 4.6 ตัวอย่างของการเรียนรู้รูปแบบนี้ ได้แก่ การเรียนรู้ด้วยกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ (Backpropagation algorithm) เป็นต้น



รูปที่ 4.6 แผนภาพการทำงานของ การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised learning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised learning)

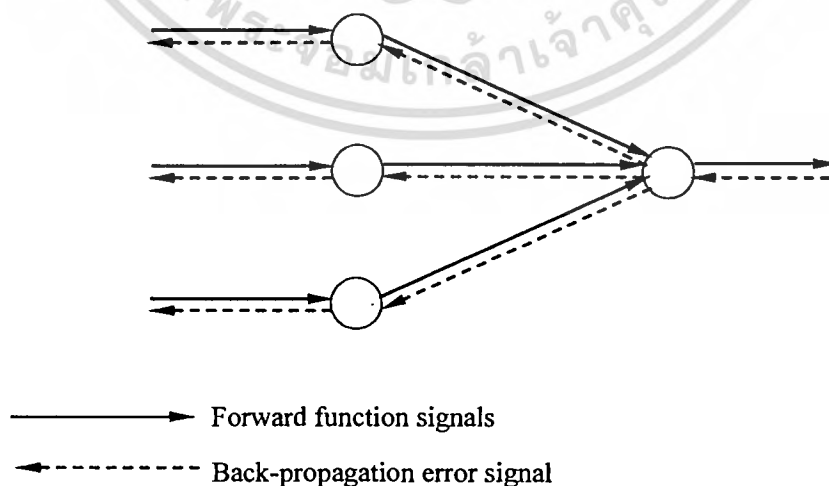
การเรียนรู้แบบนี้อาจจะนำหน้าจะถูกปรับให้สอดคล้องกับตัวแปรด้านเข้าเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริงในการเรียนรู้ของโครงข่ายดังแสดงแผนภาพการทำงานของ การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุมไว้ในรูปที่ 4.7 ซึ่งส่วนใหญ่การเรียนรู้รูปแบบนี้จะใช้ในงานจำแนก ประเภทของข้อมูลด้านเข้า (Clustering operation or network classifier) ถ้าข้อมูลด้านเข้าเป็น ประเภทเดียวกัน โครงข่ายก็จะให้ผลลัพธ์อย่างเดียวกัน ตัวอย่างของการเรียนรู้รูปแบบนี้ ได้แก่ Adaptive resonance theory และ Kohonen self-organizing map เป็นต้น



รูปที่ 4.7 แผนภาพการทำงานของ การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (Unsupervised learning)

4.6 การเรียนรู้ด้วยกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ (Feedforward back-propagation)

การเรียนรู้ด้วยกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับนั้น การเรียนรู้จะประกอบด้วย สัญญาณ 2 ส่วนในการประมวลผล ซึ่งถ้าผลการตอบรับที่แสดงออกมาแตกต่างจากค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง (Target output) จะมีการตรวจแก้ความผิดพลาดด้วยการปรับแก้ค่าน้ำหนัก (Weights) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) ในโครงข่ายให้ตรงกันด้วยค่าความผิดพลาด (Error value) ตามรอบการ คำนวณ (Epochs) โดยรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นส่วนหนึ่งของกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ ซึ่งจะประกอบด้วยสัญญาณ 2 ส่วน ดังนี้



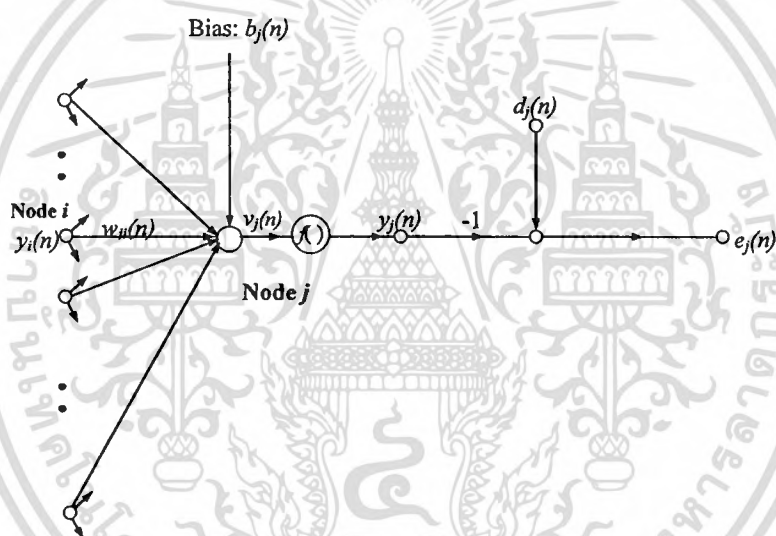
รูปที่ 4.8 แผนผังสัญญาณกระบวนการคำนวณแบบส่งไป-กลับ (Feedforward back-propagation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สัญญาณส่งไปข้างหน้า (*Forward function signal*) คือ สัญญาณส่งไปข้างหน้า (หน่วยต่อหน่วย) ตลอดโครงข่ายแล้วปรากฏออกมาที่การแสดงผล โดยผลลัพธ์สุดท้ายของโครงข่ายเป็นสัญญาณแสดงผล (*Output signal*)

2) สัญญาณส่งกลับ (*Back – propagation error signal*) คือ สัญญาณที่เกิดที่หน่วยย่อยในชั้นแสดงผลแล้วส่งกลับ (หน่วยต่อหน่วย) ตลอดโครงข่าย เพื่อปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนของโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งหน่วย j จะทำหน้าที่คำนวณค่าผลลัพธ์จากสัญญาณส่งจากหน่วย i ผลลัพธ์ที่ได้ คือ $y_j(n)$ ซึ่งจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าแตกต่างจากผลลัพธ์จริง คือ $d_j(n)$ ค่าความแตกต่างนี้ คือ $e_j(n)$ แทนด้วยสมการที่ 4-3

$$e_j(n) = d_j - y_j(n) \quad (4-3)$$



รูปที่ 4.9 โครงสร้างการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียม

$e_j(n)$ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแก้ไข $E(n)$ ดังสมการที่ 4-4

$$E(n) = \frac{1}{2} e_j^2(n) \quad (4-4)$$

ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ค่า $v_j(n)$ จะเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณจากสมการที่ 4-5

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^m w_{ji}(n) y_i(n) + b_j(n) \quad (4-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ w คือ ค่าน้ำหนัก และ สัญลักษณ์ m คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด สัญลักษณ์ $b_j(n)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนที่ใช้ในหน่วย j ดังนั้น ผลลัพธ์ของหน่วย j คือ

$$y_j(n) = f_j(v_j(n)) \quad (4-6)$$

Back-Propagation จะปรับค่าน้ำหนักจากสัญญาณแก้ไข $E(n)$ ด้วยวิธี Chain Rule ดังนี้

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \cdot \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (4-7)$$

โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าน้ำหนัก $\Delta w_{ji}(n)$ ตามอัตราการเรียนรู้ η

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (4-8)$$

การปรับค่าน้ำหนักนี้ จะใช้วิธี Gradient descent จนได้สัญญาณแก้ไขมีค่าน้อยสุดหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าผลลัพธ์จริง และในส่วนของกรู๊ปเข้าของการปรับค่าน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบนจะเร็วหรือช้า นอกจากรูปแบบวิธีการเรียนรู้แล้ว การกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบนก็ส่งผลด้วยเช่นกัน

4.7 ชั้นแฝงของโครงข่ายประสาทเทียม

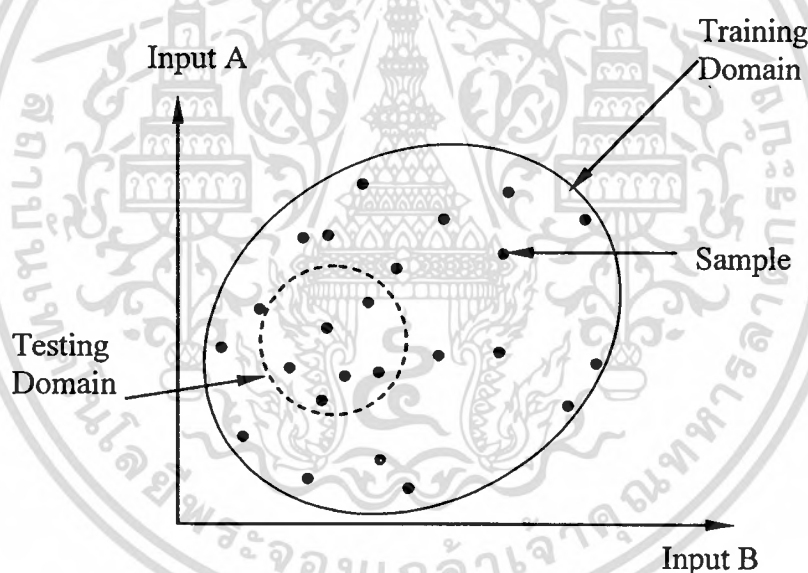
จำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝงจะมีผลต่อความสามารถในการประมวลผลของโครงข่าย พบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝงจะนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีวิธีการใดที่สามารถหาจำนวนที่เหมาะสมของจำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝงได้ และจำนวนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการประมวลผลที่ช้าลงในระหว่างการเรียนรู้ของโครงข่าย นอกจากนี้อาจทำให้สัญญาณแก้ไขอาจมีความยุ่งเหยิง เมื่อมีการกระจายของค่าถ่วงน้ำหนักมากเกินไป ดังนั้นจึงนิยมใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนของชั้นแฝงไม่เกิน 2 ชั้น

ด้วยเหตุนี้ จำนวนที่เหมาะสมของชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝง สามารถหาได้จากวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยเริ่มจากการเลือกชุดข้อมูลจำนวนหนึ่ง (ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์จากข้อมูลทั้งหมด) หลังจากนั้นทำการแบ่งข้อมูลที่เลือกมาเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training set) และ 2) ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing set) รูปแบบของโครงข่ายที่มีความ

แตกต่างกันของจำนวนชั้นแฝง หน่วยย่อยในชั้นแฝง และรอบการคำนวณ จะถูกนำมาทดสอบหาโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN) ในการแก้ปัญหาที่มาจากค่าความผิดพลาดที่แสดงออกมา

4.8 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training set)

ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training set) ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้มีความครอบคลุมในทุกขอบเขตของผลลัพธ์ และมีปริมาณข้อมูลเรียนรู้ที่มากเพียงพอในการแก้ปัญหานั้นๆ นำมาวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โครงข่ายก็จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ที่ดี และลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของผลลัพธ์ในชุดข้อมูลเดียวกันได้อีกด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การหาผลลัพธ์ของข้อมูลทดสอบ (Validation test) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างขอบเขตข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training set) ที่มีประสิทธิภาพ

ในส่วนการเลือกข้อมูลที่ใช้เรียนรู้จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN model) ในการกำหนดจำนวนของชั้นแฝง หน่วยย่อยในชั้นแฝง และรอบการคำนวณ เพื่อที่จะนำรูปแบบโครงข่ายที่เหมาะสมไปหาผลลัพธ์ในชุดข้อมูลที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ของโครงข่าย จะส่งผลกระทบต่อจำนวนของชั้นแฝง หน่วยย่อยในชั้นแฝง และรอบการคำนวณ [35] นั่นก็แสดงให้เห็นว่า ในทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จะต้องทำการหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมใหม่ทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ปัญหาการคำนวณมากเกินไป (Overfitting)

การหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN model) ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) มีความจำเป็นเพื่อที่จะลดปัญหาการคำนวณมากเกินไป (Overfitting) จากการที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความซับซ้อนมากเกินไป จนทำให้บางโครงข่ายแสดงผลของค่าผิดพลาดจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้มีค่าต่ำ แต่เมื่อนำไปทดสอบในข้อมูลที่ใช้ทดสอบผลลัพธ์กับมีค่าผิดพลาดที่สูงจนไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงมี 3 วิธีที่นำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาการคำนวณมากเกินไป ดังต่อไปนี้

1) การเพิ่มจำนวนของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลภายในโครงข่าย และในกรณีที่มีบางส่วนของข้อมูลมีความผิดพลาดในการเก็บรวบรวมข้อมูลก่อนที่จะนำมาทดสอบ

2) การจำกัดจำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝงให้มีความเหมาะสม ซึ่งในการประมวลผล ตัวแปรด้านเข้า และค่าน้ำหนักจะเป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันกระตุ้นที่จะนำมาสู่ผลลัพธ์ในแต่ละชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝง ดังนั้นหากมีจำนวนของชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝงในปริมาณที่มากเกินไป ก็อาจจะส่งผลทำให้โครงข่ายมีความซับซ้อนจนทำให้เกิดปัญหาการคำนวณมากเกินไป

3) การจำกัดจำนวนรอบการคำนวณ ในระหว่างรอบการคำนวณจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จะมีการส่งสัญญาณแก้ไขตามรอบการคำนวณ เพื่อไปกำหนดค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนที่เหมาะสมในการประมวลผลของโครงข่าย แต่หากมีรอบการคำนวณที่มากเกินไปแล้วอาจจะนำไปสู่ปัญหาการคำนวณมากเกินไปได้

บทที่ 5

การเก็บรวบรวมข้อมูลและการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

5.1 กล่าวนำ

การเก็บรวบรวมข้อมูลถือว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากข้อมูลที่จะใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมต้องมีความถูกต้อง โดยที่โครงข่ายจะนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) ถ้าข้อมูลที่ให้โครงข่ายมีความผิดพลาด ความสัมพันธ์ของปัจจัยก็จะผิดพลาดตามมา ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำในการพยากรณ์ นอกจากนี้การให้โครงข่ายประสาทเทียมได้รับการเรียนรู้ข้อมูลอย่างหลากหลายภายในขอบเขตที่เรียนรู้ก็จะส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจาก 2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ ได้แก่ โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project) [2] และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA Project) [36] รวมทั้งจะกล่าวถึงการนำข้อมูลที่ได้จากโครงการทั้งสองมาสร้างระบบฐานข้อมูลรายละเอียด จากนั้นจึงเข้าสู่วิธีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้น

5.2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานคร

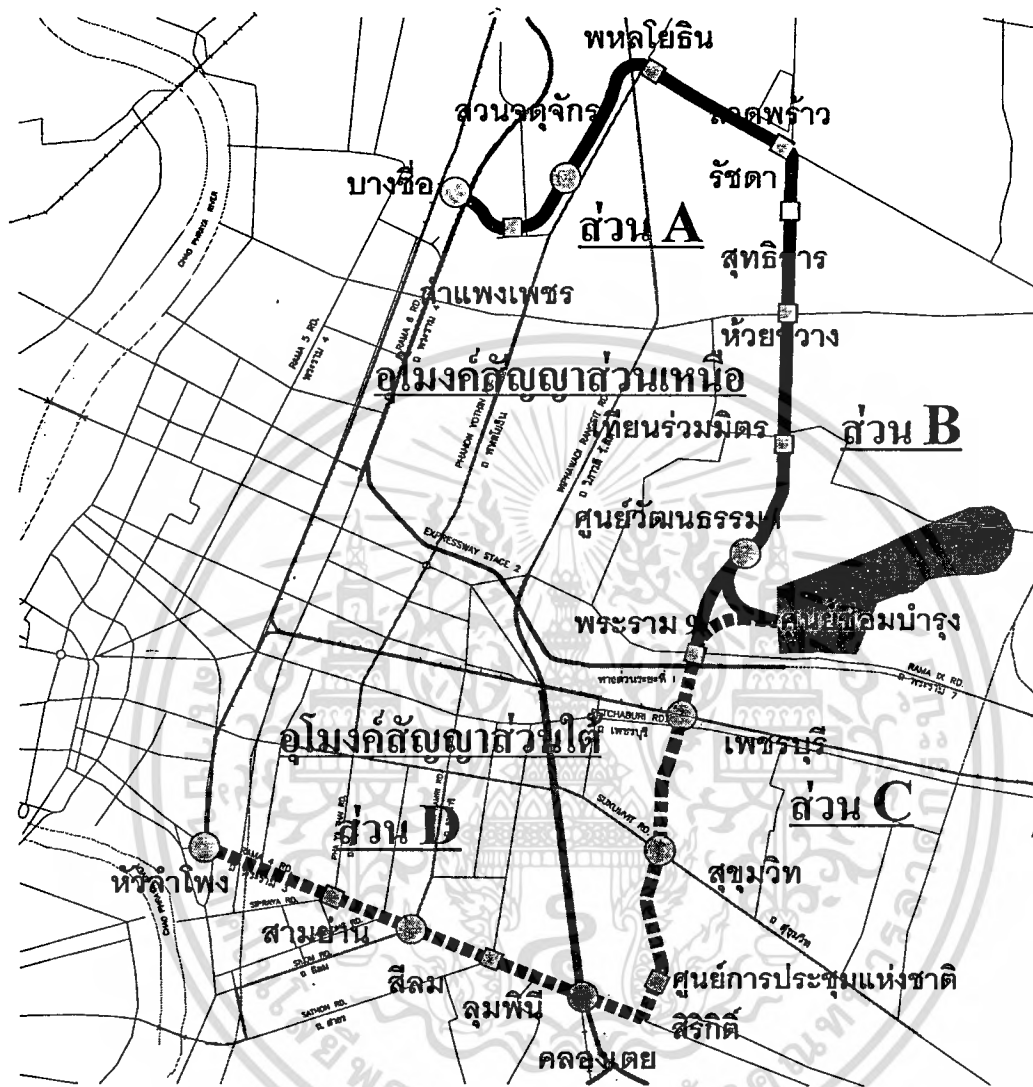
งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และการทรุดตัวผิวดินมาใช้ในการวิเคราะห์จาก 2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานครประกอบไปด้วย โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project) และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA Project) ซึ่งมีรายละเอียดของโครงการ ดังต่อไปนี้

5.2.1 โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA Project)

โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเป็นโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของกรุงเทพฯ โดยประกอบด้วยอุโมงค์คู่เสี้ยนผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.3 เมตร และเสี้ยนผ่านศูนย์กลางภายใน 5.7 เมตร มีความยาวทั้งสิ้น 20 กิโลเมตร เริ่มต้นจากสถานีหัวลำโพงไปสิ้นสุดที่สถานีบางซื่อ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 การก่อสร้างจะแบ่งเป็น 2 สัญญา คือ 1) อุโมงค์สัญญาส่วนเหนือ (North tunneling section) และ 2) อุโมงค์สัญญาส่วนใต้ (South tunneling section) โดยจะแบ่งส่วนก่อสร้างออกเป็น 4 ส่วนย่อยตามการขุดเจาะของแต่ละผู้ทำการก่อสร้าง คือ ส่วน A B C และ D แต่ละส่วนย่อยจะใช้หัวเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุล 2 หัวเจาะ รวมทั้งสิ้น 8 หัวเจาะ โดยหัวเจาะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจาะ 6 หัวที่ใช้ในส่วน A B และ C ผลิตโดยบริษัท Kawasaki ประเทศญี่ปุ่น และส่วน D ถูกผลิตโดยบริษัท Herrenknecht ประเทศเยอรมนี

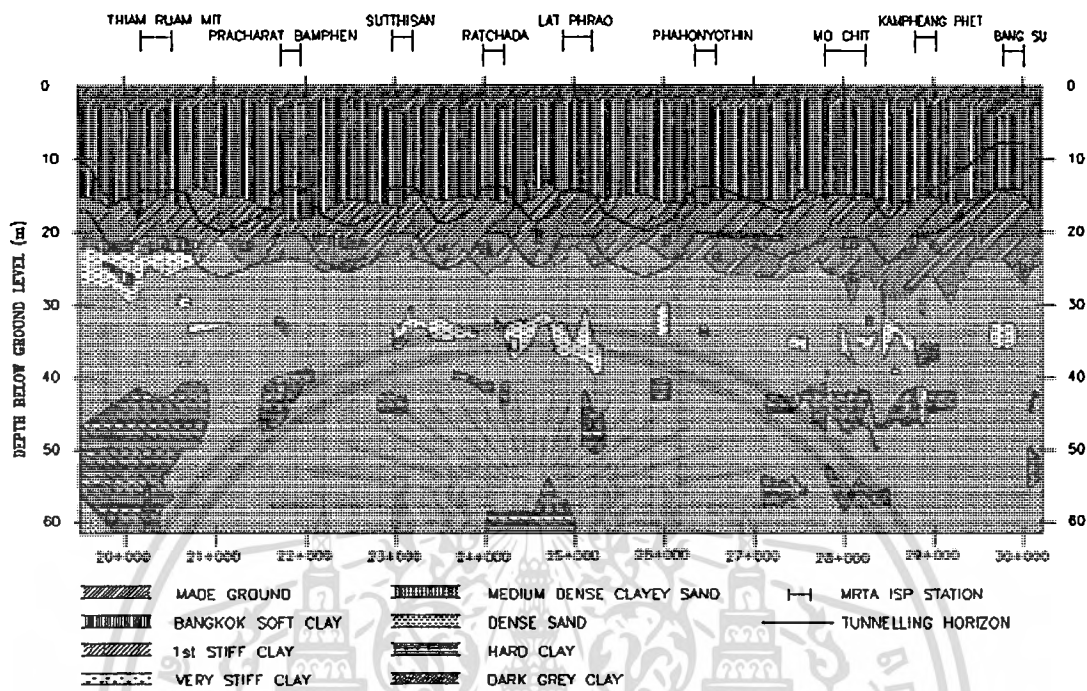


รูปที่ 5.1 แนวเส้นทางและการแบ่งส่วนก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

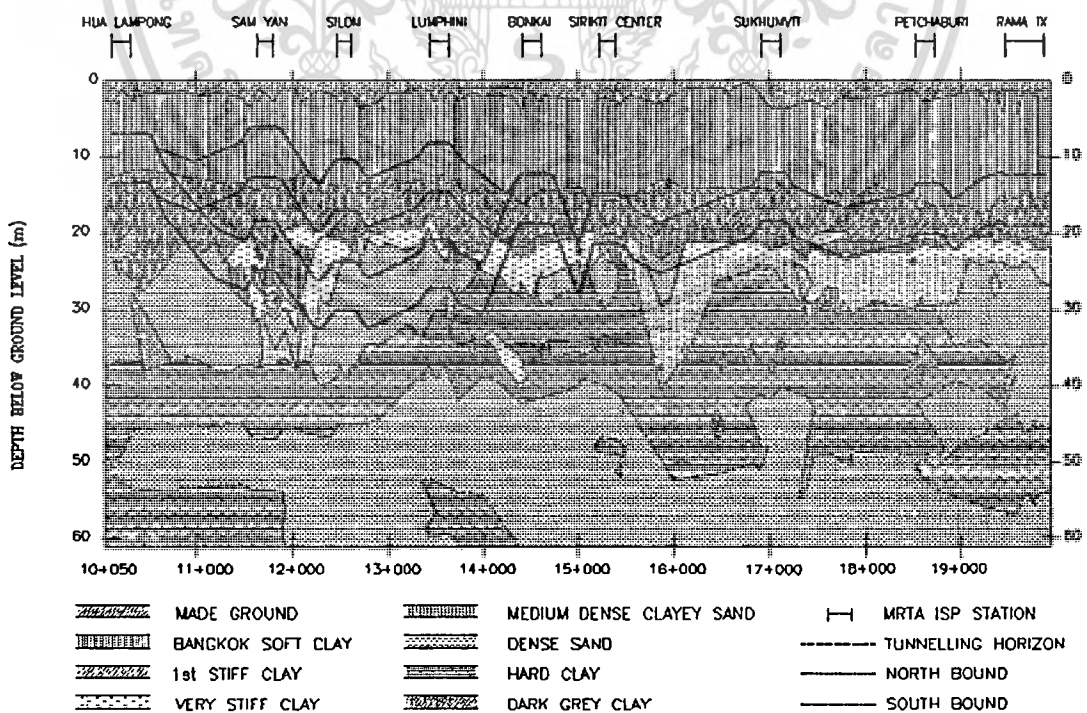
ในส่วนของสภาพทางธรณีวิทยาสำหรับโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้มีการสำรวจสภาพชั้นดินในบริเวณที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์และทำการทดสอบอย่างละเอียด พบว่า สภาพชั้นดินในโครงการ MRTA สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วน คือ อุโมงค์สัญญาส่วนเหนือ และ อุโมงค์สัญญาส่วนใต้ ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ สำหรับอุโมงค์สัญญาส่วนเหนือ คือ จากสถานี เทียนร่วมมิตร ไปสิ้นสุดที่สถานีบางซื่อ สภาพของชั้นดินของส่วนเหนือมีความสม่ำเสมอของชั้นดินเหนียวอ่อนรองรับด้วยดินเหนียวแข็งตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ซึ่งในอุโมงค์สัญญาส่วนเหนือนี้ อุโมงค์ส่วนใหญ่ขุดเจาะอยู่ภายในชั้นดินเหนียวแข็ง คือ ระยะความลึกของอุโมงค์วัดจากผิวดินถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ประมาณ 15-25 เมตร แต่ก็มีส่วนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นทราย สำหรับอุโมงค์สัญญาณส่วนใต้แนวเส้นทางของอุโมงค์ส่วนใหญ่อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง อย่างไรก็ตามในบางส่วนที่ต่ำลงไปจะขุดเจาะภายในชั้นทรายดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 สภาพชั้นดินของอุโมงค์สัญญาณส่วนเหนือ

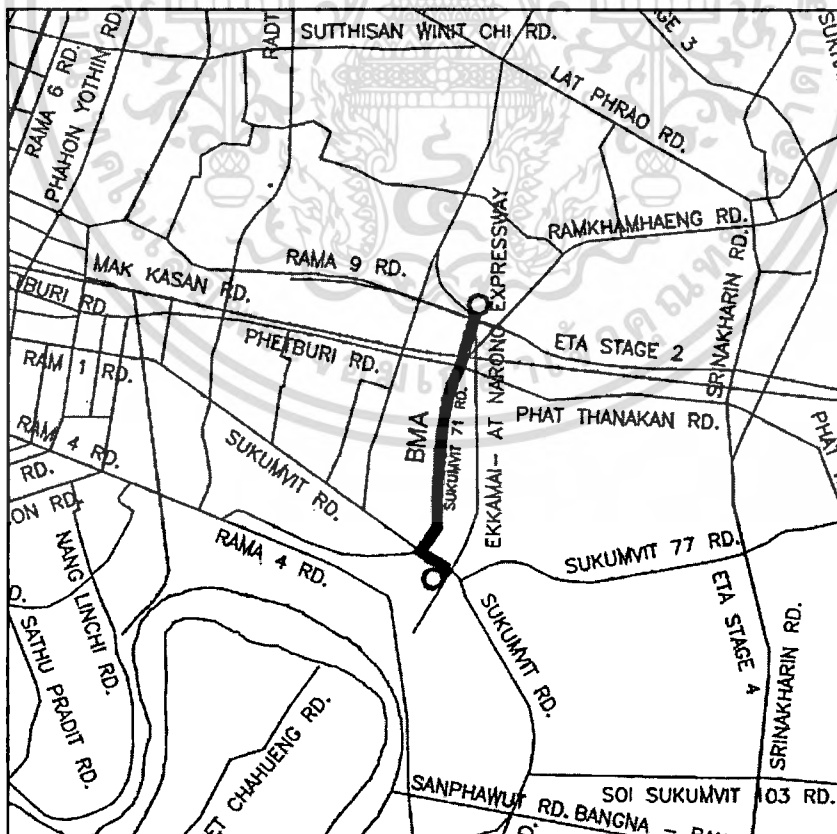


รูปที่ 5.3 สภาพชั้นดินของอุโมงค์สัญญาณส่วนใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA Project)

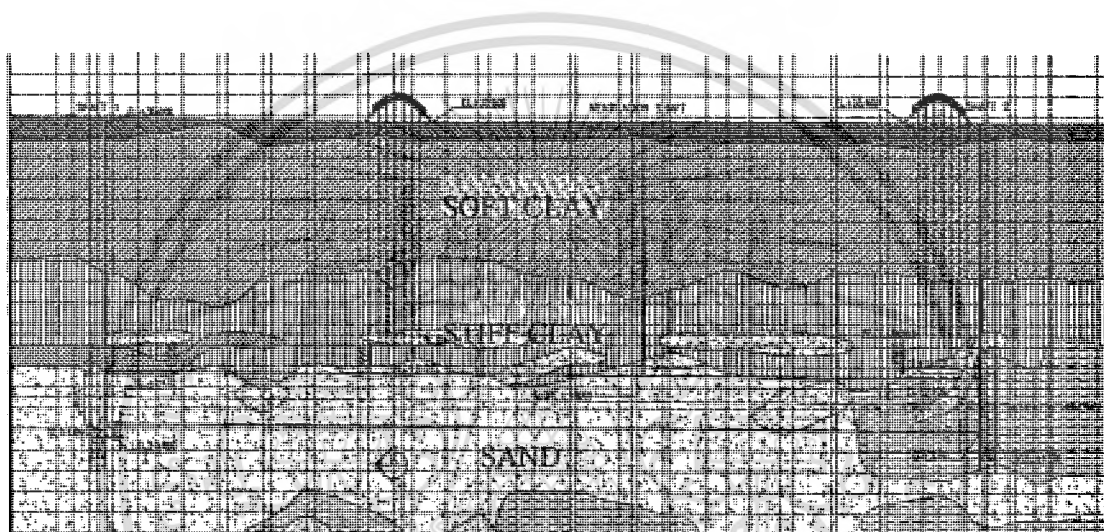
โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project) เป็นโครงการที่อยู่ในความควบคุมของสำนักระบายน้ำกรุงเทพมหานคร เพื่อหาทางป้องกันและแก้ไขปัญหาน้ำท่วมในเขตห้วยขวาง บางกะปิ บึงกุ่ม ลาดพร้าว และสะพานสูง จากแนวเส้นทางการระบายน้ำเดิม คือ คลองลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยารวมระยะทั้งสิ้น 25 กม. ใช้ระยะเวลาประมาณ 2-3 วัน เพื่อลดระดับน้ำ 10-15 ซม. นำมาซึ่งการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาที่สถานีสูบน้ำพระโขนง เพื่อทำการระบายน้ำผ่านอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.0 ม. โดยมีปล่องอุโมงค์ (Shaft) รับน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ม. ลึก 35 ม. บริเวณบึงพระราม 9 และผันน้ำผ่านอุโมงค์ที่ระดับความลึก 27 ม. เป็นระยะทางประมาณ 5.3 กม. ความลาดเอียง 1:10000 ไปยังสถานีสูบน้ำพระโขนง ที่มีปล่องอุโมงค์รับน้ำและสถานีสูบน้ำ โดยรูปที่ 5.4 แสดงแนวเส้นทางของอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่คลองพระโขนง อุโมงค์ระบายน้ำเป็นอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete) ออกแบบให้เป็นลักษณะคาคออุโมงค์แบบชิ้นส่วน (Segmental lining) ประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวน 6 ชิ้น (5 ชิ้นหลัก + 1 ชิ้น Key) มีความหนาของชิ้นส่วนคาคออุโมงค์เท่ากับ 27.5 ซม.



รูปที่ 5.4 แนวเส้นทางโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำ

เจ้าพระยา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะชั้นดินจากการเจาะสำรวจทั้งจากอุปกรณ์ภาคสนามและการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้ดำเนินการไปเพื่อการวิจัยตลอดแนวเส้นทางของโครงการด้วยวิธี Boring เพื่อเก็บตัวอย่างดินแบบไม่รบกวน (Undisturbed sample) ในดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง และเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวน (Disturbed sample) พร้อมทดสอบ Standard penetration test (SPT) ในชั้นดินเหนียวแข็ง ดินดาน และชั้นทราย นอกจากนี้ยังทำการทดสอบค่าแรงเฉือนในสนาม (Field vane shear test) ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางตลอดแนวเส้นทาง เนื่องจากแนวเส้นทางจะทำการเจาะอุโมงค์ผ่านคลองและถนน พบว่า ลักษณะสภาพทางธรณีวิทยาของโครงการนี้ทำการก่อสร้างในชั้นทรายเป็นส่วนใหญ่แสดงไว้ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 สภาพชั้นดิน โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

5.3 ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดิน

ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดิน มีทั้งหมด 287 ชุดข้อมูล แบ่งเป็นจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล 263 ชุดข้อมูล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา 24 ชุดข้อมูล ในกรณีที่แบ่งตามสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ก็สามารถแบ่งออกได้เป็นการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง 33 ชุดข้อมูล ชั้นดินเหนียวแข็ง 118 ชุดข้อมูล ชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย 80 ชุดข้อมูล และชั้นดินทราย 56 ชุดข้อมูล ซึ่งการเก็บรวบรวมข้อมูลในแต่ละชุดข้อมูลก็จะประกอบไปด้วย ปัจจัยลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ ปัจจัยสภาพทางธรณีวิทยา ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวผิวดิน โดยมีรายละเอียดของข้อมูลดังต่อไปนี้

5.3.1 ข้อมูลลักษณะทั่วไปของอุโมงค์

ข้อมูลลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ประกอบด้วย ความลึกของอุโมงค์ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ โดยที่การเก็บรวบรวมข้อมูลความลึกของอุโมงค์ จะทำการวัดระยะจากผิวดินถึงเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ในที่มีหน่วยเป็นเมตร ลำดับต่อมาคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์จะทำการวัดระยะจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของผนังอุโมงค์ในที่มีหน่วยเป็นเมตร และท้ายสุดคือ ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์จะทำการวัดระยะจากขอบนอกของกำแพงปิด (Diaphragm wall) ไปจนถึงตำแหน่งของวงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ (Ring number) ที่พิจารณา

5.3.2 ข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยา

ข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาประกอบด้วย ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ และความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ โดยที่การเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยาจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ พบว่า ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์สามารถแบ่งประเภทของชั้นดินออกได้เป็น ชั้นดินเหนียวอ่อน ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทราย ลำดับต่อมา ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์สามารถแบ่งประเภทของชั้นดินออกได้เป็น ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทราย ในส่วนความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์แทนด้วยสมการที่ 5-1

$$\text{ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์} = \text{ระดับน้ำใต้ดิน} - \text{ความลึกของอุโมงค์วัดระยะจากผิวดินถึงส่วนล่างสุดของอุโมงค์} \quad (5-1)$$

ด้วยเหตุนี้ ในกรณีที่ค่าความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์มีค่าเป็นบวก แสดงว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าอุโมงค์ ในทางตรงกันข้ามหากค่าความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์มีค่าเป็นลบ แสดงว่า ระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงกว่าอุโมงค์

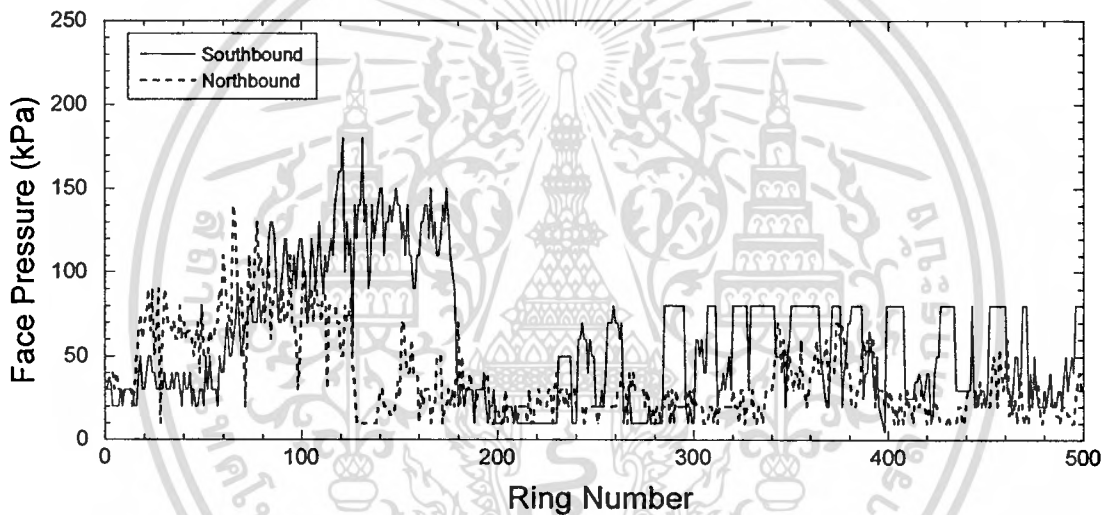
5.3.3 ข้อมูลการควบคุมหัวเจาะ

ข้อมูลการควบคุมหัวเจาะจะมีการบันทึกในแต่ละตำแหน่งของวงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ (Ring number) ตลอดแนวเส้นทางก่อสร้างอุโมงค์ ในที่นี้จะประกอบไปด้วยความดันหน้าหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (มุมที่มีค่าเป็นลบ หมายถึง มุมก้ม และมุมที่มีค่าเป็นบวก หมายถึง มุมเงย) ความดันของการฉีดน้ำปุ๋ย และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปุ๋ย

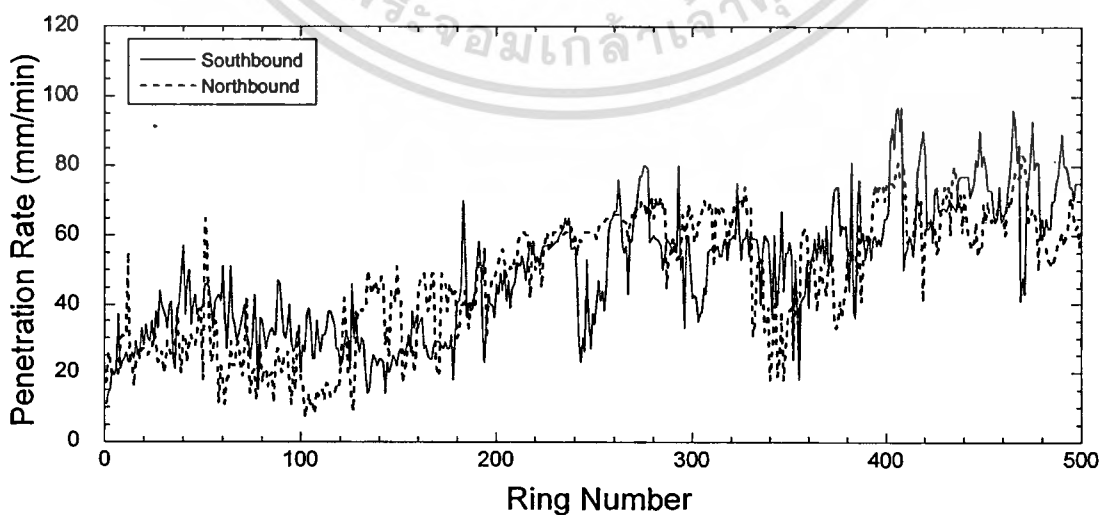
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้แสดงการบันทึกบางส่วนของข้อมูลการควบคุมหัวเจาะในแต่ละตำแหน่งของ วงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ไว้ในรูปที่ 5.6 ถึงรูปที่ 5.10 สำหรับโครงการ MRTA และรูปที่ 5.11 ถึงรูปที่ 5.15 สำหรับโครงการ BMA

นอกจากนี้ การพิจารณาข้อมูลการควบคุมหัวเจาะเป็นสิ่งสำคัญเพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลที่จะเกิดขึ้น ในการที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้น ข้อมูลการควบคุมหัวเจาะในแต่ละตำแหน่งของวงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ (Ring number) ที่มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement marker) ตามแนวศูนย์กลางอุโมงค์บริเวณเหนือผิวดิน จึงมีการนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจากตำแหน่งเดิมของวงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ออกไปจากตำแหน่งก่อนและหลังของวงแหวนกันดินรอบผนังอุโมงค์ ± 10 ตำแหน่ง ก่อนที่จะนำข้อมูลมาใช้ในการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

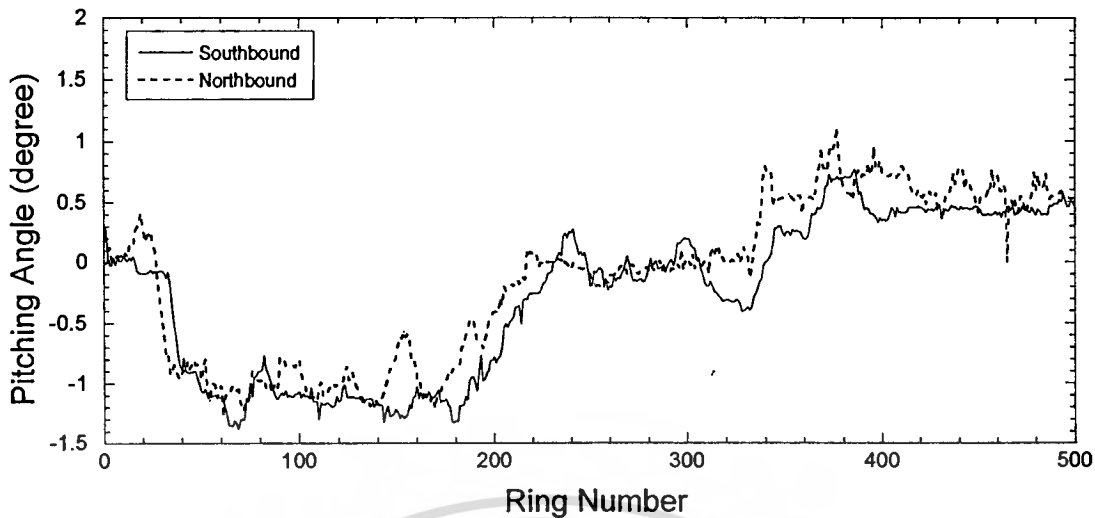


รูปที่ 5.6 ข้อมูลความดันหน้าหัวเจาะ โครงการ MRTA

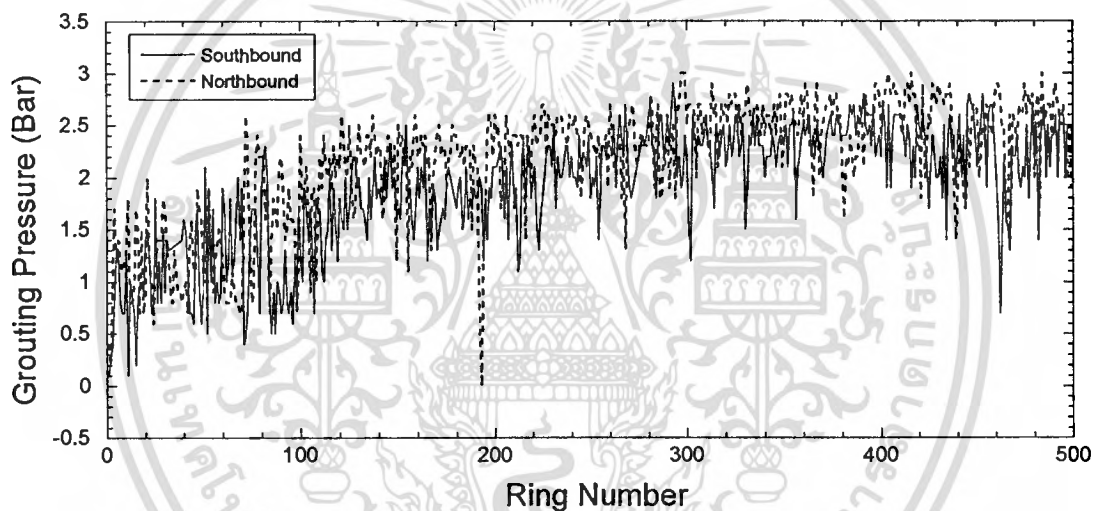


รูปที่ 5.7 ข้อมูลความเร็วขณะขุดเจาะ โครงการ MRTA

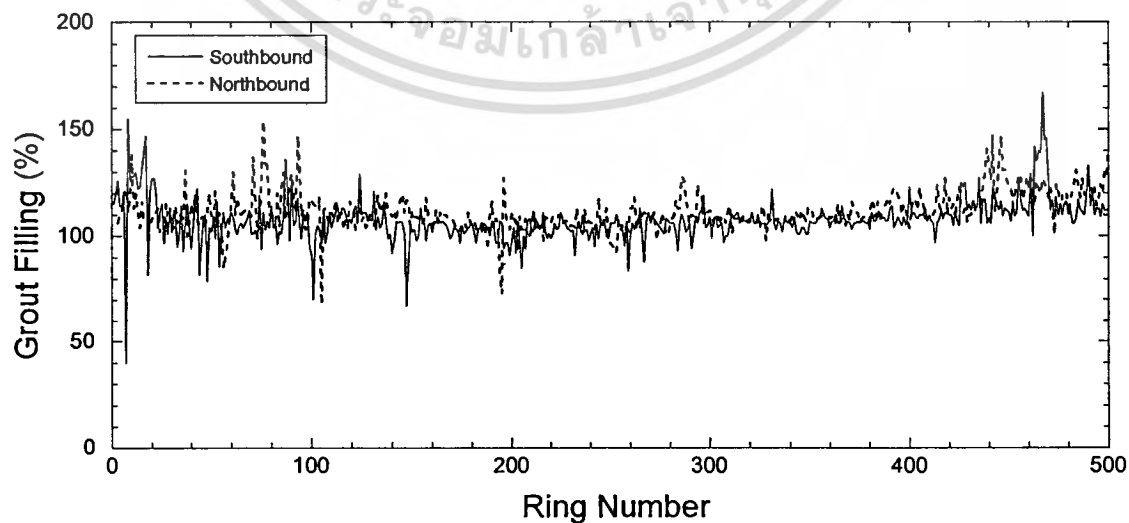
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ข้อมูลมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ โครงการ MRTA

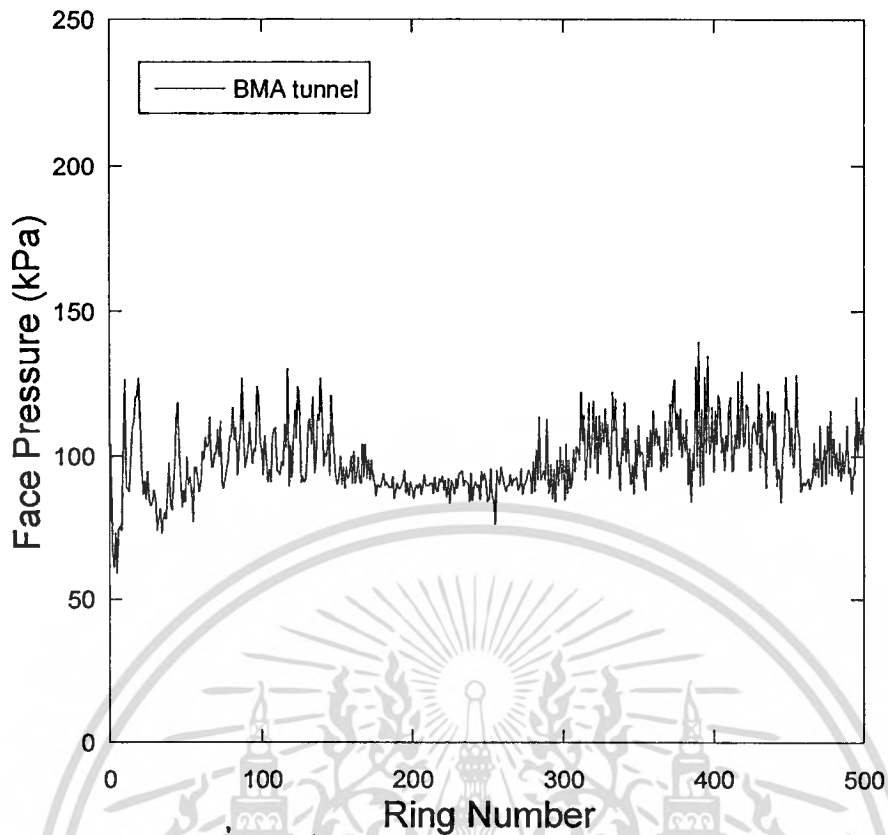


รูปที่ 5.9 ข้อมูลความดันของการฉีดน้ำปูน โครงการ MRTA

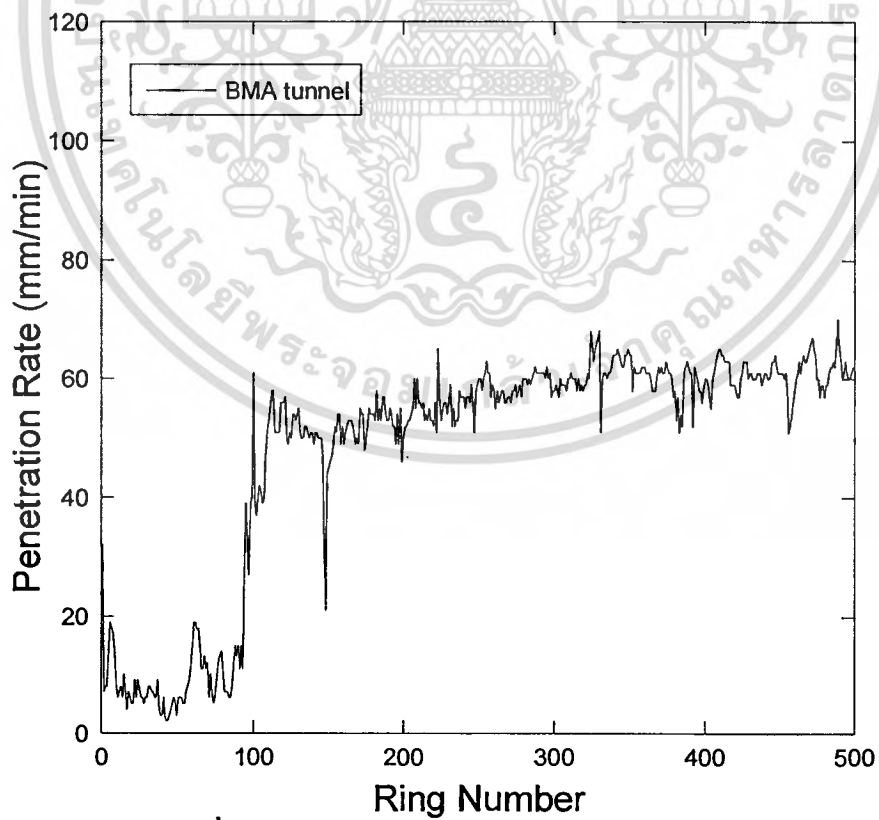


รูปที่ 5.10 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน โครงการ MRTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการรื้อถอนเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

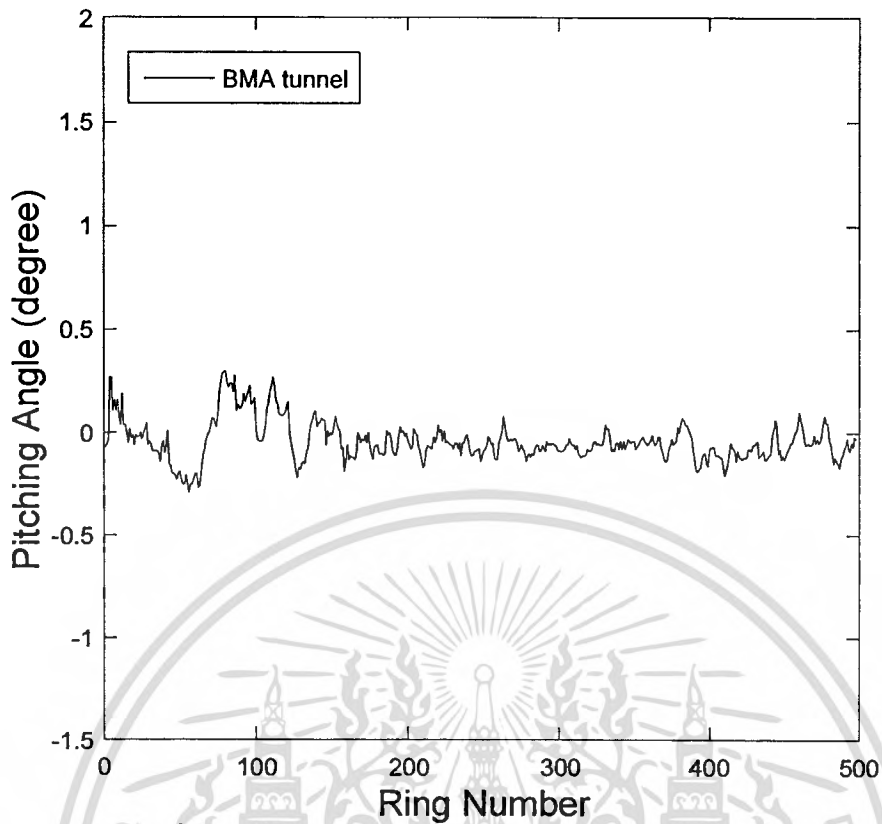


รูปที่ 5.11 ข้อมูลความดันหน้าหัวเจาะ โครงการ BMA

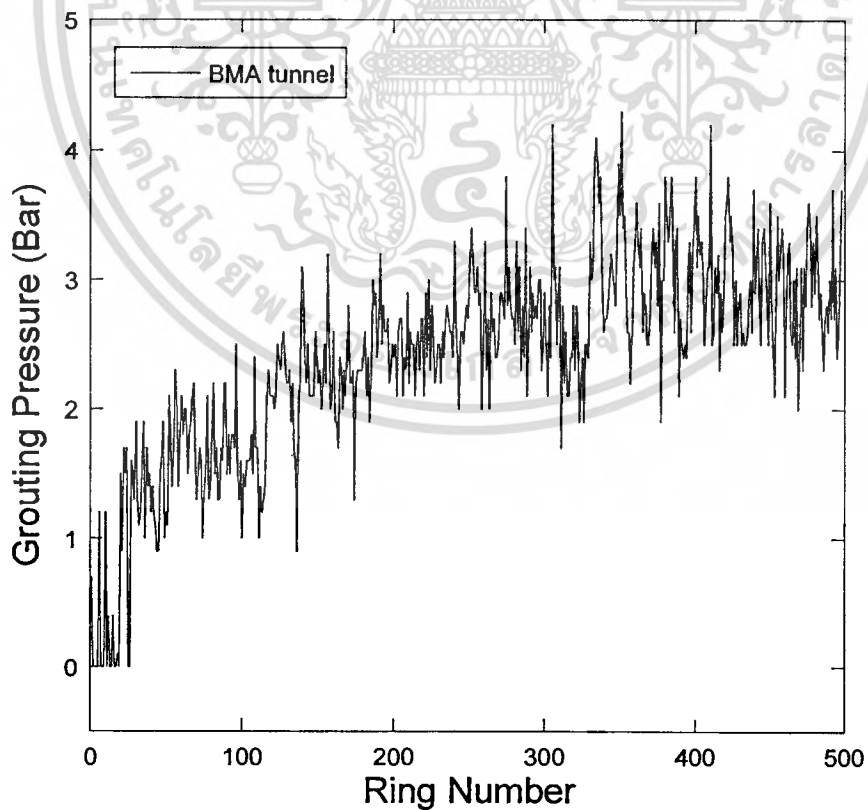


รูปที่ 5.12 ข้อมูลความเร็วขุดเจาะ โครงการ BMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

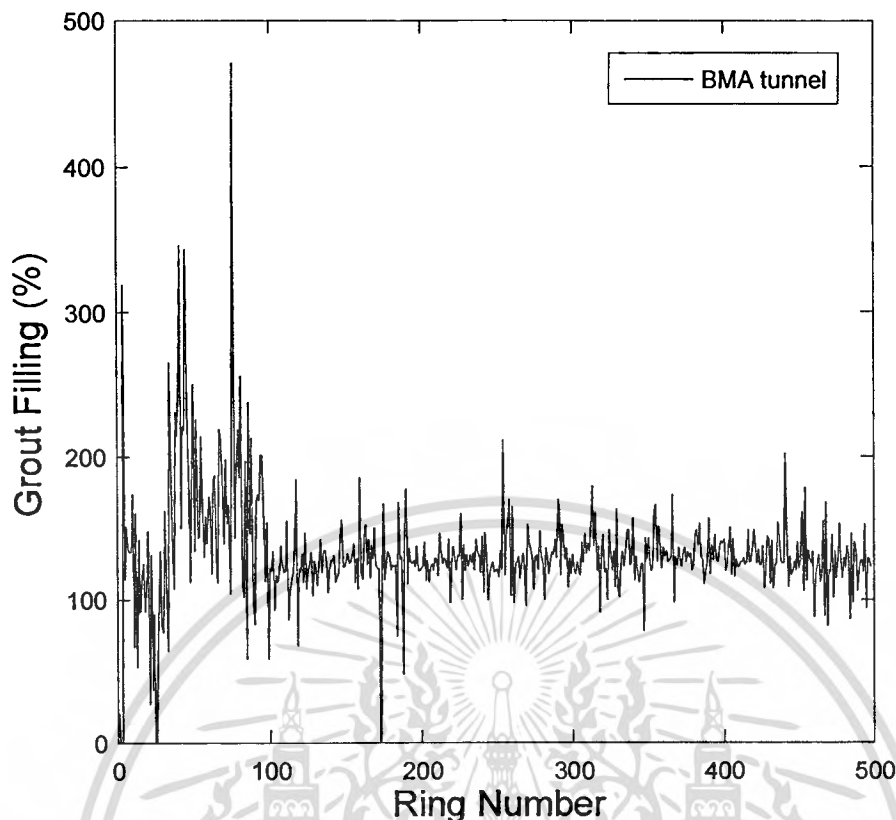


รูปที่ 5.13 ข้อมูลมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ โครงการ BMA



รูปที่ 5.14 ข้อมูลความดันของการฉีดน้ำปูน โครงการ BMA

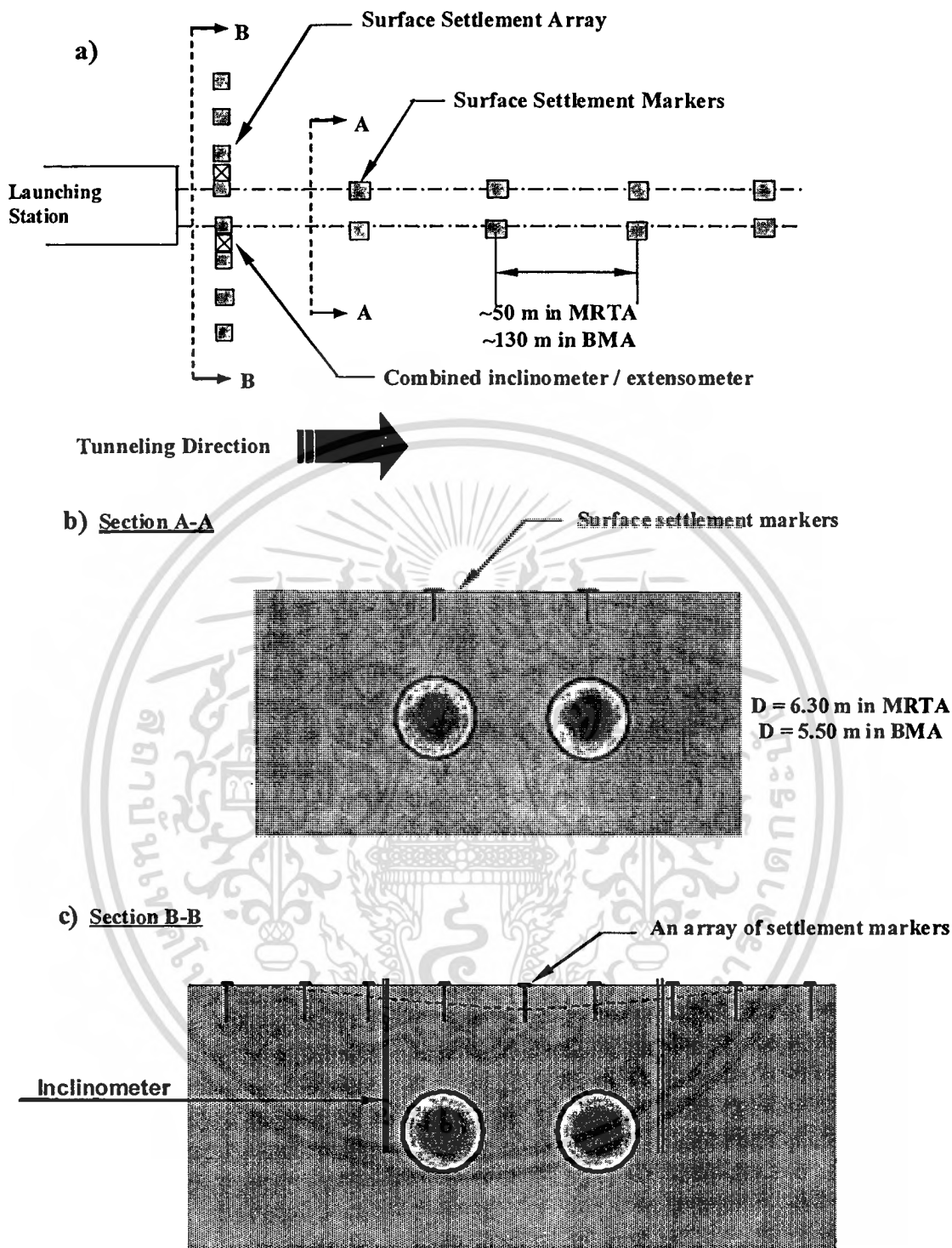
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนโครงการ BMA

5.3.4 ข้อมูลการทรุดตัวผิวดิน

หมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน (Surface settlement marker) และแนวหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน (Surface settlement array) ได้ทำการติดตั้งเพื่อวัดการทรุดตัวผิวดินในระหว่างที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ โดยที่หมุดวัดการทรุดตัวผิวดินในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลทำการติดตั้งในทุกช่วงระยะประมาณ 50 เมตร และโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาทำการติดตั้งในทุกช่วงระยะประมาณ 130 เมตร ตลอดแนวเส้นทางของอุโมงค์ดังกล่าวแสดงรายละเอียดการติดตั้งโดยทั่วไปไว้ในรูปที่ 5.16 วัตถุประสงค์หลักของหมุดวัดการทรุดตัวผิวดินก็เพื่อที่จะใช้ในการวัดค่าการทรุดตัวของผิวดินสูงสุดเหนือศูนย์กลางของอุโมงค์ นอกเหนือจากนี้ หมุดวัดการทรุดตัวผิวดินจะทำการติดตามอ่านค่าการทรุดตัวผิวดินในช่วงเวลา ก่อนที่หัวเจาะมาถึงและหลังจากที่หัวเจาะผ่านไปแล้ว เพื่อเป็นการสังเกตแนวการทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาวตลอดแนวเส้นทางของอุโมงค์อีกด้วย



รูปที่ 5.16 การติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัวผิวดิน

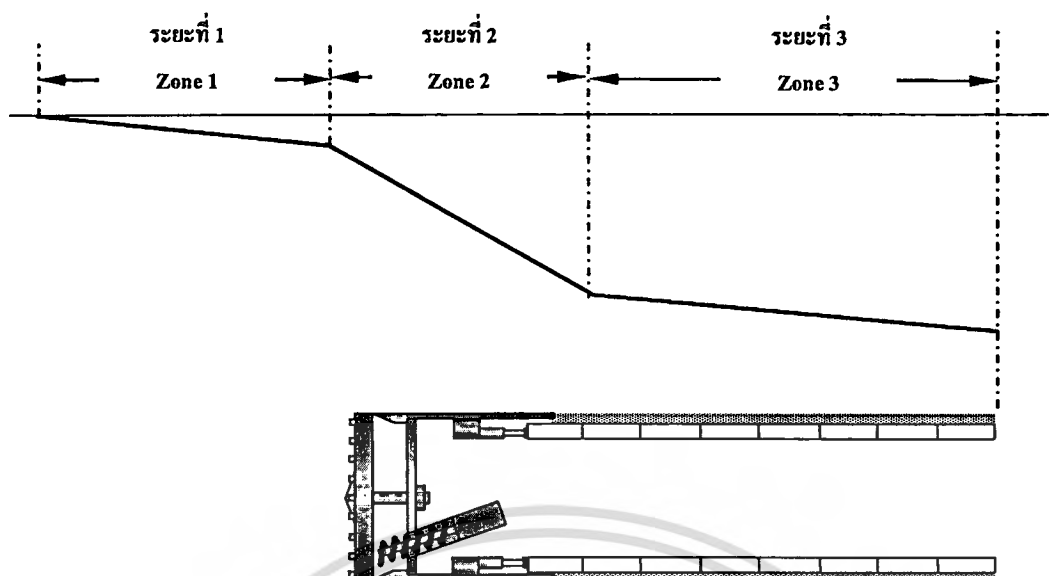
ในส่วนแนวหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน (Surface settlement array) ก็จะเป็นการประกอบกันของหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน (Surface settlement marker) ตามแนวขวางของแนวอุโมงค์ การติดตั้งก็เพื่อวัดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นร่องตัว (Trough) ในระหว่างและหลังจากหัวเจาะเคลื่อนผ่าน ส่วนใหญ่ของแนวหมุดวัดการทรุดตัวผิวดินจะทำการติดตั้งบริเวณสถานีได้ดิน หรือบริเวณที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเริ่มต้นของการขุดเจาะอุโมงค์ โดยทั่วไป การติดตั้งแนวหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดินเหนือแนวเส้นทางของอุโมงค์ เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวของผิวดิน และระยะห่างที่เหมาะสมจากแนวเส้นทางในการกำหนดบริเวณที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของระบบรถไฟฟ้า (Influence zone) ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของแนวหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดินก็เพื่อ 1) ติดตามขอบเขตการทรุดตัวของผิวดินที่มีลักษณะเป็นร่องตัว (Trough) ในระหว่างที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ และ 2) สังเกตรูปแบบของการทรุดตัวของร่องตัว และขนาดของการเปลี่ยนรูป (Deformation) ด้วยเหตุนี้ การเก็บรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินจึงถือว่ามีผลสำคัญ ในการกำหนดมาตรการที่เหมาะสมสำหรับป้องกันความเสียหายของโครงสร้างที่มีอยู่เดิมอันเนื่องมาจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล

นอกจากนี้ การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ (Zone) ประกอบไปด้วย ระยะที่ 1 (Zone 1) ระยะที่ 2 (Zone 2) และ ระยะที่ 3 (Zone 3) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.17 โดย “ระยะที่ 1” คือ ระยะเริ่มต้น (ตำแหน่งที่มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน) อยู่ที่ประมาณ 30 เมตรก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนที่เข้ามา การทรุดตัวก็เริ่มที่จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งเริ่มต้นดังกล่าว หลังจากนั้นปริมาณการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่ระยะประมาณ 10 เมตร วัดจากระยะระหว่างตำแหน่งที่มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน และส่วนหน้าของหัวเจาะ การทรุดตัวของผิวดินจะถูกรังให้เกิดขึ้นในปริมาณที่สูงมาก ในช่วงนี้จะเห็นเส้นแนวโน้มของการทรุดตัวของผิวดินที่มีความชันเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 5.17 นั้นแสดงให้เห็นว่า เป็นจุดเปลี่ยนของ “ระยะที่ 1” เข้าสู่ “ระยะที่ 2” หลังจากนั้นเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดินออกไป (ประมาณ 15 เมตรจากส่วนหน้าของหัวเจาะ) การทรุดตัวของผิวดินก็มีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ “ระยะที่ 3” เป็นการทรุดตัวของผิวดินในส่วนสุดท้าย และจะหยุดการเกิดการทรุดตัวที่ระยะประมาณ 30 เมตร หลังจากที่หัวเจาะผ่านไปจากหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน [2] ดังนั้น การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินที่ระยะ 30 เมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ในส่วนความถี่ของการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าการทรุดตัวของผิวดินจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหัวเจาะขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ยกตัวอย่างเช่น โดยปกติ ความถี่ของการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าการทรุดตัวของผิวดินจะทำการบันทึกค่าในทุกวันก่อนและหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนผ่านไป แล้ว และจะเพิ่มความถี่ในการเก็บรวบรวมข้อมูลขึ้นคือ ในทุก 2 ถึง 4 ชั่วโมง ระหว่างที่ตำแหน่งของหัวเจาะกำลังเคลื่อนผ่านหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดินที่ติดตั้งไว้เหนือผิวดินที่ศูนย์กลางของอุโมงค์



รูปที่ 5.17 แผนภาพแสดงรูปตัดการทรุดตัวผิวดินตามแนวยาวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์

5.4 การสร้างระบบฐานข้อมูลรายละเอียด

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินในทั้ง 2 โครงการ นำมาซึ่งการสร้างระบบฐานข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเป็นการจัดข้อมูลให้เป็นระบบเพื่อที่จะป้อนเข้าไปสู่ขั้นรับข้อมูลของโครงข่าย หลังจากนั้น ระบบฐานข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel จะถูกส่งต่อไปเพื่อประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB version 6.5 เพื่อที่จะใช้กล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network toolbox) ของโปรแกรมในการพยากรณ์การทรุดตัวผิวดิน โดยที่ระบบฐานข้อมูลข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการแยกข้อมูลออกเป็น 2 โครงการ ดังนี้

5.4.1 ฐานข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project database)

ฐานข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินภายในโครงการที่บริเวณเหนือผิวดิน ณ ตำแหน่งแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ประกอบไปด้วย บริเวณที่ทำการก่อสร้าง การทรุดตัวผิวดินสูงสุด ข้อมูลลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ ข้อมูลสภาพทางธรณีวิทยา และข้อมูลการควบคุมหัวเจาะ รวมข้อมูลทั้งหมดภายในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล 263 ชุดข้อมูล ซึ่งได้ทำการแสดงข้อมูลบางส่วน of โครงการไว้ในตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่มีพื้นแรกจะเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ (Testing data) และข้อมูลที่สี่พื้นปกติเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ (Training data)

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างของข้อมูลในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

Section	Max Sett. (mm)	Depth (m)	Distance from shaft (m)	Geology at Crown			at Invert		Invert to WT (m)	Avg. Face Pres. (kPa)	Avg. Penetrate (mm/min)	Pitching (degree)	Grouting Pres.(bar)	% Grout Filling
				Soft Clay	Stiff Clay	Sand	Stiff Clay	Sand						
Zone 23 SB	-60.50	18.20	33.6	0	1	0	1	0	0.65	34.50	33.5	-0.07	3.03	92
	-51.40	18.61	58.8	0	1	0	1	0	0.24	32.00	42.4	-1.01	3.03	100
	-47.90	18.70	62.4	0	1	0	1	0	0.15	31.00	41.65	-1.05	3.03	100
	-31.90	19.21	82.8	0	1	0	1	0	-0.36	54.50	34.45	-1.38	7.40	122
	-15.90	19.63	99.6	0	1	0	1	0	-0.78	84.50	32.55	-0.88	5.60	116
	-13.50	20.17	121.2	0	1	0	1	0	-1.32	100.50	30	-1.12	5.30	110
	-15.70	21.10	158.4	0	1	0	1	0	-2.25	131.00	26.4	-1.11	2.50	121
	-16.80	22.06	196.8	0	1	0	1	0	-3.21	123.00	29.75	-1.11	2.50	117
	-21.50	23.09	223.2	0	1	0	1	0	-4.24	65.50	40.65	-1.14	2.50	119
	-43.80	23.22	252	0	1	0	1	0	-4.37	14.50	48.9	-0.45	2.50	127
	-35.28	23.45	304.8	0	1	0	1	0	-4.60	44.50	48.4	-0.06	2.50	117
	-46.10	23.68	355.2	0	1	0	1	0	-4.83	49.50	50.95	0.15	2.50	195
	-20.02	23.91	404.4	0	1	0	0	1	-5.06	77.50	54.25	-0.16	2.50	120
	-39.10	23.56	504	0	1	0	0	1	-4.71	39.50	67.9	0.45	2.50	139
	-36.40	23.31	555.6	0	1	0	0	1	-4.46	53.50	70	0.42	2.50	129
	-35.10	23.05	607.2	0	1	0	0	1	-4.20	55.25	76.85	0.5	2.50	119
	-41.60	22.81	656.4	0	1	0	0	1	-3.96	77.75	69.9	0.4	2.50	94
	-31.50	22.56	708	0	1	0	0	1	-3.71	63.25	58	0.57	2.50	123
	-41.20	22.43	735.6	0	1	0	1	0	-3.58	47.00	56.6	0.57	2.50	127
	-6.25	21.84	855.6	0	1	0	1	0	-2.99	59.50	51	0.55	2.50	130
-6.67	21.42	904.8	0	1	0	1	0	-2.57	44.00	56.65	0.6	2.50	127	
-15.56	20.80	954	0	1	0	1	0	-1.95	87.50	49.7	1.17	3.80	97	
-20.00	19.78	1005.6	0	1	0	1	0	-0.93	88.75	48.6	1.36	2.50	123	
-12.86	18.78	1056	0	1	0	1	0	0.07	51.75	54.35	1.36	2.50	117	
-33.00	17.89	1107.6	0	1	0	1	0	0.96	121.00	41.2	0.92	2.50	129	
Zone 24 SB	-28.91	19.74	1508.4	1	0	0	1	0	-0.89	42.75	39.85	-0.74	2.50	118
	-19.28	20.95	1552.8	0	1	0	1	0	-2.10	111.00	27.2	-0.58	2.50	131
	-28.57	22.39	1605.6	0	1	0	1	0	-3.54	69.25	26.35	-0.69	2.50	70
	-38.57	23.64	1654.8	0	1	0	1	0	-4.79	60.00	24.55	-0.84	2.50	127
	-34.57	23.87	1704	0	1	0	0	1	-5.02	79.50	34.65	-0.72	2.50	131
	-34.00	24.11	1753.2	0	1	0	0	1	-5.26	70.00	37.7	0.02	2.50	212
	-37.00	24.35	1804.8	0	1	0	0	1	-5.50	31.75	44.45	0.03	2.30	122
	-12.57	24.58	1852.8	0	1	0	0	1	-5.73	36.00	47.2	0.04	2.50	117
	-19.28	24.82	1902	0	1	0	0	1	-5.97	35.25	51.15	-0.06	2.50	99
	-43.57	24.74	1953.6	0	1	0	0	1	-5.89	26.50	45.4	0.4	2.50	224
	-40.00	24.28	2004	0	1	0	0	1	-5.43	29.25	44.65	0.48	2.50	148
	-13.57	23.83	2053.2	0	1	0	0	1	-4.98	46.00	42.7	0.71	2.50	106
	-21.14	23.36	2104.8	0	1	0	0	1	-4.51	46.50	43	1.18	2.50	127
	-24.30	22.92	2152.8	0	1	0	0	1	-4.07	62.50	41.8	1.39	2.50	124
	-20.00	23.55	2203.2	0	1	0	0	1	-4.70	48.75	23.55	1.16	2.50	124
-22.50	23.30	2253.6	0	1	0	1	0	-4.45	37.75	20.1	1.43	2.50	121	
-15.00	23.06	2304	0	1	0	1	0	-4.21	45.75	23.5	1.26	2.50	122	
Zone 25 SB	-21.01	19.15	2752.8	0	1	0	1	0	-0.30	28.33	31	-0.71	2.50	147
	-14.22	20.33	2802	0	1	0	1	0	-1.48	18.75	36.9	-0.93	2.80	114
	-15.00	21.43	2852.4	0	1	0	1	0	-2.58	33.06	36.25	-0.89	2.50	128
	-27.50	22.07	2904	0	1	0	1	0	-3.22	18.75	34.25	-0.56	2.50	128
	-48.89	22.05	2953.2	0	1	0	0	1	-3.20	17.00	42.9	0.18	2.50	180
	-15.50	22.78	3002.4	0	1	0	0	1	-3.93	30.75	37.55	0.6	2.50	116
-21.50	22.01	3055.2	0	1	0	0	1	-3.16	25.50	37.65	0.77	2.50	126	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ฐานข้อมูลโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project database)

ฐานข้อมูลโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินภายในโครงการที่บริเวณเหนือผิวดิน ณ ตำแหน่งแนวศูนย์กลางของอุโมงค์มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน ซึ่งมีรายละเอียดของข้อมูลคล้ายคลึงกันกับโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล รวมข้อมูลทั้งหมดภายในโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา 24 ชุดข้อมูล โดยข้อมูลของโครงการได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ข้อมูลที่มีพื้นแรงเงาเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ (Testing data) และข้อมูลที่สีพื้นปกติเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ (Training data)

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างของข้อมูลในโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

Section	Max Sett. (mm)	Depth (m)	Distance from shaft (m)	Geology at Crown			at Invert		Invert to WT (m)	Avg. Face Pres. (kPa)	Avg. Penetrate (mm/min)	Pitching (degree)	Grouting Pres.(bar)	% Grout Filling
				Soft Clay	Stiff Clay	Sand	Stiff Clay	Sand						
GS1	-6	27.69	4.4	0	0	1	0	1	-8.44	93.65	9.96	0.05	0.47	107.04
GS15	-16	27.51	1723.7	0	0	1	0	1	-8.26	88.22	24.12	-0.14	2.93	171.46
GS16	-25	27.51	1813.9	0	0	1	0	1	-8.26	88.61	49.88	-0.05	2.94	143.78
GS17	-25	28.10	1890.9	0	0	1	0	1	-8.85	91.12	61.68	-0.04	3.20	142.39
GS18	-22	27.53	1955.8	0	0	1	0	1	-8.28	91.15	60.93	-0.09	3.39	141.98
GS19	-6	27.48	2088.9	0	0	1	0	1	-8.23	95.38	56.59	-0.01	3.93	134.39
GS20	-18	27.50	2181.3	0	0	1	0	1	-8.25	90.15	55.95	-0.05	3.62	132.39
GS21	-11	27.51	2343	0	0	1	0	1	-8.26	97.78	65.15	-0.04	3.82	129.63
GS22	-36	27.54	2624.6	0	0	1	0	1	-8.29	82.56	61.12	-0.04	2.73	119.32
GS23	-38	27.56	2730.2	0	0	1	0	1	-8.31	85.84	59.62	-0.05	3.00	111.15
GS24	-22	27.60	2786.3	0	0	1	0	1	-8.35	93.39	61.51	-0.08	3.48	134.12
GS25	-19	27.64	2986.5	0	0	1	0	1	-8.39	93.40	62.93	-0.01	3.95	139.44
GS26	-3	27.65	3.3	0	0	1	0	1	-8.40	94.54	43.54	-0.03	3.38	116.27
GS27	-12	27.60	23.1	0	0	1	0	1	-8.35	102.60	52.98	0.07	3.38	113.71
GS28	-19	27.49	385	0	0	1	0	1	-8.24	112.87	62.37	-0.15	3.30	140.15
GS29	-6	27.50	883.3	0	0	1	0	1	-8.25	129.83	64.73	0.13	4.09	123.24
GS30	-7	27.50	1057.1	0	0	1	0	1	-8.25	93.51	44.63	0.04	3.80	126.78
GS31	-3	27.51	1092.3	0	0	1	0	1	-8.26	43.19	36.28	0.08	4.15	123.88
GS32	-3	27.52	1140.7	0	0	1	0	1	-8.27	28.27	41.34	0.05	4.34	129.10
GS34	-4	27.53	1229.8	0	0	1	0	1	-8.28	35.33	36.85	0.10	4.15	152.68
GS36	-1	27.54	1337.6	0	0	1	0	1	-8.29	40.72	41.83	0.01	4.91	137.24
GS38	-4	27.55	1464.1	0	0	1	0	1	-8.30	36.02	43.98	0.08	4.22	114.63
GS39	-3	27.56	1531.2	0	0	1	0	1	-8.31	31.45	44.41	0.07	4.41	122.68
GS40	-2	27.57	1596.1	0	0	1	0	1	-8.32	33.66	48.15	0.06	4.79	121.66

5.5 เปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินของทั้ง 2 โครงการ

จากการสร้างระบบฐานข้อมูลรายละเอียดของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินในทั้ง 2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร ได้มีการนำข้อมูลมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดิน [37-38] โดยแสดงเปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะในตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่าในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์จะมีระดับความลึกอุโมงค์คงที่ตลอดแนวเส้นทางอุโมงค์คือประมาณ 27 เมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์มีขนาดที่เล็กกว่า คือ 5.5 เมตร แต่ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลมีขนาด 6.3 เมตร สภาพทางธรณีวิทยาของอุโมงค์ระบายน้ำอยู่ในชั้นดินทรายเป็นส่วนใหญ่ และความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์มีค่าคงที่ ในส่วนปัจจัยการควบคุมหัวเจาะของทั้ง 2 โครงการแสดงในรูปที่ 5.18 ถึงรูปที่ 5.22 ความดันหน้าหัวเจาะและมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะที่ใช้ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจะค่อนข้างต่ำ แต่ความเร็วขณะขุดเจาะจะมีค่าค่อนข้างสูง ความดันของการฉีดน้ำปูนและเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนจะมีค่าใกล้เคียงกันในทั้ง 2 โครงการ โดยความแตกต่างทั้งหลายเหล่านี้เป็นเหตุผลสำคัญยิ่งที่โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project) และโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project) มีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา ในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการขุดเจาะเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินต่อไป

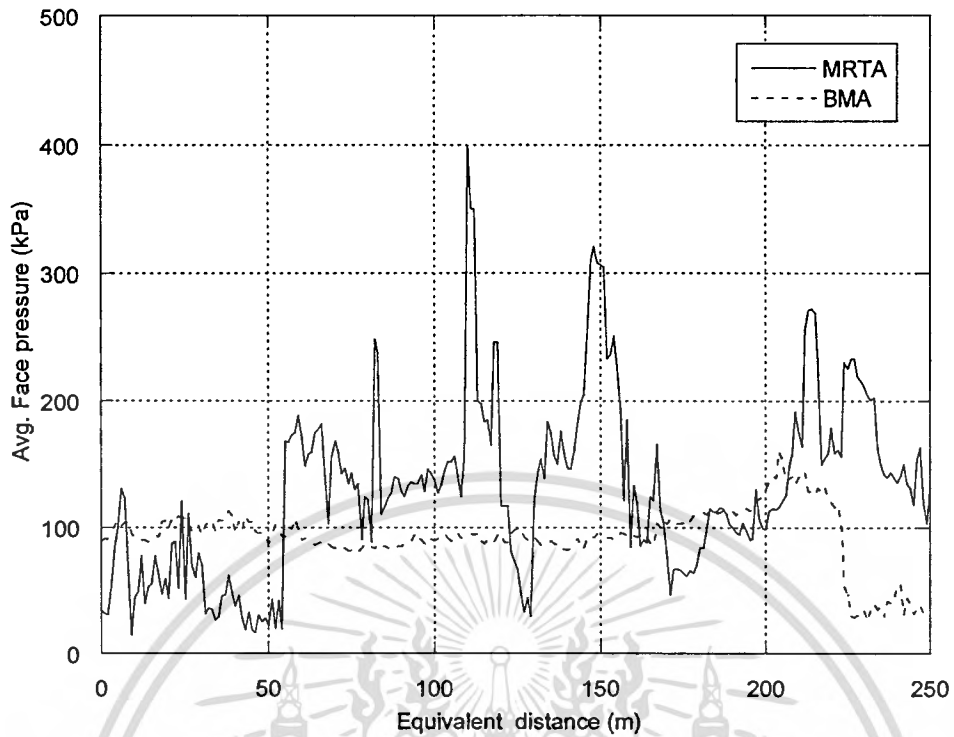
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะ

ปัจจัย	MRTA	BMA
1.1 ความลึกของอุโมงค์ (เมตร)	11 - 32	27
1.2 ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (เมตร)	0 - 3055	0 - 3123
1.3 เส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ (เมตร)	6.3	5.5
2.1 ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์	3 ชนิด*	ดินทราย
2.2 ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์	2 ชนิด**	ดินทราย
2.3 ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (เมตร)	-12 - 7	-8
3.1 ความดันหน้าหัวเจาะ (Face Pressure, kPa)	14.5 - 400	1.5 - 235
3.2 ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration Rate, mm/min)	9 - 82	2 - 77
3.3 มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching Angle, degree)	-4.5 - 3.2	-0.8 - 0.4
3.4 ความดันของการฉีดน้ำปูน เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (Grouting Pressure, bar)	0.5 - 7.4	0 - 7.6
3.5 เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent Grout Filling, %)	70 - 224	0 - 526

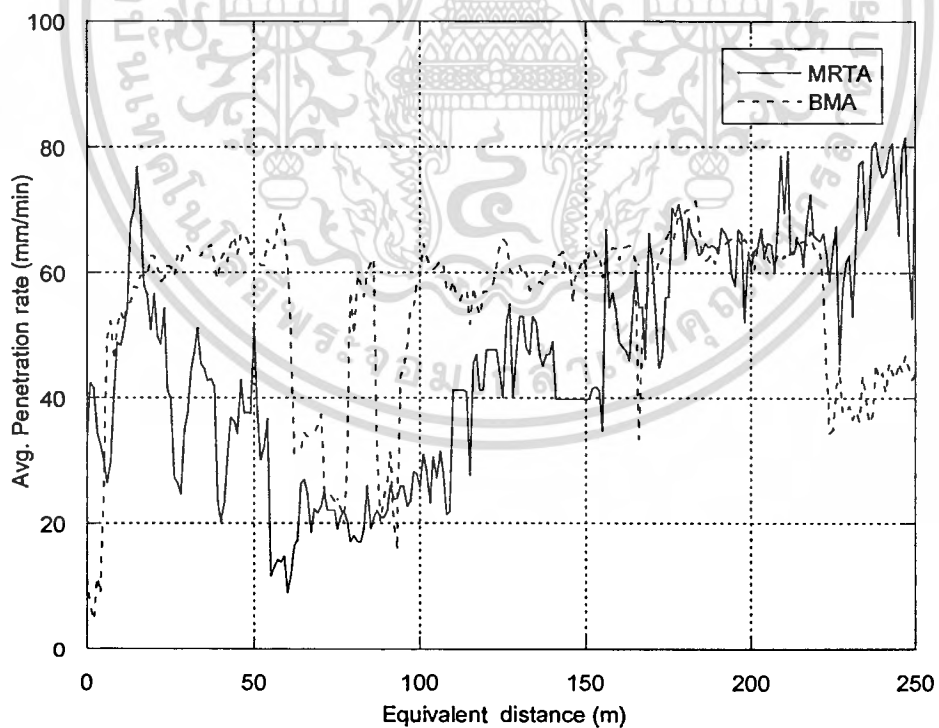
* ประกอบด้วยดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และดินทราย

** ประกอบด้วยดินเหนียวแข็ง และดินทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

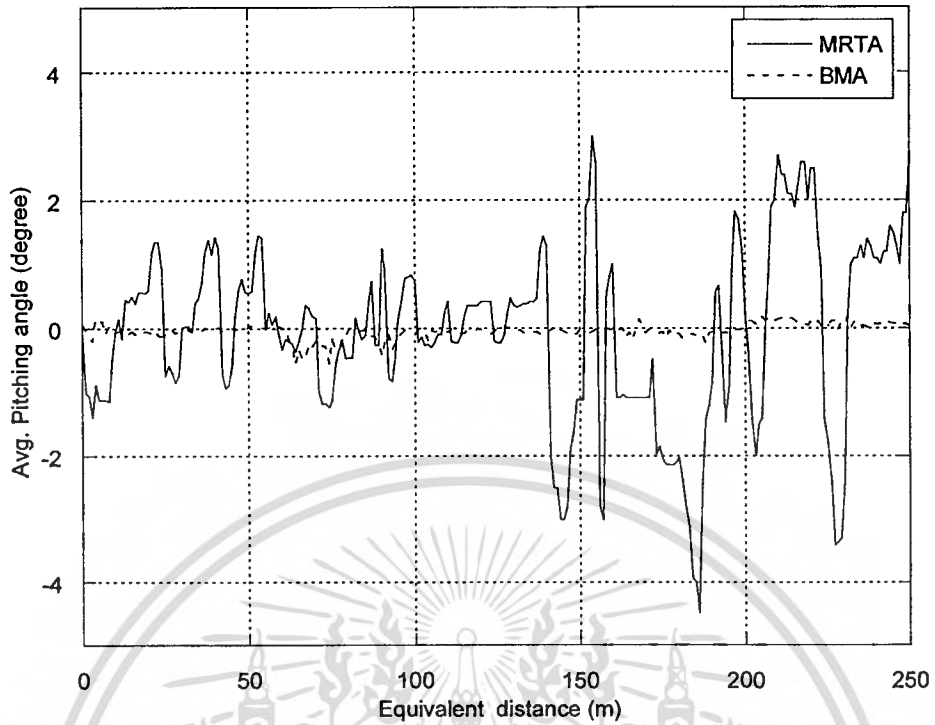


รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบความดันหน้าหัวเจาะ

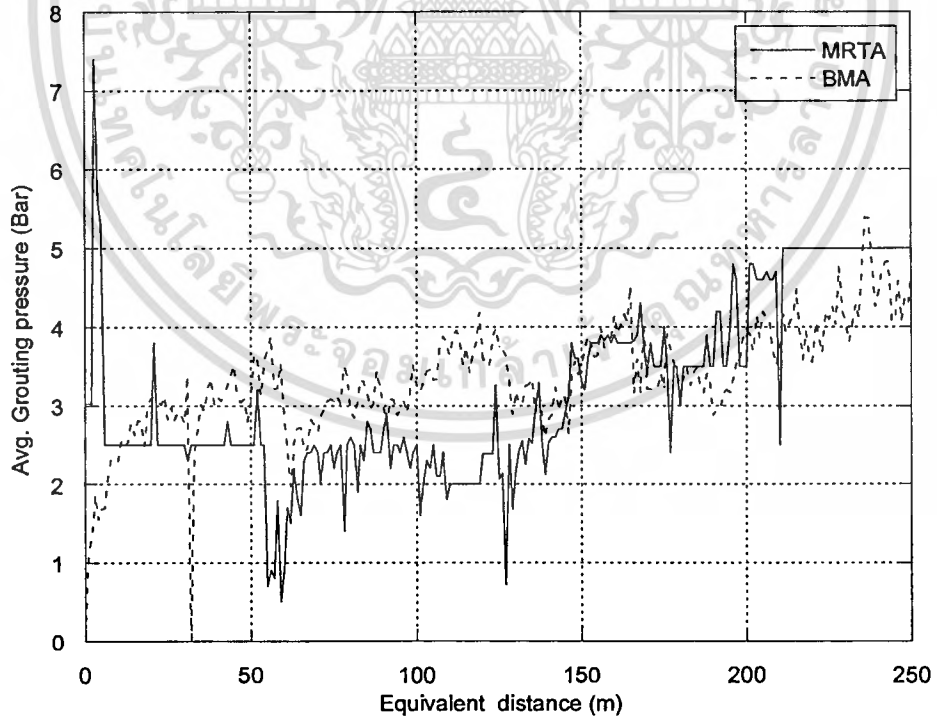


รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบความเร็วขุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

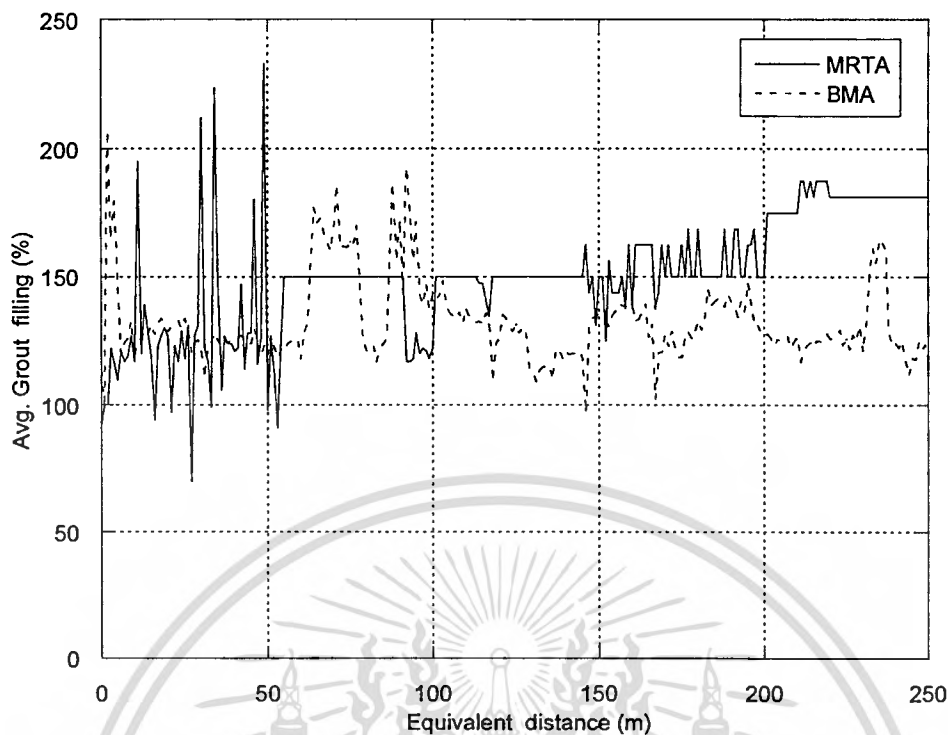


รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบความดันของการฉีดน้ำปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน

5.6 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวประกอบไปด้วยลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะทั้งหลายเหล่านี้ ล้วนแต่มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนต่อการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ด้วยเหตุนี้ จึงนำมาสู่การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีความสามารถในการสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีความซับซ้อนไปสู่ผลลัพธ์ที่เป็นคำตอบของปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวผิวดินมีวิธีการขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.6.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูล (Input layer) ของโครงข่าย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวเพื่อกำหนดเป็นปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูล (Input layer) เพื่อให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 โครงข่าย คือ โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ และโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน รายละเอียดของปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูลของแต่ละโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ

กลุ่มปัจจัย	ปัจจัยย่อย	ลำดับหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล
ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์	(1) ความลึกของอุโมงค์ (เมตร)	1
	(2) ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (เมตร)	2
	(3) เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (เมตร)	3
สภาพทางธรณีวิทยา	(4) ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ ดินเหนียวอ่อน (1=ใช่, 0=ไม่ใช่)	4
	ดินเหนียวแข็ง (1=ใช่, 0=ไม่ใช่)	5
	ดินทราย (1=ใช่, 0=ไม่ใช่)	6
	(5) ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ ดินเหนียวแข็ง (1=ใช่, 0=ไม่ใช่)	7
	ดินทราย (1=ใช่, 0=ไม่ใช่)	8
	(6) ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (เมตร)	9
การควบคุมหัวเจาะ	(7) ความดันน้ำหัวเจาะ (กิโลปาสกาล)	10
	(8) ความเร็วขณะขุดเจาะ (มิลลิเมตร/นาที)	11
	(9) มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (องศา)	12
	(10) ความดันของการฉีดน้ำปูน เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (บาร์)	13
	(11) เพลอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (เพลอร์เซ็นต์)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน

กลุ่มปัจจัย	ปัจจัยย่อย	ลำดับหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล
ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์	(1) ความลึกของอุโมงค์ (เมตร)	1
	(2) ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (เมตร)	2
สภาพทางธรณีวิทยา	(3) ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (เมตร)	3
การควบคุมหัวเจาะ	(4) ความดันหน้าหัวเจาะ (กิโลปาสคาล)	4
	(5) ความเร็วขณะขุดเจาะ (มิลลิเมตร/นาที)	5
	(6) มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (องศา)	6
	(7) ความดันของการฉีดน้ำปุณ เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (บาร์)	7
	(8) เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปุณ (เปอร์เซ็นต์)	8

5.6.2 การแบ่งข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training data) และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing data)

เมื่อได้ทำการกำหนดปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมเรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อมาจะต้องทำการแบ่งข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวผิวดินในทั้งสองโครงการออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training data) เพื่อให้โครงข่ายได้เรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลก่อนที่จะนำไปพยากรณ์การทรุดตัวผิวดิน และ 2) ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing data) เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์ของโครงข่าย ซึ่งรายละเอียดในการแบ่งข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ และข้อมูลที่ใช้ทดสอบของทั้งสองโครงการแสดงไว้ในตารางที่ 5.6 ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลแบ่งเป็นข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 211 ชุดข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 52 ชุดข้อมูล โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาแบ่งเป็นข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 19 ชุดข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 5 ชุดข้อมูล และในทั้งสองโครงการแต่ทำการแยกข้อมูลเรียนรู้/ทดสอบตามสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกันจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ดินเหนียวแข็ง ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย และดินทรายแบ่งเป็นข้อมูลเรียนรู้-ข้อมูลทดสอบ ประกอบไปด้วย 25-8, 96-22, 62-18 และ 47-9 ชุดข้อมูล ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 รายละเอียดในการแบ่งข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training data) และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (Testing data)

กลุ่มข้อมูล	รายละเอียด	จำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (ชุดข้อมูล)	จำนวนข้อมูลที่ใช้ทดสอบ (ชุดข้อมูล)
1	โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project) [2,30]	211	52
2	โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project)	19	5
3	ทั้งสองโครงการแต่ทำการแยกข้อมูลตามสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน		
3.1	การก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง	25	8
3.2	การก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินเหนียวแข็ง	96	22
3.3	การก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินเหนียวแข็ง-ดินทราย	62	18
3.4	การก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินทราย	47	9

5.6.3 การแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Normalization) เพื่อเข้าสู่กระบวนการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

ลำดับต่อมาหลังจากการแบ่งข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ และข้อมูลที่ใช้ทดสอบของทั้งสองโครงการ ก็คือการแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Normalization) ซึ่งเป็นการจัดระเบียบข้อมูลให้อยู่ในขอบเขตเดียวกัน เป็นวิธีการที่นำมาใช้เพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ (Output) ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม และลดเวลาในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล ชุดข้อมูลของปัจจัยนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) ต้องทำก่อนเริ่มกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายในการหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม [33]

โดยการเลือกขอบเขตของการแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอนของผลลัพธ์ สำหรับการศึกษานี้จะทำการแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูลให้อยู่ในช่วง $[-1, 1]$ เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นผลลัพธ์ (Output) เป็น Tangent-Sigmoid Transfer Function ซึ่งมีขอบเขตอยู่ระหว่าง $[-1, 1]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล จะทำทั้งชุดข้อมูลของปัจจัยนำเข้า (Input) และผลลัพธ์ (Output) ตามสมการที่ 5-2 ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้ในการปรับค่าน้ำหนักและค่าเบี่ยงเบนของโครงข่าย หลังจากนั้นเมื่อได้ผลลัพธ์จากโครงข่ายก็จะมีการแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูลกลับคืนสู่ค่าปกติ ตามสมการที่ 5-3 เพื่อแปลงค่ากลับเป็นค่าในขอบเขตเริ่มต้น

$$p_n = \frac{2 \times (p - p_{\min})}{(p_{\max} - p_{\min})} - 1 \quad (5-2)$$

$$p = 0.5(p_n + 1) \times (p_{\max} - p_{\min}) + p_{\min} \quad (5-3)$$

โดยที่ p คือ ค่าของปัจจัยที่จะทำการแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Normalization)

p_{\min} คือ ค่าน้อยสุดของปัจจัย

p_{\max} คือ ค่ามากที่สุดของปัจจัย

p_n คือ ค่าของปัจจัยที่ผ่านการแปลงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Normalization)

โดยมีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$

5.6.4 การหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ภายหลังจากที่ได้ผ่านการกำหนดปัจจัยนำเข้าในชั้นรับข้อมูล (Input layer) ที่ประกอบไปด้วย 14 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) สำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกส่วนก่อสร้างของทั้งสองโครงการ และ 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) สำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน และการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ พร้อมกับได้ทำการ Normalization ข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้วลำดับต่อมาก็จะเข้าสู่กระบวนการหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม เพื่อหาจำนวนชั้นแฝง (Hidden layers) จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) และจำนวนรอบการคำนวณ (Epochs) ที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์

การกำหนดจำนวนที่เหมาะสมของชั้นแฝง (Hidden layers) และหน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) ยังคงไม่มีแนวทางและวิธีการที่แน่นอน ปัญหาจากความซับซ้อนในการเปลี่ยนแปลงของจำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝงจะนำไปสู่ความสามารถในการหาผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงใน

กระบวนการเรียนรู้ (Training) เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มจำนวนฟังก์ชันการคำนวณ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝงที่มีมากจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีในกระบวนการเรียนรู้ แต่อาจเกิดการหันเหอย่างกะทันหันจากทิศทางที่เหมาะสมในการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลในกระบวนการเรียนรู้ ทำให้เกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์จากกระบวนการทดสอบ (Testing) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างความสัมพันธ์ที่ผิดพลาดนี้เรียกว่า “การคำนวณมากเกินไป” (Overfitting) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ ในจำนวนที่มากเกินไปของจำนวนชั้นแฝง และหน่วยย่อยในชั้นแฝง จะทำให้การประมวลผลของโครงข่ายใช้เวลานานทั้งในระหว่างกระบวนการเรียนรู้ และทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการหารูปแบบโครงข่ายที่เหมาะสมโดยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method) ประกอบไปด้วย 18 รูปแบบที่มีความแตกต่างกันในจำนวนของชั้นแฝง หน่วยย่อยในชั้นแฝง และจำนวนรอบการคำนวณ ดังต่อไปนี้

- 1) จำนวนชั้นแฝง (Hidden layers): 1 และ 2
- 2) จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) : 10 15 และ 20
- 3) จำนวนรอบการคำนวณ (Epochs) : 1,000 2,000 และ 3,000

รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.7 โดยแต่ละรูปแบบจะทำการสร้างความสัมพันธ์จากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้เพื่อทำการกำหนดค่าน้ำหนัก (Weights) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) ตามรอบการคำนวณของแต่ละรูปแบบในกระบวนการเรียนรู้ แต่ผลลัพธ์ในกระบวนการเรียนรู้ที่มีค่าต่ำที่สุดไม่ได้แสดงว่ารูปแบบนั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยรูปแบบโครงข่ายที่เหมาะสมที่สุดคือ รูปแบบที่ได้จากข้อมูลที่ใช้ทดสอบที่มีค่าผลลัพธ์ที่ต่ำที่สุด โดยตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการพยากรณ์การหลุดตัวของผิวดินจะใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย หรือ Root Mean Square Error (RMSE) เป็นตัววัดประสิทธิภาพของโครงข่ายในที่นี้มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร แทนด้วยสมการที่ 5-4

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - t_i)^2}{N}} \quad (5-4)$$

โดย N คือ จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในกระบวนการคำนวณ

O คือ ค่าการหลุดตัวที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

t คือ ค่าการหลุดตัวที่ได้จากการวัดค่าจริง

นอกจากนี้ ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล จำนวนชั้นแฝง และจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง จะต้องทำการหารูปแบบที่เหมาะสมของโครงข่ายใหม่ทุกครั้งด้วยวิธีการลองผิดลองถูก เพื่อให้ได้รูปแบบของโครงข่ายที่เหมาะสมกับปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ [35]

ตารางที่ 5.7 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 18 รูปแบบจากวิธีการลองผิดลองถูก

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง	
1	1	10	1000
2	1	15	1000
3	1	20	1000
4	1	10	2000
5	1	15	2000
6	1	20	2000
7	1	10	3000
8	1	15	3000
9	1	20	3000
10	2	10	1000
11	2	15	1000
12	2	20	1000
13	2	10	2000
14	2	15	2000
15	2	20	2000
16	2	10	3000
17	2	15	3000
18	2	20	3000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว

6.1 กล่าวนำ

เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมายที่มีผลต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้าง อุโมงค์ อาทิเช่น ขนาดของอุโมงค์ ความลึกของระดับอุโมงค์ คุณสมบัติของดิน ระดับน้ำใต้ดิน ความดันน้ำหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ และคุณภาพของการฉีดน้ำปูนบริเวณช่วงหางของหัวเจาะ เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ เป็นต้น โดยทุกปัจจัยหรือตัวแปรดังกล่าวนี้ ล้วนแต่มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงไม่สามารถแยกความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปรกับปริมาณการทรุดตัวได้อย่างชัดเจน ว่าปัจจัยตัวใดที่มีผลต่อการทรุดตัวมากหรือน้อยกว่ากัน ในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพทางธรณีวิทยาต่างๆ ทำให้เกิดความซับซ้อน จนยากแก่การวิเคราะห์หรือพยากรณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้น จึงได้มีการนำข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และ โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าว ลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยามาทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยใช้การวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

6.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

จากข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของทั้งสอง โครงการ นำมาสู่การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวกับค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้น ใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r) คำนวณตามสมการที่ 6.1 โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่าที่เป็นลบแสดงถึงความสัมพันธ์ของสองปัจจัยที่มีลักษณะผกผันกัน ค่าที่เป็นบวกแสดงถึงความสัมพันธ์ของสองปัจจัยที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ถ้าค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมาก และถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้ 0 แสดงว่าปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองนั้น ไม่ได้มีความสัมพันธ์กันเลย ซึ่งค่าที่ได้จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะนำไปทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวกับค่าการทรุดตัวตามสภาพทางธรณีวิทยาต่างๆ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.1)$$

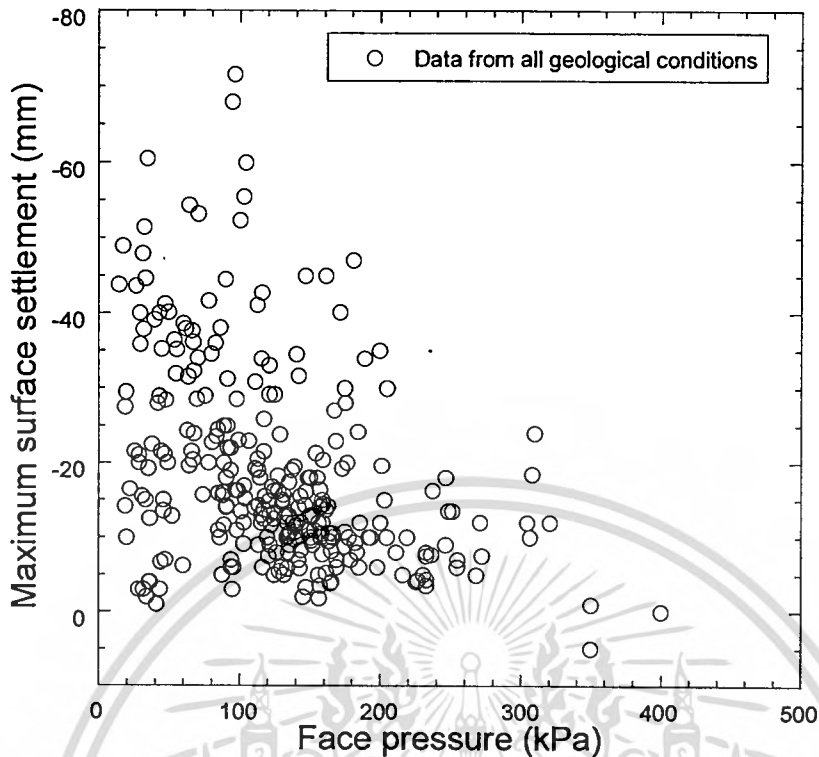
6.2.1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน (All geological conditions)

โดยวัตถุประสงค์ของการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยรวมของทั้ง 2 โครงการนี้ ก็เพื่อที่จะนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของปัจจัยในแต่ละสภาพดิน ว่าจะมีแนวโน้มของลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแตกต่างกันมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 6.1 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ ก็คือ ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.398 แสดงให้เห็นว่า ถ้าความดันหน้าหัวเจาะมีค่ามาก การทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นบนผิวดินก็จะมีค่าน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกส่วนก่อสร้างไว้ในรูปที่ 6.1 ในส่วนของปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาประกอบไปด้วย ความดันของการฉีดน้ำปูน มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ ความเร็วขณะขุดเจาะ และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ตามลำดับ จากกรณีนี้ แนวโน้มของความดันของการฉีดน้ำปูน มุมเงยของหัวเจาะ เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน และระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ทั้งหลายเหล่านี้หากมีค่าที่สูงขึ้นแล้ว จะส่งผลให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง และในส่วนของความลึกของอุโมงค์ที่มีความลึกมากจากผิวดิน จะส่งผลให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในส่วนของความเร็วขณะขุดเจาะ และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 0 จึงไม่สามารถสร้างความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่อค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้

ตารางที่ 6.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน

	Surface settlement	Face pressure	Grouting pressure	Pitching angle	Grout filling	WT from invert	Tunnel depth	Penetration rate	Dist. from shaft
Surface settlement	1	0.398	0.258	0.227	0.180	0.102	-0.099	-0.055	-0.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้พิมพ์ใช้ประโยชน์จากเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน

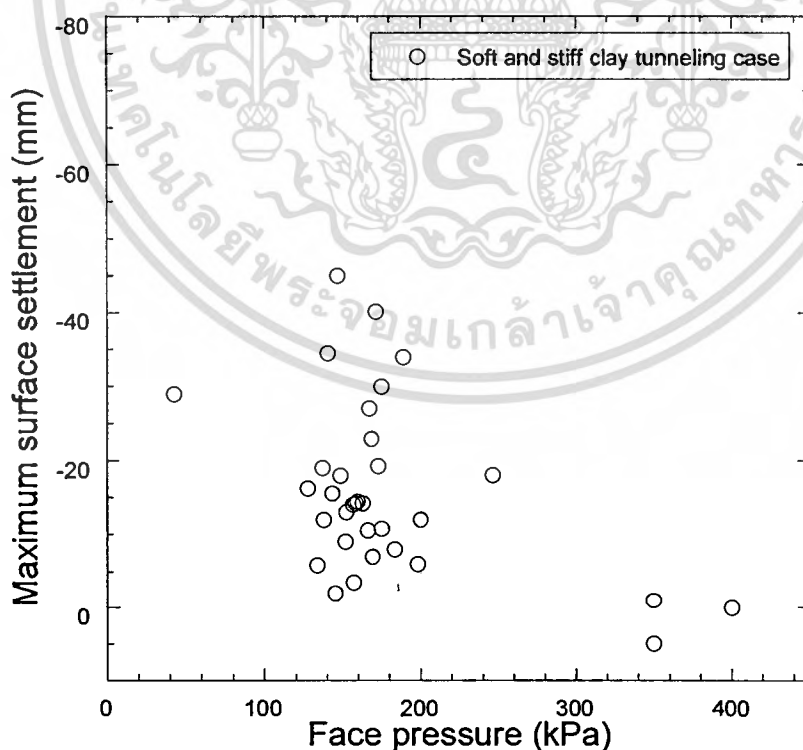
6.2.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง (Soft-Stiff clay layers)

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 6.2 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในทุกสภาพดิน และสอดคล้องกับ [39-40] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.458 แสดงให้เห็นว่า ถ้าความดันหน้าหัวเจาะมีค่ามาก การทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นบนผิวดินก็จะมีค่าน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งไว้ในรูปที่ 6.2 ในส่วนของปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาประกอบไปด้วย ความเร็วขณะขุดเจาะ ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ ความดันของการฉีดน้ำปูน เฟอร์เร็นต์การเติมน้ำปูน และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ตามลำดับ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งนี้ จะมีลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแตกต่างกันกับการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน (ตารางที่ 6.1) นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีนี้ยังให้ค่าที่สูงกว่าในแต่ละปัจจัยของการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินอีกด้วย แสดงให้เห็นว่า การสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยในสภาพดินเดียวกันทำให้มองเห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกว่าการสร้างความสัมพันธ์โดยรวม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ทุกสภาพดิน) ในส่วนความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีนี้ พบว่า ในแต่ละปัจจัยจะมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน แต่จะแตกต่างกันในปัจจัยความเร็วขณะขุดเจาะ และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินทั้งสองปัจจัยนี้มีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์จึงไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อค่าการทรุดตัวได้ อย่างไรก็ตาม สามารถบอกได้ว่า ความเร็วขณะขุดเจาะและความดันหน้าหัวเจาะที่สูงจะทำให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย และในส่วนระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แต่ก็พอที่จะแสดงให้เห็นว่า ระยะทางที่หัวเจาะเคลื่อนออกไปจากตัวสถานีมากเท่าใด แนวโน้มของการทรุดตัวก็จะมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 6.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

	Surface settlement	Face pressure	Penetration rate	WT from invert	Tunnel depth	Pitching angle	Grouting pressure	Grout filling	Dist. from shaft
Surface settlement	1	0.458	0.424	0.374	-0.374	0.357	0.343	0.262	0.130



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

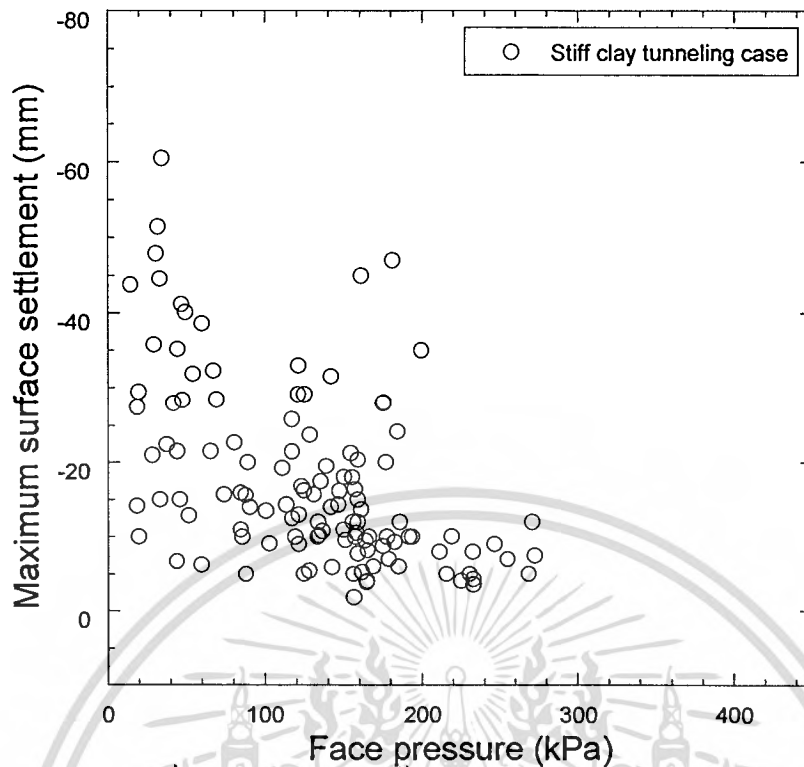
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay layers)

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 6.3 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในทุกสภาพดิน และสอดคล้องกับ [39-40] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.516 แสดงให้เห็นว่า ถ้าความดันหน้าหัวเจาะมีค่ามาก การทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นบนผิวดินก็จะมีค่าน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งไว้ในรูปที่ 6.3 ในส่วนของปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาประกอบไปด้วย เฟอร์เร็นต์การเติมน้ำปูน ความดันของการฉีดน้ำปูน ความลึกของอุโมงค์ ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ความเร็วขณะขุดเจาะ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ และระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ตามลำดับ ซึ่งลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง มีความแตกต่างกันกับปัจจัยในทุกสภาพดิน ในส่วนความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีนี้ พบว่า ในแต่ละปัจจัยจะมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน แต่จะแตกต่างกันในปัจจัยความลึกของอุโมงค์ ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ และความเร็วขณะขุดเจาะ ซึ่งการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน ความลึกของอุโมงค์ และความเร็วขณะขุดเจาะมีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์จึงไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อค่าการทรุดตัวได้ แต่ในกรณีนี้สามารถบอกได้ว่า การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งที่ความลึกมากจากผิวดิน จะส่งผลให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง ความเร็วขณะขุดเจาะและความดันหน้าหัวเจาะสูงการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย และระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ในกรณีนี้จะแปรผกผันกับความสัมพันธ์ในทุกสภาพดิน

ตารางที่ 6.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

	Surface settlement	Face pressure	Grout filling	Grouting pressure	Tunnel depth	WT from invert	Penetration rate	Pitching angle	Dist. from shaft
Surface settlement	1	0.516	0.423	0.385	0.239	-0.239	0.193	0.133	-0.026



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความคืบหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

6.2.4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย (Stiff clay-Sand layers)

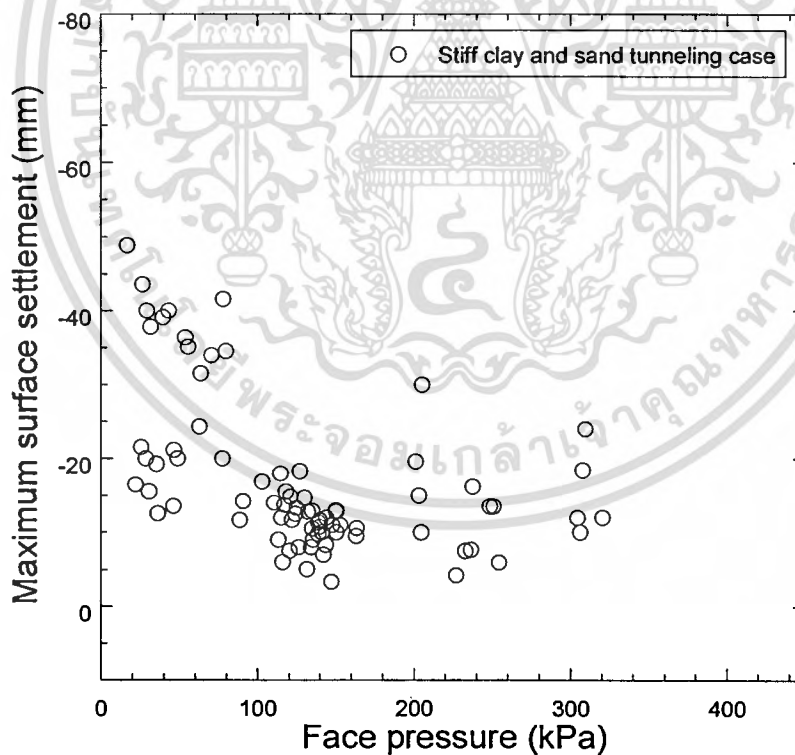
จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 6.4 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความคืบหน้าหัวเจาะ (Face pressure) เช่นเดียวกันกับความสัมพันธ์ในทุกสภาพดิน และสอดคล้องกับ [39-40] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.49 แสดงให้เห็นว่า ถ้าความคืบหน้าหัวเจาะมีค่ามาก การทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นบนผิวดินก็จะมีค่าน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคืบหน้าหัวเจาะ และค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายไว้ในรูปที่ 6.4 ในส่วนของปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาประกอบไปด้วย ความดันของการฉีดน้ำปุณระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปุณ ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ และความเร็วขณะขุดเจาะ ตามลำดับ ซึ่งลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย มีความแตกต่างกันกับปัจจัยในทุกสภาพดิน ในส่วนความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีนี้ พบว่า ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินประกอบด้วย ความคืบหน้าหัวเจาะ ความดันของการฉีดน้ำปุณ เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปุณ และความเร็วขณะขุดเจาะ แต่จะแตกต่างกันในปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขุดเจาะอุโมงค์ ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์ และมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์จะแปรผกผันกับความสัมพันธ์ในทุกสภาพดิน การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ความลึกมากจากผิวดิน จะส่งผลให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง ในส่วนมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จึงไม่สามารถบ่งบอกความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้

ตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย

	Surface settlement	Face pressure	grouting pressure	Dist. from shaft	grout filling	WT from invert	Tunnel depth	Pitching angle	Penetration rate
Surface settlement	1	0.490	0.439	-0.372	0.225	-0.202	0.195	0.060	0.010



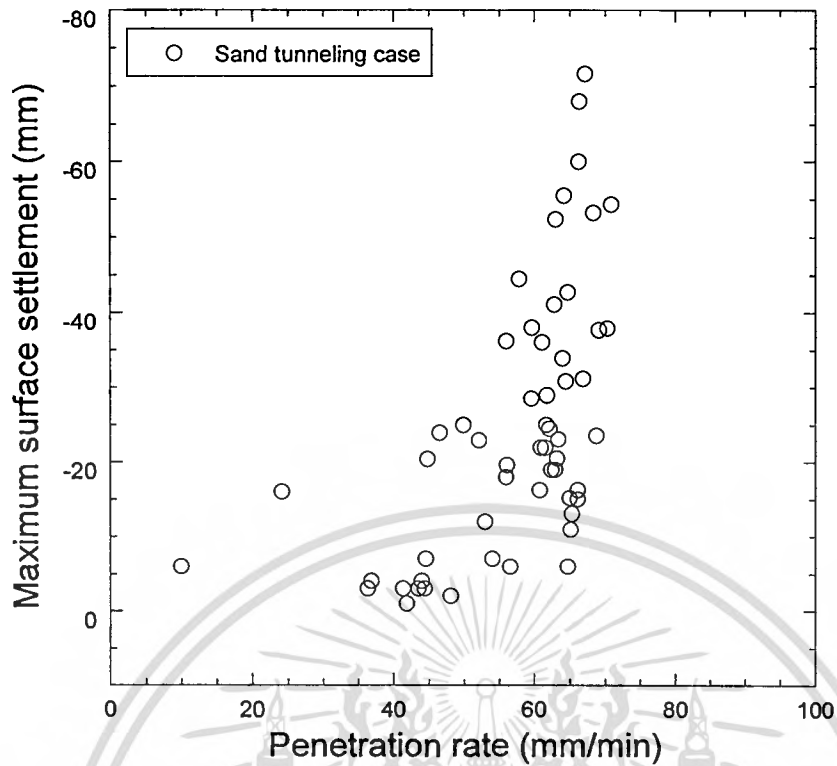
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย

6.2.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย (Sand layers)

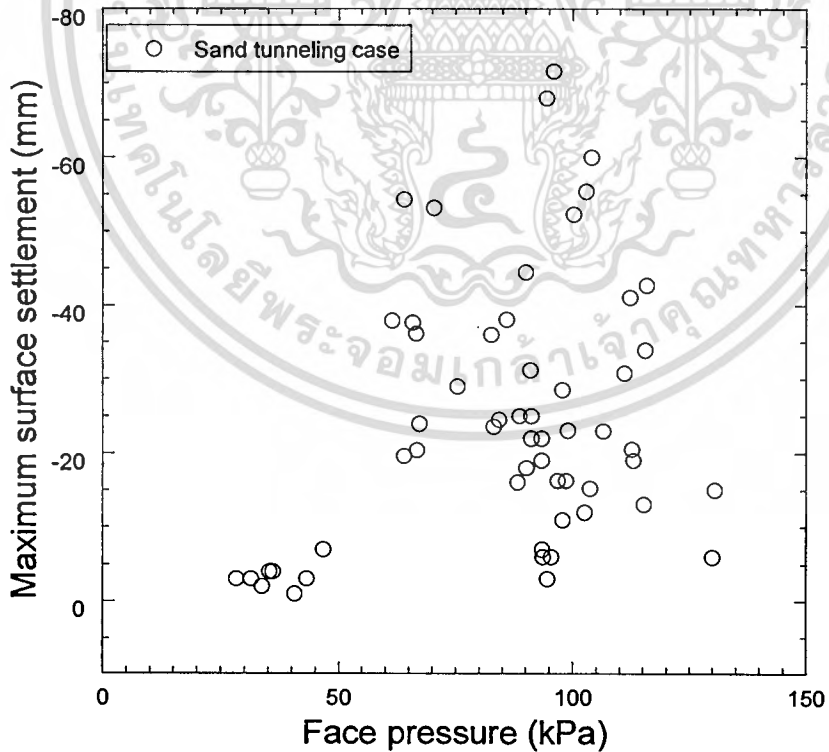
จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 6.5 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) ซึ่งสอดคล้องกับ [39-40] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ -0.547 แสดงให้เห็นว่า ถ้าหัวเจาะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วที่ค่อนข้างสูง จะส่งผลทำให้การทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นบนผิวดินก็จะมีค่ามากตามไปด้วย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะ และค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายไว้ในรูปที่ 6.5 ในส่วนของปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาประกอบไปด้วย เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน ระดับน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ความดันน้ำหัวเจาะ ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ ความลึกของอุโมงค์ และความดันของการฉีดน้ำปูน ตามลำดับ ซึ่งลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวในชั้นดินทราย มีความแตกต่างกันกับปัจจัยในทุกสภาพดิน และในส่วนของแนวโน้มความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะมีแนวโน้มที่เหมือนกันกับปัจจัยในทุกสภาพดิน แต่จะแตกต่างกันในส่วนของเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนที่สูงจะส่งผลให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากในกรณีนี้ อันเนื่องมาจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย จะมีค่าการซึมผ่านของน้ำในดินที่สูงส่งผลต่อแรงดันน้ำใต้ดินขณะทำการก่อสร้าง มีส่วนทำให้ปริมาณน้ำปูนที่ทำการฉีดพ่นเพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ ถูกแรงดันน้ำใต้ดินชะล้างน้ำปูนออกไป จนไม่สามารถอุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ได้ ซึ่งไม่เพียงแต่เปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนเท่านั้น ในส่วนของความดันของการฉีดน้ำปูนในชั้นดินทรายก็อาจจะเกิดผลกระทบจากแรงดันน้ำใต้ดินเช่นเดียวกัน จนทำให้ปัจจัยความดันของการฉีดน้ำปูนไม่สามารถสร้างความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่อค่าการทรุดตัวได้ ในส่วนความดันน้ำหัวเจาะจากการก่อสร้างในชั้นทรายก็จะมีผลสัมพันธ์กับความสัมพันธ์ของปัจจัยในทุกสภาพดินเช่นเดียวกัน (รูปที่ 6.6) คือ ความดันน้ำหัวเจาะที่สูงก็จะส่งผลให้การทรุดตัวสูงตามไปด้วย และในกรณีที่ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ที่หัวเจาะเคลื่อนออกไปจากตัวสถานีมากเท่าใด แนวโน้มของการทรุดตัวก็จะมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 6.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย

	Surface settlement	Penetration rate	Grout filling	WT from invert	Face pressure	Dist. from shaft	Pitching angle	Tunnel depth	Grouting pressure
Surface settlement	1	-0.547	-0.484	0.369	-0.281	0.241	0.233	-0.177	0.085



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขุดเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย



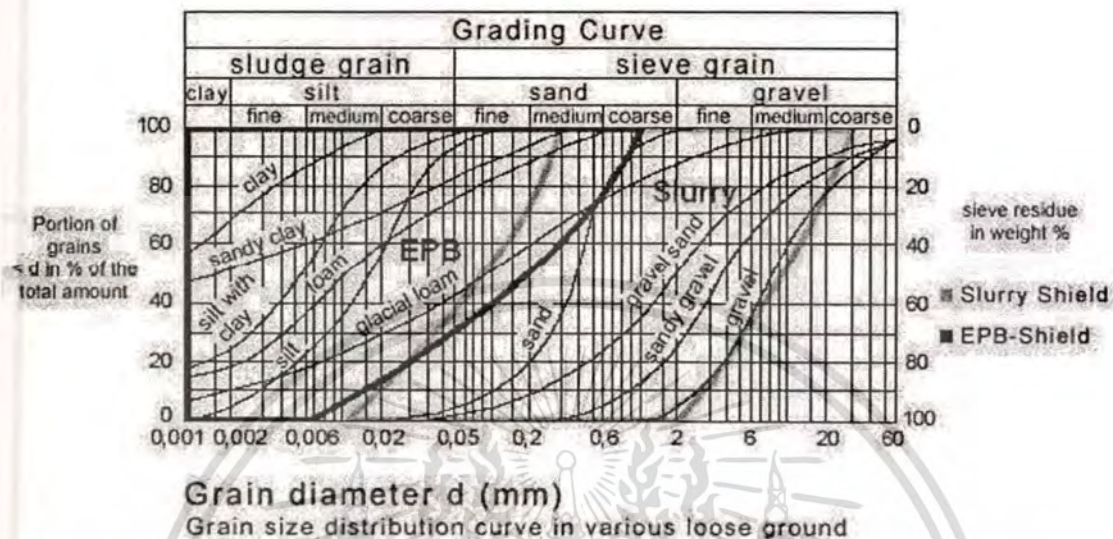
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันหน้าหัวเจาะและค่าการทรุดตัวผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว และการทรุดตัวของผิวดินแยกตามการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินต่างๆ ประกอบด้วย 1) การก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน 2) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง 3) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง 4) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย และ 5) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย ได้ทำการสรุปความสัมพันธ์ไว้ในตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.8 ถึง 6.15 พบว่า ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) จะมีความสำคัญที่สุดต่อการทรุดตัวในกรณีที่ทำกรก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน ชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ซึ่งการใช้ความดันหน้าหัวเจาะที่สูงจะทำให้การทรุดตัวมีค่าน้อยลง ความเร็วขุดเจาะ (Penetration rate) จะมีความสำคัญที่สุดต่อการทรุดตัวในกรณีที่ทำกรก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย ซึ่งหากใช้ความเร็วขุดเจาะที่ต่ำจะทำให้การทรุดตัวมีค่าลดลง ตามทฤษฎีในชั้นดินทรายมีค่าการคงตัว (Stand-up time) น้อย และแรงดันน้ำที่สูง ในการขุดเจาะอุโมงค์หัวเจาะต้องเคลื่อนตัวไปข้างหน้าให้เร็วที่สุด เพื่อทดแทนปริมาตรของดินทรายที่เคลื่อนตัวเข้าสู่อุโมงค์ แต่เมื่อศึกษาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในชั้นทราย พบว่า การขุดเจาะในชั้นดินทราย การเคลื่อนตัวของหัวเจาะที่ใช้ความเร็วขุดเจาะต่ำเมื่อเทียบกับการก่อสร้างในสภาพดินอื่น จะทำให้แนวโน้มการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินทรายมีอุปสรรคในการก่อสร้างเป็นอย่างมาก ทั้งปัญหาน้ำใต้ดินและเสถียรภาพในการขุดเจาะ อีกทั้งจากข้อมูลผู้ผลิตหัวเจาะพบว่า หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลมีความเหมาะสมในการก่อสร้างในชั้นดินเหนียว (Cohesive soil) มากกว่าในชั้นดินทราย (Cohesionless) ดังรูปที่ 6.7 ทำให้ต้องใช้ความระมัดระวังและความรอบคอบในการควบคุมความเร็วขุดเจาะและปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอื่นควบคู่ไปด้วย ลำดับต่อมา ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station) จะมีความสำคัญน้อยที่สุดต่อการทรุดตัวในกรณีที่ทำกรก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดิน ชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง ความเร็วขุดเจาะจะมีความสำคัญน้อยที่สุดต่อการทรุดตัวในกรณีที่ทำกรก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย และความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure) จะมีความสำคัญน้อยที่สุดต่อการทรุดตัวในกรณีที่ทำกรก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย สิ่งสำคัญที่สุด งานวิจัยนี้ได้เห็นจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ก็คือ ลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน ซึ่งถ้าหากไม่แยกวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและการทรุดตัวของผิวดิน จะไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนตัวของดินได้ชัดเจน ดังนั้น การใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินเฉพาะสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในแต่ละชั้นดินน่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับทุกสภาพดิน อีกทั้งการค้นพบนี้ มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะนำไปสู่การทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่หนังสือประนีประนอมกับการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับแรงดันดินสมดุล (EPB shield) แยกตามสภาพดิน และทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยคัดปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยที่สุด (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำที่สุด) ออกไปจากการประมวลผลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

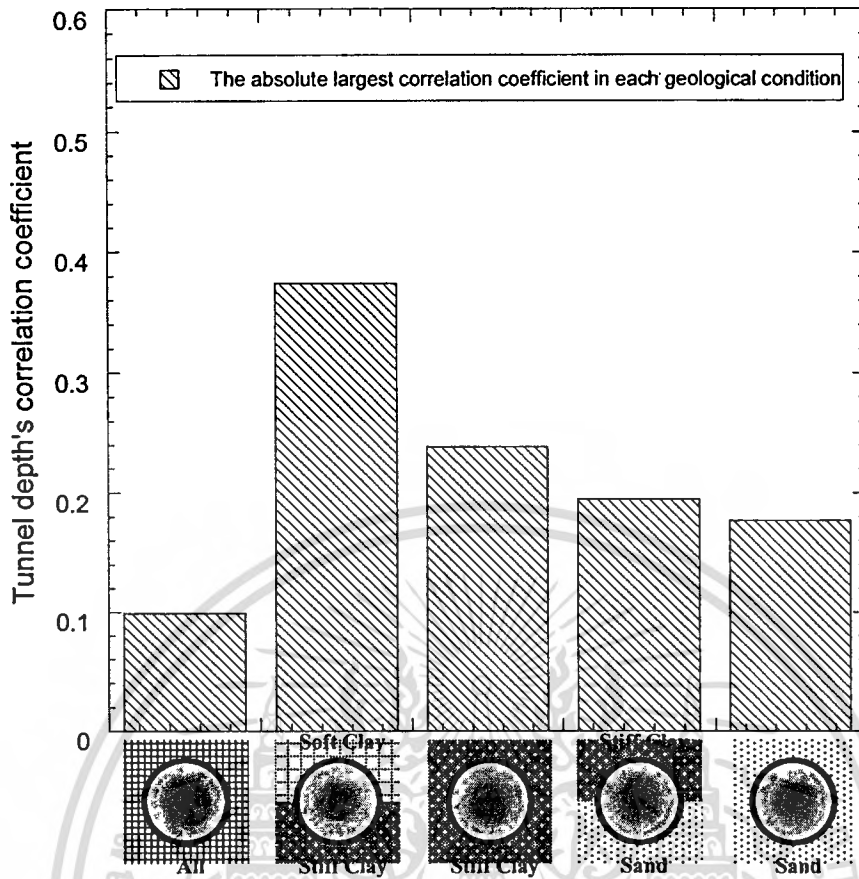


รูปที่ 6.7 แผนภูมิการกระจายตัวของเม็ดดินสัมพันธ์กับการเลือกใช้หัวเจาะ

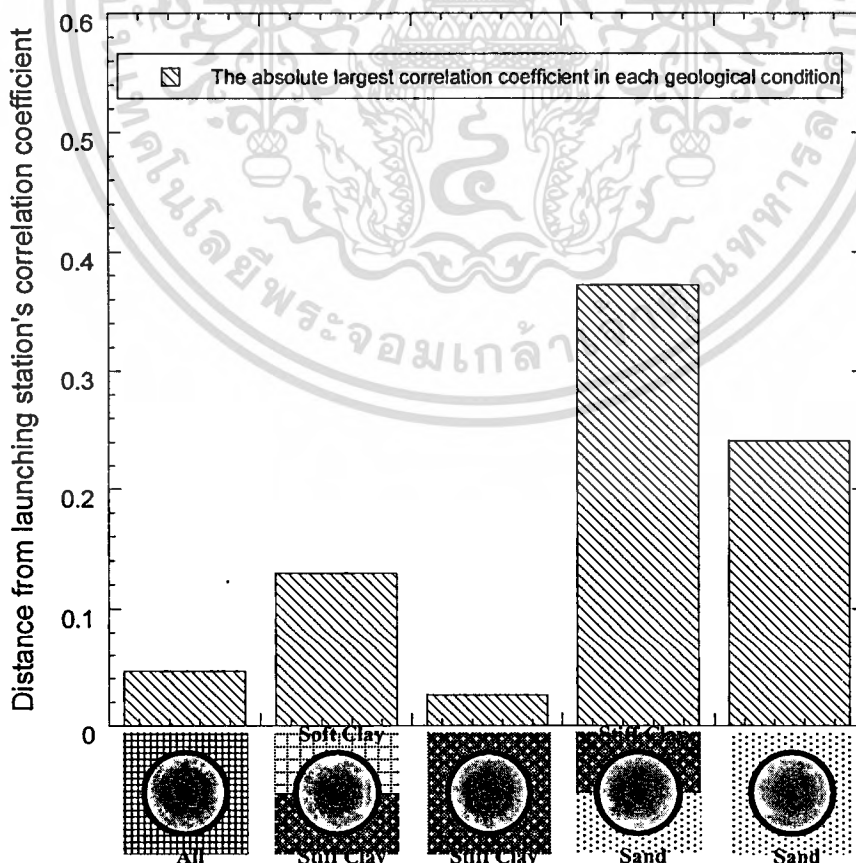
ตารางที่ 6.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินต่างๆ

Geological conditions	Principal Components							
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th
All geological conditions	Face pressure 0.398	Grouting pressure 0.258	Pitching angle 0.227	Grout filling 0.180	WT from invert 0.102	Tunnel depth -0.099	Penetration rate -0.055	Dist. from shaft -0.046
Soft-Stiff clay layers	Face pressure 0.458	Penetration rate 0.424	WT from invert 0.374	Tunnel depth -0.374	Pitching angle 0.357	Grouting pressure 0.343	Grout filling 0.262	Dist. from shaft 0.130
Stiff clay layers	Face pressure 0.516	Grout filling 0.423	Grouting pressure 0.385	Tunnel depth 0.239	WT from invert -0.239	Penetration rate 0.193	Pitching angle 0.133	Dist. from shaft -0.026
Stiff clay-Sand layers	Face pressure 0.490	Grouting pressure 0.439	Dist. from shaft -0.372	Grout filling 0.225	WT from invert -0.202	Tunnel depth 0.195	Pitching angle 0.060	Penetration rate 0.010
Sand layers	Penetration rate -0.547	Grout filling -0.484	WT from invert 0.369	Face pressure -0.281	Dist. from shaft 0.241	Pitching angle 0.233	Tunnel depth -0.177	Grouting pressure 0.085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

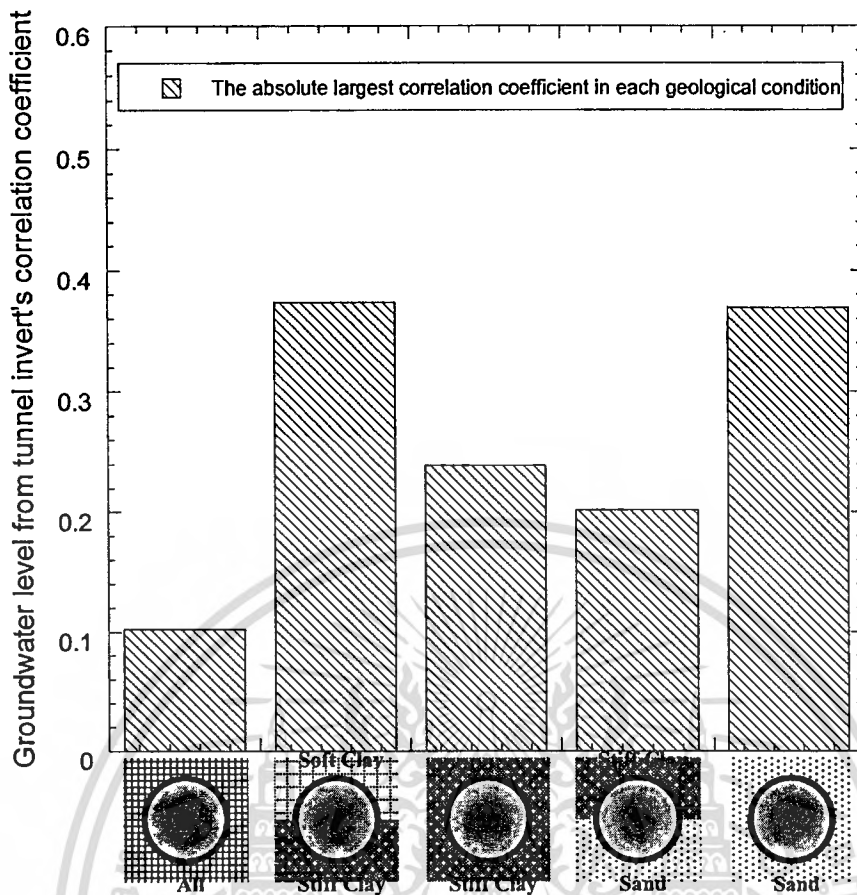


รูปที่ 6.8 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความลึกอุโมงค์ในแต่ละสภาพดิน

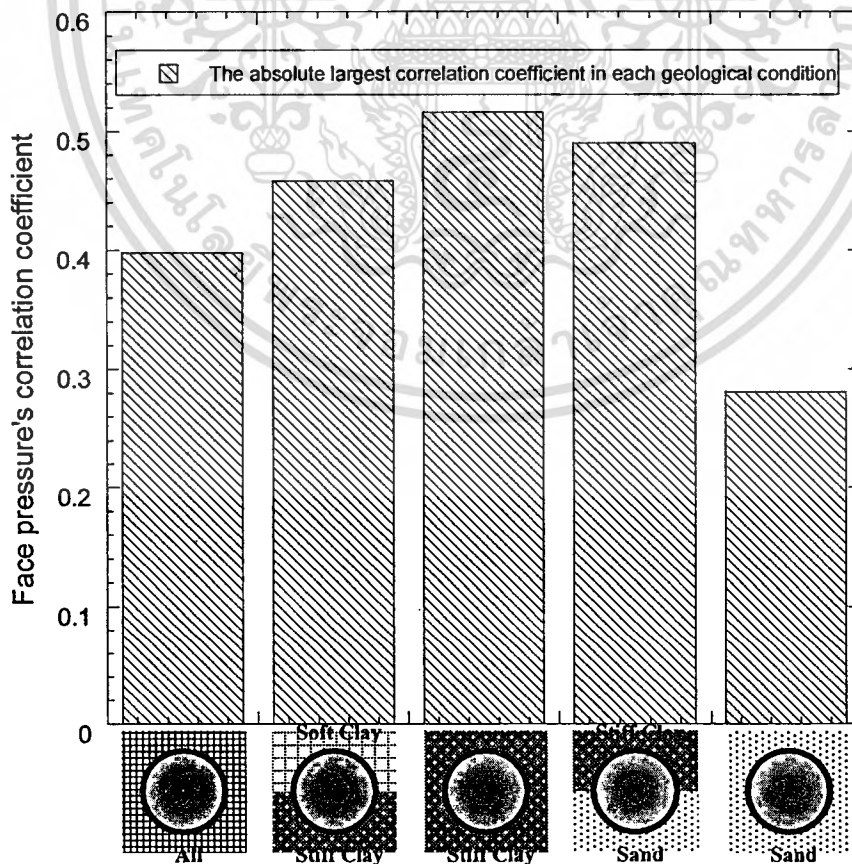


รูปที่ 6.9 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะในแต่ละสภาพดิน

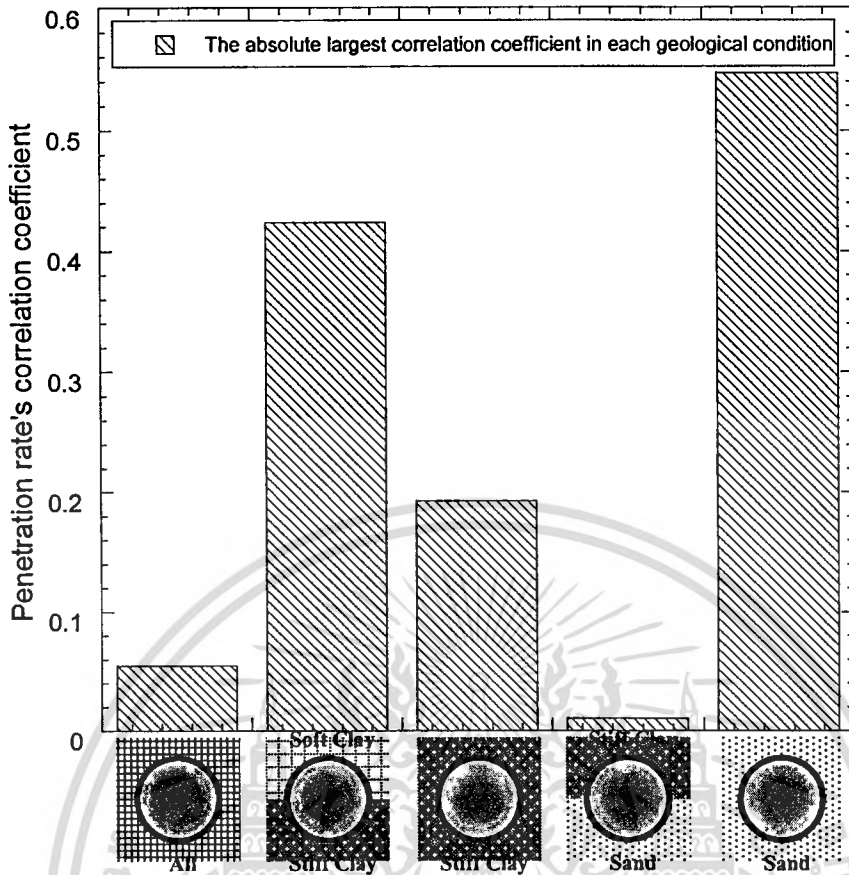
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



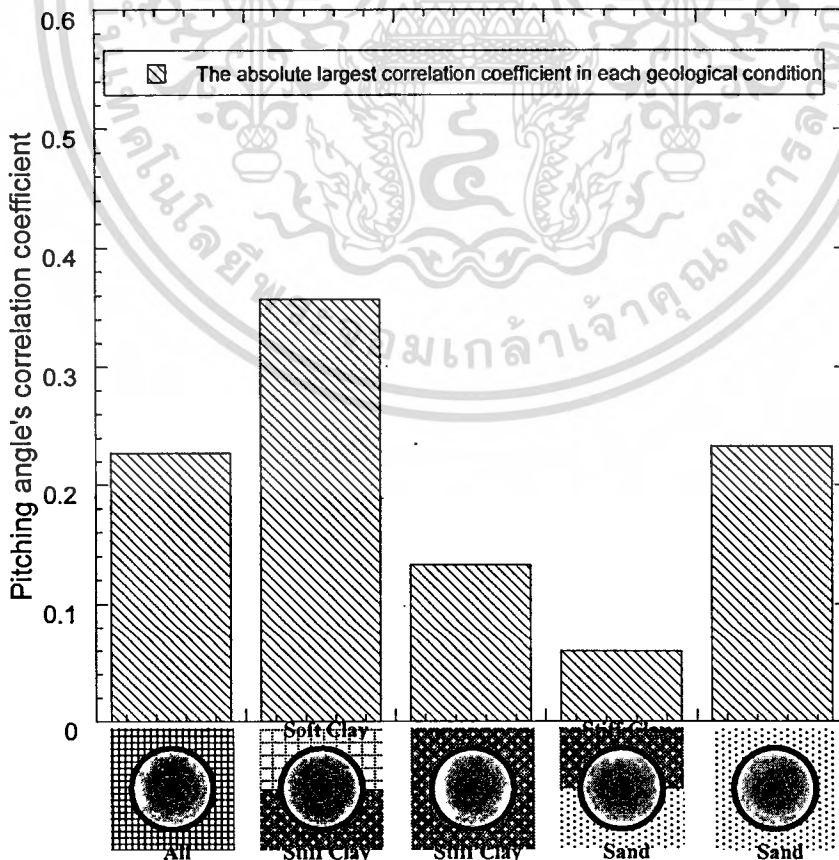
รูปที่ 6.10 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของระดับน้ำใต้ดินในแต่ละสภาพดิน



เอกสารนี้ **รูปที่ 6.11** ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความดันหน้าหัวเจาะในแต่ละสภาพดิน งานการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

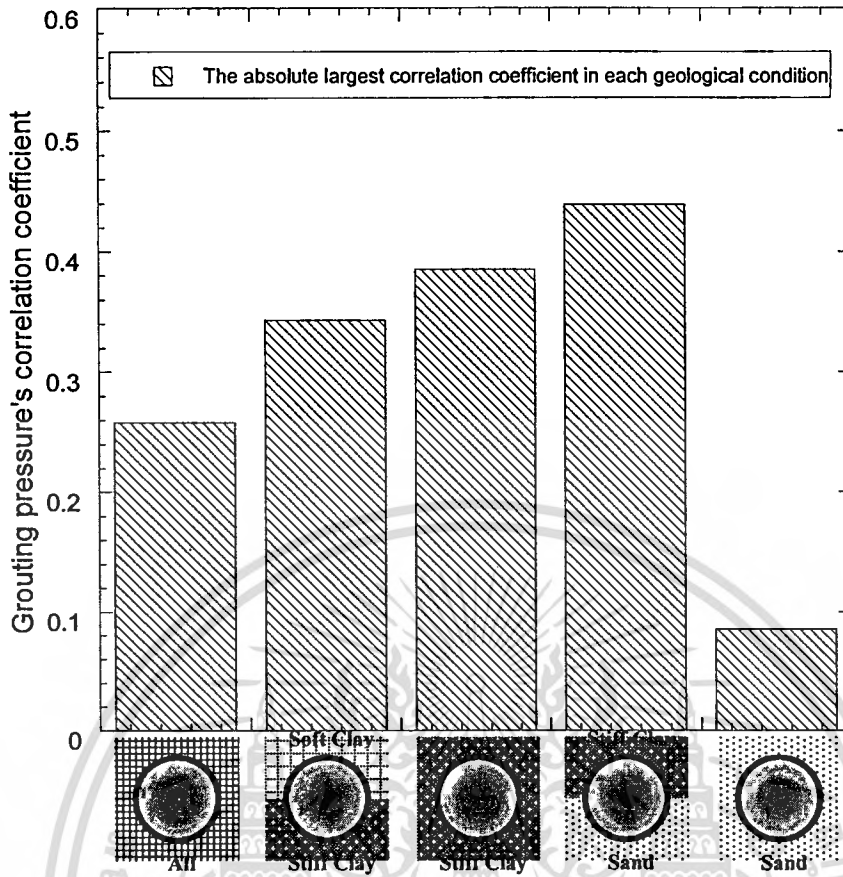


รูปที่ 6.12 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความเร็วจุดเจาะในแต่ละสภาพดิน

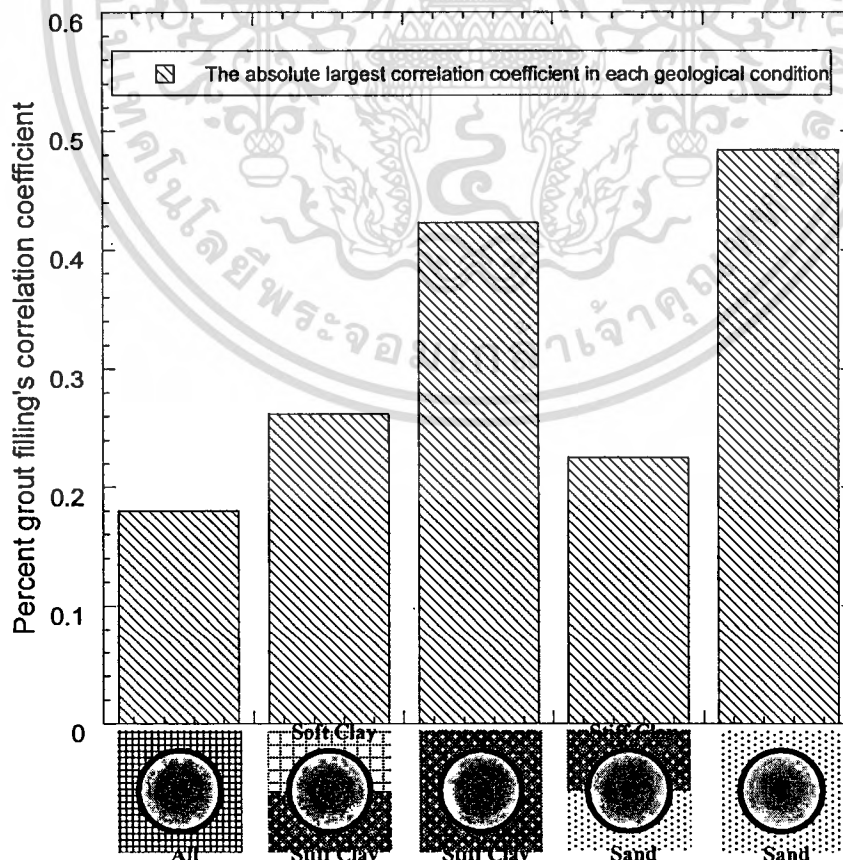


รูปที่ 6.13 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะในแต่ละสภาพดิน

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความดันของการฉีดน้ำปูนในแต่ละสภาพดิน



เอกสารรูปที่ 6.15 ค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูนในแต่ละสภาพดิน ในการคำนวณการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจาก การขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

7.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (EPB shield) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทดสอบความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน และพิจารณาถึงขอบเขตขีดจำกัดในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม อันเนื่องมาจากความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่มีความแตกต่างกันในแต่ละสภาพดิน นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่ประกอบไปด้วย ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ สภาพทางธรณีวิทยา และการควบคุมหัวเจาะ ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์น้อยที่สุดในแต่ละสภาพดินที่ได้มาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) ซึ่งปัจจัยใดที่มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดจะถูกตัดทิ้งไปจากชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียม แล้วจึงนำไปทำการพยากรณ์การทรุดตัวเปรียบเทียบกับการพยากรณ์ในกรณีที่ไม่มีการตัดปัจจัยใดๆ ทิ้งไป เพื่อศึกษาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวในแต่ละสภาพดิน ในที่นี้ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project) และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project) ได้นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

7.2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมจะนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาต่างๆดังแสดงในตารางที่ 7.1 โดยใช้ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา โดยการแบ่งกรณีศึกษาต่างๆเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินนั้น จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวประกอบไปด้วย

1. การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ

เอกสารนี้เป็น 2. การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินตามลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ และการควบคุมหัวเจาะที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในแต่ละสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ และจะตัดปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยหรือมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยออกไป

ตารางที่ 7.1 กรณีศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

กรณีศึกษา	วัตถุประสงค์	ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้	ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ
1	พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ	ทุกสภาพดิน	ทุกสภาพดิน
2	พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินเดียวกัน		
2.1		ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง
2.2		ดินเหนียวแข็ง	ดินเหนียวแข็ง
2.3		ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย	ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย
2.4		ดินทราย	ดินทราย
3	พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง		
3.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station)	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง
4	พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินเหนียวแข็ง		
4.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station)	ดินเหนียวแข็ง	ดินเหนียวแข็ง
5	พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินเหนียวแข็ง-ดินทราย		
5.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate)	ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย	ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย
6	พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินทราย		
6.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure)	ดินทราย	ดินทราย

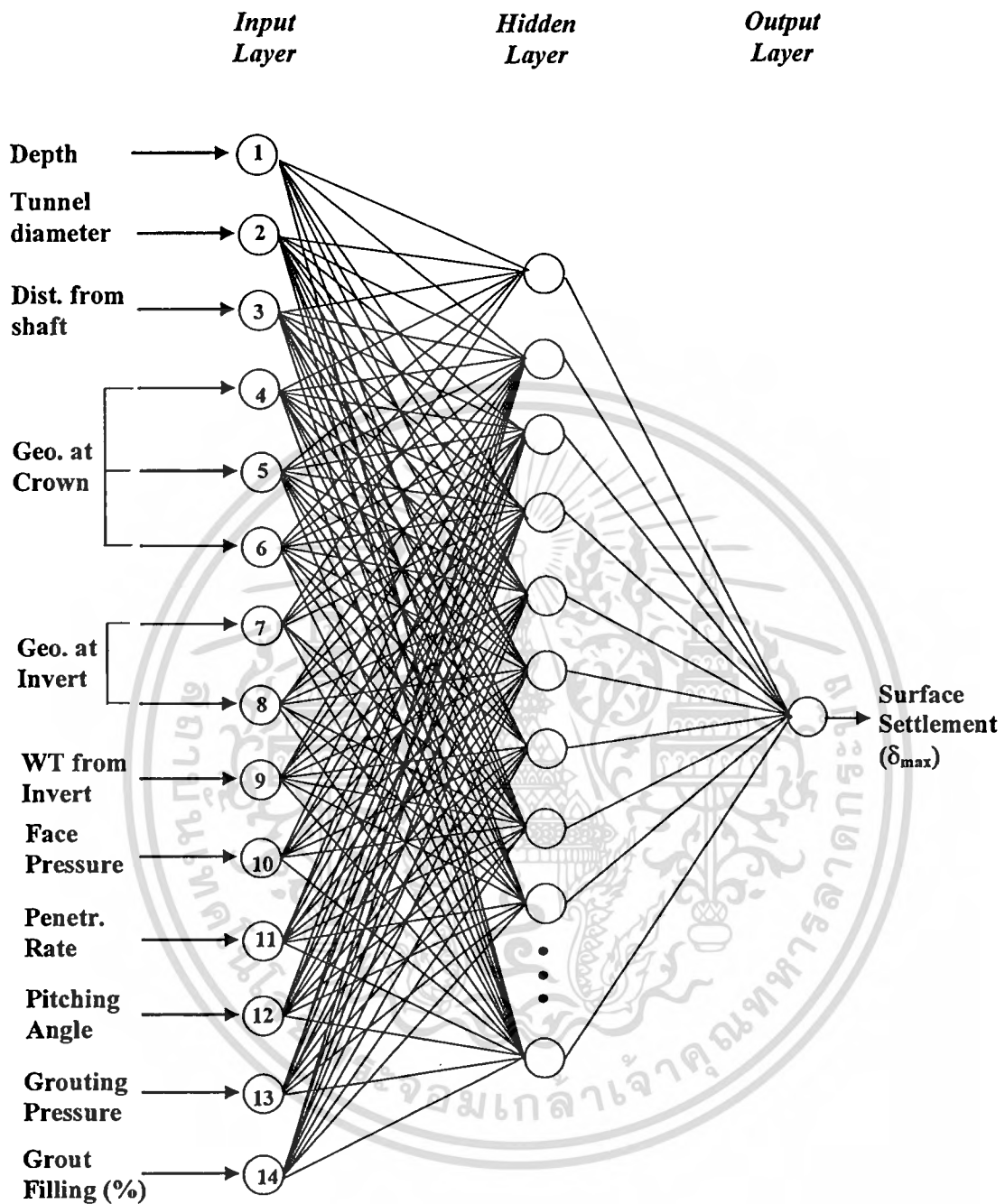
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.1 กรณีศึกษาที่ 1 เรียนรู้ข้อมูลในทุกสภาพดิน เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกสภาพดิน

ในกรณีนี้ โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ข้อมูลในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ และนำความสัมพันธ์ที่สร้างจากการเรียนรู้ มาใช้เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินในทุกสภาพดิน เช่นเดียวกัน เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยรวม ในการที่จะนำไปเปรียบถึงความสัมพันธ์กับกรณีศึกษาอื่นต่อไป โดยข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวมีทั้งหมด 287 ข้อมูล แบ่งเป็นข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล 263 ข้อมูล ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้มีความหลากหลายในแต่ละสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา 24 ข้อมูล ซึ่งข้อมูลมีเฉพาะแต่ในส่วนการก่อสร้างในชั้นทรายเท่านั้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งข้อมูลในกรณีศึกษานี้เป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 230 ข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 57 ข้อมูล กระจายตามส่วนก่อสร้างต่างๆ เพื่อให้ครอบคลุมถึงปัญหา โดยคิดตามอัตราส่วน 4:1 (ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ต่อข้อมูลที่ใช้ทดสอบ) มาทำการเรียนรู้และทดสอบประสิทธิภาพในโครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 14 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลแสดงไว้ในรูปที่ 7.1 แล้วหลังจากนั้นจึงนำมาหารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN model) ก่อนทุกครั้ง หากมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล จำนวนชั้นแฝง และจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง [35]

ด้วยเหตุนี้ จึงเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย และทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.2 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.2 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 18 ประกอบด้วย 14 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 2 ชั้นแฝง (Hidden layer) 20 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 3,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของกระบวนการทดสอบต่ำที่สุด คือ 8.57 มม. และรูปที่ 7.3 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากทุกสภาพดิน



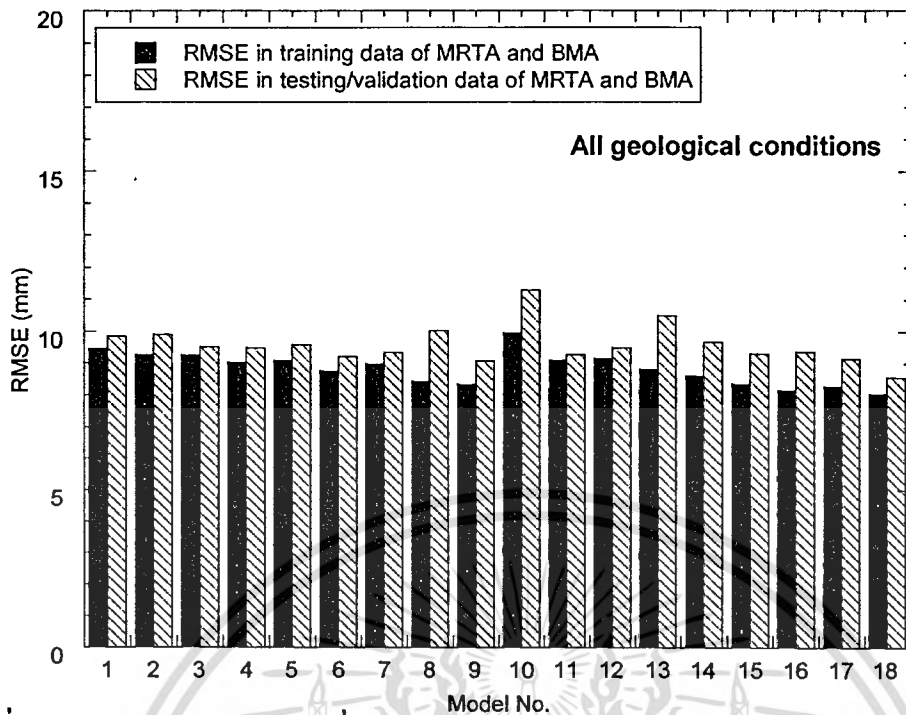
รูปที่ 7.1 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

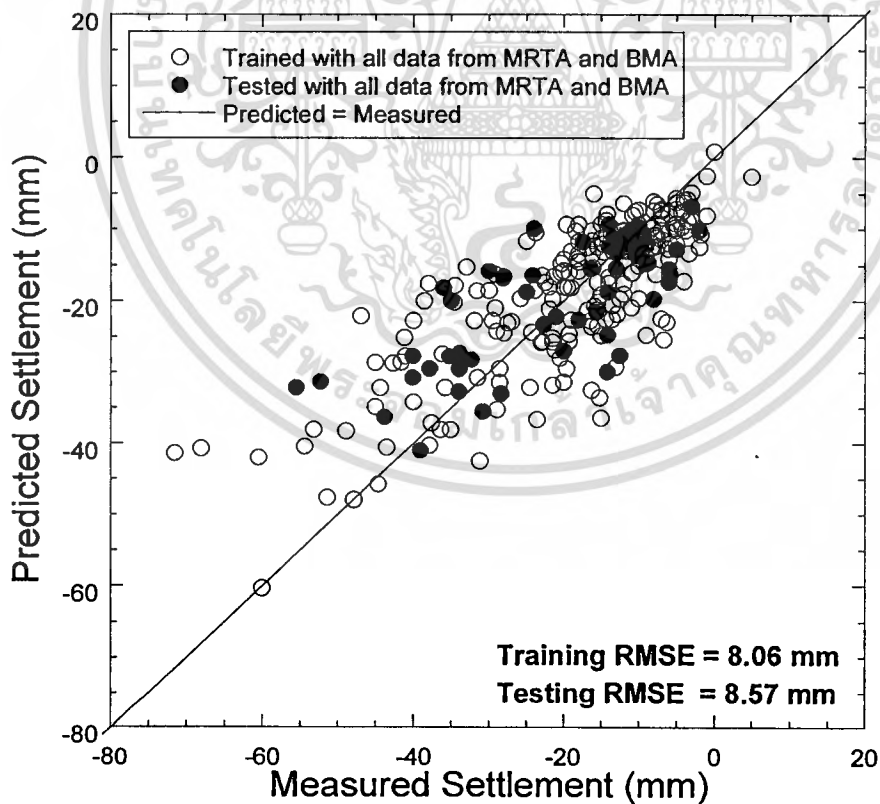
ตารางที่ 7.2 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	9.46	9.86
2	1	15	1000	9.28	9.90
3	1	20	1000	9.26	9.53
4	1	10	2000	9.03	9.48
5	1	15	2000	9.09	9.59
6	1	20	2000	8.76	9.21
7	1	10	3000	8.99	9.35
8	1	15	3000	8.44	10.04
9	1	20	3000	8.34	9.07
10	2	10	1000	9.97	11.30
11	2	15	1000	9.11	9.29
12	2	20	1000	9.17	9.50
13	2	10	2000	8.83	10.50
14	2	15	2000	8.61	9.68
15	2	20	2000	8.36	9.31
16	2	10	3000	8.16	9.37
17	2	15	3000	8.28	9.17
18	2	20	3000	8.06	8.57
19	2	20	3500	7.61	9.41
20	2	25	3000	7.84	9.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



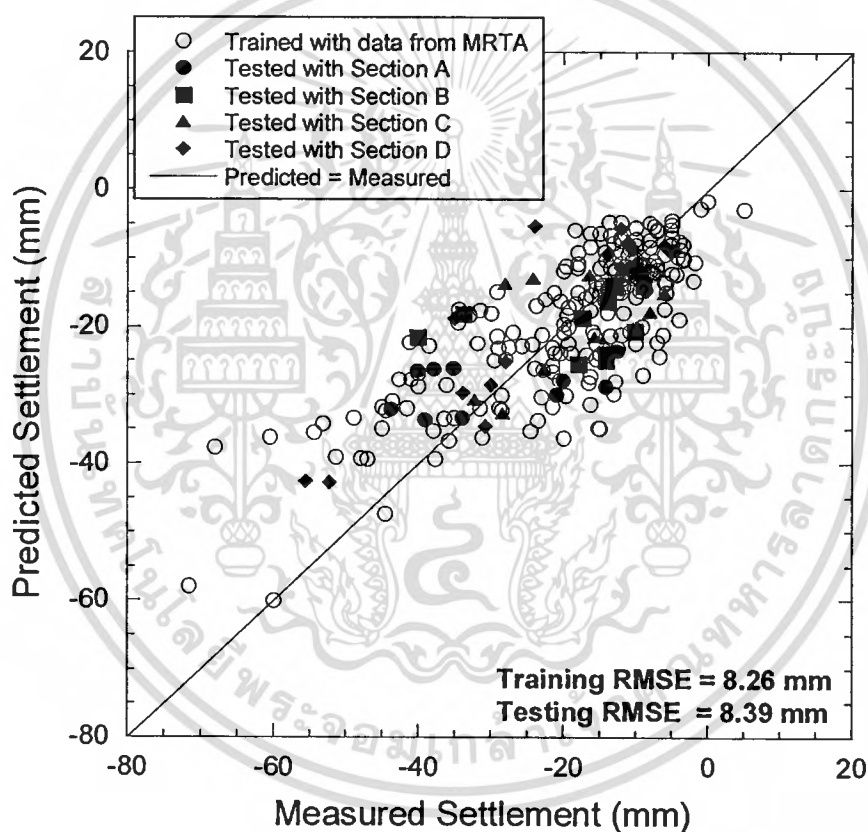
รูปที่ 7.2 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ



รูปที่ 7.3 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

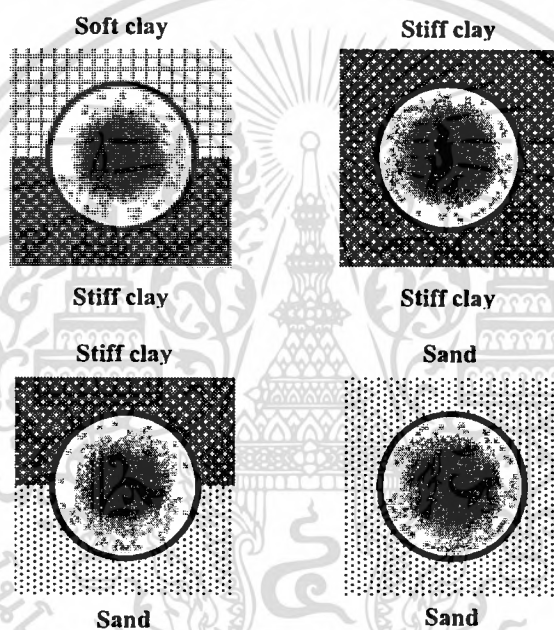
ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 8.57 มม.ตามรูปที่ 7.3 โดยที่มีค่า RMSE ใกล้เคียงกับผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลในส่วนของการทดสอบของ Suwansawat and Einstein [30] ที่ให้ค่า RMSE 8.39 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.4 นั้นแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะนำโครงข่ายประสาทเทียมไปทำการพยากรณ์การทรุดตัวร่วมกับโครงการอื่น โครงข่ายก็สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวไปสู่ค่าการทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7.4 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล [30]

7.2.2 กรณีศึกษาที่ 2 เรียนรู้ข้อมูลสภาพดินเดียวกัน เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินเดียวกัน

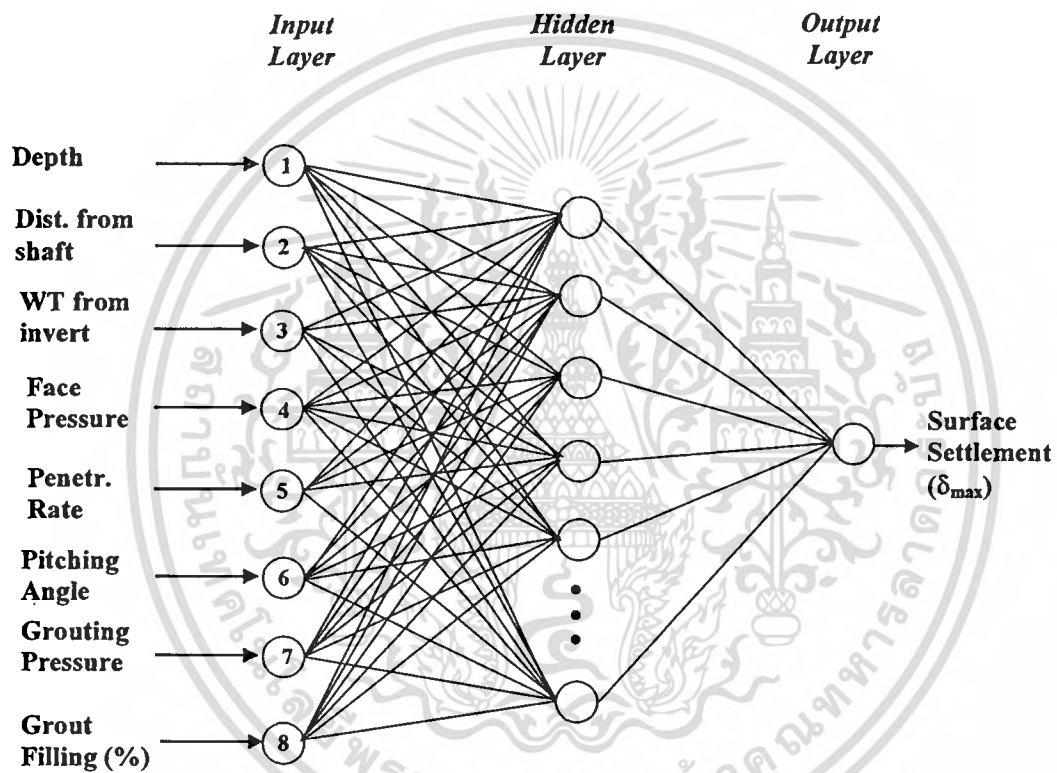
ในกรณีศึกษาที่ 2 ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว โดยที่ได้ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่น้ำเจ้าพระยาออกเป็น 4 กลุ่มตามสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ประกอบไปด้วย 1) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง 2) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง 3) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย และ 4) การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย แสดงในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 การก่อสร้างอุโมงค์แยกตามสภาพดิน

ในส่วนของสภาพดินในชั้นรับข้อมูลของโครงข่าย การป้อนข้อมูลในชั้นรับข้อมูลของโครงข่ายที่เป็นส่วนของสภาพดินได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ ประกอบด้วย ดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็งและดินทราย (2) ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ ประกอบด้วย ดินเหนียวแข็งและดินทราย โดยการป้อนข้อมูลในส่วนนี้ ถ้าอุโมงค์อยู่ในสภาพดินชนิดใดจะถูกป้อนค่าเป็น “1” ในทางตรงกันข้ามถ้าอุโมงค์ไม่ได้อยู่ในดินชนิดนั้นก็จะถูกป้อนค่าเป็น “0” แสดงในรูปที่ 7.1

ดังนั้น จากการแบ่งกลุ่มข้อมูลตามสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ทำให้การป้อนข้อมูลในชั้นรับข้อมูลของสภาพดินมีค่าคงที่ตลอดการเรียนรู้ (Training) และการทดสอบ (Testing) ของโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยเหตุนี้ กรณีศึกษาดังกล่าวจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใส่ข้อมูลในส่วนของสภาพดิน ทำให้โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมมีจำนวนลดลงเหลือเพียง 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล ประกอบไปด้วย ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ และการควบคุมหัวเจาะ แสดงในรูปที่ 7.6 เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในทั้ง 4 กลุ่มตามสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ต่อไป



รูปที่ 7.6 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเดียวกัน

7.2.2.1 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

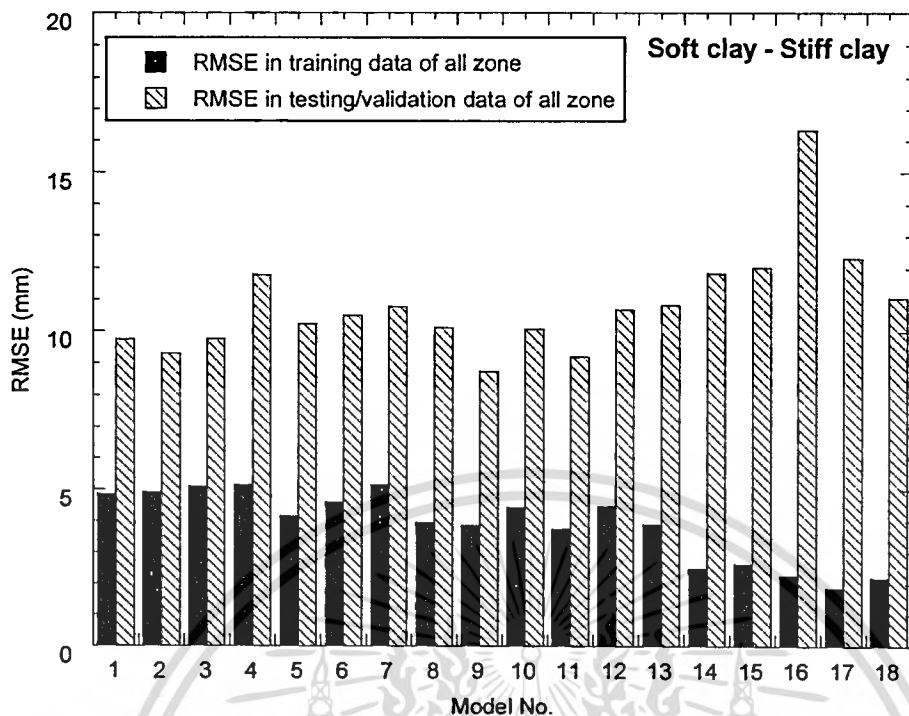
ในกรณีนี้ โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้จากข้อมูลที่ได้รับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง และนำความสัมพันธ์ที่สร้างจากการเรียนรู้ มาใช้เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง โดยข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งมีทั้งหมด 33 ข้อมูล ซึ่งมีแต่เฉพาะในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ข้อมูลที่ได้มานั้นมีกระจายอย่างละเอียดเล็กน้อยในทุกส่วนก่อสร้างประกอบไปด้วย ส่วน A B C และ D ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

งานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งข้อมูลในส่วนนี้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 25 ข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 8 ข้อมูล ค่อยจากนั้นจึงนำมารูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม โดยดำเนินการเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย และทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.3 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.7 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 9 ประกอบด้วย 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 1 ชั้นแฝง (Hidden layer) 20 หน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 3,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของกระบวนการทดสอบต่ำที่สุด คือ 8.75 มม. และรูปที่ 7.8 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

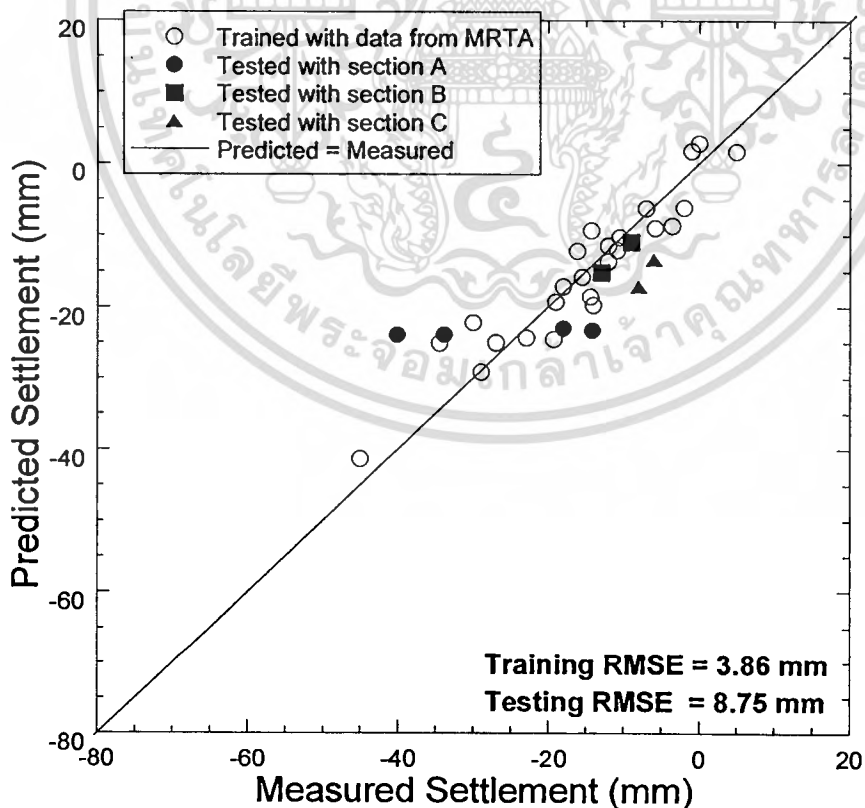
ตารางที่ 7.3 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	4.86	9.74
2	1	15	1000	4.91	9.30
3	1	20	1000	5.10	9.77
4	1	10	2000	5.15	11.78
5	1	15	2000	4.15	10.24
6	1	20	2000	4.59	10.51
7	1	10	3000	5.16	10.78
8	1	15	3000	3.95	10.12
9	1	20	3000	3.86	8.75
10	2	10	1000	4.44	10.08
11	2	15	1000	3.75	9.21
12	2	20	1000	4.47	10.69
13	2	10	2000	3.89	10.84
14	2	15	2000	2.49	11.83
15	2	20	2000	2.64	12.01
16	2	10	3000	2.26	16.34
17	2	15	3000	1.88	12.31
18	2	20	3000	2.20	11.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



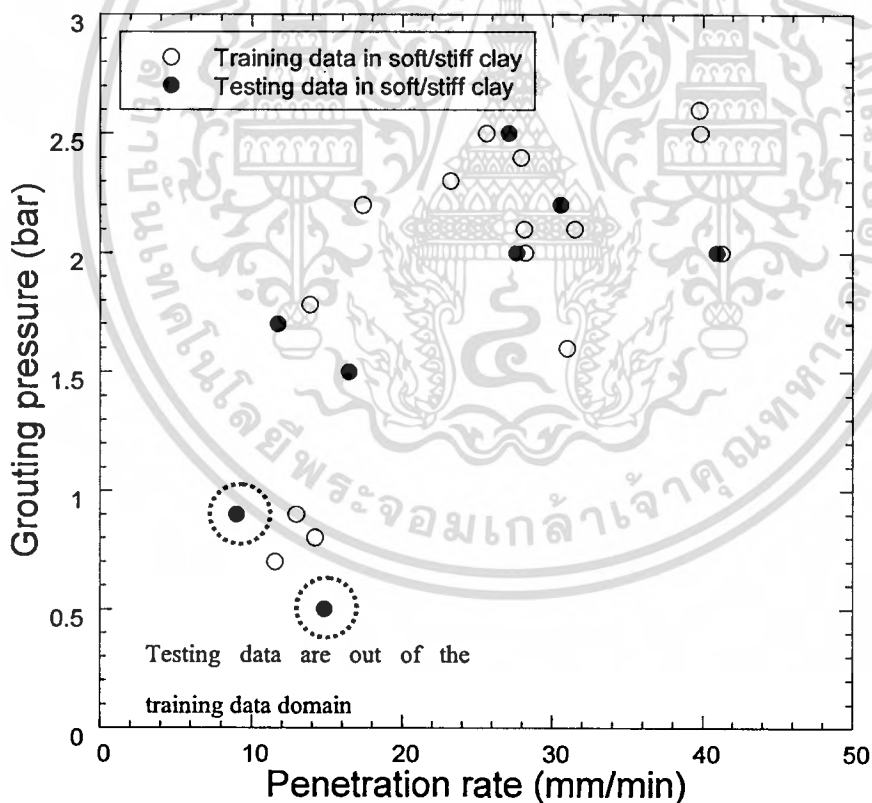
รูปที่ 7.7 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง



รูปที่ 7.8 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์
ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 8.75 มม.ตามรูปที่ 7.8 โดยที่มีค่า RMSE สูงกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงข่ายที่เล็กกว่า ที่ให้ค่า RMSE 8.57 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.3 สาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งมีค่า RMSE ที่สูง อันเนื่องมาจาก 1) ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ในส่วนนี้มีน้อยทำให้การสร้างความสัมพันธ์ไปสู่การพยากรณ์การทรุดตัวยังคงไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ และ 2) ข้อมูลที่ใช้ทดสอบในส่วนของความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) และความดันของการฉีดน้ำปูน เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ (Grouting Pressure) ซึ่งบางส่วนของข้อมูลที่ใช้ทดสอบอยู่นอกเหนือขอบเขตของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้แสดงในรูปที่ 7.9 ทำให้การสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลในกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่าย ไม่สามารถครอบคลุมไปถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ จนอาจทำให้ผลลัพธ์ที่แสดงออกมามีค่าที่ผิดพลาดได้



รูปที่ 7.9 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งในส่วนความเร็วขณะขุดเจาะ และความดันของการฉีดน้ำปูน

7.2.2.2 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

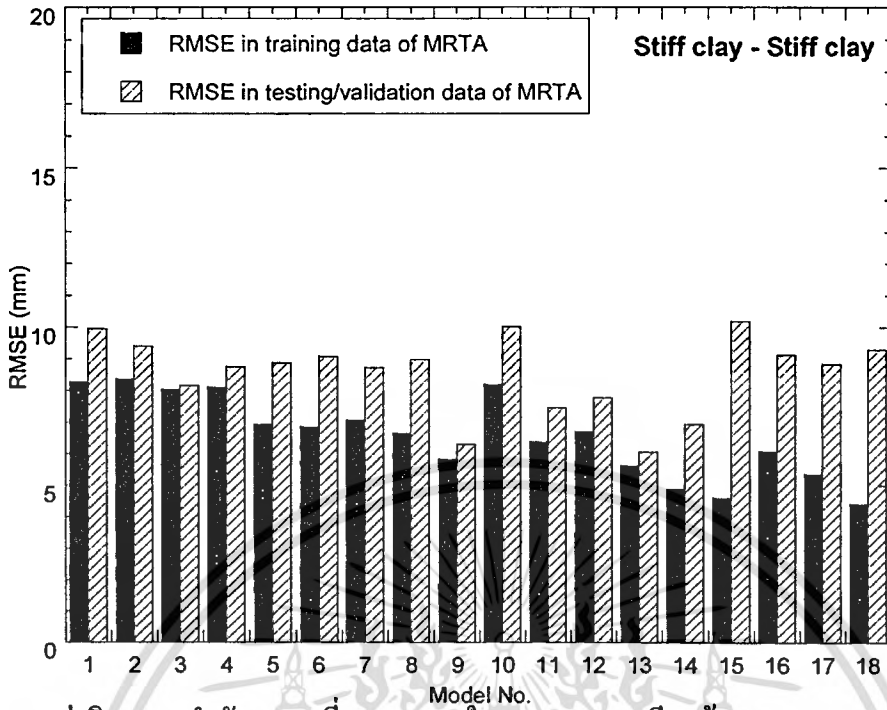
ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งมีทั้งหมด 118 ข้อมูล ภายในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล โดยข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมมาสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งนั้น ถือว่ามีปริมาณการเก็บรวบรวมข้อมูลมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินอื่นๆ อันเนื่องมาจากความเหมาะสมของสภาพชั้นดินกับวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ซึ่งในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดในการก่อสร้างแล้ว การก่อสร้างอุโมงค์ในพื้นที่กรุงเทพฯ จะทำการก่อสร้างในชั้นดินเหนียวแข็งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น ข้อมูลที่เก็บรวบรวมในส่วนนี้จึงมีกระจุกกระจายในปริมาณที่เหมาะสมในทุกส่วนก่อสร้างย่อยของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

จากข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ได้นำมาทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 96 ข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 22 ข้อมูล เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการหารูปแบบที่เหมาะสมของโครงข่าย ซึ่งจะทำการเรียนรู้ และทดสอบข้อมูลในแต่ละรูปแบบของโครงข่าย พร้อมทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ดังแสดงในตารางที่ 7.3 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.10 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 13 ประกอบด้วย 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 2 ชั้นแฝง (Hidden layer) 10 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 2,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุดในกรณีนี้ โดยมีค่า RMSE ค่าที่สุด คือ 6.06 มม. ในกระบวนการทดสอบ และรูปที่ 7.11 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

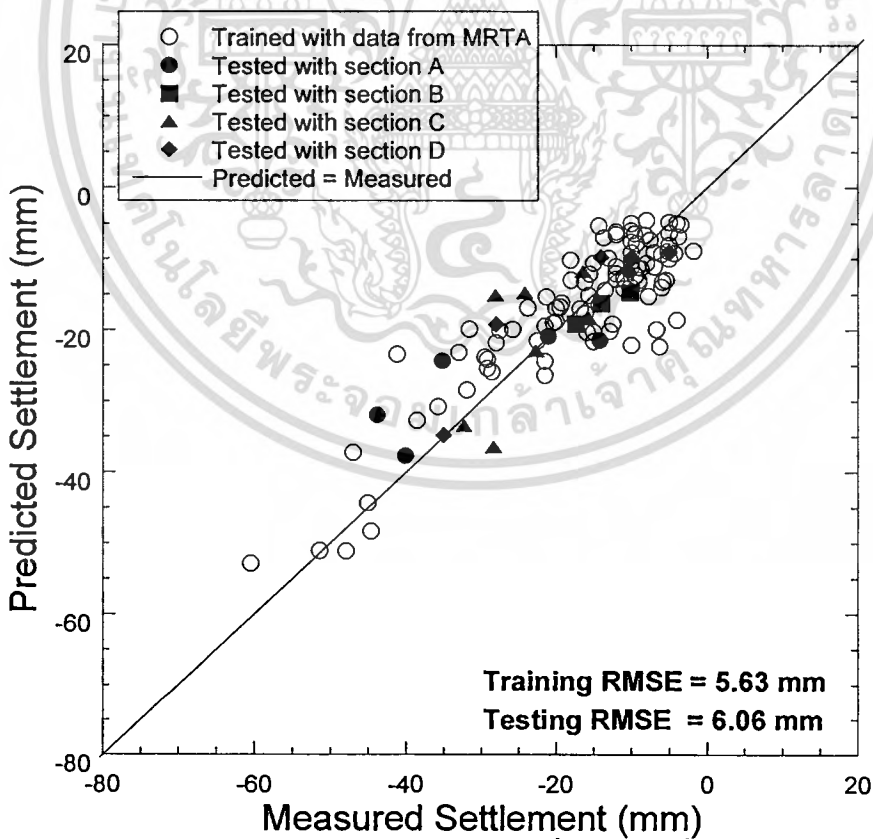
ตารางที่ 7.4 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการ
ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	8.26	9.96
2	1	15	1000	8.38	9.41
3	1	20	1000	8.03	8.15
4	1	10	2000	8.10	8.76
5	1	15	2000	6.93	8.88
6	1	20	2000	6.87	9.08
7	1	10	3000	7.08	8.73
8	1	15	3000	6.66	8.99
9	1	20	3000	5.83	6.30
10	2	10	1000	8.20	10.03
11	2	15	1000	6.37	7.46
12	2	20	1000	6.70	7.78
13	2	10	2000	5.63	6.06
14	2	15	2000	4.88	6.95
15	2	20	2000	4.62	10.19
16	2	10	3000	6.10	9.14
17	2	15	3000	5.37	8.86
18	2	20	3000	4.42	9.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



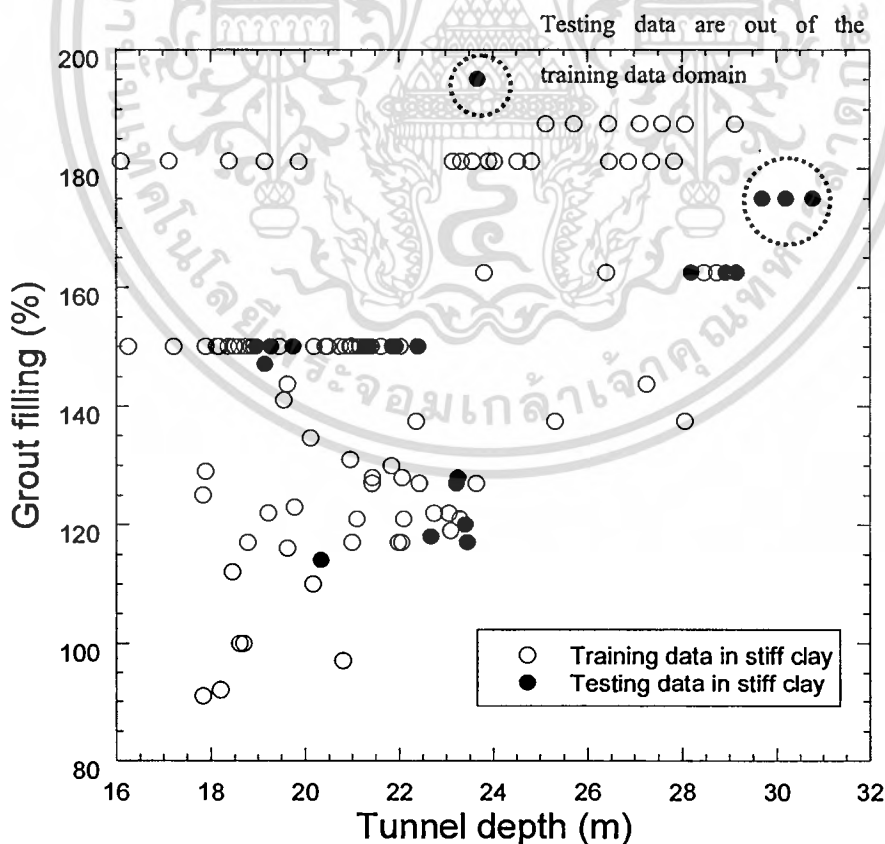
รูปที่ 7.10 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง



รูปที่ 7.11 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

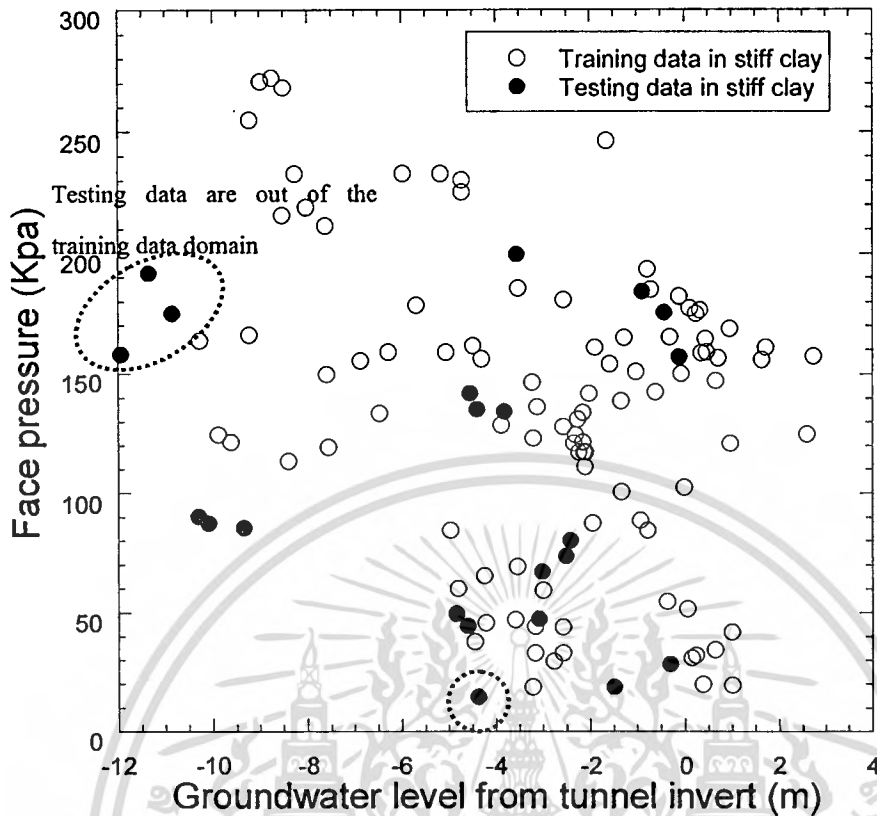
ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 6.06 มม.ตามรูปที่ 7.11 โดยที่มีค่า RMSE ต่ำกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการที่ให้ค่า RMSE 8.57 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.3 สาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งมีค่า RMSE อยู่ในระดับที่น่าพอใจ อันเนื่องมาจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ในส่วนนี้มีปริมาณที่มากพอ และเป็นการเรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพดินเดียวกัน จึงทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ถึงแม้จะมีข้อมูลที่ใช้ทดสอบในส่วนของความลึกอุโมงค์ (Tunnel depth) ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (Groundwater level from tunnel invert) ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน (Percent grout filling) ที่บางส่วนของข้อมูลอยู่นอกเหนือขอบเขตของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ดังแสดงในรูปที่ 7.12 และรูปที่ 7.13 หรืออาจอธิบายกรณีข้อมูลที่ใช้ทดสอบอยู่นอกเหนือขอบเขตของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ได้ว่า ในบางปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของข้อมูลที่ใช้ทดสอบนั้น ข้อมูลที่ใช้ทดสอบไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการสร้างความสัมพันธ์ของกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 7.12 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งในส่วน

ความลึกอุโมงค์ และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งในส่วนของความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ และความดันหน้าหัวเจาะ

7.2.2.3 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย

ข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายมีทั้งหมด 80 ข้อมูล ซึ่งมีแต่เฉพาะในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเช่นเดียวกัน โดยข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมมาสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายนั้น มีกระจายในทุกส่วนก่อสร้างย่อยของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และมีปริมาณข้อมูลมากที่สุดบริเวณส่วนก่อสร้างย่อย D จากสถานีศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ไปสิ้นสุดที่สถานีหัวลำโพง ซึ่งในส่วนก่อสร้างย่อย D นี้จะไม่พบชั้นดินเหนียวแข็งในบางตำแหน่ง และอุโมงค์ในช่วงยังถูกขุดในระดับที่ลึกกว่าส่วนก่อสร้างย่อย A B และ C ทำให้อุโมงค์ลงไปอยู่ในชั้นทราย

ในกรณีนี้ได้ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 62 ข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 18 ข้อมูล เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการหารูปแบบที่เหมาะสมของโครงข่าย ซึ่งจะทำการเรียนรู้ และทดสอบข้อมูลในแต่ละรูปแบบของโครงข่าย พร้อมทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ดังแสดงในตารางที่ 7.5 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบรูปแบบการคำนวณค่า

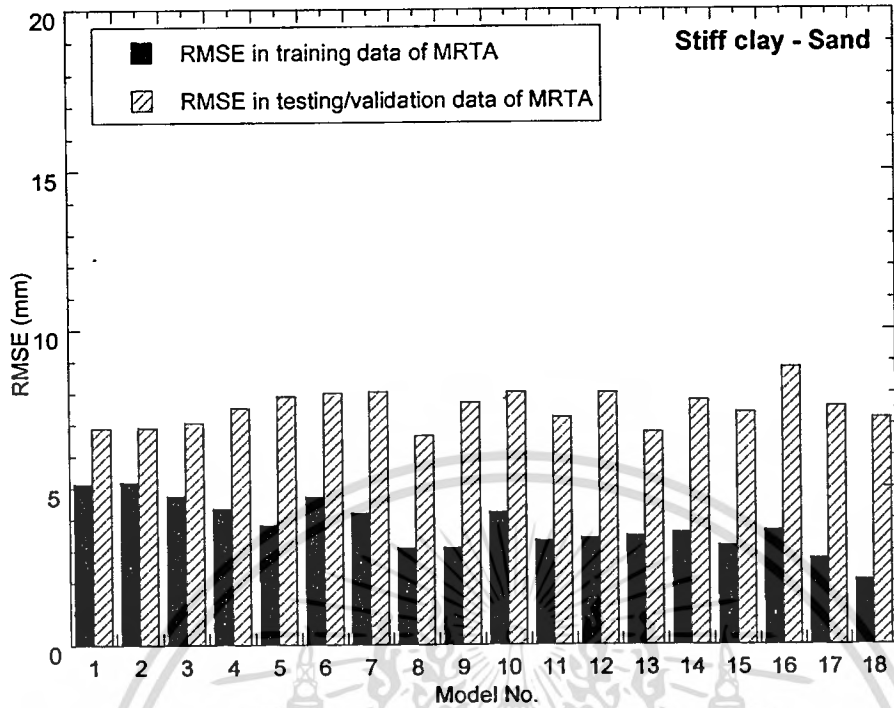
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.14 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 8 ประกอบด้วย 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 1 ชั้นแฝง (Hidden layer) 15 หน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 3,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุดในกรณีนี้ โดยมีค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ 6.64 มม. ในกระบวนการทดสอบ และรูปที่ 7.15 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ชั้นทราย

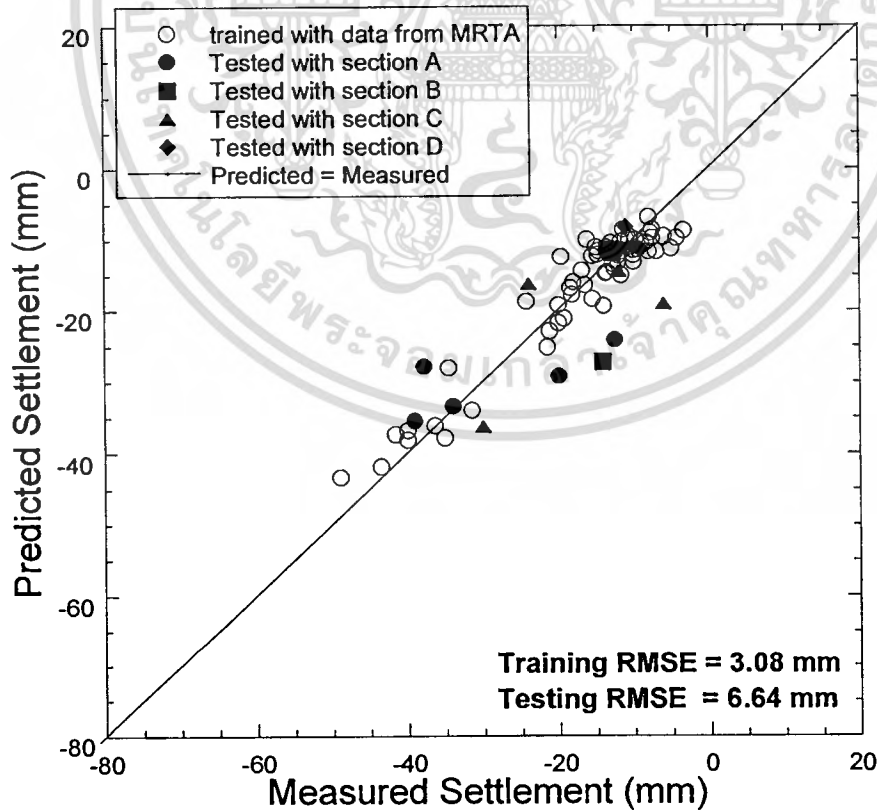
ตารางที่ 7.5 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ชั้นทราย

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	5.14	6.90
2	1	15	1000	5.18	6.91
3	1	20	1000	4.75	7.06
4	1	10	2000	4.33	7.54
5	1	15	2000	3.83	7.90
6	1	20	2000	4.70	8.00
7	1	10	3000	4.19	8.05
8	1	15	3000	3.08	6.64
9	1	20	3000	3.09	7.70
10	2	10	1000	4.22	8.03
11	2	15	1000	3.33	7.24
12	2	20	1000	3.41	8.02
13	2	10	2000	3.48	6.77
14	2	15	2000	3.59	7.78
15	2	20	2000	3.16	7.39
16	2	10	3000	3.64	8.81
17	2	15	3000	2.74	7.57
18	2	20	3000	2.06	7.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



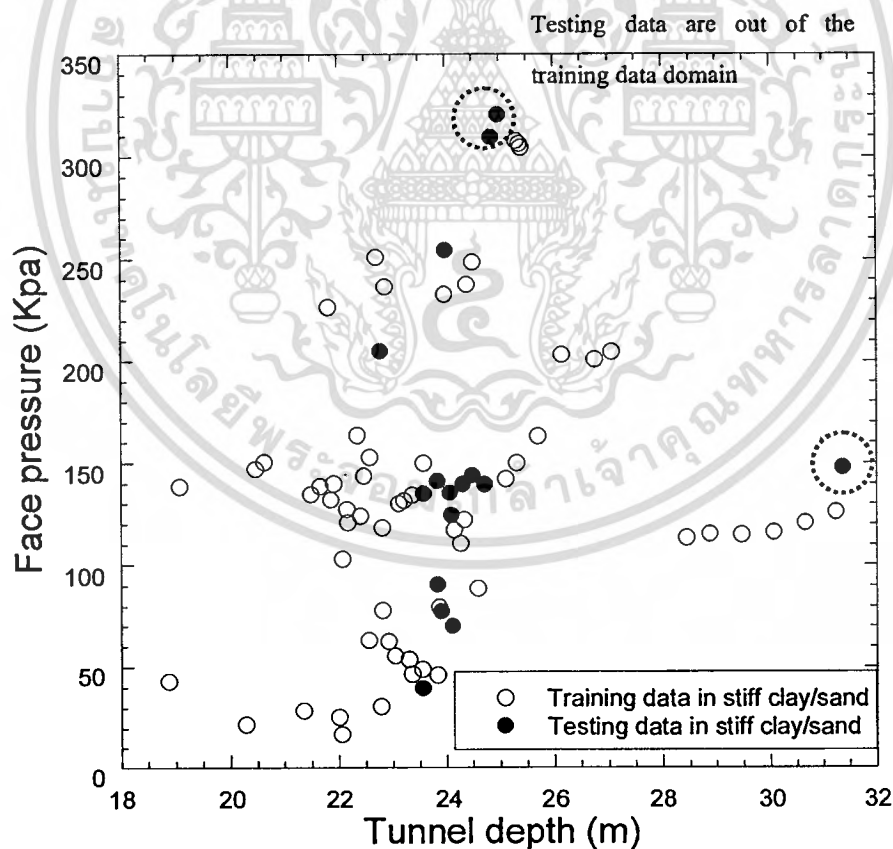
รูปที่ 7.14 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ชั้นทราย



รูปที่ 7.15 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์

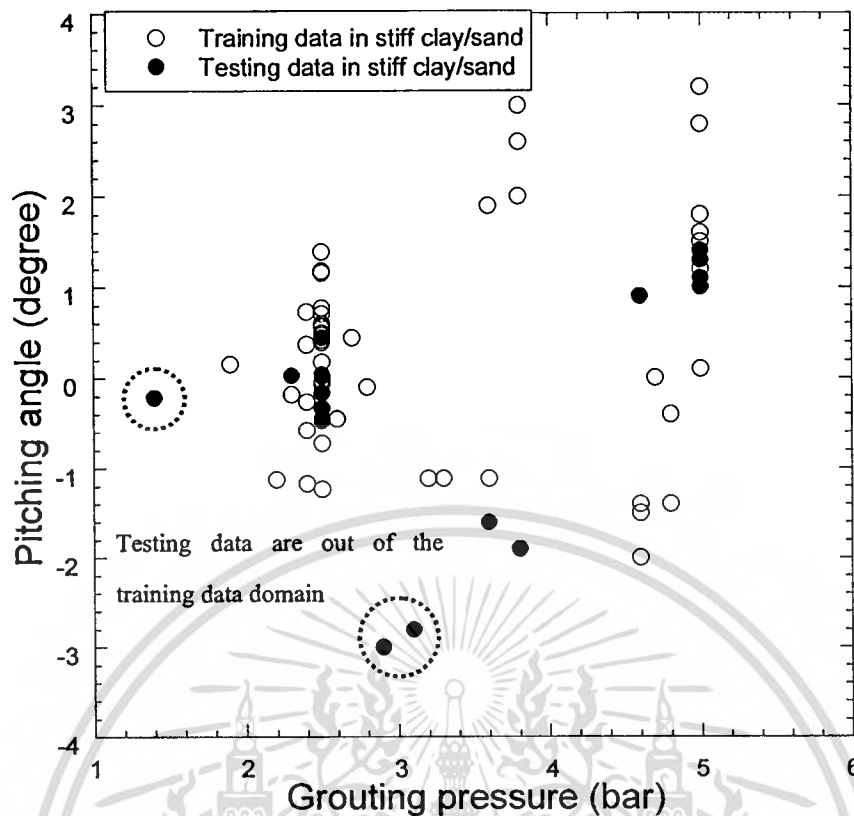
เอกสารนี้เป็นเอกสารในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 6.64 มม.ตามรูปที่ 7.15 โดยที่มีค่า RMSE ต่ำกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ ที่ให้ค่า RMSE 8.57 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.3 สาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายมีค่า RMSE อยู่ในระดับที่น่าพอใจ อันเนื่องมาจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ในส่วนนี้มีปริมาณที่มากพอ และเป็นการเรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน จึงทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ถึงแม้จะมีข้อมูลที่ใช้ทดสอบในส่วนของความลึกอุโมงค์ (Tunnel depth) ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์ (Groundwater level from tunnel invert) ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) มุมก้มหรือมุมเงยของหัวขุดเจาะ (Pitching angle) และความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure) ที่บางส่วนของข้อมูลอยู่นอกเหนือขอบเขตของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ดังแสดงในรูปที่ 7.16 และรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.16 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ในส่วนความลึกอุโมงค์ และความดันหน้าหัวเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.17 ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และทดสอบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ในส่วนความดันของการฉีดน้ำปูน และมุมก้มมุมเงยของหัวเจาะ

7.2.2.4 เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย

ในกรณีนี้ โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้จากข้อมูลที่ได้รับจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย และนำความสัมพันธ์ที่สร้างจากการเรียนรู้ มาใช้เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของดินในสภาพเดียวกัน โดยข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นทรายมีทั้งหมด 32 ข้อมูล ภายใน โครงการรถไฟใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ซึ่งข้อมูลที่ได้มีแต่เฉพาะในส่วนก่อสร้างย่อย D (สถานีศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ถึงสถานีหัวลำโพง) เท่านั้น อันเนื่องมาจากเป็นบริเวณเดียวที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในชั้นทรายเป็นส่วนใหญ่

จากข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ได้นำมาทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 28 ข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 4 ข้อมูล เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม โดยทำการหารูปแบบที่เหมาะสมของโครงข่าย ซึ่งจะทำการเรียนรู้ และทดสอบข้อมูลในแต่ละรูปแบบของโครงข่าย พร้อมทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ดังแสดงในตารางที่ 7.6 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.18

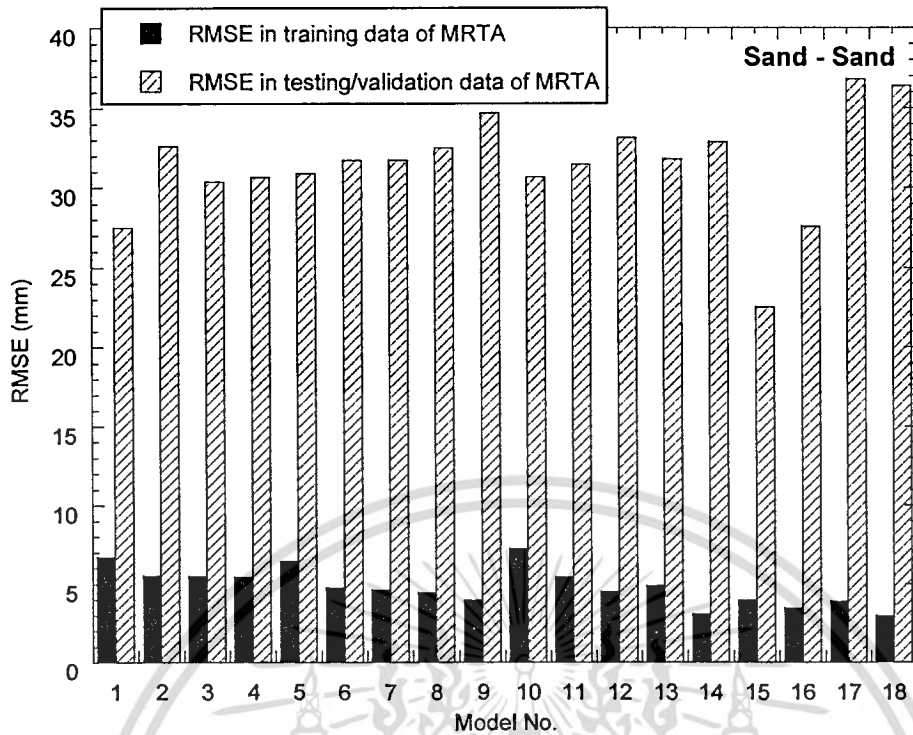
ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 15 ประกอบด้วย 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 2 ชั้นแฝง (Hidden layer) และ 1 หน่วยในชั้นส่งออก (Output nodes) ได้แสดงผลการพยากรณ์ค่าการทรุดตัวได้ดีกว่ารูปแบบอื่น ๆ ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

layer) 20 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 2,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุดในกรณีนี้ โดยมีค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ 22.52 มม. ในกระบวนการทดสอบ และรูปที่ 7.19 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย

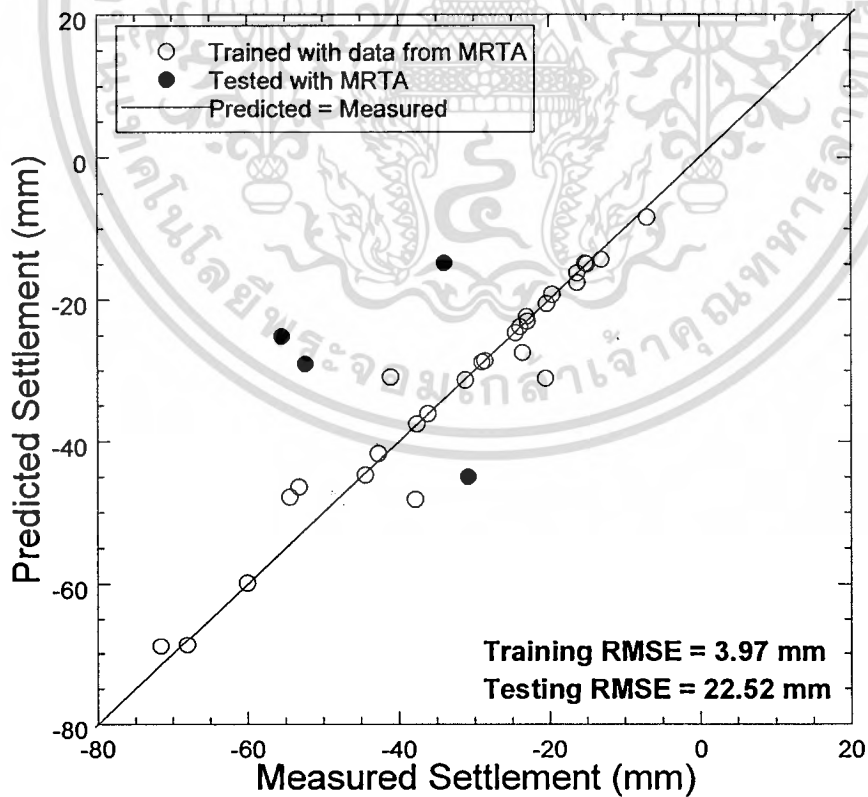
ตารางที่ 7.6 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายเฉพาะข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	6.74	27.49
2	1	15	1000	5.52	32.65
3	1	20	1000	5.49	30.38
4	1	10	2000	5.44	30.65
5	1	15	2000	6.44	30.90
6	1	20	2000	4.79	31.74
7	1	10	3000	4.64	31.74
8	1	15	3000	4.47	32.52
9	1	20	3000	4.01	34.70
10	2	10	1000	7.24	30.65
11	2	15	1000	5.44	31.46
12	2	20	1000	4.51	33.14
13	2	10	2000	4.88	31.79
14	2	15	2000	3.08	32.89
15	2	20	2000	3.97	22.52
16	2	10	3000	3.48	27.56
17	2	15	3000	3.92	36.81
18	2	20	3000	2.97	36.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.18 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) จากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย



รูปที่ 7.19 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์

ในชั้นดินทรายเฉพาะข้อมูลจากโครงการรถไฟใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

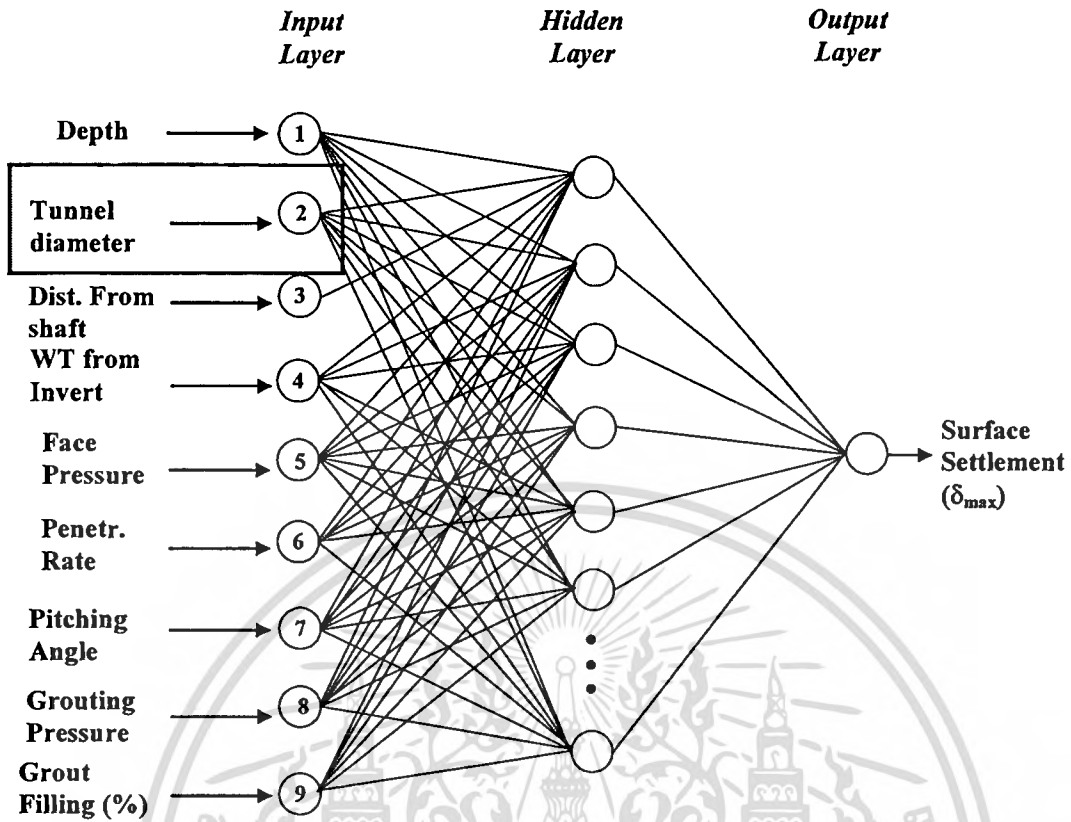
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของอาคารก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายเฉพาะข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 22.52 มม.ตามรูปที่ 7.19 แสดงให้เห็นถึง ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวที่มีความผิดพลาดสูงมาก อันเนื่องมาจากข้อมูลในส่วนนี้มีน้อย ไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงข่ายเรียนรู้ข้อมูลเพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ข้อมูลในส่วนที่ใช้ทดสอบทั้ง 4 ข้อมูลในกรณีนี้ จะมีค่าของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวอยู่ในขอบเขตของข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ก็ตาม

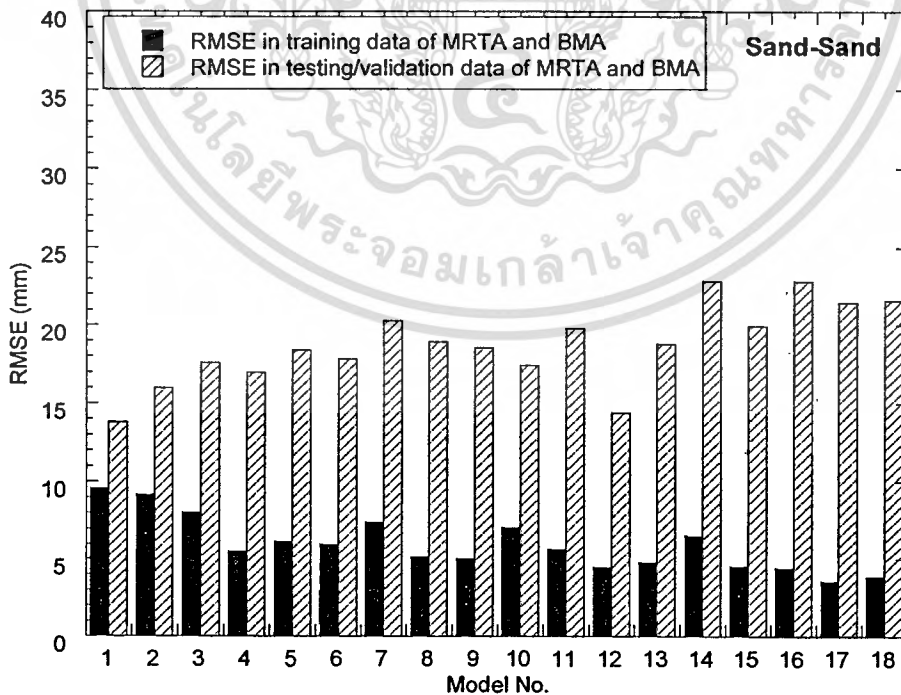
ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการนำข้อมูลมาทดสอบเพิ่มเติมจากโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งโครงการนี้ทำการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นทรายเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนนี้มาด้วยกันทั้งหมด 24 ข้อมูล แล้วจึงนำมารวมกับข้อมูลของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ทำให้มีข้อมูลทั้งสิ้น 56 ข้อมูล จากนั้นได้นำมาทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 47 ข้อมูล และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 9 ข้อมูล เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม แต่ก่อนที่จะนำไปหารูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในกรณีนี้ จะต้องทำการเพิ่มหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล นั่นก็คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (Tunnel diameter) ดังแสดงในรูปที่ 7.20 อันเนื่องมาจากทั้ง 2 โครงการ มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ที่แตกต่างกัน โดยโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลมีขนาด 6.3 ม. และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยามีขนาด 5.5 ม. ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์มีผลกระทบชัดเจนต่อขนาดการทรุดตัวของผิวดิน อุโมงค์ขนาดใหญ่จะมีการทรุดตัวของผิวดินมากกว่าอุโมงค์ขนาดเล็ก เนื่องด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากพื้นที่หน้าตัดก็ย่อมมากตาม เป็นสาเหตุให้ปริมาณการเคลื่อนตัวของมวลดินจะแปรผันตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์

เมื่อทำการเพิ่มหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาสู่กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย และทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.7 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบได้แสดงในรูปที่ 7.21 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 1 ประกอบด้วย 9 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 1 ชั้นแฝง (Hidden layer) 10 หน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 1,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของการทดสอบต่ำที่สุด คือ 13.79 มม. และรูปที่ 7.22 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายของทั้ง 2 โครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.20 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เพิ่มปัจจัยเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ในหน่วยย่อยของชั้นรับข้อมูล



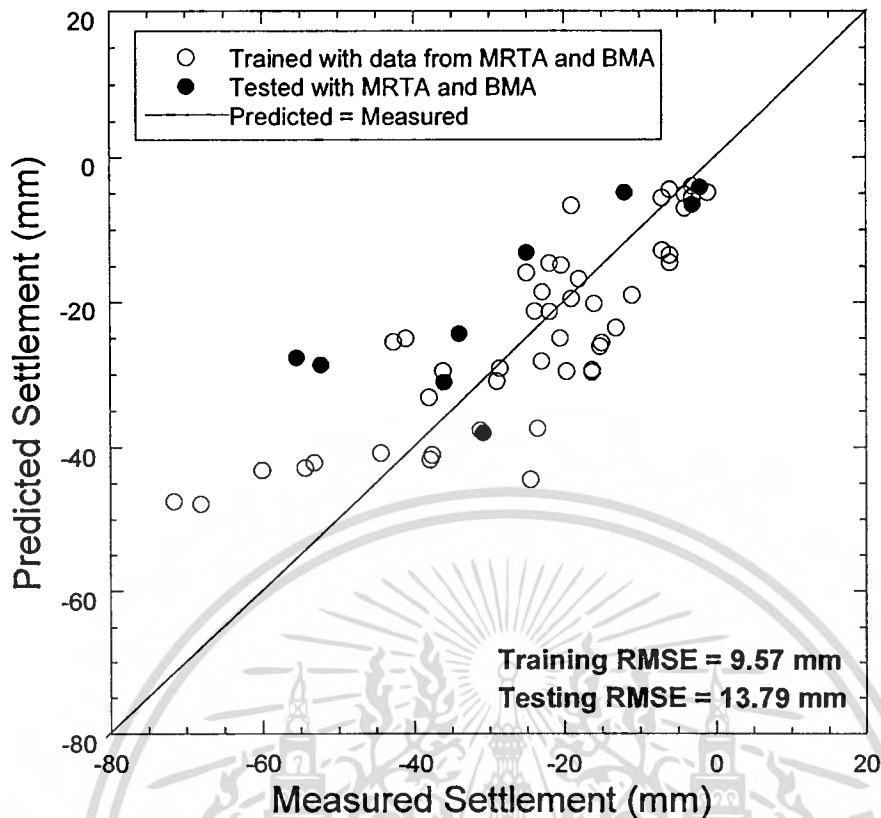
รูปที่ 7.21 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ (Training) และกระบวนการทดสอบ (Testing) ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพิธีการพิเศษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.7 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการ
ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	9.57	13.79
2	1	15	1000	9.16	15.96
3	1	20	1000	8.03	17.60
4	1	10	2000	5.49	16.96
5	1	15	2000	6.16	18.35
6	1	20	2000	5.96	17.82
7	1	10	3000	7.40	20.27
8	1	15	3000	5.11	18.90
9	1	20	3000	5.00	18.53
10	2	10	1000	7.08	17.41
11	2	15	1000	5.66	19.78
12	2	20	1000	4.45	14.40
13	2	10	2000	4.76	18.78
14	2	15	2000	6.54	22.84
15	2	20	2000	4.52	19.93
16	2	10	3000	4.42	22.86
17	2	15	3000	3.55	21.48
18	2	20	3000	3.84	21.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

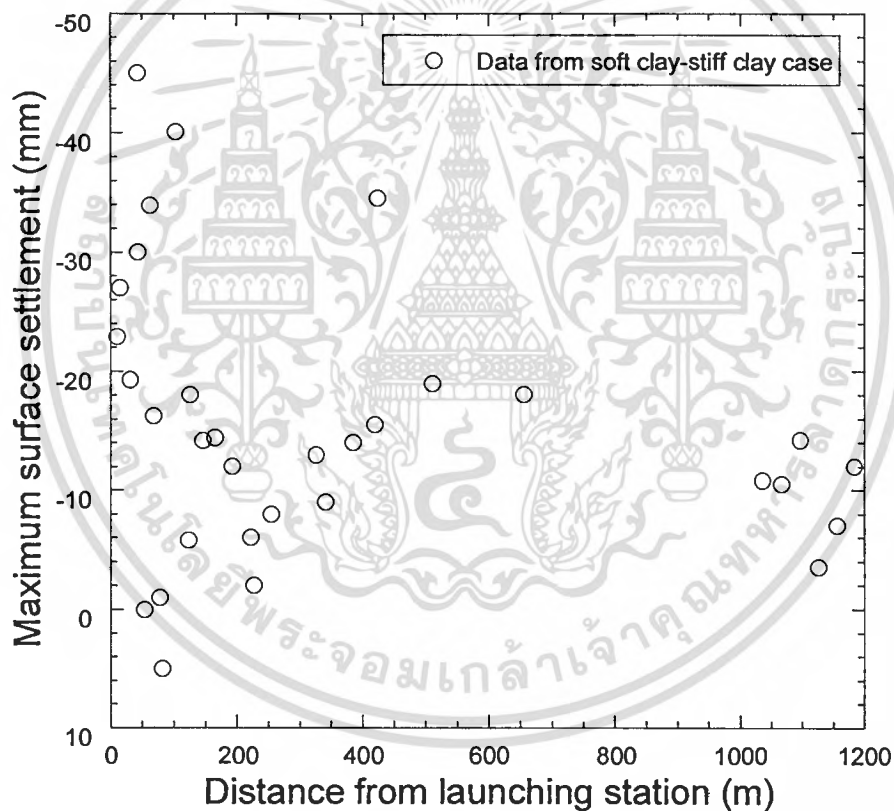


รูปที่ 7.22 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์
ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายจากทั้ง 2 โครงการ แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 13.79 มม. ตามรูปที่ 7.22 แม้จะแสดงให้เห็นว่า ผลของการพยากรณ์ยังคงมีค่าที่สูง แต่ก็ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากข้อมูลในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเพียงอย่างเดียว นั่นก็แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจาก โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ทำการศึกษาเรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายนี้อาจต้องทำการศึกษาต่อไป เพื่อที่จะนำข้อมูลของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่จะเกิดขึ้นมากมายในอนาคตของประเทศไทย มาพัฒนาประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวที่เกิดขึ้น ให้ได้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในระดับที่น่าพอใจ

7.2.3 กรณีศึกษาที่ 3 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว

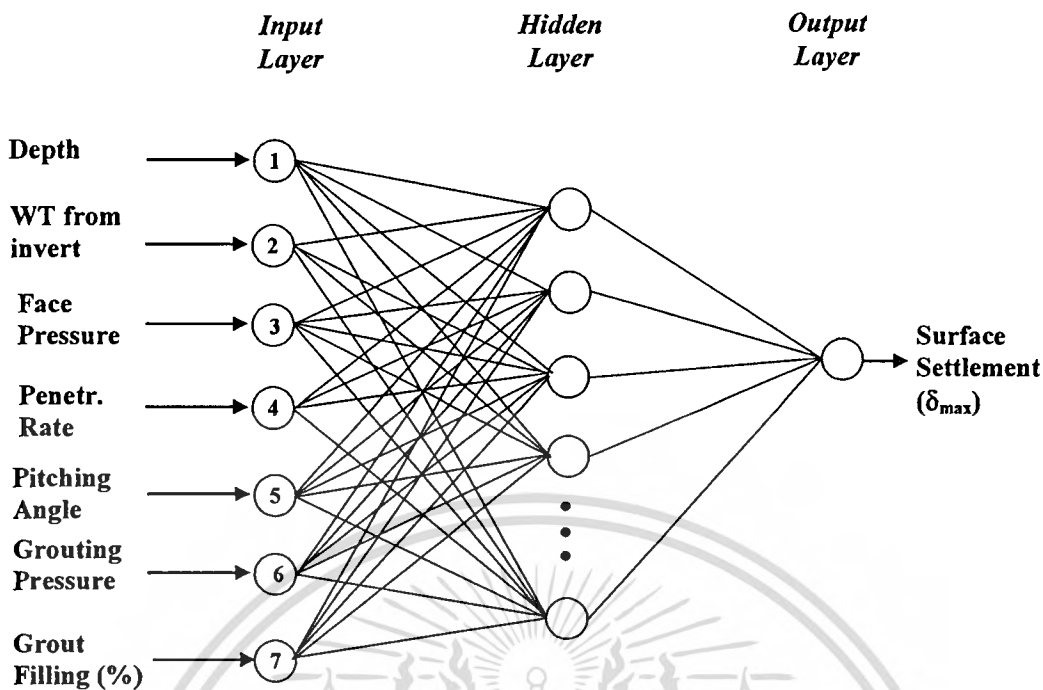
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาในบทที่แล้ว ในส่วนของการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ซึ่งปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุดก็คือ ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงแค่ 0.130 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยตัวอื่นๆ แต่จากค่าที่ได้แม้จะมีค่าที่ต่ำแต่ก็พอจะบอกความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินได้ว่า ระยะทางที่หัวเจาะเคลื่อนออกไปจากตัวสถานีมากเท่าใด แนวโน้มของการทรุดตัวก็จะมีค่าน้อยลง ดังแสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 7.23



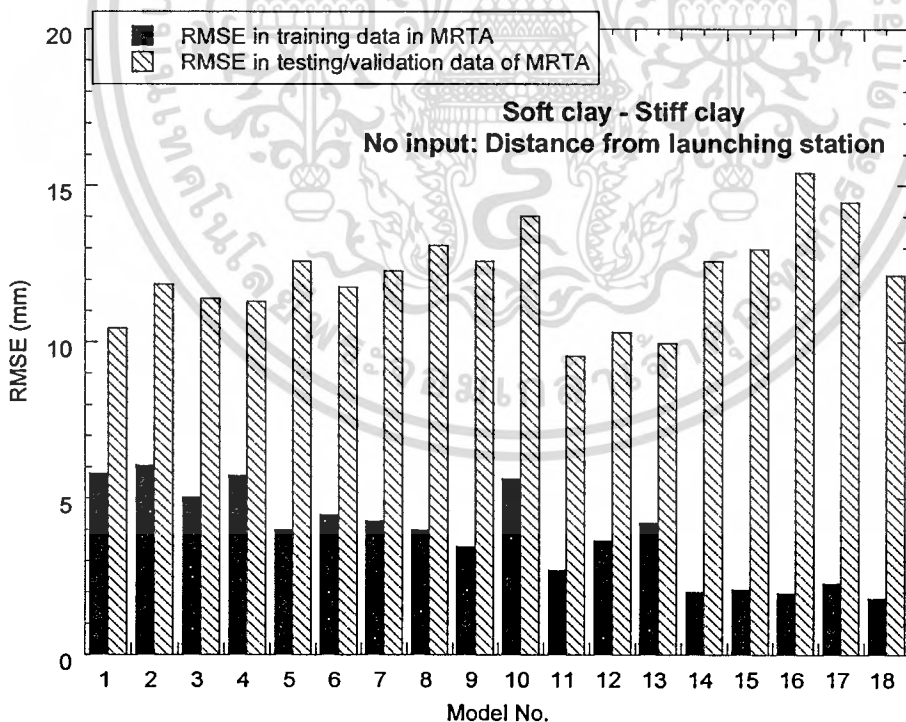
รูปที่ 7.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

โดยวัตถุประสงค์ของกรณีศึกษานี้ ก็เพื่อที่จะนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวในแต่ละสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ โดยทำการตัดปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวบางปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด เพื่อศึกษาว่าปัจจัยดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อค่าการทรุดตัวมากน้อยเพียงใด สามารถที่จะตัดทิ้งไปโดยไม่นำมาพิจารณาได้หรือไม่ โดยนำผลการพยากรณ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด มาเปรียบเทียบกับผลการพยากรณ์ตามแต่ละสภาพดินในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งถ้าผลการพยากรณ์ในกรณีที่ทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด มีค่าสูงกว่าผลการพยากรณ์ตามแต่ละสภาพดินในกรณีศึกษาที่ 2 ก็จะแสดงให้เห็นว่าปัจจัยดังกล่าวแม้จะไม่มีความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่อค่าการทรุดตัว แต่ก็มีผลกระทบต่อค่าการทรุดตัวผิวดินที่เกิดขึ้น และในทางตรงกันข้ามหากผลการพยากรณ์ในกรณีที่ทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด มีค่าต่ำกว่าผลการพยากรณ์ตามแต่ละสภาพดินในกรณีศึกษาที่ 2 ก็จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยดังกล่าวนั้น ไม่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวผิวดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละสภาพดินที่ทำการพิจารณา

สำหรับในกรณีศึกษาที่ 3 นี้ โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมมีจำนวนลดลงเหลือเพียง 7 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล ซึ่งไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 7.24 แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย และทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.8 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.25 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 11 ประกอบด้วย 7 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 2 ชั้นแฝง (Hidden layer) 15 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 1,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของกระบวนการทดสอบต่ำที่สุด คือ 9.56 มม. และรูปที่ 7.26 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง โดยไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์



รูปที่ 7.24 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์



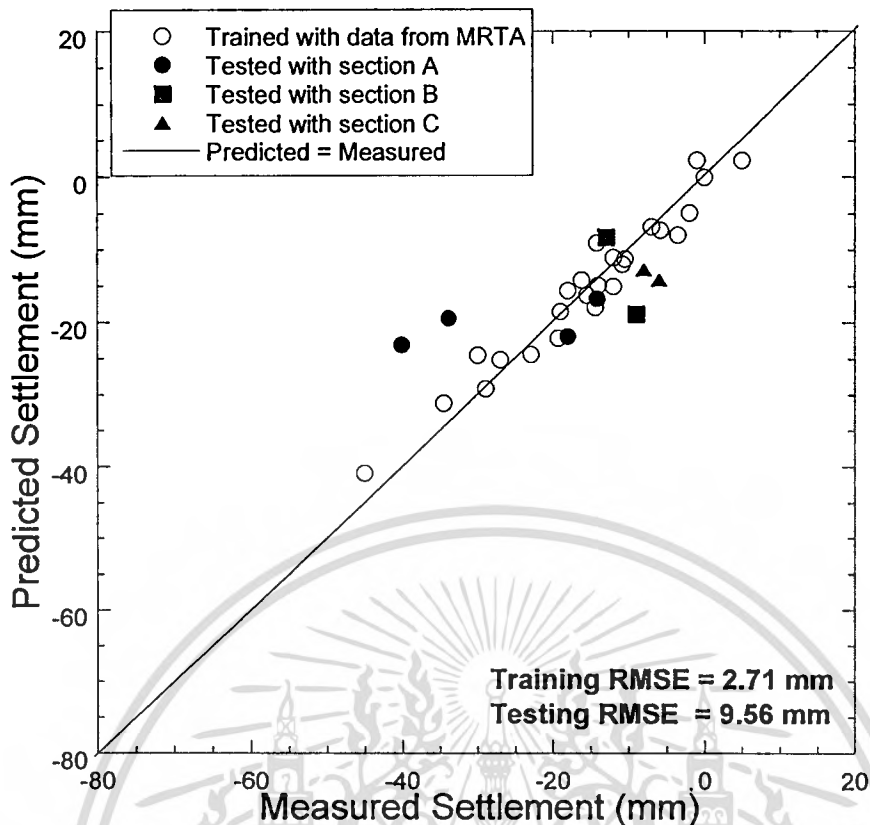
รูปที่ 7.25 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.8 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	5.79	10.44
2	1	15	1000	6.06	11.85
3	1	20	1000	5.03	11.39
4	1	10	2000	5.73	11.31
5	1	15	2000	4.00	12.58
6	1	20	2000	4.48	11.77
7	1	10	3000	4.28	12.27
8	1	15	3000	3.99	13.07
9	1	20	3000	3.47	12.59
10	2	10	1000	5.63	14.02
11	2	15	1000	2.71	9.56
12	2	20	1000	3.64	10.30
13	2	10	2000	4.23	9.96
14	2	15	2000	2.02	12.58
15	2	20	2000	2.10	12.96
16	2	10	3000	1.97	15.41
17	2	15	3000	2.28	14.46
18	2	20	3000	1.81	12.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

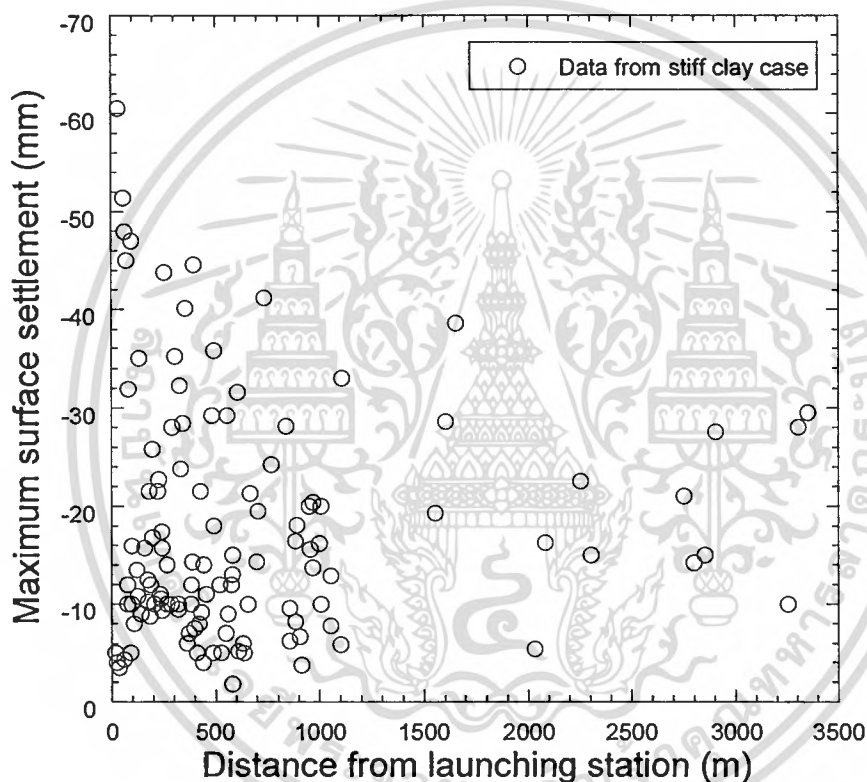


รูปที่ 7.26 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 9.56 มม. ตามรูปที่ 7.26 โดยที่มีค่า RMSE สูงกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเดียวกันคือ ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็งในกรณีศึกษาที่ 2.1 ที่ให้ค่า RMSE 8.75 มม. ดังแสดงในรูปที่ 7.8 นั้นแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวของผิวดินเช่นเดียวกัน ถึงแม้จะมีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ

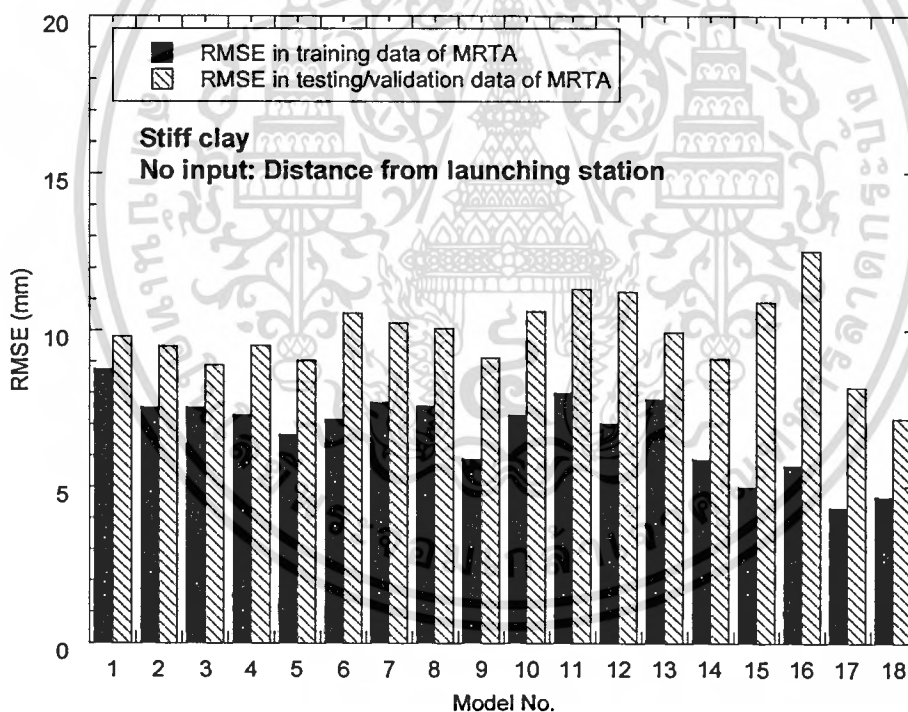
7.2.4 กรณีศึกษาที่ 4 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินเหนียวแข็ง เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว

ในส่วนของการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุดก็คือ ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงแค่ -0.026 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากทำให้ไม่สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์และการทรุดตัวของผิวดินได้ ดังแสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 7.27



รูปที่ 7.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

ในกรณีนี้โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมมีจำนวนลดลงเหลือเพียง 7 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล ซึ่งไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 7.24 แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย และทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.9 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.28 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 18 ประกอบด้วย 7 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 2 ชั้นแฝง (Hidden layer) 20 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 3,000 รอบการคำนวณ (Epochs) จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของกระบวนการทดสอบต่ำที่สุด คือ 7.17 มม. และรูปที่ 7.29 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง โดยไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

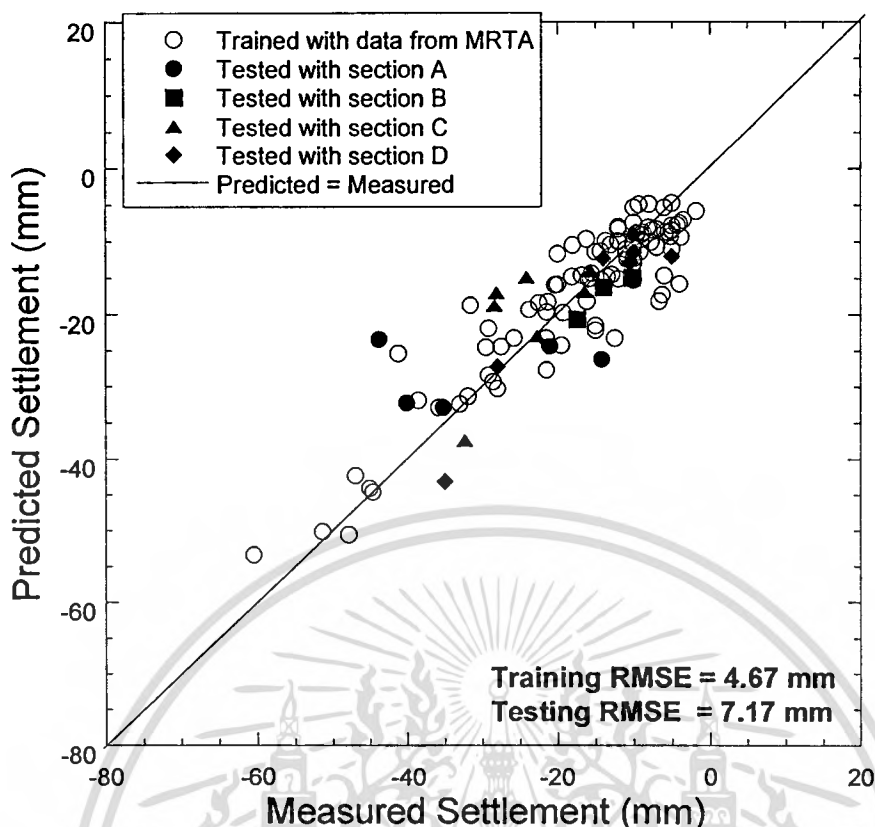


รูปที่ 7.28 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

ตารางที่ 7.9 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการ
ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	8.77	9.81
2	1	15	1000	7.54	9.50
3	1	20	1000	7.54	8.90
4	1	10	2000	7.30	9.51
5	1	15	2000	6.67	9.03
6	1	20	2000	7.15	10.57
7	1	10	3000	7.71	10.24
8	1	15	3000	7.57	10.06
9	1	20	3000	5.88	9.12
10	2	10	1000	7.28	10.62
11	2	15	1000	8.00	11.33
12	2	20	1000	7.02	11.25
13	2	10	2000	7.79	9.94
14	2	15	2000	5.88	9.09
15	2	20	2000	4.99	10.91
16	2	10	3000	5.65	12.52
17	2	15	3000	4.32	8.17
18	2	20	3000	4.67	7.17
19	2	20	3500	4.82	9.14
20	2	25	3000	4.24	10.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

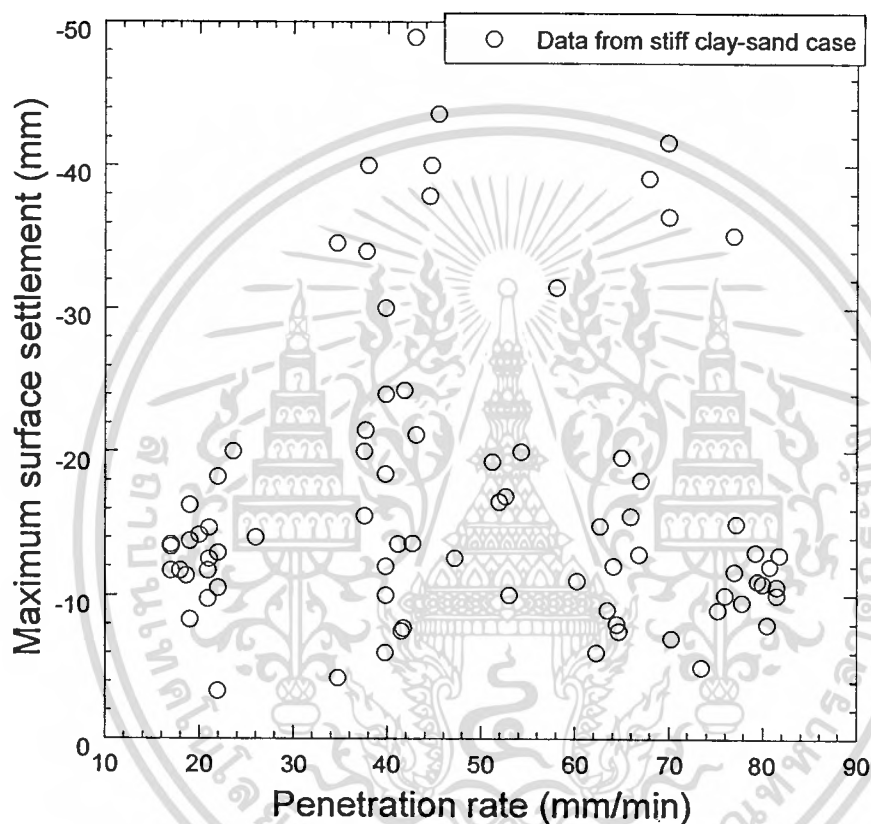


รูปที่ 7.29 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์

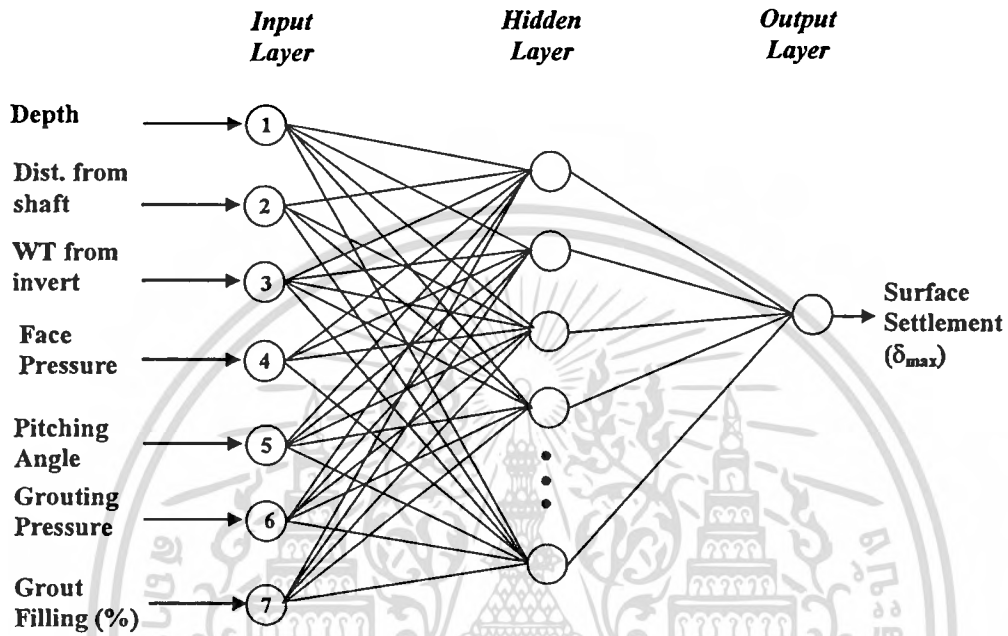
ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งที่ไม่มีระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 7.17 มม.ตามรูปที่ 7.29 โดยที่มีค่า RMSE สูงกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเดียวกันคือ ชั้นดินเหนียวแข็งในกรณีศึกษาที่ 2.2 ที่ให้ค่า RMSE 6.06 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.11 นั้น แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวของผิวดิน ถึงแม้จะมีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ

7.2.5 กรณีศึกษาที่ 5 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว

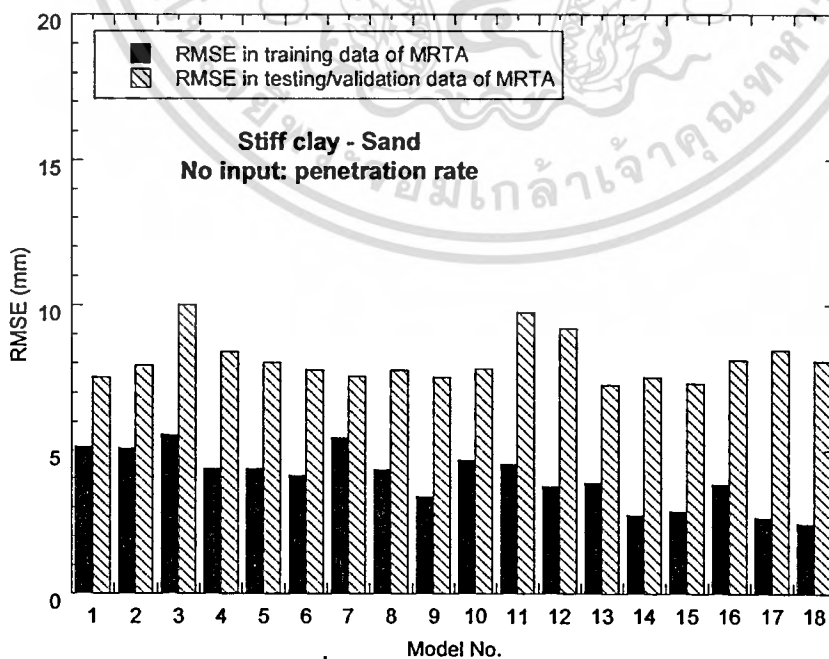
ในส่วนของการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดก็คือ ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงแค่ 0.01 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากทำให้ไม่สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างความเร็วขณะขุดเจาะและการทรุดตัวของผิวดินได้ ดังแสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 7.30



ตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของกระบวนการทดสอบต่ำที่สุด คือ 7.26 มม. และรูปที่ 7.33 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย โดยไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความเร็วขณะขุดเจาะ



รูปที่ 7.31 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความเร็วขณะขุดเจาะ



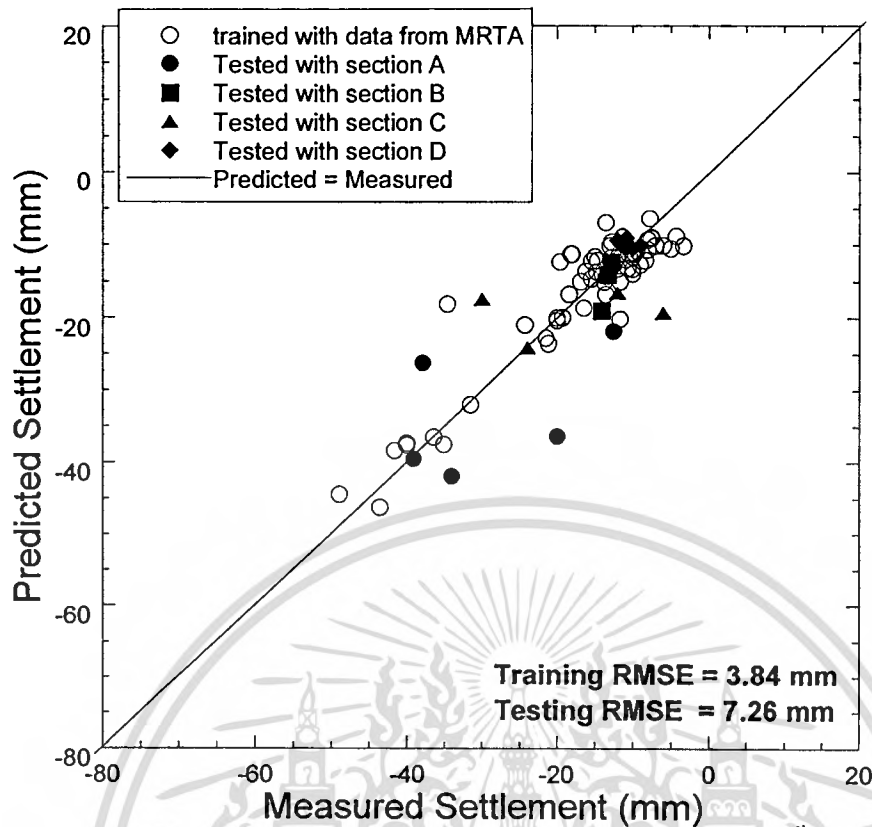
รูปที่ 7.32 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะขุดเจาะ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.10 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการ
ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะขุดเจาะ

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	5.15	7.52
2	1	15	1000	5.09	7.92
3	1	20	1000	5.56	10.01
4	1	10	2000	4.36	8.39
5	1	15	2000	4.36	8.03
6	1	20	2000	4.11	7.78
7	1	10	3000	5.45	7.56
8	1	15	3000	4.33	7.76
9	1	20	3000	3.37	7.52
10	2	10	1000	4.67	7.81
11	2	15	1000	4.52	9.75
12	2	20	1000	3.72	9.20
13	2	10	2000	3.84	7.26
14	2	15	2000	2.73	7.53
15	2	20	2000	2.86	7.32
16	2	10	3000	3.79	8.11
17	2	15	3000	2.64	8.45
18	2	20	3000	2.44	8.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

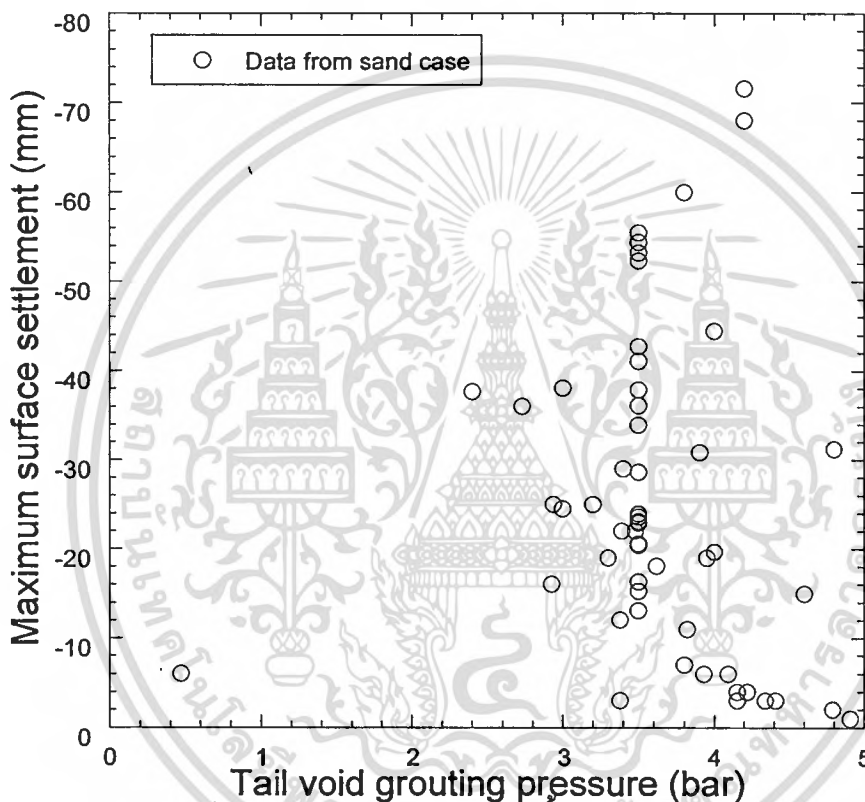


รูปที่ 7.33 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะขุดเจาะ

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายที่ไม่มีความเร็วขณะขุดเจาะ แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 7.26 มม.ตามรูปที่ 7.33 โดยที่มีค่า RMSE สูงกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเดียวกันคือ ชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทรายในกรณีศึกษาที่ 2.3 ที่ให้ค่า RMSE 6.64 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.15 นั้นแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยความเร็วขณะขุดเจาะมีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวของผิวดิน ถึงแม้จะมีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ

7.2.6 กรณีศึกษาที่ 6 พยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินทราย เพื่อพิจารณาถึง ความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว

ในส่วนของ การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุดก็คือ ความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงแค่ 0.085 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากทำให้ไม่สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูน และการทรุดตัวของผิวดินได้ ดังแสดงความสัมพันธ์ไว้ในรูปที่ 7.34

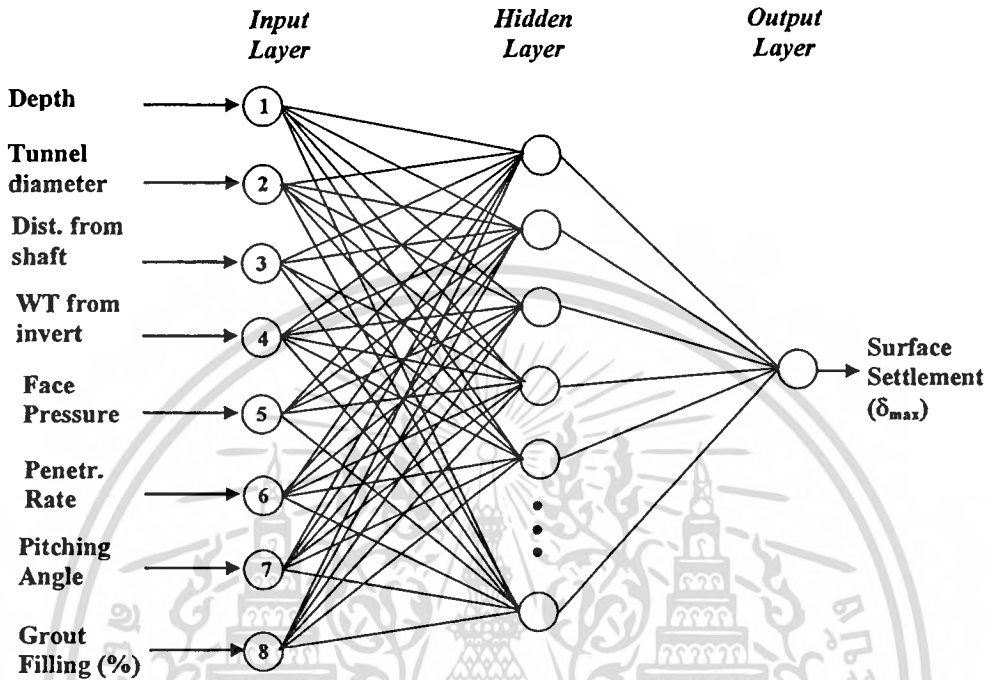


รูปที่ 7.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูน และค่าการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย

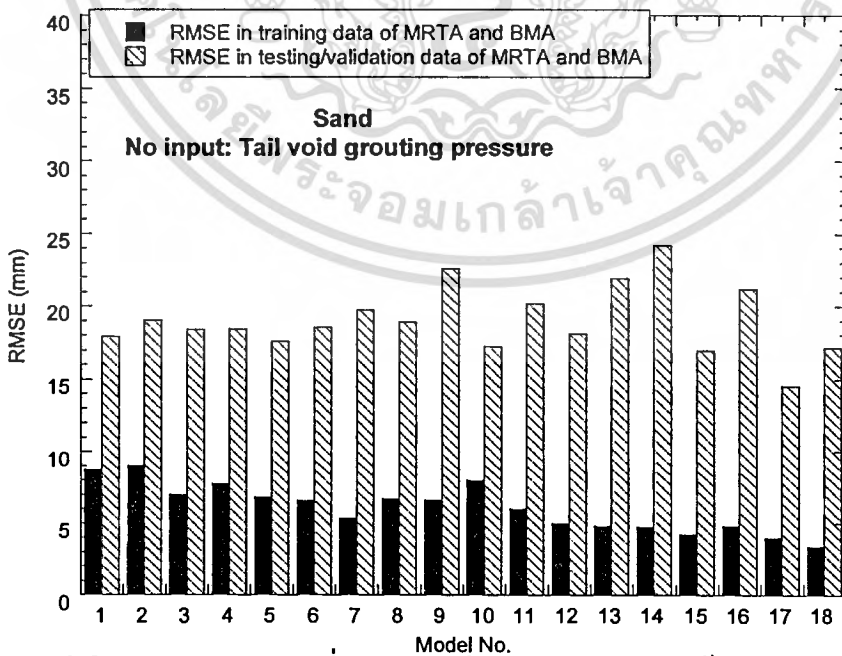
ในกรณีนี้โครงข่ายประสาทเทียมมีเพียง 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล ซึ่งไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความดันของการฉีดน้ำปูนดังแสดงในรูปที่ 7.35 แล้วจึงเข้าสู่การเรียนรู้และการทดสอบของแต่ละโครงข่าย และทำการบันทึกค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบของแต่ละโครงข่าย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.11 ในส่วนค่า RMSE ทั้งในกระบวนการเรียนรู้และกระบวนการทดสอบรูปแบบโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบ ได้แสดงในรูปที่ 7.36 ซึ่งพบว่า รูปแบบที่ 17 ประกอบด้วย 8 หน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล (Input nodes) 2 ชั้นแฝง (Hidden layer) 15 หน่วยย่อยในแต่ละชั้นแฝง (Hidden nodes) และ 3,000 รอบการคำนวณ (Epochs)

จะสามารถพยากรณ์ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้แม่นยำที่สุด โดยมีค่า RMSE ในส่วนของ
เอกสารทั้งหมดยกเว้นค่าการทรุดตัวของผิวดินในชั้นดินทราย โดยค่า RMSE ในส่วนของโครงข่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทดสอบค่าที่สุด คือ 14.53 มม. และรูปที่ 7.37 เป็นผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย โดยไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความดันของการฉีดน้ำปูน



รูปที่ 7.35 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความดันของการฉีดน้ำปูน



รูปที่ 7.36 ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในกระบวนการเรียนรู้ และกระบวนการทดสอบ

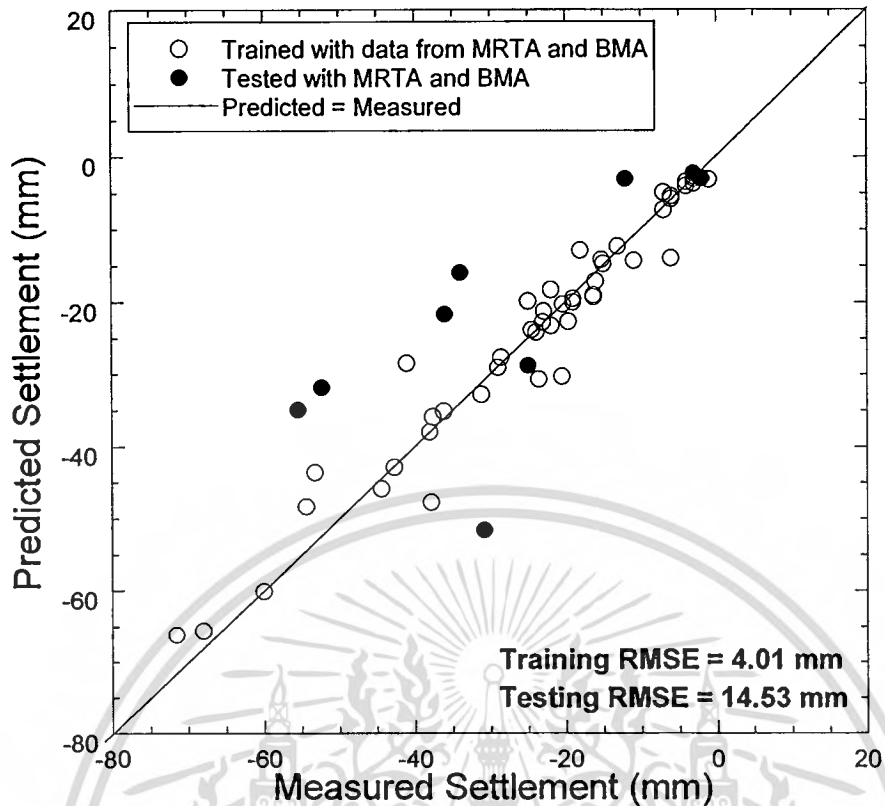
ในชั้นดินทรายที่ไม่มีความดันของการฉีดน้ำปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.11 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมและผลการเรียนรู้ของโครงข่ายทั้ง 18 รูปแบบจากการ
ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายที่ไม่มีความดันของการฉีดน้ำปูน

รูปแบบ	รูปแบบโครงข่าย		รอบการคำนวณ (Epochs)	RMSE (มม.)	
	จำนวนชั้นแฝง (ชั้น)	จำนวนหน่วยย่อย ในแต่ละชั้นแฝง		กระบวนการ เรียนรู้	กระบวนการ ทดสอบ
1	1	10	1000	8.73	17.92
2	1	15	1000	9.01	19.03
3	1	20	1000	7.00	18.38
4	1	10	2000	7.73	18.44
5	1	15	2000	6.79	17.58
6	1	20	2000	6.56	18.53
7	1	10	3000	5.32	19.73
8	1	15	3000	6.68	18.91
9	1	20	3000	6.59	22.62
10	2	10	1000	7.96	17.24
11	2	15	1000	6.00	20.17
12	2	20	1000	4.95	18.10
13	2	10	2000	4.83	21.92
14	2	15	2000	4.76	24.19
15	2	20	2000	4.25	16.95
16	2	10	3000	4.82	21.19
17	2	15	3000	4.01	14.53
18	2	20	3000	3.38	17.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.37 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวของดินในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในชั้นดินทรายที่ไม่มี ความดันของการฉีดน้ำปูน

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวจากการ ก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายที่ไม่มี ความดันของการฉีดน้ำปูน แสดงออกมาเป็นผลของค่า ผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 14.53 มม.ตามรูปที่ 7.37 โดยที่มีค่า RMSE สูงกว่าผลของการพยากรณ์การทรุดตัวจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเดียวกันคือ ชั้น ดินทรายในกรณีศึกษาที่ 2.4 ที่ให้ค่า RMSE 13.79 มม.ดังแสดงในรูปที่ 7.22 นั้นแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยความดันของการฉีดน้ำปูนมีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวของผิวดิน ถึงแม้จะมีความสัมพันธ์ ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุดก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในปัจจุบัน ทำให้เกิดการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ซึ่งก่อให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างเหนือบริเวณที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ หลักการต่างๆจากการสังเกต และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่มีอยู่ระหว่างลักษณะการก่อสร้างอุโมงค์ต่อการเสีรูปของผิวดินและใต้ดิน ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ 2 มิติ และ 3 มิติ ได้นำมาใช้ในปัญหาการก่อสร้างอุโมงค์ แต่กระบวนการวิเคราะห์ต่างๆเหล่านี้ ก็ยังคงไม่มีความใกล้เคียงต่อรูปแบบการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน โดยใช้ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบ และคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาเป็นกรณีศึกษา โดยสามารถที่จะสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

8.1 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ประสิทธิภาพของรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของโครงข่าย จำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล จำนวนชั้นแฝง จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง และจำนวนรอบการคำนวณ โดยได้ทำการเลือกรูปแบบที่เหมาะสมจากวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) จากค่าต่างๆดังต่อไปนี้

- 1) จำนวนชั้นแฝง (Hidden layers): 1 และ 2
- 2) จำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง (Hidden nodes) : 10 15 และ 20
- 3) จำนวนรอบการคำนวณ (Epochs) : 1,000 2,000 และ 3,000

โดยวัตถุประสงค์ของวิธีการลองผิดลองถูกในการเลือกรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินนั้น ก็เพื่อจะหลีกเลี่ยงปัญหาที่เรียกว่า “Overfitting” ที่จะทำให้ผลลัพธ์ค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีความผิดพลาดที่สูงมาก แม้ว่าผลลัพธ์ของค่า RMSE ในกระบวนการเรียนรู้จะมีค่าผิดพลาดที่ต่ำก็ตาม และในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล จำนวนชั้นแฝง และจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง จะต้องทำการหารูปแบบที่เหมาะสมของโครงข่ายใหม่ทุกครั้งด้วยวิธีการลองผิดลองถูก เพื่อให้ได้รูปแบบของโครงข่ายที่เหมาะสมกับปัญหาที่นำมาวิเคราะห์

8.2 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ผลของค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบจากการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาต่างๆจากข้อมูลโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทั้งสอง โครงการ แสดง ในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ผลของค่า RMSE จากการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

กรณีศึกษา	วัตถุประสงค์	ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ	ค่า RMSE ทดสอบ/ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวในส่วนทดสอบ (มม./มม.)
1	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ	ทุกสภาพดิน	8.57/-20.86 (8.39/-21.37 ทุกส่วนของ Suwansawat&Einstein, 2006)
2	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในสภาพดินเดียวกัน		
2.1		ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง	8.75/-17.77
2.2		ดินเหนียวแข็ง	6.06/-21.65
2.3		ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย	6.64/-17.80
2.4		ดินทราย	13.79/-27.83
3	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในสภาพดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง		
3.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station)	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง	9.56/-17.77
4	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในสภาพดินเหนียวแข็ง		
4.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station)	ดินเหนียวแข็ง	7.17/-21.65
5	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในสภาพดินเหนียวแข็ง-ดินทราย		
5.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate)	ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย	7.26/-17.80
6	พยากรณ์การทรุดตัวของดินในสภาพดินทราย		
6.1	ไม่มีหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูลที่เป็นความดันของการฉีดน้ำปูน (Grouting pressure)	ดินทราย	14.53/-27.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของอาคารก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ แสดงออกมาเป็นผลของค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในส่วนของการทดสอบมีค่า 8.57 มม. (ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวในส่วนทดสอบ -20.86 มม.) โดยที่มีค่า RMSE ใกล้เคียงกับผลของการพยากรณ์การทรุดตัวของอาคารก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลในส่วนของทดสอบของ Suwansawat and Einstein [30] ที่ให้ค่า RMSE 8.39 มม. (ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวในส่วนทดสอบ -21.37 มม.) แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะนำโครงข่ายประสาทเทียมไปทำการพยากรณ์การทรุดตัวร่วมกับโครงการอื่นที่แม้จะมีความแตกต่างกันของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว โครงข่ายก็สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวไปสู่ค่าการทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน

จากการศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในสภาพดินเดียวกันด้วยโครงข่ายประสาทเทียม แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่เรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ที่มีข้อมูลในปริมาณที่มากเพียงพอที่จะให้โครงข่ายได้เรียนรู้แล้ว สามารถที่จะพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพดินของทั้ง 2 โครงการ อันเนื่องมาจากในแต่ละสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ จะมีลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแตกต่างกัน ทำให้การสร้างความสัมพันธ์โดยการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะสุ่มค่าน้ำหนัก (Weights) และค่าเบี่ยงเบน (Bias) ไปสู่ปัญหาในที่นี้ก็คือ ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะการแบ่งกลุ่มข้อมูลตามสภาพทางธรณีวิทยาทำให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวได้ชัดเจนกว่าการสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยในทุกสภาพดิน

แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทราย ผลของค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีค่าที่สูง อันเนื่องมาจากมีข้อมูลที่น้อยในทั้งสองส่วนนี้ ทำให้โครงข่ายไม่สามารถที่จะสร้างความสัมพันธ์ไปสู่การพยากรณ์การทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในกรณีการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทรายจะได้ข้อมูลเพิ่มเติมมาจากโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา จนทำให้ผลการพยากรณ์การทรุดตัวมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าการเรียนรู้ข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเพียงอย่างเดียวก็ตาม

ในส่วนการศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในแต่ละสภาพดินที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อพิจารณาถึงความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความดันน้ำหัวเจาะ และในส่วนปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์จะมีความสัมพันธ์น้อยที่สุดต่อการทรุดตัว แต่เมื่อไม่มีปัจจัยนี้ในการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ผลปรากฏว่า ค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นกว่ากรณีศึกษาที่ 2.1 นั้นแสดงให้เห็นว่า ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม
- 2) ชั้นดินเหนียวแข็ง ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความดันน้ำหัวเจาะ และในส่วนของระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งมีความสัมพันธ์น้อยที่สุดต่อการทรุดตัวเช่นเดียวกันกับชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง แต่เมื่อไม่มีปัจจัยนี้ในการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ผลปรากฏว่า ค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นกว่ากรณีศึกษาที่ 2.2 นั้นแสดงให้เห็นว่า ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม
- 3) ชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความดันน้ำหัวเจาะ และในส่วนความเร็วขณะขุดเจาะมีความสัมพันธ์ที่กระจัดกระจายที่สุดต่อค่าการทรุดตัว ซึ่งแสดงจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มาก แต่เมื่อไม่มีปัจจัยนี้ในการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ผลปรากฏว่า ค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นกว่ากรณีศึกษาที่ 2.3 นั้นแสดงให้เห็นว่า ความเร็วขณะขุดเจาะมีอิทธิพลต่อการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม
- 4) ชั้นดินทราย ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวมากที่สุดก็คือ ความเร็วขณะขุดเจาะ และปัจจัยความดันของการฉีดน้ำปูนมีความสัมพันธ์น้อยที่สุดต่อการทรุดตัว แต่เมื่อไม่มีปัจจัยนี้ในการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ผลปรากฏว่า ค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีค่าที่สูงขึ้นกว่ากรณีศึกษาที่ 2.4 นั้นแสดงให้เห็นว่า ความดันของการฉีดน้ำปูนมีอิทธิพลต่อการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

8.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (EPB shield) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องคำนึงถึงในการนำวิธีโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้

ประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพยากรณ์การทรุดตัวของตามสภาพดินต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้จากกรณีการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง และดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ที่มีข้อมูลให้โครงข่ายได้เรียนรู้ในปริมาณที่มากเพียงพอ แต่ในกรณีของการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง และดินทราย ยังคงต้องทำการศึกษาต่อไป เนื่องมาจากข้อมูลมีอยู่ในปริมาณที่น้อย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องนำข้อมูลโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตของประเทศไทย มาทำการพัฒนาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในทั้งสองส่วนนี้ ให้ได้ผลของการพยากรณ์การทรุดตัวที่ดียิ่งขึ้น

การนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งาน โครงข่ายประสาทเทียมจะมีความเหมาะสมในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในโครงการที่มีสภาพทางธรณีวิทยาที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ในกรณีที่โครงการมีชุดข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่น้อยในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ควรเลือกรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับพยากรณ์ในทุกสภาพทางธรณีวิทยา แต่ในกรณีที่โครงการมีชุดข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่มากในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ควรเลือกรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้สำหรับพยากรณ์แยกตามสภาพทางธรณีวิทยา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Stack, B. **Handbook of Mining and Tunneling Machinery**. New York : John Wiley and Sons. 1982.
- [2] Suwansawat, S. “**Earth Pressure Balanced (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Network.**” MIT’s Dissertation. 2002.
- [3] Clough, G. W. Sweeney, B. P. and Finno, R. J. “Measured Soil Response to EPB Shield Tunneling.” **Journal of Geotechnical Engineering.**, vol. 109, no. 2, 1982. pp. 131-149.
- [4] Matsushita, Y. Hashimoto, T. Iwasaki, Y. and Imanishi, H. “Behavior of Subway Tunnel driven by Large Slurry Shield.” **Proc. of Int. Conf. on Underground Construction in Soft Ground.**, Balkema, Rotterdam, 1995. pp. 253-256.
- [5] Chiorboli, M. A. and Marcheselli, P. P. “Analysis and Control of Subsidence due to Earth Pressure Shield Tunneling in Passante Ferroviario of Milano.” **Proc. of Int. Conf. on North American Tunneling’96.**, Balkema, Rotterdam, 1996. pp. 97-106.
- [6] Ju, D. Moh, Z-C. and Hwang, R. N. “Soft Ground Tunneling for Taipei Rapid Transit Systems.” **Proc. of the 3rd Conf. on Geo-Engineering for Underground Facilities.**, ASCE, 1999. pp. 610-621.
- [7] Moh, Z-C. Hwang, R. N. and Ju, D. H. “Ground Movements around Tunnels in Soft Ground.” **Proc. of Int. Symp. On Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.**, Balkema, Rotterdam, 1996. pp. 725-730.
- [8] Leca, E. “**Analysis of NATM and Shield Tunneling in Soft Ground.**” Ph.D. Thesis, Virginia Institute and State University, Blacksburg, Va. 1989.
- [9] Litwinski, J. “Application of the Equation of Stochastic Processes to Mechanics of Loose Bodies.” **Arch. Mech. Stosow.**, vol. 8, 1956. pp. 396-411.
- [10] Peck, R. B. “Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground.” **Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering.**, Mexico City, State of the Art Volume, 1969. pp. 225-290.
- [11] O’Reilly, M. P. and New, B. M. “Settlement above Tunnels in the United Kingdom – Their Magnitude and Prediction.” **Tunneling 88.**, London, 1982. pp. 231-241.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12]Attewell, P. B. and Woodman J. P. "Predicting the Dynamics of Ground Settlement and its Derivatives caused by Tunneling in Soil." **Ground Engineering**, vol. 15, no. 8, 1982. pp. 13-22 and 36.
- [13]Sagaseta, C. "Analysis of Undrained Soil Deformations due to Ground Loss." **Geotechnique**, vol. 37, no. 3, 1987. pp. 301-320.
- [14]Baligh, M. M. "Strain Path Method." **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, vol. 111, GT9, 1985. pp. 1108-1136.
- [15]Verruijt, A. and Booker, J. R. "Surface Settlements due to Deformation Tunnel in an Elastic Half Plane." **Geotechnique**, vol. 46, no. 4, 1996. pp. 753-756.
- [16]Loganathan, N. and Poulos, H. G. "Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays." **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, vol. 124, no. 9, 1998. pp. 846-856.
- [17]Pinto, F. "Analytical Methods to Interpret Ground Deformations due to Soft Ground Tunneling." SM Thesis, MIT, Cambridge, MA. 1999.
- [18]Mair, R. J. and Taylor, R. N. "Bore Tunneling in the Urban Environment." Theme Lecture, Plenary Session 4, **Proc. 14th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Hamburg, vol. 4, 1997. pp. 2353-2385.
- [19]Atkinson, J. H., Brown, E. T., and Potts, D. M. "Collapse of Shallow Unlined Tunnels in Dense Sand." **Tunnel & Tunneling**, May 1975, pp. 81-87.
- [20]Atkinson, J. H. and Potts, D. M. "Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground." **Proc. ASCE Geotechnical Engineering Division**, vol. 103, GT 4, 1977. pp. 307-325.
- [21]Kimura, T. and Mair, R. J. "Centrifugal Testing of Model Tunnels in Soft Clay." **Proc. 10th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Stockholm, vol. 1, 1981. pp. 319-322.
- [22]Nomoto, T. Imamura, S. Hagiwara, T. Kusakabe, O. and Fujii, N. "Shield Tunnel Construction in Centrifuge." **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, vol. 125, no. 4, 1999. pp. 289-300.
- [23]Shi, J. Ortigao, J.A.R. and Bai, J. "Modular Neural Networks for Predicting Settlements during Tunneling." **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 124, no. 5, 1998. pp. 389-395.

- [24]Sonmez, H. Tuncay, E. and Gokceoglu, C. "Models to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity for Ankara Agglomerate." **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.**, vol. 41, 2004. pp. 717-729.
- [25]Benardos, A.G. and Kaliampakos, D.C. "Modelling TBM Performance with Artificial Neural Networks." **Tunneling and Underground Space Technology.**, vol. 19, 2004. pp. 597-605.
- [26]Kahraman, S. Altun, H. Tezekici, B.S. and Fener, M. "Sawability Prediction of Carbonate Rocks from Shear Strength Parameters Using Artificial Neural Networks." **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.**, vol. 43, 2006. pp. 157-164.
- [27]Tiryaki, B. "Application of Artificial Neural Networks for Predicting the Cuttability of Rocks by Drag Tools." **Tunneling and Underground Space Technology.**, vol. 23, 2007. pp. 273-280.
- [28]Alimoradi, A. Moradzadeh, A. Naderi, R. Salehi, M.S. and Etemadi, A. "Prediction of Geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP-203 and Artificial Neural Networks." **Tunneling and Underground Space Technology.**, vol. 23, 2008. pp. 711-717.
- [29]Santos, Jr. and Celestino, B. "Artificial Neural Networks Analysis of Sao Paulo Subway Tunnel Settlements Data." **Tunneling and Underground Space Technology.**, vol. 23, 2008. pp. 481-491.
- [30]Suwansawat, S. and Einstein, H. H. "Artificial Neural Networks for Predicting the Maximum Surface Settlement Caused by EPB Shield Tunneling." **Tunneling and Underground Space Technology.**, vol. 21, 2006. pp. 133-150.
- [31]Suwansawat, S. "Shield Tunneling Database Management for Ground Movement Evaluation." **Proc. the 30th World Tunnel Congress.**, Singapore, 2004.
- [32]Smith, M. **Neural Networks for Statistical Modeling.** Van Nostrand Reinhold : NewYork. 1993.
- [33]Zhang, G. Patuwo, B.E. and Hu, M. Y. "Forecasting with Artificial Neural Networks: the State of the Art." **International Journal of Forecasting.**, vol. 14, 1998. pp. 35-62.
- [34]Demuth, H. Beale, M. and Hagan, M. **Neural Network Toolbox for Use with MATLAB.** 9 ED. The Math Works, Inc. 2005.

- [35]Seibi, A. and Al-Alawi, S.M. "Prediction of Fracture Toughness using Artificial Neural Networks (ANNs)." *Engineering Fracture Mechanics.*, vol. 56, no. 3, 1997. pp. 311-319.
- [36]ทีมงานก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำ. โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา. สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร. 2549.
- [37]พิสุทธิ์ โชติคิลก, สุัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์, "ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นทรายกรุงเทพฯ" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 12. 2550.
- [38]Chotidilok, P. and Suwansawat, S. "Application of ANN Model for Predicting Settlements Induced by Tunneling in Sand." *Proc., International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, Bangkok, Thailand. 2007.*
- [39]พิชากร ศรีจันทร์ทอง, สุัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์, 2550. "การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์การควบคุมหัวเจาะที่ส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์" การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 12. 2550.
- [40]Srijanthong, P. and Suwansawat, S. "ANN For mechanism evaluation of factors affecting settlements caused by EPB tunneling." *Proc., International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, Bangkok, Thailand. 2007.*



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์
เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม
A STUDY OF SHIELD OPERATIONAL FACTOR'S CORRELATION
FOR PREDICTING SURFACE SETTLEMENTS BY ANN

พิสุทธิ์ โชติดิлок (Pisut Chotidilok)¹

สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ (Suchatvee Suwansawat)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโทผู้ช่วยวิจัย E-mail: pisut42@hotmail.com

²รองศาสตราจารย์ E-mail: kssuchat@kmitl.ac.th

ศูนย์นวัตกรรมก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ : การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล จะส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียผิวดินใน ขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยเหตุนี้ หลักวิธีการต่างๆ ประกอบไปด้วย หลักการสังเกต หลักการวิเคราะห์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ จึงนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์เพื่อหาการเคลื่อนตัวของดินทั้งในระดับลึกและที่ผิวดิน แต่ อย่างไรก็ตามกระบวนการวิเคราะห์ต่างๆ เหล่านี้ ยังคงไม่สามารถที่จะจำลองพฤติกรรมของการขุดเจาะอุโมงค์ได้ อย่างครบถ้วน อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว ดังนั้น บทความนี้จึงได้นำวิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้าง อุโมงค์ และทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยใช้ ข้อมูลจาก 2 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ ได้แก่ โครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา เป็นกรณีศึกษา โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทรุดตัว ผลปรากฏว่า ใน กรณีที่แยกข้อมูลตามสภาพทางธรณีวิทยาและข้อมูลมีปริมาณที่มากเพียงพอ โครงข่ายประสาทเทียมสามารถ พยากรณ์การทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมดล้วนแต่ มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น

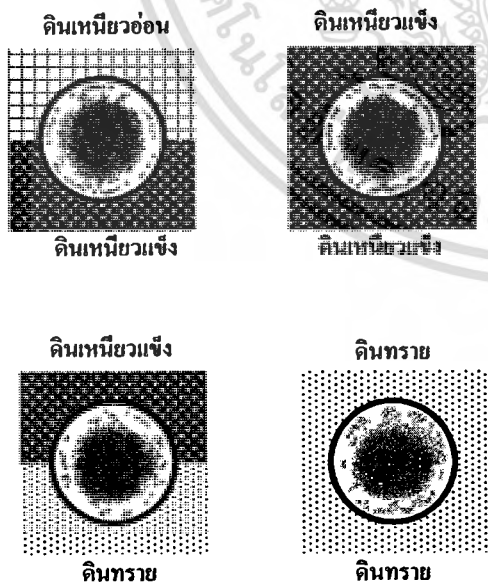
ABSTRACT : Earth pressure balance (EPB) shield has been used in most of soft ground tunneling projects. It was found that ground loss and related excessive surface settlements caused by EPB shield tunneling could damage existing buildings adjacent to tunneling area. Although, numerous empirical principle and 2-D and 3-D numerical analysis have been applied to tunnel-induced ground movement problems. However, fewer approaches have been developed for EPB shield tunneling. Therefore, this paper applied artificial neural networks (ANN) for predicting surface settlements and evaluating relation of factors affecting surface settlements including tunnel geometry, geological conditions and shield operation factors by correlation coefficient with data from Bangkok MRTA and BMA flood protection tunnel projects. As a result, an appropriately trained ANN model in each geological condition can effectively predict surface settlements well. All introduced factors affecting were found to be associated with surface settlements.

KEYWORDS : EPB shield tunneling, Surface settlements, Artificial neural networks, Operational Factors, Correlation coefficient

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมายที่มีผลต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ อาทิเช่น ขนาดของอุโมงค์ ความลึกของระดับอุโมงค์ คุณสมบัติของดิน ระดับน้ำใต้ดิน ความดันหน้าหัวเจาะ ความเร็วขณะขุดเจาะ และคุณภาพของการฉีดน้ำปูนบริเวณช่วงหางของหัวเจาะ เพื่ออุดช่องว่างหลังผนังอุโมงค์ เป็นต้น โดยทุกปัจจัยหรือตัวแปรดังกล่าวนี้ล้วนแต่มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงไม่สามารถแยกความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปรกับปริมาณการทรุดตัวได้อย่างชัดเจน ว่าปัจจัยตัวใดที่มีผลต่อการทรุดตัวมากหรือน้อยกว่ากัน ในขณะที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพทางธรณีวิทยาต่างๆ ทำให้เกิดความซับซ้อน จนยากแก่การวิเคราะห์หรือพยากรณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล (MRTA project) และโครงการอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA project) มาทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยใช้การวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แล้วจึงนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) ในกรณีศึกษาต่างๆ



รูปที่ 1 การก่อสร้างอุโมงค์แยกตามสภาพทางธรณีวิทยาต่างๆ ในโครงการ MRTA และBMA

2. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดิน

จากข้อมูลพื้นฐานในอดีต [1-3] และข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล [4] ซึ่งได้ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแบ่งเป็น 3 กลุ่มปัจจัยหลัก แสดงไว้ในตารางที่ 1 เพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการคำนวณโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวดินขณะขุดเจาะอุโมงค์

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดินขณะขุดเจาะอุโมงค์

กลุ่มปัจจัย	ปัจจัย
1. ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์	1.1 ความลึกของอุโมงค์ 1.2 ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ 1.3 เส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์
2. สภาพทางธรณีวิทยา	2.1 ชนิดของดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ 2.2 ชนิดของดินบริเวณส่วนล่างของอุโมงค์ 2.3 ความสูงของน้ำใต้ดินจากส่วนล่างสุดของอุโมงค์
3. การควบคุมหัวเจาะ	3.1 ความดันหน้าหัวเจาะ 3.2 ความเร็วขณะขุดเจาะ 3.3 มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ 3.4 ความดันของการฉีดน้ำปูน 3.5 เพลอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน

3. โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) ซึ่งมีการใช้ และบรรยายไว้อย่างละเอียดใน [5]

3.1 ข้อมูลพื้นฐาน

โครงข่ายประสาทเทียมอ้างอิงโครงข่ายทางชีววิทยาหรือระบบประสาทของมนุษย์ โดยมีการเชื่อมโยงซึ่งกันและกันระหว่างค่าเริ่มต้น ค่าน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบน ผู้การให้ผลลัพธ์ที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่หลายประเภท แต่ที่นิยมใช้ที่สุดคือแบบ Feed-forward โครงข่ายนี้จะประกอบด้วย 1) ชั้นรับข้อมูล 2) ชั้นแฝง และ 3) ชั้นแสดงผล โดยแต่ละชั้นจะประกอบด้วยหน่วยย่อย ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผล แทนด้วยสมการ

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^m (w_{j,i} \cdot x_i) + b_j\right) \tag{1}$$

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^n (w_{k,j} \cdot y_j) + b_k\right) \tag{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อข้อผิดพลาดที่ปรากฏในเอกสารนี้ ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย x_i คือ ข้อมูลเริ่มต้น
- y_j คือ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากชั้นแฝง
- y_k คือ ค่าผลลัพธ์จากชั้นแสดงผล
- w คือ ค่าน้ำหนัก
- b คือ ค่าเบี่ยงเบน
- $f(c)$ คือ ฟังก์ชันแปลงค่าความสัมพันธ์

การพยากรณ์การทรุดตัวของอาคารจะทำการหารูปแบบของ โครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม (Optimum ANN) โดยใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย หรือ Root mean square error (RMSE) เป็นตัววัดประสิทธิภาพของโครงข่าย ในที่นี้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร แทนด้วยสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - t_i)^2}{N}} \quad (3)$$

โดย N คือ จำนวนข้อมูลที่นำมาใช้

O คือ ค่าการทรุดตัวจากโครงข่ายประสาทเทียม

t คือ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการวัดค่าจริง

นอกจากนี้ ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ จำนวนหน่วยย่อยในชั้นรับข้อมูล จำนวนชั้นแฝง และจำนวนหน่วยย่อยในชั้นแฝง จะต้องทำการหารูปแบบที่เหมาะสมของโครงข่ายใหม่ทุกครั้งด้วยวิธีการลองผิดลองถูก เพื่อให้ได้รูปแบบของโครงข่ายที่เหมาะสมกับปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ [6]

4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว

จากข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของทั้งสองโครงการ นำมาสู่การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient, r) คำนวณตามสมการ

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งค่าที่เป็นลบแสดงถึงความสัมพันธ์ของสองปัจจัยที่มีลักษณะผกผันกัน ค่าที่เป็นบวกแสดงความสัมพันธ์ของสองปัจจัยที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวกับค่าการทรุดตัวตามสภาพทางธรณีวิทยาต่างๆ ไว้ในตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลำดับความสัมพันธ์ของปัจจัยมีความแตกต่างกันในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยา โดยที่ความดันหน้าหัวเจาะ มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวที่มีความสำคัญที่สุดในทุกกรณี ยกเว้นในกรณีการก่อสร้างอุโมงค์

ในชั้นทรายที่ความเร็วขณะเจาะมีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวมากที่สุด

5. ประสิทธิภาพการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมจะนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7 โดยมีวัตถุประสงค์ในการที่จะพัฒนาประสิทธิภาพในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [7] ซึ่งการแบ่งกรณีศึกษาต่างๆ เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินนั้น ประกอบไปด้วย

- 1) การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินในทุกสภาพทางธรณีวิทยาของทั้ง 2 โครงการ
- 2) การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์
- 3) การพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินแยกตามสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ แต่ทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์น้อยที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

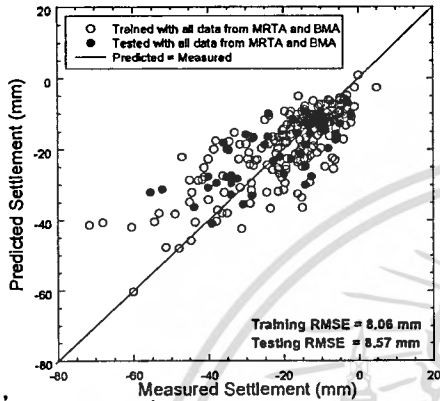
ตารางที่ 7 กรณีศึกษาการพยากรณ์การทรุดตัวผิวดินด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

กรณีศึกษา	วัตถุประสงค์	ข้อมูลที่ใช้เรียนรู้และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ
1	พยากรณ์การทรุดตัวผิวดินในทุกสภาพทางธรณีวิทยาของทั้ง 2 โครงการ	ทุกสภาพทางธรณีวิทยา
2	พยากรณ์การทรุดตัวผิวดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ดินเหนียวแข็ง ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ดินทราย
3	พยากรณ์การทรุดตัวผิวดินดินในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง ดินเหนียวแข็ง
3.1	ไม่มีปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการเจาะอุโมงค์	ดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง
3.2	ไม่มีปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการเจาะอุโมงค์	ดินเหนียวแข็ง
3.3	ไม่มีปัจจัยความเร็วขณะเจาะ	ดินเหนียวแข็ง-ดินทราย
3.4	ไม่มีปัจจัยความดันของการดันน้ำปูน	ดินทราย

5.1 กรณีศึกษา 1 การเรียนรู้ข้อมูลในทุกสภาพทางธรณีวิทยา

เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวในทุกสภาพทางธรณีวิทยา

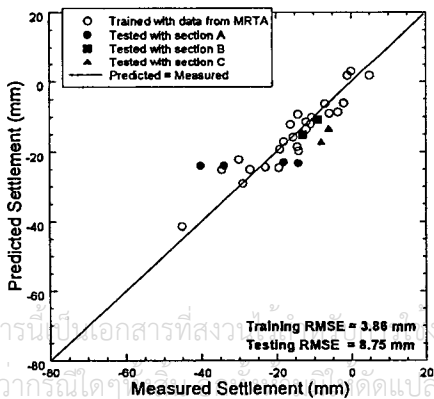
ในกรณีนี้ โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้ข้อมูลในทุกส่วนก่อสร้างของทั้ง 2 โครงการ เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวโดยรวม ในการที่จะนำไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ในกรณีศึกษาอื่นต่อไป โดยให้ผลการพยากรณ์การทรุดตัวมีค่า RMSE = 8.57 มม. แสดงไว้ในรูปที่ 2



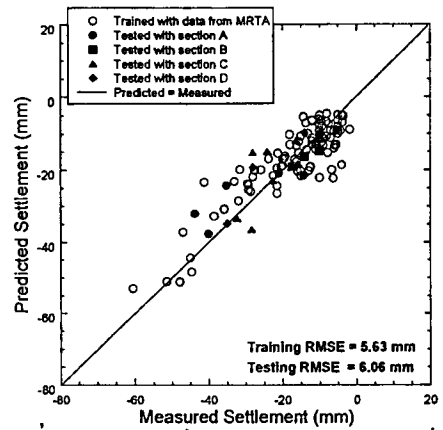
รูปที่ 2 การพยากรณ์การทรุดตัวในทุกสภาพทางธรณีวิทยา

5.2 กรณีศึกษา 2 การเรียนรู้ข้อมูลและพยากรณ์ทดสอบในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน

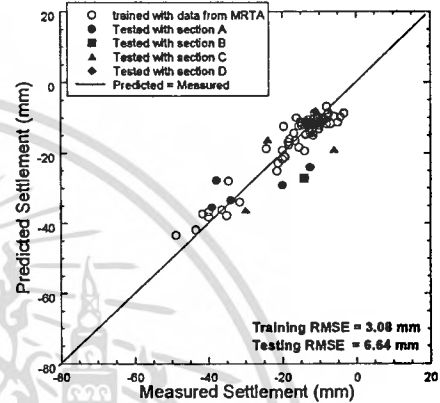
ในกรณีนี้ ใช้ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว โดยที่ได้ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ตามสภาพทางธรณีวิทยาออกเป็น 4 ส่วน ประกอบไปด้วย 1) ชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง 2) ชั้นดินเหนียวแข็ง 3) ชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย และ 4) ชั้นดินทราย โดยผลการพยากรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าผลการพยากรณ์ในชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ให้ค่า RMSE = 6.06 และ 6.64 มม. ตามลำดับ ให้ผลการพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการพยากรณ์โดยรวม แต่ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทราย ผลการพยากรณ์กับให้ค่า RMSE ที่สูงกว่าการพยากรณ์การทรุดตัวในทุกส่วนก่อสร้าง



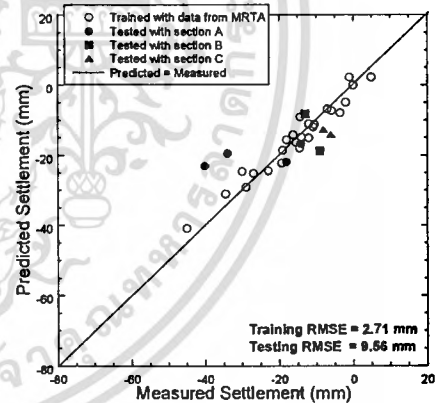
รูปที่ 3 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง



รูปที่ 4 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินเหนียวแข็ง



รูปที่ 5 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินเหนียวแข็ง-ดินทราย

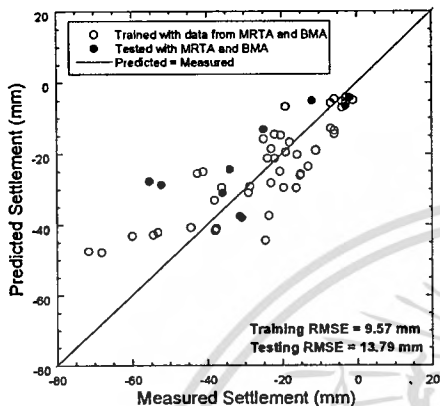


รูปที่ 6 ผลการพยากรณ์การทรุดตัวในดินทราย

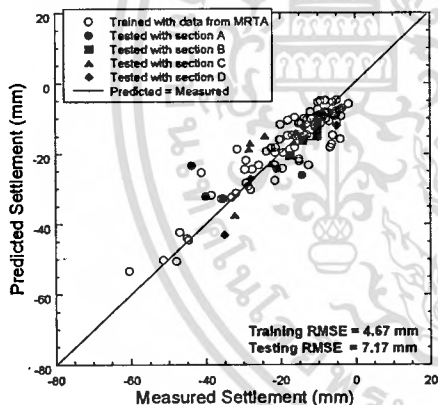
5.3 กรณีศึกษา 3 การเรียนรู้ในสภาพทางธรณีวิทยาเดียวกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัย

ในกรณีศึกษา นี้ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งทำการตัดปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยที่สุดต่อการทรุดตัวจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งถ้าผลการพยากรณ์ในกรณีทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการทรุดตัวน้อยที่สุด มีค่าสูงกว่าผลการพยากรณ์ตามแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาในกรณีศึกษาที่ 2 ก็จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยดังกล่าวแม้จะไม่มี ความสัมพันธ์ที่แน่นอนต่อการทรุดตัว แต่ก็มีผลกระทบต่อ การทรุดตัว และในทางตรงกันข้ามหากผลการพยากรณ์ใน

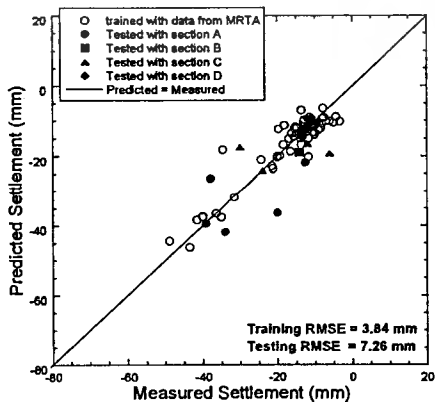
กรณีที่ทำการตัดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด มีค่าต่ำกว่าผลการพยากรณ์ในกรณีศึกษาที่ 2 ก็จะแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยดังกล่าวนั้น ไม่มีความสัมพันธ์ต่อค่าการทรุดตัวผิวดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยา โดยผลการพยากรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า RMSE ในทั้ง 4 กรณี ให้ค่าที่สูงกว่าในกรณีศึกษาที่ 2



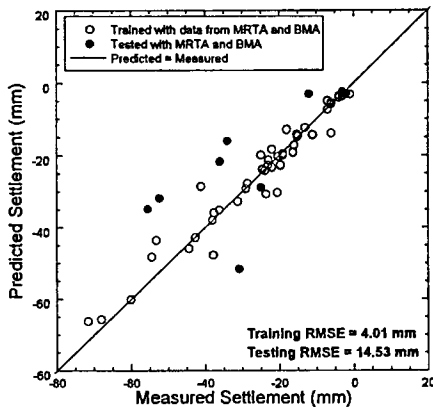
รูปที่ 7 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง โดยไม่มีปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์



รูปที่ 8 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินเหนียวแข็ง โดยไม่มีปัจจัยระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์



รูปที่ 9 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินเหนียวแข็ง-ดินทรายโดยไม่มีปัจจัยความเร็วขุดเจาะ



รูปที่ 10 การพยากรณ์การทรุดตัวในดินทรายโดยไม่มีปัจจัยความดันของการฉีดน้ำปูน

6. บทสรุป

การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย ที่มีข้อมูลในปริมาณที่มากเพียงพอ สามารถที่จะพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพทางธรณีวิทยาของทั้ง 2 โครงการ อันเนื่องมาจากในแต่ละสภาพทางธรณีวิทยาที่ทำกรก่อสร้างอุโมงค์ จะมีลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวแตกต่างกัน ทำให้การสร้างความสัมพันธ์โดยการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะหาค่าน้ำหนัก และค่าเบี่ยงเบนไปสู่ปัญหาในที่นี้ก็คือ ค่าการทรุดตัวของผิวดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทราย ผลของค่า RMSE ในกระบวนการทดสอบมีค่าที่สูง อันเนื่องมาจากมีข้อมูลทีน้อยในทั้งสองส่วนนี้ ทำให้โครงข่ายไม่สามารถที่จะสร้างความสัมพันธ์ไปสู่การพยากรณ์การทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากกรณีศึกษาที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวทุกปัจจัยล้วนมีอิทธิพลต่อค่าการทรุดตัว

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนวิจัยมหัพชาพิชิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว.-สสว.) ประจำปี 2550 และความเห็น ในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Clough, G. W., Sweeney, B. P., and Finno, R. J., (1982). Measured Soil Response to EPB Shield Tunneling. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 2: pp. 131-149.
- [2] Ju, D., Moh, Z-C., and Hwang, R. N., (1999). Soft Ground Tunneling for Taipei Rapid Transit Systems. Proc. of the 3rd Conf. on Geo-Engineering for Underground Facilities, ASCE: pp. 610-621.
- [3] Chiorboli, M. A. and Marcheselli, P. P., (1996). Analysis and Control of Subsidence due to Earth Pressure Shield Tunneling in Passante Ferroviario of Milano. Proc. of Int. Conf. on North American Tunneling'96, Balkema, Rotterdam: pp. 97-106.
- [4] Suwansawat, S., (2004). Shield Tunneling Database Management for Ground Movement Evaluation. Proc. the 30th World Tunnel Congress, Singapore.
- [5] Murray Smith, (1993). Neural networks for statistical modeling. United States of America : International Thomson Publishing.
- [6] Seibi, A., Al-Alawi, S.M., (1997). Prediction of Fracture Toughness using Artificial Neural Networks (ANNs). Engineering Fracture Mechanics, Vol. 56, No. 3, pp. 311-319.
- [7] Suwansawat and Einstein, (2006). Artificial Neural Networks for Predicting the Maximum Surface Settlement Caused by EPB Shield Tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology, 21 : pp. 133 -150.

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในทุกสภาพทางธรณีวิทยาของทั้ง 2 โครงการ

	การทรุดตัว ผิวดิน	ความคืบหน้า หัวเจาะ	ความคืบหน้า น้ำปูน	มุมของ หัวเจาะ	% การเติม น้ำปูน	ระดับน้ำ ใต้ดิน	ความลึก อุโมงค์	ความเร็วขณะ ขุดเจาะ	ระยะเริ่มต้นการ ก่อสร้างอุโมงค์
การทรุด ตัวผิวดิน	1	0.398	0.258	0.227	0.180	0.102	-0.099	-0.055	-0.046

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน-ดินเหนียวแข็ง

	การทรุดตัว ผิวดิน	ความคืบหน้า หัวเจาะ	ความเร็วขณะ ขุดเจาะ	ระดับน้ำ ใต้ดิน	ความลึก อุโมงค์	มุมของ หัวเจาะ	ความคืบหน้า น้ำปูน	% การเติม น้ำปูน	ระยะเริ่มต้นการ ก่อสร้างอุโมงค์
การทรุด ตัวผิวดิน	1	0.458	0.424	0.374	-0.374	0.357	0.343	0.262	0.130

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง

	การทรุดตัว ผิวดิน	ความคืบหน้า หัวเจาะ	% การเติม น้ำปูน	ความคืบหน้า น้ำปูน	ความลึก อุโมงค์	ระดับน้ำ ใต้ดิน	ความเร็วขณะ ขุดเจาะ	มุมของ หัวเจาะ	ระยะเริ่มต้นการ ก่อสร้างอุโมงค์
การทรุด ตัวผิวดิน	1	0.516	0.423	0.385	0.239	-0.239	0.193	0.133	-0.026

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็ง-ดินทราย

	การทรุดตัว ผิวดิน	ความคืบหน้า หัวเจาะ	ความคืบหน้า น้ำปูน	ระยะเริ่มต้นการ ก่อสร้างอุโมงค์	% การเติม น้ำปูน	ระดับน้ำ ใต้ดิน	ความลึก อุโมงค์	มุมของ หัวเจาะ	ความเร็วขณะ ขุดเจาะ
การทรุด ตัวผิวดิน	1	0.490	0.439	-0.372	0.225	-0.202	0.195	0.060	0.010

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวจากการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินทราย

	การทรุดตัว ผิวดิน	ความเร็วขณะ ขุดเจาะ	% การเติม น้ำปูน	ระดับน้ำ ใต้ดิน	ความคืบหน้า หัวเจาะ	ระยะเริ่มต้นการ ก่อสร้างอุโมงค์	มุมของ หัวเจาะ	ความลึก อุโมงค์	ความคืบหน้า น้ำปูน
การทรุด ตัวผิวดิน	1	-0.547	-0.484	0.369	-0.281	0.241	0.233	-0.177	0.085

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายพิสุทธิ์ โชติฉิลก
 วัน เดือน ปีเกิด 2 กรกฎาคม 2525
 ที่อยู่ 48 ถนนมาบมะยม ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2548-2549 วิศวกรโครงสร้าง บริษัท อิน โนเวทีฟ เอนจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
 พ.ศ. 2549-ปัจจุบัน วิศวกรธรณีเทคนิค บริษัท ดี ทู คอนซัลท์ เอเชีย จำกัด

ผลงานทางวิชาการ

พ.ศ. 2550 เสนอบทความวิจัย “ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นทรายกรุงเทพฯ”

พ.ศ. 2550 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12
 เสนอบทความวิจัย “Application of ANN model for predicting settlements induced by tunneling in sand”
 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2007)

พ.ศ. 2550 เสนอบทความวิจัย “Ground improvements in supporting the excavation of Bangkok Blue Line South Extension”
 International Symposium on Tunneling for Urban Development
 Pattaya City, Thailand

พ.ศ. 2551 เสนอบทความวิจัย “การออกแบบการปรับปรุงคุณภาพดินในโครงการอุโมงค์ส่วนต่อขยายสายใต้สีน้ำเงินของกรุงเทพฯ”
 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13

- พ.ศ. 2551 เสนอบทความวิจัย “Evaluation of ANN performance and shield operational factor’s correlation for predicting surface settlements”
Conference of ASEAN Federation of Engineering Organization (CAFEO’26) Bangkok, Thailand
- พ.ศ. 2552 เสนอบทความวิจัย “การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมและความสัมพันธ์ของปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์สำหรับพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดิน”
การประชุมวิชาการ โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 3
- พ.ศ. 2552 เสนอบทความวิจัย “การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์เพื่อพยากรณ์การทรุดตัวของผิวดินโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม”
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14
- พ.ศ. 2552 เสนอบทความวิจัย “หลักเกณฑ์ทางวิศวกรรมของระบบรถไฟฟ้าในโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินช่วงหัวลำโพง-บางแค และช่วงบางซื่อ-ท่าพระ”
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14
- พ.ศ. 2552 เสนอบทความวิจัย “Ground improvement design and technique for supporting the construction of Bangkok Blue Line South Extension Subway”
ITA-AITES world tunnel congress 2009, Budapest, Hungary.
- ทุนการศึกษา
- พ.ศ. 2550-ปัจจุบัน กองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว.-สสว.) ประจำปี 2550