

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ PVD ในประเทศไทย  
THE WAY TO APPLY PREFABRICATED VERTICLE DRAIN ( PVD ) IN  
THAILAND



เลขานุ.....  
เลขทะเบียน..... 72956  
วัน,เดือน,ปี..... 26 ส.ย. 2550

b. 11225/261  
i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE WAY TO APPLY PREFABRICATED VERTICLE DRAIN ( PVD ) IN  
THAILAND**



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ                      การประยุกต์ใช้ PVD ในประเทศไทย

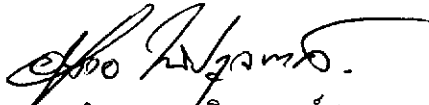
นักศึกษา                                      นาย ปิยพล                      หลุณรรักษ์ปราการ

หลักสูตร                                      วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชา                                      วิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ. อำนวย พานิชกุลพงศ์	
อาจารย์ศิลป์ชัย จานสุวรรณ	
ดร.คมสัน มาลีสี	
อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

  
(รศ. อำนวย พานิชกุลพงศ์ )  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
วันที่    เดือน    พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การประยุกต์ใช้ PVD ในประเทศไทย

นักศึกษา

นาย ปิยพล หฤทรัพย์ปรากฏ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ศิลป์ชัย จานสุวรรณ

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา

2549

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของ PVD ในด้านต่างๆและหนทางที่จะสามารถประยุกต์ใช้ วัสดุนี้ในประเทศไทยได้ จึงมีคัดการเลือกวิธีที่สามารถนำไปใช้ได้โดยเกิดประโยชน์ การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนบนบริเวณภาคกลางตอนล่างเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุก น่าจะเป็นวิธีที่น่าจะเกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับการใช้ PVD จึงได้มีการเลือกวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเช่นเดียวกันมาเพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียเพื่อที่จะเลือกวัสดุที่คุ้มค่าที่สุดเหมาะสมที่สุดไปใช้ อีกทั้งวัสดุ PVD ยังมีการพัฒนาการอีก Soil cement column , PVD with surcharge , PVD with vacuum จึงเป็นวัสดุที่เลือกมาเปรียบเทียบกัน โดยการอนุเคราะห์ข้อมูลของกรมทางหลวงจึงได้ข้อมูลจากหน้างานเพื่อมาเปรียบเทียบวิจัย และรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุเหล่านี้จากแหล่งต่าง

สรุปมาเป็นข้อดีข้อเสียของวัสดุ และนำมาเปรียบเทียบทางด้านต่างๆเช่นด้านวิศวกรรม ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านการก่อสร้างและผลกระทบ และนำมารวมกันเพื่อหาข้อสรุป พบว่า PVD with Vacuum มีผลคะแนนออกมาดีที่สุดสำหรับสามวัสดุที่นำมาเปรียบเทียบเท่ากับ 3.26 และ soil cement column เท่ากับ 2.86 ตามลำดับแต่ทั้งนี้ต้องเลือกวัสดุตามความเหมาะสมจากปัจจัยเด่นทางด้านต่างๆด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title : The way to apply Prefabricated Vertical Drain ( PVD ) in Thailand  
Name : MR.PEYAPON HARUHUNPRAKRAN  
Field : CIVIL ENGINEERING  
Faculty : ENGINNEERING  
Advisor : MR.SINCHAI JARNSUWAN

## ABSTRACT

This project is focused on the study properties of PVD and the way to apply this material in Thailand.

Improvement soft soil in middle region for bearing surcharge, it is probably the most benefit method for using PVD.

So that selection the same material for improvement soil for compare advantage and disadvantage, and then selection the most appropriate to use, Included development PVD material.

Soil cement column, PVD with surcharge, PVD with vacuum are chosen to compare. And use data form Highway Department for research and then collect research from other sources.

Conclusion is advantage and disadvantage of material and take it to compare such as engineering, economic, construction and effect, take it to analysis conclusion.

PVD with vacuum become the best choice of all material, score is 3.26 and soil cement column score is 2.86 respectively. But selection material should consider appropriate and other factors.

# กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีคำกล่าวใดที่สามารถใช้บ่งบอกถึงความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ อาจารย์ ศิลป์ชัย จานสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ได้ ตลอดระยะเวลาของการศึกษานี้ ท่านได้สละเวลาให้คำสั่งสอนที่มีค่ามากมายทั้งเรื่องงานและเรื่องเรื่องทั่วไป โดยท่านได้เน้นให้เรียนรู้เกี่ยวกับการใช้ชีวิต ของเหล่าวิศวกรจบใหม่การวางตัว รวมทั้ง ชี้แนะแนวทางการดำเนินต่อไปในอนาคต และความรู้ที่อีกมากมายที่ไม่สามารถหาได้ในห้องเรียน มีคุณค่าเกินกว่าจะบรรยายได้หมด ณ ที่นี้ ทั้งนี้ขอกล่าวขอบคุณอย่างสุดเคารพแต่ อาจารย์ ศิลป์ชัย จานสุวรรณ

ถือเป็นเกียรติของชีวิตอย่างสูงที่ผู้ประพันธ์ได้รับจากคณะอาจารย์ภาควิชา วิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่าน ด้วยความรัก และความเอาใจใส่ให้คำปรึกษาแนะนำอย่างจริงใจ ไม่รู้จักเหน็ดเหนื่อยเสมือน พี่กับน้อง พ่อกับลูก ตลอดการศึกษา จึงขอกล่าวขอบคุณอย่างยิ่งสำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ได้รับยากที่จะหาสิ่งใดมาทดแทนได้

ท้ายที่สุดแต่ไม่ใช่ข้อสุดท้ายสำหรับคำขอบคุณอันพิเศษสุดขอบขอบแต่สมาชิก ครอบครัวและบุคคลอันเป็นที่รักทุกคนที่มอบความรัก ความหวังโยและให้ความช่วยเหลือมาอย่างต่อเนื่องตลอดการศึกษาของผู้ประพันธ์และขอขอบคุณแหล่งข้อมูลทุกที่ที่อนุเคราะห์ข้อมูลอันตรงค่ามาเพื่อการวิจัยนี้

ปิยพล หฤหรรษ์ปรากการ  
ผู้ประพันธ์

## สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
ปกใน(ภาษาไทย)	ก
ปกใน(ภาษาอังกฤษ)	ข
หน้าอนุมัติ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฏ
คำย่อ	ค
ภาคผนวก	ด
บรรณานุกรม	ต
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 ความจำเป็นและปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำโครงการ	1
1.3 จุดประสงค์ในการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3

## สารบัญ

บทที่ เรื่อง	หน้า
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ระบบPrefabricate Vertical Drains	4
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของของระบบ PVD	4
2.2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน โดยระบบ PVD	5
2.2.3 ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำระบบPVDมาใช้งาน	21
<b>3 วิธีปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ในประเทศไทย</b>	<b>27</b>
3.1 กล่าวนำ	27
3.2 การปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก	27
3.2.1 Geosynthetics	29
3.2.2 PVD	30
3.2.3 soil cement column	38
<b>4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>55</b>
4.1 กล่าวนำ	55
4.2 รวบรวมข้อมูล	55
4.3 การเปรียบเทียบข้อมูลทางวิศวกรรม	55
4.4 การเปรียบเทียบข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์	79
<b>5 การประยุกต์ใช้</b>	<b>92</b>
5.1 การเพิ่มกำลัง	92
5.2 เสถียรภาพ	93
5.3 การสกัดน้ำออก	95
5.4 Pile foundation	96
5.5 Preload	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 เทคนิคด้านสิ่งแวดล้อม	101
<b>6 ผลวิจัยและการวิเคราะห์</b>	<b>104</b>
6.1 กล่าวนำ	104
6.2 สรุปข้อดีข้อเสียวัสดุที่นำมาเปรียบเทียบ	104
6.3 ตารางเปรียบเทียบวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน	106
<b>7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>108</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1	คุณสมบัติต่างๆ ของ PVD <sub>s</sub>	11
2.2	คุณสมบัติของเส้นท่อ PVD <sub>s</sub>	25
2.3	คุณสมบัติด้านทนทานต่อสารเคมีของ PVD <sub>s</sub>	26
3.1	ข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับค่า Unconfined Compression Test ของ Soil-Cement Column	54
4.1	คุณสมบัติเบื้องต้นของบริเวณที่ถูกเลือกมาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบ	58
4.2	การทรุดตัวของถนน บางนา-บางปะกง	68
4.3	การทรุดตัวของถนน กรุงเทพ-ชลบุรี (สายใต้ใหม่)	73
4.4	ค่า Undrained Shear Strength ทั้งก่อนและหลัง การปรับปรุงฐานรากโดยวิธี PVD ของถนน สายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่)	76
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained Shear Strength ต่อความลึกทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงฐานรากโดยวิธี PVD ของถนนกรุงเทพ-ชลบุรีสายใหม่	76
4.6	ตัวอย่างมูลค่าในเดินทางเฉลี่ยต่อคันของถนนสายหนึ่ง	81
4.7	รายละเอียดการคำนวณค่าปรับปรุงดินโดยใช้ Soil- Cement Column	87
4.8	รายละเอียดการคำนวณค่าปรับปรุงดินโดยใช้ PVD	87

## สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1	การขุดตัวของดิน เมื่อไม่มีระบบ PVDs	6
2.2	การระบายน้ำออกจากมวลดินเมื่อใช้ระบบ PVDs	7
2.3	เปรียบเทียบปริมาณการทรุดตัวของดินภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน	7
2.4	Core ของ Vertical drains แบบต่างๆ	9
2.5	Jacket Vertical drains	12
2.6	Self – Movable Installation Rig	13
2.7	Mandre และการประกอบติดตั้ง Anchor plate	14
2.8	ขั้นตอน และวิธีการติดตั้งระบบ PVDs	16
2.9	Sand Blanket Drainage	17
2.10	การใช้ Anchor plate กำหนดจุดที่จะฝัง PVDs	17
2.11	การติดตั้งและการตัดปลายของ PVDs	18
2.12	ทำความสะอาดหลังจากดึง Mandrel ออกแล้ว	18
2.13	ค่าความแข็งแรงของแกน และผนังเส้นท่อ PVDs	22
2.14	ลักษณะการเสียบรูปของเส้นท่อ PVDs	23
3.1	วิธีการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนโดย Preloading with PVD	31
3.2	Drain Resistance และ Soil Disturbance	34
3.3	การแปลงพื้นที่หน้าตัด PVD เป็นหน้าตัดวงกลม	34
3.4	การกระจายของความเค้นสำหรับงานถมดิน a) พื้นที่กว้าง b) งานถมก้นดิน	36
3.5	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน a) Surcharge load b) Vacuum	37
3.6	เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน	37
3.7	การวิจัยของกลุ่ม Soil-Cement Column ในลักษณะ Block Failure	41
3.8	การวิจัยของกลุ่ม Soil-Cement Column ในลักษณะ to Local Shear Failure	42
3.9	การออกแบบ Soil-Cement Column ชนิด End Bearing type	42
3.10	ลักษณะการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อรับน้ำหนักน้อยกว่า Creep Strength	44
3.11	การทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Settlement ) ของ Soil-Cement Column	45
3.12	ลักษณะการวิจัยของเสถียรภาพความลาด	46
3.13	รูปแบบคันทางทดสอบ ( Bergado et al., 2005 )	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14	การทรุดตัวของ Soil-Cement Column และดินรอบๆ	48
3.15	กำลังแรงเฉือนของ Soil-Cement Column	49
3.16	การกระจายตัวของ calcium ที่ความลึก 2.3 ม.	50
3.17	ปริมาณน้ำในมวลดินและความหนาแน่นเปียกที่ระยะเวลาต่างๆ	51
3.18	ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Soil-Cement Column	51
3.19	การเปลี่ยนแปลงกำลังแรงเฉือนกับเวลา (Ikegami et al.,2005)	52
3.20	การกระจายตัวของ calcium (Ikegami et al.,2005)	52
3.21	ผลของคันทางต่อหน่วยแรงที่กระทำบน Soil-Cement Column (Stewart et al., 2005)	53
3.22	ผลของโมดูลัสเสาคementต่อหน่วยแรงที่กระทำบน Soil-Cement Column (Stewart et al., 2005)	53
3.23	ลักษณะการกระจายตัวของค่ากำลังรับแรงอัดของ Soil-Cement Column	54
4.1	ตำแหน่งและที่ตั้งของถนนสายบางนา-บางปะกง และ กรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่)( ปรับปรุงจาก สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง	59
4.2	ที่ตั้งของถนนบางนา-บางปะกง และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ปรับปรุงจาก สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง	60
4.3	ที่ตั้งของถนนกรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใหม่ ) และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์	60
4.4	รูปตัดตามแนวยาว และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ของถนนบางนา-บางปะกง	61
4.5	รูปตัดตามแนวยาว และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ของถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่)( ปรับปรุงจาก ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2541 )	61
4.6	คุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำ ( CR, Compression Ratio ) ตลอดความยาว ของถนนสายกรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใหม่ ) ( ปรับปรุงจาก Lin, 1999 )	62
4.7	คุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำ ( CR, Compression Ratio ) ตลอดความยาว ของถนนสายบางนา-บางปะกง	63
4.8	พื้นที่ในการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนนบางนา - บางปะกง	65
4.9	ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนนบางนา - บางปะกง	66
4.10	ขยายตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนนบางนา - บางปะกง	67
4.11	ค่าการทรุดตัวของถนนบางนา – บางปะกง	69
4.12	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนน-ชลบุรี สายใหม่	71
4.13	ค่าการทรุดตัวของถนน สายกรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใต้ใหม่ )	74
4.14	การทรุดตัวที่เกิดขึ้นแปรผันตามระยะในแต่ละ Station ของถนนกรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใหม่ )	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15	การเปรียบเทียบทรุดตัวระหว่าง ถนนบางนา-บางปะกง (STA 29+992 ) กับ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) ( STA 24+000 )	77
4.16	การเปรียบเทียบ Undrained Shear Strength ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง ฐานรากของถนนทั้ง 2 สาย	78
4.17	การประมาณผลประโยชน์ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ถนน	80
4.18	ผลประโยชน์ที่ได้อันเนื่องมาจากการลดลงของค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ซึ่งมีอัตราเติบโต ๘%ต่อปี	82
4.19	กระแสเงินสดของผลประโยชน์ที่เท่ากันแต่ได้รับ ณ เวลาต่างกัน	83
5.1	Bridge	92
5.2	Drainage Layer	93
5.3	Landslide & Squeezing	94
5.4	Slip Circle	95
5.5	Building Excavation	96
5.6	Pile Foundation	96
5.7	Preload & Tankpark	97
5.8	Surcharge Method	98
5.9	Vacuum Consolidation	98
5.10	Motoway Widening	99
5.11	Well Point System	100
5.12	Test Field Sweden	100
5.13	Soil Cleaning	102
5.14	Landfill Drains	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

### ความหมาย

A	=	พื้นที่หน้าตัดของ Soil-Cement Column
$A_{sc}$	=	พื้นที่หน้าตัดของ Soil-Cement Column
B	=	ด้านกว้างของกลุ่ม Soil-Cement Column
$C_c$	=	Compression Index
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ Soil-Cement Column
$D_e$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ Equivalent Soil Cylinder
$E_{sc}$	=	Elastic Modulus ของ Soil-Cement Column
$E_{sm}$	=	Elastic Modulus ของดินระหว่าง Soil-Cement Column
$F(n)$	=	Spacing Effect
$F_w$	=	Well Resistance
$F_s$	=	Smear Effect
G	=	Shear Modulus ของดิน
$G_{sc}$	=	Shear Modulus เฉลี่ยของดิน
H	=	ความยาวของ Soil-Cement Column
$H_d$	=	ความยาวมากสุดของเส้นทางการไหล
$H_c$	=	ความยาวของ Soil-Cement Column
L	=	Length of the Drain
L	=	ด้านยาวของกลุ่ม Soil-Cement Column
N	=	จำนวนของ Soil-Cement Column ที่พิจารณา
$P_c$	=	คะแนนเฉลี่ยที่ได้จากแบบฟอร์มสัมพัทธ์ผู้เชี่ยวชาญ
$Q_{ult,sc}$	=	Ultimate Bearing Capacity ของ Soil-Cement Column เมื่อเกิด Creep
$Q_{ult,sc}$	=	Ultimate Bearing Capacity ของกลุ่ม Soil-Cement Column
$Q_{ult,sc}$	=	Ultimate Bearing Capacity ของ Soil-Cement Column
S	=	ระยะห่างระหว่างหลุม
$S_{sc}$	=	ปริมาณการทรุดตัวของ Soil-Cement Column
$S_o$	=	ปริมาณการทรุดตัวของมวลดินได้ฐานรากถ้าไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ
$S_s$	=	ปริมาณการทรุดตัวของมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column
$S_{u,im}$	=	Average Undrained Shear Strength of Improved Soil
$S_{u,sc}$	=	Undrained Shear Strength of Soil-Cement Column
$S_{u,sc}$	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของมวลดินได้เสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ๓๑๓ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
$S_{undr}$	Undrained Shear Strength of Soil
$S_u$	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของมวลดินรอบ Soil-Cement Column
$T_r$	Time Factor ตาม Radial Flow
$U_v$	ค่าเฉลี่ย Degree of Consolidation ของ Vertical Flow
$W_i$	Weighting Factor ของแต่ละป่องจ้อยหลัก
$a$	Relative Column Area
$b$	ความกว้างของ Local Load Area
$b_1$	ผลประ โยชน์ที่ได้รับในช่วงเวลา $t$
$c$	Cohesion
$c_h$	Horizontal Coefficient of Consolidation
$c_v$	Vertical Coefficient of Consolidation
$d_1$	เส้นค่าศูนย์กลางของ Disturbed Zone รอบ Drain
$d_e$	Equivalent Diameter of the Drain
$g$	อัตราการเติบโตของผลประ โยชน์ต่อช่วงเวลา
$k_h$	Coefficient of Permeability in the Horizontal Direction in Undisturbed Zone
$k_s$	Coefficient of Permeability in the Horizontal Direction in Smear Zone
$l$	ความยาวของ Local Load Area
$m$	จำนวนแถวของกลุ่ม Soil-Cement Column
$m_{in}$	กะแนมเฉลี่ยต่ำสุดของป่องจ้อยรอง
$n$	Spacing Ratio
$n_x$	ช่วงกะแนม
$q$	หน่วยแรงเฉลี่ยที่กระทำบนพื้นที่ที่ปรับปรุงคุณภาพ
$q_1$	หน่วยแรงแนวตั้งที่กระทำกับ Soil-Cement Column
$q_d$	Discharge Capacity of the Drain at Hydraulic Gradient of 1
$r$	ระยะทางตามแนวรัศมีของจุดที่พิจารณาจากศูนย์กลางของ Drained Soil Cylinder
$t$	เวลาหลังจากการเพิ่มขึ้นของ Vertical Stress
$u$	Average Excess Pore Pressure
$w_i$	Weighting Factor ของแต่ละป่องจ้อยรอง
$w_u$	ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ
$x$	กะแนมเฉลี่ยของแต่ละป่องจ้อย
$\Delta P_{col}$	น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อ Soil-Cement Column
$\Delta P_{sum}$	น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำบนพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

$\Delta P_c$	=	น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column
$\Delta VOT$	=	ความแตกต่างของมูลค่าที่เกิดจากระยะเวลาในการเดินทางรวมลดลง มุมที่เปลี่ยนไป
$\alpha$	=	
$\phi$	=	Friction Angle
$\sigma_H$	=	Total Lateral Stress
$\sigma_V$	=	Total Vertical Stress
$\sigma_1$	=	Major Principal Stress ซึ่งเท่ากับหน่วยแรงในแนวตั้ง $\sigma_V$
$\sigma_3$	=	Minor Principal Stress ซึ่งเท่ากับหน่วยแรงในแนวราบ $\sigma_H$
$\tau_{int}$	=	ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนตามเส้นรอบรูปของกลุ่ม Soil-Cement Column

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	ชื่อเต็ม
Avg	average
B/C	benefit cost ratio
CR	compression ratio
HDM	highway development & management
IRR	internal rate of return
NPV	net present value
PVD	prefabricated vertical drain
PVDs	prefabricated vertical drain
VOC	vehicle operating cost
VOT	value of time
OCR	over consolidation ratio

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ดินบริเวณภาคกลางตอนล่างของประเทศไทยเป็นพื้นที่ดินคอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำที่เกิดจากการพัดพาทับถมของตะกอนทำให้มีความชื้นสูง ความหนาแน่นน้อย เป็นเหตุให้มีความสามารถในการรับกำลังต่ำ

จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของดินเพื่อให้มีความสามารถในการรับกำลังเพื่อการก่อสร้างที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุก เพื่อป้องกันความเสียหายภายหลังการก่อสร้างตามมา ไม่เพียงแต่กับสิ่งก่อสร้างสาธารณะเท่านั้น ในบางพื้นที่ ก็มีความสามารถในการรับกำลังต่ำมาก แม้ที่อยู่อาศัยหรือสิ่งก่อสร้างทั่วไปก็ยังมีปัญหาได้เช่นกัน

เราจึงควรเผยแพร่ข้อเท็จจริงนี้แก่บุคคลทั่วไปเพื่อให้ได้ตระหนักถึงสภาพความเป็นจริงเพื่อสิ่งปลูกสร้างของประเทศไทยเราจะได้มีการพัฒนาให้แข็งแรงคงทนถาวรคุ้มค่าและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดดังความต้องการสืบไป

### 1.2 ความจำเป็นและปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำโครงการ

เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้มีการคิดค้นวัสดุทางวิศวกรรมขึ้นมาเรื่อยๆ ในหลายประเทศที่พัฒนาแล้ว หลายวัสดุภัณฑ์เหล่านี้บางตัวก็มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ แต่ในเมืองไทยก็ยังไม่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากนัก

พื้นที่บริเวณภาคกลางตอนล่างของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่มีดินอ่อนมาก ไม่มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะรับน้ำหนักโครงสร้างได้อย่างดินทั่วไป จึงมักพบปัญหา หลังจากการก่อสร้างเสมอๆ เช่นการทรุดตัว การพังทลายของดิน เป็นต้น

ทำให้เกิดมูลค่าความเสียหายมากมาย อีกทั้งพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง เป็นบริเวณที่มีเมืองหลวงของประเทศ รวมทั้งพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมโดยรอบ ทำให้ความเสียหายเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ

กระผมจึงคิดว่าเป็นการดีหากเราจะศึกษาค้นคว้าวัสดุวิศวกรรมที่นำมาปรับปรุงคุณภาพดิน เพื่อที่จะนำมาเผยแพร่ ให้มีความเข้าใจง่าย แก่บุคคลทั่วไป

PVD (Prefabricated Vertical Drain) ก็เป็นหนึ่งในวัสดุวิศวกรรมที่ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและได้มีการนิยมนำมาใช้แพร่หลายกัน ในต่างประเทศ มีการนำไปประยุกต์ใช้มากมายในงานต่างๆกันไป และได้เริ่มนำมาใช้บ้างแล้วในเมืองไทย

กระผมจึงคิดว่าเป็นการดีหากเราจะได้ศึกษา วัสดุนี้อย่างจริงจังเพื่อนำมาเผยแพร่ความรู้แก่คนทั่วไปเพื่อประโยชน์แก่งานก่อสร้างประเทศเราสืบไป

### 1.3 จุดประสงค์ในการศึกษา

1. เพื่อเผยแพร่ความรู้แก่รวมถึงผู้ออกแบบ ผู้รับเหมาและผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อให้ทราบถึงความจำเป็นของการปรับปรุงคุณภาพดิน และแสดงให้เห็นถึงผลความเสียหาย ที่จะตามมาหากไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพดิน รวมทั้งเสนอทางเลือกที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

### 1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. มุ่งเน้นไปที่การรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ และเอกสารที่เกี่ยวข้องกับ PVD และ ข้อมูลการก่อสร้างจริง
2. ศึกษาการประยุกต์ใช้ PVD ในงานประเภทต่างๆ ในต่างประเทศ
3. ศึกษาที่มาของราคา รวบรวมมาวิเคราะห์ หากความสัมพันธ์ของปัจจัยและราคาต่างๆ และ ทำการประมาณราคา ของPVDต่อหน่วยการใช้งาน
4. เปรียบเทียบราคา และจุดเด่นจุดด้อยคุณสมบัติต่างๆของPVDกับวัสดุประเภทอื่นๆในงานประเภทเดียวกัน

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลอ้างอิงในการตัดสินใจในการเลือกวิธีการ ในการปรับปรุงคุณภาพดิน
2. ให้ผู้คนที่ทั่วไปได้ตระหนักถึงความสำคัญของการปรับปรุงคุณภาพดิน
3. เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจในการศึกษาค้นคว้าความรู้ที่เกี่ยวข้องกับ PVD



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

PVD เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันในต่างประเทศ และในเมืองไทยก็มีการเริ่มใช้มาพอสมควร เป็นวัสดุที่มีไว้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายหลากในงานต่างๆ

ด้วยเหตุนี้ PVD จึงเป็นวัสดุที่น่าจะศึกษาไว้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในบ้านเมืองเราต่อไป

### 2.2 ระบบ Prefabricate Vertical Drains ( PVD )

#### 2.2.1 ประวัติความเป็นมาของ Prefabricate Vertical Drains

Prefabricate Vertical Drains ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในประเทศสวีเดนประมาณปี ค.ศ. 1937 โดยในระยะแรกๆ นั้นการขจัดน้ำ ออกจากมวลดิน กระทำได้โดยใช้วัสดุ เช่น ทรายแข็งและมีแกนแข็งซึ่งเป็นตัวนำอยู่ข้างใน และในเวลาเดียวกันนี้ใน California ก็ได้นำระบบ Sand Drains มาใช้กันอย่างกว้างขวางในราวปี ค.ศ. 1950 ทั้งนี้ เนื่องจากภูมิประเทศส่วนใหญ่ของเนเธอร์แลนด์ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อน ( Soft Clay ) และดินจำพวก Peat ที่มีระดับความลึกมาก เมื่อจะทำการก่อสร้างโครงการต่างๆ เช่น ถนน อาคาร โรงงาน และสิ่งสาธารณูปโภค จำเป็นต่างๆ จึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของดินเดิม ( Soil Stabilization ) โดยการนำทรายมาถมกดทับ ( Surcharge ) ร่วมกับการใช้ Sand Drains เพื่อเร่งอัตราการทรุดตัวของดินเสมอ

ในปี ค.ศ. 1972 ระบบการใช้ Sand Drains ได้ถูกพัฒนามาเป็นการใช้วัสดุประเภทโพลีสังเคราะห์ ( Synthetic Drains ) มาใช้เพื่อการระบายน้ำเพื่อเร่งอัตราการทรุดตัวของโครงการก่อสร้างต่างๆ ใน Amsterdam ประเทศเนเธอร์แลนด์ หลังจากนั้นแถบวัสดุโพลีสังเคราะห์ ( Synthetic Drains ) ดังกล่าวนี้ได้ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้อย่างยอดเยี่ยม โดยมีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น

- มีความยืดหยุ่นดีเยี่ยม ( Flexibility )
- ไม่อุดตัน เพราะสามารถกรองอนุภาคของดินเหนียวไม่ให้ลอดผ่านใยสังเคราะห์ที่ถูกถักทอมาอย่างละเอียดได้
- เมื่อถูกทำให้พังงอ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้าง ก็ยังสามารถระบายน้ำได้คืออยู่เสมอ
- ทนทานต่อสภาพความเป็นกรด – ด่าง และสารเคมีต่างๆ ฯลฯ

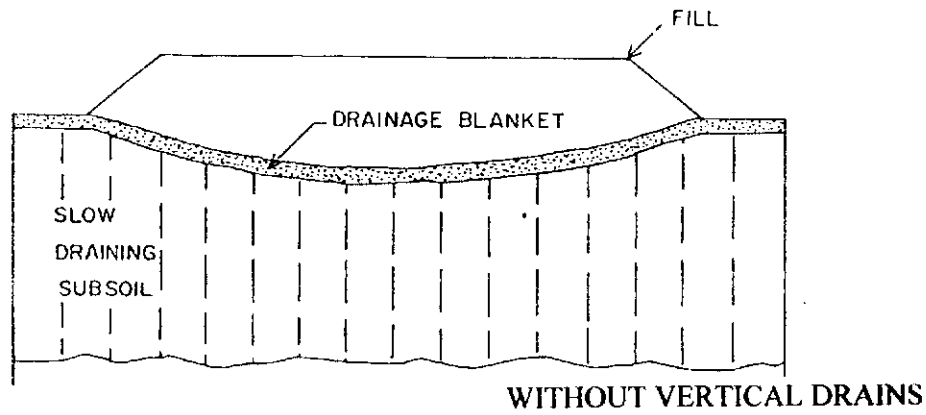
แต่อย่างไรก็ตาม Sand Drains ก็ยังมีบทบาทสำคัญที่จะต้องนำมาใช้ควบคู่กับแถบใยสังเคราะห์อยู่เสมอ

เนื่องจากวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน โดยวิธีการใช้ Prefabricate Vertical drains ( PVDs ) ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ดังนี้ จึงทำให้ความต้องการในการใช้วัสดุแถบใยสังเคราะห์ที่มีคุณภาพดีขึ้นตามต้องการและได้รับความนิยมไปทั่วโลก โดยได้มีการนำไปใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนกันอย่างแพร่หลายในหลาย ประเทศทั่วโลก และที่พบเห็นบ่อย ในเมืองไทย เช่น ยี่ห้อ Mebradrain<sup>®</sup> ของบริษัท GEOPLAST

## 2.2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดยใช้ระบบ Prefabricate Vertical drains (PVDs)

### หลักการทั่วไป

การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนในระบบ Prefabricate Vertical drains ( PVDs ) จะต้องใช้กับดินที่มีความสามารถในการยุบอัดตัวได้ ( Compressible ) และจะต้องเป็นดินที่อยู่ในสภาพที่อิ่มตัว ( Saturated Soil ) เช่น ดินเหนียวอ่อน ( Soft Clay ) และ Peat ซึ่งเป็นดินที่มีโครงสร้างอ่อน และมีโพรงที่เต็มไปด้วยน้ำ ( Pore Water ) เมื่อดินดังกล่าวนี้ถูกกระทำจากแรงภายนอก เช่น น้ำหนักจากดินถมกันทาง ( Embankment or Dike ) จะทำให้ดินทรุดตัว ( Settlement ) ปัญหาการทรุดตัวของดินเดิมในบริเวณโครงการก่อสร้างนับได้ว่าเป็นปัญหาสำคัญอย่างมากในงานก่อสร้างโดยทั่วไป เช่น งานก่อสร้างถนนบนดินอ่อน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การยุบตัวของดิน เมื่อไม่มีระบบ PVDs

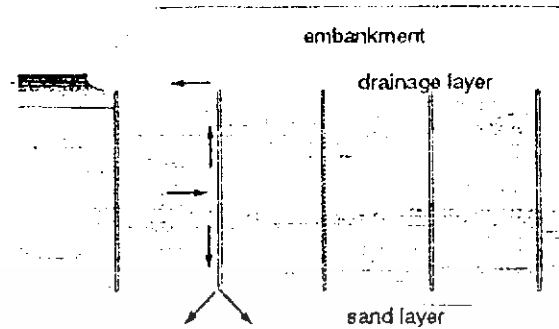
จากภาพที่ 2.1 ในงานก่อสร้างทางเมื่อทำการก่อสร้างคันทาง ( Embankment ) บนดินอ่อนและเป็นดินอิ่มตัว เมื่อน้ำหนักจาก Embankment or Dike กระทำในทันทีทันใด น้ำหนักทั้งหมดนี้จะถูกรับได้โดยน้ำในโพรง ( Pore Water ) หากดินดังกล่าวเป็นดินเหนียวซึ่งมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้ต่ำ ดังนั้น แรงดันของน้ำในโพรงจะถูกขจัดออกไปอย่างช้า และการยุบตัวของดินก็จะเป็นไปอย่างช้า กินเวลานานหลายสิบปี

อนึ่งในงานก่อสร้าง Embankment บนดินอ่อน หากเร่งทำการก่อสร้างจะทำให้เกิดความดันในโพรงมากขึ้น การเพิ่มขนาดของความดันน้ำในโพรง ( Pore Water Pressure ) จะมีผลต่อเสถียรภาพของดินเดิมได้ทันที เช่น อาจทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวได้ ( Slip planes )

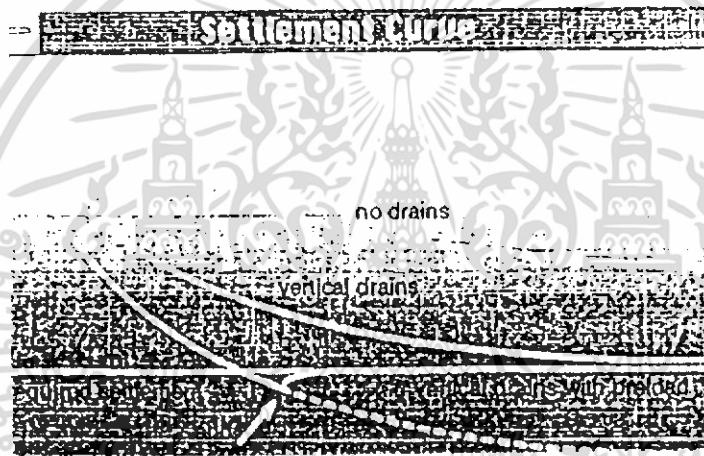
การใช้ PVDs นอกจากจะเป็นตัวเร่งระบายน้ำออกจากมวลดิน เพื่อเร่งอัตราการทรุดตัวของชั้นดินใต้คันทาง ( Subsoil ) แล้วยังเป็นการเสริมสร้างให้ชั้นดินเดิมใต้คันทางมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย โดยจะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของชั้นดิน จึงทำให้สามารถร่นเวลาในการก่อสร้างลงไปได้มากที่สุดทีเดียว

การเพิ่มขนาดของการทรุดตัวของดินใต้คันทาง ( Subsoil ) และกระบวนการลดขนาดของ ความดันของน้ำในโพรง ( Pore Water Pressure ) จำเป็นที่จะต้องทำการลดระยะทาง และเพิ่มความเร็วในการไหลซึมของน้ำในดิน ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้สามารถกระทำได้โดยการฝังแผ่นใยสังเคราะห์เพื่อการระบายน้ำในแนวตั้งลงไปตามระยะเวลาที่เหมาะสม การใช้ Vertical drains จะทำให้สามารถระบายน้ำออกจากมวลดินได้อย่างรวดเร็วและจะทำให้อัตราการยุบอัดตัวของดินเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในเวลาเพียง 6 เดือนเท่านั้น

## Vertical Drains



รูปที่ 2.2 การระบายน้ำออกจากมวลดินเมื่อใช้ระบบ PVDs



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบปริมาณการทรุดตัวของดินภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 2.2 จะเห็นความแตกต่างระหว่างขนาดของการทรุดตัวของดินใต้คันทาง อันเนื่องจากการกระทำด้วยน้ำหนักของวัสดุถมคันทาง ( Embankment ) เส้นกราฟเส้นบนแสดงปริมาณของการทรุดตัวของดินใต้คันทางโดยมิได้ทำการฝัง Vertical drains เพื่อเร่งอัตราการทรุดตัว

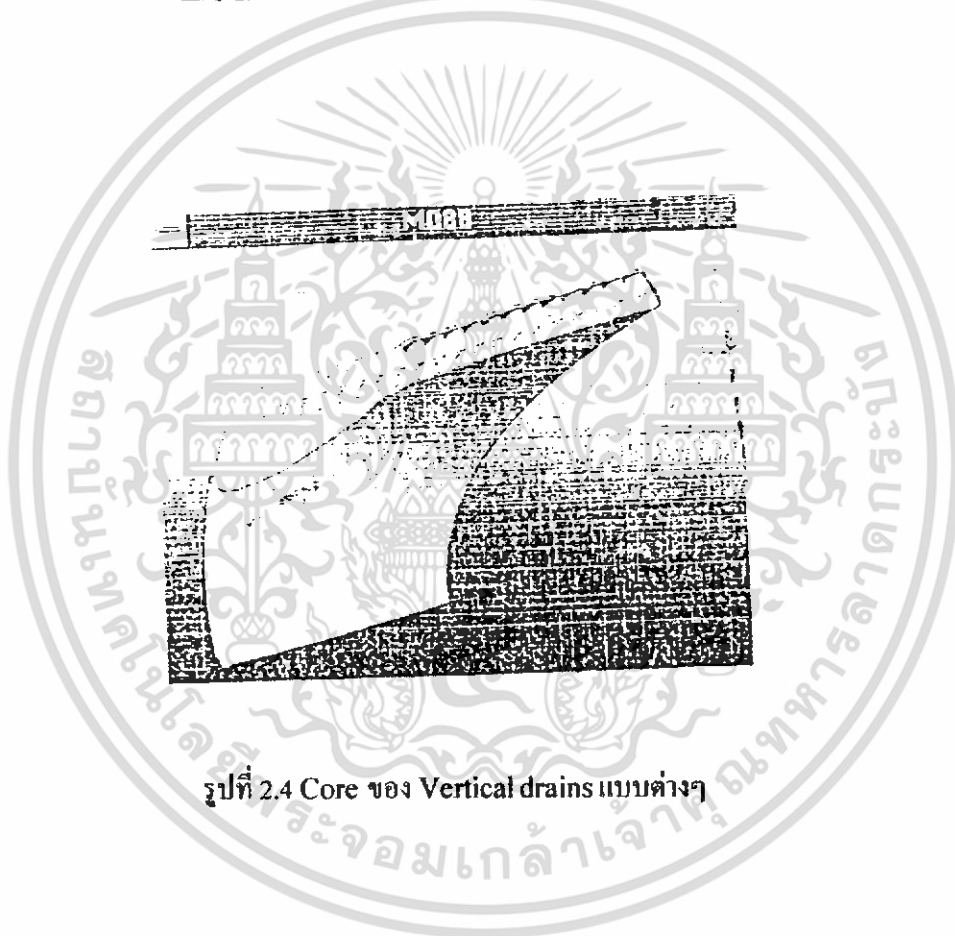
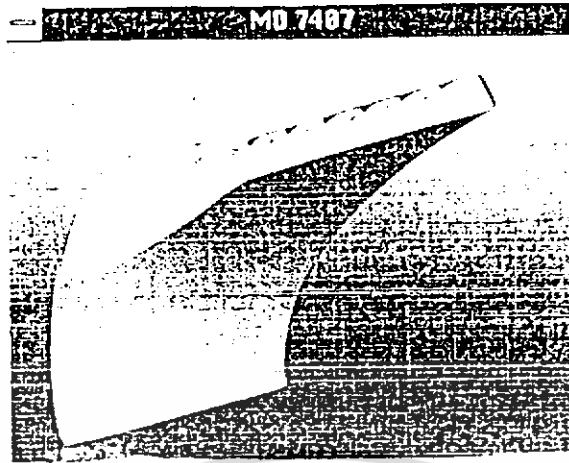
ส่วนกราฟเส้นกลาง และเส้นล่างแสดงปริมาณการทรุดตัวของดินใต้คันทางเมื่อนำระบบ Vertical drains มาใช้ โดยเฉพาะกราฟเส้นล่างสุดจะเห็นว่าปริมาณการทรุดตัวมีค่ามาก และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากทำการ Preload ร่วมกับการฝัง Vertical drains

- งานก่อสร้างทางหลวง ทางรถไฟ และสนามบิน
- งานก่อสร้างท่าเรือ
- งานถมดินเพื่อพัฒนาที่ดิน
- งานถมดินบริเวณ โรงงาน และอาคารของเอกชน
- งานดินถมอาคารคลังสินค้า เป็นต้น

### ส่วนประกอบของ (Vertical drains )

แถบใยสังเคราะห์ระบายน้ำในแนวดิ่ง ( Vertical drains ) มีลักษณะคล้ายๆ ท่อสายอ่อนที่ใช้สำหรับเครื่องปั๊มสูบน้ำที่เห็นกันโดยทั่วไป แต่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีแกนพลาสติกแข็งอยู่ด้านใน ( Core ) และมีแผ่นใยสังเคราะห์ ( Filter or Jacket ) หุ้มอยู่ด้านนอก ซึ่งสามารถแยกชั้นส่วน โครงสร้างได้ดังนี้ คือ

1. แกนกลาง ( Core ) มีลักษณะเป็นแถบยาวๆ เป็นวัตถุประเภทพลาสติกที่ทำมาจากวัสดุสังเคราะห์ประเภท Polyethylene ( PE ) หรือ Polypropylene ( PP ) มีความยาวต่อเนื่องสม่ำเสมอ ตัวแกนจะมีร่อง ( Grooves Through ) เพื่อเป็นช่องทางสำหรับการไหลของน้ำทั้งสองด้าน แกนกลางของ Vertical drains ที่เห็นกันอยู่ทั่วไปมี 2 รูปแบบ ซึ่งไว้มีในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Core ของ Vertical drains แบบต่างๆ

2. แผ่นใยสังเคราะห์หุ้มด้านนอก ( Filter or Jacket ) เป็นวัสดุใยสังเคราะห์ ( Synthetic Geotextile ) ที่สามารถต้านทานแรงกระทำในลักษณะต่างๆ เช่น แรงบิด แรงทะลุทะลวง ( Punching ) และแรงดึงที่เกิดขึ้นในระหว่างการติดตั้ง ( Installation )

ตลอดอายุการใช้งานของ PVDs ที่จะต้องฝังตัวอยู่ในชั้นดินภายใต้สภาวะที่โดยกระทำด้วยแรงในลักษณะต่างๆ ตลอดเวลา ซึ่งคุณสมบัติพิเศษต่าง ของ Filter or PVDs ที่ต้องการจะต้องเป็นไปดังต่อไปนี้ คือ

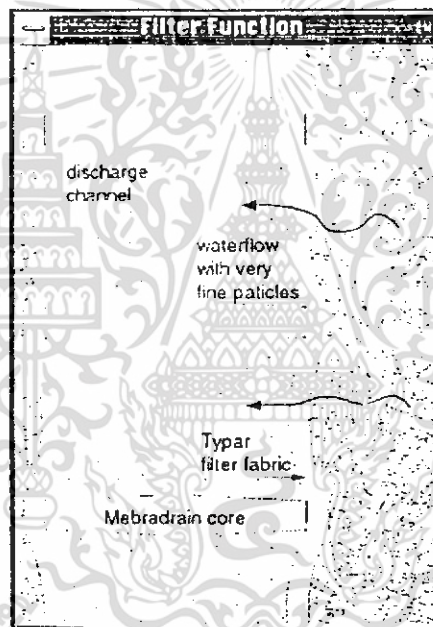
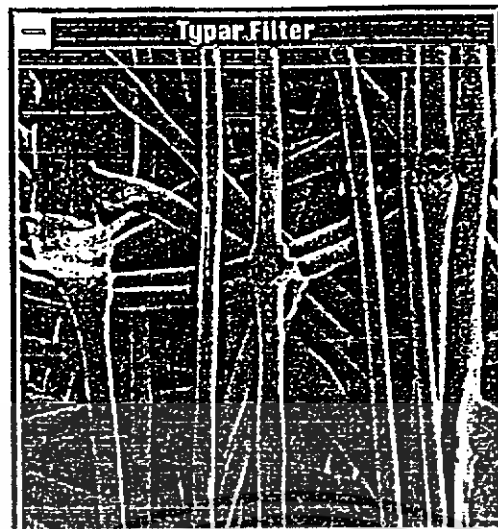
- ก. ต้องแข็งแรงเพียงพอ และไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงทะลุทะลวง ( Punching Resistance ) ที่กระทำต่อผนังของ Jacket จากวัสดุ เช่น กรวดทราย หรือหิน
- ข. สามารถต้านทานต่อแรงดันของดินด้านข้าง จากน้ำหนักกดทับข้างบน ( Surcharge ) ในขณะที่ PVDs ฝังตัวอยู่ในชั้นดิน และจะไม่ทำให้ PVDs เสียรูปร่าง ( Deform ) จนไม่สามารถระบายน้ำในแนวตั้งออกจากชั้นดินได้
- ค. ต้องมีคุณสมบัติยึดหยุ่นตัวได้อย่างสม่ำเสมอในระหว่างการติดตั้ง และในช่วงเกิดการทรุดตัว โดยปราศจากความเสียหาย
- ง. ต้องไม่เกิดการฉีกขาดแตกร้าว หรือลอกตัวออกในขณะที่ทำการติดตั้ง
- จ. ต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรมตามรายละเอียดในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างๆ ของ PVD,

คุณสมบัติของ PVD, Jacket	หน่วย	มาตรฐานการทดสอบ	ค่าที่ยอมรับ
1. Apparent Opening Size:AOS	um KN	ASTM 4751-87 ASTM 4632-91	น้อยกว่า 90
2. Grab Tensile Stength	KN	ASTM 4533-88	มากกว่า 0.35
3. Trapezoidal Tear Strength	KN Kpa	ASTM 4833-88 ASTM 3786-80a	มากกว่า 0.10
4. Puncture Resistngth			มากกว่า 0.20
5. Burst Stregth	M <sup>3</sup> /year	ASTM 4716-87	มากกว่า 900
6. Discharge Capacity days 200 KN/m <sup>2</sup> hydraulic gradientl			มากกว่า 500

หมายเหตุ : เป็นตัวอย่างข้อมูลของคุณสมบัติ PVDs, Jacket ที่ใช้ในโครงการกรุงเทพฯ – ชลบุรี สายใหม่และถนนวงแหวนรอบนอกฝั่งตะวันออกเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพชั้นดินและการใช้งานอื่นๆ



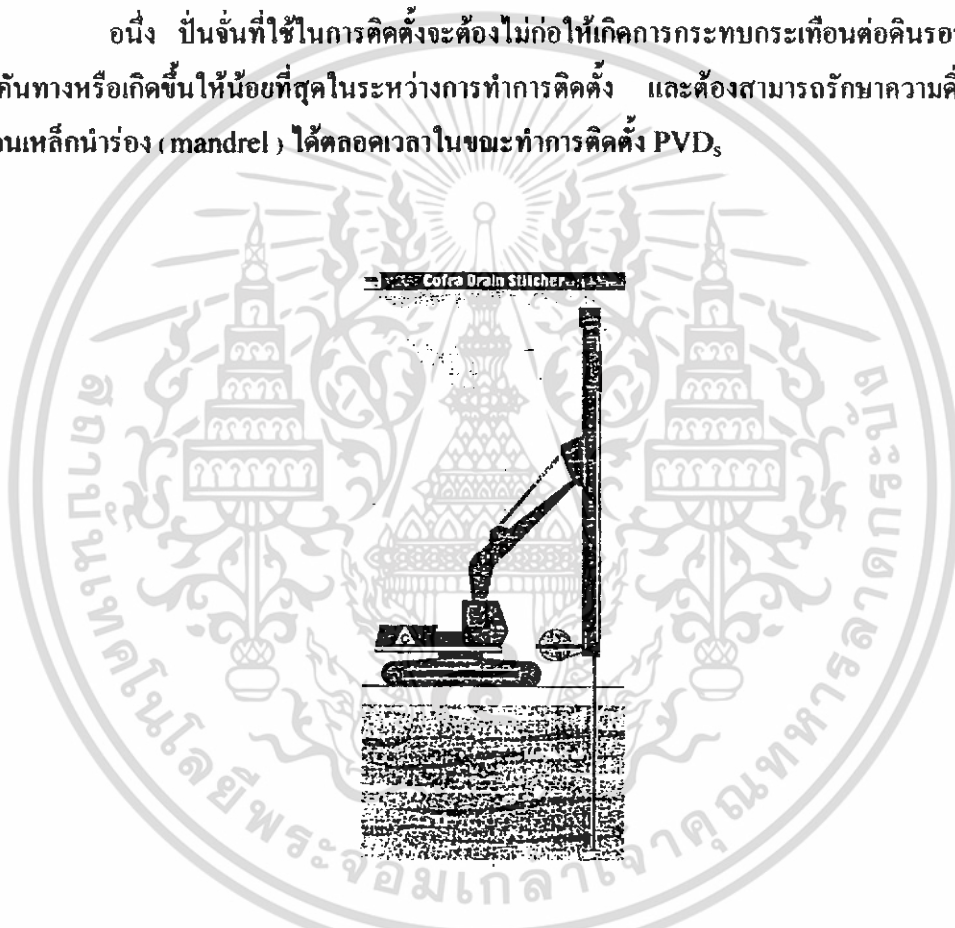


รูปที่ 2.5 Jacket Vertical drains

เครื่องจักรและเครื่องมือและอุปกรณ์ในการติดตั้ง PVD<sub>s</sub> ( PVD<sub>s</sub> Installation Equipment )

1. เครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้ง PVD<sub>s</sub> ประกอบด้วย เครื่องปั้นจั่นที่สามารถเล่นด้วยตัวเองได้ ( Self – movable installation rig ) พร้อมแกนเหล็กนาร่อง ( Steel Mandrel) ที่มีลักษณะแบน แต่กว้างเพียงพอที่ PVD<sub>s</sub> จะใส่เข้าไปด้านในได้ ตามรายละเอียดในภาพที่ 2.6 ซึ่งแกนเหล็กนาร่องนี้ จะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถกดลงไปในพื้นที่ตำแหน่งตามที่ต้องการ และสามารถที่จะป้องกันไม่ให้ PVD<sub>s</sub> ขาดหรือถูกเสียดสีให้เสียหายในระหว่างการติดตั้ง

อนึ่ง ปั้นจั่นที่ใช้ในการติดตั้งจะต้องไม่ก่อให้เกิดการกระทบกระเทือนต่อดินรอบข้างได้ทันทีหรือเกิดขึ้นให้น้อยที่สุดในช่วงการทำการติดตั้ง และต้องสามารถรักษาความตั้งของแกนเหล็กนาร่อง ( mandrel ) ได้ตลอดเวลาในขณะที่ทำการติดตั้ง PVD<sub>s</sub>

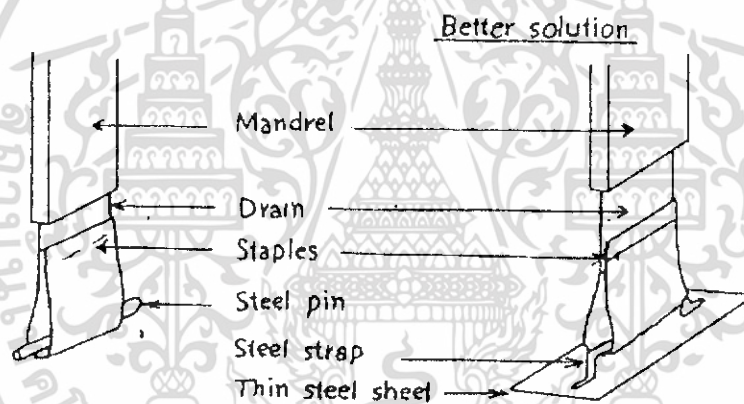


รูปที่ 2.6 Self – Movable Installation Rig

2. ขนาดของแกนเหล็กนำร่อง ( Mandrel/Sleeve )จะต้องมีขนาดเหมาะสมที่จะไม่ทำให้ดินถูกกระทบเทือน หรือเกิดการกระทบเทือนน้อยที่สุด ซึ่งจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดไม่เกิน 70 ตารางเซนติเมตร อีกทั้งแกนเหล็กนำร่องดังกล่าวจะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงของ PVDs ขณะทำการติดตั้งในสนาม

3. แผ่นหรือแกนเหล็กยึดรั้งปลายสุดของแกนนำร่อง ( Anchorage at of mandrel ) ดังแสดงในภาพที่ 2.7

เพื่อป้องกันดินไม่ให้ดินเข้าไปบริเวณปลายของแกนนำร่อง ในระหว่างการติดตั้งแผ่น PVDs และเป็นกรยึดรั้งปลายแผ่น PVDs ให้อยู่ ในระดับความลึกที่ต้องการขณะที่ชักแกนนำร่องออกขนาดของแผ่นยึดรั้ง ( Anchor plate ) จะต้องมีความเท่าหรือใกล้เคียงกับขนาดของแกนนำร่อง ( Mandre ) เพื่อให้ดินถูกกระทบกระเทือนน้อยที่สุด



รูปที่ 2.7 Mandre และการประกอบติดตั้ง Anchor plate

## วิธีการติดตั้ง PVD<sub>s</sub> (Method of PVD<sub>s</sub> Installation) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

### ( 1. ) ขั้นตอนการติดตั้ง ( Sequence of Installation )

ก. ปูแผ่นใยสังเคราะห์ ( Geotextile ) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งชั้นวัสดุหรือ Separator ( ถ้าปรากฏในแบบ ) ในการป้องกันมิให้วัสดุชั้นทางผสมกับดินเดิมเพื่อลดการสูญเสียของวัสดุชั้นทาง

ในกรณีที่วัสดุทางเป็นดินถมเม็ดละเอียด ( Fine – grained material ) อาจจำเป็นต้องใช้แผ่นใยสังเคราะห์เป็น Separator อีกชั้น แต่ถ้าวัสดุทางเป็นวัสดุเม็ดหยาบ ( Coarse – grained material ) ก็ไม่จำเป็นต้องปู Geotextile คือ

ข. ถมชั้นทรายระบายน้ำ ( Drainage Blanket ) หนาประมาณ 30-50 เซนติเมตร ซึ่งวัสดุที่ใช้จะต้องมีสัดส่วนมวลกละ ( Gradation ) ที่จะสามารถระบายน้ำออกได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติควรมี % Finer than sieve # 200 ( by weight ) ไม่เกิน 6% อนึ่งชั้นทรายระบายน้ำออกก็ได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติควรมี % Finer than sieve # 200 ( by weight ) ไม่เกิน 6% อนึ่ง ชั้นทรายระบายน้ำไม่ควรใช้วัสดุหินคลุก เพราะจะเป็นการลำบากต่อการกดแบบ PVD<sub>s</sub> ลงในชั้นดิน โดยใช้แกนนำร่อง ( Mandrel )

### ค. ติดตั้งแถบ PVD<sub>s</sub> ตามขั้นตอน ดังนี้

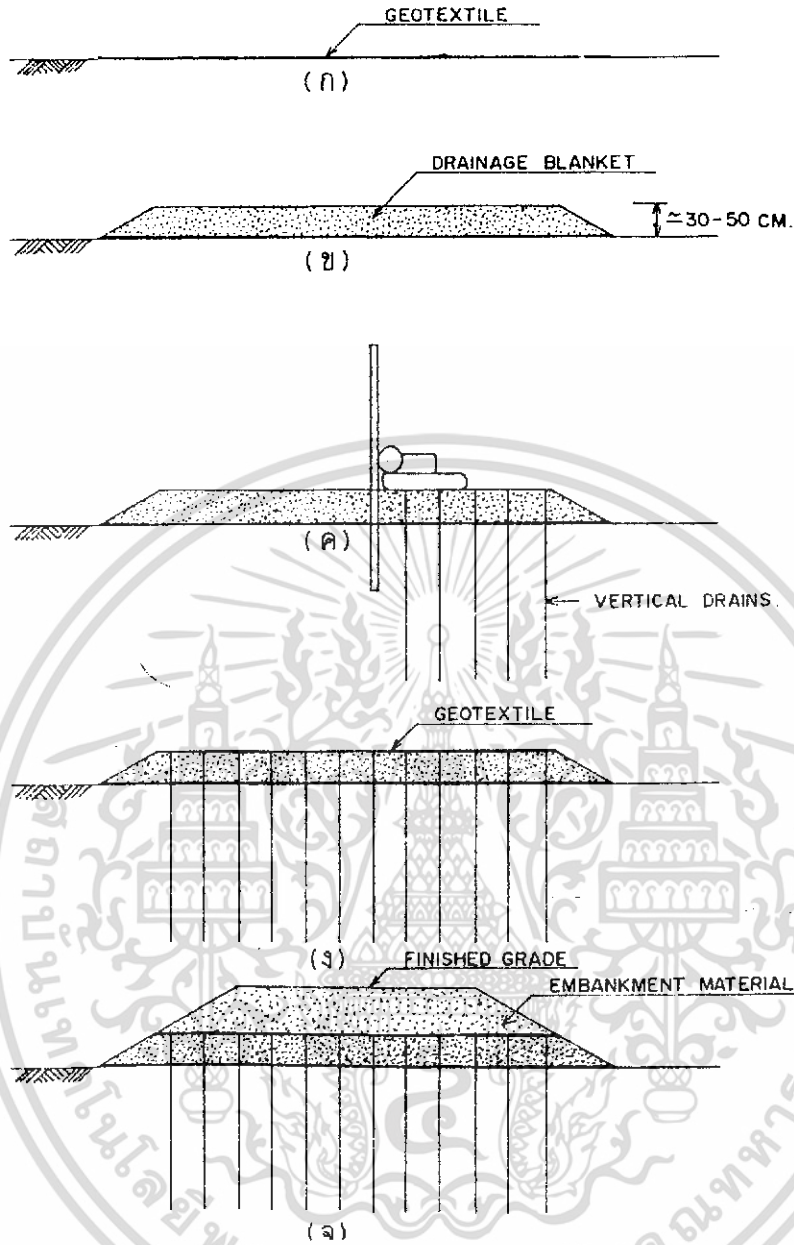
1. ใช้เครื่องปั่นจั่น ( ตามรูปที่ 2.6 ) เคลื่อนเข้าไปในตำแหน่งด้วยหมุดตามรายละเอียดในแบบก่อสร้างแล้ว

2. ทำการประกอบแผ่นยึดรั้ง ( Anchor plate ) บริเวณปลายสุดของแถบ PVD<sub>s</sub> ดังแสดงในรูปที่ 2.7

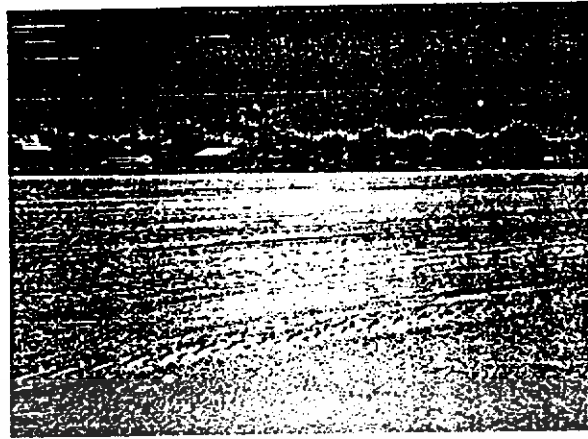
3. กดเหล็กนำร่อง ( Mandrel ) ลงไปในดินด้วยอัตรา 15-60 เซนติเมตรต่อวินาทีลงไปในระดับความลึกที่ต้องการตามแบบ ตามรูปที่ 2.8 ( ก )

4. ถอนเหล็กนำร่องออกแบบ PVD<sub>s</sub> จะฝังตัวอยู่ในดินที่ระดับความลึกที่ระดับความลึกตามต้องการ

5. ทำการตัดแถบ PVD<sub>s</sub> โดยใช้กรรไกรเหนือระดับชั้นทรายระบายน้ำ ตามรูปที่ 2. 8 ( ง )



รูปที่ 2.8 ขั้นตอน และวิธีการติดตั้งระบบ PVDs

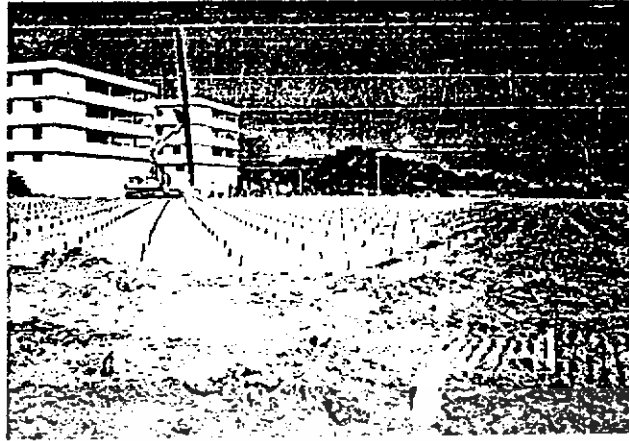


รูปที่ 2.9 Sand Blanket Drainage



รูปที่ 2.10 การใช้ Anchor plate กำหนดจุดที่จะฝัง PVD,

72956



รูปที่ 2.11 การติดตั้งและการตัดปลายของ PVDs



รูปที่ 2.12 ทำความสะอาดหลังจากติดตั้ง Mandel ออกแล้ว

## ข้อควรคำนึงในการติดตั้ง PVDs

- (1.) ในการกำหนดตำแหน่ง และระยะห่างของ PVDs จะต้องทำการวางแผน และนำ Anchoe plate มาปักกำหนดตำแหน่งให้แน่นอน ตามหลักการของงานสำรวจทั่วไปเพื่อป้องกันความผิดพลาดและยังง่ายต่อการตรวจสอบควบคุม โดยตำแหน่งของ PVDs ไม่ควรคลาดเคลื่อนจากที่กำหนดในแบบเกิน 15 เซนติเมตร
- (2.) ก่อนการติดตั้งแถบ PVDs เพื่อให้ระดับความลึกของ PVDs ถูกต้องตามแบบก่อสร้างตรวจสอบระดับดินเดิม. working platform ให้ถูกต้องเสียก่อนในแต่ละตอนของการก่อสร้าง ( section ) แล้วทำการบันทึกความยาวของแถบ PVDs ที่ใช้ก่อนและหลังติดตั้งในแต่ละวัน แล้วตรวจสอบกับจำนวนหลุมที่ฝังแถบ PVDs ที่ทำได้ทั้งหมดในแต่ละวัน ซึ่งไม่ควรจะแตกต่างกันเกิน 5-10 เซนติเมตรในแต่ละตอน ( section ) ที่ติดตั้ง
- (3.) เครื่องปั้นจั่นสำหรับติดตั้งแถบ PVDs จะต้องทำการตรวจสอบความคั่งของทั้งตัวเครื่องและตัวแกนเหล็กนำร่องให้ได้คั่งเสมอดตลอดเวลาที่ทำการกดแถบ PVDs ลงในดิน โดยที่ความคลาดเคลื่อนต้องไม่เกิน 1:50 ( แนวราบ:แนวตั้ง ) ในระหว่างการติดตั้งแถบ PVDs ทุกหลุม
- (4.) การติดตั้งแถบ PVDs ควรจะกำหนดด้วยการกด โดยใช้น้ำหนักกดหรือโดยใช้การสั่นสะเทือนในอัตราความเร็วที่คงที่และราบเรียบสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง ส่วนการใช้วิธีการฉีดน้ำอัด ( Jetting ) อนุญาตให้ใช้ได้ในพื้นที่ที่มีดินแข็งมากอยู่ตอนบน แต่ทั้งนี้ควรได้รับความเห็นชอบจากวิศวกรผู้ควบคุมงานก่อน ไม่ควรใช้วิธีการตอก ( Driving ) เพื่อกดแถบ PVDs ลงในดิน
- (5.) อัตราการกดของแกนเหล็กนำร่อง ในการฝังแถบ PVDs ควรอยู่ในช่วงอัตรา 15-60 เซนติเมตรต่อวินาที เพื่อป้องกันการบิด ( Bending ) และเสียรูปร่าง ( Deform ) ของแถบ PVDs
- (6.) แผ่น PVDs ที่ติดตั้งลงในตำแหน่งและความลึกตามแบบเรียบร้อยแล้ว จะต้องตัดเหนือระดับชั้นทรายระบายน้ำประมาณ 25 เซนติเมตร ในลักษณะปลายเรียบเสมอกัน โดยใช้กรรไกร
- (7.) การต่อปลายแถบ PVDs โดยวิธีการทาบ ( Splice ) จะต้องต่ออย่างประหยัด เพื่อให้ไม่ทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติด้านการระบายน้ำเสียไป โดยปกติควรจะมีระยะทาบ ( Overlap ) อย่างน้อย 15-20 เซนติเมตร และไม่ควรจะมีการต่อปลายแถบเกิน 1 จุดต่อ 1 ม้วนของแถบ PVDs ที่ใช้

## การควบคุมคุณภาพ PVDs

จุดประสงค์ : เพื่อควบคุมคุณภาพของแถบ PVDs ที่จะนำมาใช้งานให้ได้คุณภาพ และมีคุณสมบัติสอดคล้องตามรายละเอียดข้อกำหนดประกอบแบบก่อสร้างทุกประการ โดยมีหลักปฏิบัติโดยทั่วไปเป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้รับจ้างต้องส่งรายละเอียดคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และวิศวกรรมของวัสดุ PVDs จากผู้ผลิตที่จะใช้ติดตั้งในโครงการอย่างน้อย 2-3 สัปดาห์ก่อนการติดตั้ง รวมทั้งประวัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ PVDs ที่ผ่านมาแล้วในอดีต เพื่อให้วิศวกรผู้ควบคุมงานได้ระบอบการพิจารณาอนุมัติโดยวิศวกรผู้ควบคุมงานจะพิจารณาและแจ้งให้ผู้รับจ้างทราบถึงผลการอนุมัติก่อนการติดตั้งอย่างน้อย 7 วันก่อนเริ่มงานติดตั้งในสนาม

2. ผู้รับจ้างต้องกำหนดหรือแจ้งแหล่งที่มาหรือแหล่งผลิตของผลิตภัณฑ์ PVDs ที่จะใช้ในโครงการแก่วิศวกรผู้ควบคุมงานก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะถูกนำเข้ามาใช้ติดตั้งในสนาม

3. ในระหว่างการก่อสร้างวิศวกรผู้ควบคุมงาน จะสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ PVDs ที่จะใช้ในโครงการเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ตามข้อกำหนด โดยจะสุ่มอย่างน้อย 1 ม้วนทุกๆ การนำเข้าสินค้าในแต่ละ lot (each shipment) หรือทุกๆ ความยาว PVDs 150,000 เมตร ต่อ 1 ตัวอย่าง และมีความกว้างเต็มขนาด ( Full width ) ของแถบ PVDs ที่จะใช้

ถ้าตัวอย่างที่สุ่มมาทดสอบไม่ผ่านข้อกำหนดในแบบก่อสร้าง จะทำการสุ่มตัวอย่างใหม่เพิ่มเติมอีก 2 ตัวอย่างจาก 2 ม้วนใหม่ในสินค้า lot นั้น หรือจากความยาวผลิตภัณฑ์ PVDs ทุก 150,000 เมตร ต่อ 1 ตัวอย่างและมีความกว้างเต็มขนาด ( Full width ) ของแถบ PVDs ที่จะใช้

4. ในการควบคุมคุณภาพ PVDs ในสนามก่อนการติดตั้งอาจจะสุ่มตัวอย่างอีกครั้งจากผลิตภัณฑ์ PVDs ที่ได้อนุมัติให้ใช้ตามข้อ 3 แล้ว อย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อผลิตภัณฑ์ 100 ม้วนหรือแถบ PVDs แต่ละ lot ที่นำเข้าไปในไซต์งาน แล้วแต่ปริมาณ ใจะน้อยกว่า โดยใช้วิธีการซึ่ง

5. น้ำหนักของ PVDs ต่อหน่วยความยาว ( หน่วยกรัมต่อเมตร ) ทุกๆ ตัวอย่าง โดยจะต้องมีน้ำหนักต่อหน่วยความยาวแตกต่างกันไม่เกิน 5% จึงจะอนุญาตให้ทำการติดตั้งได้

### 2.2.3 ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อต้องการนำระบบ Prefabricate Vertical Drains มาใช้งาน

ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงเสมอ เมื่อต้องการทำการปรับปรุงคุณภาพของดินฐานราก โดยการใช้ระบบ Prefabricate Vertical Drains ขึ้นอยู่ปัจจัยพื้นฐานโดยทั่วไป ดังต่อไปนี้

- ขนาดของการทรุดตัวที่ต้องการ
- ระยะเวลาในการยุบอัดตัวของดิน
- ระยะทางการไหลระบายของน้ำ ( Drain length )
- ขนาดความสูงของงานดินถม
- วิธีการและขั้นตอนการติดตั้ง

อนึ่ง เพื่อให้มั่นใจว่าระบบ PVD<sub>s</sub> จะยังคงมีประสิทธิภาพ สามารถทำการระบายน้ำออกจากมวลดินได้ตลอดระยะเวลาที่ต้องการใช้งาน โดยเฉพาะในระยะเวลา Waiting Period ที่กำลังบรรทุกน้ำหนักเพื่อเร่งอัตราการทรุดตัว โดยไม่เกิดการเสียหายได้นั้นจะต้องพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

ความแข็งแรงและคุณภาพของเส้นท่อ Prefabricate Vertical Drains ในระหว่างทำการติดตั้งระบบ PVD<sub>s</sub> ซึ่งจะต้องใช้แรงดึงเส้นท่อ PVD<sub>s</sub> ด้วยแรงดึงสูงจะต้องระมัดระวังมิให้เส้นท่อ PVD<sub>s</sub> เกิดความเครียดมากเกินไปจนทำให้ยืดยาวหรือขาดได้ อีกทั้งโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อทำการเปลี่ยนม้วนของ PVD<sub>s</sub> จะต้องทำการต่อให้ถูกต้องตามวิธีการเสมอ หรือแม้กระทั่งขณะทำการขนส่งม้วน PVD<sub>s</sub> จะต้องระมัดระวังมิให้เกิดการฉีกขาด และแกนของ PVD<sub>s</sub> จะต้องอยู่ในสภาพดี การขนส่งไม่ควรวางทับถมกันเป็นจำนวนมากเพราะทำให้แกนท่อ PVD<sub>s</sub> ( Core ) เกิดการแตกหักได้

ดังนั้น คุณสมบัติเชิงกลที่ต้องคำนึงถึงอยู่เสมอ คือ

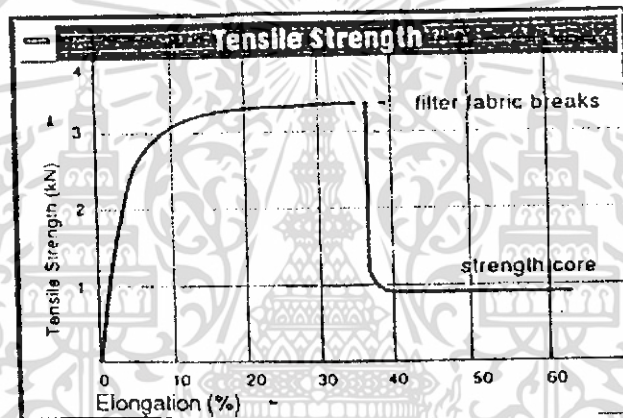
- Elongation Filter 2%
- Strength Filter 0.5 kN
- Elongation at 0.5 kN 2%

สำหรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของม้วน PVD<sub>s</sub> ขณะทำการติดตั้ง และติดตั้งกับเครื่องเจาะฝัง ( Rig ) ไม่ควรมากกว่า 150 มม.

## ความแข็งแรงของ Jacket หรือผนังเส้นท่อ

ในระหว่างช่วงของการขุดตัวของดินฐานรากที่มี PVD<sub>s</sub> ฝังอยู่จะทำให้เส้นท่อ PVD<sub>s</sub> โดยเฉพาะผนังเส้นท่อถูกกดอัดด้วยแรงกระทำของดิน ฉะนั้นผนังเส้นท่อ ( Jacket ) จะต้องไม่เกิดความเสียหาย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวอีกทั้งจะต้องคงรูปร่างเอาไว้ได้เสมอภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งจากการทดลอง พบว่าผนังเส้นท่อจะต้องไม่เกิดการฉีกขาดเสียหายเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเป็ยกขึ้นผนังเส้นท่อที่ติดตั้งคงรูปร่างเอาไว้ได้เสมอภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าผนังเส้นท่อจะต้องไม่เกิดการฉีกขาดเสียหาย เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกดอัด 300 kN/m<sup>2</sup>

ฉะนั้น เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของผนังเส้นท่อ ในขณะที่ทำการติดตั้งผนังเส้นท่อ จึงต้องมีความทนทานต่อแรงฉีกขาด ( Tear Strength ), Tf มากกว่า 200 N ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.13 ค่าความแข็งแรงของแกน และผนังเส้นท่อ PVD<sub>s</sub>

## ความสามารถในการไหลผ่านของ PVD<sub>s</sub>

โดยปกติในการออกแบบคำนวณ ระบบ Vertical Drains มักจะกำหนดให้ค่าด้านทานการไหลของน้ำในระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ปริมาณการไหลในเส้นท่อ PVD<sub>s</sub> จึงไม่ขึ้นอยู่กับความเสียหายภายในเส้นท่อ แต่จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลต่างๆ หลายอย่าง ด้วยกันเช่น ความยาวในการไหลผ่านสภาพของแกนท่อ PVD<sub>s</sub> ที่กดอัดบิดเบี้ยวเสียรูปทรง เนื่องจากแรงกดอัดทางด้านข้างน้ำหนักจาก Surcharge load และความสามารถในการระบายน้ำของ PVD<sub>s</sub> เป็นต้น

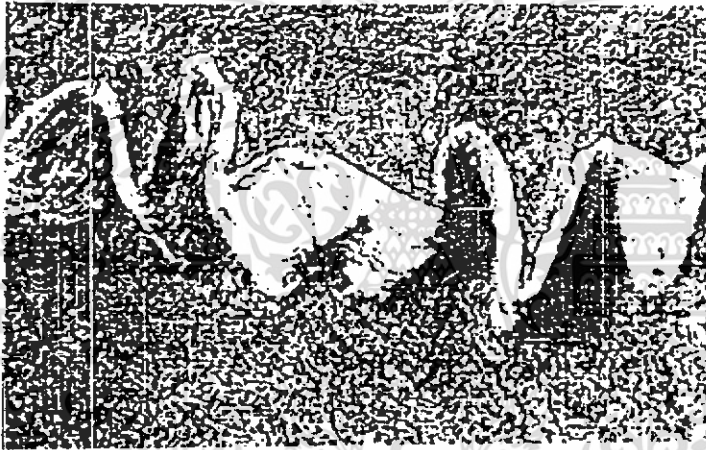
สำหรับค่าต่างๆ ที่ต้องคำนึงเกี่ยวกับการไหลผ่านของน้ำที่สำคัญ คือ

1. กรณีระยะทางการไหลน้อยกว่า 10.00 เมตร และไม่มีปัญหาทางเสถียรภาพของดิน

$$q_w(\text{Straight}) > 10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sce} = 3/5 \text{ m}^3/\text{year}$$
$$q_w(\text{buckled}) > 7.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sce} = 236 \text{ m}^3/\text{year}$$

2. กรณีระยะทางการไหลมากกว่า 10.00 เมตร และไม่มีปัญหาทางด้านเสถียรภาพของดิน

$$q_w(\text{Straight}) > 50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sce} = 1575 \text{ m}^3/\text{year}$$
$$q_w(\text{buckled}) > 32.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sce} = 1183 \text{ m}^3/\text{year}$$



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเสถียรรูปของเส้นท่อ PVDs

## ความซึมผ่านได้ของน้ำสำหรับ Jacket

ผนังเส้นท่อที่มีคุณภาพดี จะต้องมีความสามารถทำให้น้ำที่อยู่ภายใต้ความดันโพรง ( Pore Water Pressure ) ลอดผ่านไหลออกได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และสามารถรองรับอนุภาคของดินโคลนไม่ให้ลอดผ่านเข้าไปได้ โดยสังเกตได้จาก น้ำที่ไหลออกมาต้องมีความใสสะอาดอีกทั้งจะต้องไม่เกิดการอุดตันในช่องผนังเส้นท่อด้วย

ค่าความซึมผ่านได้ของน้ำสำหรับผนังเส้นท่อตามมาตรฐานที่กำหนดจะต้องมีค่า  $(K) \geq 5 \times 10^{-3} / \text{sce}$

### ขนาดของโพรงผนังเส้นท่อ ( Pore Size )

โพรงหรือช่องว่างของผนังเส้นท่อจะต้องมีขนาดเล็กพอที่จะป้องกันมิให้อนุภาคของดินโคลนลอดผ่านเข้าไปได้ ซึ่งหากว่าอนุภาคของดิน โคลนหรือดินเหนียวลอดผ่านไปได้ จะต้องให้เส้นท่อ PVD<sub>s</sub> เกิดการอุดตันไม่สามารถระบายน้ำออกได้

ฉะนั้น คุณสมบัติตามมาตรฐานที่ต้องการของ Pore Size ควรจะต้องเป็นไปตามค่าต่างๆ ดังนี้ คือ

$$O_{90} < 2 \times D_{90} \quad (5.1)$$

โดยที่

$O_{90}$  = ขนาดที่ต้องการและเชื่อถือได้ 90%

$D_{90}$  = ขนาดของอนุภาคเม็ดดินที่เล็กกว่า 90%

สำหรับค่ามาตรฐานหรือข้อกำหนดสูงสุดสำหรับดินที่ไม่มีสภาพเป็นกรดกัดกร่อน

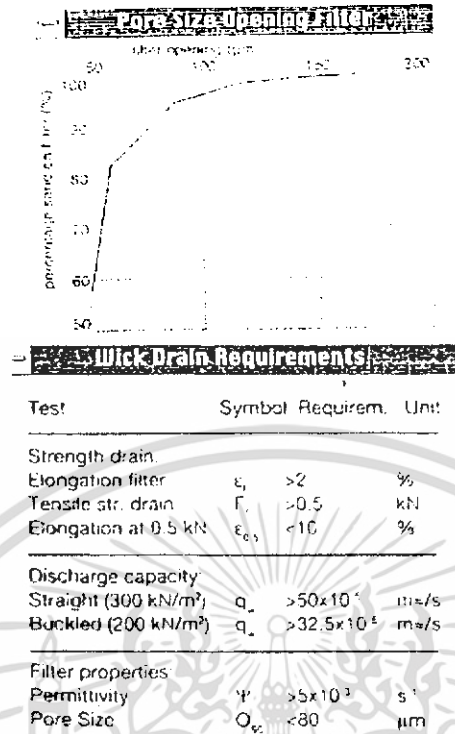
$$O_{90} < 160 \text{ um}$$

สำหรับดินเหนียว และดิน โคลน ที่มีสภาพเป็นกรดและสามารถกัดกร่อนได้

$$O_{90} < 160 \text{ um}$$

โดยสามารถสรุปและแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเส้นท่อ PVDs



ที่นา N.G Cortlever, The Mebradrain System

ความทนทานต่อสารเคมี

Vertical Drains ที่ประกอบด้วยแกนท่อ ( Core ) และผนังเส้นท่อ ( Jacket ) ซึ่งส่วนประกอบทั้งสองนี้สามารถต้านทานต่อสารเคมี เช่น สภาวะเป็นกรด และด่างได้เป็นอย่างดี เนื่องจากผลิตมาจากวัสดุ Polypropylene ( PP ) ซึ่งวัสดุ Polymer นี้จะมีความต้านทานต่อสารเคมีได้อย่างดีเยี่ยมดังแสดงในตารางที่ 5.3

นอกจากนี้แล้วการประยุกต์และนำระบบ PVDs มาใช้งาน นับได้ว่าไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใดๆ อีกด้วย

## ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติด้านทนทานต่อสารเคมีของ PVDs

### Chemical Resistance

Agent	Effect
<u>Acids</u>	
Acetic	none
Chromic	none
Hydrobromic	none
Hydrochloric	none
Sulfuric	none
Phosphoric	none
<u>Alkalis</u>	
Ammonia	none
Sodium hydroxide	none
Sodium hypochlorite	none
<u>Organic chemicals</u>	
Acetone	none
Benzene	moderate
Cyclohexanone	none
Ethanol	none
Ethylene Glycol	none
Dimethyl	none
Gasoline	considerable
Methylene chloride	considerable
Trichlorethene	considerable

ที่มา N.G. Cortlever, The Mebradrain System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## การปรับปรุงคุณภาพดิน

### 3.1 คำว่านำ

ดินเป็นวัสดุที่มีมากมาย แตกต่างทั้งคุณสมบัติรูปลักษณะมากมายหลายหลากกันไป ตามสภาพพื้นที่และต้นกำเนิด ดินแต่ละชนิดมีประโยชน์ที่จะนำไปใช้แตกต่างกัน ดินบางพื้นที่มีความสามารถในการรับกำลังสูงเหมาะสมแก่การก่อสร้างแต่อีกหลายๆแห่งกลับไม่มี แต่ด้วยปัจจัยความจำเป็นทางด้านต่าง แม้ดินจะไม่มีความสามารถในการรับกำลังสิ่งปลูกสร้างแต่ ก็จำเป็นต้องมีการปลูกสร้างบริเวณนั้นๆ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของดิน ซึ่งวิธีปรับปรุงคุณภาพดินก่อนได้มีการริเริ่มมานานแล้ว และมีการพัฒนาต่อกันมามากมาย

PVD ก็เป็นหนึ่งในวัสดุเหล่านั้นและวัสดุปรับปรุงคุณภาพดินยังมีอีกมากมาย นับตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันและมีการพัฒนาต่อมาเรื่อยๆจนถึงเลือกเอาวัสดุมาเปรียบเทียบในด้านปรับปรุงคุณภาพดิน 3 ชนิดคือ Vacuum PVD, PVD with Preload และ cement column

### 3.2 การปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก

Hausmann (1990) แนะนำวิธีการแก้ไขปัญหของ โครงการก่อสร้างที่มีดินฐานรากเป็นดินอ่อน มีคุณสมบัติรับน้ำหนักได้น้อย เกิดการทรุดตัวได้มาก และไม่มี ความมั่นคง ดังนี้

1. ทำการขุด ขนย้าย วัสดุดินเดิมที่มีคุณภาพไม่เหมาะสมออกไป แล้วนำวัสดุที่เหมาะสมมาถมแทนที่ สามารถกระทำได้ดีถ้าปริมาณของวัสดุไม่มากนัก ระยะทางขนและแหล่งวัสดุที่จะนำมาแทนที่หาได้ง่ายและอยู่ไม่ไกล แต่ถ้ามีปริมาณมากๆ อาจจะไม่เหมาะสม เพราะค่าใช้จ่ายจะสูงมาก เช่น โครงการก่อสร้างถนนยาวหลายสิบกิโลเมตรบนชั้นดินฐานรากอ่อน ที่มีชั้นดินอ่อนลึกมาก ( 10-20 เมตร )

2. ออกแบบอาคาร สิ่งก่อสร้างให้สอดคล้องกับสภาพดินฐานราก โดยคำนึงถึงงบประมาณระยะเวลา ประสิทธิภาพการทำงาน เช่น การออกแบบอาคารสูงโดยใช้รากเสาเข็มยาวช่วยน้ำหนักบรรทุกลงสู่ชั้นดินแข็งที่อยู่ลึกลงไป

3. ปรับปรุงคุณสมบัติของดินฐานรากเดิม ให้สอดคล้องกับสิ่งก่อสร้าง วิธีนี้อาจเรียกว่า Soil Treatment, Soil Improvement หรือ Soil Stabilization

การปรับปรุงคุณสมบัติของดินฐานรากจะขึ้นกับ ลักษณะ ชนิดของสิ่งก่อสร้าง ว่าต้องการคุณสมบัติอะไรบ้าง ที่ดินเดิมมีไม่เพียงพอ และวิธีการปรับปรุงก็มีหลายวิธีการด้วยเช่นกัน จำเป็นต้องพิจารณาศึกษา เปรียบเทียบให้เหมาะสมตรงกับความต้องการ

คุณสมบัติของดินฐานรากเดิมที่มักจะต้องทำการปรับปรุง ได้แก่

1. Volume Stability ซึ่งดินบางแห่งมีลักษณะที่จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้มาก ในเวลารวดเร็ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน โดยอาจจะเกิดการขยายตัวหรือหดตัวมากซึ่งจะมีผลต่อโครงสร้างหรืออาคารที่มีน้ำหนักเบาเกิดการเคลื่อนตัวเสียหายได้
2. Strength ของดินให้มีค่าสูงขึ้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดียิ่งขึ้น
3. Permeability ขึ้นอยู่วัตถุประสงค์ในการทำงาน เช่น งานแกนเขื่อนดิน จะปรับปรุงเขื่อนดิน จะปรับปรุงให้มีค่าต่ำลง
4. Stress-Strain Modulus ให้มีค่าสูงขึ้น เพื่อความมั่นคงของดินฐานราก
5. Compressibility ให้มีค่าลดลงอยู่ในเกณฑ์ที่จะยอมรับได้
6. Durability จากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีจากสภาวะแวดล้อม
7. Liquefaction การสูญเสียกำลังเนื่องจากแผ่นดินไหว หรือมี Excess Pore Pressure มากเกินไป
8. Uniformity โดยลดความเปลี่ยนแปลง ความไม่เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเดียวกันของวัสดุที่มาจากแหล่งเดียวกัน

Hausmann (1990) แบ่งวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินฐานราก ออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

1. Mechanical Modification เป็นการทำให้ดินแน่นขึ้นโดยใช้แรงกระทำ เช่น การใช้เครื่องจักรบดอัดดิน ซึ่งเป็นการลด Air Void ในมวลดินลงโดยที่ปริมาตรของเนื้อดินและ Water Content ยังคงเดิม เป็นต้น มักจะมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่ม Shear Strength, ลด Permeability, ลดสภาวะ Liquefaction, ควบคุม Volume Stability และ เพิ่ม Durability ของดินฐานราก

2. Physical and Chemical Modification เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของชั้นดินฐานราก เช่น โดยการผสมสาร Admixtures ประเภทปูนซีเมนต์ ปูนขาวรวมทั้งวัสดุอื่นการให้ความร้อนหรือทำให้ดินเป็นจืดจนน้ำในมวลดินแข็งตัว ซึ่งใช้กับการขุดรูโม่ลงในชั้นดินเหนียวอ่อนที่อึดตัวด้วยน้ำกรouting ซึ่งเป็นการ

3. อัดฉีดวัสดุที่อยู่ในสถานะของเหลวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน รอยแตกของหิน โดยความดันสูง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความแน่น และลด Permeability ของดินหรือหิน

4. Inclusions and Confinement Modification ได้แก่การทำ Soil Reinforcement โดยใช้วัสดุสังเคราะห์ Geosynthetics ต่างๆ การใช้สมอยึด สำหรับงาน Slope Stability ซึ่งหลักการก็เป็นการเพิ่ม Internal Friction การช่วยเสริมตัวรับแรง Tensile Stresses ช่วยเพิ่ม Stability . เพิ่ม Bearing Capacity. ลด Settlement และการเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน

5. Hydraulic Modification เป็นการไล่น้ำออกจากมวลดิน หรือการ Redirecting Seepage สำหรับมวลดินชนิดเม็ดหยาบ อาจทำได้ง่ายๆ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกให้ระบายน้ำในมวลดินลงสู่ที่ต่ำกว่า แต่สำหรับดินชนิดเม็ดละเอียดการไหลของน้ำออกจากมวลดินโดยแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นไปได้ยาก มักจะใช้แรงกระทำหรือน้ำหนักบรรทุกเป็นแบบ Forced Consolidation ได้แก่วิธี Preloading, Electro osmosis มักจะมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้บริเวณก่อสร้างแห้ง, เพิ่มเสถียรภาพของลาดทาง, ลดแรงดันทางด้านข้างของดินต่อกำแพงกันดิน, ลด Compressibility ของ Granular Soils, เพิ่ม Bearing Capacity, ป้องกันสถานะ Liquefaction, ป้องกันการพัดพามีดินโดยน้ำใต้ดินหรือ Piping, ป้องกันการกัดเซาะดินผิวหน้า, ลดอันตรายจาก Frost Heave

### 3.2.1 Geosynthetics

วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมกับดิน หรือแทนดินบางส่วน มักจะทำจากอุตสาหกรรมพลาสติก โดยเฉพาะพวก Polymers และอาจจะทำจาก ยาง, Fiberglass หรืออื่นๆ ก็ได้ ( Koerner, 1990 ) เรียกว่า Geosynthetics มักจะนำมาใช้เนื่องจากวัตถุประสงค์หลัก 5 ประการคือ

1. Separation แยกชั้นวัสดุออกจากกัน
2. Reinforcement เสริมกำลังรับแรงของดินให้แข็งแรงยิ่งขึ้น
3. Filtration ช่วยกรองวัสดุ
4. Drainage ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายน้ำ

## 5. Moisture Barrier ปิดกั้นความชื้น

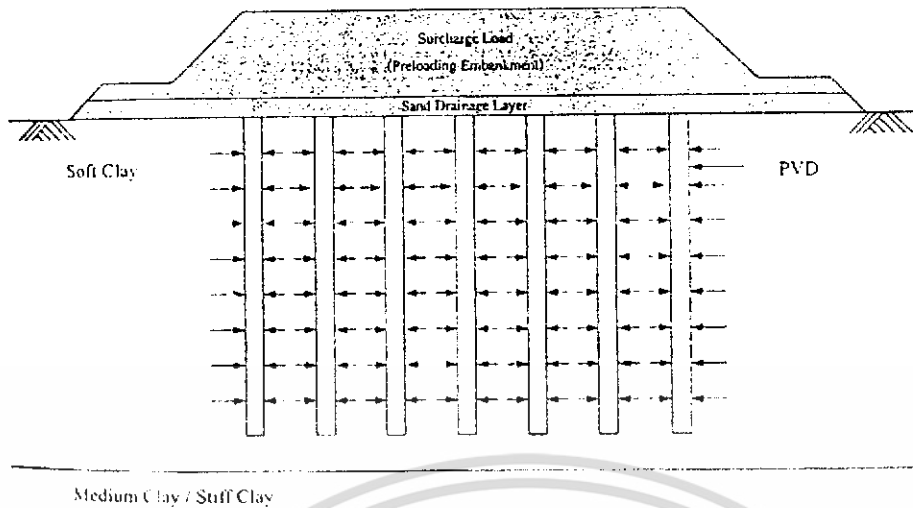
Koerner (1990) ได้แบ่งกลุ่มประเภทของ Geosynthetics ดังนี้

1. Geotextiles มีคุณสมบัติให้น้ำซึมผ่านได้ มีความเหนียว ชีดหยุ่นได้
2. Geogrids มักจะนำคุณสมบัติทางด้าน Reinforcement มาใช้มาก
3. Geonets ใช้เกี่ยวกับการระบายน้ำ
4. Geomembranes เป็นแผ่นบางๆ ให้น้ำซึมผ่านไม่ได้ ป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้
5. Geocomposites เป็นการนำ Geosynthetics ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาใช้ร่วมกัน เช่น Geocells ประกอบด้วย Geogrids ทำเป็นกล่องบรรจุด้วยหินย่อย ช่วยเพิ่ม Bearing Capacity ของดินฐานราก
6. Geo-Others ใช้ในกรณีที่ต้องการประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงขึ้นไปอีก เช่น ใช้ในการ Threaded Soil Masses, Polymeric Anchors และ Encapsulated Soil Cells

### 3.2.2 Preloading With Prefabricated Vertical Drained (PVD, )

#### 3.2.2.1 ทฤษฎีและหลักการออกแบบ

เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีค่าการซึมผ่าน ( Permeability ) ที่ต่ำและการอัดตัวคายน้ำช่วงแรก ( Primary Consolidation Stage ) ใช้เวลานาน ดังนั้นการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ Preloading จะกระทำร่วมกับ PVD, โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อลดปริมาณการทรุดตัว เนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ( Primary Consolidation Settlement ) โดยการทำให้ Preloading และเร่งการระบายน้ำของดินเหนียวในขณะที่ทำ Preloading ด้วย PVD น้ำที่ถูกบีบออกในช่วง Primary Consolidation Stage เนื่องจากการ Preloading จะไหลทางแนวราบไปยังช่องทางการระบาย ( Drain well ) ในกรณีนี้คือ PVD หลังจากนั้น น้ำจะไหลทางแนวตั้งตาม PVD ไปยังชั้นทรายระบายน้ำ ( Sand Drainage Layer ) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูป 3.1 วิธีการปรับปรุงดินเหนียวอ่อนโดย Preloading with PVD

Barron ( 1948 ) ได้แสดงการวิเคราะห์กระบวนการอัดตัวคายน้ำ ( Primary Consolidation ) ของการระบายในแนวนอน ( Radial Flow ) โดยเริ่มจากสมการการไหลของน้ำในขณะเกิดการอัดตัวคายน้ำแบบ Radial Flow ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right] \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- $u$  = Average Excess Pore Pressure ที่ จุดใดๆ และที่เวลาใดๆ
  - $r$  = ระยะทางตามแนวรัศมีของจุดที่พิจารณาจากศูนย์กลางของ Drained Soil Cylinder
  - $t$  = เวลาหลังจากการเพิ่มขึ้นของ Vertical Stress
  - $c_h$  = Horizontal Coefficient of Consolidation

เมื่อ Integrate สมการ 2.1 แล้วปรับปรุงแบบให้เป็นตัวแปรไร้มิติได้ดังสมการที่ 2.2 ( สมการที่ 2.2 ไม่กิดผลอันเนื่องมาจาก Smear และ Well Resistance )

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $T_h =$  Time Factor ตาม Radial Flow

$$= \frac{c_h t}{D_c} \quad (2.3)$$

$F(n) =$  Spacing Effect

$$= \left[ \frac{n^2}{1-n} \right] \left[ \ln(n) - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} \right] \quad (2.4)$$

- $D_c =$  เส้นผ่าศูนย์กลางของ Equivalent Soil Cylinder
- $D_w =$  Equivalent Diameter of the Drain
- $n =$  Spacing Ratio ( $n=D_c/d_w$ )
- $D_c =$  1.13 S สำหรับ square Pattern
- $D_c =$  1.05 S สำหรับ Triangular Pattern
- S = ระยะห่างระหว่างหลุม

เนื่องจาก PVD มีข้อจำกัดการไหล ( Drain Resistance ) และในขณะที่ติดตั้ง PVD ดินรอบ PVD ถูกรบกวน ( Soil Disturbance ) ส่งผลทำให้ค่า Permeability ของดินบริเวณรอบ PVD ( Smear Zone ) ลดลง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.2 จากสาเหตุดังกล่าว Hansbo (1979) ได้ปรับปรุงสมการที่ 2.2 ของ Barron (1948) โดยคำนึงถึง Smear Effect และ Well Resistance Effect ดังนี้

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F}\right) \quad (2.5)$$

โดยที่

$$F = F(n) + F_s + F_r \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} F(n) &= \text{Spacing Effect} \\ &= \ln\left(\frac{D_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4} \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} F_s &= \text{Smear Effect} \\ &= \left[ \left(\frac{k_h}{k_s}\right) - 1 \right] \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$k_h$  = Coefficient of Permeability in the Horizontal Direction in Undisturbed Zone

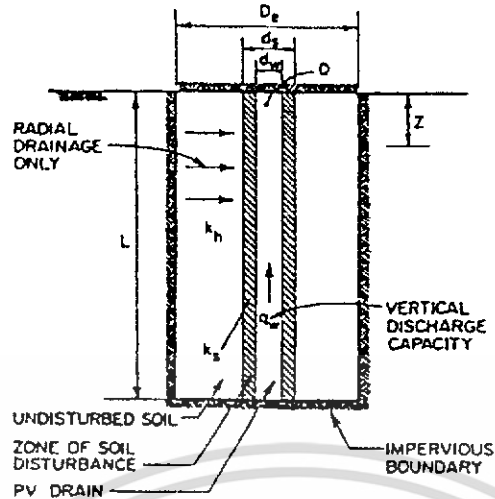
$k_s$  = Coefficient of Permeability in the Horizontal Direction in Smear Zone

$d_s$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของ Disturbed Zone รอบ Drain

$$\begin{aligned} F_r &= \text{Well Resistance} \\ &= \frac{\pi z(L-z) k_h}{q_w} \end{aligned} \quad (2.9)$$

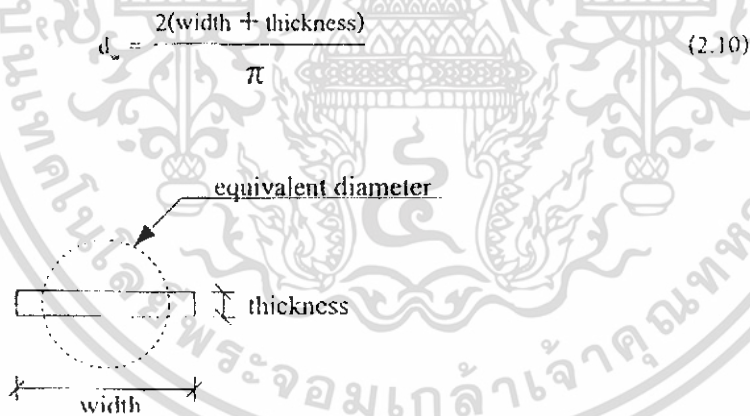
$q_w$  = Discharge Capacity of the Drain at Hydraulic Gradient of 1

$L$  = Length of the Drain



รูป 3.2 Drain Resistance และ Soil Disturbance (Rixner et., 1986 )

จากทฤษฎีการ Consolidation with Rarial Drainage เพื่อ ให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงสมมติว่าลักษณะการ Drain เป็นแบบหน้าตัดวงกลม Hansbo (1979) ได้เสนอการแปลงหน้าตัดของ PVD ดังสมการที่ 2.10 และรูปที่ 3.3



รูป3.3 การแปลงพื้นที่หน้าตัด PVD เป็นหน้าตัดวงกลม (Rixner et al., 1986 )

สำหรับการวิเคราะห์การไหลในแนวตั้งสามารถใช้สมการการไหลในแนวตั้งเสนอโดย Terzaghi (1923) ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.11)$$

ผลลัพธ์จากการ Intergrate สมการที่ 2.11 จะได้สมการที่ 2.12

$$U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} \exp\left[-(2N+1)^2 \pi^2 \frac{c_v t}{4H_f}\right] \quad (2.12)$$

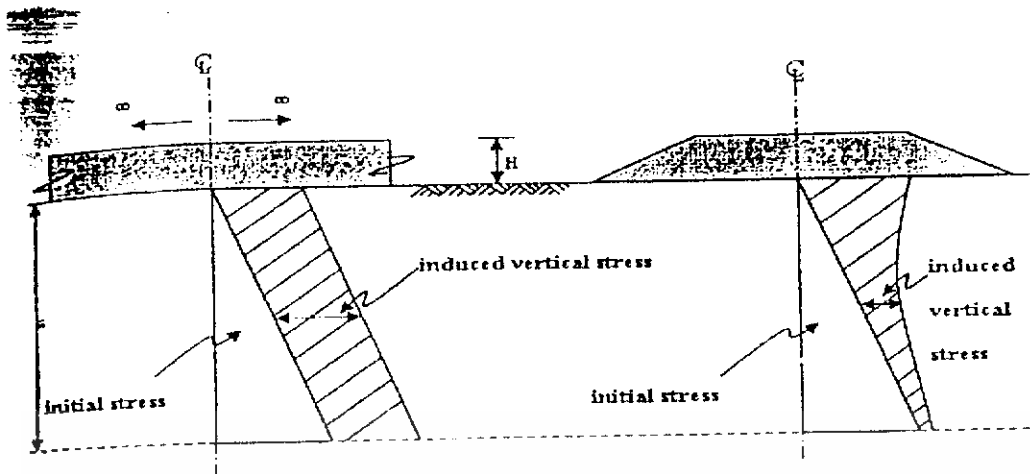
เมื่อ  $U_v$  = ค่าเฉลี่ย Degree of Consolidation ของ Vertical Flow  
 $H_f$  = ความยาวมากสุดของเส้นทางการไหล

เมื่อรวมผลลัพธ์ของการระบายน้ำทั้งแนวตั้งและแนวนอนเข้าด้วยกันจะสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ Degree of Consolidation ของดินที่ถูกปรับปรุง ( $U_{hv}$ ) ได้ดัง สมการที่ 2.13 (Carrillo, 1942 )

$$U_{hv} = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (2.13)$$

### 3.2.2.2 หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดินขณะ Preloading

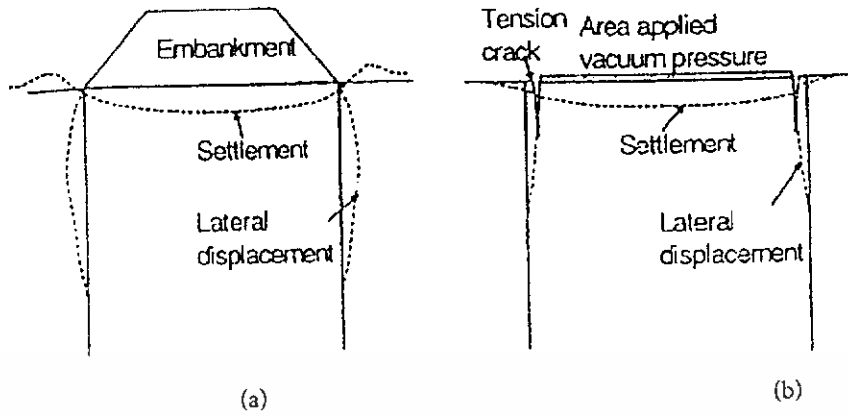
การกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างคันดินเพื่อการ Preloading ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในชั้นดินซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎี Elasticity ( Timoshenko and Gaozier, 1934 Poulos and Davis, 1974 ) สำหรับการสร้างคันดินเป็นบริเวณพื้นที่กว้าง เช่น งานสนามบิน ซึ่งลักษณะแรงกระทำเป็นลักษณะ Uniform ทั่วทั้งพื้นที่นั้น ดังนั้น การกระจายของหน่วยงานในแนวตั้งที่เกิดจากน้ำหนักของดินถม มีขนาดเท่ากันตลอดความลึก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 a แต่สำหรับงานถมคันดินในพื้นที่จำกัด เช่น งานถนน ซึ่งมีลักษณะแรงกระทำแบบ Trapezoidal การกระจายของหน่วยงานในมวลดินจึงมีผลทำให้ปริมาณการทรุดตัวของงานถมดินในพื้นที่กว้าง และงานถมดินในพื้นที่จำกัดมีขนาดแตกต่างกัน โดยสำหรับกรณีที่มีความสูงของคันดินที่เท่ากัน การถมพื้นที่กว้างจะมีปริมาณการทรุดตัวที่มากกว่างานถมดินในพื้นที่จำกัด



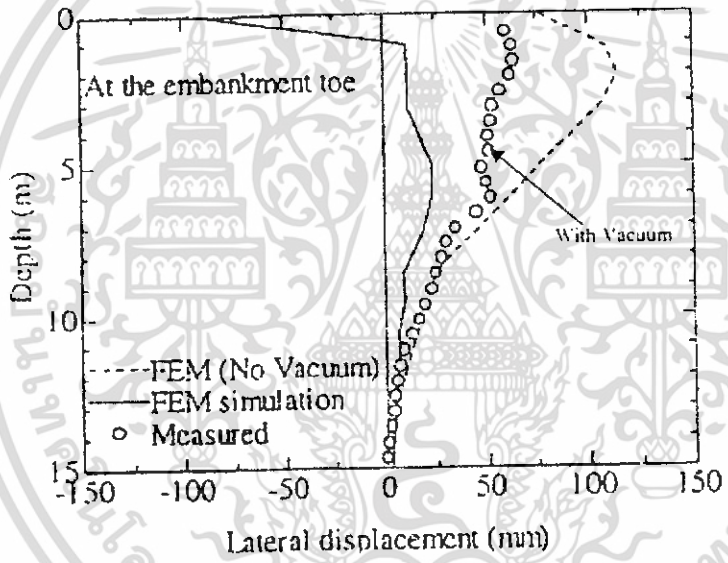
รูป 3.4 การกระจายของความเค้นสำหรับงานถมดิน a) พื้นที่กว้าง b) งานถมคันดิน

### 3.2.2.3 การเคลื่อนตัวด้านข้างของมวลดิน (Lateral Displacement)

ขณะการทำ Preloading Chai et al. (2005) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการทรุดตัวและเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นระหว่างการทำ Preloading ด้วยวิธีสร้างคันดินกดทับ และวิธี Vacuum Pressure จะทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินพร้อมกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในลักษณะเคลื่อนตัวออก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 a แต่วิธีการเพิ่มหน่วยแรงโดย Vacuum Pressure จะทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินพร้อมกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในลักษณะเคลื่อนตัวเข้า ดังแสดงในรูปที่ 3.5 b ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดินโดยการให้น้ำหนักกดทับร่วมกับ Vacuum Pressure รูปที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบในสนามและการทำนายด้วยไนท์อิลิเมนต์ของการปรับปรุงคุณภาพดินโดย Surcharge Load ร่วมกับ Vacuum Pressure พบว่าการใช้ Vacuum Pressure จะช่วยลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน



รูป 3.5 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน a) Surcharge load b) Vacuum pressure ( Chai et al., 2005 )



รูป 3.6 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน ( Chai et al., 2005 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 Soil-Cement Column

Soil-Cement Column เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินระดับลึก โดยการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับดินโดยวิธีทางกลหรือการใช้แรงดัน เนื่องจาก Soil-Cement Column มีความสามารถรับแรงแบกทานได้ดีและมีสมบัติการยุบตัว ดังนั้น วิศวกรได้นำเทคนิคมาใช้ปรับปรุงดินเหนียวอ่อน เพื่อแก้ปัญหาการทรุดตัว เช่น การทรุดตัวเกินพิกัดของถนน การเพิ่มเสถียรภาพเชิงลาดของคันดินและการเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานของดินฐานราก

ขบวนการและเทคนิคการก่อสร้าง Soil-Cement Column สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ Press Grout Mixing Method และ Mechanically Mixing Method ( Department of Highways Ministry of Transport and Communications & Japan International Cooperation Agency, 1998) Pressure Grout Mixing Method ใช้การฉีดปูนซีเมนต์ออกจากท่อด้วยแรงดันสูง โดยอาจมีการฉีดอากาศหรือน้ำไปพร้อมกัน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมดินกับซีเมนต์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน Mechanically Mixing Method ใช้ใบมีดควนดินเพื่อช่วยในการผสมดินปูนซีเมนต์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน

Broms and Boman (1975) กล่าวว่า การใช้ Soil-Cement Column ช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนมักจะก่อสร้างให้มีความยาวตลอดชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่ง Soil-Cement Column จะทำหน้าที่ยกถ่ายน้ำหนักเสาเข็มกลุ่มรองรับน้ำหนักของโครงสร้าง สำหรับงานถนน Soil-Cement Column จะช่วยลดการทรุดตัวของคันทางได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามปริมาณการทรุดตัวเพิ่มเติมสามารถเกิดได้จากการยุบและหดตัวของ Soil-Cement Column และชั้นดินที่อยู่ใต้ Soil-Cement Column Broms and Boman ( 1975 ) ได้เสนอวิธีการคำนวณออกแบบ Soil-Cement Column ไว้ดังนี้

#### 1) การวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ( Ultimate Bearing Capacity )

ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถพิจารณาได้ 3 ลักษณะตามรูปแบบการวิบัติ ดังนี้

1.1 พิจารณาจากการวิบัติของดิน ( Soil Failure ) โดยคำนวณกำลังรับน้ำหนักของดินรอบ Soil-Cement Column และเปลี่ยนของเสาเข็ม โดยให้ค่าหน่วยแรงเฉือนทานที่ผิวของ Soil-Cement Column มีค่าเท่ากับค่า Undrained Shear Strength ( $S_u$ ) ของดินรอบๆ Soil-Cement

Column และกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มมีค่าประมาณ 6 ถึง 9 เท่าของค่า  $S_u$  ของมวลดินรองรับที่ปลายของ Soil-Cement Column ดังสมการที่ 2.14

$$Q_{ult,soil} = \left[ \sum S_{ui} \cdot \pi H_i \right] + \left[ (6 \text{ to } 9) \frac{\pi D^2}{4} \cdot S_{u, end} \right] \quad (2.14)$$

- เมื่อ  $Q_{ult,soil}$  = Ultimate Bearing Capacity ของ Soil-Cement Column  
 $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ Soil-Cement Column  
 $H_i$  = ความยาวของ Soil-Cement Column  
 $S_{ui}$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำรอบ Soil-Cement Column  
 $S_{u, end}$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของมวลดินได้เสาเข็ม

1.2 พิจารณาจากการวิบัติของเสาเข็ม (Column Failure) โดยพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ Soil-Cement Column และแรงดันดินข้างที่กระทำกับ Soil-Cement Column ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสามารถวิเคราะห์ได้จาก Strength Envelope ใน Mohr Diagram ดังนี้

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.15)$$

- เมื่อ  $\sigma_1$  = Major Principal Stress ซึ่งเท่ากับหน่วยแรงในแนวตั้ง  $\sigma_v$   
 $\sigma_3$  = Minor Principal Stress ซึ่งเท่ากับหน่วยแรงในแนวราบ  $\sigma_h$   
 $c$  = Cohesion  
 $\phi$  = Friction Angle

ถ้ากำหนดให้  $\phi$  ของ Soil-Cement Column,  $\phi = 30^\circ$   
 ดังนั้น

$$\sigma_1 = 3.5c_{col} + 3\sigma_{Hl} \quad (2.16)$$

$$Q_{ult, soil} = A_{col} (3.5c_{col} + 3\sigma_{Hl}) \quad (2.17)$$

เมื่อ

$Q_{ult, soil}$	=	Ultimate Bearing Capacity ของ Soil-Cement Column
$\sigma_H$	=	Total Lateral Stress
	=	$\sigma_v + 5S_u$
$\sigma_v$	=	Total Vertical Stress
$A_{cyl}$	=	พื้นที่หน้าตัดของ Soil-Cement Column

เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ Soil-Cement Column จะลดลง เนื่องจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุของวัสดุภายใน Soil-Cement Column และรวมไปถึงความล้า ( Creep ) ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ Soil-Cement Column มีค่าลดลงเหลือ 65-80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเดิม

$$Q_{ult, creep, soil} = (0.6 \text{ to } 0.8) Q_{ult, soil} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $Q_{ult, creep, soil}$  = Ultimate Bearing Capacity ของ Soil-Cement Column เมื่อเกิด Creep

1.3 พิจารณากรณีการเกิดการวิบัติในกรณีเข็มกลุ่ม กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของกลุ่ม Soil-Cement Column ที่เกิดการวิบัติ ( $Q_{ult, group}$ ) สามารถพิจารณาได้สองกรณี คือ

1.3.1 Ultimate Bearing Capacity due to Block Failure เนื่องจากกลุ่ม Soil-Cement Column ไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำได้จึงเกิดการวิบัติในลักษณะ Block Failure ดังแสดงในรูปที่ 3.7 กำลังน้ำหนักบรรทุกประลัยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19

$$Q_{ult, group} = 2S_u H (B+L) + (6 \text{ to } 9) S_u BL \quad (2.19)$$

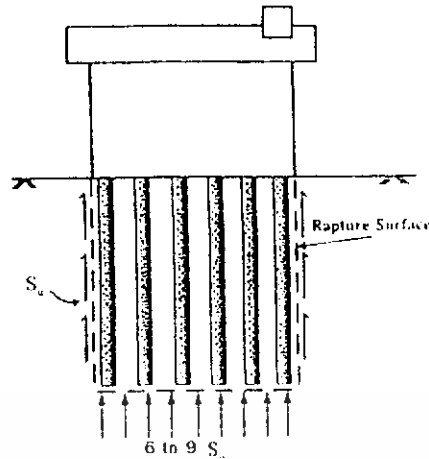
เมื่อ  $Q_{ult, group}$  = Ultimate Bearing Capacity ของกลุ่ม Soil-Cement Column เมื่อเกิด Creep

B = ด้านกว้างของกลุ่ม Soil-Cement Column

L = ด้านยาวของกลุ่ม Soil-Cement Column

H = ความยาวของ Soil-Cement Column

สำหรับเสาเข็มกลุ่มที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า End Bearing จะมีค่าเท่ากับ  $6 S_u BL$  ในกรณีเสาเข็มที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส End Bearing จะมีค่าเท่ากับ  $9 S_u BL$



รูป 3.7 การวิจัยของกลุ่ม Soil-Cement Column ในลักษณะ Block Failure

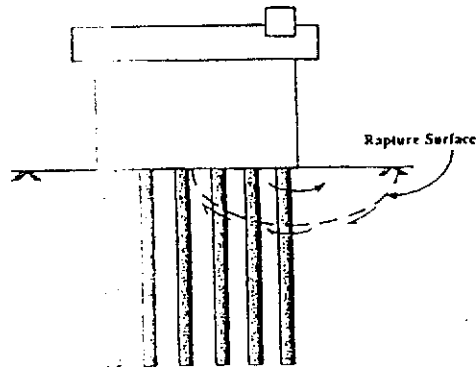
1.3.2 Ultimate Bearing Capacity due to Local Failure เกิดจากการที่ขั้วของ Soil-Cement Column บางต้น โดยมีสาเหตุจากระยะห่าง Soil-Cement Column มากเกินไป และเกิดน้ำหนักกระทำมากในบางบริเวณทำให้กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของ Soil-Cement Column และดินฐานรากบริเวณนั้นไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดการวิบัติในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีค่าดังสมการที่ 2.20

$$Q_{ult,group} = 5.5 S_{u,avg} \left(1 + 0.2 \frac{b}{l}\right) \quad (2.20)$$

เมื่อ

- $b$  = ความกว้างของ Local Load Area
- $l$  = ความยาวของ Local Load Area
- $S_{u,avg}$  = Average Undrained Shear Strength ตามแนว Slip Surface
- $S_u$  =  $S_u (1 - a) + S_{u,col} (a)$
- $S_{u,col}$  = กำลังต้านทานแรงเฉือน Soil-Cement Column
- $a$  =  $\frac{NA}{BL}$

- N = จำนวนของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่พิจารณา
- B = ความกว้างของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์
- L = ความยาวของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์
- A = พื้นที่หน้าตัดของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์



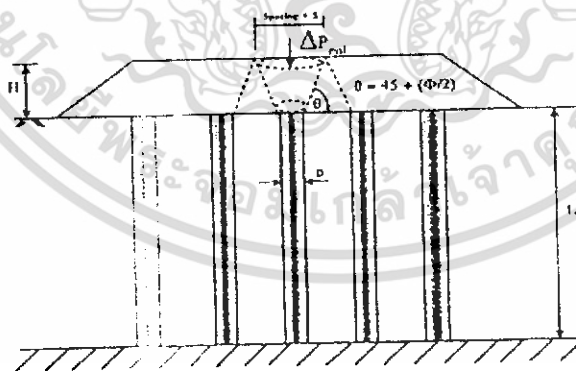
รูป 3.8 การวิบัติของกลุ่ม Soil-Cement Column ในลักษณะ to Local Shear Failure

2) การวิเคราะห์การทรุดตัว

การวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงการสร้างที่รับน้ำหนักโดยรากฐานที่ปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วย Soil-Cement Column แบ่งตามลักษณะการออกแบบได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1) End Bearing type

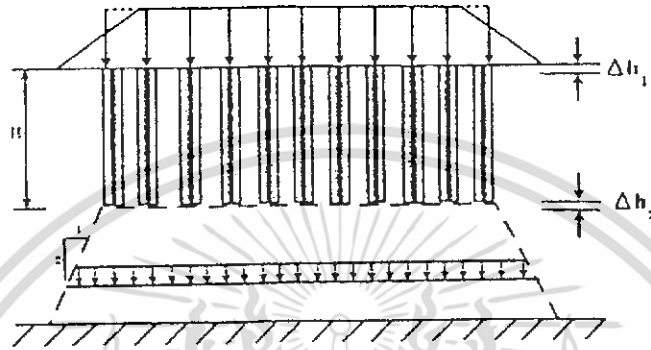
ลักษณะการออกแบบ Soil-Cement Column ประเภท End Bearing type แสดงดังรูปที่ 3.9 ปลายของ Soil-Cement Column จะอยู่บนชั้นดินแข็งหรือชั้นหิน การคำนวณการทรุดตัวจะพิจารณาการทรุดตัวของ Soil-Cement Column และ การทรุดตัวของมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column (Miki 1977, JICA and Dept. of Highways 1998 )



รูป 3.9 การออกแบบ Soil-Cement Column ชนิด End Bearing type

## 2.2) Floating Type

ลักษณะการวิเคราะห์การทรุดตัวของ Soil-Cement Column ประเภท Floating Type แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งปลายของ Soil-Cement Column จะอยู่ในชั้นดินอ่อน การทรุดตัวทั้งหมดประมาณได้จากผลรวมของการทรุดตัวของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วย Soil-Cement Column และชั้นดินที่อยู่ใต้ Soil-Cement Column



รูป 3.10 ลักษณะการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อรับน้ำหนักน้อยกว่า Creep Strength

ปริมาณการทรุดตัวของรวมจะขึ้นอยู่กับขนาดของ Creep Limit ของ Soil-Cement Column และ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบน Soil-Cement Column ( Bergado et al. 1992 ) ในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบน Soil-Cement Column มีค่าน้อยกว่า Creep Limit (  $Q_{creep}$  ) หน่วยแรงกระทำที่เกิดใน Soil-Cement Column สามารถคำนวณได้จาก

$$q_1 = \frac{q}{a + \left( \frac{E_{soil}}{E_{col}} \times (1 - a) \right)} \quad (2.24)$$

เมื่อ

- $q_1$  = หน่วยแรงแนวตั้งที่กระทำกับ Soil-Cement Column
- $q$  = หน่วยแรงที่กระทำบนพื้นที่ที่ปรับปรุงคุณภาพ ( Contact Pressure )
- $E_{col}$  = Elastic Modulus of Soil-Cement Column ซึ่งประมาณเท่ากับ 50 ถึง 100 เท่าของ  $S_{u,col}$
- $E_{soil}$  = Elastic Modulus ของดินระหว่าง Soil-Cement Column ค่า  $E_{soil}$  ของ Soft Bangkok Clay ( Slightly Overconsolidated Clay ) มีประมาณ 150  $S_u$  และค่า  $E_{soil}$  ของ Overconsolidated Clay มีค่าประมาณ 250  $S_u$  ( Bergado et al. 1992 )

## การทรุดตัวของ Soil-Cement Column

การทรุดตัวของ Soil-Cement Column สามารถคำนวณจาก

$$S_{col} = \frac{\Delta P_{col}}{E_{col}} L \quad (2.22)$$

เมื่อ

- $S_{col}$  = ปริมาณการทรุดตัวของ Soil-Cement Column  
 $\Delta P_{col}$  = น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อ Soil-Cement Column  
 $L$  = ความยาวของ Soil-Cement Column  
 $E_{col}$  = Elastic Modulus ของ Soil-Cement Column

ค่า  $\Delta P_{col}$  คำนวณจากแรงที่กระทำบนคันดิน เช่นแรงจากรถบรรทุกขุดด้วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของดินคันทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 Elastic Modulus ของ Soil-Cement Column มีค่าประมาณเท่ากับ  $100 q_{u,col}$  โดยที่  $q_{u,col}$  คือ ค่า Unconfined Compressive ของ Soil-Cement Column

## การทรุดตัวของมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column

การทรุดตัวของมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column (JICA and Dept. of Highways 1998) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.22

$$S_s = \frac{S_0 \times \Delta P_s}{\Delta P_0} \quad (2.23)$$

โดยที่

- $S_s$  = ปริมาณการทรุดตัวของมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column  
 $S_0$  = ปริมาณการทรุดตัวของมวลดินได้ฐานรากถ้าไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ  
 $\Delta P_s$  = น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column  
 $\Delta P_0$  = น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำบนพื้นที่

การทรุดตัวของชั้นดินที่ปรับปรุงด้วย Soil-Cement Column ( $\Delta h_1$ ) คำนวณ

ได้จาก

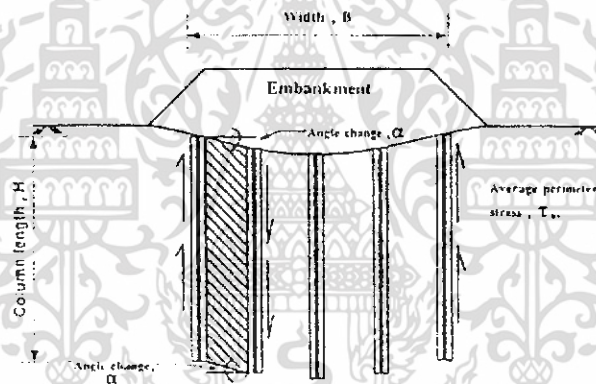
$$\Delta h_1 = \frac{q_1 \times H}{(a \times E_{col}) + (1-a)E_{soil}} \quad (2.25)$$

การทรุดตัวของชั้นดินที่อยู่ใต้ Soil-Cement Column ( $\Delta h_2$ ) สามารถ

ประมาณโดยใช้ทฤษฎีการทรุดตัวของดิน

### 3) การทรุดตัวที่แตกต่างกันของ Soil-Cement Column

ค่าทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างแถวของ Soil-Cement Column ที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ด้วยมุมที่เปลี่ยนไป สามารถหาค่าได้จากสัดส่วนของค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนตามเส้นรอบรูปของกลุ่มของ Soil-Cement Column กับค่า Shear Modulus ( $G_2$ ) เฉลี่ยของมวลดิน ดังแสดงในสมการที่ 2.26



รูป 3.11 การทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Settlement) ของ Soil-Cement Column

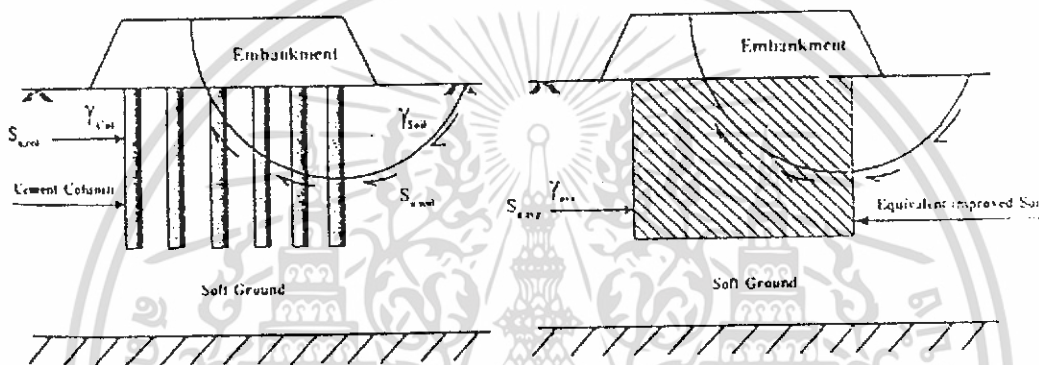
$$\alpha = \frac{T_{avg}}{G_{avg}} \quad (2.26)$$

เมื่อ	$\alpha$	=	มุมที่เปลี่ยนไป	
	$T_{avg}$	=	ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนตามเส้นรอบรูปของกลุ่ม Soil-Cement Column	
	$G_{avg}$	=	Shear Modulus เฉลี่ยของดิน	
		=	$\frac{B}{B - mD} \cdot G_{soil}$	(2.27)

- B = ด้านกว้างขวางของ Soil-Cement Column Block
- m = จำนวนแถวของ Soil-Cement Column
- D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ Soil-Cement Column
- $G_{soil}$  = Shear Modulus ของดิน =  $100 S_u$

4) การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของคันทาง

การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของคันทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินฐานรากที่ถูกปรับปรุงคำนวณจากการเฉลี่ยของกำลังแรงเฉือนของ Soil-Cement Column กับมวลดินระหว่าง Soil-Cement Column ตามแนววิถี ดังสมการที่ 2.28



รูป 3.12 ลักษณะการวิบัติของเสถียรภาพความลาด

$$S_{u,avg} = S_{u,soil} (1-a) + S_{u,col} a \quad (2.28)$$

เมื่อ

- $S_{u,avg}$  = Average Undrained Shear Strength of Improved Soil
- $S_{u,soil}$  = Undrained Shear Strength of Soil
- $S_{u,col}$  = Undrained Shear Strength of Soil-Cement Column

เกษมและพินิจ ( 2543 ) กล่าวว่า Soil-Cement Column และดินรอบๆ Soil-Cement Column จะเกาะเป็นกลุ่มช่วยกันรับน้ำหนักบรรทุกได้เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่มากนัก เช่น 1.5 ถึง 2.0 ม. นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของ Soil-Cement Column Group ขนาดของน้ำหนักบรรทุกและความแข็งแรงของดินเดิมด้วย น้ำหนักบรรทุกส่วนมากจะส่งผ่านไปยังดินเดิมโดยผ่านเส้นรอบรูปของ Soil-Cement Column Group และเนื่องจาก Soil-Cement Column Group มีการทรุดตัวเล็กน้อยหลังจากการก่อสร้างคันดิน ทำให้แรงเสียดทานเกิดขึ้น

เดิมที่ใช้ในช่วงแรกส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกที่ส่งผ่านไปยังปลาย Soil-Cement Column Group จึงมีค่าน้อย จากนั้นน้ำหนักที่ปลายจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและเวลาที่มากขึ้น เกษมและพินิจ ( 2543 ) ดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้วิธี Finite Element และพบว่าน้ำหนักบรรทุกส่งถ่ายผ่านแรงเสียดทานมีค่าประมาณ 70-80% และส่งถ่ายไปยังปลาย Soil-Cement Column Group มีค่าประมาณ 20-30%

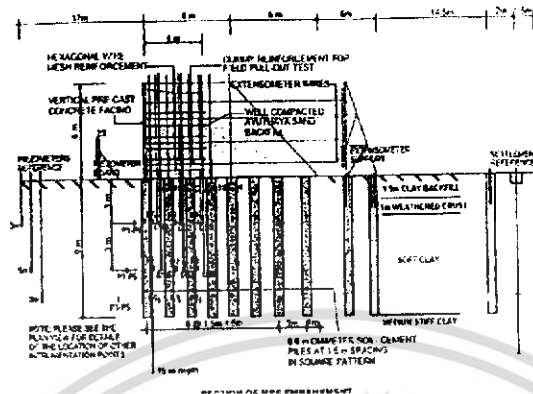
ธีรชาติและจอม ( 2545 ) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของถนนบนดินอ่อนปรับปรุงคุณภาพดินด้วย Soil-Cement Column บนทางหลวงหมายเลข 34 ตอน บางนา-ชลบุรี พบว่า Soil-Cement Column จะรับน้ำหนักจาก Embankment และน้ำหนักจรมากกว่าดินระหว่าง Soil-Cement Column จากผลการวัดที่ได้จากสนามพบว่าน้ำหนักที่กระทำต่อ Soil-Cement Column มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 60 และกระทำต่อมวลดินรอบๆ Soil-Cement Column เฉลี่ยร้อยละ 40 ของน้ำหนักทั้งหมด

เกษมและสมบัติ ( 2002 ) ทำการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวแตกต่างกันที่เกิดขึ้นระหว่างดินระหว่างเสาเข็มและตัวของ Soil-Cement Column การศึกษาดำเนินการ โดยสร้าง Full Scale Load Test ซึ่งมีขนาดพื้นที่  $12 \times 21$  ม' และมีความสูงคันดินถม 6 ม. ( คันดินถมทำการเสริมกำลังด้วย Hexagonal Wire Mesh กับแผ่น Precast Concrete Facing Panel ) ผลการทดสอบพบว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะรวดเร็วและมีอัตราการทรุดตัวที่สูงในช่วงเวลาการถมดินสร้างคันดินทดลอง ค่าการทรุดที่เกิดขึ้นจะรวดเร็วและมีอัตราการทรุดตัวที่สูงในช่วงเวลาการถมดินสร้างคันดินทดลอง ค่าการทรุดตัวที่วัคบริเวณผิวคันที่เวลา

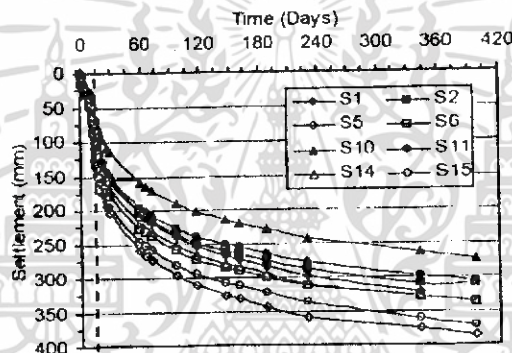
230 วัน มีค่าเท่ากับ 35.8 ซม. และผลค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันมากที่สุดระหว่างดินบริเวณรอบๆ ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพดินกับการทรุดดินของ Soil-Cement Column มีค่าเท่ากับ 6.5 ซม.

Bergado, et al. ( 2005 ) ทำการศึกษากการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่าง Soil-Cement Column และดินโดยรอบภายใต้คันทางที่ทำการเสริมแรง ( Reinforced Embankment ) สูง 6 ม. แสดงดังรูปที่ 3.13 จากผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบมีค่า 2.5 ถึง 6 ซม. โดยค่าการทรุดตัวเฉลี่ยทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 28.5 ซม. ภายหลังจากการก่อสร้างคันทาง 1 ปี ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบทำให้เกิด Negative Skin Friction บน Soil-Cement Column จากรูปที่ 3.14 จะพบว่า การทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่าง Soil-Cement Column และดินโดยรอบเริ่มคงที่หลังจากการ

ก่อสร้างคันทาง 1 เดือน คัดมันดินนที่ทำการก่อสร้างบน Soil-Cement Column ผิวทางชั้น  
 สุดท้ายควรทำอย่างน้อย 1 เดือน หลังจากการก่อสร้างคันทางเสร็จ

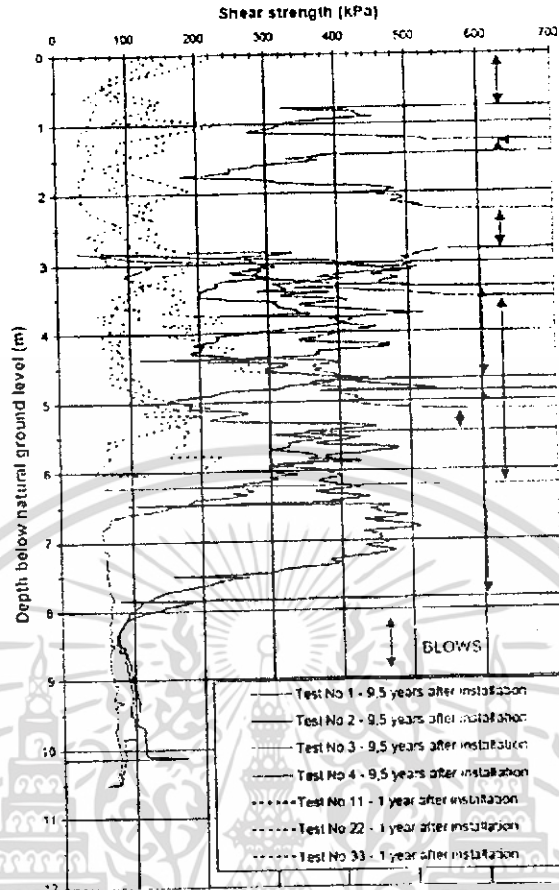


รูป 3.13 รูปแบบคันทางทดสอบ (Bergado et al., 2005)



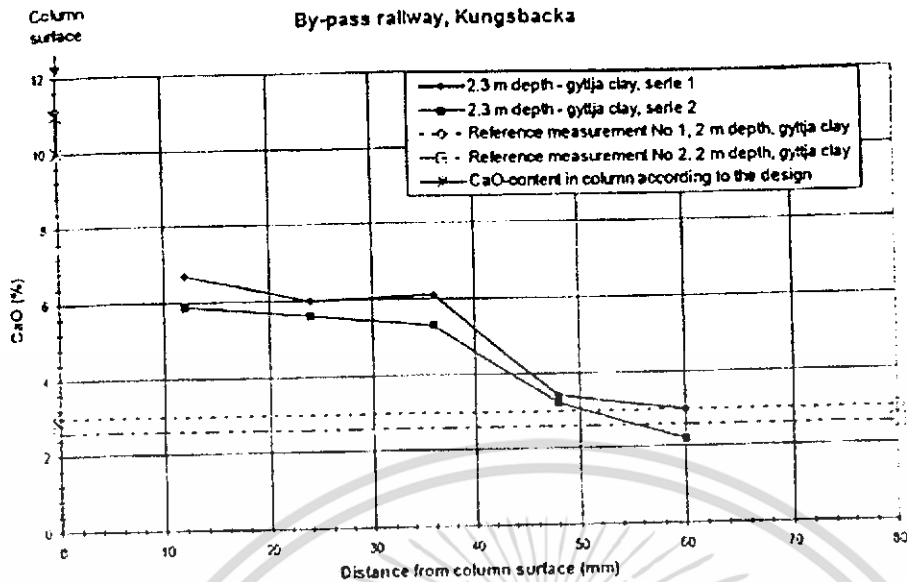
รูป 3.14 การทรุดตัวของ Soil-Cement Column และดินรอบๆ : Solid Symbol = on Soil-Cement Column ; Hollow Symbols = on Clay Between Soil-Cement Column (Bergado et al., 2005)

Lofroth (2005) ทำการศึกษาคุณสมบัติของ Soil-Cement Column ก่อสร้างด้วยวิธี Dry Process ที่ระยะเวลา 1 ปี และ 9.5 ปี ภายหลังจากการก่อสร้าง ผลการศึกษาพบว่ากำลังของ Soil-Cement Column เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 3.15 โดยกำลังของ Soil-Cement Column ที่ระยะเวลา 9.5 ปี มีค่าสูงกว่าประมาณ 2 เท่าของ Soil-Cement Column ที่ระยะเวลา 1 ปี นอกจากนั้นยังพบว่าเกิดการกระจายตัวของ Calcium จากเสาเข็มสู่ดินรอบๆ ที่ระยะ 50 มม. จากผิวของ Soil-Cement Column แสดงดังรูปที่ 3.16



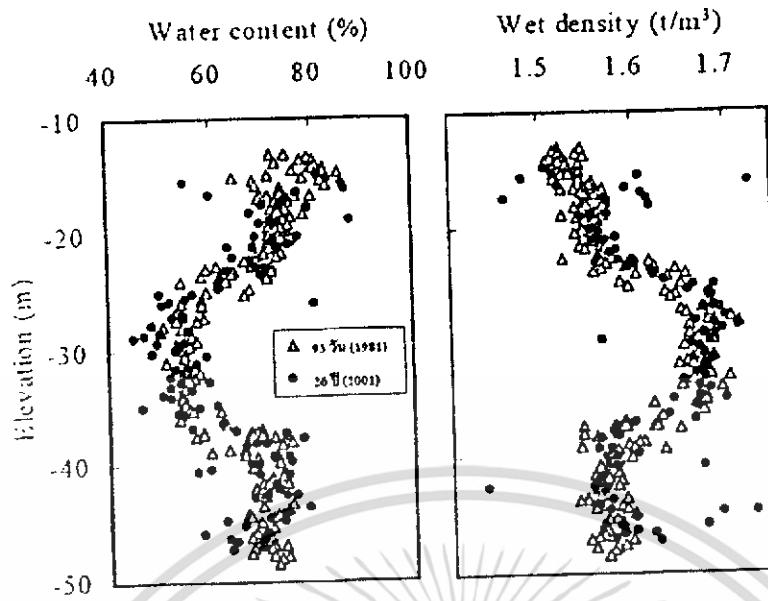
รูป 3.15 กำลังแรงเฉือนของ Soil-Cement Column ที่ระยะเวลา 1 ปี และ 9.5 ปี (Lofroth, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

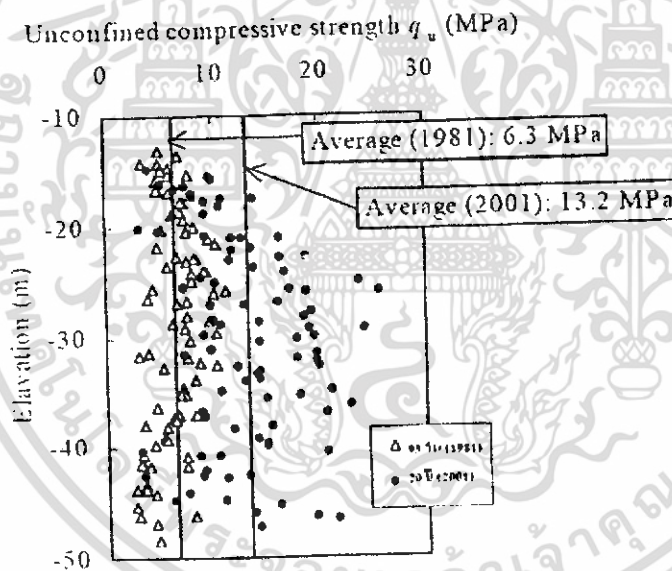


รูป 3.16 การกระจายตัวของ calcium ที่ความลึก 2.3 ม. (Lofroth, 2005)

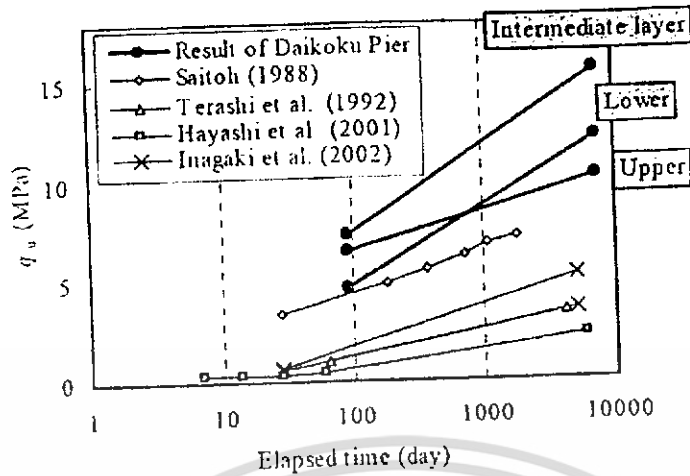
Ikegami et al. (2005) ทำการศึกษาคุณสมบัติระยะยาวของ Soil-Cement Column ที่ก่อสร้างด้วยวิธี Wet Process ผลการศึกษาพบว่าค่าปริมาณน้ำในมวลดิน ( Water Content ) และค่าความหนาแน่นเปียกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 20 ปี ภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วย Soil-Cement Column ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ในขณะที่กำลังแรงเฉือน ( Unconfined Compressive strength,  $q_u$  ) ของ Soil-Cement Column ที่ระยะเวลา 20 ปี มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.1 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Soil-Cement Column ที่ระยะเวลา 93 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่เพิ่มขึ้นกับเวลาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 นอกจากนี้ Ikegami et al. (2005) ยังได้ศึกษาการกระจายตัวของ calcium ใน Soil-Cement Column และในดินรอบๆ พบว่ามีการแพร่กระจายตัวของ calcium จาก Soil-Cement Column ไปสู่ดินรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของ Soil-Cement Column



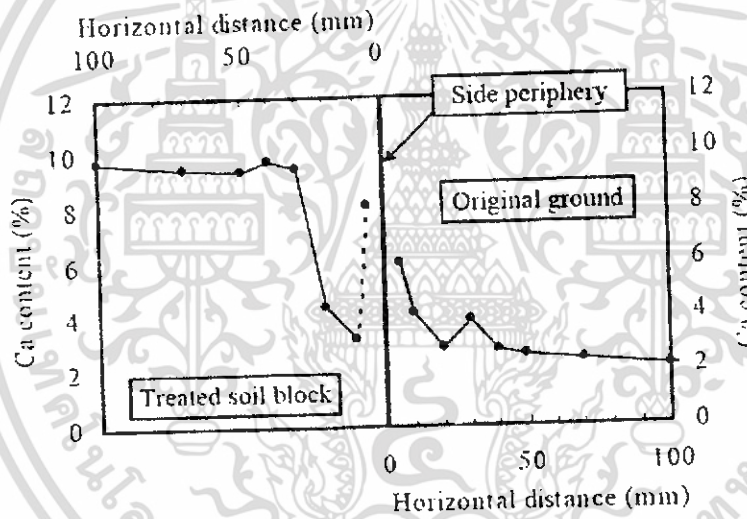
รูป 3.17 ปริมาณน้ำในมวลดินและความหนาแน่นเปียกที่ระยะเวลาต่างๆ (Ikegami et al.2005)



รูป 3.18 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของ Soil-Cement Column ที่ระยะเวลาต่างๆ (Ikegami et al.2005)

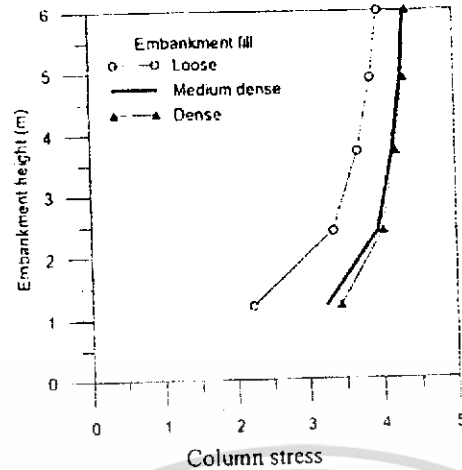


รูป 3.19 การเปลี่ยนแปลงกำลังแรงเฉือนกับเวลา (Ikegami et al., 2005)



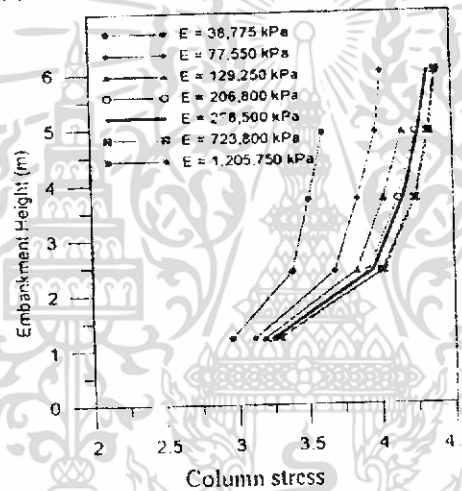
รูป 3.20 การกระจายตัวของ calcium (Ikegami et al., 2005)

Stewart et al. (2005) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายน้ำหนักของคันทางบน Soil-Cement Column จากผลการศึกษาพบว่าหน่วยแรงบนหัว Soil-Cement Column จะเพิ่มขึ้นเมื่อ 1) ความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น 2) Stiffness ของคันทางเพิ่มขึ้น 3) โมดูลัสของเสารซึมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ถึงรูปที่ 3.22



รูป 3.21 ผลของคันทงต่อหน่วยแรงที่กระทำบน Soil-Cement Column (Stewart et al., 2005)

ของคันทงต่อหน่วยแรงที่กระทำบน Soil-Cement Column (Stewart et al.

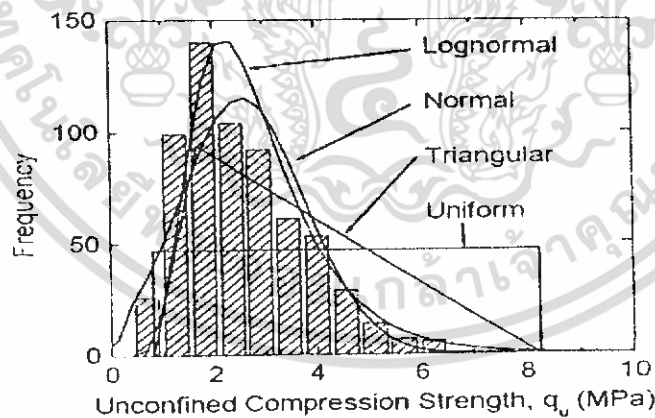


รูป 3.22 ผลของโมดูลัสเสถาแข็งต่อหน่วยแรงที่กระทำบน Soil-Cement Column (Stewart et al., 2005)

Navin and Filz ( 2005 ) ทำการรวบรวมข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับค่า Unconfined Compression Test ของ Soil-Cement Column ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของ Soil-Cement Column อยู่ระหว่าง 34-74 % ในกรณีศึกษา Glen Road Interchange Ramp H&E ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.23 พบว่า กำลังของ Soil-Cement Column มีแนวโน้มการกระจายตัวแบบ Lognormal Distribution มากกว่า Normal Distribution, Uniform Distribution และ Triangular Distribution

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับค่า Unconfined Compression Test ของ Soil-Cement Column (Navin and Filz, 2005)

Project	Sample Type	# Tests	Mean (MPa)	Strength $\sigma$ (MPa)	V	Source
Baker Library Capitol Visitor Center Kaufel Center	Wet Grab	81	1.44	0.66	0.459	Weatherby (2004)
	Wet Grab	44	1.01	0.5	0.494	
	Wet Grab	106	1.56	0.81	0.522	
	Total	231	1.41	0.74	0.520	
Port of Oakland Oakland Airport	Core	118	2.98	1.55	0.521	Yang (2004)
	Core	184	3.54	1.57	0.445	
	Total	302	3.20	1.58	0.494	
Glen Road Interchange Ramps G&F Glen Road Interchange Ramps H&E	Core	164	3.26	1.12	0.343	Dasenbrock (2004)
	Core	634	2.84	1.21	0.425	
	Total	818	2.94	1.24	0.421	
Blue Circle Kinder Morgan Cement Silos	Wet Grab	487	4.7	3.49	0.742	Burke (2004)
Jackson Lake Dam: Owner Samples Jackson Lake Dam: Contractor Samples Jackson Lake Dam: Owner Samples	Core	340	4.83	3.05	0.633	Farrar (2004)
	Wet Grab	1683	2.83	1.79	0.633	
	Wet Grab	546	2.70	1.44	0.534	
	Total	2569	3.06	2.06	0.672	
I-95 Interchange: Dry method I-95 Interchange: Wet method	Core	473	2.84	1.9	0.669	Shuells (2004)
	Core	2199	3.42	2.27	0.663	
	Total	2672	3.32	2.22	0.669	



รูป 3.23 ลักษณะการกระจายตัวของค่ากำลังรับแรงอัดของ Soil-Cement Column (Navin and Filz, 2005)

## บทที่ 4

### ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่ได้รวบรวมนำมาวิจัยและข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์และ  
ทำการศึกษา

#### 4.2 รวบรวมข้อมูล

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ PVD ในประเทศไทยปัจจุบันมีเพียงการปรับปรุงคุณภาพดิน  
เท่านั้นที่เป็นข้อมูลจริงอีกทั้งยังเป็นข้อมูลระยะสั้นจึงจำเป็นต้องคาดเดาผลระยะยาวจากทฤษฎีเท่านั้น

เป็นการรวบรวมข้อมูลของการทำงานจริงของถนนบางนา-บางปะกง และ ถนนกรุงเทพ-  
ชลบุรี (สายใหม่)ในส่วนที่มีการใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน PVDแบบPVD with Preload และ  
Cement Column ด้วยความอนุเคราะห์โดย กรมทางหลวง เนื่องจากปัจจุบันมีเพียงหน่วยงานราชการ  
เท่านั้นที่มีการเริ่มใช้ วัสดุปรับปรุงคุณภาพดินคือ กรมทางหลวง การทางรถไฟ และสนามบินได้แบ่ง  
ข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่วิเคราะห์ทางวิศวกรรม และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

#### 4.3การศึกษาเปรียบเทียบทางวิศวกร

ผลจากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยในอดีต พบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน  
โดยใช้ Prefabricated Vertical Drain (PVD) และ Soil-Cement Column มีพื้นฐานทางทฤษฎี  
แนวคิด และหลักการออกแบบที่แตกต่างกัน และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดิน  
ต่างกัน เช่น การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดย PVD นั้นช่วยเร่งให้ Primary Consolidation  
Settlement เกิดมากที่สุดในขณะที่ก่อสร้าง การวิเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีการอัดน้ำตัวคายน้ำ  
(Consolidation Theory ) เป็นหลัก แต่ในกรณีของ Soil-Cement Column นั้น ถูกออกแบบมาเพื่อ  
เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากตัวคันทางลงสู่ชั้นดินเบื้องล่างที่มีความแข็งแรงเพียงพอ

โดยอาศัยหลักการและทฤษฎีของการออกแบบเสาเข็ม ( Pile Foundation Concept ) ดังนั้น เพื่อการศึกษาถึงความเหมาะสมของทั้งสองวิธีในการใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนสำหรับงานก่อสร้าง ถนนบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล ที่ปรึกษาการใช้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมจากโครงการฯ ทางหลวงที่ถูกเลือกมาใช้เป็นกรณีศึกษา อันได้แก่ 1) สายบางนา-บางปะกง ( ปรับปรุงคุณภาพดินโดย Soil-Cement Column ) และ 2) สายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) ( ปรับปรุงคุณภาพโดย PVD ) ในแต่ละกรณีศึกษานั้น จะเลือกหนึ่ง Section ที่มีขนาดคันทางและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินใกล้เคียงกัน เพื่อเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ซึ่งมีเกณฑ์ในการเลือกคือ ความลึกเฉลี่ยของชั้นดินอ่อน ปริมาณความชื้นในดินตามธรรมชาติกำลังแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และคุณสมบัติด้านการอัดตัวคายน้ำ (Compressibility Properties ) ประเด็นที่นำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางวิศวกรรม คือ การทรุดตัวหลังการใช้งาน และความแข็งแรงของดินฐานรากหลังจากฐานรากหลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

#### 4.3.1 กรณีศึกษา : ถนนบางนา-บางปะกง และ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่)

ถนนสายบางนา-บางปะกง เป็นถนนเชื่อมระหว่างกรุงเทพ กับ จังหวัดชลบุรี เริ่มก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2510 แล้วเสร็จเมื่อ ปี พ.ศ. 2515 มีระยะทางทั้งสิ้น ประมาณ 57 กม. เนื่องจากปริมาณการใช้ถนนที่เพิ่มขึ้น และ ปริมาณการทรุดตัวที่ค่อนข้างสูง ( การทรุดตัวของถนนหลังจากเปิดบริการเป็นระยะเวลา 10 ปี อยู่ในช่วง 0.6 ม. ถึง 2.0 ม. ( ยงยุทธ แท้ศิริ, 2538 ) ) ดังนั้น ในปี พ.ศ. 2539 กรมทางหลวงจึงได้เริ่มดำเนินโครงการปรับปรุงดินฐานรากและขยายช่องจราจรถนนเดิม โดยใช้วิธี Soil-Cement Column ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Soil-Cement Column เท่ากับ 0.6 เมตร ก่อสร้างในรูปแบบ Grid Pattern ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของ Soil-Cement Column เท่ากับ 1.5 เมตร ระดับหัว Soil-Cement Column ต่ำกว่า Profile Grade ไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร ความยาวของ Soil-Cement Column อยู่ในช่วง 10 ถึง 17 เมตร ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นดินอ่อน วิธีการก่อสร้างใช้ระบบ Mechanical Mixing Method ทั้งแบบ Wet Mix ซึ่งก่อสร้างในช่วง กม. 14+177 ถึง 50+200 และ Dry Mix ก่อสร้างในช่วง กม. 50+200 ถึง 56+855 การปรับปรุงถนนสายบางนา-บางปะกงเสร็จสิ้นในปลาย ปี 2543 ( สมศักดิ์ สาครจรเดช, ไม่ระบุปี และจอม จันทรหิรัญ, 2543 )

ถนนสายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) เป็นทางหลวงพิเศษ ซึ่งขนานกับถนนสายบางนา-บางปะกง โดยมีจุดประสงค์สำคัญเพื่อพัฒนาระบบคมนาคมระหว่าง กรุงเทพ กับพื้นที่อุตสาหกรรมชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก และนิคมอุตสาหกรรมที่มาบตาพุด โดยมีระยะทางประมาณ 82 กม. (รูปที่ 3.1)

ถนนสายนี้ เริ่มก่อสร้างเมื่อ ปี พ.ศ. 2537 เสร็จสิ้นเมื่อ ปี พ.ศ. 2540 ในการก่อสร้าง กรมทางหลวงได้ปรับปรุงดินฐานรากถนน โดยการถมคันทราย (Preloading) สูง 2 เมตร ( โดยแบ่งการถมเป็น 3 Stage ) ร่วมกับการใช้ PVD โดยมี Sand Drainage Blanket หนา 0.4 เมตร หลังการก่อสร้าง มีการนำคันทรายถมออกจนได้ระดับการก่อสร้างชั้นพื้นทาง ( รูปที่ 3.14 ) การติดตั้ง PVD ใช้รูปแบบ Triangular Pattern ระยะห่างระหว่าง PVD เท่ากับ 1.2 เมตร ความยาว PVD อยู่ในช่วง 8 ถึง 12 เมตร ขึ้นกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ( ขงขุทรี แด้ศิริ และ ดวงตา ศันสนีย์เมธา, 2545 และ นพพร สติวรเวศน์, 2545)

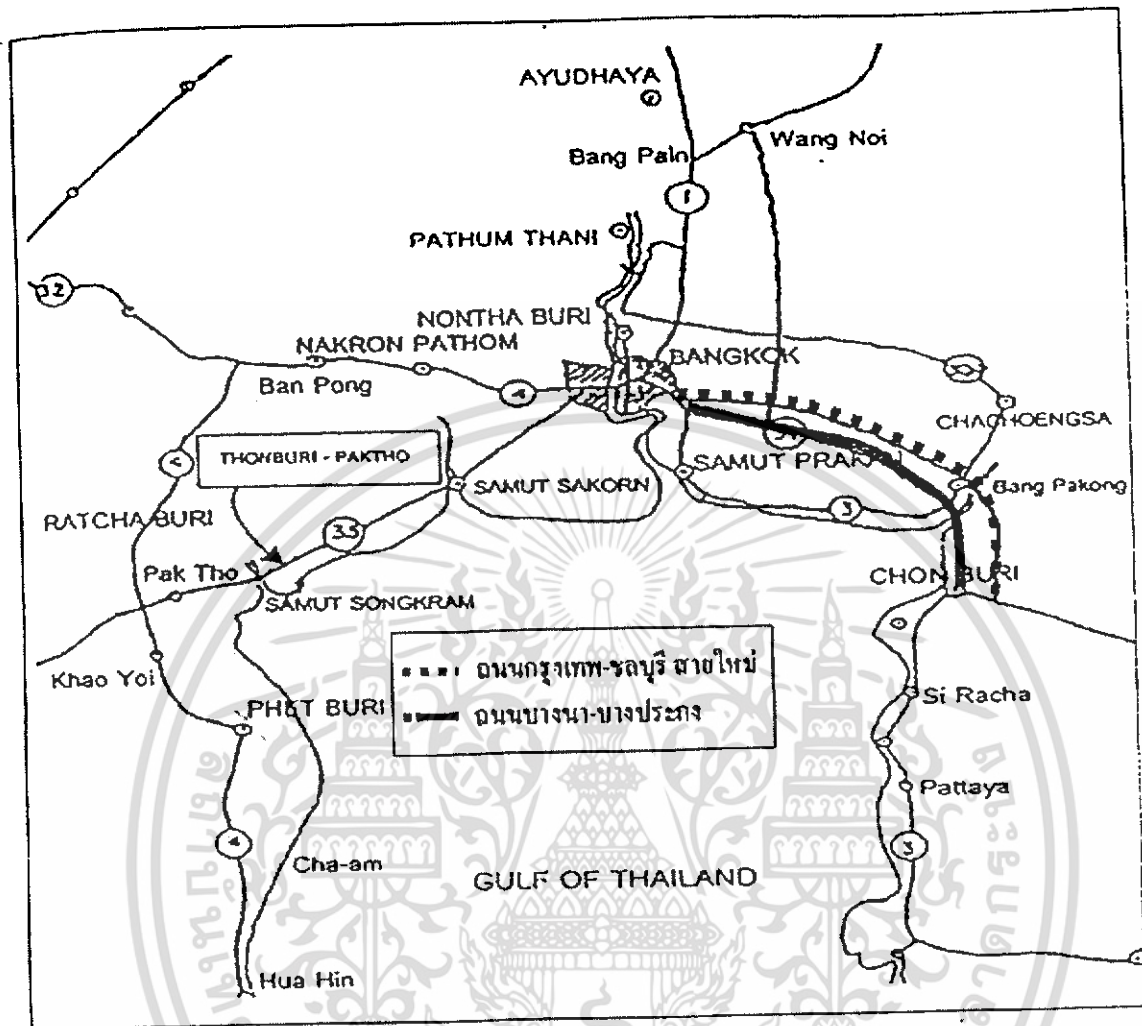
#### 4.3.2 พื้นที่ศึกษา และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

บริเวณถนนบางนา-บางปะกง และถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) ( หรือ Motor Way) ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาครั้งนี้ คือ ระหว่างกม.ที่ 20-30 และ ระหว่างกม. ที่ 15 ถึง 30 ตามลำดับ แผนที่แสดงที่ตั้งของถนนทั้ง 2 สาย แสดงในรูปที่ 4.1 และ ตำแหน่งพื้นที่ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ของถนนบางนา - บางปะกง และ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงลักษณะของชั้นดินในบริเวณศึกษาของถนนบางนา-บางปะกง และ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) ความหนาของชั้นดินอ่อนและคุณสมบัติของดินในบริเวณดังกล่าว ได้แสดงในตารางที่ 4.1 ทั้งสองบริเวณ มีความหนาเฉลี่ยของชั้นดินอ่อนที่ประมาณ 16 ม. ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ ( Natural Water Content ,  $W_n$  ) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ 96% ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength ,  $S_u$  ) ตลอดทั้งบริเวณมีค่าอยู่ในช่วง 1.4-1.6 ตัน/ม.<sup>2</sup> และคุณสมบัติการอัดตัวคายน้ำ ( Compression Ratio,  $CR=C_v/(1+e)$  ) ของมวลดินของทั้งสองบริเวณ อยู่ในช่วง 0.4-0.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถึง 3.9

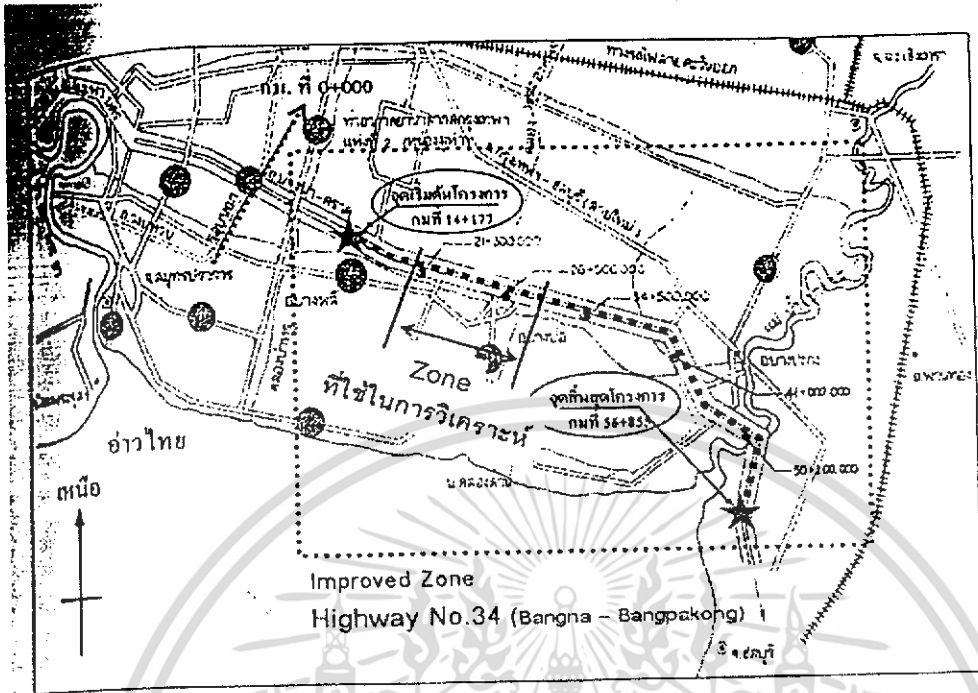
Section ที่ถูกเลือกเพื่อเป็นตัวแทนบริเวณศึกษา และมีข้อมูลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบทางด้านวิศวกรรมของถนนบางนา-บางปะกง และ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใหม่) คือ STA 29+992 และ STA 24+200 ตามลำดับ โดยที่ STA 29+992 ความยาว Soil-Cement Column ที่ใช้ คือ 17 ม. ปลาย Soil-Cement Column อยู่ประมาณบนชั้น Medium Clay การก่อสร้าง Soil-Cement Column ใช้วิธี Mechanical Mixing Method ชนิด Wet Mix และที่ STA 24+000 ความยาว PVD ที่ใช้คือ 12 ม. และปลาย PVD อยู่ที่ประมาณชั้น Soft Clay

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของบริเวณที่ถูกเลือกมาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

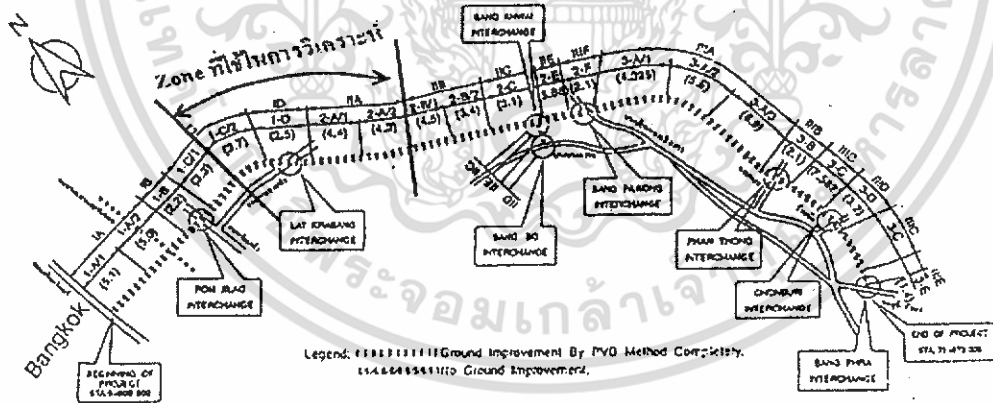
คุณสมบัติของบริเวณพื้นที่ศึกษา	ถนน	
	บางนา-บางปะกง	กรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่)
ความหนาเฉลี่ยของชั้นดินอ่อน	16 ม.	16ม.
ความยาวของ Section	10 กม.	14.9 กม.
จำนวนของหลุมเจาะ	3 หลุม	4 หลุม
จำนวนของข้อมูล Undrained Shear Strength, $S_u$	33	81
จำนวนของข้อมูล Natural Water Content, $W_n$	35	84
Average Undrained Shear Strength	1.6 ตัน /ม <sup>2</sup> ( โดยประมาณ )	1.4 ตัน/ม <sup>2</sup> ( โดยประมาณ )
Average Natural Water Content	96% ( โดยประมาณ )	96% ( โดยประมาณ )
Average Compression Ratio (CR)	0.5 ( โดยประมาณ )	0.4 ( โดยประมาณ )



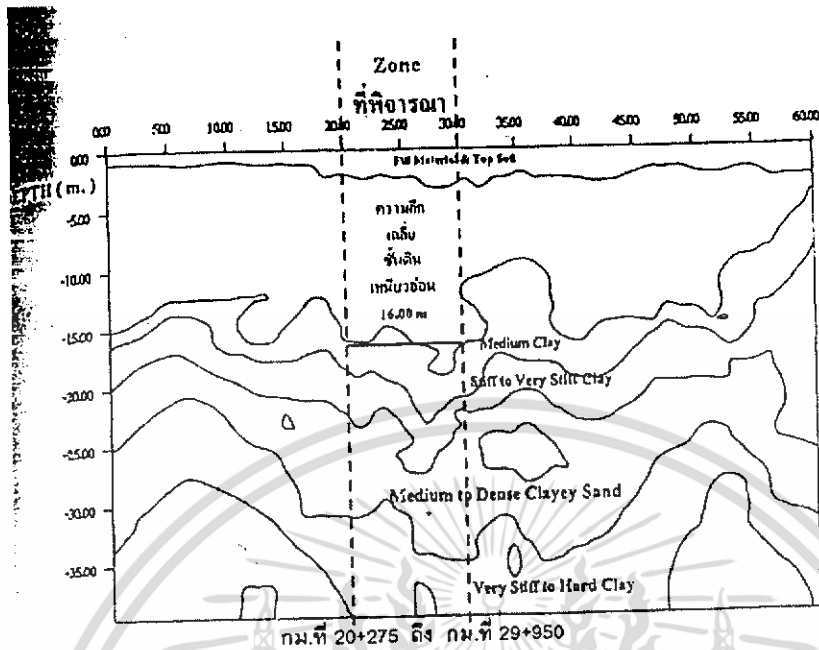
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งและที่ตั้งของถนนสายบางนา-บางปะกง และ กรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) (ปรับปรุงจาก สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง)



รูปที่ 4.2 ที่ตั้งของถนนบางนา-บางปะกง และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ปรับปรุงจาก สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง)

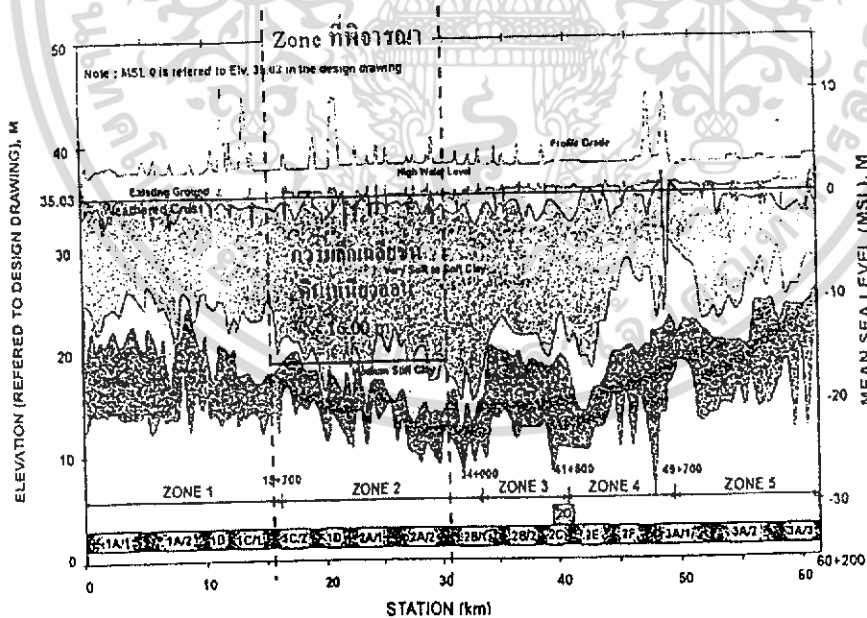


รูปที่ 4.3 ที่ตั้งของถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Katahira and Engineering International and Thai Engineering Consultant, 1999)

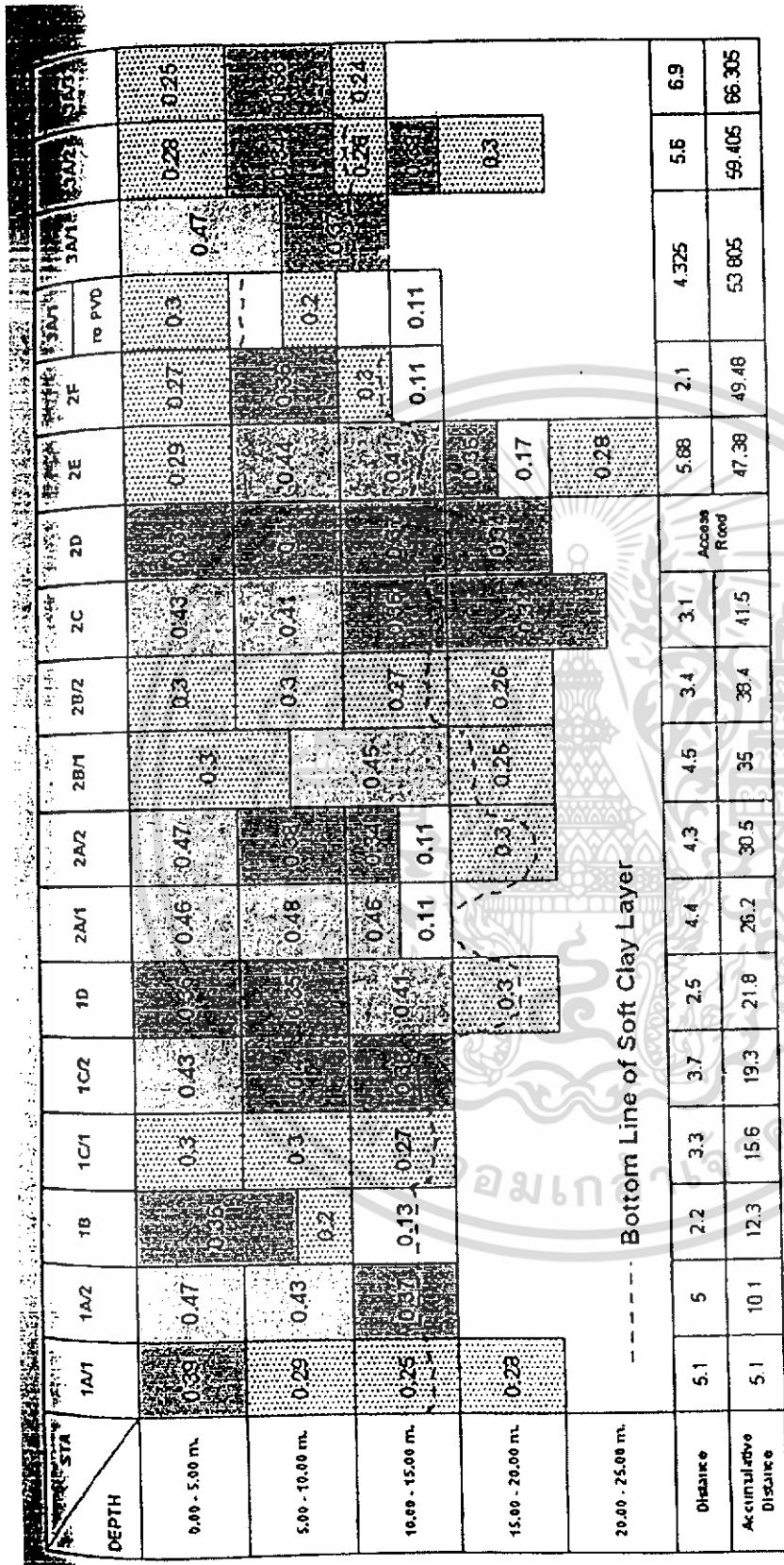


รูปที่ 4.4 รูปตัดตามแนวราง และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ของถนนบางนา-บางปะกง (ปรับปรุงจาก ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2541)

(ปรับปรุงจาก ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2541)

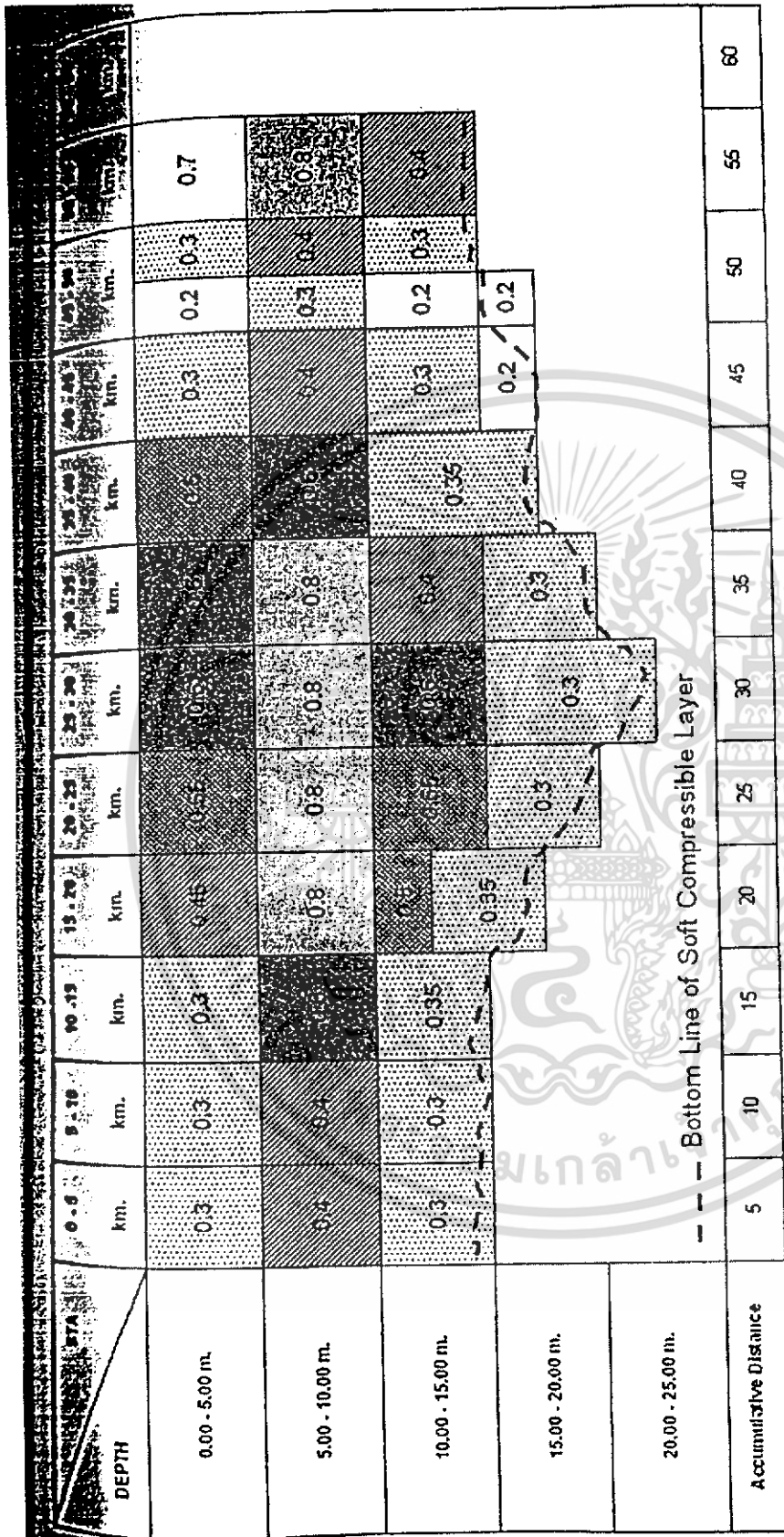


รูปที่ 4.5 รูปตัดตามแนวราง และบริเวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ของถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) (ปรับปรุงจาก ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2541)



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติการอัดตัวก้นน้ำ (CR, Compression Ratio) ตลอดความยาวของถนนสายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) (ปรับปรุงจาก Lin, 1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 คุณสมบัติการอัดตัวคาน้ำ ( CR, Compression Ratio ) ตลอดความยาวของถนนบางนา-บางปะกง ( Seah , 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3 พฤติกรรมทางวิศวกรรม ถนนบางนา-บางปะกง ( STA 29+992 )

การรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวและกำลังต้านแรงเฉือนของมวลดินฐานรากหลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพดินโดย Soil-Cement Column ของถนนสายบางนา-บางปะกง ได้รวบรวมจากจอมจันทร์หิรัญ ( 2543 ) โดยสรุปได้ดังนี้

##### 4. 3.3.1 พฤติกรรมทรุดตัว

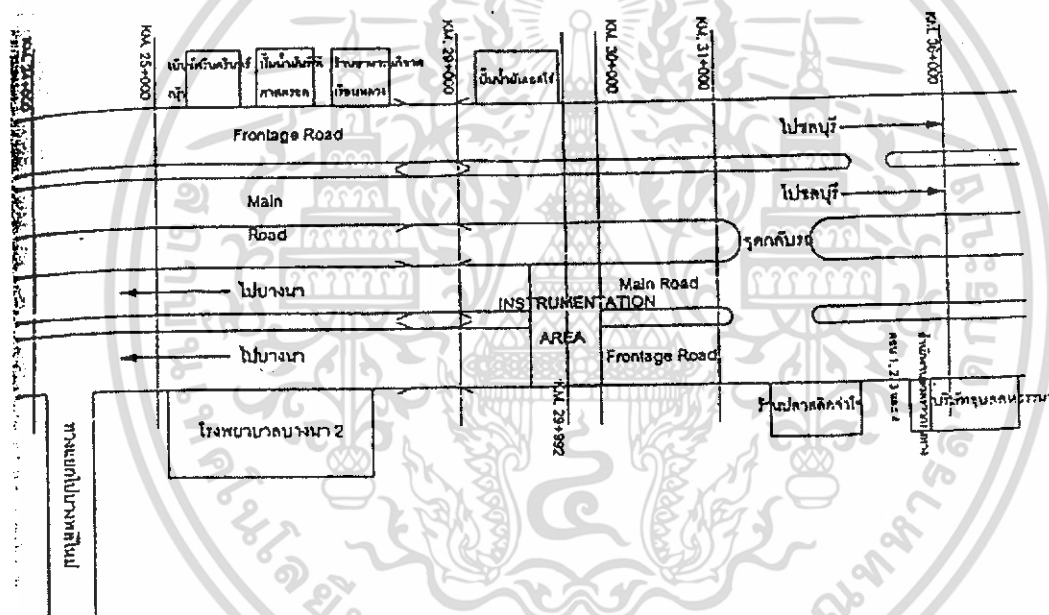
การตรวจวัดการทรุดตัวของ Soil-Cement Column ที่ STA 29+992 ดำเนินการโดยติดตั้ง Surface Settlement Plate ที่ระดับบนสุดของ Soil-Cement Column ( โดยวางไว้บนหัวของ Soil-Cement Column ) ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.9 จอมจันทร์หิรัญ ( 2543 ) แสดงผลจากการตรวจวัดการทรุดตัวหลังจากสิ้นสุดการปรับปรุงคุณภาพดิน และผลการคาดคะเนการทรุดตัว โดยวิธี Asaoka (1978) และ Broms and Boman (1975) ที่ระยะเวลาเดียวกัน พบว่า การคาดคะเนการทรุดตัว โดยวิธี Asaoka (1978) ให้ค่าเท่ากับ 24.02 ซม. ค่าการทรุดตัวจากการคาดคะเนโดยวิธี Broms and Boman (1975) เท่ากับ 16.4 ซม. ค่าการทรุดตัวจากการคาดคะเนโดยวิธี Poulos (1986) เท่ากับ 27.0 ซม. และค่าการทรุดตัวจากการคาดคะเนในกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพดินตามทฤษฎี One-Dimensional Consolidation ของ Trezaghi (1923) เท่ากับ 77.8 ซม. ผลการวิจัยของ จอม จันทร์หิรัญ (2543) แสดงให้เห็นว่าการคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธี Asaoka (1978) และวิธี Poulos (1975) มีค่าใกล้เคียงกับการทรุดตัวซึ่งวัดในสนามโดยวิธี Asaoka (1978) ให้ค่าใกล้เคียงมากที่สุด และถ้าเปรียบเทียบระหว่างการทรุดตัวของดินฐานรากที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงคุณภาพ และดินฐานรากที่มีการปรับปรุงคุณภาพ โดย Soil-Cement Column พบว่า Soil-Cement Column ช่วยลดการทรุดตัวได้ถึงประมาณ 3 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11

##### 4. 3.3.2 พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินใต้คันทาง

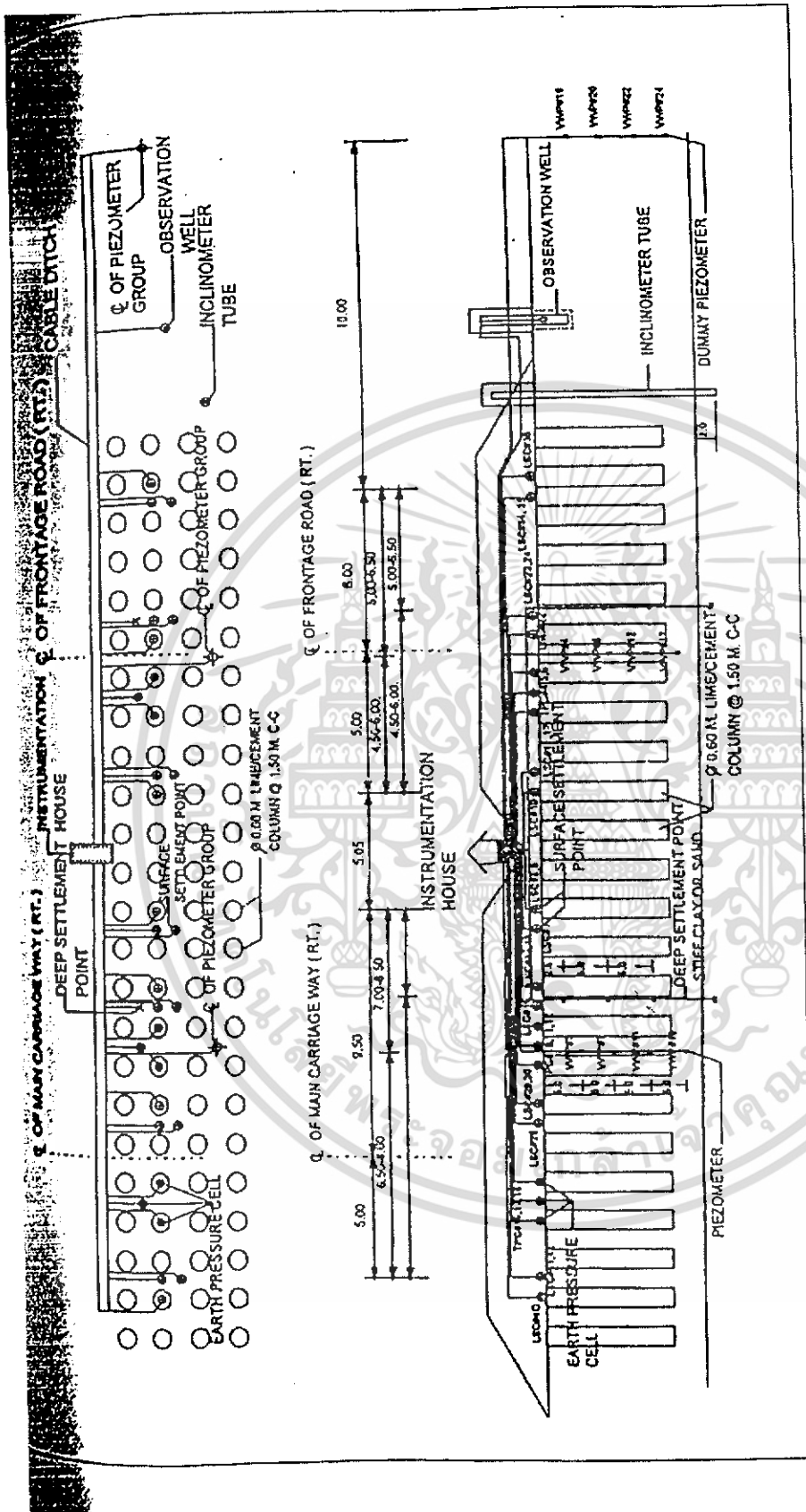
การตรวจวัดกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำก่อนการก่อสร้างได้ดำเนินการโดยทำการเก็บตัวอย่างดินและทำการทดสอบ Unconfined Compression ซึ่งพบว่า ที่ STA 24+000 ถึง 32+000 และระดับความลึกประมาณ 2 ถึง 16 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกประสิทธิผลของการปรับปรุงคุณภาพดิน ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยประมาณ 1.4 ตัน/ม.<sup>2</sup> ก่อนทำการก่อสร้าง

จริง ได้มีการทดสอบคุณภาพ Soil-Cement Column ในสนาม โดยการทำ Soil-Cement Column ตัวอย่าง ที่ กม. 28+000 ถึง 34+000 และ เจาะเก็บตัวอย่างเพื่อมาทดสอบ Unconfined Compression Test ทุกๆระยะ ความลึก 1 ม. ค่า Undrained Shear Strength ของตัว Soil-Cement ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 34 ตัน/ม.<sup>2</sup> ถึง 71 ตัน/ม.<sup>2</sup>

จอม จันทรหิรัญ (2543) ได้นำค่า Undrained Shear Strength ของตัว Soil-Cement Column (ใช้ค่าเท่ากับ 34 ตัน/ม.<sup>2</sup>) และ ของมวลดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงรอบ Soil-Cement Column (ใช้ค่าเท่ากับ 0.97 ตัน/ม.<sup>2</sup>) มาใช้คำนวณหา Undrained Shear Strength เหลือของมวลดินที่ถูกปรับปรุงภาพ ตามสมการที่ 2.28 ได้ค่าเท่ากับ 5.1 ตัน/ม.<sup>2</sup>



รูปที่ 4.8 พื้นที่ในการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนนบางนา-บางปะกง (จอม จันทรหิรัญ, 2543)



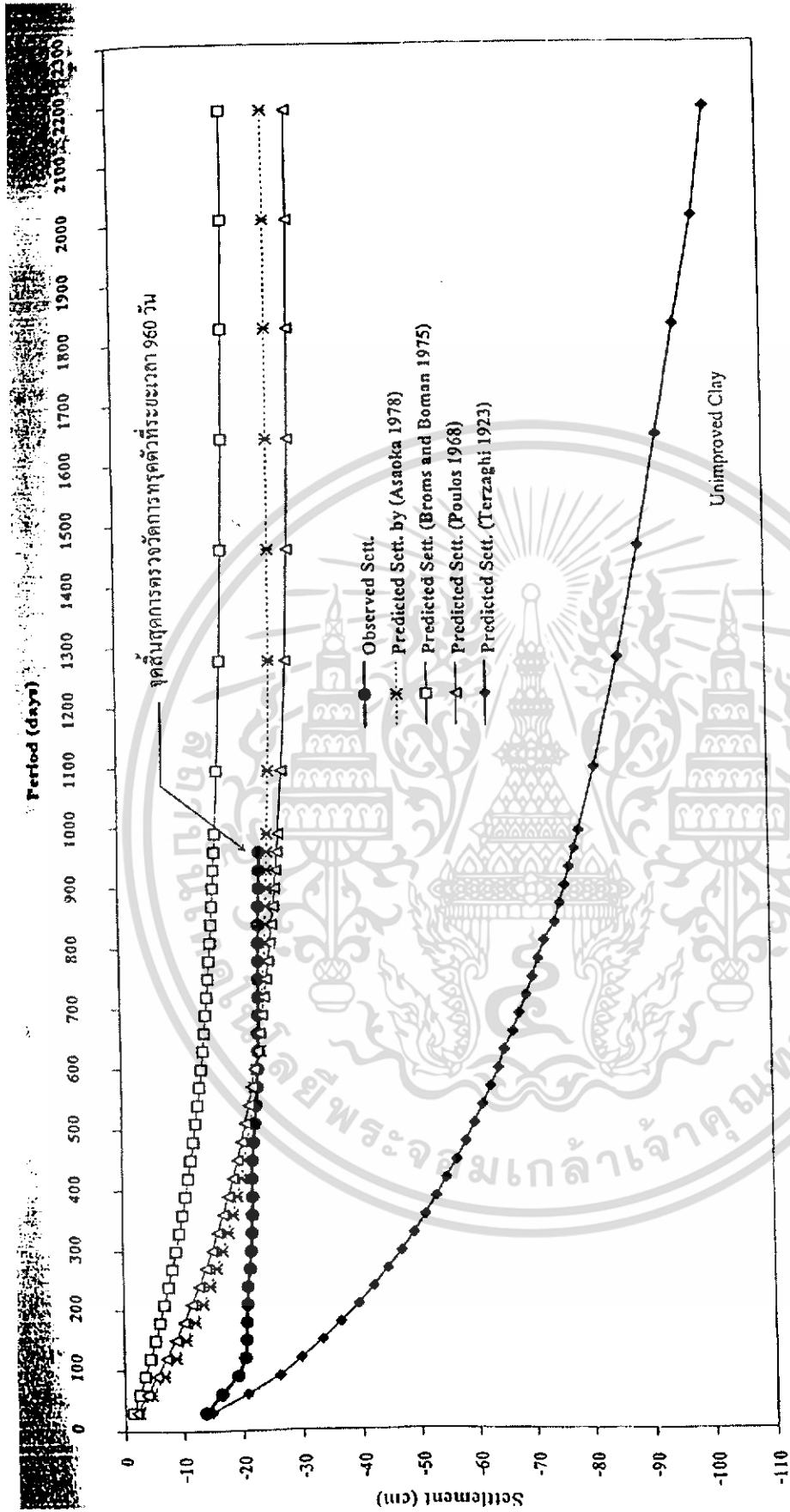
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนนบางนา-บางประกง (จอม จันทร์ทริญ 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 4.2 การทรุดตัวของถนน บางนา-บางปะกง STA 29+992 (จอม จันทรหิรัญ, 2543)

Period (days)	Observed Settlement (cm)	Predicted Settlement (cm)			
		Improved Soil			Unimproved Soil
		Asaoka 1978	Brom and Boman 1975	Poulos 1968	Terzaghi 1923
30	-13.7	-2.556	-1.388	-1.981	-14.703
60	-16.4	-4.684	-2.617	-3.871	-20.73
90	-19.17	-6.949	-3.625	-5.608	-26.21
120	-20.42	-8.852	-4.580	-7.254	-29.816
150	-20.69	-10.55	-5.469	-8.778	-33.354
180	-20.79	-12.083	-6.307	-10.211	-36.463
210	-20.93	-13.467	-7.071	-11.521	-39.465
240	-21.03	-14.716	-7.808	-12.771	-42.058
270	-21.45	-15.858	-8.484	-13.96	-44.529
300	-21.71	-16.876	-9.102	-15.027	-46.894
330	-21.87	-17.795	-9.658	-16.032	-49.094
360	-21.95	-18.652	-10.232	-16.997	-51.083
390	-22.02	-19.347	-10.754	-17.861	-52.997
420	-22.03	-20.06	-11.254	-18.715	-54.887
450	-22.05	-20.669	-11.707	-19.477	-56.646
480	-22.31	-21.22	-12.147	-20.208	-58.302
510	-22.59	-21.718	-12.551	-20.879	-59.815
540	-22.86	-22.167	-12.938	-21.519	-61.255
570	-23.11	-22.578	-13.286	-22.098	-62.722
600	-23.21	-22.944	-13.619	-22.647	-64.085
630	-23.26	-23.724	-13.937	-23.165	-65.086
660	-23.38	-23.572	-14.236	-23.652	-66.64
690	-23.39	-23.842	-14.503	-24.079	-67.834
720	-23.44	-24.088	-14.773	-24.506	-69.026
750	-23.54	-24.307	-15.025	-24.902	-70.153
780	-23.59	-24.506	-15.259	-25.268	-71.264
810	-23.64	-24.684	-15.472	-25.603	-72.336
840	-23.67	-24.846	-15.698	-25.938	-74.3
870	-23.77	-24.992	-15.903	-26.243	-75.195
900	-23.9	-25.125	-16.088	-26.518	-76.107
930	-23.98	-25.244	-16.259	-26.761	-76.946
960	-24.02	-25.351	-16.427	-27.005	-77.781
990		-25.448	-16.591	-27.249	-78.609
1095		-25.72	-17.078	-27.92	-81.441
1277		-26.012	-17.752	-28.804	-85.647
1460		-26.168	-18.244	-29.352	-89.322
1642		-26.253	-18.621	-29.748	-92.654
1825		-26.298	-18.907	-29.992	-95.832
2007		-26.322	-19.160	-30.145	-99.221
2190		-26.335	-19.356	-30.267	-101.527



รูปที่ 4.11 ค่าการทรุดตัวของถนนบางนา-บางปะกง STA 29+992 (วิเคราะห์จากข้อมูลของ จอม จันทร์ทริญ, 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. 3.3. 3 พฤติกรรมทางวิศวกรรมของ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใหม่ ) ( STA 24+000 )

ข้อมูลการทรุดตัวและกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของมวลดินของถนน กรุงเทพ-ชลบุรี ( สายใหม่ ) ถูกรวบรวมมาจาก นพพร สิตวรเวช ( 2545 ) และ Lin. ( 1999 ) โดยมี รายละเอียดดังนี้

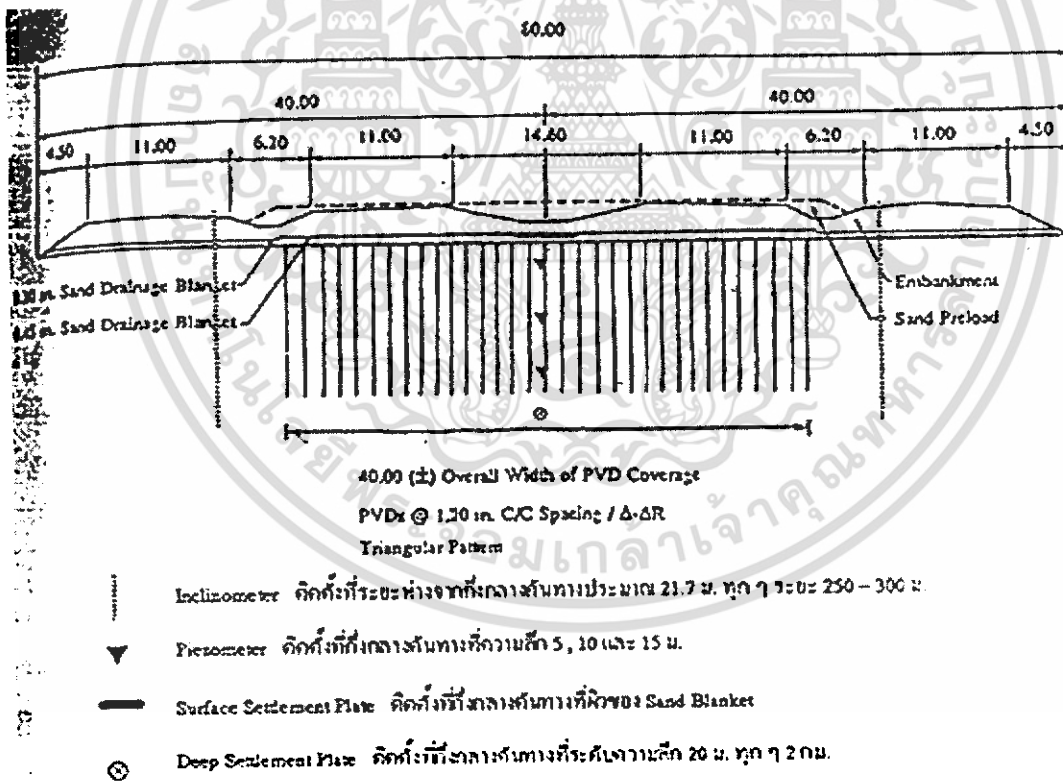
##### 4. 3.3. 3.1 พฤติกรรมทรุดตัว

การตรวจวัดการทรุดตัวดำเนินการโดยการติดตั้ง Surface Settlement Plate ที่ระดับผิวของ Sand Drainage Blanket ที่ตำแหน่งห่างจากกึ่งกลางคันทรายถม ( ขณะทำ Preloading คันทาง เดิมขณะก่อสร้าง ) ทุกๆ ระยะ 250 ถึง 300 เมตร หลังจากที่ดินนก่อสร้างเสร็จได้ทำการวัดการทรุดตัวที่ผิวที่ตำแหน่งเดิม ( Surface Settlement ) ซึ่งห่างจากกึ่งกลางของคันทางใหม่ประมาณ 10 เมตร ดังแสดง ในรูปที่ 4.12 โดยทำการตรวจวัดระดับของคันทางด้านซ้ายและขวา เทียบกับระดับคันทางตามแบบ ก่อสร้างโดยมีข้อมูลจากการตรวจวัดล่าสุด 2 ครั้ง คือ เดือนสิงหาคม 2542 และ เดือนกันยายน 2543 นพพร สิตวรเวช ( 2545 ) นำค่าการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัด ( Observed Settlement ) มาเปรียบเทียบกับ การทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน ( Surface Settlement ) โดยวิธี Finite Element ที่ระยะเวลา เดียวกัน

การคาดคะเนการทรุดตัวด้วย Finite Element นพพร สิตวรเวช ( 2545 ) ใช้โปรแกรม Plaxis วิเคราะห์แบบ 2-D Plane Strain Condition โดยมีเงื่อนไขว่า ไม่มีการเคลื่อนตัวของดินใน แนวราบที่ขอบคันทาง และไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้งที่ฐานของคันทาง นอกจากนี้ ยัง กำหนดขอบเขตที่ผิวดินและคันทาง และขอบเขตล่างของแบบจำลอง เป็น Free Drainage Boundary และขอบด้านซ้ายและขวาเป็น Impermeable Boundary สำหรับการจำลองดิน ใช้หลักการ Critical State Soil ในการกำหนดคุณสมบัติของดิน โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ในแนวราบเท่ากับ 2 เท่าของ สัมประสิทธิ์ความชื้นได้ในแนวตั้ง บริเวณที่ติดตั้ง PVD นั้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้เท่ากับ 100 เท่า ของ สัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของดินเดิม

จากข้อมูลการตรวจวัดการทรุดตัวและการคาดคะเนการทรุดตัวที่ STA 24+000 ดัง แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13 นพพร สิตวรเวช ( 2545 ) พบว่า การทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน

โดยวิธี Finite Element จะมีค่าสูงกว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม โดยในช่วงแรกการทรุดตัวในสนามจะเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากอิทธิพลของ Stress History Smear Effect ความหนาที่ไม่เพียงพอของ Sand Drainage Blanket Layer และ การเปลี่ยนแปลงสภาพ Over Consolidation Ratio (OCR) ของมวลดิน หลังจากถนนได้เปิดใช้งาน ได้ทำการวัดการทรุดตัวในสนามอีก 2 ครั้ง ( ในเดือน สิงหาคม 2542 และ กันยายน 2543 ) พบว่า ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนามมีความใกล้เคียงกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณจากวิธี Finite Element โดยมีความสอดคล้องกันประมาณร้อยละ 95 การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อเดือน สิงหาคม 2542 และ กันยายน 2543 เท่ากับ 336.4 ซม. และ 340.7 ซม. ตามลำดับ ส่วนการทรุดตัวที่ได้จากการภาคคะเน มีค่า เท่ากับ 356.8 ซม. และ 357.2 ซม. ตามลำดับ ซึ่งการทรุดตัวดังกล่าวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ ความหนาของชั้นดินอ่อนมีมากขึ้นและส่งผลให้ ความยาวของ PVD เพิ่มขึ้น และเมื่อสภาพการอัดตัวของมวลดิน (OCR) ลดลง ดังจะเห็นได้จากการทรุดตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อห่างจากกรุงเทพฯ เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนาของชั้นดินอ่อนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมของถนน-ชลบุรี สายใหม่

#### 4. 3.3. 3.2 พฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนของดินใต้คันทาง

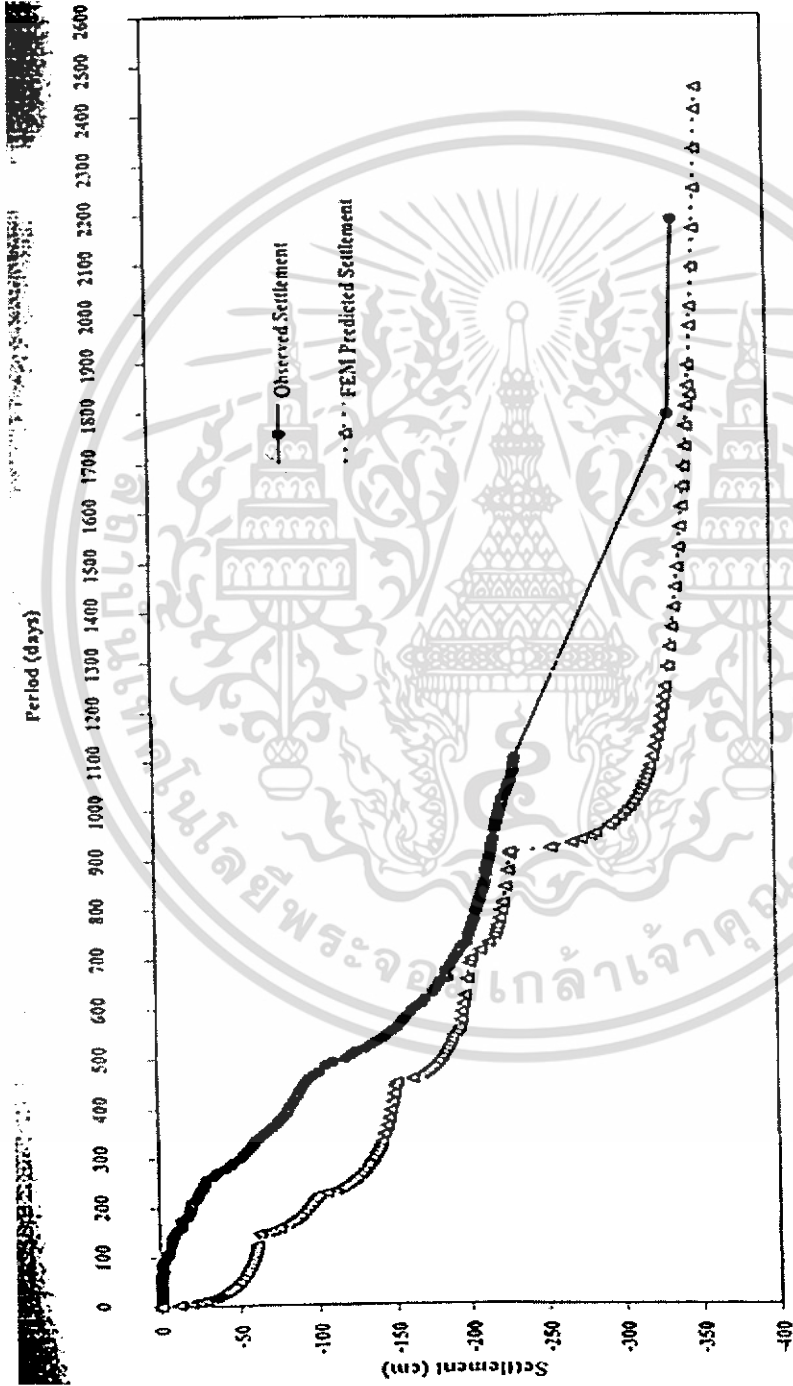
ข้อมูลกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของมวลดินได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test และจากการคาดคะเนโดยวิธี Stress History and Normalized Soil Engineering Properties หรือ SHANSEP (Ladd and Foott, 1974) และวิธี Stamatopoulos and Kotzias (1985) ที่กึ่งกลางคันทาง ทุกๆ ระดับ 1.00 เมตร จากระดับผิวดินเดิม จนถึงชั้น Medium to Stiff Clay โดยทำการทดสอบก่อนเริ่มการก่อสร้าง และหลังจากการก่อสร้างถนนเสร็จ 3 ครั้ง คือ เดือนพฤศจิกายน 2541 เดือนสิงหาคม 2542 และเดือนกุมภาพันธ์ 2544 นพพร สิตวรเวศย์ (2545)

นพพร สิตวรเวศย์ (2545) ศึกษาผลการตรวจวัดค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่ STA 24+000 และพบว่ามวลดินมีความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงขึ้นหลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดย PVD ดังแสดงตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 กล่าวคือ ก่อนการปรับปรุงคุณภาพดินโดย PVD มวลดินมีกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยตลอดความลึก ( ตั้งแต่ระดับผิวดินเดิมจนถึง ความลึกประมาณ 14 เมตร ) ประมาณ 1.5 ตัน/ม.<sup>2</sup> แต่เมื่อผ่านการปรับปรุงดิน ( เป็นเวลา ประมาณ 2 ปี ) ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ กำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยตลอดความลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 2.8 ตัน/ม.<sup>2</sup> สำหรับการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจาก Field Vane Shear Test และการคาดคะเนโดยวิธี SHANSEP (Ladd and Foott, 1974) และวิธี Stamatopoulos and Kotzias (1985) พบว่า ในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก ( Very Soft Clay ) ตั้งแต่ระดับความลึก ประมาณ 3-8 เมตร มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 ตัน/ม.<sup>2</sup> จากการทดสอบ Field Vane Shear Test การคาดคะเนโดยวิธี SHANSEP (Ladd and Foott, 1974) ให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย ประมาณ 2.6 ตัน/ม.<sup>2</sup> และการคาดคะเนโดยวิธี Stamatopoulos and Kotzias (1985) ให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย ประมาณ 2.1 ตัน/ม.<sup>2</sup> แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้การคาดคะเนโดยวิธี SHANSEP (Ladd and Foott, 1974) ให้ผลลัพธ์ที่ดีถ้าใช้กับชั้นดินเหนียวอ่อนมาก แต่ถ้าพิจารณาในชั้นดินเหนียวอ่อน ( Soft Clay ) ตั้งแต่ความลึก 9-14 เมตร พบว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย มีค่า ประมาณ 3 ตัน/ม.<sup>2</sup> ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย จากการคาดคะเนโดยวิธี SHANSEP (Ladd and Foott, 1974) ประมาณ 3.4 ตัน/ม.<sup>2</sup> และค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยจากการคาดคะเนโดยวิธี Stamatopoulos and Kotzias (1985) ให้ค่ากำลังประมาณ 2.1 ตัน/ม.<sup>2</sup> แสดงว่าในกรณีนี้ การคาดคะเนกำลังต้านแรงเฉือนในชั้นดินอ่อนโดยวิธี SHANSEP (Ladd and Foott, 1974)

ตารางที่ 4.3 การทรุดตัวของถนน กรุงเทพ-ชลบุรี (สายใต้ใหม่) STA 24+000 (นพพร สิตวาทย์, 2545)

Observed Settlement					Predicted Settlement (by FEAS)			
Fill Height (cm)	Settlement (cm)	Period (days)	Fill Height (cm)	Settlement (cm)	Period (Days)	Uy (cm)	Period (Days)	Uy (cm)
0	0.00	516	270	-125.4	0	0.0	505	-182.4
30	-0.20	522	270	-131.2	3	-11.4	514	-184.3
30	-0.30	530	270	-135.2	6	-19.0	522	-186.0
30	-0.40	537	270	-138.6	9	-24.2	530	-187.6
30	-0.10	544	285	-142.8	12	-28.0	538	-189.0
30	-0.10	551	285	-145.9	16	-31.9	546	-190.2
30	-0.10	558	285	-148.9	18	-33.5	554	-192.4
50	-0.40	565	285	-152.5	20	-35.1	562	-194.2
50	-0.40	572	285	-154.4	22	-36.5	578	-195.8
50	-0.30	579	285	-156.7	24	-37.8	594	-195.8
50	-0.30	586	285	-158.6	26	-39.1	610	-197.1
50	-0.20	596	285	-161.9	28	-40.3	626	-198.3
50	-0.40	600	285	-162.7	30	-41.3	659	-200.2
50	-0.60	607	285	-165.7	34	-43.3	691	-201.8
50	-0.60	614	285	-169.5	38	-45.0	700	-202.7
50	-1.50	621	285	-171.4	42	-46.6	716	-208.9
50	-1.40	635	285	-176.8	46	-48.1	732	-214.4
50	-1.20	642	285	-178.8	50	-49.4	748	-218.2
95	-2.00	649	285	-180.5	58	-51.6	756	-219.2
95	-3.50	656	285	-182.0	67	-53.4	765	-220.1
95	-5.10	663	285	-187.2	75	-54.9	781	-221.7
95	-5.90	670	285	-185.8	83	-56.2	797	-223.0
95	-7.10	677	285	-185.8	91	-57.4	813	-224.1
95	-7.50	684	285	-188.4	99	-58.4	845	-225.9
95	-7.90	691	285	-189.5	107	-59.3	877	-227.4
95	-9.30	699	285	-191.5	115	-60.1	910	-228.7
115	-11.20	706	285	-192.9	123	-60.7	915	-228.8
115	-13.90	713	285	-194.5	147	-62.5	923	-255.5
135	-14.40	720	285	-195.8	150	-68.1	933	-269.4
135	-14.20	727	285	-197.2	153	-71.3	939	-275.7
135	-17.60	733	285	-200.1	157	-75.0	946	-281.7
135	-19.00	747	285	-201.4	165	-80.4	951	-285.2
135	-19.20	754	285	-202.1	171	-83.5	966	-293.7
135	-20.70	761	285	-203.3	175	-85.4	974	-297.1
135	-20.50	768	285	-203.7	179	-87.0	984	-301.0
150	-23.50	775	285	-204.5	183	-88.6	994	-304.3
150	-24.70	782	285	-205.5	191	-91.2	1004	-307.2
165	-25.10	796	285	-206.7	199	-93.5	1014	-309.7
165	-26.30	803	285	-207.6	207	-95.6	1024	-311.9
165	-27.70	810	285	-208.1	215	-97.4	1034	-313.8
165	-28.50	817	285	-209.1	219	-98.2	1044	-315.4
180	-29.10	824	285	-209.3	224	-99.8	1054	-317.0
180	-30.20	831	285	-210.3	228	-105.1	1064	-318.3
195	-34.60	838	285	-210.8	234	-111.3	1074	-319.6
195	-37.10	845	285	-211.8	238	-114.1	1084	-320.7
195	-41.80	856	285	-212.7	240	-115.3	1104	-322.7
195	-45.20	873	285	-213.7	244	-117.5	1124	-324.4
195	-47.40	880	285	-213.8	248	-119.5	1144	-326.0
195	-51.20	887	285	-214.3	252	-121.3	1164	-327.4
195	-52.90	894	285	-214.9	256	-122.9	1185	-328.6
195	-55.20	901	285	-215.9	260	-124.5	1205	-329.8
195	-57.50	908	285	-216.2	268	-127.2	1225	-330.9
195	-59.40	915	295	-216.9	276	-129.5	1245	-331.9
195	-60.90	922	295	-217.2	285	-131.6	1285	-333.7
195	-63.80	927	295	-217.2	293	-133.6	1325	-335.4
195	-66.90	934	295	-217.7	297	-134.5	1365	-336.9
195	-69.50	941	295	-218.5	301	-135.3	1405	-338.3
195	-72.40	962	295	-219.6	309	-136.9	1445	-339.6
195	-75.10	969	295	-220.2	317	-138.3	1485	-340.8
195	-76.90	975	295	-220.6	325	-139.6	1525	-342.0
195	-78.90	982	295	-221.4	333	-140.8	1566	-343.1
195	-81.20	989	295	-222.0	349	-142.8	1606	-344.1
195	-82.10	996	230	-222.5	365	-144.5	1646	-345.0
195	-83.10	1003	230	-223.3	381	-146.1	1686	-346.0
195	-84.80	1010	230	-223.9	397	-147.3	1726	-346.9
195	-86.20	1017	230	-224.6	414	-148.5	1766	-347.7
195	-87.70	1024	230	-225.0	430	-149.4	1806	-348.5
195	-89.00	1036	250	-227.2	446	-150.3	1846	-349.2
195	-90.30	1045	250	-228.1	453	-151.5	1887	-349.9
195	-91.80	1053	250	-229.0	461	-162.2	1827	-350.6
195	-93.20	1060	270	-230.1	469	-168.6	1967	-351.3
210	-95.10	1074	270	-231.3	473	-170.9	2007	-351.9
225	-98.30	1081	270	-232	477	-172.9	2087	-353.1
225	-101.6	1088	270	-232	481	-174.6	2167	-354.1
240	-106.5	1095	270	-232.5	485	-176.2	2248	-355.1
240	-111	1105	270	-233.1	489	-177.7	2328	-356
255	-118.9	1792	295	-336.4	493	-179.0	2408	-356.8
270	-122.5	2187	295	-340.7	497	-180.2	2451	-357.2

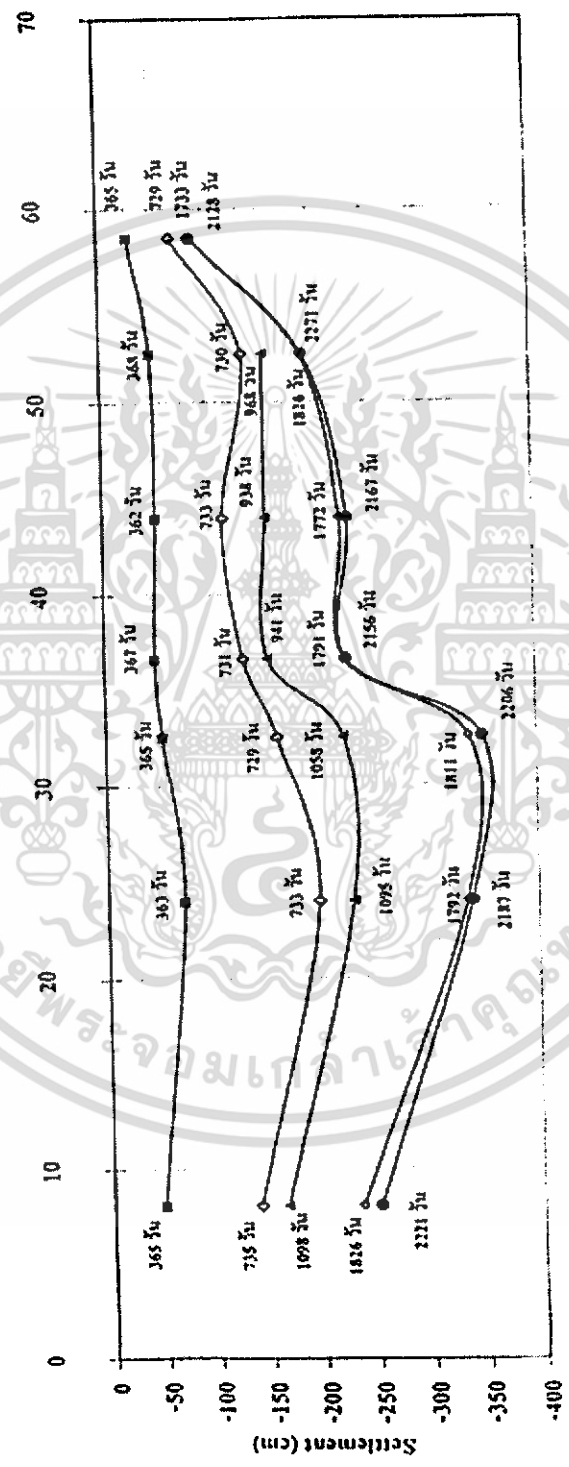
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่าการทรุดตัวของถนน สายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใต้ใหม่) STA 24+000 (วิเคราะห์จากข้อมูลของ นพพร สิตวรเวศย์, 2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กม.ที่ 8+075	กม.ที่ 24+000	กม.ที่ 32+500	กม.ที่ 36+600	กม.ที่ 43+950	กม.ที่ 52+500	กม.ที่ 58+500
Period	363	365	367	362	368	365
settlement	-49	-72.4	-48.2	-50.8	-48.3	-28
Period	735	733	731	733	730	729
settlement	-140.4	-200.1	-132.5	-115	-135.9	-69.3
Period	1098	1095	941	938	968	-
settlement	-165.6	-232.5	-155.3	-155	-155.5	-
Period	1826	1792	1791	1772	1826	1733
settlement	-236.4	-336.4	-226.6	-225	-190	-87.4
Period	2221	2187	2156	2167	2271	2128
settlement	-252.5	-340.7	-229	-232	-192.6	-88.3



รูปที่ 4.14 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นแปรผันตามระยะในแต่ละ Station ของถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่)

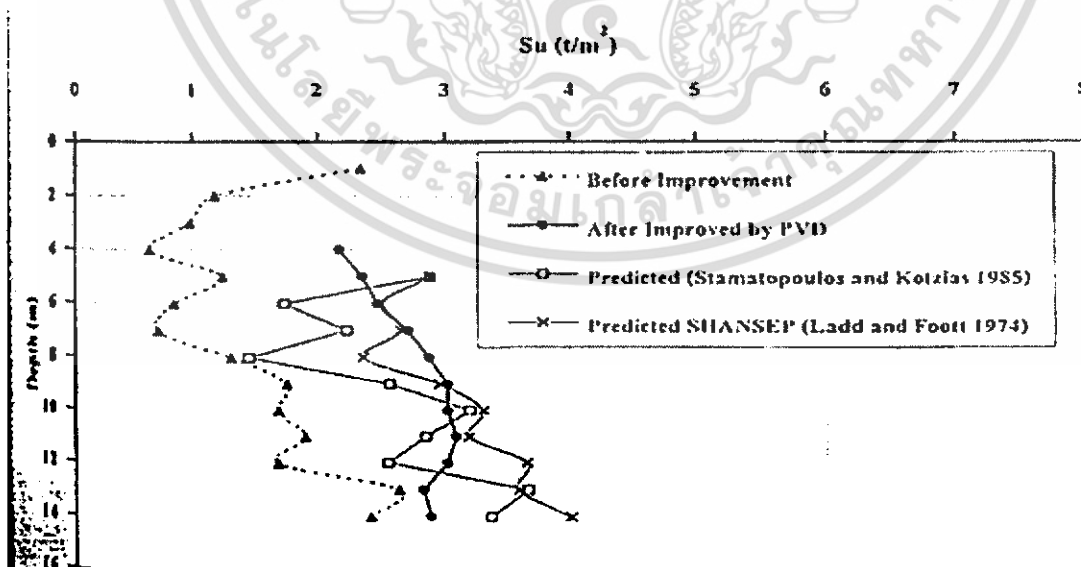
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

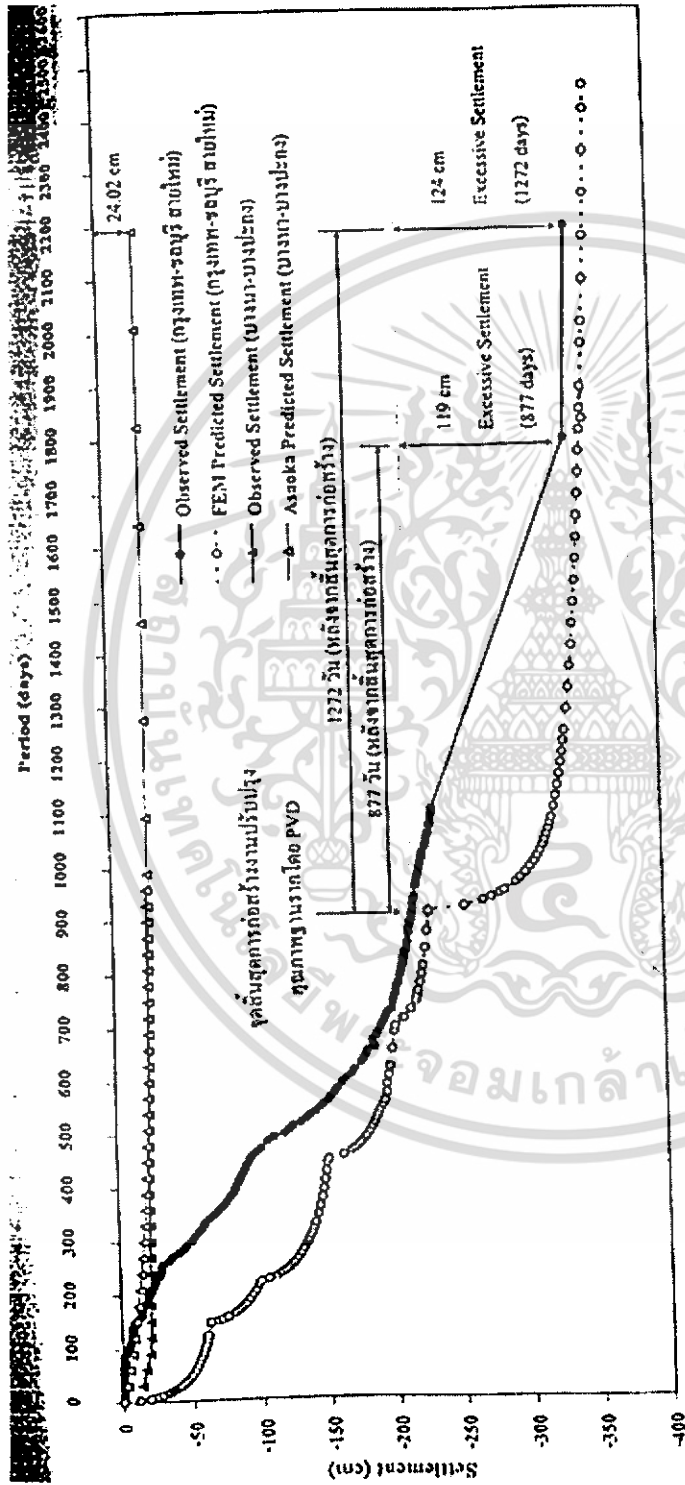
ตารางที่ 4.4 ค่า Undrained Shear Strength ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงฐานรากโดยวิธี PVD ของถนนสายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) STA 24+000 (วิเคราะห์จากข้อมูลของ นพพร สิตวรเวชย์, 2545)

Depth (m)	Measurement		Predicted			
	$S_u$		Stamatopoulos and Kotzias (1985) ( $U/m^2$ )	SIHANSEP (1974)		
	Before Improved ( $U/m^2$ )	After Improved ( $U/m^2$ )		average ( $U/m^2$ )	upper ( $U/m^2$ )	lower ( $U/m^2$ )
1	2.34					
2	1.18					
3	0.98					
4	0.65	2.17				
5	1.24	2.35	2.88	2.88	4.03	2.07
6	0.85	2.47	1.73	2.49	3.49	1.79
7	0.72	2.7	2.23	2.65	3.71	1.91
8	1.31	2.87	1.45	2.36	3.3	1.7
9	1.75	3.01	2.56	2.95	4.13	2.12
10	1.68	3.01	3.19	3.3	4.62	2.38
11	1.9	3.08	2.84	3.18	4.45	2.29
12	1.68	3.01	2.55	3.65	5.11	2.63
13	2.63	2.82	3.66	3.58	5.01	2.58
14	2.41	2.88	3.36	4	5.6	2.88

พื้นดินเหนียวอ่อนที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ประมาณ 1.8 เท่า

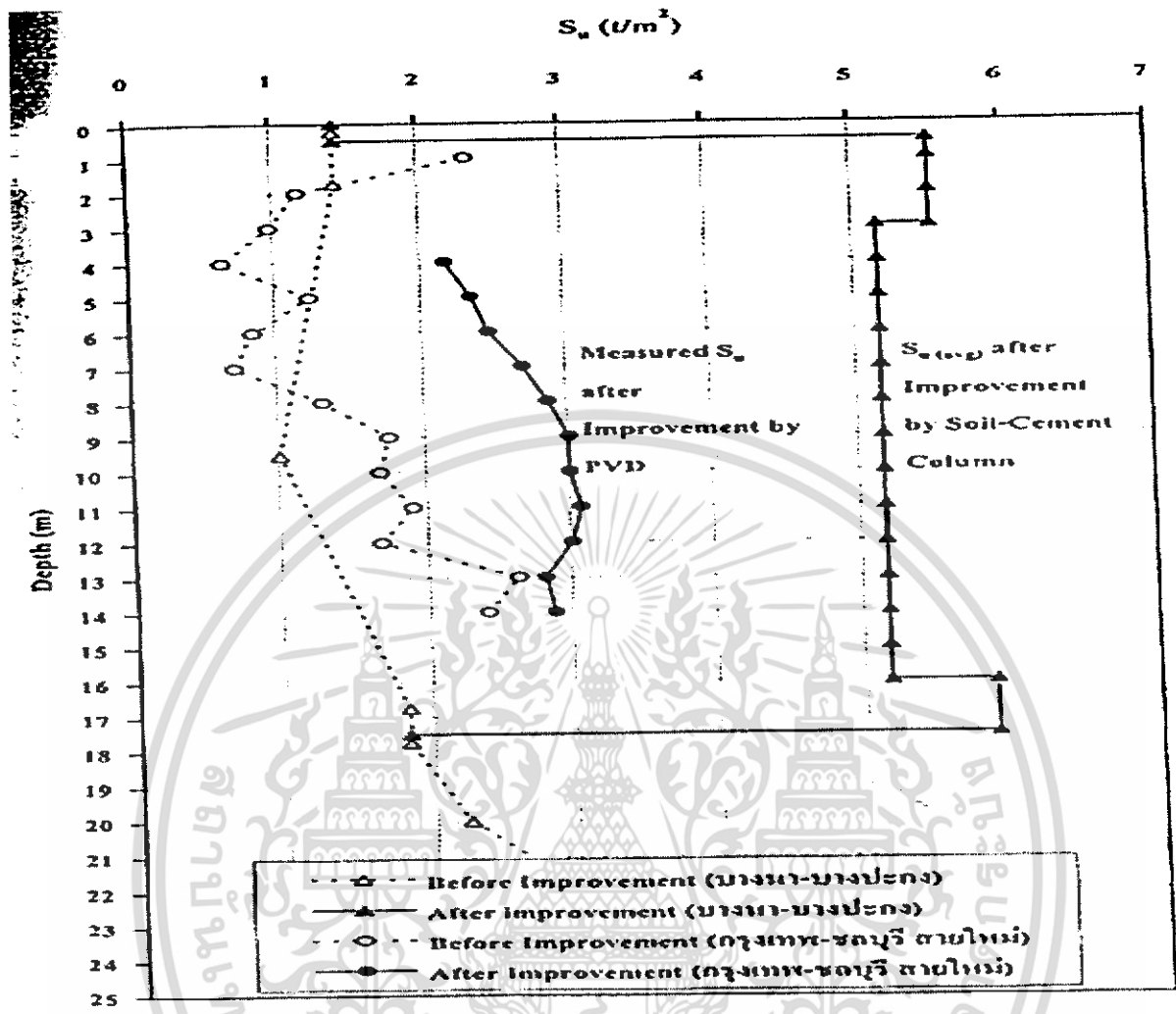
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained Shear Strength ต่อความลึก ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงฐานรากโดยวิธี PVD ของถนนกรุงเทพ-ชลบุรีสายใหม่ STA 24+000 (วิเคราะห์จากข้อมูลของ นพพร สิตวรเวชย์, 2545)





รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการทรุดตัวระหว่าง ถนนบางนา-บางปะกง (STA 29+992) กับ ถนนกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) (STA 24+000) (วิเคราะห์จากข้อมูลของ จอม จันทร์หิรัญ, 2543 และ นพพร สิวาววศย์, 2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบ Undrained Shear Strength ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงฐานรากของถนน ทั้ง 2 สาย ( วิเคราะห์จากข้อมูลของ จอม จันทร์หิรัญ, 2543 และ นพพร สิตวรเวศย์, 2545 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การเปรียบเทียบข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของการดำเนินการโครงการในเชิงของความสัมพันธ์ในการลงทุน โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อมแล้วจึงทำการเปรียบเทียบถึงผลกระทบด้านบวกและด้านลบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการ ซึ่งจะพิจารณาจากคุณค่าของโครงการที่มีต่อสังคมโดยรวมอันเป็นเป้าหมายที่รัฐบาลควรตระหนักถึงสื่อประเมินโครงการ เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดจากการลงทุน ซึ่งในการปฏิบัตินั้นการประเมินความเหมาะสม โครงการมักจะมีข้อจำกัด ทำให้พิจารณาได้เพียงผลกระทบบางประเด็นเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบบางอย่างไม่สามารถประเมินเป็นค่าทางเศรษฐกิจได้ ดังนั้นผลการประเมินทางด้านเศรษฐกิจที่ได้จึงควรนำมาพิจารณาประกอบกับการวิเคราะห์เกี่ยวกับผลกระทบด้านอื่นๆ ที่เกิดจากโครงการ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ผลกระทบเชิงเศรษฐกิจ ผลภาวะ ระหว่างและภายหลังการก่อสร้างสื่อสร้างความมั่นใจว่าผลกระทบที่สำคัญทั้งหลายซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้จะได้รับการพิจารณาด้วย

การศึกษาครั้งนี้ได้วางกรอบการศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดย PVD และ Soil-Cement Column โดยการเสนอแนะแนวทางการประมาณผลประโยชน์ และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการดำเนินการของแต่ละวิธี

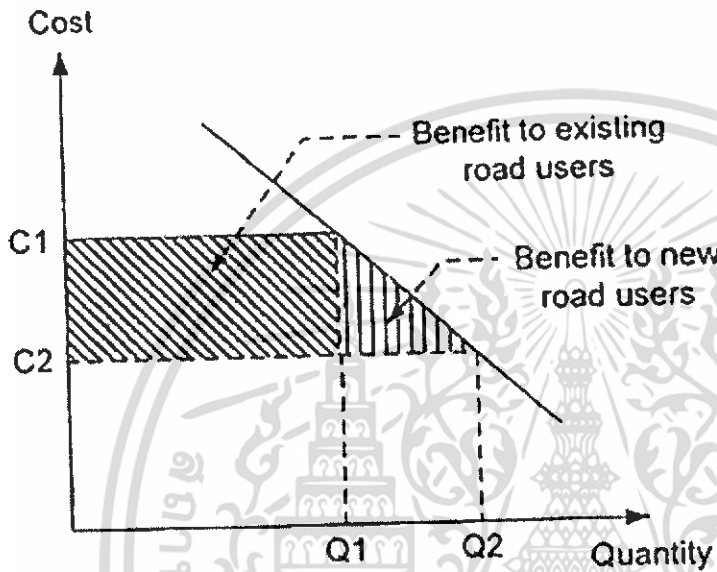
##### 4.4.1 การประมาณผลประโยชน์

โดยทั่วไปแล้วประโยชน์ของโครงการก่อสร้างและซ่อมแซมถนนรวมถึงประโยชน์ต่อทั้งผู้ที่ให้บริการโดยตรงและผู้ที่ให้บริการ ดังนั้นการประมาณค่าดังกล่าวจึงไม่สามารถกระทำได้ง่าย ในการประเมินความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์นั้น มักจะจำกัดการพิจารณาเฉพาะแต่ประโยชน์ที่เกิดขึ้นกับผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงการเดินทาง ซึ่งหมายถึงผู้ใช้ถนน ประโยชน์ที่ได้รับคือ ช่วยลดเวลาในการเดินทาง และประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้รถยนต์ โดยการวิเคราะห์ประโยชน์จะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

จากทฤษฎีทางเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับอุปสงค์-อุปทาน ผลประโยชน์โครงการที่ทำให้เกิดการลดค่าใช้จ่ายรวมของการเดินทางของผู้ใช้ถนนนั้นสามารถวัดจากผลของโครงการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงในส่วนของประโยชน์ส่วนเกินที่ผู้บริโภคได้รับจากการบริโภคได้รับการบริโภคสิ่งของหรือใช้บริการ ( Changes in Consumer Surplus ) ซึ่งในทางทฤษฎี ค่าใช้จ่ายรวม

ครอบคลุมทั้งค่าใช้จ่ายในการใช้พยาน และมูลค่าเวลา และประโยชน์ส่วนเกินที่ผู้บริโภครได้รับจากการบริโภคสิ่งของหรือใช้บริการส่วนต่างของราคาที่ผู้บริโภครตั้งใจจะจ่ายกับราคาที่จ่ายจริง

ในกรณีของโครงการก่อสร้างและซ่อมแซมถนน การเปลี่ยนแปลงของประโยชน์ส่วนเกินที่บริโภครได้รับอันเนื่องมาจากการดำเนินโครงการ เกิดจากการที่ค่าใช้จ่ายรวมในการเดินทางลดลงจากระดับ C1 เป็น C2 ซึ่งคือพื้นที่แรเงาในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การประมาณผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้งาน

1) ประโยชน์ที่เกิดกับผู้เดินทางเดิมที่มีอยู่ ซึ่งคิดเป็นปริมาณการเดินทาง Q1 เทียบ การลดค่าใช้จ่ายจาก C1 เป็น C2 ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้เดินทางกลุ่มนี้  $Q1 * (C1 - C2)$  หรือพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูป

2) ประโยชน์ที่เกิดจากการที่มีผู้หันมาเดินทางเพิ่ม เนื่องจากค่าใช้จ่ายลดลง คิดเป็นจำนวนปริมาณการเดินทางที่เพิ่มขึ้น  $Q2 - Q1$  ประโยชน์ที่ได้รับในส่วนนี้คือพื้นที่สามเหลี่ยมแรเงา ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(1 * (Q2 - Q1) * (C1 - C2)) / 2$

โดยทั่วไปผลประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการก่อสร้างและซ่อมแซมถนน ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายที่ลดลงของการใช้พยาน ( Vehicle Operating Costs, VOS ) และระยะเวลาการเดินทางที่

น้อยลง ( Value of Time, VOT ) โดยผลประโยชน์ของ โครงการคือ มูลค่าที่เกิดจากค่าใช้จ่ายทั้งสองที่ลดลงอันเนื่องจากการมีโครงการก่อสร้างนั้นๆ

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างมูลค่าในเดินทางเฉลี่ยต่อคันของถนนสายหนึ่ง

ประเภทรถ	ค่าเฉลี่ยรายได้ต่อชั่วโมง ( บาท/คน-ชม. )	ค่าเฉลี่ยผู้โดยสารต่อคัน ( คน/คัน )	มูลค่าเวลาต่อคัน ( บาท/คัน-ชม. )	สัดส่วนเทียบเท่ารถยนต์ส่วนบุคคล
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	41.20	1.56	64.30	0.61
จักรยานยนต์	16.60	1.31	21.75	0.05
แท็กซี่	29.10	1.86	54.12	0.24
รถโดยสารประจำทางไม่ปรับอากาศ	18.30	52.09	693.35	0.07
รถโดยสารประจำทางปรับอากาศ	37.30	40.59	1026.23	0.04
ค่าเฉลี่ยมูลค่าเวลา ( บาท/คัน-ชม. )			<b>136.54</b>	

การประเมินผลประโยชน์ในด้านการประหยัดเวลาในการเดินทางของผู้ใช้ยานพาหนะเนื่องจากการทำโครงการ คือความแตกต่างของมูลค่าที่เกิดจากระยะเวลาในการเดินทางรวมลดลงระหว่างกรณีที่มีโครงการและกรณีที่ไม่มีโครงการ ซึ่งสามารถคำนวณสมการที่ 6.1

$$\Delta VOT = (VOT \times VHT_{w/o \text{ project}}) - (VOT \times VHT_{w \text{ project}}) \quad (6.1)$$

#### 4.4.2 ผลประโยชน์ของการเปิดใช้งานเร็ว

เนื่องจากวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากทั้งสองวิธีไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างต่อการก่อสร้างชั้นทางและผิวทาง รวมทั้งคุณภาพการขับขี ( หากก่อสร้างสำเร็จสมบูรณ์ ) ดังนั้นทำให้ผลประโยชน์ที่ได้จากสองวิธีนี้มีความใกล้เคียงกัน หากแต่ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Soil-Cement Column มีระยะเวลาที่สั้นกว่า ทำให้งานก่อสร้างถนนเริ่มต้นได้เร็วกว่า และเปิดให้บริการแก่ประชาชนได้ก่อน

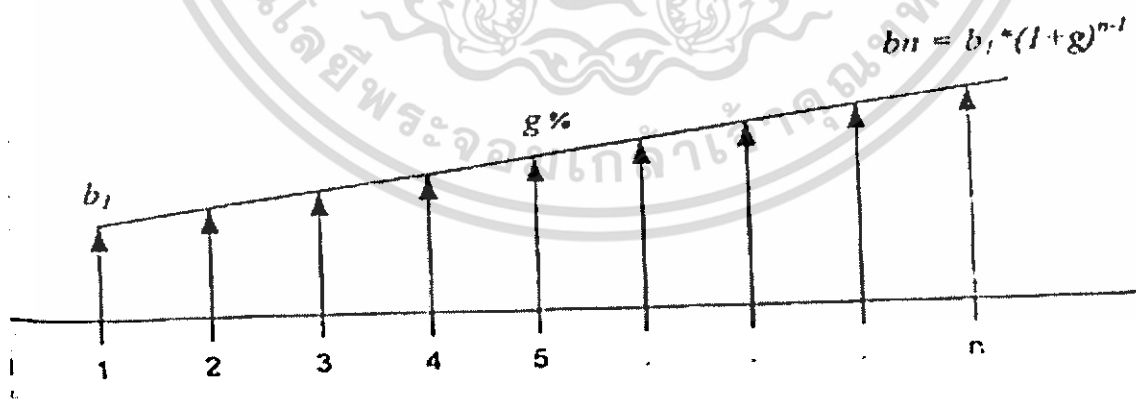
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 81 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้ Soil-Cement Column ในการปรับปรุงคุณภาพดิน สามารถทำให้ งานก่อสร้างถนนเริ่มต้นได้เร็วกว่า PVD จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพของดินที่ทำการปรับปรุง เนื่องจากระยะเวลาการก่อสร้างของงาน Soil-Cement Column จะค่อนข้างตายตัวและคาดการณ์ ได้ ส่วนระยะเวลาของการก่อสร้างวิธี PVD จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน และความลึกของชั้นดิน อ่อน การเริ่มต้นงานก่อสร้างถนนได้เร็วนี้ ทำให้สามารถให้บริการแก่ประชาชนได้อย่างเร็วขึ้น โดย ผลประโยชน์ที่ได้มีความแตกต่างในแต่ละเส้นทาง ขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรบนเส้นทางนั้นๆ

สำหรับถนนที่สร้างใหม่ ปริมาณการจราจรสามารถพยากรณ์ได้จากหลักการของ แบบจำลองชนิดต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน (แบบจำลองการเดินทาง แบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง) เพื่อหาปริมาณการบนแต่ละเส้นทางในโครงข่ายการขนส่งเมื่อมีเส้นทางเพิ่มขึ้น โดยข้อมูลพื้นฐาน ที่จำเป็นในการพยากรณ์ความต้องการการเดินทางได้แก่ จำนวนประชากร การจ้างงาน และรายได้

จากหลักการของแบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง ถ้าถนนที่สร้างใหม่สามารถ ดึงดูดปริมาณการจราจรได้มาก และมีความสามารถในการรับรองปริมาณการจราจรสูง ผู้ขับขีจาก เส้นทางอื่นหันมาเลือกใช้เส้นทางมาก ค่าใช้จ่ายในการเดินทางของเส้นทางเดิมที่มีอยู่จะลดลง ค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรวมของทั้งโครงข่ายลดลงตามไปด้วย และทำให้ผลประโยชน์ของการ มีโครงการมีมูลค่าสูง

รูปที่ 4.18 แสดงผลประโยชน์ที่ได้อันเนื่องมาจากค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่ลดลง เมื่อมีโครงการตลอดระยะเวลา n ปี โดยมีอัตราการเติบโต g% ต่อปี โดยอัตราการเติบโตดังกล่าว อาจกำหนดให้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเดินทางของทั้งโครงข่าย



รูปที่ 4.18 ผลประโยชน์ที่ได้อันเนื่องมาจากการลดลงของค่าใช้จ่ายในการเดินทางซึ่งมีอัตราเติบโต g% ต่อปี

สำหรับโครงการปรับปรุงซ่อมแซมถนนที่เสื่อมสภาพ

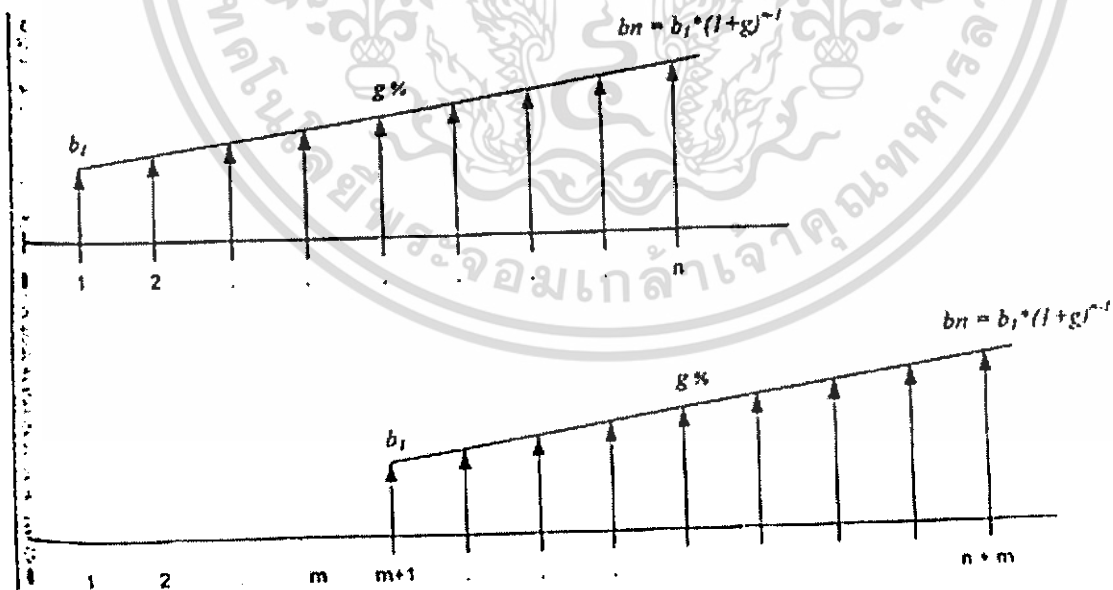
การวิเคราะห์หา

ผลประโยชน์จะใช้หลักการเดียวกับการก่อสร้างถนนเส้นทางใหม่ คือค่าใช้จ่ายการเดินทางที่ลดลง เมื่อมีถนนเส้นนั้นใช้งานโดยค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่มีถนนนั้นใช้งานจะถูกคำนวณจากปริมาณการจราจรปกติก่อนการแจกแจงการเดินทางเพื่อพยากรณ์ปริมาณการจราจรบนถนนแต่ละเส้นทางในกรณีไม่มีถนนที่พิจารณาเข้าให้บริการ

ถ้าถนนที่ทำการซ่อมแซมมีปริมาณการจราจรเดิมที่รองรับก่อนการก่อสร้างสูง

การปิดซ่อมแซมก่อนเสียต่อการจราจรบนเส้นทางข้างเคียงในโครงการขยับ เนื่องจากผู้ขับขี่อาจมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางไม่ว่าจะเนื่องจากเส้นทางเดิมถูกปิดให้แก่การซ่อมแซม หรือเพื่อหลีกเลี่ยงการจราจรที่ติดขัดเนื่องจากความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรที่ลดลง ปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าใช้จ่ายในการเดินทางบนเส้นทางเคียงเหล่านี้นั้นสูงขึ้น และทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรวมสูงขึ้นตามไปด้วย

การเลือกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีระยะเวลาการก่อสร้างที่สั้นกว่านั้น ทำให้งานก่อสร้างถนนเริ่มต้นได้เร็ว และเปิดให้บริการแก่ประชาชนได้ก่อน นั่นคือ ผลประโยชน์ที่จะได้จะเลื่อนเข้ามาเร็วขึ้นในทางเศรษฐศาสตร์ ผลประโยชน์ที่เท่ากันแต่ได้รับในเวลาอันใกล้ย่อมมีมูลค่าสูงกว่าผลประโยชน์ที่ได้รับในเวลาถัดไป รูปที่ 4.19 แสดงกระแสเงินสดของผลประโยชน์ที่เท่ากันแต่ได้รับในเวลาต่างกัน



รูปที่ 4.19 กระแสเงินสดของผลประโยชน์ที่เท่ากันแต่ได้รับ ณ เวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 83 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 กระแสเงินสดรูปบน ผลประโยชน์ที่ได้รับเริ่มต้นหลังกระแสเงินสดรูปล่างไป  $m$  ช่วงระยะเวลาผลประโยชน์จากการได้รับประโยชน์ขึ้นสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของทั้งสองกระแสเงินสดดังนี้

มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรูปบน ( ในกรณีนี้ อาจหมายถึงการเลือกปรับปรุงคุณภาพดินวิธี Soil-Cement Column )

$$PV_{\text{Soil-CementColumn}} = \frac{b_1}{r-g} \left[ 1 - \frac{(1+g)^n}{(1+r)^n} \right] \quad (6.2)$$

มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรูปล่าง ( ในกรณีนี้ อาจหมายถึงวิธี PVD )

$$PV_{\text{PVD}} = \frac{b_1}{r-g} \left[ 1 - \frac{(1+g)^n}{(1+r)^n} \right] \cdot \frac{1}{(1+r)^m} \quad (6.3)$$

โดย

$b_1$  = ผลประโยชน์ที่ได้รับในช่วงเวลาที่ 1

$r$  = อัตราดอกเบี้ยที่ใช้พิจารณา

$g$  = อัตราการเติบโตของผลประโยชน์ต่อช่วงระยะเวลา

$n$  = จำนวนช่วงระยะเวลาที่พิจารณา

$m$  = จำนวนช่องเวลาที่ถนนถูกเปิดใช้งานชั่วคราว อันเนื่องมาจากการ

เลือกใช้วิธี PVD

ผลประโยชน์ที่ได้จากการเลือกใช้วิธี Soil-Cement Column คิดเป็นมูลค่า

$$\begin{aligned} PV_{\text{Soil-CementColumn}} - PV_{\text{PVD}} &= \frac{b_1}{r-g} \left[ 1 - \frac{(1+g)^n}{(1+r)^n} \right] - \frac{b_1}{r-g} \left[ 1 - \frac{(1+g)^n}{(1+r)^n} \right] \cdot \frac{1}{(1+r)^m} \\ &= \frac{b_1}{r-g} \left[ 1 - \frac{(1+g)^n}{(1+r)^n} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{1}{(1+r)^m} \right] \end{aligned} \quad (6.4)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามูลค่าของผลประโยชน์ที่ได้รับเร็วขึ้นเนื่องจากการเลือกใช้วิธี Soil-Cement Column ขึ้นอยู่กับมูลค่าของประโยชน์จากการให้บริการของถนน อัตราที่เพิ่มขึ้นของประโยชน์นั้น ความแตกต่างของระยะเวลาก่อสร้าง และช่วงเวลาในการพิจารณาซึ่งผลประโยชน์ที่คำนวณได้จากสมการนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายของทั้งสองวิธีเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนต่อไป

#### 4.4.3 การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์จากค่าใช้จ่ายโครงการ

การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเข้ามาเป็นปัจจัยสำคัญในการเปรียบเทียบ วิธีการวิเคราะห์สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ( Net Present Value, NPV ) วิธีอัตราผลตอบแทน ( Internal Rate of Return, IRR ) การเปรียบเทียบความคุ้มค่าจากอัตราส่วนผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายโครงการ ( Benefit Cost Ratio, B/C ) โดยค่า NPV เป็นค่าของกระแสเงินสดในอนาคตที่คิดเทียบกลับมาในปัจจุบัน มูลค่าปัจจุบันที่เป็นบวกแสดงถึงกระแสเงินสดจากผลประโยชน์หรือรายได้สูงกว่าค่าใช้จ่าย ค่า IRR จะเป็นอัตราส่วนสุดท้ายที่ได้จากการกำหนดให้ค่า NPV เท่ากับศูนย์ การลงทุนที่ดีควรมีค่า IRR ที่สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยระยะยาว หรือค่า IRR ของโครงการอื่นๆ ส่วนใหญ่โครงการของรัฐกำหนดค่า IRR ขั้นต่ำไว้ที่ 12% ส่วน B/C เป็นอัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์ที่ได้รับและค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนโครงการ โดยปกติแล้วโครงการที่ให้ค่า B/C มากกว่าหนึ่ง จะพิจารณาคุ่มค่าต่อการลงทุน

สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างวิธี PVD และวิธี Soil-Cement Column สำหรับถนนสายหนึ่ง ผลประโยชน์ที่ได้จากการให้บริการการเดินทางของถนนจะพิจารณาเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะปรับปรุงฐานรากโดยเทคนิคใดก็ตาม ปัจจัยที่ต่างจึงเป็นปัจจัยราคาค่าใช้โครงการ ( พิจารณาผลประโยชน์จากการเปิดใช้เร็วของ Soil-Cement Column เป็นความสูญเสียหรือต้นทุนค่าเสียโอกาสของ PVD เพื่อให้ผลประโยชน์อย่างอื่นเท่ากัน ) ราคาค่าใช้โครงการในการเปรียบเทียบควรประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายและต้นทุนดังต่อไปนี้

ค่าใช้จ่ายโครงการ PVD = ต้นทุนค่าก่อสร้าง + ความสูญเสียอันเนื่องมาจากผลกระทบด้านการจราจรระหว่างการก่อสร้าง + ความสูญเสียผลประโยชน์จากการเปิดใช้งานช้า + ต้นทุนการบำรุงรักษาภายหลังการก่อสร้าง + ความสูญเสียระหว่างการใช้งานเนื่องจากการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้าง

ค่าใช้จ่ายโครงการ Soil-Cement Column = ราคาค่าก่อสร้าง + ความสูญเสียอันเนื่องมาจากผลกระทบด้านจรรยาบรรณระหว่างการก่อสร้าง + ต้นทุนการบำรุงรักษาภายหลังการก่อสร้าง + ความสูญเสียระหว่างการใช้งานเนื่องจากการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้าง

ต้นทุนค่าก่อสร้าง ( Construction Cost ) คือ ค่าใช้จ่ายในการสร้างและค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงฐานรากรวมถึงค่าขุดเขยอสังหาริมทรัพย์และค่าโยกย้ายสาธารณูปโภค เช่น ค่าใช้จ่ายในการจัดกรรมสิทธิ์ที่ดิน และ ค่าขุดเขยอปลุกสร้าง ซึ่งทั้ง PVD และ Soil-Cement Column มีขั้นตอนการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันและขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย เช่น ประเภทและคุณสมบัติของดิน ความลึกของชั้นดินอ่อน ซึ่งส่งต่ออัตราการทรุดตัวได้

จากการประเมินรายละเอียดด้านราคาก่อสร้าง โดยรวบรวมข้อมูลจากโครงการทางหลวงสาย บางนา-ชลบุรี ทางหลวงสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) โครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ และโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ สามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินโดยวิธี Soil-Cement Column มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าใช้ PVD อยู่ 2.0 และ 2.7 เท่า ขึ้นอยู่กับพิจารณาการทรุดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้างด้วยหรือไม่ การใช้ PVD ในกรณีที่ไม่นำมาพิจารณาการทรุดตัวของคันดินถม สัดส่วนค่าก่อสร้างจะมีค่าประมาณ 2.7 เท่า (Soil- Cement Column : PVD ) แต่กรณีที่คันดินมีการทรุดตัว ( ประมาณ 2.0 เมตร ตามข้อมูลการทรุดตัวระหว่างการก่อสร้างของกรมทางหลวง สายกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) ) แล้วใช้ดินถมกลับเพื่อให้ได้ระดับตามที่ออกแบบไว้จะมีสัดส่วนค่าก่อสร้างประมาณ 2.0 เท่า (Soil- Cement Column : PVD ) ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณค่าก่อสร้างต่อความยาวถนน 1 กม. ในตารางที่ 4.7 ถึง 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดการคำนวณค่าปรับปรุงดินโดยใช้ Soil- Cement Column

Soil-Cement Column ทางหลวงสาย บรมมา-บรมประกง (ความยาว 17.0 ม. Square Pattern ระยะห่าง 1.5 ม.)

ลำดับ	รายการ	ราคาหน่วย (บาท)	หน่วย	ปริมาณ/กม.	ราคารวม (บาท/กม.)
1	งานปรับพื้นที่	-	ม. <sup>2</sup>	-	-
2	งานขุดลอกหน้าดิน	-	ม. <sup>3</sup>	-	-
3	Working Platform 0.5 m	350.00	ม. <sup>3</sup>	20,000.00	7,000,000.00
4	งานเสาเข็มดินซีเมนต์	1,960.00	ม. <sup>3</sup>	86,562.72	169,662,933.96
5	Embankment Surcharge	350.00	ม. <sup>3</sup>	100,000.00	35,000,000.00
6	วัสดุสำหรับก่อสร้างคันถนน	-	ม. <sup>3</sup>	-	-
7	การเจาะเก็บตัวอย่าง และทดสอบค่ารับแรงเฉือน (ทุก 3,000 คม.)	60,000.00	ค้ำ	6.00	360,000.00
ราคารวมทั้งสิ้น					212,022,933.96

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดการคำนวณค่าปรับปรุงดินโดยใช้ PVD

ทางหลวงสายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) (ความยาว 12.0 ม. Square Pattern ระยะห่าง 1.2 ม.)

ลำดับ	รายการ	ราคาหน่วย (บาท)	หน่วย	ปริมาณ/กม.	ราคารวม (บาท/กม.)
1	งานปรับพื้นที่	-	ม. <sup>2</sup>	-	-
2	งานขุดลอกหน้าดิน	-	ม. <sup>3</sup>	-	-
3	Sand Blanket 0.4 m	450.00	ม. <sup>3</sup>	16,000.00	7,200,000.00
4	Working Platform 0.5 m	350.00	ม. <sup>3</sup>	20,000.00	7,000,000.00
5	Prefabricated Vertical Drains	25.00	ม. <sup>3</sup>	340,272.00	8,506,800.00
6	Embankment Surcharge 2.5 m	350.00	ม. <sup>3</sup>	100,000.00	35,000,000.00
7	Counterweight Surcharge	350.00	ม. <sup>3</sup>	24,000.00	8,400,000.00
8	Geotextile Reinforcement	100.00	ม. <sup>2</sup>	40,000.00	4,000,000.00
9	Geogrid Reinforcement	160.00	ม. <sup>2</sup>	40,000.00	6,400,000.00
10	วัสดุสำหรับก่อสร้างคันถนน	-	ม. <sup>3</sup>	-	-
11	งานทดสอบ และตรวจวัดพฤติกรรม	100,000.00	ค้ำแห่ง	1.00	100,000.00
ราคารวมทั้งสิ้น (เมื่อไม่พิจารณาจากการทรุดตัวของดินชั้นทรายระหว่างก่อสร้าง)					76,606,800.00
ราคารวมทั้งสิ้น (พิจารณาการทรุดตัวของทรายถมระหว่างก่อสร้าง 2.0 เมตร)					104,606,800.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 87 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูญเสียอันเนื่องมาจากผลกระทบด้านจราจรระหว่างการก่อสร้าง ( Traffic Impact Cost during Construction ) เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการก่อสร้างบนถนนเดิมที่เคยให้บริการการเดินทางและจำเป็นต้องปิดช่องทางการจราจรบางส่วนหรือทั้งหมดระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงต่อผู้ใช้ถนน การปิดช่องทางการจราจรบางส่วนส่งผลให้ความจุถนนลดลง ทำให้ความเร็วการขับขี่ลดลงไปด้วย ในกรณีที่ความจุของถนนระหว่างการก่อสร้างมีค่าน้อยกว่าความต้องการในการเดินทางจะเกิดปัญหาการติดและแถวการรอคอยบริเวณหน้าคอขวด ซึ่งทั้งหมดนี้ก่อให้เกิดต้นทุนการใช้รถที่สูงขึ้นและความสูญเสียอันเนื่องมาจากเวลาในการเดินทางที่เพิ่มขึ้น เมื่อค่าใช้จ่ายในการเดินทางบนถนนที่มีการก่อสร้างสูงขึ้น ผู้ใช้รถบางส่วนอาจมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางในการเดินทางโดยยอมเดินทางในเส้นทางเลี้ยวที่อาจมีระยะทางที่ยาวกว่าหรือใช้เวลาในการเดินทางที่นานกว่าเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการจราจร ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นการเพิ่มปริมาณการจราจรบนเส้นทางเส้นทางเลี้ยวทำให้ความเร็วการขับขี่บนเส้นทางเลี้ยวลดลง และทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินทางสูงขึ้น ดังนั้นความสูญเสียอัน

เนื่องมาจากผลกระทบด้านการจราจรระหว่างการก่อสร้างจึงควรรวมถึงค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่เพิ่มขึ้นบนเส้นทางที่มีการก่อสร้างและเส้นทางเลี้ยวสามารถประมาณได้จาก

1) บนเส้นทางที่มีการก่อสร้าง

ค่าใช้จ่ายในการใช้รถ ( Vehicle Operating Cost ) ที่เพิ่มขึ้น

$$= \Delta \text{ ค่าใช้จ่ายเมื่อความเร็วในการขับขี่เปลี่ยนแปลง ( บาทต่อกิโลเมตรต่อคัน ) } \times \text{ระยะทางของการก่อสร้าง ( กิโลเมตร ) } \times \text{จำนวนรถที่วิ่ง} \times \text{ระยะเวลาของการก่อสร้าง}$$

ค่าเสียหายอันเนื่องมาจากมูลค่าของราคาในการเดินทาง ( Value of Time ) ที่เพิ่มขึ้น

$$= \left[ \frac{1}{S_{\text{before}}} - \frac{1}{S_{\text{during}}} \right] \times \text{ระยะทางบนเส้นทางที่มีการก่อสร้าง} \times \text{VOT} \times \text{จำนวนรถที่วิ่ง} \times \text{ระยะเวลาของการก่อสร้าง}$$

## 2) บนเส้นทางเดิม

2.1 สำหรับผู้ที่เปลี่ยนแปลงเส้นทางจากเส้นทางที่มีการก่อสร้างเป็นเส้นทางเดิม  
ค่าใช้จ่ายในการใช้รถ (Vehicle Operating Cost) ที่เพิ่มขึ้น

=  $(VOC_{before} \times \text{ระยะทางการก่อสร้าง}) - (VOC_{before} \times \text{ระยะทางบนเส้นทางเดิม}) \times \text{จำนวนที่เปลี่ยนเส้นทาง} \times \text{ระยะทางการก่อสร้าง}$

ค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากมูลค่าของเวลาในการเดินทาง (Value of Time) ที่เพิ่มขึ้น

=  $\Delta \text{ระยะเวลาในการเดินทาง} \times VOT \times \text{จำนวนรถที่เปลี่ยนเส้นทาง} \times \text{ระยะเวลาของการก่อสร้าง}$

## 2.2 สำหรับผู้ที่เดิมขับซื้ออยู่บนเส้นทาง

ค่าใช้จ่ายในการใช้รถ (Vehicle Operating Cost) ที่เพิ่มขึ้น

=  $\Delta \text{ค่าใช้จ่ายเมื่อความเร็วในการขับเปลี่ยนแปลง (บาทต่อกิโลเมตรต่อคัน)} \times \text{ระยะทางที่ได้รับผลกระทบ (กิโลเมตร)} \times \text{จำนวนรถที่วิ่ง} \times \text{ระยะเวลาของการก่อสร้าง}$

ค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากมูลค่าของเวลาในการเดินทาง (Value of Time) ที่เพิ่มขึ้น

$$= \left[ \frac{1}{S_{before}} - \frac{1}{S_{during}} \right] \times \text{ระยะทางที่ได้รับผลกระทบ} \times VOT \times \text{จำนวนรถที่วิ่ง} \times \text{ระยะเวลาของการก่อสร้าง}$$

จะเห็นได้ว่าความสูญเสียในส่วนนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของเวลาในการเดินทางและค่าใช้จ่ายในการใช้รถยนต์ที่วัดจากความแตกต่างระหว่างก่อนและระหว่างการก่อสร้าง โดยนำค่าใช้จ่ายในการใช้รถยนต์ (VOC) และมูลค่าของเวลา (VOT) ที่อธิบายไว้ข้างต้นมาใช้ นอกจากนี้การวิเคราะห์จะต้องอาศัยข้อมูลปริมาณการจราจรในแต่ละช่วงเวลาและรูปแบบของการจราจรตลอดทั้งวันของทั้งถนนที่มีการก่อสร้างและเส้นทางเดิม ความจุของถนนก่อนและระหว่างการก่อสร้าง ความจุถนนบนเส้นทางเดิม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและปริมาณการจราจรของถนนที่เกี่ยวข้อง ระยะเวลาการก่อสร้าง รวมถึงค่า VOC และ VOT ที่สัมพันธ์กับความเร็วของถนนที่เกี่ยวข้อง

ความสูญเสียผลประโยชน์จากการเปิดใช้งานซ้ำ (Opportunity Cost) คือ มูลค่าของผลประโยชน์ที่ได้รับจากการเปิดให้บริการการเดินทางแก่ผู้ขับขี่ โดยพิจารณาผลประโยชน์ที่ได้รับเร็วขึ้นจากการเลือกใช้วิธี Soil- Cement Column ซึ่งวิธีการคำนวณได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.2 การประมาณผลประโยชน์ในด้านอื่นของทั้งวิธี PVD และ Soil- Cement Column มีค่า

เหมือนกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์จึงสามารถพิจารณาจากทางเลือกที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดหรือการพิจารณาแบบ Least Cost Analysis

ต้นทุนการบำรุงรักษาภายหลังการก่อสร้าง ( Maintenance Cost ) เป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นภายหลังการเปิดให้บริการ เพื่อเป็นการรักษาไว้ซึ่งสภาพความแข็งแรงของโครงการและประสิทธิภาพการให้บริการ ( Pavement Performance ) เช่นเดียวกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ต้นทุนการบำรุงรักษาอาจผันผวนจากปัจจัยด้านต่างๆ เช่น สภาพดิน ความลึกของชั้นดินอ่อน อัตราการทรุดตัว เป็นต้น ในการพิจารณาเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากจึงอยู่บนสมมติฐานที่ว่าโครงสร้างถนนส่วนบนมีลักษณะเหมือนกัน มีสภาพแวดล้อมที่คล้ายกัน เพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลมาจากการเลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงฐานรากที่แตกต่างกัน ที่สำคัญการวิเคราะห์ที่เหมาะสมจะต้องทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและช่วงเวลาซ่อมแซมที่ทำให้ถนนเส้นนั้นมีสภาพใกล้เคียงกันตลอดอายุการใช้งาน

ผลจากการรวบรวมข้อมูลแผนงานบำรุงปกติทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ตอน กรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) ในพื้นที่ควบคุมของสำนักบำรุงทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง ประจำปี พ.ศ. 2548-2550 ซึ่งได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี PVD ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก สามารถเปรียบเทียบงบประมาณงานบำรุงผิวทางและไหล่ทาง และงานบำรุงรักษาทางแยกต่างระดับ, สะพาน, ท่อเหลี่ยม, ท่อกลมและรางระบายน้ำต่างๆ ในแต่ละปีได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และจากการรวบรวมข้อมูลค่าบำรุงรักษาทางและสะพานของถนนสายบางนา-บางปะกง ของสำนักทางหลวงที่ 11 ( กรุงเทพฯ ) ประจำปี 2540-2548 ซึ่งได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินวิธี Soil-Cement Column ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก สามารถเปรียบเทียบงบประมาณงานบำรุงรักษาผิวทางและไหล่ทางในแต่ละปีได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยเป็น 3.12 และ 3.69 เท่าสำหรับปี พ.ศ. 2548 และ 2550 ตามลำดับ โดยเมื่อคิดงบประมาณการบำรุงรักษาเฉลี่ยรวมต่อปีมีค่าเป็น 134,108.37 บาท/กม./ช่องจราจร แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อนำงบประมาณการบำรุงรักษาถนนสายบางนา-บางปะกง จากรูปที่ 4.7 ของปี พ.ศ. 2544 และ 2547 ซึ่งมีงบประมาณการบำรุงรักษาเท่ากับ 107,267.02 และ 106,059.60 บาท/กม./ช่องจราจร ตามลำดับจัดเป็นงบประมาณการบำรุงรักษาเฉลี่ยเท่ากับ 107,059.60 บาท/กม./ช่องจราจร มาเปรียบเทียบกับงบประมาณการบำรุงรักษาเฉลี่ยรวมต่อปีของทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ตอนกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) แล้วพบว่างบประมาณค่าบำรุงรักษาของทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ตอนกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) มีแนวโน้มที่สูงกว่าประมาณ 1.25 เท่า

งบประมาณการบำรุงรักษาของถนนสายบางนา-บางปะกง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 มีความไม่ชัดเจนของรายละเอียด เนื่องจากการเก็บข้อมูลไม่ละเอียด เพราะเป็นข้อมูลที่ของงบประมาณบำรุงรักษาถนนตลอดสายทั้งขาเข้าและขาออก ทำให้ไม่สามารถแยกงบประมาณการบำรุงรักษาเฉพาะขาเข้าซึ่งเป็นช่องทางเฉพาะที่ปรับปรุงคุณภาพดินด้วย Soil- Cement Column ได้ จากเหตุดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลไม่ได้เตรียมเอาไว้เพื่อใช้สำหรับงานวิจัย จึงทำให้ผลการแสดงการเปรียบเทียบครั้งนี้อาจจะมองเป็นภาพรวมได้เท่านั้น ซึ่งหากต้องการความถูกต้อง ชัดเจนมากขึ้น จะต้องมีการจัดเก็บข้อมูลที่แสดงรายละเอียดงบประมาณงบประมาณการบำรุงรักษาและซ่อมแซมในบริเวณที่มีความเสียหายจริงๆ แล้วนำข้อมูลของถนนทั้งสองสายมาเปรียบเทียบกัน

ความสูญเสียระหว่างการใช้งานเนื่องจากการทรุดตัวของผิวหลังการก่อสร้าง ( Increase in Vehicle Operating Cost Settlement ) เป็นความสูญเสียอันเนื่องมาจากการขยับขึ้นบนถนนที่มีการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการทรุดตัว ถึงแม้ว่าจะทำการปรับปรุงคุณภาพดินแล้วก็ตาม หลังจากการก่อสร้างเสร็จสิ้นชั้นดินฐานรากอาจมีการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องในอัตราที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ เมื่อเวลาผ่านไปผิวทางอาจมี สภาพขรุขระเป็นคลื่นการบำรุงรักษาซ่อมแซมอาจไม่สามารถรักษาความเรียบของถนนคงสภาพหลังการก่อสร้างเสร็จใหม่ การขยับขึ้นบนสภาพทางที่ขรุขระนี้ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงแก่ผู้ขับขี่ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้รถสูงขึ้น นอกจากนี้ สภาพผิวถนนที่ขรุขระทำให้ผู้ขับขี่ต้องใช้ความระมัดระวังและลดความเร็วลง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงความจุกจุกโดยรวม ทำให้ระยะเวลาในการเดินทางเพิ่มขึ้น ความสูญเสียในส่วนนี้อาจประมาณได้จาก

ความสูญเสียระหว่างการใช้งานเนื่องจากการทรุดตัวของผิวหลังการก่อสร้าง

$$= \text{ค่าใช้จ่ายในการใช้รถที่เพิ่มขึ้น} + \text{ค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจาก มูลค่าของเวลาในการเดินทางที่เพิ่มขึ้น}$$

ค่าใช้จ่ายในการใช้รถ (Vehicle Operating Cost) ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของถนนในแต่ละปี

$$= (VOC_{NEW} - VOC_{CURRENT}) \times \text{ระยะทาง} \times \text{จำนวนรถที่วิ่งต่อปี}$$

ค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากมูลค่าของเวลาในการเดินทาง (Value of Time) ที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของถนนในแต่ละปี

$$= \frac{1}{S_{new}} - \frac{1}{S_{current}} \times \text{ระยะทาง} \times VOT \times \text{จำนวนรถที่วิ่งต่อปี}$$

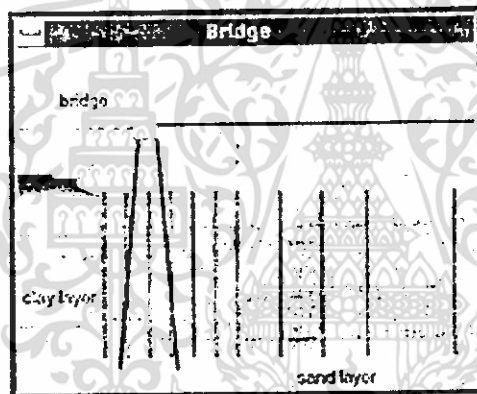
# บทที่ 5

## การประยุกต์ใช้

### 5.1. การเพิ่มกำลัง

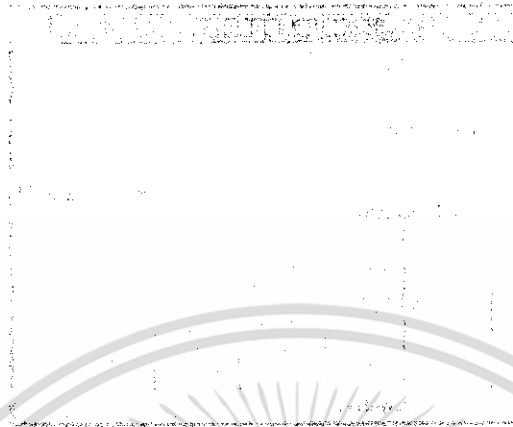
PVD มีประโยชน์ มากมาย โดยปกติส่วนมากจะใช้ในการ เพิ่มความแข็งแรงในดิน Highway, Airstrip , Harbours และ Railway ที่จะต้องสร้างในเวลาจำกัด ระหว่างนั้นราคาในการซ่อมบำรุง จะต้องมีน้อยที่สุด การไม่สม่ำเสมอของการทรุดตัวและความแตกต่างของการยุบตัว คือสิ่งที่ยอมรับไม่ได้ หลังมีการเปิดใช้งานจราจร

โดยการใช้ระบบ PVD 95% ของการยุบตัวสามารถทำได้ในเวลาสั้น การยุบตัวในภายหลัง จะเกิดจาก secondary effect อย่างไรก็ดีตามนั้นไม่สามารถทำได้โดย PVD การยุบตัวสามารถเร่งได้โดยการใช้ Preload



การรับประกันคุณภาพที่ดีที่สุดหากใช้ PVD น้ำ ในดินจะไหลออกอย่างอิสระในกรณีเดียวกัน ก็จะซึมเข้าสู่ชั้นทราย ที่ต่ำกว่าชั้นดินที่ถูกกด เช่นเดียวกันในชั้น Discharge Layer โดยทั่วไป อย่างไรก็ตาม ในชั้นห่างไปจากนี้ การระบายน้ำจะปล่อยตัวที่ผิวดิน ในชนิดที่มีความต้านทานต่ำสุด การซึมในชั้นทรายหรือกรวดนี้ จำเป็นต้องผสมกับการระบายน้ำแนวอน ในชั้นนี้ ความดันน้ำจะไหลอย่างอิสระ ภายหลังการซึมต่ำสุดของชั้น surcharge ถูกวางลง ดึงน้ำมันและโรงเก็บแร่ มักจะวางโดยตรงบน ชั้นผิวดินด้านล่าง เมื่อดินถูกกดมาก ๆ ในบริเวณนี้ เพราะมีการกดลงในน้ำหนักมาก ๆ dynamic stress จะเกิดขึ้นโดยอิทธิพลของ การยุบตัวและเสถียรภาพ ดังจะเลื่อนจมลงไปในชั้นดินอ่อน มีแรงดัน ชกถึง สู่อ่างเก็บน้ำ เค็ม โดยชั้นทรายใต้ถึง และจะทำให้เกิดการเสียหาย การผสม PVD กับ surcharge ชั่วคราว สามารถวัดยุบตัวได้ในเวลาอันสั้น การ

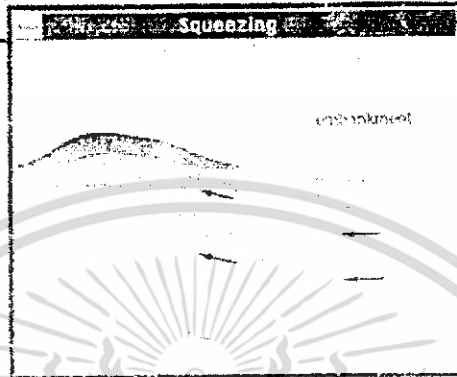
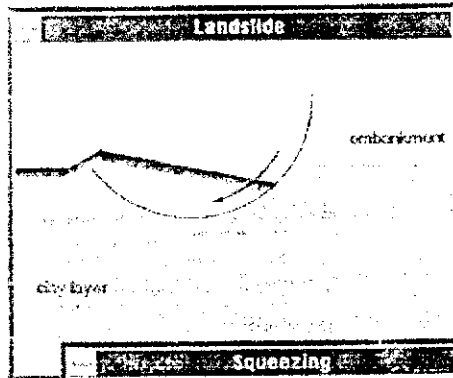
ระบายน้ำแควคิง ได้ถึงน้ำมันหรือพื้นที่ที่มีการก่อสร้างจะ ไม่เกิดพื้นที่ที่ยุบตัวของชั้นซึมน้ำ เพื่อ หลีกเลี่ยงความเสียหายขยายตัวในอนาคต



## 5.2. สถิติสภาพ

นอกจากจะเร่งการเพิ่มกำลังแล้ว PVD ยังเป็นตัวสนับสนุนที่ดีในพื้นที่เดิม สถิติสภาพของ Embankment ทั้งระหว่างและตอนเสร็จ ความไม่แน่นอนของดินชั้นล่างสามารถ ปรากฏได้ 2 กรณีดังนี้

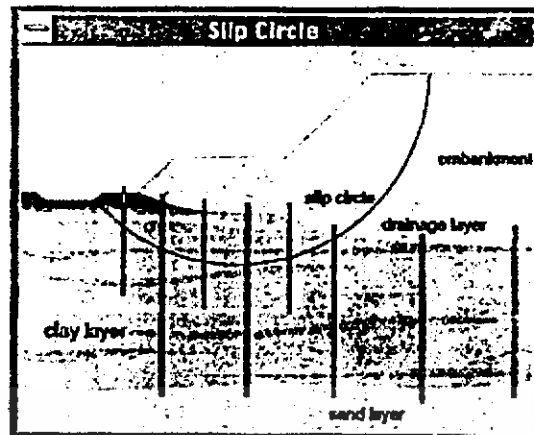
- การเลื่อนตัวของเนิน โดยส่วนหนึ่งของดินจะเลื่อนลงพร้อมกันเป็น slip circle
- การบีบตัวของชั้นดินอ่อนใต้ Embankment เนินดินยังคงค้างอยู่ แต่ระดับดินข้างๆ Embankment จะสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะหยุดนิ่ง



การเพิ่มของแรงดันนี้เป็นสาเหตุ ของความไม่เสถียรของชั้นดินใต้ดิน เกิดการ  
 หายไปของ แรงเสียดทาน เราสามารถจะเพิ่มความสมดุลได้หลายวิธีดังนี้

- ค่อยๆเพิ่มชั้นดินถมอย่างช้า
- เพิ่มจุด support ในไหล่ทาง
- PVD
- รวมหลายวิธี

สำหรับตำแหน่งที่แน่นอน ของจุดสมดุลสามารถคำนวณได้โดยใช้การถ่วงของผิว  
 ดินมาใช้ในการคำนวณโดยใช้ Bishop method การเลื่อนตัวสามารถป้องกันได้โดยคำนวณหา  
 ค่าสูงสุดของที่ยอมได้ของแรงดัน pore pressure และตรวจสอบด้วยการวัด pore pressure  
 ระหว่างการถม การออกแบบ ให้สามารถควบคุมได้โดย ใช้การระบายน้ำระยะสั้นในพื้นที่ที่อาจจะ  
 เกิดความไม่เสถียร

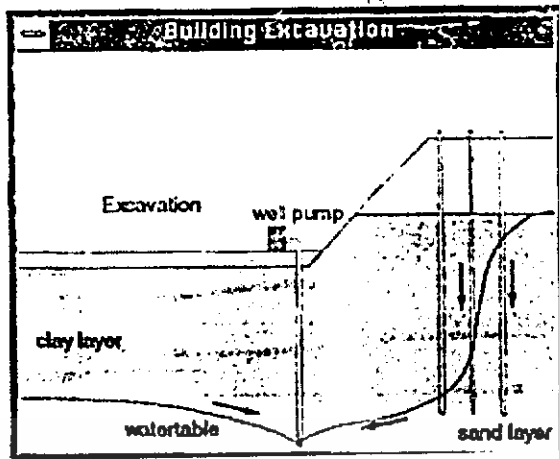


### 5.3. การสกัดน้ำออก

PVD สามารถใช้ได้ ในโครงการหลายๆโครงการ เช่น การสกัดน้ำออก ใน Germany PVD สามารถใช้ขยออกไปเป็นการระบายน้ำแนวนอน คอนกรีต motorway การระบายน้ำแนวนอน จะติดตั้งต่ำกว่าจุดเชื่อมเพื่อป้องกัน ความเสียหายที่จะไปถึงฐานรากโดยการรั่ว การรั่วโดยทั่วไปคือ สกัดน้ำออกจากผิวดินด้านบนในพื้นที่ที่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน โดยการวางใน จุดที่อยู่ใต้ชั้นระบายน้ำ ผิวน้ำ จะถูกระบายออกในแนวตั้งไปสู่ชั้นนี้เพื่อ ระบายออกต่อไปนี้ ไม่มี ช่วงระบายน้ำหรือระบบระบายน้ำอื่นๆ ที่อยู่ต่ำกว่า ground water level

ในผิวน้ำขนาดใหญ่จะคงเหลือไว้ใช้ในงานก่อสร้างได้ซึ่งสำคัญมากสำหรับพื้นที่ อุคตสาหกรรม การสร้างชั้นใต้ดินจะต้องมีระบบการระบายน้ำที่ระดับบนของเนินดิน อย่างไรก็ตาม เมื่อดินมีชั้นของโครงสร้างเกิดขึ้น มันเป็นไปได้ที่ ที่ ground water จะรั่วลงมาในแนวคิ่ง น้ำจะเปลี่ยนเป็นไหลตาม slope นั่นคือผลที่จะตามมาทั้งหมด ถ้ามีระบบ PVD วางไว้รอบรอบ โครงสร้างจะมั่นใจได้ว่า น้ำใต้ดินทุกชั้นจะไหลลงด้านล่างโดยไม่เป็นอุปสรรค

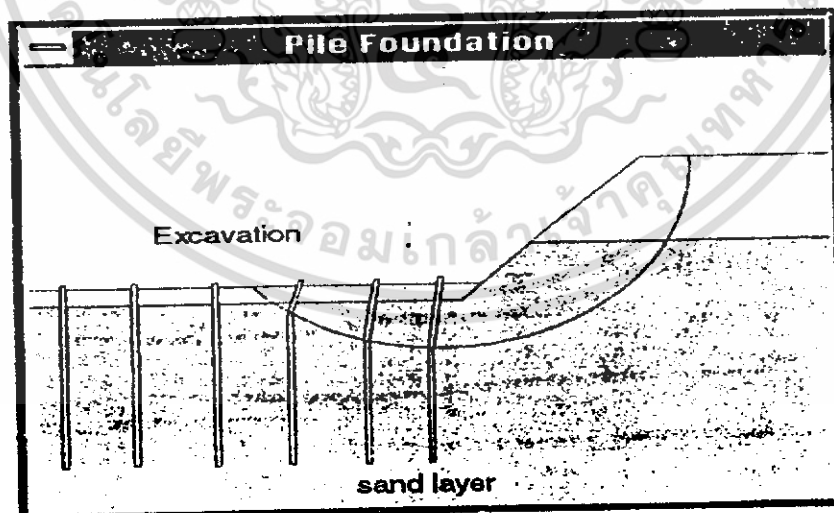
ยิ่งไปกว่านั้น แรงดันน้ำจะขยายออกเกินเป็นรูปสามเหลี่ยมไปทาง สิ่งก่อสร้างใต้ ดินนั้น ด้วยเหตุนี้จึงเพิ่มความเสถียร ระดับที่ต่ำกว่าน้ำใต้ดินที่บริเวณด้านข้างของการถมจะ สนับสนุนให้เกิด profile ที่ดีที่สุด



#### 5.4. Pile foundation

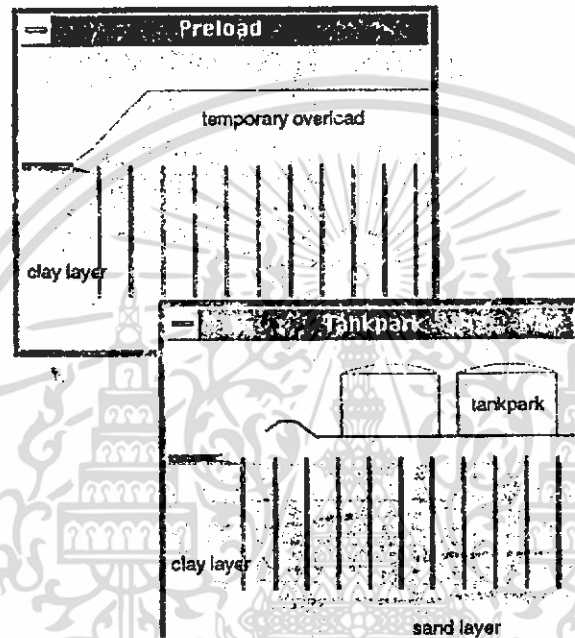
แรงดันน้ำใต้ดินสามารถเพิ่มขึ้นมากเป็นผลมาจากการตอกเข็มลงไป.ปรกติมันจะไม่มีผลต่อดินชั้นล่าง.อย่างไรก็ตามเมื่อมีการตอกเข็มในพื้นที่ๆจะนำไปสู่ความไม่เสถียรภาพของของฐานรากเสาเข็ม.ระบบระบายน้ำแนวตั้ง สามารถป้องกันปัญหาไปได้มาก.เสาหรือน้ำหนักบรรทุกหากเกิดการทรุดผลของมันจะเกิดความเสียหายต่อกำลังของดิน

ดังนั้นมันเหมาะสำหรับ SURCHARGE.อาจจะผสมกับการระบายน้ำแนวตั้ง ทำก่อนที่จะมีการตอกเสาเข็ม. โดยเฉพาะบริเวณใกล้slopeผลตามมาก็มีแรงจำนวนมากจะพยายามดันเสาเข็มทั้งหมด.ในอดีตค่าใช้จ่ายของโครงสร้างเข็มจำนวนมากสามารถป้องกันได้โดยโดยระบบระบายน้ำราคาถูก



## 5.5. Preload

มีหลากหลายวิธีที่จะผสมกับ PVD ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังขึ้นอย่างรวดเร็ว บางวิธีไม่เพียงแต่เพิ่มกำลังแต่ยังสามารถช่วยให้การทรุดตัวในระยะที่ 1 ถึงที่คาดหมายไว้ การทรุดตัวขั้นที่ 1 สามารถเร่งให้เร็วขึ้นได้ด้วย PVD การทรุดตัวเกิดขึ้นขณะที่ดินถูกกดอัดร่วมกับ Preload จะเป็นแบบ Surcharge หรือ Vacuum ก็ได้ ผลของการทรุดตัวระยะ 2 สามารถทำให้เป็นจริงได้ในเวลาอันสั้น เมื่อเอา Preload ออกจุดสมดุลตั้งต้นของดินจะกลับคืนมา

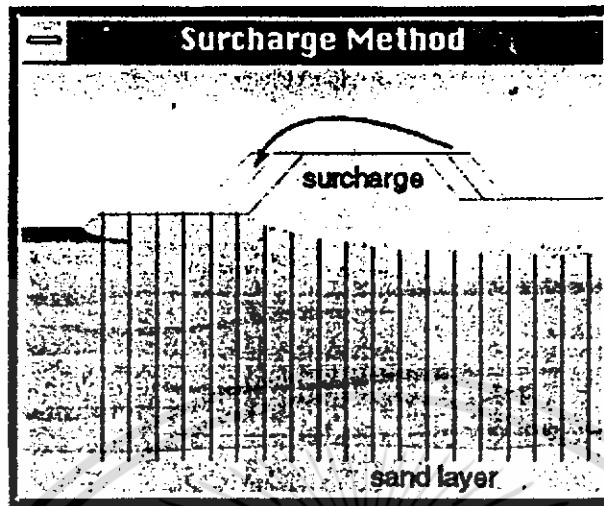


### 5.5.1. Surcharge

Surcharge มักจะมีการใช้เสมอๆในพื้นที่ที่หลีกเลี่ยง การทรุดตัวในระยะยาว ดังเช่น เมื่อไรที่ดินถมย้ายเข้าสู่การก่อสร้างที่รองรับโดยเสาเข็มดังตัวอย่างที่กล่าวมา เช่น สะพานยาวร่วมกับเนินดิน บางเวลาการเพิ่มความสูงของ Surcharge สามารถเพิ่มที่ขึ้นตอนสุดท้ายในส่วนอื่นของเนินดิน

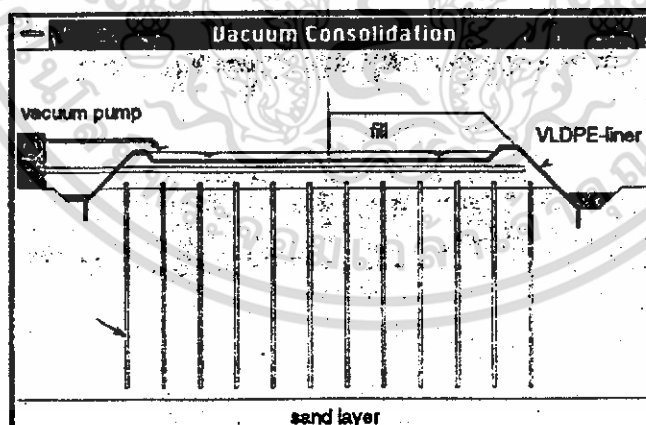
อย่างไรก็ตาม เมื่อเราปรับปรุงหน้าดินเดิมในพื้นที่ด้วย Surcharge เมื่อเวลาผ่านไปจะมีบางสิ่งเกิดขึ้นในช่วงที่มี Surcharge มากภายหลังเวลาจะมีการขุดและเทบนพื้นที่ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงความต้องการของการเพิ่ม Surcharge ขึ้นกับรอบขอบการเพิ่มกำลังและระดับดินถมระหว่างการดำเนินการการเพิ่ม Surcharge สามารถทำได้ปกติ ในขณะที่เริ่มทรุดตัวในวิธีนี้จะทำงานได้ดีกับพื้นที่ที่มีความกว้าง ดัชนีเองไม่เหมาะที่จะมีการทรุดตัว ปัจจุบันเราจะวางมันบน

ฐานทรายคัดเกรด Preload ในแบบ Surcharge ก็ไม่ราบรื่นเสมอความไม่เสถียรอาจเกิดขึ้นขณะก่อสร้าง แต่สำหรับวิธี Vacuum จะเสนอคำตอบนี้ให้



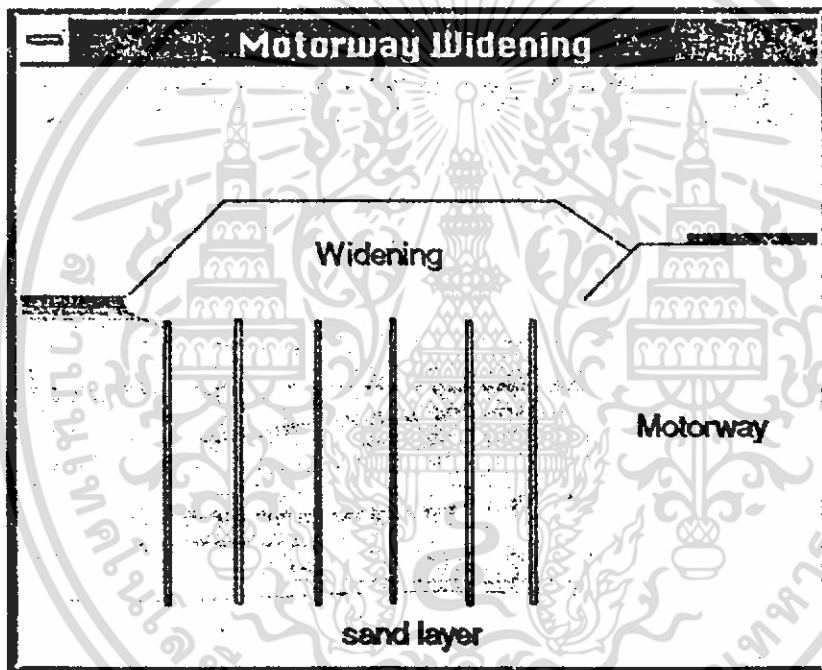
### 5.5.2. Vacuum Consolidation

นอกจากการประยุกต์ใช้กับ Surcharge การเพิ่มกำลังสามารถลดเวลาลงไปได้มากโดย Vacuum Consolidation นี้คือวิธีของการเพิ่มกำลังของดินโดยใช้แรงดันอากาศประโยชน์ที่สำคัญที่สุดของวิธีนี้คือหลีกเลี่ยงความไม่เสถียรของใต้ดิน และจะไม่เพิ่มความเสี่ยงในการเกิดการวิบัติแบบการเลื่อนของดินบริเวณขอบนอกของเนินดิน ตามหลักแล้ว Surcharge 100 kPa เท่ากับขนาดของ Sand layer ความหนา 5 ม. มันสามารถทดแทนได้โดยการใช้ระบบปั๊ม



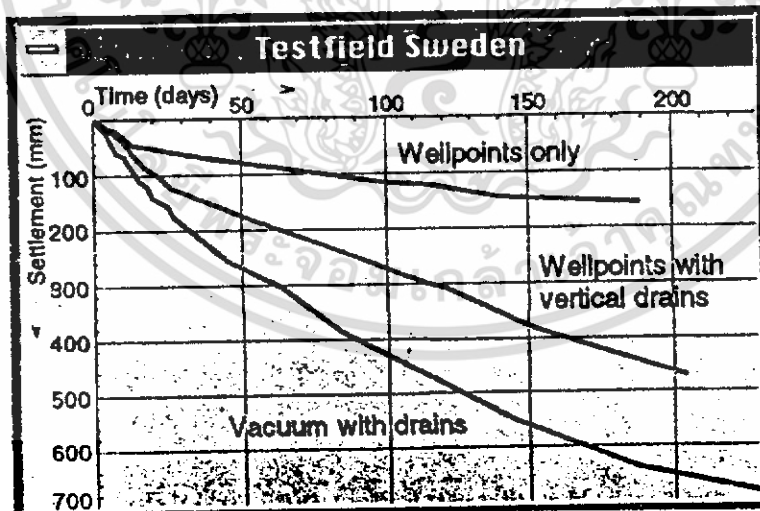
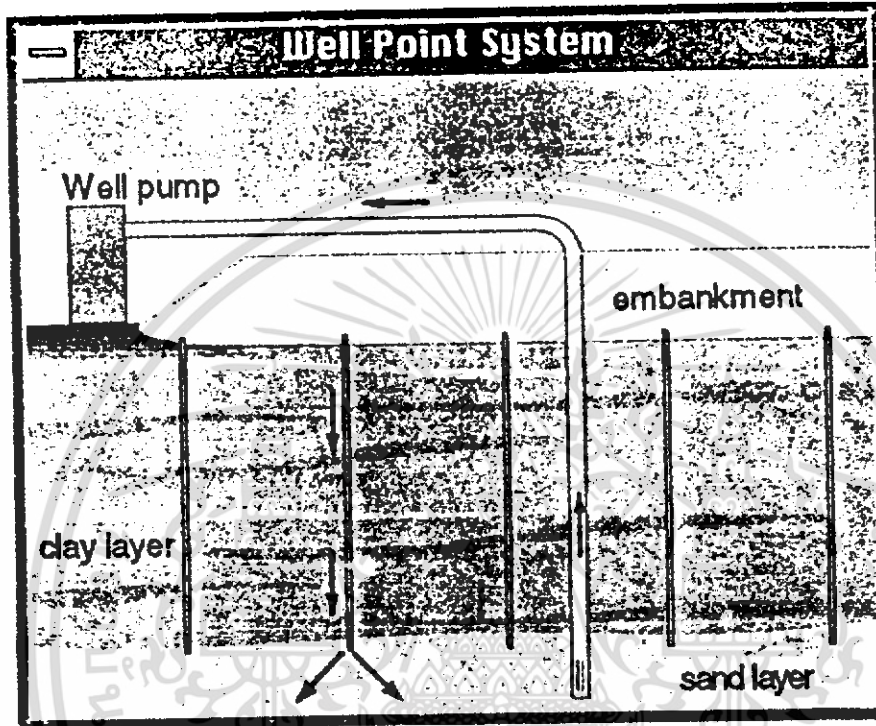
### การประยุกต์ใช้ :

- \* เพิ่มกำลังของดินในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวจะเป็นปัญหาในอนาคต,ศย. จุดต่อสะพาน หรือจุดต่อระหว่างดินถมและเสาเข็มรับฐานราก
- \* ชั้นดินถมที่ต้องทำในเวลาอันสั้นและความเสถียรของชั้นได้ดินไม่เพียงพอ
- \* ถนนที่มีความกว้างมาก และมีการทรุดตัวไม่เท่ากัน
- \* บริเวณดินอ่อนกลุ่มน้ำ,เมื่อมีการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็วจะมีพฤติกรรมที่ต้องการเพิ่ม the capacity of depot
- \* Preload สำหรับถังบรรจุ



### 5.5.3 ระบบ Deep Well Point

เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการบดอัดด้วยระบบ Well Point ในชั้นดินที่ลึก มันจะทำให้ค่าการระบายน้ำเป็นศูนย์ ด้วยพลังงานกลที่ต่างกันมากในชั้นดินโดยรอบ กราฟด้านล่างจะแสดงถึงผลในการทดสอบภาคสนามในประเทศสวีเดน โดยมีการเปรียบเทียบกัน 3 แบบ ได้แก่ การระบายน้ำในแนวคิ่ง, Well Point, Vacuum Load



## 5.6. เทคนิคด้านสิ่งแวดล้อม

### 5.6.1 ดินถม

การถมดินจะเป็นการเพิ่มน้ำหนักปริมาณมากซึ่งทำให้เกิดแรงมหาศาลและเกิดการทรุดตัวตามมาทั้ง Mineral seal และ Liner เป็นทางหนึ่งที่ทำให้เกิดผลการทรุดตัวที่ไม่คงที่

ระบบการระบายน้ำแนวตั้งเป็นการผสมระหว่างแรงขึ้นดันที่ทำให้เกิดการทรุดตัวหลังจากระบบ Preload สมบูรณ์ ระบบระบายน้ำจะถูกปิดเพื่อป้องกันความเสียหาย

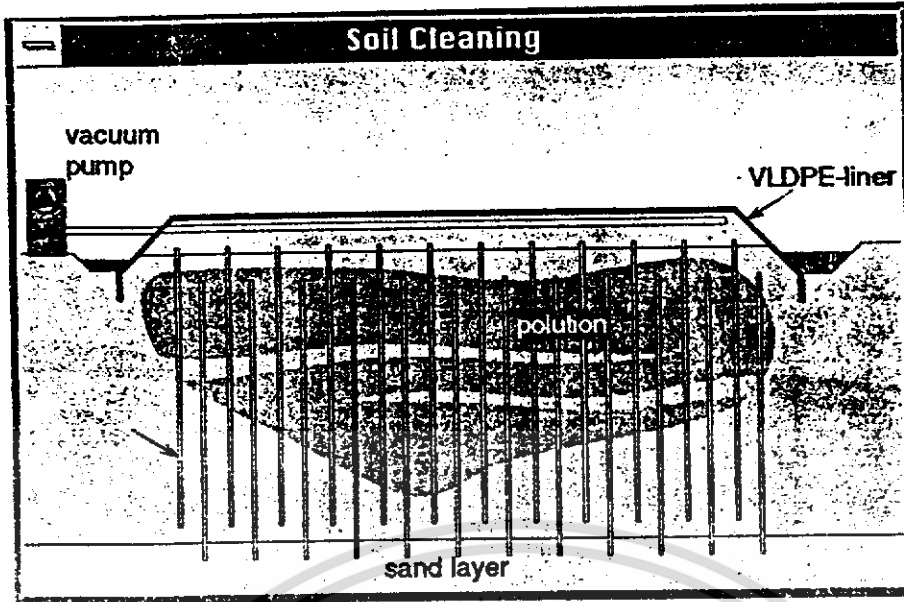
### 5.6.2 กัด Sludge

ดินโคลนบริเวณท่าเรือและ Sludge จากการบำบัดน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม จะถูกเก็บรักษาไว้ที่คลัง ค่าดินโคลนอันนี้จะมีปริมาณความชื้นสูง

ระบบ Mebradrain เป็นการผสมค่า Preload หรือ ระบบ Vacuum การเพิ่มขนาดความจุของคลัง การใช้อุปกรณ์พิเศษ, ระบบระบายน้ำ อาจถูกติดตั้งจากผิวหน้าของ Sludge ไปจนถึงผิวหน้าของระบบระบายน้ำ เมื่อระบบระบายน้ำถูกปิดระยะเวลาของระบบระบายน้ำ จะกระตุ้นให้เกิดการทรุดตัวของ Sludge ขึ้น โดยขึ้นอยู่กับชนิดของ Sludge และขนาดของมัน โดยอาจขยายตัวได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

### 5.6.3 การทำความสะอาดดิน

หนึ่งในวิธีที่ถูกที่สุดสำหรับการทำความสะอาดดิน คือการล้างดินในสถานที่ ระบบระบายน้ำแนวตั้งจะถูกเชื่อมต่อกับชั้นดินที่ลึกและระบบทั้งหมดจะติดต่อกับ ระบบ Vacuum System ชั้นน้ำใต้ดินที่ลึกจะถูกดูดขึ้นผ่านระบบระบายน้ำเพื่อชำระล้างดิน Mebradrain ทำจาก โพลีโพรพิลีน วัสดุซึ่งมีความต้านทานทางเคมีสูง

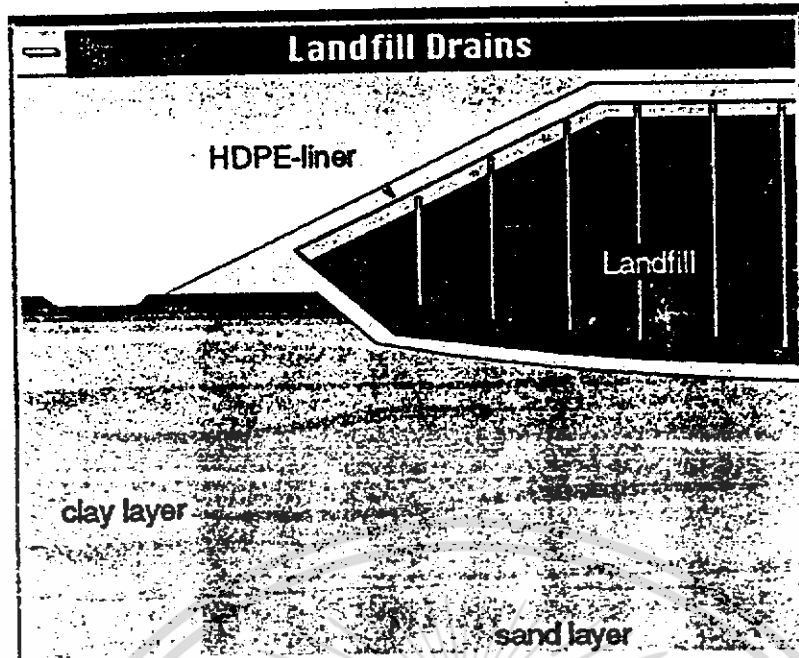


#### 5.6.4 การกายก๊าซ

ก๊าซหลายชนิดจะเกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวของสารอินทรีย์ภายในท่อ ท่อก๊าซนี้จะประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน 60 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 39 % ก๊าซนี้จะลอยอย่างช้าๆและแพร่ผ่านเข้าไปในระบบท่อซึ่งมีการป้องกันการกัดกร่อนที่ส่วนบนของท่อ

ระบบการคลายก๊าซเป็นทางเลือกที่ไม่แพงนักเมื่อเทียบกับระบบระบายน้ำ การทรุดตัวจะเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น ระบบระบายน้ำจะเชื่อต่อการแพร่ก๊าซซึ่งอยู่ที่ด้านเหนือของส่วนปกปิดของท่อ ข้อดีของระบบระบายน้ำแนวตั้ง คือ มีการปล่อยท่อระบายน้ำที่รั่วซึมทางใต้ของท่อ ระบบแนวราบที่มีการซึมผ่านที่ไม่ดีนักจะถูกติดตั้งไว้เพื่อป้องกันการรั่วซึมของระบบระบายน้ำ

แท่งและแผ่นกรองของ Mebradrain ทำจาก โพลีโพรพิลีน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความต้านทานทางเคมีสูง ระหว่างชั้นคอนกรีตติดตั้ง อุปกรณ์การติดตั้งจะต้องมีการป้องกันชั้นคอนกรีตเสียหายเอาไว้



## บทที่ 6

### ผลวิจัยและการวิเคราะห์

#### 6.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นผลการวิเคราะห์ของวัสดุที่เราได้เลือกนำมาเปรียบเทียบกับ PVD และ ตัว PVD เอง จะแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะสรุปข้อดีข้อเสียของวัสดุ ช่วงหลังจะเป็นการเปรียบเทียบวัสดุในด้านต่างๆเพื่อที่จะนำไปสรุปว่า PVD มีความน่าใช้หรือไม่ และสามารถสู้วัสดุ อื่นๆที่ใช้ในงานประเภทเดียวกันได้หรือไม่

#### 6.2 สรุปข้อดีข้อเสียวัสดุที่นำมาเปรียบเทียบ

##### 6.2.1 PVD with preload

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"><li>- ราคาถูก</li><li>- กระบวนการควบคุมคุณภาพมีความชัดเจน</li><li>- ใช้เครื่องจักรน้อย และ ราคาถูก</li><li>- Clean site</li><li>- เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทั้งระยะสั้นและยาว</li><li>- ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- ระยะเวลาสร้างนาน</li><li>- ต้องอาศัยผู้มีความเชี่ยวชาญในการควบคุม</li><li>- มีการขนย้าย surcharge มาก</li><li>- ต้องระวัง เสถียรภาพคันดินถม เพื่อป้องกัน base fail</li><li>- หมั่นตรวจ sand blanket เพื่อให้การทำงานต่อเนื่อง</li><li>- ระวังการเคลื่อนตัวด้านข้าง</li><li>- ใช้พื้นที่ในการก่อสร้าง</li><li>- ไม่เหมาะกับชั้นดินอ่อนที่กว้างมาก</li></ul>

### 6.2.2 PVD with Vacuum

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาถูก</li> <li>- กระบวนการควบคุมคุณภาพมีความชัดเจน</li> <li>- ใช้เครื่องจักรน้อย และ ราคาถูก</li> <li>- Clean site</li> <li>- เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทั้งระยะสั้นและยาว</li> <li>- ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ</li> <li>- แก้ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินข้าง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระยะเวลาสร้างนาน</li> <li>- ต้องอาศัยผู้มีความเชี่ยวชาญในการควบคุม</li> </ul>

### 6.2.3 Cement Column

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ก่อสร้างรวดเร็วภาคการณ้ได้</li> <li>- เพิ่มกำลังมวลดินมากขึ้นมาก</li> <li>- แก้ปัญหาการทรุดตัว</li> <li>- แก้ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินข้าง</li> <li>- สะดวกในการขยายต่อเติมถนนเดิม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ควบคุมคุณภาพงานและคุณภาพวัสดุยาก</li> <li>- มีความยุ่งยากในการทำงาน</li> <li>- ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม</li> <li>- เกิดมลภาวะ</li> <li>- เกิดวิบัติจากการออกแบบและ ก่อสร้างได้ง่าย( differential Settlement, Punching fail )</li> <li>- กีดขวางระบบสาธารณูปโภคในอนาคต</li> </ul>

### 6.3 ตารางเปรียบเทียบวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน

#### 6.3.1 การเปรียบเทียบทางวิศวกรรม ( A=Excellent , B=good , C=fair )

เป็นการเปรียบเทียบความสามารถทางด้านวิศวกรรมของวัสดุต่างๆ โดยเสมือนว่า วัสดุนั้นมีความสามารถเหมือน ในทฤษฎีโดยไม่คิดปัจจัยอื่นมาร่วมด้วย

	PVD with Preload	Vacuum PVD	Soil Cement column	หมายเหตุ
การทรุดตัว, settlement	B	B	A	*จากกราฟกรมทางหลวง
กำลังรับแรงเฉือน, Su	B	B	A	*ข้อมูลจากกรมทางหลวง
การเคลื่อนตัวด้านข้าง	C	B	A	*เปรียบเทียบจากทฤษฎี
ความต้านทานวิบัติ	B	B	B	*เปรียบเทียบจากทฤษฎี
การออกแบบ	C	B	C	*เปรียบเทียบจากทฤษฎี
สรุป	2.60	3.00	3.40	

#### 6.3.2 การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ ( A=Excellent , B=good , C=fair )

นำข้อมูลจริงที่ได้จากกรมทางหลวงมาเปรียบเทียบในด้านราคาและความคุ้มค่าคุ้มเสียที่จะเกิดขึ้นจากก่อสร้างโดยมีการคาดการณ์จากทฤษฎีในบางส่วน

	PVD with Preload	Vacuum PVD	Soil Cement column	หมายเหตุ
ราคา	B	A	C	*SCราคาเป็น 1.3 เท่าของ PVD- ข้อมูลจริง
เวลาในการก่อสร้าง	C	B	A	*P+PVD.V+PVD 28.4 m- ข้อมูลจริง
การบำรุงรักษา	C	B	B	*ข้อมูลจากกรมทางหลวง
ความสูญเสียจากการวิบัติ	C	B	C	*ความเสี่ยงจากการเกิดการวิบัติ-ทฤษฎี
การจราจรระหว่างการก่อสร้าง	C	C	C	*เปรียบเทียบกระบวนการก่อสร้าง+พื้นที่ก่อสร้าง
สรุป	2.20	3.00	2.60	

6.3.3 การเปรียบเทียบรวม ( A=Excellent , B=good , C=fair )

เป็นการนำข้อมูลทั่วไปของการก่อสร้างมาเปรียบเทียบเช่น ความสามารถในการควบคุมคุณภาพ มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ความสะดวกในการก่อสร้าง ซึ่งสิ่งเหล่านี้ก็เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญของการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุเช่นกัน

	PVD with Preload	Vacuum PVD	Soil Cement column	หมายเหตุ
Long term performance	A	A	B	*เปรียบเทียบจากทฤษฎี *เปรียบเทียบกระบวนการตรวจสอบ
Quality Control	B	A	C	*เปรียบเทียบกระบวนการก่อสร้าง
Environment	A	A	C	*เปรียบเทียบกระบวนการก่อสร้าง
Easy to construct	B	A	C	*เปรียบเทียบกระบวนการก่อสร้าง+ เวลาก่อสร้าง
Easy to attach	C	B	A	
สรุป	3.20	3.80	2.60	

## บทที่ 7

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การเปรียบเทียบทางวิศวกรรมจะพบว่า Soil Cement Column ให้คะแนนมากที่สุดทั้งผลวัดจริงที่เกิดและจากหลักทฤษฎี และจากข้อมูลหน้างานจะพบว่าการทรุดตัวอีกของการปรับปรุงคุณภาพดินโดยระบบ PVD ทั้งนี้เพราะปัญหาจากการออกแบบยังไม่สามารถครอบคลุมการทรุดตัวระยะ Secondary Settlement ได้ อีกทั้งการรับกำลังของดินยังเพิ่มน้อยกว่า Soil Cement Column แต่กำลังที่เพิ่มขึ้นก็เกิดจากการเพิ่มกำลังของดินเองอย่างแท้จริง

การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์จะพบว่า PVD มีราคาก่อสร้างถูกกว่าอย่างชัดเจน แต่ทั้งนี้ต้องดูปัจจัยการเปิดใช้งานเร็วด้วยว่าก่อให้เกิดผลกำไร รวมกันแล้วจะคุ้มค่าง่ากว่าก่อสร้างรีเปล่าและในระยะยาวแล้วยังต้อง รวมค่านำรุงรักษาระบบ และการซ่อมแซมที่เกิดจากการวิบัติอีกด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยแปรผันกับ ทฤษฎีและการควบคุมการก่อสร้างด้วย แต่จากข้อมูลที่มีสรุปได้ว่า Vacuum PVD มีความคุ้มค่างามากที่สุด

สรุปโดยรวมจะพบว่า Surcharge PVD เป็นระบบที่ใช้เวลานานและยากในการควบคุมรวมทั้งยังมีปัญหาในเรื่องความเสถียรขณะการก่อสร้างอีกด้วย Vacuum PVD เป็นวิธีใหม่ที่แก้ไขข้อบกพร่อง ของ Surcharge PVD ไม่ว่าจะเป็นเรื่องระยะเวลา การวิบัติ ขณะการก่อสร้าง และยังลดราคาก่อสร้างในส่วน Surcharge และ ใหล่ทางไปได้มากอีกด้วย จากข้อมูลที่ได้มาพบว่า โดยรวมหากไม่คิดเรื่องระยะเวลาก่อสร้างแล้ว Vacuum PVD ดีกว่า Soil Cement Column ทั้งเรื่องการควบคุมการก่อสร้างควบคุมคุณภาพและราคา และความเสถียรในระยะยาวเหตุที่สรุปเช่นนี้ เพราะแม้หลักการและทฤษฎีจะดีเยี่ยม แต่ถ้างานที่ออกมาไม่สามารถทำได้ตามหลักการเดิมที่ใ้ประโยชน์ ดังนั้นแม้ Vacuum PVD จะมีความสามารถทางวิศวกรรมดีด้อยกว่า Soil Cement Column แต่การควบคุมคุณภาพก็ทำได้ดีกว่ามาก ดังนั้นงานที่ออกมาควรจะดีกว่า รวมกับความคุ้มค่างทางเศรษฐศาสตร์ด้วย จึงสรุปเช่นนี้

หลังจากการเปรียบเทียบแล้วสรุปได้ว่า Vacuum PVD มีความน่าเลือกใช้ที่จะใช้ปรับปรุงคุณภาพดินในพื้นที่ภาคกลางตอนล่างของไทย แต่ทั้งนี้ควรคำนึงถึงปัจจัยเรื่องเวลาและสถานที่ก่อสร้างด้วยเพราะหากก่อสร้างในพื้นที่ชุมชนระยะเวลาก่อสร้างจะมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจมาก

## บรรณานุกรม

- นายคุณวัศ รุ่งโรจน์งามเจริญ,2546.การศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยPVDต่อเสาะเข็ม ข้างเคียงในการก่อสร้างอาคารภายในโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ.วิทยานิพนธ์ปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นายสุเจตน์ เจตน์พิสุทธิ์,2540.การแก้ปัญหาการทรุดตัวของดินเดิมใต้คันทับและเทคนิคการก่อสร้างทางบนดินอ่อนด้วยระบบPVD.วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ดร.มนตรี ,สำนักวิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง
- ฉัฐพงศ์ โกวิทยานันต์,Geoplast company Limited. ,Cofra asia LTD.
- มณเฑียร กังคศิเทียม , 2543. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 9 :: สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมมหาราชวัง
- วรากร ไม้เรียง, เอกสารประกอบการสอนวิชา วิศวกรรมฐานราก :: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สมเกียรติ ขวัญพุกษ์, เอกสารประกอบการสอนวิชา วิศวกรรมฐานราก :: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตั้งบุญเดิม ,2540. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ :: โยธาสาร , ปีที่ 9 , ฉบับที่ 11 , หน้า 30-39.
- ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ ,2541. การปรับปรุงดินในงานทางหลวง :: การสัมมนาเรื่องการปรับปรุงดิน'41, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , หน้า 1-103.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชีระชาติ รุ่งไถ่ฤกษ์ และ จอม จันทร์หิรัญ,2545. พฤติกรรมกรทรุดตัวของคันทงเสริม Cement Column ทางหลวงหมายเลข 34 สาย บางนา-ชลบุรี .: การสัมมนาวิศวกรรมกรทางครังที่ 1, กรุงเทพฯ,
- นพพร สิตวระเวศย์ ,2545. พฤติกรรมคันทงถนนสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี สายใหม่ ก่อนและหลังการติดตั้ง PVD .: วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณทิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 193 หน้า.
- ยงยุทธ แตศิริ,2538. การปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก ถนนสาย บางนา-บางปะกง .: สัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์วิจัยประจำปี, กรมทางหลวง , 28 หน้า.
- ยงยุทธ แตศิริ และ ธนศักดิ์ วงศ์ธนาภิเจษฎ ,2548. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน .: เอกสารการสัมมนางานวิจัยเพื่อการพัฒนาทางหลวง , หน้า 271-284 .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้