

การออกแบบกำแพงกันดินเกเบียนโดยใช้โปรแกรมเป้าหมายในแบบจำลองโปรแกรม
ไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม

DESIGNING A GABION RETAINING WALL USING GOAL PROGRAMMING IN
A MIXED INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING MODEL



วุฒิชัย ชาตพัฒนานันท์

VUTTICHAJ CHATPATTANANAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-098-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGNING A GABION RETAINING WALL USING GOAL PROGRAMMING IN
A MIXED INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING MODEL



VUTTICHAJ CHATPATTANANAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMUTL-2021-EN-D-098-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบกำแพงกันดินเกเบี่ยนโดยใช้โปรแกรมเป้าหมายในแบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม
นักศึกษา	นายวุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์
รหัสประจำตัว	60601175
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ธนาถล คงสมบูรณ์

บทคัดย่อ

โครงสร้างเกเบี่ยนเป็นชุดของกรงประกอบสำเร็จแล้วเติมด้วยหิน การก่อสร้างด้วยกล่องเกเบี่ยนนี้มักจะทำตามแนวทางปฏิบัติของผู้จัดหาสินค้าหรือตามมาตรฐานการออกแบบของหน่วยงานรัฐ การออกแบบโครงสร้างเกเบี่ยนอย่างน้อยที่สุดต้องถูกหลักเกณฑ์การออกแบบหลายด้านในการผ่านเสถียรภาพภายนอกในด้านการไหล การหมุนควง และกำลังแบกทานของฐานราก การออกแบบที่ดีต้องการการสมดุลของความเค้นแนวตั้งที่ปลายด้านหน้ากำแพงและความเค้นแนวตั้งที่ปลายด้านหลังกำแพง ด้วยความต้องการในการออกแบบโครงสร้างเกเบี่ยนที่มีจุดมุ่งหมายแบบหลายเกณฑ์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรมเป้าหมายที่เป็นเทคนิคการหาที่เหมาะสมแบบหลายเกณฑ์ในการออกแบบกำแพงเกเบี่ยน ตัวอย่างเกเบี่ยนสูง 3.1 เมตรถูกใช้เป็นตัวอย่างพื้นฐาน แล้วโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสมถูกใช้เพื่อจัดเรียงกรงเกเบี่ยนที่มีขนาดต่างๆเพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักต่ำสุดและผ่านเกณฑ์ด้านเสถียรภาพภายนอก แบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายสองแบบจำลองถูกแนะนำเพื่อบรรลุเกณฑ์การออกแบบในการได้น้ำหนักเกเบี่ยนน้อยสุดและสมดุลความเค้นแนวตั้ง ซึ่งแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายทั้งสองแบบจำลองให้คำตอบที่เหมาะสมที่เท่ากันโดยให้น้ำหนักเกเบี่ยนน้อยสุดและระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยสุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักและค่าระยะเยื้องศูนย์กลางจากตัวอย่างเดิม

Thesis	Designing a Gabion Retaining Wal Using Goal Programming in a Mixed Integer Nonlinear Programming Model
Student	Mr. Vuttichai Chatpattananan
Student ID.	60601175
Degree	Doctor of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Thanadol Kongsomboon

ABSTRACT

Gabion structure is a set of stacked prefabricated cages filled with rocks. Constructing these gabion cages usually follows supplier guidelines or governmental agency design standards. Designing this gabion structure, at a minimum, must satisfy many design criteria in passing external stability in sliding, overturning, and bearing capacity of the foundation. Good gabion design requires a balance of the toe bearing stress and heel bearing stress. With this requirement for the design of gabion structures to meet multi-criteria objectives, goal programming, which is a multi-criteria optimization technique, is used in this thesis. A 3-meter gabion example is used as a based design. Then, mixed integer nonlinear programming is introduced to rearrange a set of varying sized gabion cages to minimize the gabion weight and passing external stability criteria. Two goal programming models are introduced to meet the two design criteria in minimizing gabion weight and balancing the vertical stresses. The two goal programming models give the same optimum solution with the minimum weight and minimum eccentricity compared with those from the original example.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา อาจารย์ที่ปรึกษา องค์กรและหน่วยงานจากภาคอุตสาหกรรมและภาควิชาการที่ให้ข้อมูล คำถาม คำตอบ คำชี้แนะ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วุฒิชัยชาติพัฒนานันท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 เกเบี่ยน.....	1
1.1.2 โครงสร้างกำแพงกันดินแบบเกเบี่ยน.....	2
1.1.3 การออกแบบโครงสร้างเกเบี่ยน.....	3
1.1.4 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้ในการการออกแบบโครงสร้าง เกเบี่ยน.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	8
1.5 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	9
บทที่ 2 เกเบี่ยน.....	10
2.1 กำแพงกันดินเกเบี่ยนโดยทั่วไป.....	10
2.2 ชนิดของกำแพงและการใช้งาน.....	10
2.3 วัสดุ.....	11
2.3.1 ลวดเหล็กตะแกรงถักทอรูปทรงหกเหลี่ยม	11
2.3.2 ลวดเหล็กตะแกรงเชื่อม.....	14
2.3.3 ตะแกรงอื่นๆ.....	14
2.3.4 การกัดกร่อนและความเสียหายของเกเบี่ยน.....	15
2.3.5 การประกอบหน่วยเกเบี่ยน.....	16

2.3.6 ขนาดเกเบี่ยน	16
2.3.7 การเติมหิน.....	16
2.4 การออกแบบ.....	17
2.4.1 การออกแบบโดยทั่วไป.....	17
2.4.2 สมดุลของกำแพง	17
2.5 การก่อสร้าง.....	18
2.5.1 ตำแหน่งทรง.....	18
2.5.2 การประยุกต์ใช้กับงานในทะเล.....	19
2.6 ลักษณะตะแกรง.....	19
บทที่ 3 โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม.....	21
3.1 MINLP โดยทั่วไป.....	21
3.2 รูปแบบของ MINLP	22
3.3 แนวคิดพื้นฐานในการแก้ปัญหา MINLP.....	23
3.3.1 การคลาย.....	23
3.3.2 การเสริมข้อจำกัด.....	26
3.4 วิธีเชิงกำหนดสำหรับ MINLP แบบคอนเวกซ์.....	29
3.4.1 วิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรง.....	29
3.4.1.1 การแตกกิ่ง.....	29
3.4.1.2 กฎการเล็มกิ่ง.....	31
3.4.2 วิธีระนาบตัดสำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบ ไม่เป็นเส้นตรง.....	31
3.4.3 วิธีหุดันไม้สำหรับ MINLP.....	32
3.5 MINLP แบบไม่คอนเวกซ์	32
3.6 วิธีฮิวริสติกส์สำหรับ MINLP	33
บทที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเกเบี่ยน.....	34
4.1 ตัวอย่างการออกแบบ.....	34
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	34
4.2.1 รูปทรงเรขาคณิต.....	34

4.2.2 วัสดุ	35
4.2.3 กำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน.....	35
4.2.4 พารามิเตอร์อื่นๆ.....	36
4.2.5 ตัวแปร.....	38
4.3 ผลการออกแบบ.....	40
บทที่ 5 แบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมของกำแพงเกเบี้ยน.....	41
5.1 พารามิเตอร์การออกแบบ.....	41
5.2 แบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มผสม.....	42
5.2.1 สมการเป้าหมาย.....	42
5.2.2 ตัวแปรตัดสินใจ.....	44
5.2.3 สมการข้อจำกัด.....	44
5.2.4 สัดส่วนความกว้างต่อความสูง.....	50
5.2.5 ผลการใช้ MINP.....	51
5.3 โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า.....	52
5.4 โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า.....	54
บทที่ 6 วิเคราะห์และอภิปรายผล.....	58
6.1 เปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมจากแบบจำลองทั้งหมด.....	58
6.2 ตรวจสอบคำตอบที่ถูกต้องของแบบจำลองและประเด็นการได้ค่าที่เหมาะสม.....	58
6.3 ค่าคำตอบที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายในการคำนวณ.....	59
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะตะแกรง ตาม ASTM A975.....	20
4.1 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh ของระบบ 27.....	40
5.1 พารามิเตอร์ทางเรขาคณิต พารามิเตอร์ของดิน และพารามิเตอร์อื่นๆ.....	43
5.2 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh ของระบบ 27 ระบบ 39 และ MINP	52
5.3 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh และโปรแกรมเป้าหมาย ล่องหน้า.....	54
5.4 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP โปรแกรมเป้าหมายล่องหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก.....	55
5.5 รายละเอียดจากผลของการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP โปรแกรม เป้าหมายล่องหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก.....	56
6.1 เปรียบเทียบน้ำหนักและระยะเยื้องศูนย์กลางจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP โปรแกรมเป้าหมายล่องหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ก่อร่างเคเบิ้ลที่ประกอบเสร็จ รอขนส่ง และผูกมัดเทอร์ส (BS8002)	2
1.2 กำแพงเคเบิ้ลแบบลาดด้านหน้า ลาดด้านหลัง และสี่เหลี่ยมคางหมู (BS8002).....	3
1.3 เคเบิ้ลกรณีใช้ร่วมกับตาข่ายเสริมแรงเปรียบเทียบกับใช้เคเบิ้ลเป็นกำแพง แรงโน้มถ่วง	4
1.4 ผังงานแสดงขั้นตอนหลักในการศึกษา.....	7
2.1 รูปแบบทั่วไปของกรงเคเบิ้ลตะแกรงถักทอรูปทรงหกเหลี่ยม.....	12
2.2 รูปแบบทั่วไปของกรงเคเบิ้ลตะแกรงเชื่อม.....	13
2.3 ตะแกรงประเภทอื่นๆเช่นตะแกรงเหล็กขัดลูกโซ่ ตะแกรงฉีก.....	15
2.4 ตัวอย่างกำแพงเคเบิ้ลจาก BS8002.....	17
2.5 ตัวอย่างแสดงค้ำยันของกำแพงเคเบิ้ลจาก Ćwirko M. et. al. (2017)	19
2.6 ขนาดรูเปิดตลอดเหล็กตะแกรง จาก ASTM A975.....	20
3.1 พีลีเบิลเซตของจำนวนเต็มแบบผสมจาก ก) แสดงประเภทของการคล้ายสอง ประเภท คือ ข) พีลีเบิลเซตของจำนวนเต็มแบบผสม และ ค) โพลีอีตริลรีแลกเซชัน จาก Belotti P. et. al. (2013)	26
และ ข) โพลีอีตริลรีแลกเซชัน จาก Belotti P. et. al. (2013)	
3.2 การแยกจุดอินฟีลิตี้ที่เป็นจุดดำในรูปซ้ายโดยเพิ่มไฮเปอร์เพลนที่แสดงเป็น ลูกศรเขียวในรูปขวา จาก Belotti P. et. al. (2013).....	27
3.3 การแตกกิ่งของตัวแปรจำนวนเต็มที่แยกเป็นสองปัญหาย่อยที่ไม่เป็นเส้นตรง ที่ตัดจุดอินฟีลิตี้ (จุดดำ) ออก จาก Belotti P. et. al. (2013)	28
3.4 การเสริมข้อจำกัดโดยการใส่การแตกกิ่งเชิงพื้นที่สำหรับการหาค่าเหมาะสมโดยรวม จาก Belotti P. et. al. (2013)	29
3.5 แสดงอัลกอริธึมการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตโดยการเดินตามเส้นและแก้ปัญหา NLP ที่ทุกโหนดของต้นไม้ จาก Belotti P. et. al. (2013).....	30
3.6 ตัวอย่างการกำหนดปัญหาใหม่ จาก Belotti P. et. al. (2013).....	33
4.2 แรงดันดินเชิงรุกคูลอมบ์ จาก Enviromesh (2007)	39
4.3 ระยะ d_h และ b_v จาก Enviromesh (2007)	39

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาใน 1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา ใน 1.2 ที่จะเสนอการออกแบบกำแพงเกเบียน (gabion wall) โดยการใช้โปรแกรมเป้าหมาย (goal programming) ในแบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming) ขอบเขตการวิจัยใน 1.3 ที่ประยุกต์ใช้กับตัวอย่างการออกแบบกำแพงเกเบียนสูงในช่วง 3.1 เมตร ประโยชน์ของงานวิจัยใน 1.4 ที่สามารถนำแบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสมไปประยุกต์ในการออกแบบทางวิศวกรรมที่ต้องการให้ปลอดภัยและประหยัดที่สุด และยังสามารถนำโปรแกรมเป้าหมายไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบที่มีการพิจารณาหลายเกณฑ์ (multicriteria) ส่วนที่ 1.5 แสดงส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

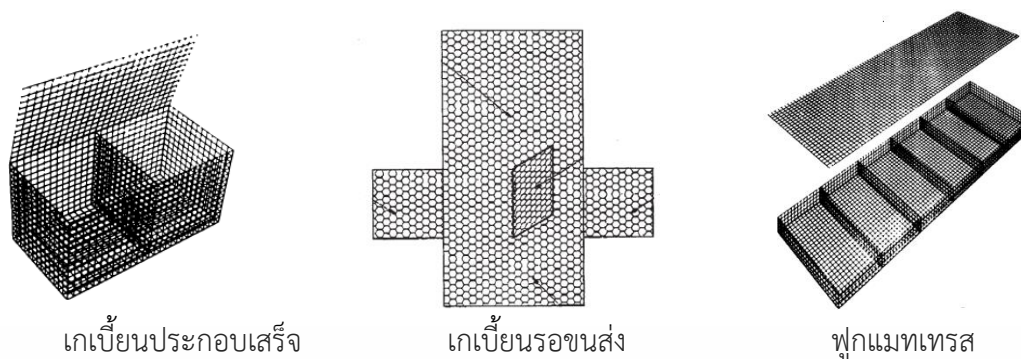
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 เกเบียน

กรงเกเบียนทำจากลวดเหล็ก (steel wire) เหล็กตะแกรงเชื่อมรูปเหลี่ยม (square welded mesh) หรือวัสดุโพลีเมอร์ (polymeric) เช่น โพลีโพรไพลีน (polypropylene) โพลีเอเธลีน (polyethylene) หรือ ไนลอน (nylon) จาก Bhudu (2011) กรงเกเบียนนี้ นอกจากจะถูกใช้ในงานโครงสร้างกันดิน (retaining structure) ยังใช้ในงานอื่นๆ เช่น การป้องกันการกัดเซาะ (erosion protection) งานชายฝั่งทะเล (coastal protection) งานป้องกันท่อวางบนดิน (pipe protection) หรืองานป้องกันท่อฝัง จาก Araki (2019) เป็นต้น

กล่องเกเบียนโดยทั่วไปมีความยาว 2 เมตร กว้าง 1 เมตร สูง 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ASTM 975 ให้ขนาดกล่องเกเบียนมีความกว้าง 1 เมตร มีความยาว 2 เมตร 3 เมตร หรือ 4 เมตร และมีความสูง 1 เมตร 0.5 เมตร หรือ 0.3 เมตร โดยกล่องเกเบียนที่ความสูง 0.3 เมตร จะเรียกว่ากล่องแมทเทรส (mattress) โดยกล่องแมทเทรสนี้ มักใช้กับงานป้องกันการกัดเซาะ (revetment) ส่วนกล่องเกเบียนมักจะใช้กับงานกำแพงกันดิน (retaining wall) กล่องเกเบียนและกล่องแมทเทรสแสดงดังรูปที่ 1.1 ที่แสดงกล่องเกเบียนแสดงรูปร่างเมื่อประกอบเสร็จพร้อมบรรจุหิน (รูปซ้าย) เป็นแผ่นก่อนประกอบเพื่อซ้อนกันสะดวกในการขนส่ง (รูปกลาง) และ แมทเทรสป้องกันการกัดเซาะ หรือ Revet Mattress (รูปขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เกเบี่ยนประกอบเสร็จ

เกเบี่ยนรอกขนส่ง

ฟูกแมทเทรส

รูปที่ 1.1 ก่อสร้างเกเบี่ยนที่ประกอบเสร็จ รอกขนส่ง และฟูกแมทเทรส (BS8002)

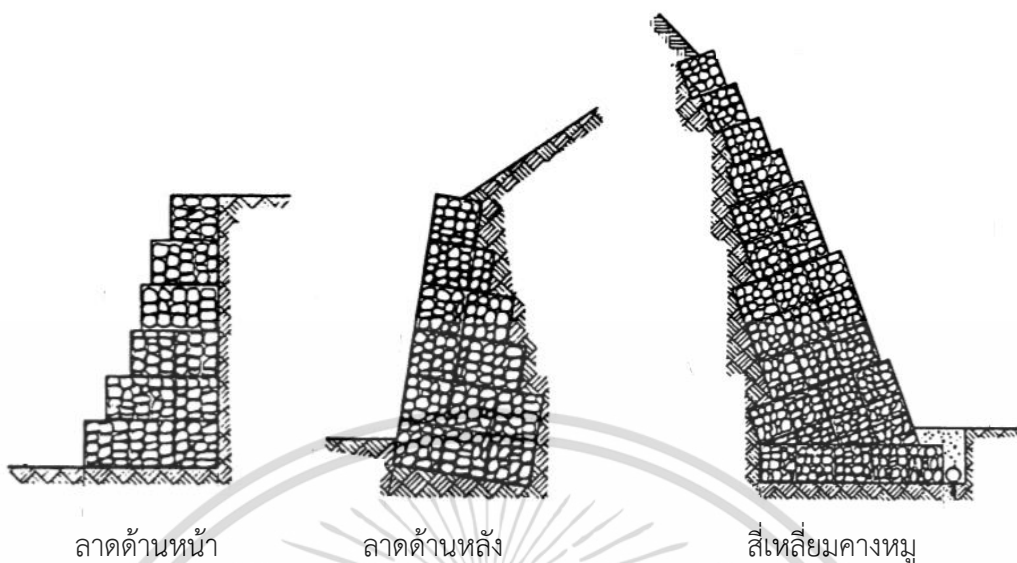
1.1.2 โครงสร้างกำแพงกันดินแบบเกเบี่ยน

กำแพงกันดิน (retaining wall) ใช้ต้านทานแรงดันดินด้านข้าง (lateral earth pressure) และที่เกิดจากน้ำหนักของดินในแนวตั้งและจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน กำแพงกันดินทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพด้านข้างของลาดดิน (slope stability) กำแพงกันดินมีหลายประเภท เช่น กำแพงกันดินแบบอาศัยน้ำหนักตัวเองรับน้ำหนักดิน (gravity retaining wall) กำแพงกันดินคอนกรีตหล่อในที่ (cast-in-place concrete) กำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (flexible retaining wall) เช่นเสาเข็มพืด (sheet pile) หรือกำแพงกันดินเสริมกำลัง (mechanical stabilized earth wall) จาก Budhu (2011)

นอกจากนี้แล้ว ยังมีกำแพงกันดินประเภทอื่นๆ เช่นกำแพงกันดินโมดูลาร์ (modular retaining wall) ตัวอย่างเช่น เกเบี่ยน (gabion) หรือกล่องกระชุน กำแพงกันดินประเภทอินสitus (in situ retaining wall) เช่น ตะปูดิน (soil nail) หรือกำแพงกันดินที่ผสมสารเคมีกับดิน (chemically stabilized earth wall) โดยประเภทนี้ผสมไลม์ (lime หรือ ปูนขาว) หรือ lime-cement กับดินเดิม (in situ soil) เพื่อเป็นวัสดุเกร้าท์ (grout) ใช้เสริมแรงในดิน จาก Budhu (2011)

นอกจากเกเบี่ยนจะสามารถจัดเป็นกำแพงกันดินแบบโมดูลาร์ เนื่องจากจะมีลักษณะเป็นกรง (cage) ที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม แล้วบรรจุหินในกล่องเกเบี่ยน แล้วนำกรงหลายกรงนี้มาเรียงตัวในแนวนอนและแนวตั้ง เกเบี่ยนยังสามารถจัดเป็นเป็นกำแพงแรงโน้มถ่วง (gravity wall) ที่อาศัยน้ำหนักตัวกำแพงเองรับน้ำหนักแรงดันดินและน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน

การใช้กล่องเกเบี่ยนมาวางเรียงเป็นกำแพงกันดิน สามารถวางเรียงได้หลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยอาจจะวางเป็นลาดด้านหน้า (front slope) วางเป็นลาดด้านหลัง (rear slope) หรือวางเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal) ที่หยาบไปมา โดยที่ความกว้างแต่ละชั้นไม่ควรมีความมากกว่าความสูงของชั้น จาก BS8002



รูปที่ 1.2 กำแพงเกเบี่ยนแบบลาดด้านหน้า ลาดด้านหลัง และสี่เหลี่ยมคางหมู (BS8002)

1.1.3 การออกแบบโครงสร้างเกเบี่ยน

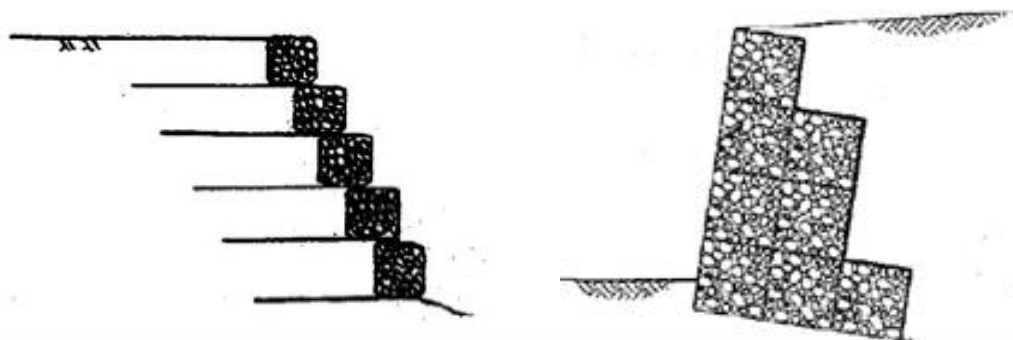
การออกแบบโครงสร้างกำแพงกันดินโดยทั่วไปจะตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (external stability) เสถียรภาพภายใน (internal stability) และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) โดยเสถียรภาพภายนอกจะพิจารณาโครงสร้างกำแพงกันดินเป็นก้อนวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) ที่ต้านทานแรงดันด้านข้างที่เกิดจากน้ำหนักดินแนวดิ่งและน้ำหนักบรรทุกทุกด้านบน เสถียรภาพภายในจะเกิดจากการขาด (rupture) จากแรงดึง (tensile) ของวัสดุเสริมแรงและแรงดึงออก (pull out) จากแรง interaction ระหว่างดินและวัสดุเสริมแรง ส่วนเสถียรภาพโดยรวม เป็นการตรวจสอบระนาบวิบัติที่อยู่ด้านหลังหรือด้านใต้กำแพงกันดิน

โครงสร้างเกเบี่ยนที่มีฐานกว้างน้อยกว่า 4 เมตรสามารถจัดเป็นกำแพงเกเบี่ยนขนาดเล็ก และสามารถออกแบบเป็นกำแพงแรงโน้มถ่วง (gravity wall) โดยไม่ต้องคำนึงการลดขนาดความกว้างของกำแพงเกเบี่ยนโดยใช้วัสดุเสริมแรงอื่นๆประกอบเพื่อประหยัดการใช้วัสดุและเพื่อการรักษาเสถียรภาพภายใน (internal stability) (BS8002)

การออกแบบโครงสร้างเกเบี่ยนเป็นกำแพงแรงโน้มถ่วงจะคำนึงถึงเสถียรภาพภายนอก (external stability) ในด้านการเลื่อนไถล (sliding) การรับแรงแบกทาน (bearing capacity) และการพลิกคว่ำ (overturning)

เสถียรภาพภายใน (internal stability) จะถูกตรวจสอบในบางกรณี ตัวอย่างเช่น กรณีที่ใช้เกเบี่ยนเป็นวัสดุผิวหน้า (facing) และใช้วัสดุเช่นตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ช่วยเป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcement) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 รูปซ้าย เพื่อลดปริมาณเกเบี่ยนและหินที่ใช้ รูป 1.3 รูปขวา แสดงกรณีที่ใช้เกเบี่ยนอย่างเดียวเป็นกำแพงแรงโน้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เกเบี่ยนใช้ร่วมกับตาข่ายเสริมแรง

(FHWA-NHI-10-024)

เกเบี่ยนเป็นกำแพงแรงโน้มถ่วง

(FHWA-SA-96-038)

รูปที่ 1.3 เกเบี่ยนกรณีใช้ร่วมกับตาข่ายเสริมแรงเปรียบเทียบกับใช้เกเบี่ยนเป็นกำแพงแรงโน้มถ่วง

สำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวม (global stability) จะตรวจสอบโดยใช้วิธีสมดุลจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) โดยอาศัยสมการสมดุลและหาอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety) ที่ระนาบวิบัติ (failure plane) หรือใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ (finite element method หรือ FEM) ที่พิจารณาค่าความเครียด (strain) ร่วมกับค่าความเค้น (stress) ตัวอย่างเช่น Zein A. K. M. (2017) ที่เสถียรภาพความลาด (slope stability) ของดินเหนียว (clay) โดยใช้ LEM และ FEM

1.1.4 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้ในการการออกแบบโครงสร้างเกเบี่ยน

การออกแบบกำแพงกันดินแบบโครงสร้างเกเบี่ยน นอกจากจะต้องพิจารณาให้ผ่านเสถียรภาพภายนอก เสถียรภาพภายใน และเสถียรภาพโดยรวม โดยต้องการให้โครงสร้างกำแพงกันดินมีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้ประหยัดสุด ในการออกแบบ ยังต้องพิจารณาให้โครงสร้างกำแพงกันดินมีความเค้นกดทับแนวตั้งที่ปลาย (vertical stress at the toe) เท่ากับความเค้นกดทับแนวตั้งที่สัน (vertical stress at the heel) หรือให้แรงที่ปลายทั้งสองข้างมีค่าใกล้เคียงกันจาก Enviromesh (2007) ซึ่งทำให้การออกแบบโครงสร้างกำแพงเกเบี่ยนนี้ มีลักษณะเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีขอบเขตค่าจำกัด (unconstrained optimization) และมีสมการเป้าหมายหลายสมการจึงจัดเป็นสมการจุดมุ่งหมายแบบหลายเกณฑ์ (multicriteria objectives)

เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ได้ถูกใช้ในงานด้านปฐพีวิศวกรรม (geotechnical engineering) ตัวอย่างเช่น Dungca J., et. al. (2018) ใช้โปรแกรมเชิงเส้นตรง (linear programming) ในการผสมดินเพื่อออกแบบกำแพงกันน้ำ (cut-off wall) งานวิจัยบางงานประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (optimization technique) ไปใช้ในการออกแบบกำแพงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินเช่น Saribas and Erbatur (1996) ใช้แบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear optimization model) ในการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้ Basudhar P. K. et. al. (2008) ประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่เป็นเส้นตรงโดยประยุกต์ใช้กับต้นทุนต่ำสุดในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall) โดยประยุกต์ใช้วิธี sequential unconstrained minimization technique (SUMT) ในการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่เป็นเส้นตรงที่มักจะไม่ได้คำตอบแบบแม่นยำ (exact solution) แต่จะได้คำตอบแบบประมาณ (approximation answer) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยังไม่มีการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่เป็นเส้นตรงในการออกแบบกำแพงเกเบี้ยน

งานศึกษานี้เริ่มจากการเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming หรือ MINLP) เพื่อใช้ในการออกแบบกำแพงเกเบี้ยน โดย MINP นิยมใช้ในงานทางวิศวกรรมเช่น Musati S. (2009) ประยุกต์ใช้ MINP สำหรับออกแบบเครื่องทำความร้อนแบบใช้ไฟ (fire heater) สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม MINLP ยังใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธา เช่น Kravanja S. et. al. (2003) ประยุกต์ใช้ MINP ในการออกแบบงานวิศวกรรมโครงสร้างและงานวิศวกรรมแหล่งน้ำ Kravanja S. et. al. (2017) ประยุกต์ใช้ MINP ในการออกแบบระบบพื้นแบบคอมโพสิตไอเปียม (composite I beam) ซึ่งเป็นการออกแบบงานวิศวกรรมโครงสร้าง Klansek U. (2016) ใช้ MINP ในการวางแผนโครงการ (project schedule) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ MINP ในงานทางด้านวิศวกรรมก่อสร้างและการจัดการ (construction engineering and management) นอกจากนี้ Komarudin F. M. (2017) ประยุกต์ใช้โปรแกรมเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer linear programming หรือ MIP) ในการวางโครงข่ายโลจิสติกส์ทางทะเล (maritime logistics network) เป็นการประยุกต์ใช้ MINP ในงานทางด้านวิศวกรรมขนส่ง (transportation engineering and management) โดย MIP นี้จะมีความซับซ้อนและความยุ่งยากน้อยกว่า MINP ในการสร้างคำตอบที่เหมาะสม

หลังจากประยุกต์ใช้ MINP ในการออกแบบกำแพงกันดินเกเบี้ยนแล้ว งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมเป้าหมาย (goal programming หรือ GP) ประยุกต์ใช้ในแบบจำลอง MINP เพื่อออกแบบกำแพงกันดินเกเบี้ยน ที่มีหลายเกณฑ์ (multi-criteria) ในการออกแบบ ทำให้แบบจำลองมีสมการจุดมุ่งหมายหลายสมการ (multiple objectives) ซึ่งทฤษฎีและวิธีการในการใช้โปรแกรมเป้าหมายได้ถูกอธิบาย เช่น Taiz M. et. al. (1998) และตัวอย่างการใช้โปรแกรมเป้าหมายเช่นงานศึกษาของ Ravirala and Grivas (1995) ที่ประยุกต์การใช้โปรแกรมเป้าหมายกับแผนงานบูรณาการของงานทางร่วมกับงานสะพาน

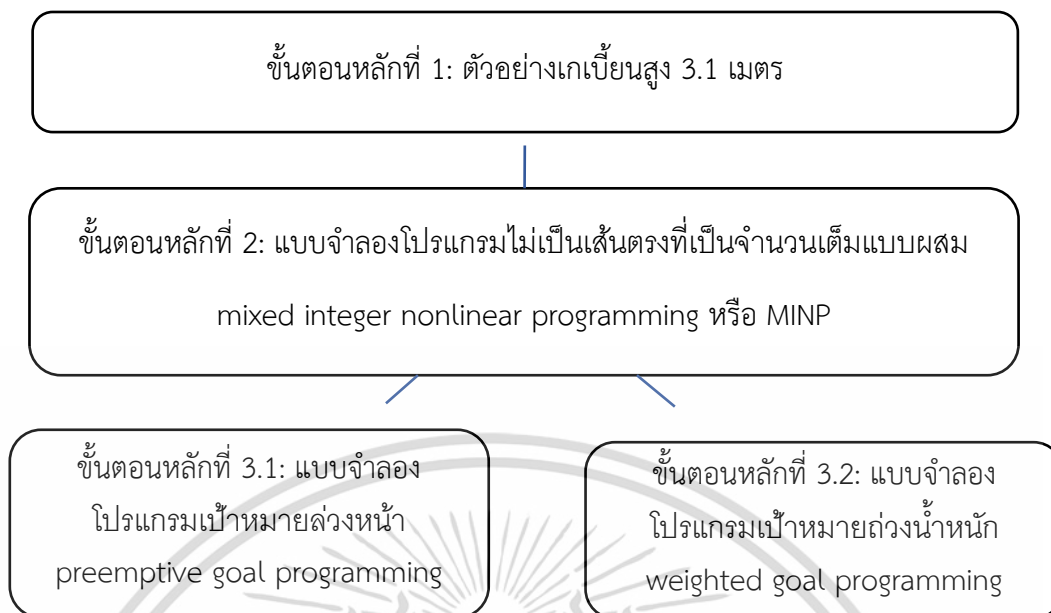
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเป้าหมาย (goal programming) ที่มีหลายวัตถุประสงค์ ในการคำนวณออกแบบกำแพงเกเบียนที่เป็นโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming หรือ MINLP) และทำการเปรียบเทียบผลจากการใช้โปรแกรมเชิงเป้าหมายที่มีสองวัตถุประสงค์คือการออกแบบให้ประหยัดที่สุดและออกแบบให้ความดันแนวตั้งที่ปลายฐานทั้งสองข้างเท่ากัน เปรียบเทียบกับ MINLP ที่มีวัตถุประสงค์เดียวคือการออกแบบให้ประหยัดที่สุด และเปรียบเทียบกับวิธีเดิม (conventional) จากบริษัทเอ็นไวโรเมช

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การออกแบบกำแพงเกเบียนจะเริ่มจากวิธีเดิมในขั้นหลักที่ 1 ดังแสดงใน key step 1 ในรูปที่ 1.4 ที่กำแพงเกเบียนมีความสูง 3.1 เมตร โดยที่ตัวอย่างการคำนวณดังกล่าวมาจาก Enviromesh (2007) แล้วงานศึกษานี้ประยุกต์ใช้โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming หรือ MINLP) ในการจัดเรียงกล่องเกเบียนที่มีขนาดต่างๆกันให้ประหยัดที่สุด ดังแสดงใน key step 2 ในรูปที่ 1.4 โดยให้ชื่อแบบจำลองว่า MINP ซึ่งการจัดเรียงกล่องให้ประหยัดที่สุดโดยการใช้โปรแกรม spreadsheet เช่นโปรแกรม Microsoft Excel แทบไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสม (optimum solution) ได้ โดย Microsoft Excel สามารถกระทำได้เพียงใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ในการป้อนค่า (input) สุดท้ายแล้วงานศึกษานี้เสนอการใช้เทคนิคโปรแกรมเป้าหมายสองวิธีคือโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (preemptive goal programming) ดังแสดงใน key step 3.1 ในรูปที่ 1.4 และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (weighted goal programming) โดยให้ชื่อแบบจำลองทั้งโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนักว่า GP ซึ่งทั้ง MINP และ GP ใช้ซอฟต์แวร์ GAMS ด้วย MINLP solver ในการหาคำตอบที่เหมาะสม (optimum solution) โดยผังงาน (flowchart) ของขั้นตอนหลัก (key step) ของแบบจำลองได้แสดงในรูปที่ 1.4

งานศึกษานี้ พิจารณาเฉพาะกรณีการออกแบบกำแพงเกเบียนมีความสูงในช่วง 3 เมตร จากตัวอย่างจากบริษัทเอ็นไวโรเมช Enviromesh (2007) ที่ให้รายละเอียดที่ชัดเจนในการคำนวณการออกแบบกำแพงเกเบียนสูง 3.1 เมตร บริษัทเอ็นไวโรเมชยังแสดงรูปแบบการออกแบบสองรูปแบบสำหรับกำแพงเกเบียนสูงในช่วง 3 เมตร คือรูปแบบที่บริษัทเอ็นไวโรเมช เรียกว่า ระบบ 27 (27 system) ที่ออกแบบกำแพงเกเบียนสูง 3.1 เมตร ดังแสดงในรายการคำนวณใน key step 1 ในรูปที่ 1.4 และอีกรูปแบบที่บริษัทเรียกว่า ระบบ 39 (39 system) ที่ออกแบบกำแพงเกเบียนสูง 3.0 เมตร



รูปที่ 1.4 ผังงานแสดงขั้นตอนหลักในการศึกษา

งานศึกษานี้เสนอแบบจำลอง MINP ซึ่งเป็นโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสมในการออกแบบกำแพงเกเบี่ยนสูงในช่วง 3 เมตร โดยออกแบบให้เกเบี่ยนมีขนาดยึดหยุ่นมากขึ้น โดยให้มีความกว้างที่มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 เมตรและมีความสูงชั้นละ 0.5 เมตร จำนวน 6 ชั้น รวมเป็น 3 เมตร โดยที่ MINP มีสมการวัตถุประสงค์เดียวคือออกแบบให้ประหยัดที่สุด คือให้มีพื้นที่หน้าตัดน้อยสุด โดยที่สมการข้อจำกัดจะเป็นข้อจำกัดด้านเสถียรภาพภายนอก (external stability constraint) และข้อจำกัดด้านเรขาคณิต (geometrical constraints) โดยข้อจำกัดด้านเสถียรภาพภายนอก จะพิจารณาในด้านการลื่นไถล (sliding) การหมุนคว่ำ (overturning) และกำลังแบกทานของดิน (soil bearing capacity) งานศึกษานี้จะไม่ครอบคลุมด้านเสถียรภาพภายใน (internal stability) และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) โดยงานศึกษานี้จะไม่พิจารณาเสถียรภาพภายในเนื่องจากโครงสร้างกำแพงกันดินนี้ไม่มีวัสดุเสริมแรง (reinforcement) และมีความสูงไม่เกิน 4 เมตร จาก BS8002 งานศึกษานี้จะไม่พิจารณาเสถียรภาพภายนอกเนื่องจากเสถียรภาพภายนอกจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับสถานที่ก่อสร้างจริงและสามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพทางลาด (slope stability) ซึ่งอาจจะเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธี LEM เช่น Slope/W®, Slide®, KUslope® เป็นต้น หรือเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธี FEM เช่น Plaxis®

งานศึกษานี้เสนอสองแนวทางในการใช้การโปรแกรมเป้าหมาย (goal programming) คือ โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (preemptive goal programming) และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (weighted goal programming) โดยโปรแกรมเป้าหมายจะมีสองวัตถุประสงค์หรือสองสมการจุดมุ่งหมาย (objective functions) โดยสมการจุดมุ่งหมายแรกคือการออกแบบให้ประหยัดที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขอสงวนสิทธิ์ในการใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสมการจุดมุ่งหมายที่สอง คือการสมดุลความเค้นแนวตั้งที่ปลายฐานทั้งสองข้าง โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (preemptive goal programming) จะมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือออกแบบให้ประหยัดที่สุด ส่วนขั้นตอนที่สอง คือ การสมดุลความเค้นแนวตั้งที่ปลายฐานทั้งสองข้าง โดยที่พื้นที่หน้าตัดที่ได้จากขั้นตอนแรก จะถูกกำหนดเป็นสมการข้อจำกัดในโปรแกรมเป้าหมายในขั้นตอนที่สอง ส่วนโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (weighted goal programming) จะรวมจุดมุ่งหมายทั้งสองจุดมุ่งหมายคือออกแบบให้ประหยัดที่สุดและรักษาสมดุลความเค้นแนวตั้งที่ปลายฐานทั้งสองข้างให้อยู่ในสมการเป้าหมายเดียว ทำได้โดยการกำหนดน้ำหนักความสำคัญของจุดมุ่งหมายเอง (subjectively) แบบจำลอง MINP มีความยุ่งยากในด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (convergence) และการได้คำตอบที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimality) งานศึกษานี้จะเสนอแนวทางในการจัดการความยุ่งยากในการจัดการด้านการลู่เข้าสู่คำตอบและการได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

งานศึกษานี้จะจำกัดเฉพาะการออกแบบโครงสร้างกำแพงกันดินเกเบี่ยนสูงในช่วง 3 เมตร เท่านั้น โดยจะนำแบบผลการออกแบบที่ได้จากแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายทั้งสองแบบจำลองที่มีสองวัตถุประสงค์ คือ โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (key step 3.1 ในรูปที่ 1.4) และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (key step 3.2 ในรูปที่ 1.4) เปรียบเทียบกับแบบจำลอง MINP ที่มีวัตถุประสงค์เดียว (key step 2 ในรูปที่ 1.4) และเปรียบเทียบกับต้นแบบการออกแบบสองระบบคือจากบริษัท เอ็นไวโรเมช ระบบ 27 (key step 1 ในรูปที่ 1.4) และระบบ 39

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

งานศึกษานี้ นำแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายสองแบบจำลองคือแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก ไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming หรือ MINP) เพื่อออกแบบกำแพงเกเบี่ยนเทียบกับกำแพงเกเบี่ยนเดิมที่มีความสูง 3.1 เมตร แบบจำลองที่เสนอสามารถบรรลุสองวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือออกแบบได้ประหยัดที่สุดคือมีหน้าตัดและน้ำหนักที่น้อยที่สุดและสามารถออกแบบให้สมดุลความเค้นแนวตั้งที่ปลายฐานทั้งสองด้านมีค่าใกล้เคียงกันที่สุดคือมีระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity) มีค่าใกล้ศูนย์กลาง ซึ่งจะต้องออกแบบให้ผ่านข้อจำกัดในด้านเสถียรภาพภายนอก (external stability) ในด้านการไถล (sliding) การหมุนคว่ำ (overturning) และกำลังแบกทาน (bearing capacity) และข้อจำกัดอื่นๆเช่นข้อจำกัดทางเรขาคณิต

เพียงการออกแบบให้ประหยัดที่สุดอย่างเดียว ภายใต้ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพภายนอกและข้อจำกัดทางเรขาคณิต ที่ในกรณีนี้เป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) เป็นตัวแปรจำนวนเต็ม (integer variables) ผสมกับตัวแปรต่อเนื่อง (continuous variables) ส่วนสมการเป้าหมาย (objective functions) และสมการข้อจำกัด (constraints) เป็นโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear) ทำให้จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลอง MINP ในการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ซึ่งจะ

หาคำตอบได้ยากหากใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) โดยใช้โปรแกรม spreadsheet เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญต์เห็นใบเซปาระเบียนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Microsoft Excel งานศึกษานี้ยังได้แนะนำวิธีการจัดการกับปัญหาการลู่เข้าและปัญหาการได้ค่าที่เหมาะสมที่เกิดจากการใช้ MINP รวมถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมเป้าหมายใน MINP ทำให้การออกแบบสามารถบรรลุได้สองวัตถุประสงค์ ขณะที่การใช้ MINP อย่างเดียวสามารถบรรลุได้เพียงหนึ่งวัตถุประสงค์

1.5 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อธิบายละเอียดในบทที่ 2 อธิบายโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม ในบทที่ 3 ให้รายละเอียดตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเกเบี่ยนในบทที่ 4 บทที่ 5 เป็นแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสม (optimization models) ที่รวมโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming หรือ MINP) และโปรแกรมเป้าหมาย (goal programming) ทั้งแบบโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (preemptive goal programming) และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (weighted goal programming) บทที่ 6 วิเคราะห์และอภิปรายผลใน บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 เกเบียน

บทนี้กล่าวถึงกำแพงกันดินเกเบียน โดยเป็นเนื้อหาทั่วไปใน 2.1 ชนิดของกำแพงและการใช้งานใน 1.2 วัสดุใน 1.3 การออกแบบใน 1.4 การก่อสร้างใน 1.5 ลักษณะตะแกรงใน 1.6

2.1 กำแพงกันดินเกเบียนโดยทั่วไป

เกเบียนมีลักษณะเป็นกรง (cage) หรือตะกร้า (basket) ขนาดใหญ่ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นลวดเหล็กขึ้นรูปเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 เกเบียนใช้สำหรับก่อสร้างเป็นกำแพงกันดิน (retaining walls) หรือโครงสร้างปิดทับหน้าตลิ่ง (revetment) หรือใช้สำหรับงานป้องกันกัดเซาะ (erosion) อาจอยู่ในรูปจักสาน (wickerwork) ระแนงไม้ไผ่ (bamboo slats) ไนลอน (nylon) หรือ โพลีโพรไพลีน (polypropylene) ซึ่งมีข้อควรระวังในการใช้กำแพงเกเบียนที่ทำจากวัสดุที่ติดไฟได้ (flammable)

2.2 ชนิดของกำแพงและการใช้งาน

การซึมผ่าน (permeability) และความยืดหยุ่น (flexibility) ของเกเบียนทำให้เกเบียนมีความเหมาะสมถ้าดินหลังกำแพง (retained material) มีโอกาสที่จะชุ่มน้ำ (saturated) หรือดินมีกำลังแบกทานต่ำ (poor bearing capacity) ลวดเหล็กตะแกรงเกเบียน (wire mesh gabion) จะเป็นสองรูปแบบคือ แบบตะกร้า (basket) ซึ่งจะใช้สำหรับเป็นกำแพง หรือแบบฟูก (mattress) ซึ่งจะใช้เป็นโครงสร้างปิดทับหน้าตลิ่ง (revetment) โดยใช้สำหรับการลาดทับหน้า (lining) ตลิ่งแม่น้ำ (river bank)

รูปทรงปกติของของกำแพงกันดินเกเบียนจะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal) แต่ผิวด้านหน้ากำแพง (ผิวด้านนอกหรือ outer face) และผิวด้านหลังกำแพง (ผิวด้านในหรือ inner face) จะเป็นแนวตรง (straight) หรือเป็นขั้นบันได (stepped) ซึ่งแบบขั้นบันไดจะพบเห็นได้ทั่วไปมากกว่าแบบแนวตรง

ความกว้างของแต่ละชั้นเกเบียนไม่ควรมีค่ามากกว่าความลึกกำแพง กำแพงอาจจะมีผิวด้านนอกเป็นแนวตรง ซึ่งมักจะนิยมสร้างเป็นมุมเอียง (batter) เพื่อให้ดูสวยงาม (appearance) และเพิ่มแรงต้านทานต่อการหมุนคว่ำ (overturning) กำแพงที่มีผิวเป็นขั้นบันไดควรมีลักษณะเช่นเดียวกันคือเอียงไปทางดินถมด้านหลัง (backfill)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำแพงที่มีขนาดใหญ่ที่ความกว้างกำแพงมากกว่า 4 เมตร อาจทำให้ประหยัดขึ้นโดยการใช้กล้องเกเบี่ยนแบบเซลลูลาร์ (cellular) ผิวด้านนอกและด้านในอาจจะโดนยึดโดยเกเบี่ยนและใส่หินไว้ตรงกลาง ขนาดและรูปร่างของเซลล์ควรมีสัดส่วนเดียวกันเพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพภายใน (internal stability)

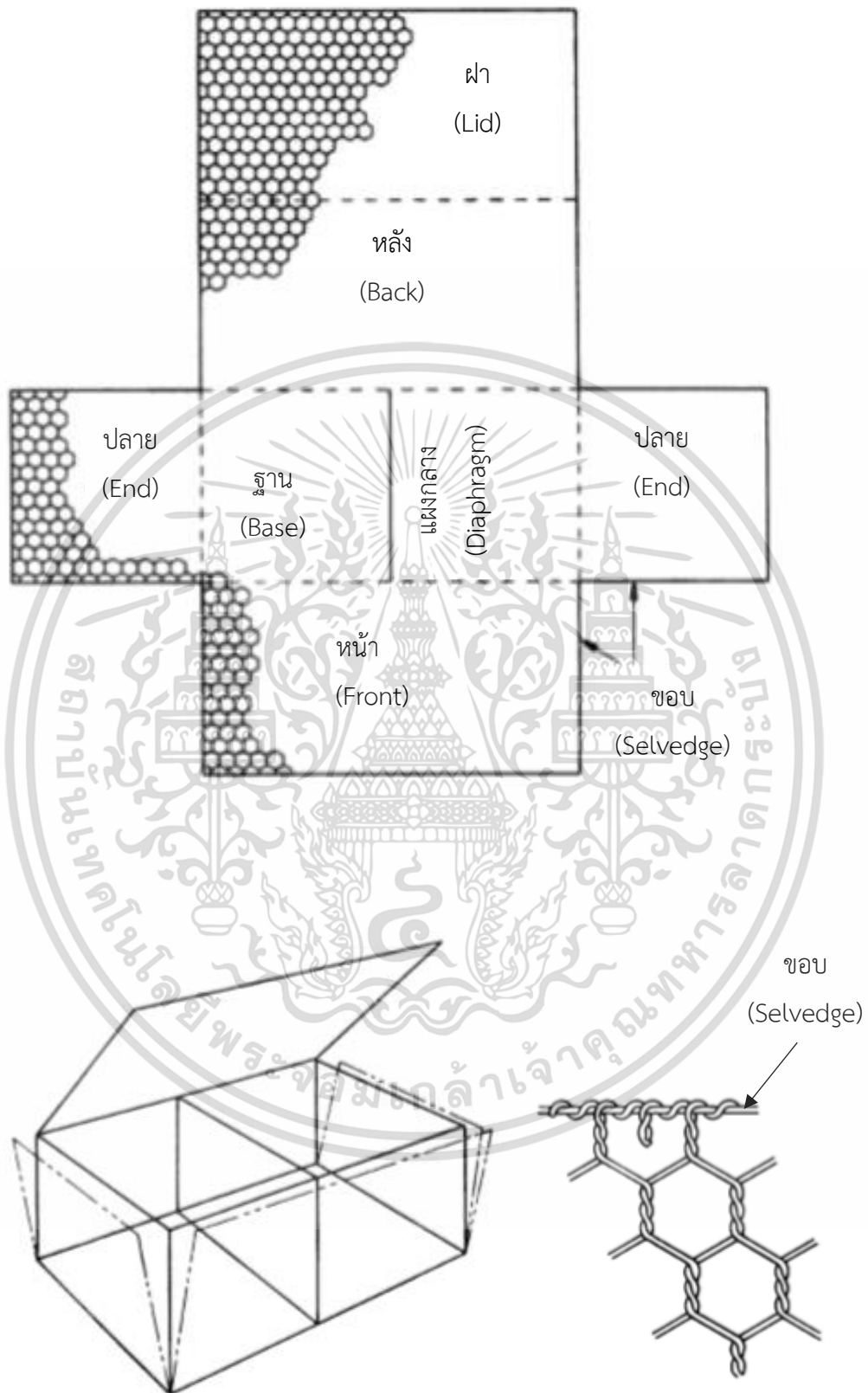
การซึมผ่านได้ดีของกำแพงเกเบี่ยนมีประโยชน์เมื่อใช้สำหรับงานป้องกันตลิ่งแม่น้ำหรืองานป้องกันตลิ่งจากคลื่นทะเล เพราะน้ำจะระบายออกได้ดีในช่วงน้ำลด อาจจะมีควมจำเป็นต้องใช้ชั้นกรอง (filter) หลังกำแพงเพื่อป้องกันการชะล้าง (leaching) ของอนุภาคละเอียด (fines) ของดินหลังกำแพง กำแพงเกเบี่ยนยังมีความเหมาะสมที่จะใช้ในสถานที่ที่มีอากาศหนาวเย็นจัดจนมีน้ำค้างแข็งตัว (frost heave)

อายุใช้งานของเกเบี่ยนไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุของกรงหรือตะกร้าถ้าหินภายในกรงค่อนข้างจะอยู่ตัวทำให้รูปทรงของกำแพงไม่เสียรูปแม้ว่าตัวกรงจะกัดกร่อน (corrosion) หรือลวดเหล็กตะแกรงถูกเสียดสี (abrasion) ถ้าดินมีกำลังเพียงพอที่จะใช้เป็นโครงสร้างแข็งเกร็ง (rigid structure) ได้ กำแพงอาจจะถูกทำให้เป็นกำแพงถาวรโดยการเกร้าท์กำแพงเกเบี่ยนด้วยซีเมนต์เกร้าท์ แต่คุณสมบัติของกำแพงในด้านความยืดหยุ่น (flexibility) จะเปลี่ยนไป

2.3 วัสดุ

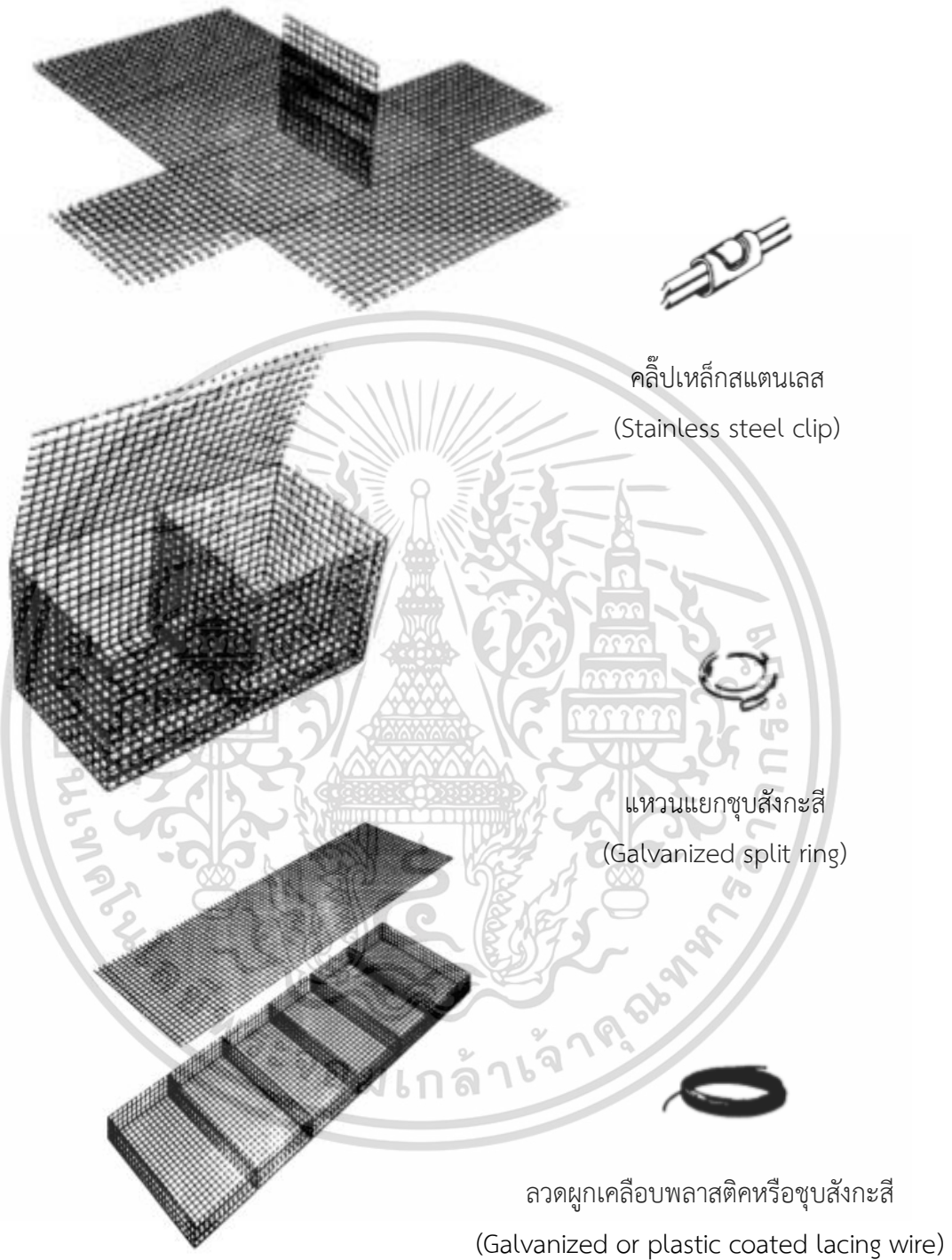
2.3.1 ลวดเหล็กตะแกรงถักทอรูปทรงหกเหลี่ยม

ลวดเหล็กตะแกรงถักทอรูปทรงหกเหลี่ยม (hexagonal woven wire mesh) เกิดจากการสานโดยใช้เครื่องจักรขึ้นรูปเป็นตะแกรงหกเหลี่ยม ตะแกรงนี้สามารถยึดและหัดได้สองทิศทางในระนาบแผ่นทำให้กล้อลวดเหล็กตะแกรงทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ใส่หินย่อย (quarried stone) หรือกรวดแม่น้ำ (shingle river) สามารถเสียรูปในทิศทางใดๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบทั่วไปของกรงเกเบี่ยนตะแกรงถักทอรูปทรงหกเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 รูปแบบทั่วไปของกรงเคเบียงตะแกรงเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ลวดเหล็กตะแกรงเชื่อม

ลวดเหล็กตะแกรงเชื่อม (welded wire mesh) จะเป็นตะแกรงรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (oblong) หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square) ที่ผลิตจากลวดเหล็กรีดเย็น (cold reduced steel wire) ผลิตตาม BS1052 โดยจะต้องมีการเชื่อมด้วยไฟฟ้า (electrical welded) ทุกจุดตัด (intersection) และให้กำลังเฉือนที่จุดเชื่อมเฉลี่ยต่ำสุด (minimum average weld shear strength) ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังแรงดึงสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด (minimum ultimate strength) ของลวด

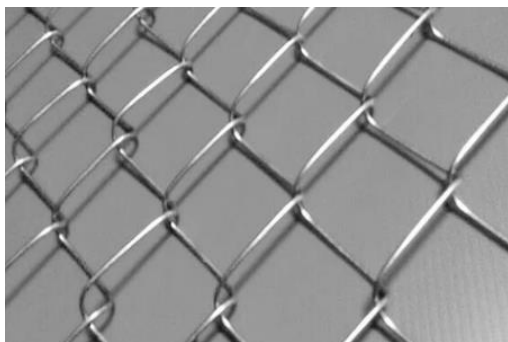
ลวดที่เชื่อมจะถูกตัดเป็นแผ่นที่ขอบ (flush edge) เพื่อให้ได้ตะกร้าที่มีขนาดที่ต้องการทั้งด้านข้าง ด้านบน ฐานด้านล่าง และแผงกลาง (diaphragm) (ในกรณีที่ต้องมีแผงกลาง) และต่อกันด้วยคลิปเหล็กสแตนเลส (stainless clip) หรือแหวนแยกลวดสปริงชุบสังกะสี (galvanized spring steel split rings) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เกเบี่ยนนี้จะถูกขนส่งไปสถานที่ก่อสร้างในลักษณะห่อเป็นแผ่นเรียบ (flat-packed)

ผู้ออกแบบจะกำหนดขนาดลวดเพื่อให้ได้ความแข็งแรง (rigidity) หรือความยืดหยุ่นที่ต้องการของกล่องเกเบี่ยน โดยทั่วไปแล้ว ตะกร้าเกเบี่ยนจากตะแกรงเชื่อมจะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าลวดเหล็กตะแกรงถักทอ

2.3.3 ตะแกรงอื่นๆ

ตะแกรงประเภทอื่นๆ (other meshes) อาจจะถูกใช้เช่นตะแกรงเหล็กขัดลูกโซ่หรือ chain link หรือเป็น ตะแกรงฉีก (expanded metal) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จาก Tech1 แต่ตะแกรงเหล่านี้มีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากในการแกะออก (unravel) หากมีการฉีกขาด ไม่มีลวดขอบ (selvedge wire) ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ที่ชัดเจน ทำให้ขึ้นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากได้ยาก และทนต่อการกัดกร่อน (corrosion) ได้น้อย

เกเบี่ยนที่ขนส่งมาสถานที่ก่อสร้างเป็นม้วน (rolls) หรือเป็นแผ่น (sheets) มักจะไม่มีแผงกลาง (diaphragm panels) ทำให้เกเบี่ยนที่ขาดแผงกลางนี้จะวิบัติ (failure) ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตะแกรงผิวนอกสุดที่อาจจะเกิดการฉีกขาด (rupture)



ตะแกรงเหล็กขัดลูกโซ่

ตะแกรงฉีก

รูปที่ 2.3 ตะแกรงประเภทอื่นๆเช่นตะแกรงเหล็กขัดลูกโซ่ ตะแกรงฉีก

2.3.4 การกัดกร่อนและความเสียหายของเกเบียน

การใช้เกเบียนควรพิจารณาถึงเรื่องต่างๆดังนี้คือ

ก. กรณีไม่เคลือบผิว (unprotected) ลวดเหล็กเกเบียนที่ไม่ได้เคลือบผิว (uncoated) ปกติแล้วจะใช้ในงานชั่วคราว (temporary works) แต่หากเส้นผ่าศูนย์กลางลวดมีค่ามากกว่า 5 มิลลิเมตร อายุใช้งานของลวดไม่เคลือบผิวอาจนานพอสำหรับใช้ในงานถาวร (permanent works)

ข. ลวดชุบสังกะสี (galvanized wire) เกเบียนตะแกรงถักทอหกเหลี่ยม (hexagonal woven mesh gabion) ควรจะทำจากลวดชุบสังกะสีตาม BS443 สำหรับเกเบียนตะแกรงเชื่อม แผงตะแกรงที่ใช้ประกอบเป็นกรงจะต้องชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (hot dip) ตาม BS729 หลังจากผ่านการเชื่อม เกเบียนชุบสังกะสีอาจจะถูกใช้ถ้าอายุใช้งานของลวดชุบสังกะสีนานพอสำหรับเป็นงานโครงสร้างที่ต้องการ ดินและน้ำที่สัมผัสกับเกเบียนจะต้องถูกประเมินในด้าน 1) สภาพต้านทานดิน (soil resistivity) 2) แนวโน้มที่จะเกิดรีดอกซ์ (ปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้และรับอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน) 3) เกลือละลาย (dissolve salts) เช่นปริมาณคลอไรด์ไอออน (chloride ion content) หรือปริมาณซัลเฟตทั้งหมด (total sulfate content) 4) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH value) 5) ความชื้นของดิน (soil moisture content) ซึ่งถ้าลวดชุบสังกะสีตกอยู่ในสภาพที่รุนแรง (aggressive conditions) ตามที่กล่าวมา ควรพิจารณาการใช้ลวดเคลือบผิวPVC (polyvinyl chloride)

ค. ลวดเคลือบผิวPVC การเคลือบผิวPVC ต้องเป็นไปตาม BS4102 ความหนาตามแนวรัศมีในการเคลือบผิวของแกนลวดชุบสังกะสี (galvanized wire core) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร PVC จะต้องมีการยึดเหนี่ยว (bond) เพียงพอกับแกนลวดชุบสังกะสีเพื่อป้องกันการไหลแรงตึงผิว (capillary flow) ของน้ำที่อยู่ระหว่างลวดและ PVC จนทำให้เกิดการกัดกร่อน (corrosion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. ความเสียหายจากการเสียดสี (damage by abrasion) ลวดเหล็กชุบสังกะสีหรือลวดเหล็กเคลือบ PVC จะต้องไม่เสียหายจากการเสียดสีต่อหินกรวด (shingle) ที่ท้องน้ำ (river beds) หรือที่ชายฝั่งทะเล (coastal foreshores) ในกรณีที่เป็นแม่น้ำตามพื้นที่ที่เป็นภูเขา (mountain rivers) วัสดุหนักที่มากับน้ำ (heavy waterborne materials) มักจะถูกพัดพามาตามท้องน้ำ กรณีนี้ควรใช้เกเบี่ยน PVC ในการก่อสร้างกำแพงตามแม่น้ำที่มีผิวตรงแนวตั้งเข้ารับน้ำ (vertical water face) แต่ไม่ควรใช้เกเบี่ยน PVC ที่มีผิวแนวราบ (horizontal surface) เป็นพื้นที่ป้องกันการกัดเซาะที่ฐาน (anti-scour apron) ตะแกรงชุบสังกะสีจะถูกเสียดสีได้ง่ายกว่าในสถานการณ์ที่กล่าวมาเมื่อเทียบกับเกเบี่ยน PVC สำหรับชายฝั่งทะเล (coastal foreshores) ไม่ควรใช้เกเบี่ยน PVC เนื่องจากหินกรวดก้อนใหญ่ (large shingle) หรือวัสดุที่มากับน้ำหนักมาก (heavy abrasion material) มีโอกาสมากที่จะถูกโยนใส่โครงสร้างหรือชะล้างผิวโครงสร้างโดยคลื่นทะเล

2.3.5 การประกอบหน่วยเกเบี่ยน

ในการประกอบหน่วยเกเบี่ยน (assembly of gabion units) ขอบของแผงปลาย (end panels) และขอบของแผงกลาง (diaphragm panels) (ถ้ามี) จะต้องถูกยึดด้านข้างและผูก (lacing) ด้วยลวดเหล็กขนาดอย่างน้อย 2.2 มิลลิเมตรและลวดเหล็กจะต้องถูกชุบสังกะสีหรือเคลือบ PVC เหมือนกันกับตะแกรงเกเบี่ยน

2.3.6 ขนาดเกเบี่ยน

สำหรับขนาดเกเบี่ยน (gabion sizes) เกเบี่ยนรูปกล่อง (box gabions) ปกติจะอยู่ในหน่วยย่อย (modules) ทุกครึ่งเมตร ในความยาว 2 เมตรถึง 6 เมตร กว้าง 1 เมตรถึง 2 เมตร และสูง 0.3 เมตร, 0.5 เมตร และ 1 เมตร ถ้าเป็นไปได้ แผงกลางที่ตั้งตรงขวาง (transverse vertical diaphragm panels) ควรอยู่ตรงกลางที่ 1 เมตรเพื่อป้องกันการบิดตัวเกินไป (undue distortion) และการไหลเคลื่อนของหิน (stone migration)

2.3.7 การเติมหิน

ในการเติมหิน (stone filling) หินจะต้องเป็นไปตาม BS5390 ในด้านความแข็ง (hardness) กำลังการบด (crushing strength) ความต้านทานการผุกร่อน (resistance to weathering) หินที่เกิดตามธรรมชาติเช่นหินกลม (rounded stone) หรือหินย่อย (quarried stone) สามารถใช้ได้ (acceptable) ขนาดต่ำสุดของหินจะถูกกำหนดโดยขนาดตะแกรง ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ที่จะถูกย่อยลงถึง 50 มิลลิเมตรถึง 80 มิลลิเมตร เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถก่อสร้างได้มีประสิทธิภาพ ขนาดหินควรจะเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอเท่าที่เป็นไปได้ สำหรับโครงสร้างในทะเล (marine structures) ปกติจะใช้หินขนาดต่ำสุดที่ 175 มิลลิเมตร ขนาดสูงสุดที่แนะนำไม่ควรเกิน 200 มิลลิเมตร

2.4 การออกแบบ

2.4.1 การออกแบบโดยทั่วไป

เกเบี่ยนขนาดเล็กควรจะออกแบบด้วยหลักการเดียวกันกับกำแพงมวลแรงโน้มถ่วง (gravity mass wall) ไม่ต้องมีค่าเผื่อ (allowance) สำหรับกำลัง (strength) หรือมวล (mass) ของลวดเหล็ก ตะแกรง (wire mesh) ตัวอย่างกำแพงเกเบี่ยนแสดงในรูปที่ 2.4 ค่าความหนาแน่นหิน (density) ควรคิดที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุตัน (solid material)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกำแพงเกเบี่ยนจาก BS8002

2.4.2 สมดุลของกำแพง

ในการพิจารณาสมดุลของกำแพง (equilibrium of the wall) ดินหลังกำแพง (retained soil) จะส่งแรงดันเชิงรุก (active pressure) ครอบคลุมความสูงกำแพงทั้งหมด แต่ไม่มีแรงดันอุทกสถิต (hydrostatic pressure) หรือแรงดันน้ำนิ่ง

หน้าตัดขวาง (cross section) ของกำแพงเกเบี่ยนที่เป็นโครงสร้างมวลแรงโน้มถ่วง (gravity mass structure) ควรเป็นสัดส่วน (proportional) ที่ทำให้แรงลัพธ์ (resultant force) ที่หน้าตัดแนวนราบ (horizontal section) ใดๆอยู่ในหนึ่งในสามที่ส่วนกลาง (middle third) หน้าตัดแนวนราบนั้นๆ แรงดัน (thrust) ที่กระทำโดยดินถม (backfill) ต่อกำแพงเกเบี่ยนจะกระทำที่มุมตั้งฉาก (perpendicular) กับกำแพง มุมกระทำอาจจะถูกสมมุติให้เท่ากับออกแบบ φ' เนื่องจากความขรุขระของผิวกำแพง ซึ่งอาจจะถูกสมมุติให้เท่ากับผิวแรงเสียดทานดิน (soil friction surface)

เมื่อดินหลังกำแพงถูกค้ำยันโดยปลายฐานหลังกำแพง (heel) ดินอาจจะถูกสมมุติให้เป็นส่วนหนึ่งของกำแพงและการออกแบบอาจจะสมมุติให้เป็นแรงข้างหลังแนวตั้งเสมือน (virtual vertical rear force)

ในคำนวณแรงต้านต่อการไถลไปข้างหน้า (sliding forward) กำแพงจะถูกต้านด้วยมุมแรงเสียดทาน (angle of friction) จากดินฐานราก (foundation soil) ไม่ใช่แรงเสียดทานจากเศษหิน (stone rubble) และดิน กำแพงเกเบี่ยนอาจจะสร้างบนฐานรากที่เอียง (slope foundation) เพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน

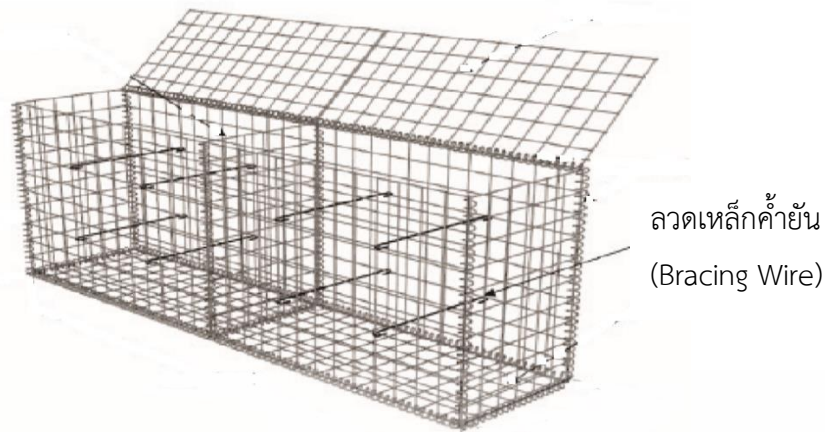
ควรตรวจสอบระดับเหนือกำแพงเกเบี่ยนเพื่อให้แน่ใจว่าแรงต้านทานการไถลมีค่าเพียงพอเพื่อป้องกันการวิบัติของกำแพงโดยไม่ต้องพิจารณาถึงลวดเหล็กตะแกรง (wire mesh)

2.5 การก่อสร้าง

2.5.1 ตำแหน่งกรง

ในการก่อสร้าง (construction) ในส่วนตำแหน่งกรง (positioning cages) กรงเปล่าอาจจะวางเดี่ยวหรือวางร่วมกันเป็นกลุ่ม เกเบี่ยนลวดเหล็กตะแกรงถักทออาจจะถูกยึดออกด้วยเครื่องกว้าน (winch) เล็กๆ ก่อนที่จะถูกผูกด้วยลวดกับหน่วยถัดไปที่ถูกเติมหินไปแล้ว โดยปกติแล้วเกเบี่ยนที่จะนำไปวางอยู่ใต้น้ำจะถูกเติมหินก่อนที่จะถูกยกไปวางโดยเครน

กรงจะถูกเติมหินมากกว่าปกติ (overfilling) เพื่อให้หินแน่นพอเมื่อมีการทรุดตัวในเวลาต่อมา (subsequent settlement) ลวดเหล็กค้ำยันภายในที่อยู่แนวราบ (horizontal internal bracing wire) ควรจะถูกยึดแน่นที่ตรงกลางระหว่างผิวนอกและผิวในที่ระยะ 330 มิลลิเมตรทั้งแบบเกเบี่ยนลวดเหล็กตะแกรงถักทอและเกเบี่ยนตะแกรงเชื่อมถึงแม้ว่าเกเบี่ยนตะแกรงเชื่อมจะลึกกว่า 500 มิลลิเมตร ตัวอย่างลวดค้ำยันแสดงใน bracing tie ในรูปที่ 2.5 เมื่อเติมหิน ฝาเกเบี่ยน (gabion lids) จะต้องถูกปิดโดยไม่มีช่องว่าง (gaps) และต้องพันลวดทึกลง (wired down) รอยต่อแนวตั้ง (vertical joints) ระหว่างเกเบี่ยนหน่วยต่างๆควรจะวางหยักไปมา (staggered) เพื่อความสวยงามและป้องกันการเกิดระนาบเฉือนแนวตั้งที่อ่อนแอ (weak vertical shear plane) โค้ง (curves) และมุม (angles) ที่ผิวโครงสร้างอาจจะขึ้นรูปได้โดยการตัดและพับลวดเหล็กตะแกรงเพื่อให้ได้รูปทรงที่ต้องการ



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแสดงค้ำยันของกำแพงเกเบี่ยนจาก Ćwirko M. et. al. (2017)

2.5.2 การประยุกต์ใช้กับงานในทะเล

ในส่วนการประยุกต์ใช้กับงานในทะเล (marine applications) เกเบี่ยนจะต้องต้านทานแรงคลื่น จึงควรจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของหินในตะกร้าให้น้อยที่สุด ควรเติมหินให้แน่นและผูกลวดให้ตึง (taut) ในทางปฏิบัติ ควรจะเปิดตะกร้าหลังจากผ่านคลื่นสองสามลูกเพื่อเติมหินเพิ่มเพื่อลดการยุบตัวที่เกิดขึ้นจากการเติมหินก่อนหน้านี้ ควรนำหินที่เหลือจากการก่อสร้างออกไป ไม่ทิ้งไว้ที่ชายฝั่ง

2.6 ลักษณะตะแกรง

สำหรับลักษณะตะแกรง (mesh characteristics) จาก ASTM A975 สำหรับเกเบี่ยนชนิดตะแกรง (mesh type) เป็นแบบ 8 by 10 สำหรับแมทเทรส (revet mattresses) เป็นชนิด 6 by 8 ช่องเปิด (mesh opening) ของเกเบี่ยนมีขนาด 83 x 114 มิลลิเมตร ของแมทเทรสมีขนาด 64 x 83 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.6 รายละเอียดเพิ่มเติมของลักษณะตะแกรง แสดงในตารางที่ 2.1



เกเบี่ยนเป็นชนิด 8 by 10 มีค่า D เท่ากับ 83 มิลลิเมตร (3.25 นิ้ว)

แมทเทรสเป็นชนิด 6 by 8 มีค่า D เท่ากับ 64 มิลลิเมตร (2.50 นิ้ว)

รูปที่ 2.6 ขนาดรูเปิดลวดเหล็กตะแกรง จาก ASTM A975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ลักษณะตะแกรง ตาม ASTM A975

ลักษณะ (Characteristics)	เกเบียน (Gabion)		แมทเทรส (Mattress)	
	เคลือบโลหะ (Metallic Coated)	เคลือบพีวีซี (PVC Coated)	เคลือบโลหะ (Metallic Coated)	เคลือบพีวีซี (PVC Coated)
ชนิดตะแกรง (Mesh Type)	8 by 10	8 by 10	6 by 8	6 by 8
ช่องเปิดตะแกรง, มิลลิเมตร (Mesh Opening, mm)	83 by 114	83 by 114	64 by 83	64 by 83
ลวดตะแกรง, มิลลิเมตร (Mesh wire, mm)	3.05	2.7	2.2	2.2
ลวดขอบ, มิลลิเมตร (Selvege wire, mm)	3.8	3.4	2.2	2.2
ลวดผูก, มิลลิเมตร (Lacing wire, mm)	2.2	2.2	2.2	2.2
กำลังต่ำสุดในแนวขนานกับการบิด, กิโลนิวตันต่อเมตร (Parallel to twist minimum strength, kN/m)	51.1	42.3	33.6	33.6
กำลังต่ำสุดในแนวตั้งฉากกับการบิด, กิโลนิวตันต่อเมตร (Perpendicular to twist minimum strength, kN/m)	26.3	20.4	13.1	13.1
กำลังต่ำสุดในแนวจุดต่อกับขอบ, กิโลนิวตันต่อเมตร (Connection to selvages minimum strength, kN/m)	20.4	17.5	10.2	10.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม

บทนี้กล่าวถึงโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming problems หรือ MINLP) โดยเป็นเนื้อหาทั่วไปใน 3.1 รูปแบบของ MINLP ใน 3.2 แนวคิดพื้นฐานในการแก้ปัญหา MINLP ใน 3.3 วิธีเชิงกำหนดสำหรับ MINLP แบบคอนเวกซ์ ใน 3.4 MINLP แบบไม่คอนเวกซ์ ใน 3.5 วิธีฮิวริสติกส์สำหรับ MINLP ใน 3.6

3.1 MINLP โดยทั่วไป

หลายปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมที่ประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรมจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (discrete variables) และความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear relationships) ซึ่งปัญหาโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming problems หรือ MINLP) ที่จะรวมความยากของการจัดหมู่ (combinatorial difficulty) ของการหาค่าที่เหมาะสม (optimizing) ของตัวแปรไม่ต่อเนื่องและยังรวมถึงความท้าทายในการจัดการกับฟังก์ชันไม่เป็นเส้นตรง

วิธีหาค่าตอบสำหรับ MINLP โดยส่วนใหญ่จะประยุกต์ใช้การค้นหาต้นไม้ (tree search) ซึ่งสามารถแบ่งได้กว้างๆเป็นสองวิธีคือ วิธีต้นไม้เดี่ยว (single-tree) หรือวิธีหลายต้นไม้ (multitree) ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นวิธีดั้งเดิมสำหรับฟังก์ชันคอนเวกซ์ (convex function) หรือฟังก์ชันนูน วิธีต้นไม้เดี่ยวดั้งเดิมจะรวมวิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear branch-and-bound) และวิธีการแตกกิ่งและการตัดแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear branch-and-cut method) ขณะที่วิธีหลายต้นไม้แบบดั้งเดิมจะรวมวิธีการประมาณด้านนอก (outer approximation) และวิธีการย่อยเบนเดอร์ (Bender decomposition) วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับ MINLP แบบคอนเวกซ์คือวิธีผสม (hybrid method) ที่รวมจุดแข็งของต้นไม้เดี่ยวและวิธีหลายต้นไม้

MINLP แบบไม่คอนเวกซ์ (non-convex MINLP) มีความท้าทายมากขึ้นเพราะจะรวมฟังก์ชันไม่คอนเวกซ์ในสมการจุดมุ่งหมาย (objective function) หรือในสมการข้อจำกัด (constraints) ดังนั้นถึงแม้ว่าตัวแปรจำนวนเต็ม (integer variables) จะถูกคลาย (relaxed) ให้เป็นตัวแปรต่อเนื่อง (continuous variables) ฟีลible region) หรือบริเวณที่เป็นไปได้ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบไม่คอนเวกซ์ (nonconvex) ส่งผลให้มีจุดต่ำสุดเฉพาะที่หลายจุด (local minima) แนวทางการหาค่าตอบนี้ จะรวมวิธีการประมาณเป็นเส้นตรงเป็นขั้น (piecewise linear

approximation) ซึ่งเป็นกลยุทธ์ทั่วไปในการคลายคอนเวกซ์ (convex relaxation) ของฟังก์ชันไม่คอนเวกซ์ และวิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตเชิงพื้นที่ (spatial branch-and-bound)

นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคฮิวริสติก (heuristic technique) ซึ่งเป็นเทคนิคช่วยการค้นหาคำตอบที่เร็วที่สุด ถ้าวิธีต้นไม้ค้นหา (search-tree) มีขนาดใหญ่และใช้เวลาและต้องใช้คำตอบทันที (real time solutions)

3.2 รูปแบบของ MINLP

โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming problems หรือ MINLP) มักจะแสดงในรูปของ

$$(3.1) \quad \begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(x) \\ \text{Subject to} & c(x) \leq 0, \\ & x \in X, \\ & x_i \in \mathbb{Z}, \forall i \in I \end{array}$$

ซึ่ง $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ และ $c: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ สามารถหาอนุพันธ์ที่ต่อเนื่องได้สองครั้ง (twice continuously differentiable) $X \subset \mathbb{R}^n$ เป็นหรือโพลีฮีดรอลเซต (polyhedral set หรือเซตรูปหลายด้านหรือมีหลายเหลี่ยม) ที่มีขอบเขต (bounded) และ $I \subseteq \{1, \dots, n\}$ เป็นเซตดัชนี (index set) ของตัวแปรจำนวนเต็ม (integer variables) ซึ่ง (3.1) ยังหมายถึงสามารถเป็นการหาค่าสูงสุด (maximization) และเปลี่ยนเป็นสมการข้อจำกัดทั่วไป (general constraints) เช่นสมการข้อจำกัดเท่ากับ (equality constraints) หรือสมการขอบเขตล่างบน (lower and upper bounds) $l \leq c(x) \leq u$

(3.1) เป็น MINLP แบบคอนเวกซ์ (convex MINLP) หากฟังก์ชัน $f(x)$ และ $c(x)$ เป็นฟังก์ชันคอนเวกซ์ (convex functions) หาก $f(x)$ หรือ $c(x)$ สมการใดๆเป็นฟังก์ชันไม่คอนเวกซ์ หรือนอนคอนเวกซ์ (nonconvex functions) (3.1) เป็น MINLP แบบไม่คอนเวกซ์หรือนอนคอนเวกซ์ MINLP (nonconvex MINLP)

(3.1) เป็นปัญหาการจัดหมู่แบบเอ็นพีฮาร์ด (NP-hard combinatorial problem) เนื่องจากมีการรวม MILP และคำตอบมักจะต้องใช้การค้นหาต้นไม้การค้นหาที่มีขนาดใหญ่ (enormous search tree) ที่แยกว่านั้นคือ ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมของจำนวนเต็มแบบนอนคอนเวกซ์ (non-convex integer optimization problem) (นอนคอนเวกซ์ หรือ non-convex หมายถึง ไม่นูน) โดยทั่วไปแล้วไม่สามารถตัดสินใจ (undecidable) ในคำตอบได้

(3.1) นิยมเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(x, y) \\ \text{Subject to} & c(x, y) \leq 0, \\ & x \in X, \\ & y \in Y, \text{ Integer} \end{array}$$

(3.2)

3.3 แนวคิดพื้นฐานในการแก้ปัญหา MINLP

มีหลายวิธีสำหรับแก้ปัญหา MINLP ซึ่งอาศัยแนวคิดสองแนวคือหรือการรีแลกซ์ชัน (relaxation หรือการคลาย) และการเสริมข้อจำกัดหรือ constraint reinforcement การคลายใช้สำหรับการหาขอบเขตล่าง (lower bound) ของคำตอบที่เหมาะสมของ (3.1) การคลายจะทำการขยายเซตคำตอบที่เป็นไปได้หรือฟีลิสเบิ้ลเซต (feasible set) ของ MINLP ให้ใหญ่ขึ้นตัวอย่างเช่นการละเลยไม่ใช้บางสมการข้อจำกัด (constraints) โดยปกติแล้ว จะเลือกคลายสมการที่ทำให้การหาคำตอบง่ายขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับปัญหา MINLP ของเดิม โดยใช้ร่วมกับบางขอบเขตบน (upper bounds) ที่สามารถหามาได้จากบางจุดคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible point) การคลายจะหยุด (terminate) การค้นหาคำตอบ (search) เมื่อขอบเขตล่างมีค่ามากกว่าขอบเขตบนที่มีอยู่

สำหรับการเสริมข้อจำกัด (constraint reinforcement) หมายถึงขั้นตอน (procedures) ที่ใช้การตัดคำตอบที่เป็นไปได้จากการคลาย แต่ไม่ใช่จาก MINLP โดยการเสริมข้อจำกัด ทำได้โดยการลดขนาดการคลาย มักจะทำโดยการเพิ่มสมการที่ถูกต้อง (valid inequalities) หรือโดยการแตกกิ่ง (branching) โดยที่การคลายถูกแบ่งเป็นสองหรือมากกว่าสองปัญหาที่แยกจากกัน การหาขอบเขตบน (upper bounds) จากบางจุดคำตอบที่เป็นไปได้หรือจุดฟีลิสเบิ้ล (feasible point) มักจะหาโดยการกำหนด (fix) ค่าตัวแปรจำนวนเต็ม (integer variables) ที่ค่าจำนวนเต็ม (integral value) แล้วแก้ปัญหาที่กลายเป็น NLP เพื่อให้ได้ขอบเขตบน ที่จะเซตเป็นอนันต์ (infinity) ถ้าหาก NLP ไม่มีคำตอบ (infeasibility)

3.3.1 การคลาย

ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (optimization problem) $\min\{\xi_R(x): x \in S_R\}$ เป็นการคลาย (relaxations) ของปัญหา $\min\{\xi(x): x \in S\}$ ถ้า $S_R \supseteq S$ และ $\xi_R \in \xi(x)$ สำหรับแต่ละ $x \in S$ เซตที่เป็นไปได้หรือฟีลิสเบิ้ลเซต \mathcal{R} ของการคลายที่มีฟีลิสเบิ้ลเซต \mathcal{F} ที่รวมจุดฟีลิสเบิ้ล (feasible points) ทั้งหมดของ \mathcal{F} บทบาทหลักของการคลายคือการให้ปัญหาที่สามารถหาคำตอบได้ง่ายขึ้นและสามารถได้คำตอบที่เหมาะสมโดยรวม (globally optimal solutions) ที่สามารถใช้เป็นขีดจำกัดล่างได้ การคลายที่เป็นประเภนี้คือ NLP แบบคอนเวกซ์ (convex NLPs) ที่โปรแกรมแก้ปัญหาหรือซอล

เวอร์ในการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear optimization solvers) จะถูกรวบรวมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์อันใดจากเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(converge) สู่ค่าต่ำสุดโดยรวม (global minimum) และ MINLP ที่มักจะแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพในทางปฏิบัติโดยใช้แนวทางแตกกิ่งและการตัด (branch-and-cut approach) กลยุทธ์ที่ใช้ในการคลาย (relaxation) ของ MINLP มีดังนี้

ก. คลายจำนวนเต็ม หรือรีแลกซ์อินทิกรัลลิตี (relaxing integrality) สมการข้อจำกัดจำนวนเต็ม $x_i \in Z$ สามารถคลายเป็น $x_i \in R$ สำหรับ $\forall i \in I$ ขั้นตอนนี้จะให้การคลายที่ไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear relaxation) ของ MINLP โดยการคลายประเภทนี้ใช้ในอัลกอริธึมการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต (branch-and-bound algorithm) (อัลกอริธึม หรือ algorithm คือชุดของคำสั่งที่สร้างไว้ตามขั้นตอน) ดังนี้

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{Minimize}} && f(x) \\ & \text{Subject to} && c(x) \leq 0, \\ & && x \in X, \end{aligned} \quad (3.3)$$

ข. คลายสมการข้อจำกัดคอนเวกซ์ (relaxing convex constraints) สมการข้อจำกัด $c(x) \leq 0$ และ $f(x) \leq z$ ที่มีฟังก์ชันคอนเวกซ์ (convex functions) c และ f ที่สามารถคลายด้วยเซตของซัพพอร์ตติ่งไฮเปอร์เพลน (supporting hyperplane) ที่ได้จากการประมาณอนุกรมเทย์เลอร์ลำดับที่หนึ่ง (first-order Taylor series approximation)

$$z \geq f^{(k)} + \nabla f^{(k)T} (x - x^{(k)}), \quad (3.4)$$

$$0 \geq c^{(k)} + \nabla c^{(k)T} (x - x^{(k)}), \quad (3.5)$$

สำหรับเซตของจุด $x^{(k)}, k = 1, \dots, K$ เมื่อ c และ f เป็นคอนเวกซ์ (convex) ไฮเปอร์เพลนที่ได้จะก่อให้เกิดการคลายโพลีฮีดรอลหรือโพลีฮีดรอลรีแลกซ์ชัน (polyhedral relaxation) ของสมการข้อจำกัดเหล่านี้ ขั้นตอนการคลายจะถูกใช้ในวิธีการประมาณชั้นนอก (outer approximation method)

ค. คลายสมการข้อจำกัดแบบนอนคอนเวกซ์ (relaxing non-convex constraints) สมการข้อจำกัด $c(x) \leq 0$ และ $f(x) \leq z$ ที่มีฟังก์ชันนอนคอนเวกซ์ ต้องการการทำงานมากขึ้นในการคลาย แนวทางหนึ่งคือการให้ได้การได้ค่าประมาณต่ำกว่าคอนเวกซ์หรือคอนเวกซ์อันเดอร์เอสติเมเตอร์ (convex underestimators) ของ $f(x)$ และ $c(x)$ ที่เป็นฟังก์ชันคอนเวกซ์โดยที่

$$\tilde{f}(x) \leq f(x) \text{ และ } \tilde{c}(x) \leq c(x), \text{ สำหรับ } \forall x \in \text{conv}(X) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\text{conv}(X)$ คือเปลือกคอนเวกซ์หรือ convex hull ของเซต X

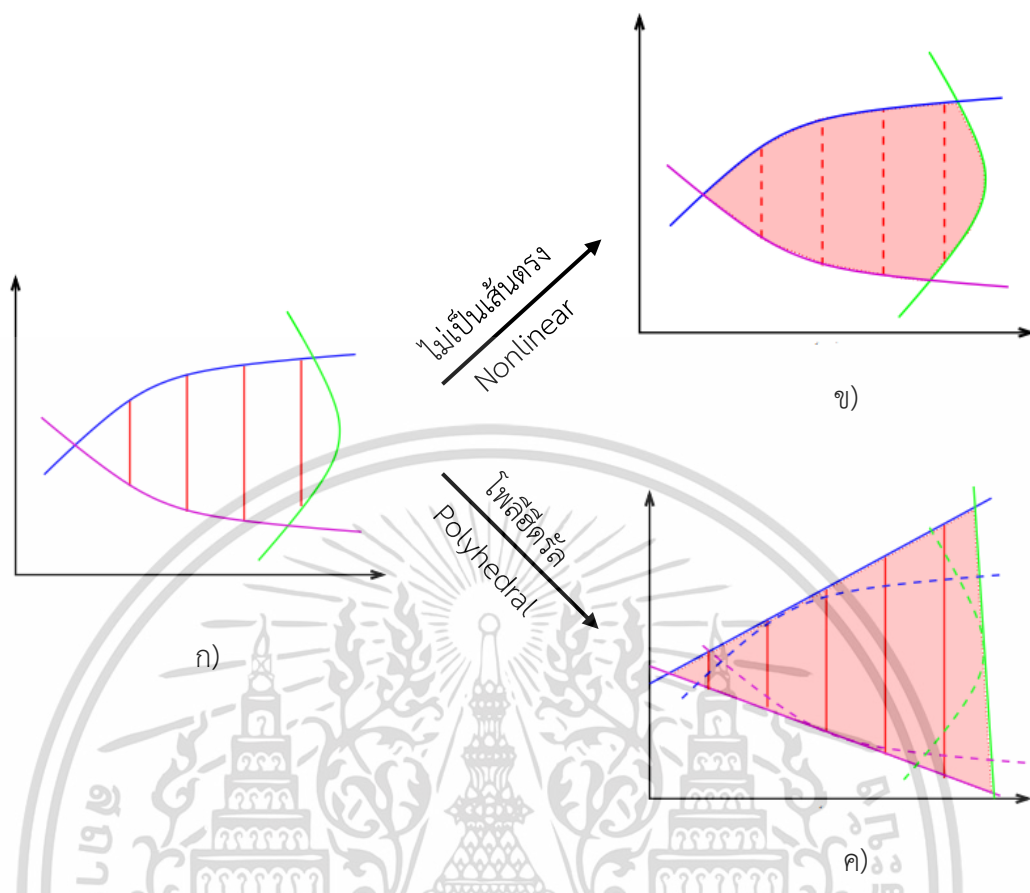
และสมการข้อจำกัด $z \geq f(x)$ และ $0 \geq c(x)$ ถูกคลายโดยเปลี่ยนสมการเหล่านี้ด้วยสมการ

$$z \geq \check{f}(x) \text{ และ } 0 \geq \check{c}(x)$$

(3.7)

MINLP แบบไม่คอนเวกซ์ จะอาศัยชั้นของฟังก์ชันไม่เป็นเส้นตรงที่รู้ค่าคอนเวกซ์เอสติเมเตอร์ การคลายเหล่านี้ขยายพีสิเบิลเซตของ (3.1) และสามารถรวมเข้าด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น คอนเวกซ์เอสติเมเตอร์ของฟังก์ชันนอคอนเวกซ์สามารถคลายได้มากขึ้นโดยใช้ซัพพอร์ตติงไฮเปอร์เพลนทำให้เกิดโพลีฮีดรอลรีแลกเซชัน

รูปที่ 3.1 แสดงการคลายสมการข้อจำกัดจำนวนเต็ม (relaxation of integrality constraints) และสมการข้อจำกัดไม่เป็นเส้นตรงแบบคอนเวกซ์ (convex nonlinear constraints) รูปที่ 3.1 ก) พีสิเบิลเซตของจำนวนเต็มแบบผสม (mixed-integer feasible set) ที่รวมยูเนียน (union) ของส่วนของเส้นตรงแนวตั้ง (vertical segments) รูปที่ 3.1 ข) การคลายไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear relaxation) ที่ได้มาจากการคลายจำนวนเต็ม (พื้นที่แรเงาเป็นพีสิเบิลเซตที่เป็น NLP) และรูปที่ 3.1 ค) โพลีฮีดรอลรีแลกเซชันที่เป็นพื้นที่แรเงาที่รวมยูเนียนของเส้นตรงแนวตั้งและการคลาย LP (LP relaxation) ซึ่งโพลีฮีดรอลรีแลกเซชันที่เป็นไปได้ที่มีอยู่จริง (exist) นี้มีจำนวนไม่จำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือกจุด $x^{(k)} \in \text{conv}(X), k = 1, \dots, K$ ถ้าคำตอบของการคลายเป็นไปได้ใน (3.1) คำตอบนั้นจะเป็นคำตอบของ MINLP ด้วย อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้ว คำตอบที่ไม่พีสิเบิลใน (3.1) จะต้องถูกตัดออกจากคำตอบของการคลาย



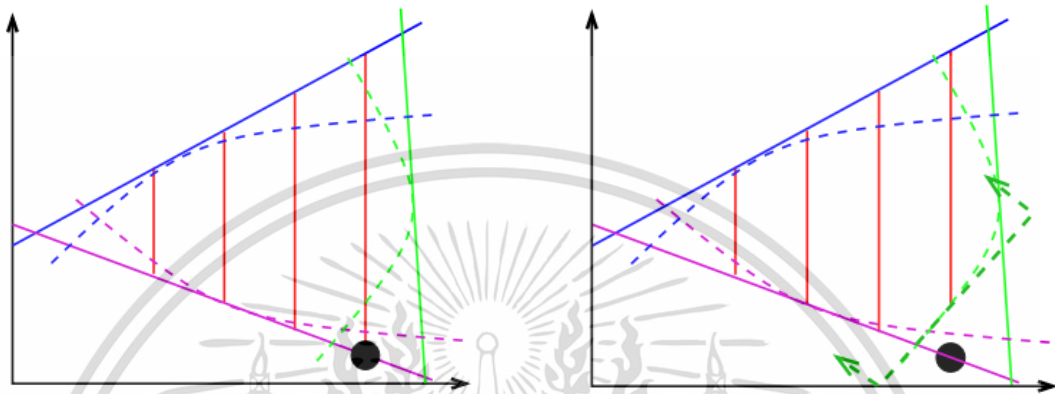
รูปที่ 3.1 ฟิสิกส์เซตของจำนวนเต็มแบบผสมจาก ก) แสดงประเภทของการคลายสองประเภท คือ
 ข) ฟิสิกส์เซตของจำนวนเต็มแบบผสม และ ค) โพลีฮีดรอลแลกเซชัน จาก Belotti P. et. al. (2013)

3.3.2 การเสริมข้อจำกัด

กำหนดให้จุด x เป็นจุดฟิสิกส์สำหรับการคลาย (relaxation) แต่ไม่ฟิสิกส์สำหรับ MINLP เป้าหมายของการเสริมข้อจำกัด (constraint reinforcement) คือการตัดคำตอบนี้ออกเพื่อให้ อัลกอริทึมลู่วิ่งเข้าสู่ในที่สุดไปสู่คำตอบที่ผ่านสมการข้อจำกัดทั้งหมด มีสองวิธีการในการเสริมข้อจำกัดคือ การทำการคลายให้ละเอียดขึ้น (relaxation refinement) และการแตกกิ่ง (branching) ซึ่งอัลกอริทึม MINLP ปัจจุบันใช้ทั้งสองแบบนี้

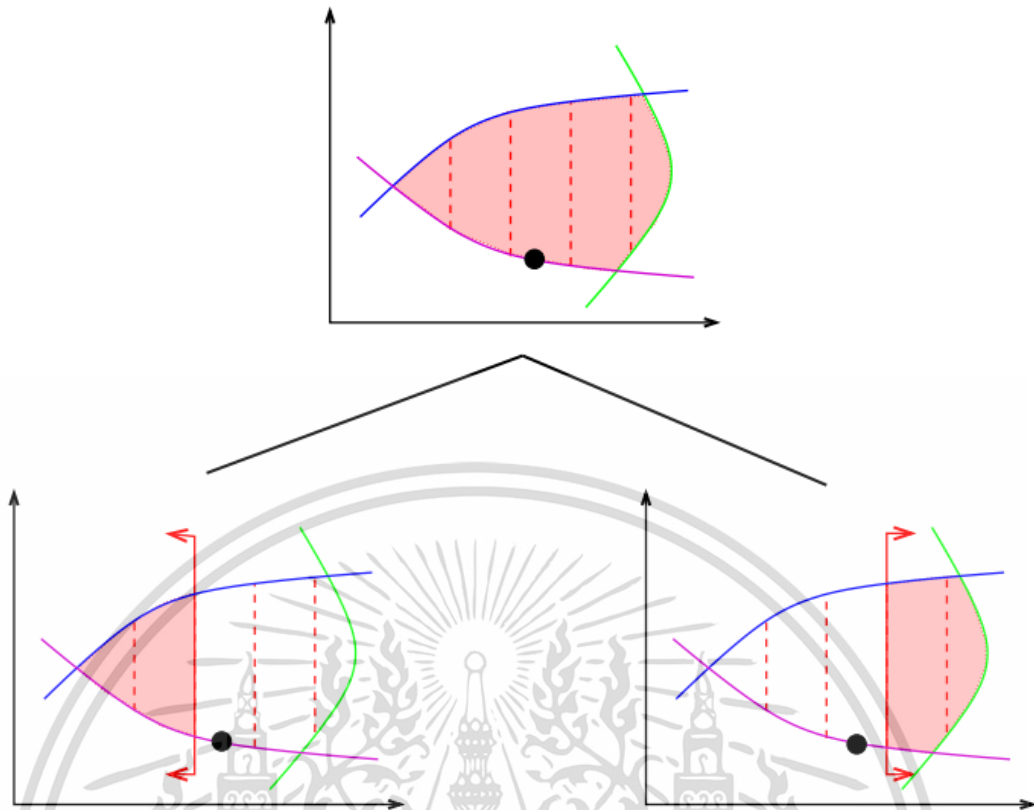
เป้าหมายของการคลายให้ละเอียดขึ้น (relaxation refinement) คือการทำให้การคลายแน่นขึ้นโดยนำคำตอบ x จากการคลายที่ไม่ฟิสิกส์ (infeasible) ใน MINLP ออกจากการคลายโดยทั่วไปแล้ว กระทำโดยการเพิ่มสมการที่ถูกต้อง (valid inequality) เข้าไปในการคลาย สมการที่ถูกต้องเป็นสมการที่ผ่านคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ MINLP เมื่อสมการที่ถูกต้องสามารถกันคำตอบที่ไม่ฟิสิกส์ออกไปแล้ว หรือที่เรียกว่าการตัด (cut) สมการที่ถูกต้องโดยทั่วไปจะเป็นเส้นตรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(linear) หรืออาจจะคอนเวกซ์ ยกตัวอย่างเช่น หลังจากคลายสมการข้อจำกัดคอนเวกซ์ด้วยโพลีฮีดรัลรีแลกเซชัน ซึ่งเป็นสมการที่ถูกต้องนี้กระทำโดยปรับฟังก์ชันไม่เป็นเส้นตรงให้เป็นเส้นตรงที่ \hat{x} สมการที่ถูกต้องจะตัด \hat{x} ออก ยกเว้นกรณี \hat{x} ผ่านสมการไม่เป็นเส้นตรง $\hat{c}(x) \leq 0$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การแยกนี้ใช้ในการประมาณด้านนอก (outer approximation)



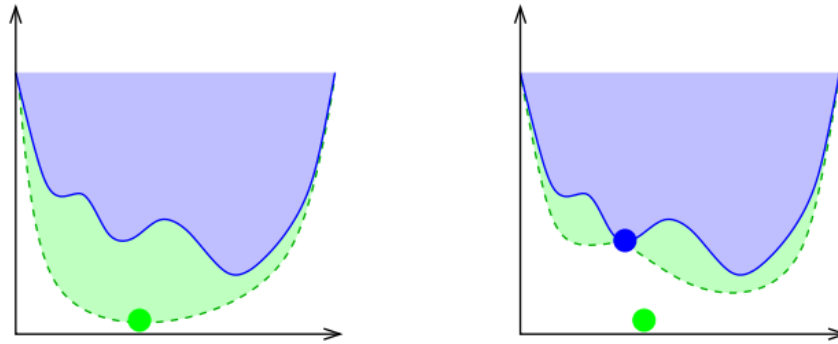
รูปที่ 3.2 การแยกจุดอินฟีลิกซ์ที่เป็นจุดดำในรูปซ้ายโดยเพิ่มไฮเปอร์เพลนที่แสดงเป็นลูกศรเขียวในรูปขวา จาก Belotti P. et. al. (2013)

อีกรูปแบบหนึ่งของการเสริมข้อจำกัด (constraint reinforcement) คือการแตกกิ่งหรือแบรนชิ่ง (branching) การแตกกิ่งเป็นการแบ่งพื้นที่ที่เป็นไปได้หรือฟีลิสเบิ้ลรีเจียน (feasible region) เป็นเซตย่อย (subset) ที่ทุกคำตอบของ MINLP เป็นไปได้หรือฟีลิสเบิ้ลในหนึ่งในเซตย่อยนั้น เมื่อการทำให้เป็นจำนวนเต็มถูกคลาย ซึ่งสามารถทำได้โดยแยกคำตอบที่เป็นเศษส่วนของ x_i สำหรับ $i \in I$ การแตกกิ่งแยกการคลายเป็นสองการคลาย สมการข้อจำกัด $x_i \leq \lfloor x_i \rfloor$ ถูกเพิ่มไปในการคลายแรก และ $x_i \geq \lceil x_i \rceil$ ถูกเพิ่มไปในการคลายที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 คำตอบทั้งหมดของ MINLP อยู่ในหนึ่งในสองปัญหาย่อยนี้ ปัญหาย่อยนี้จะอยู่ในต้นไม้ค้นหา (search tree) ที่จะบันทึก (keep track) ปัญหาย่อยทั้งหมดที่จะต้องหาคำตอบถัดไป แนวทางนี้เป็นหลักการของอัลกอริธึมการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต



รูปที่ 3.3 การแตกกิ่งของตัวแปรจำนวนเต็มที่แยกเป็นสองปัญหาย่อยที่ไม่เป็นเส้นตรงที่ตัดจุดอินทิกรัล (จุดดำ) ออก จาก Belotti P. et. al. (2013)

การเสริมข้อจำกัดสำหรับสมการข้อจำกัดที่นอนคอนเวกซ์ที่ถูกคลายเป็นการผสมระหว่างการแตกกิ่งและการเสริมข้อจำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากคำตอบของการคลาย (แสดงโดยเส้นประในรูปที่ 3.4 รูปซ้าย) และแบ่งเป็นสองโดเมนย่อย และคำนวณค่าประมาณต่ำกว่า (underestimators) สำหรับใช้ใน (3.6) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นจริงในสองโดเมนย่อย (เช่นการทำการคลายให้ละเอียดขึ้น) ในตัวอย่างนี้ ค่าประมาณต่ำกว่าที่ละเอียดขึ้นแสดงเป็นสองสมการจุดมุ่งหมายที่เป็นเส้นประในรูปที่ 3.4 รูปขวา วิธีการนี้มีชื่อว่าการแตกกิ่งเชิงพื้นที่ (spatial branching) ซึ่งให้ผลในอัลกอริธึมการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตที่คล้ายกับแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (discrete variables) โดเมนจะถูกแบ่งโดเมนย่อยไปเรื่อยๆจนกระทั่งขอบเขตล่างของโดเมนย่อยมีค่ามากกว่าขอบเขตบน ซึ่งจะสามารถตัดโดเมนออกจากการค้นหาได้ สำหรับ MINLP ที่มีทั้งตัวแปรจำนวนเต็มและสมการข้อจำกัดนอนคอนเวกซ์ การแตกกิ่งอาจจะต้องใช้กับตัวแปรตัดสินใจทั้งแบบต่อเนื่องและแบบจำนวนเต็ม



รูปที่ 3.4 การเสริมข้อจำกัดโดยการใส่การแตกกิ่งเชิงพื้นที่สำหรับการหาค่าเหมาะสมโดยรวม จาก Belotti P. et. al. (2013)

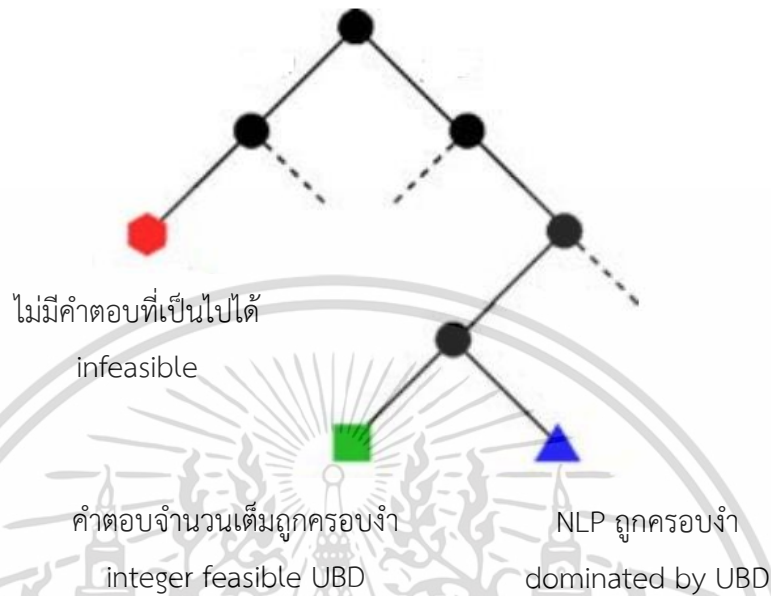
3.4 วิธีเชิงกำหนดสำหรับ MINLP แบบคอนเวกซ์

โดยปกติแล้ว ปัญหาที่มีสมการข้อจำกัดจำนวนเต็ม (integrality constraints) จะใช้การค้นหาต้นไม้ (tree search) แก้ปัญหา ซึ่ง MINLP เพิ่มความยุ่งยากมากขึ้นจากการมีฟังก์ชันไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งวิธีที่กว้างๆ สำหรับแก้ปัญหานี้ (3.1) ซึ่งเป็นวิธีเชิงกำหนดสำหรับ MINLP แบบคอนเวกซ์ (deterministic methods for convex MINLP) มีสองวิธีคือวิธีต้นไม้เดียว (single-tree method) และวิธีหลายต้นไม้ (multitree method) ซึ่งทั้งสองวิธีใช้สำหรับแก้ปัญหานี้ MINLP แบบคอนเวกซ์ที่มีสมการจุดหมายคอนเวกซ์และสมการข้อจำกัดคอนเวกซ์ โดยการตั้งสมมติฐานให้เซต X เป็นโพลีฮีดรอลเซตมีขอบเขต ฟังก์ชัน f และ c สามารถหาอนุพันธ์ที่ต่อเนื่องได้สองครั้ง (twice continuously differentiable) และ (3.1) ผ่านสมการข้อจำกัดในคอนเวกซ์ฮิลล์ของฟิลิเบิ้ลเซตของ (3.1) ซึ่งวิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรงถัดไปเป็นพื้นฐานของทั้งวิธีต้นไม้เดียวและวิธีหลายต้นไม้

3.4.1 วิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรง

วิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรงหรืออนลิเนียลแบรนช์แอนด์บาวนด์ (nonlinear branch-and-bound) นี้เริ่มโดยการหาค่าตอบของการคลาย NLP (NLP relaxation) ของ (3.1) โดยที่จุดรากหรือรูด (root node) นิยามโดยการคลายเงื่อนไขจำนวนเต็ม (integrality conditions) ของตัวแปรจำนวนเต็ม (integer variables) $x_i, i \in I$ ถ้าการคลาย (relaxation) เป็นไปไม่ได้ (อินฟิลิเบิ้ล) MINLP ก็จะมีอินฟิลิเบิ้ลด้วย ถ้าคำตอบของการคลายเป็นจำนวนเต็ม คำตอบนี้จะเป็นคำตอบของ MINLP มิฉะนั้นการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต (branch-and-bound) จะหาต้นไม้ (tree) ที่จุดโหนดตอบสนองต่อปัญหาย่อย NLP (NLP subproblems) และที่ขอบ (edges) ตอบสนองต่อการตัดสินใจแตกกิ่ง จะมีการใช้ทั้งค่าที่เหมาะสม (optimality)

และค่าที่เป็นไปได้ (feasibility) ของปัญหาย่อย NLP เพื่อเล็มกิ่งหรือพرون (prune) โหนดในต้นไม้ โดยกำหนดให้โหนดปัญหาใดๆแสดงตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงอัลกอริทึมการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตโดยการเดินตามเส้นและแก้ปัญหา NLP ที่ทุกโหนดของต้นไม้ จาก Belotti P. et. al. (2013)

โหนดในต้นไม้การแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต (branch-and-bound tree) ถูกกำหนดโดยเซตขอบเขต (l, u) ของตัวแปรจำนวนเต็มและเป็นไปตามสมการ NLP

$$\begin{aligned} & \text{Minimize}_x && f(x) \\ & \text{Subject to} && c(x) \leq 0, \\ & && x \in X, \\ & && l_i \leq x_i \leq u_i, \forall i \in I \end{aligned}$$

(3.8) หรือ $(NLP(l, u))$

การคลายของรูทโหนด (root node relaxation) เป็น $NLP(-\infty, \infty)$ กฎการแตกกิ่ง (branching) และการเล็มกิ่ง (pruning) สำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตมีดังนี้

3.4.1.1 การแตกกิ่ง

ถ้าคำตอบ x' ของ (3.8) หรือ $(NLP(l, u))$ ฟิสีเบิลแต่ไม่เป็นจำนวนเต็ม (not integral) จะทำการแตกกิ่ง (branching) ที่ค่าไม่เป็นจำนวนเต็มของ x' นี้เป็นสองโหนด NLPs หรือเป็นโหนดลูก (child nodes) ของ $(NLP(l, u))$ และเริ่มต้นขอบเขต (bounds) สำหรับสองปัญหาใหม่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(l^-, u^-) := (l, u)$ และ $(l^+, u^+) := (l, u)$ และปรับขอบเขตตามตัวแปรแตกกิ่ง (branching variable) เป็น

$$u_i^- := \lfloor x_i' \rfloor \text{ และ } u_i^+ := \lceil x_i' \rceil$$

(3.9)

ปัญหา NLPs ใหม่จะนิยามเป็น $NLP(l^-, u^-)$ และ $NLP(l^+, u^+)$ ในทางปฏิบัติ ปัญหาใหม่นี้จะถูกเก็บในกอง (Heap หรือ \mathcal{H}) และถูกปรับค่า (update) ด้วยปัญหาใหม่สองปัญหานี้

3.4.1.2 กฎการเล็มกิ่ง

กฎการเล็มกิ่ง (pruning rule) สำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต NLP มีพื้นฐานบนการใช้ทั้งค่าที่เหมาะสม (optimality) และค่าที่เป็นไปได้ (feasibility) ของปัญหาย่อย NLP ถ้ากำหนดให้ U เป็นขอบเขตบนของคำตอบค่าที่เหมาะสมของ (3.1) (ตั้งต้นที่ $U = \infty$) โดยกฎการเล็มกิ่งมีดังนี้

โหนดอินฟีสิเบิล (infeasible nodes) ถ้าโหนดของ $(NLP(l, u))$ ใดๆเป็นอินฟีสิเบิล ต้นไม้ย่อย (subtree) ที่โหนดนั้นเป็นอินฟีสิเบิลด้วย ดังนั้นสามารถเล็มกิ่งโหนดนี้ได้ แสดงในโหนดหกเหลี่ยมในรูปที่ 3.5)

โหนดจำนวนเต็มทีฟีสิเบิล (integer feasible nodes) ถ้าคำตอบ $x^{(l,u)}$ ของ $(NLP(l, u))$ เป็นจำนวนเต็ม จะได้คำตอบปัจจุบัน (new incumbent solution) ถ้า $f(x^{(l,u)}) < U$ และกำหนดให้ $x^* = x^{(l,u)}$ และ $U = f(x^{(l,u)})$ มิเช่นนั้น โหนดนี้จะถูกเล็มกิ่งไปเนื่องจากคำตอบถูกรอบงำโดยขอบเขตบน (dominated by upper bound หรือ UBD) แสดงในโหนดสี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.5

ขอบเขตบนของโหนด NLPs (upper bounds on NLP nodes) ถ้า $f(x^{(l,u)})$ คือค่าที่เหมาะสมของ $(NLP(l, u))$ ซึ่งเป็นขอบเขตล่างของค่าที่เหมาะสมถูกรอบงำโดยขอบเขตบนที่ $f(x^{(l,u)}) \geq U$ สามารถเล็มกิ่งนี้ได้เนื่องจากไม่สามารถหาคำตอบจำนวนเต็มที่ดีกว่าที่รากของต้นไม้ย่อย (subtree roots) จาก $(NLP(l, u))$ ได้

การวิเคราะห์การลู่เข้า (convergence analysis) ของการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear branch-and-bound) สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมโดยรวม (global optimality) ได้ถ้าทุกๆโหนดถูกเล็มกิ่ง ดังนั้นสมมติฐานการคอนเวกซ์ (convexity assumption) เพียงพอที่จะรับประกันคำตอบที่เหมาะสมโดยรวม

3.4.2 วิธีระนาบตัดสำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรง

อัลกอริธึมสำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต (branch-and-bound algorithm) สามารถขยายโดยการเพิ่มระนาบตัดหรือตัดตั้งเพลาสำหรับคอนเวกซ์ผสม 0-1 สำหรับโปรแกรมไม่

เป็นเส้นตรง อัลกอริธึมสำหรับการแตกกิ่งและการตัด (branch-and-cut algorithm) ซึ่งเป็นวิธี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบตัดสำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรงหรือตัดตั้งเพนสำหรับนอนลิเนียล แบนซ์ แอนด์ บาวนด์ (cutting planes for nonlinear branch-and-bound) จะขยายอัลกอริธึมสำหรับการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต โดยเพิ่มหนึ่งขั้นตอนในการเพิ่มระนาบตัดอย่างน้อยหนึ่งระนาบไปที่โหนด ($NLP(l, u)$) โดยการตัดคำตอบที่เหมาะสมที่ไม่เป็นจำนวนเต็มของ $x^{(l, u)}$ โหนดจะถูกแตกกิ่งก็ต่อเมื่อคำตอบที่เหมาะสมที่ถูกคลาย (relaxed optimal solution) ยังเป็นเศษส่วนอยู่ แม้จะเพิ่มระนาบตัดไปแล้วหรือไม่สามารถเพิ่มระนาบตัดได้ การเพิ่มระนาบตัดมีจุดประสงค์ที่จะลดขนาดต้นไม้ให้เล็กลงมากหรือลดการแตกกิ่งของคอนเวกซ์ฮัลล์ที่มีโหนดแน่นมาก

3.4.3 วิธีพหุต้นไม้สำหรับ MINLP

ข้อเสียเปรียบอย่างหนึ่งของ การแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear branch-and-bound) คือการต้องการคำตอบจำนวนมากของ NLPs ที่ไม่สามารถเข้าสู่ค่าเหมาะสมได้เร็ว ไม่เหมือน MILP ที่สามารถใช้ LP เบสิคแฟคเตอร์ (LP basis factors) เข้าได้ หลังจากการแตกกิ่ง วิธีพหุต้นไม้ (Multitree) จะแก้ไขข้อเสียเปรียบนี้โดยการย่อย (decompose) MINLP เป็นขั้นตอนสลับ (alternating sequence) ของปัญหาย่อย NLP และการคลาย (MILP) โดยจะมีสามวิธีคือการประมาณชั้นนอก (outer approximation) การย่อยเบนเดอร์ทั่วไป (generalized Bender decomposition) และวิธีระนาบตัดขยาย (extended cutting-plane) ตามรายละเอียดใน Belotti P. et. al. (2013)

3.5 MINLP แบบไม่คอนเวกซ์

MINLP แบบไม่คอนเวกซ์ (non-convex MINLP) มีความท้าทายมากขึ้นเพราะจะมีฟังก์ชันไม่คอนเวกซ์ในสมการจุดมุ่งหมายหรือในสมการข้อจำกัด ซึ่งถึงแม้ตัวแปรตัดสินใจจำนวนเต็ม (integer decision variables) จะถูกคลายให้เป็นค่าต่อเนื่อง (continuous) บริเวณที่เป็นไปได้ (feasible region) ยังเป็นแบบไม่คอนเวกซ์ จึงต้องการวิธีปรับเพิ่มให้ได้การคลายเป็นคอนเวกซ์ (convex relaxation) ที่สามารถหาคำตอบได้ด้วยกรอบแนววิธีการแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขต

วิธีแก้ปัญหา MINLP แบบไม่คอนเวกซ์มีหลายวิธีเช่น 1) การใช้การประมาณเป็นเส้นตรงที่แยกชิ้น (piecewise linear approximation) แล้วหาคำตอบค่าประมาณนี้โดยใช้โปรแกรมโซลเวอร์ MILP (mixed integer linear programming) หาคำตอบ 2) การตั้งเป็นปัญหาใหม่ของ MINLP ที่สามารถแยกส่วนได้ (reformulation of factorable MINLP) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 3) การแตกกิ่งและการจำกัดขอบเขตเชิงพื้นที่ (spatial branch-and-bound) ที่อาศัยการแบ่งส่วน (partitioning) เป็นปัญหาย่อย (subproblems) แล้วแก้ปัญหาย่อยนี้เพื่อกำหนดเป็นขอบเขตบน (upper bound) หรือขอบเขตล่าง (lower bound) ตามรายละเอียดใน Belotti P. et. al. (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} && x_1 + x_2^2, \\
&\text{subject to} && x_1 + \sin x_2 \leq 4, \\
&&& x_1 x_2 + x_2^3 \leq 5, \\
&&& x_1 \in [-4, 4] \cap \mathbb{Z}, \\
&&& x_2 \in [0, 10] \cap \mathbb{Z}.
\end{aligned}$$

กำหนดปัญหาใหม่
(Reformulation) \Downarrow

$$\begin{aligned}
&\text{minimize } x_9, \\
&\text{subject to} \\
&x_3 = \sin x_2, & x_7 = x_5 + x_6 - 5, & 0 \leq x_2 \leq 10, & 0 \leq x_6 \leq 1000, \\
&x_4 = x_1 + x_3 - 4, & x_8 = x_2^2, & -1 \leq x_3 \leq 1, & -45 \leq x_7 \leq 0, \\
&x_5 = x_1 x_2, & x_9 = x_1 + x_8, & -9 \leq x_4 \leq 0, & 0 \leq x_8 \leq 100, \\
&x_6 = x_2^3, & -4 \leq x_1 \leq 4, & -40 \leq x_5 \leq 40, & -4 \leq x_9 \leq 104, \\
&x_1, x_2, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 \in \mathbb{Z}.
\end{aligned}$$

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการกำหนดปัญหาใหม่ จาก Belotti P. et. al. (2013)

3.6 วิธีฮิวริสติกส์สำหรับ MINLP

บางปัญหาที่ใช้ประยุกต์ใช้งานจริงไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมโดยรวม (global optimality) โดยใช้เทคนิคที่กล่าวใน 3.4 และ 3.5 ได้ เนื่องจากปัญหาใหญ่เกินไป หรือการค้นหาต้นไม่มีขนาดใหญ่มาก หรือจะต้องแก้ปัญหาคำตอบโดยทันที ซึ่งต้องการคำตอบที่ดีและเร็ว แทนที่จะรอจนได้คำตอบที่เหมาะสม (optimal solution) ในสถานการณ์นี้วิธีฮิวริสติกส์ (heuristics) เป็นวิธีที่กำหนดค้นคว้าด้วยตนเอง มีความเหมาะสมมากกว่าในการให้คำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solution) โดยไม่รับประกันว่าคำตอบที่เป็นไปได้นั้นเป็นคำตอบที่เหมาะสม

วิธีฮิวริสติกส์ จะมีสองประเภทใหญ่ๆคือการค้นหาเชิงความน่าจะเป็น (probabilistic search) และการค้นหาเชิงกำหนด (deterministic search) การค้นหาเชิงความน่าจะเป็นหมายถึงเทคนิคที่ในแต่ละการทำซ้ำ (iteration) จะใช้การเลือกแบบสุ่ม (random choice) ในการเลือกค่าที่มีโอกาสเป็นคำตอบ (candidate solution) หรือเลือกค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้หาคำตอบ ตัวอย่างได้แก่ วิธี Simulated annealing, ant colony optimization), particle-swarm optimization, cross-entropy), tabu search และ genetic algorithms ส่วนการค้นหาเชิงกำหนดนั้นจะใช้วิธีใน 3.4 และ 3.5 เพื่อเริ่มให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้แล้วผสมกับวิธีที่กำหนดค้นคว้าด้วยตนเองจึงจัดเป็นวิธีแบบฮิวริสติกส์ รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ใน Belotti P. et. al. (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเกเบี่ยน

บทนี้กล่าวถึงตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเกเบี่ยนใน 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบใน 4.2 และผลการออกแบบใน 4.3 เพื่อจะแสดงการออกแบบกำแพงเกเบี่ยนโดยใช้โปรแกรมเป้าหมายในแบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม ในบทที่ 5 ถัดไป

4.1 ตัวอย่างการออกแบบ

ตัวอย่างการคำนวณมาจากบริษัทเอ็นไวโรเมช (Enviromesh 2007) เนื่องจากบริษัทนี้ได้ให้รายละเอียดรายการคำนวณที่ชัดเจน โดยบริษัทเอ็นไวโรเมชให้ตัวอย่างการออกแบบที่มีความสูง 3.1 เมตร โดยตัวอย่างที่ออกแบบมีพื้นที่หน้าตัดที่ 3.87 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

จากตัวอย่างของบริษัทเอ็นไวโรเมช พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นดังนี้

4.2.1 รูปทรงเรขาคณิต

ความสูงกำแพง, (Slope Wall height, H) = 3.1 เมตร

ความสูงเกเบี่ยนชั้นฐาน, y_1 = 1.0 เมตร

ความสูงเกเบี่ยนชั้นที่ 2, y_2 = 0.7 เมตร

ความสูงเกเบี่ยนชั้นที่ 3, y_3 = 0.7 เมตร

ความสูงเกเบี่ยนชั้นที่ 4, y_4 = 0.7 เมตร

ความกว้างเกเบี่ยนชั้นฐาน, b_w = 1.7 เมตร

ความกว้างเกเบี่ยนชั้นที่ 2, b_2 = 1.4 เมตร

ความกว้างเกเบี่ยนชั้นที่ 3, b_3 = 1.0 เมตร

ความกว้างเกเบี่ยนชั้นที่ 4, b_4 = 0.7 เมตร

ความชันของลาดดินหลังกำแพง (back slope), ϵ = 15 องศา

มุมลาดเอียงด้านหน้าของกำแพง (wall inclination), α = 10 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wall inclination α



รูปที่ 4.1 ขนาดของโครงสร้างเกเบียนจากตัวอย่างเอ็นไวโรเมช Enviromesh (2007)

4.2.2 วัสดุ

มุมแรงเสียดทานภายในของดิน (soil internal friction angle, ϕ) = 28 องศา

ความหนาแน่นดิน (soil density, γ) = 19 kN/m³.

ความหนาแน่นเกเบียน (gabion density, γ_g) = 16 kN/m³.

ความหนาแน่นดินฐานราก (foundation soil density, γ_f) = 19 kN/m³.

มุมแรงเสียดทานภายในดินฐานราก (foundation soil internal friction angle, ϕ_f) = 30 องศา

4.2.3 กำลังรับน้ำหนักแบกทานของดิน

ค่าพารามิเตอร์กำลังแบกทาน (bearing capacity parameters) กำหนดจากสมการของ Meyerhof จาก Bowles (2001) ดังนี้

ตัวคูณปรับแก้ความลึกของกำลังแบกทาน (bearing capacity depth factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 + \phi/2) = 18.4$$

(4.1)

ตัวคูณปรับแก้รูปร่างของกำลังแบกทาน (bearing capacity shape factor)

$$N_c = \cot \phi (N_q - 1) = 30.1$$

(4.2)

ตัวคูณปรับแก้ความเอียงของกำลังแบกทาน (bearing capacity inclination factor)

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan 1.4 \phi = 15$$

(4.3)

4.2.4 พารามิเตอร์อื่นๆ

น้ำหนักบรรทุกทุก (surcharge), $P_0 = 10 \text{ kN/m}^2$

มุมประสิทธิผลด้านหลังกำแพง (effective plane at rear of wall, β) = 94.46 องศา ดังรูปที่ 4.2

มุมแรงเสียดทานกำแพง (wall friction angle, δ) = 28 องศา โดยที่ $\delta = \phi$ ถ้าผ้าใยสังเคราะห์จีโอเทกไทล์ (geotextile) หรือ 0.9 ϕ ถ้ามีจีโอเทกไทล์

สัมประสิทธิ์แรงดันดินเชิงรุก (active earth pressure coefficient, K_a) ซึ่งเป็น แรงดันดินเชิงรุกคูลอมบ์ (Coulomb active earth pressure) = 0.364 โดย

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \phi)}{\sin^2 \beta \sin(\beta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \epsilon)}{\sin(\beta - \delta) \sin(\beta + \epsilon)}} \right]}$$

(4.4)

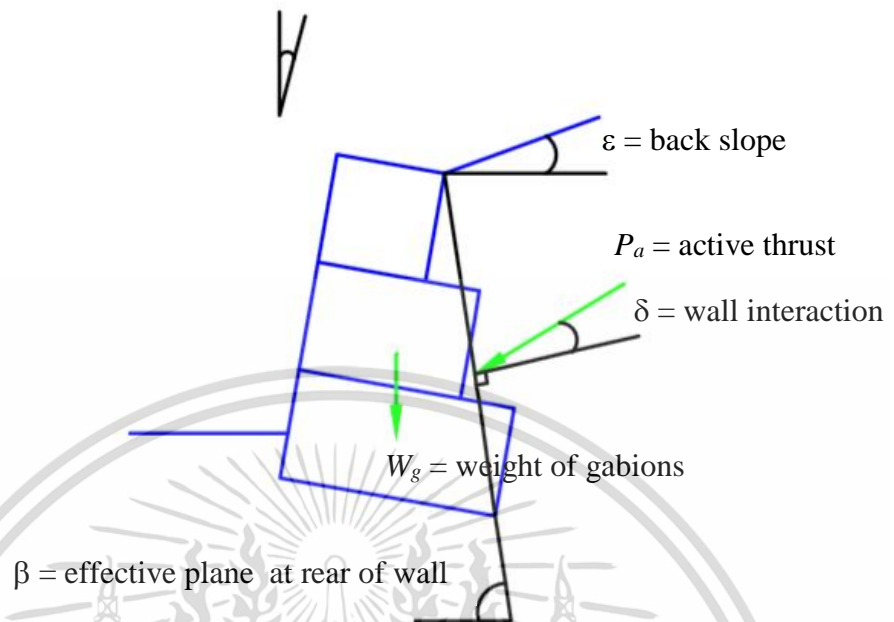
แรงดันรูปทรงสามเหลี่ยมที่กระทำต่อกำแพง (triangular pressure acting on the wall, P_a) = 43.4 kN แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยที่

$$P_a = 0.5 K_a \gamma H^2 + P_0 K_a H$$

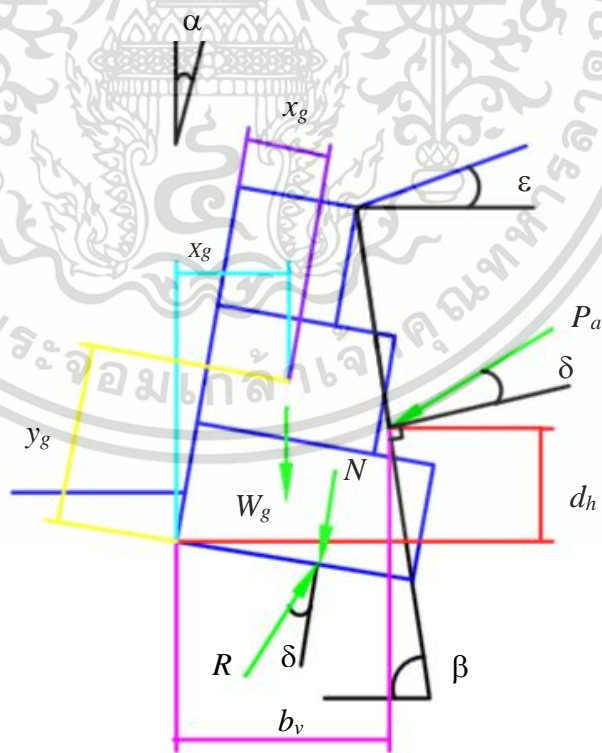
(4.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α = wall inclination



รูปที่ 4.2 แรงดันดินเชิงรุกคูลอมบ์ จาก Enviromesh (2007)



รูปที่ 4.3 ระยะ d_h และ b_v จาก Enviromesh (2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ตัวแปร

ตัวแปรที่ใช้มีดังนี้

ส่วนประกอบแรงแนวราบ (horizontal component, P_h) = 39.8 kN โดยที่

$$P_h = P_a \cos(90 - \beta + \delta) \quad (4.6)$$

ส่วนประกอบแรงแนวตั้ง (vertical component, P_v) = 17.3 kN โดยที่

$$P_v = P_a \sin(90 - \beta + \delta) \quad (4.7)$$

ระยะทางแนวตั้งไปยัง P_a , $d_h = 0.852$ เมตร โดยที่

$$d_h = \frac{H}{3} \left(H + \frac{3P_0}{\gamma} \right) / \left(H + \frac{2P_0}{\gamma} \right) - b_w \sin \alpha \quad (4.8)$$

$$d_h = d'_h - b_w \sin \alpha \quad (4.9)$$

ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากสมมูลโมเมนต์

$$\left(\frac{1}{2} \gamma_s H + P_0 \right) d'_h = \frac{1}{2} \gamma_s H \frac{H}{3} + P_0 \frac{H}{2}$$

ระยะทางแนวราบจากปลายลาดชั้น (toe) ถึง P_a , $b_v = 1.741$ เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3

$$b_v = b_w \cos \alpha - d_h / \tan \beta \quad (4.10)$$

ระยะทางแนวราบถึง W_g แสดงในรูปที่ 4.3

$$X_g = x_g \cos \alpha + y_g \sin \alpha \quad (4.11)$$

โมเมนต์ต้าน

$$M_r = P_v b_v + W_g X_g \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์หมุนคว่ำ

$$M_o = P_h d_h$$

(4.13)

อัตราส่วนปลอดภัยต่อการหมุนคว่ำ (overturning safety factor)

$$FS_o = M_r / M_o$$

(4.14)

แรงตั้งฉากกับผิวสัมผัส (normal force) ต่อระนาบการไถล (sliding)

$$N = W_g + P_v$$

(4.15)

แรงขนานกับผิวสัมผัส (tangential force)

$$T = P_h$$

(4.16)

แรงต้านการไถล (sliding resistance)

$$F_r = (N \cos \alpha + T \sin \alpha) \tan \phi$$

(4.17)

แรงขับ (driving force)

$$F_d = T \cos \alpha - N \sin \alpha$$

(4.18)

อัตราส่วนปลอดภัยต่อการไถล (sliding safety factor)

$$FS_s = F_d / F_r$$

(4.19)

ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยา (reaction eccentricity)

$$e = \frac{b_w}{2} - \frac{M_r - M_o}{N}$$

(4.20)

โดยที่ e เป็นตัวแปรอิสระ (free variables) ที่สามารถมีค่าเป็นบวกหรือลบ (unrestricted in sign) ซึ่งถ้า e มีเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่ากำแพงกันดินหมุนคว่ำไปทางลาดชันด้านหลังกำแพง ความเค้นแนวตั้งที่ปลายลาดชัน (vertical stress at the toe)

$$\sigma_t = \frac{N}{b_w} \left(1 + \frac{6e}{b_w} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาคู่ขนานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4.21)

ความเค้นแนวตั้งที่อีกปลายลาดชัน (vertical stress at the heel)

$$\sigma_h = \frac{N}{b_w} \left(1 - \frac{6e}{b_w} \right)$$

(4.22)

กำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ดินรับได้ (allowable soil bearing stress)

$$q_a = P_0 N_q + 0.5 \gamma_s b_w N_\gamma$$

(4.23)

อัตราส่วนปลอดภัยต่อน้ำหนักแบกทาน (bearing safety factor)

(4.24)

$$F_b = \sigma_t / q_a$$

4.3 ผลการออกแบบ

จากตัวอย่างการออกแบบเกเบียงของ Enviromesh ที่ความสูง 3.1 เมตร ผลการออกแบบแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh ของระบบ 27

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าออกแบบ
ความสูง (Height)	H	m	3.1
น้ำหนักต่อเมตร (Weight)	W_g	kN/m	61.92
ระยะเยื้องศูนย์ (eccentricity)	e	m	0.086
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการหมุนคว่ำ	FSO		2.72
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการไถล	FSS		1.87
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อกำลังแบกทาน	FSB		7.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

แบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมของกำแพงเข็ญ

เนื้อหาในส่วนนี้แสดงการประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบถูกใช้ใน ส่วนนี้ แบบจำลองที่ 1 เป็นแบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มผสม (mixed-integer nonlinear programming หรือ MINP) แบบจำลองอีกสองแบบจำลองเป็นแบบจำลองที่ใช้โปรแกรมเป้าหมาย (goal programming) โดยแบบจำลองแบบแรกเป็นแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (preemptive goal programming) และแบบจำลองแบบที่สองเป็นแบบจำลองเป้าหมายแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted goal programming) โดยจะแสดงพารามิเตอร์การออกแบบใน 5.1 โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มผสมใน 5.2 โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าใน 5.3 โปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนักใน 5.4

5.1 พารามิเตอร์การออกแบบ

พารามิเตอร์การออกแบบ (Design parameters) เป็นพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต พารามิเตอร์ของดิน และพารามิเตอร์อื่นๆ แบบจำลองจะใช้พารามิเตอร์เดียวกับพารามิเตอร์จาก Enviromesh (2007) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลจากการออกแบบ ค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต พารามิเตอร์ของดิน และพารามิเตอร์ที่คำนวณเพิ่มเติมอื่นๆ แสดงในตาราง 5.1 จะเห็นว่าจากตารางที่ 5.1 แทนที่จะใช้แบบจำลองจากตัวอย่างของ Enviromesh (2007) ที่ใช้เกเบี่ยนจำนวนสี่ชั้นแบบจำลองในส่วนนี้ใช้เกเบี่ยนจำนวนหกชั้นโดยที่ความสูงชั้น $y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = y_5 = y_6 = 0.5$ เมตร จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้ง (vertical centroid) มีค่าเป็นดังนี้ จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้งชั้นฐาน

$$yy_1 = y_1/2 = 0.25$$

(5.1)

จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้งชั้นที่ 2

$$yy_2 = y_1 + y_2/2 = 0.75$$

(5.2)

จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้งชั้นที่ 3

$$yy_3 = y_1 + y_2 + y_3/2 = 1.25$$

(5.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้งชั้นที่ 4

$$yy_4 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4/2 = 1.75$$

(5.4)

จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้งชั้นที่ 5

$$yy_5 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5/2 = 2.25$$

(5.5)

จุดศูนย์กลางรูปทรงแนวตั้งชั้นที่ 6

$$yy_6 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6/2 = 2.75$$

(5.6)

5.2 แบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มผสม

แบบจำลองโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มผสม (mixed integer nonlinear programming model หรือ MINP) จะหาน้ำหนักเกเบียนที่น้อยสุดเพื่อประหยัดวัสดุ โดยที่ต้องผ่านข้อจำกัด (constraints) ของเสถียรภาพภายนอก (external stability) ในด้านการไถล (sliding) การหมุนคว่ำ (overturning) และกำลังแบกทาน (bearing capacity) ซึ่งจะทำโดยการปรับค่าผลลัพธ์ของตัวแปรตัดสินใจ (decision variables)

5.2.1 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมาย (objective function) ของแบบจำลอง MINP

$$\text{Minimize } W_g$$

(5.5)

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ทางเรขาคณิต พารามิเตอร์ของดิน และพารามิเตอร์อื่นๆ

รายการ	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความชันของลาดดินหลังกำแพง	ϵ	15	องศา
มุมประสิทธิผลด้านหลังกำแพง	β	94.46	องศา
ความเชื่อมแน่นของดิน	c	-	กิโลปาสคาล
มุมแรงเสียดทานภายในของดิน	ϕ	28	องศา
ความหนาแน่นดิน	γ	19	kN/m^3
มุมแรงเสียดทานกำแพง	δ	28	องศา
มุมลาดเอียงด้านหน้าของกำแพง	α	10	องศา
น้ำหนักบรรทุก	P_0	10	กิโลปาสคาล
ความสูงเกเบียนชั้นฐาน	y_1	0.5	เมตร
ความสูงเกเบียนชั้นที่ 2	y_2	0.5	เมตร
ความสูงเกเบียนชั้นที่ 3	y_3	0.5	เมตร
ความสูงเกเบียนชั้นที่ 4	y_4	0.5	เมตร
ความสูงเกเบียนชั้นที่ 5	y_5	0.5	เมตร
ความสูงเกเบียนชั้นที่ 6	y_6	0.5	เมตร
สัมประสิทธิ์แรงดันดินเชิงรุก	K_a	0.364	
แรงดันรูปทรงสามเหลี่ยมที่กระทำต่อกำแพง	P_a	43.4	กิโลนิวตัน
ส่วนประกอบแรงแนวราบ	P_h	39.8	กิโลนิวตัน
ส่วนประกอบแรงแนวตั้ง	P_v	17.3	กิโลนิวตัน
ตัวคูณปรับแก้ความลึกของกำลังแบกทาน	N_q	18.4	
ตัวคูณปรับแก้รูปร่างของกำลังแบกทาน	N_c	30.1	
ตัวคูณปรับแก้ความเอียงของกำลังแบกทาน	N_γ	15.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ตัวแปรตัดสินใจ

ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) มีดังนี้คือ

b_w : ความกว้างเกเบียงที่ชั้นฐาน (เมตร)

b_i : ความกว้างเกเบียงที่ชั้น i , $i = 2, 3, 4, 5, 6$ (เมตร)

x_{Fi} : ระยะขดเซย (offset) วัดจากด้านหน้า (front) ของเกเบียงที่ชั้น i , $i = 2, 3, 4, 5, 6$ (เมตร)

x_{Bi} : ระยะขดเซย (offset) วัดจากด้านหลัง (back) ของเกเบียงที่ชั้น i , $i = 2, 3, 4, 5, 6$ (เมตร)

i_w : ตัวแปรจำนวนเต็มบวก (positive integer variable) สำหรับกำหนดความกว้างเกเบียงที่ชั้นฐาน

i_i : ตัวแปรจำนวนเต็มบวก (positive integer variable) สำหรับกำหนดความกว้างเกเบียงที่ชั้น i ,

$$i = 2, 3, 4, 5, 6$$

5.2.3 สมการข้อจำกัด

5.2.3.1 ความกว้างชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 6 (widths)

ความกว้างเกเบียงชั้นที่ 2

$$(5.6) \quad b_2 = b_w - x_{2F} - x_{2B}$$

ความกว้างเกเบียงชั้นที่ 3

$$(5.7) \quad b_3 = b_2 - x_{3F} - x_{3B}$$

ความกว้างเกเบียงชั้นที่ 4

$$(5.8) \quad b_4 = b_3 - x_{4F} - x_{4B}$$

ความกว้างเกเบียงชั้นที่ 5

$$(5.9) \quad b_5 = b_4 - x_{5F} - x_{5B}$$

ความกว้างเกเบียงชั้นที่ 6

$$(5.10) \quad b_6 = b_5 - x_{6F} - x_{6B}$$

5.2.3.2 จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้าง (integer widths)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียงชั้นฐาน

$$(5.11) \quad b_w = 0.5i_w$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 2

$$b_2 = 0.5i_2$$

(5.12)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 3

$$b_3 = 0.5i_3$$

(5.13)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 4

$$b_4 = 0.5i_4$$

(5.14)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 5

$$b_5 = 0.5i_5$$

(5.15)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 6

$$b_6 = 0.5i_6$$

(5.16)

5.2.3.3 จำนวนเต็มมากกว่า 1 สำหรับกำหนดความกว้าง (≥ 1 integer widths)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นฐานให้ไม่เป็นศูนย์

$$b_w \geq 1$$

(5.17)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 2 ให้ไม่เป็นศูนย์

$$b_2 \geq 1$$

(5.18)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบียนชั้นที่ 3 ให้ไม่เป็นศูนย์

$$b_3 \geq 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5.19)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบี่ยนชั้นที่ 4 ให้ไม่เป็นศูนย์

$$b_4 \geq 1$$

(5.20)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบี่ยนชั้นที่ 5 ให้ไม่เป็นศูนย์

$$b_5 \geq 1$$

(5.21)

จำนวนเต็มสำหรับกำหนดความกว้างเกเบี่ยนชั้นที่ 6 ให้ไม่เป็นศูนย์

$$b_6 \geq 1$$

(5.22)

5.2.3.4 น้ำหนักเกเบี่ยน (Weight)

(5.33)

$$W_g = \gamma_g (y_1 b_w + y_2 b_2 + y_3 b_3 + y_4 b_4 + y_5 b_5 + y_6 b_6)$$

5.2.3.5 ระยะเซนทรอยด์แนวราบ (Horizontal centroids)

ระยะเซนทรอยด์แนวฐานชั้นฐาน

(5.34)

$$xx_1 = b_w/2$$

ระยะเซนทรอยด์แนวฐานชั้นที่ 2

(5.35)

$$xx_2 = x_{2F} + b_2/2$$

ระยะเซนทรอยด์แนวฐานชั้นที่ 3

(5.36)

$$xx_3 = x_{2F} + x_{3F} + b_3/2$$

ระยะเซนทรอยด์แนวฐานชั้นที่ 4

(5.37)

$$xx_4 = x_{2F} + x_{3F} + x_{4F} + b_4/2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเซนทรอยด์แนวฐานชั้นที่ 5

$$xx_5 = x_{2F} + x_{3F} + x_{4F} + x_{5F} + b_5/2$$

(5.38)

ระยะเซนทรอยด์แนวฐานชั้นที่ 6

$$xx_6 = x_{2F} + x_{3F} + x_{4F} + x_{5F} + x_{6F} + b_6/2$$

(5.39)

5.2.3.6 โมเมนต์แนวฐาน (base direction moments)

โมเมนต์แนวฐานชั้นฐาน

$$xxm_1 = y_1 b_w x x_1$$

(5.40)

โมเมนต์แนวฐานชั้นที่ 2

$$xxm_2 = y_2 b_2 x x_2$$

(5.41)

โมเมนต์แนวฐานชั้นที่ 3

$$xxm_3 = y_3 b_3 x x_3$$

(5.42)

โมเมนต์แนวฐานชั้นที่ 4

$$xxm_4 = y_4 b_4 x x_4$$

(5.43)

โมเมนต์แนวฐานชั้นที่ 5

$$xxm_5 = y_5 b_5 x x_5$$

(5.44)

โมเมนต์แนวฐานชั้นที่ 6

$$xxm_6 = y_6 b_6 x x_6$$

(5.45)

5.2.3.7 โมเมนต์แนวสูง (height direction moments)

โมเมนต์แนวสูงชั้นฐาน

$$yym_1 = y_1 b_w y y_1$$

(5.46)

โมเมนต์แนวสูงชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $yym_2 = y_2 b_2 y y_2$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5.47)

โมเมนต์แนวสูงชั้นที่ 3

$$yym_3 = y_3 b_3 yy_3$$

(5.48)

โมเมนต์แนวสูงชั้นที่ 4

$$yym_4 = y_4 b_4 yy_4$$

(5.49)

โมเมนต์แนวสูงชั้นที่ 5

$$yym_5 = y_5 b_5 yy_5$$

(5.50)

โมเมนต์แนวสูงชั้นที่ 6

$$yym_6 = y_6 b_6 yy_6$$

(5.51)

5.2.3.8 จุดศูนย์ถ่วง (center of gravity)

จุดศูนย์ถ่วงแนวขนานฐานหรือแนวฐาน

$$x_g = \frac{y_1 b_1 x x_1 + y_2 b_2 x x_2 + y_3 b_3 x x_3 + y_4 b_4 x x_4}{y_1 b_w + y_2 b_2 + y_3 b_3 + y_4 b_4}$$

(5.52)

จุดศูนย์ถ่วงแนวตั้งฉากกับฐานหรือแนวสูง

$$y_g = \frac{y_1 b_1 y y_1 + y_2 b_2 y y_2 + y_3 b_3 y y_3 + y_4 b_4 y y_4}{y_1 b_w + y_2 b_2 + y_3 b_3 + y_4 b_4}$$

(5.53)

จุดศูนย์ถ่วงแนวราบขนานพื้นดิน แสดงในรูปที่ 3.3

$$X_g = x_g \cos \alpha + y_g \sin \alpha$$

(5.54)

5.2.3.9 เสถียรภาพการไถล (sliding stability)

แรงปฏิกิริยา (reaction force หรือ normal force)

$$N = W_g + P_v$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5.55)

อัตราส่วนปลอดภัยการไถล (sliding factor of safety หรือ FSS) ซึ่ง FSS ต้องมีค่ามากกว่า 1.5 จาก Enviromesh (2007) และจาก FHWA-NHI-10-024

$$\frac{(N\cos\alpha + P_h\sin\alpha)\tan\phi}{P_h\cos\alpha - N\sin\alpha} \geq 1.5$$

(5.56)

5.2.3.10 เสถียรภาพการหมุน (overturning stability)

ระยะแนวตั้งตั้งฉากกับพื้นดินจากแรง P_a ไปหาจุดปลายฐาน (toe) แสดงในรูปที่ 3.3

$$d_h = \frac{H}{3} \left(H + \frac{3P_0}{\gamma} \right) / \left(H + \frac{2P_0}{\gamma} \right) - b_w \sin\alpha$$

(5.57)

ระยะแนวราบขนานกับพื้นดินจากแรง P_a ไปหาจุดปลายฐาน (toe) แสดงในรูปที่ 3.3

$$b_v = b_w \cos\alpha - d_h / \tan\beta$$

(5.58)

โมเมนต์ต้าน (resisting moment)

$$M_r = P_v b_v + W_g x x_g$$

(5.59)

โมเมนต์หมุน (driving moment)

$$M_o = P_h d_h$$

(5.60)

อัตราส่วนปลอดภัยการหมุนคว่ำ (overturning factor of safety หรือ FSO) ซึ่ง FSO ต้องมีค่ามากกว่า 2.0 จาก Enviromesh (2007) และจาก FHWA-NHI-10-024

$$M_r / M_o \geq 2$$

(5.61)

5.2.3.11 ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity)

ระยะเยื้องศูนย์กลาง

$$e = \frac{b_w}{2} - \frac{M_r - M_o}{N}$$

(5.62)

ข้อกำหนดระยะเยื้องศูนย์กลาง eccentricity หรือ e จาก Enviromesh (2007) และจาก FHWA-NHI-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10-024

$$|e| \leq b_w/6$$

(5.63)

เนื่องจากระยะเยื้องศูนย์กลาง e เป็นตัวแปรอิสระ (free variable) ที่มีเครื่องหมายบวกหรือลบก็ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มสมการ $e = e^+ - e^-$ โดยเปลี่ยนตัวแปร e เป็นตัวแปรไม่เป็นลบ (non-negativity) สองตัวคือ e^+ และ e^- และสมการข้อจำกัด (4.63) จะเปลี่ยนเป็น

$$e^+ - e^- \leq b_w/6$$

โดยที่

e^+ : ระยะเยื้องศูนย์กลางบวก ในกรณีนี้ กำแพงจะเอียงไปทางด้านหน้ากำแพงหรือทางผิวหน้า (facing) ซึ่งเป็นทางซ้ายของรูป 3.3

e^- : ระยะเยื้องศูนย์กลางลบ ในกรณีนี้ กำแพงจะเอียงไปทางดินหลังกำแพง (retained soil) ซึ่งเป็นทางขวาของรูป 3.3

5.2.3.12 กำลึงแบกทาน (bearing)

ความเค้นแนวตั้งที่ปลายด้านหน้า (vertical stress at the toe)

$$\sigma_t = \frac{N}{b_w} \left(1 + \frac{6e}{b_w} \right)$$

(5.64)

กำลึงแบกทานดิน (soil bearing capacity)

$$q_a = P_0 N_q + 0.5 \gamma_s b_w N_\gamma$$

(5.65)

อัตราส่วนปลอดภัยการแบกทาน (bearing factor of safety หรือ FSB) ซึ่ง FSB ต้องมีค่ามากกว่า 2.5 จาก FHWA-NHI-10-024

$$\sigma_t / q_a \geq 2.5$$

(5.66)

5.2.4 สัดส่วนความกว้างต่อความสูง

สำหรับสัดส่วนความกว้างต่อความสูง (width/height ratio) ความกว้างฐานของโครงสร้างเกเบียนควรจะมีระยะ $0.4H$ ถึง $0.6H$ จาก Ortigo and Sayao, (2004) โดยที่ H คือความสูงของโครงสร้างเกเบียน ดังนั้น สมการข้อจำกัดจึงกำหนดให้สัดส่วนความกว้างต่อความสูงของทั้ง 6 ชั้นมีค่าน้อยสุดที่ 0.4 และกำหนดให้สัดส่วนความกว้างต่อความสูง มากสุดมีค่าที่ 0.6

ความกว้างน้อยสุดที่ชั้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_w/H \geq 0.4$$

(5.67)

ความกว้างน้อยสุดที่ชั้นที่ 2

$$b_2/(H - y_1) \geq 0.4$$

(5.68)

ความกว้างน้อยสุดที่ชั้นที่ 3

$$b_3/(H - y_1 - y_2) \geq 0.4$$

(5.69)

ความกว้างน้อยสุดที่ชั้นที่ 4

$$b_4/(H - y_1 - y_2 - y_3) \geq 0.4$$

(5.70)

ความกว้างน้อยสุดที่ชั้นที่ 5

$$b_5/(H - y_1 - y_2 - y_3 - y_4) \geq 0.4$$

(5.71)

ความกว้างน้อยสุดที่ชั้นที่ 6

$$b_6/(H - y_1 - y_2 - y_3 - y_4 - y_5) \geq 0.4$$

(5.72)

ความกว้างมากที่สุดที่ชั้นฐาน

$$b_w/H \leq 0.6$$

(5.73)

5.2.5 ผลการใช้ MINP

โดยการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรตัดสินใจของความกว้างเกเบียนทั้ง 6 ชั้น คือ $b_w, i_w, b_i, i_i, i = 2, 3, 4, 5, 6$ คำตอบของโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming หรือ MINP) ให้ค่าน้ำหนักต่ำสุดของเกเบียนที่ W_g ที่ 48 kN/m และให้ระยะเยื้องศูนย์ (eccentricity หรือ e) ที่ 0.233 m ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh ของระบบ 27 ระบบ 39 และ MINP

รายการ	ระบบ 27	ระบบ 39	MINP
ความสูง (Height, H) (m)	3.1	3.0	3.0
น้ำหนักต่อเมตร (Weight, W_g) (kN/m)	61.92	72.0	48.0
ระยะเยื้องศูนย์ (eccentricity, e) (m)	0.086	0.172	0.233
อัตราส่วนความปลอดภัยการหมุนคว่ำ, FSO	2.72	2.87	2.00
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการไถล, FSS	1.87	1.83	1.52
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อกำลังแบกทาน, FSB	7.14	6.18	4.89

หมายเหตุ 27 คือระบบ 27 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบียงสูง 3.1 เมตร ส่วน 39 คือระบบ 39 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบียงสูง 3.0 เมตร และ MINP คือโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming)

5.3 โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า

โปรแกรมเป้าหมายแบบเลือกไว้ล่วงหน้า (preemptive goal programming) จะทำการจัดลำดับเป้าหมายล่วงหน้าไว้สองเป้าหมายคือ

เป้าหมายล่วงหน้าที่ 1 (preemptive goal 1) น้ำหนักเกเบียงน้อยสุด (minimum W_g)

เป้าหมายล่วงหน้าที่ 2 (preemptive goal 2) ระยะเยื้องศูนย์น้อยสุด (minimum e)

โดยที่เป้าหมายล่วงหน้าเป้าหมายที่ 1 จะกำหนดสมการเป้าหมายแรกซึ่งมีความสำคัญที่สุดไว้ดังนี้

สมการจุดมุ่งหมายของเป้าหมายล่วงหน้าที่ 1 (preemptive goal 1 objective function)

$$\text{Min } W_g$$

(5.78)

สำหรับสมการข้อจำกัดจะเป็นชุดสมการเดียวกันกับโปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มผสม (MINP)

คำตอบของโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าเป้าหมายแรกให้ค่าน้ำหนักเกเบียงน้อยสุดที่ W_g ที่ 48 kN/m และระยะเยื้องศูนย์ (eccentricity หรือ e) ที่ 0.233 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5.2

เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมในเป้าหมายล่วงหน้าที่ 1 (preemptive goal 1) จะเปลี่ยนเป้าหมายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล่องหน้าที 1 เป็นสมการข้อจำกัดและตั้งเป้าหมายล่องหน้าที 2 (preemptive goal 2) เป็นสมการวัตถุประสงค์แทน โดยเป้าหมายล่องหน้าที 2 นี้ จะพยายามสมดุลความเค้นแนวตั้งที่ปลายข้างหนึ่ง (vertical stress at the toe, $\sigma_t = \frac{N}{b_w} \left(1 + \frac{6e}{b_w}\right)$) ให้เท่ากับความเค้นแนวตั้งที่ปลายอีกข้างหนึ่ง (vertical stress at the heel, $\sigma_h = \frac{N}{b_w} \left(1 - \frac{6e}{b_w}\right)$) ซึ่งความเค้นที่สมดุลกันนี้ ($\sigma_t = \sigma_h$) จะทำให้ค่าระยะเยื้องศูนย์ (eccentricity) มีค่าเป็นศูนย์ ($e = 0$) ดังนั้นการตั้งเป้าหมายล่องหน้าที 2 ที่ตั้งการหาค่าต่ำสุดของระยะเยื้องศูนย์เป็นสมการจุดมุ่งหมาย จึงมีค่าเท่ากับการสมดุลความเค้นแนวตั้งของทั้งสองปลาย การหาค่าต่ำสุดของระยะเยื้องศูนย์นี้ของสมการเป้าหมายตามเป้าหมายล่องหน้าที 2 นี้ ทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรตัดสินใจระยะขดเซย (offset) x_{Fi} และ x_{Bi} , $i = 2, 3, 4, 5, 6$ ของเกเบี่ยนทั้ง 6 ชั้น

เป้าหมายล่องหน้าเป้าหมายที่ 2 จะกำหนดสมการเป้าหมายถัดไป ซึ่งมีความสำคัญรองลงมา และกำหนดไว้ดังนี้

สมการจุดมุ่งหมายของเป้าหมายล่องหน้าที 2 (preemptive goal 2 objective function)

$$(5.79) \quad \text{Min } e^+ - e^-$$

สมการข้อจำกัดจะเหมือนกับแบบจำลองของเป้าหมายล่องหน้าที 1 (preemptive goal 1) เว้นแต่จะเพิ่มสมการข้อจำกัดอีก 1 สมการ ซึ่งสมการข้อจำกัดนี้มาจากเป้าหมายล่องหน้าที 1 (preemptive goal 1) ที่จะต้องบรรลุเป็นเป้าหมายแรก สมการข้อจำกัดที่เพิ่มนี้คือ สมการข้อจำกัดจากการบรรลุเป้าหมายล่องหน้าที 1 (preemptive goal 1 met constraint)

$$(5.80) \quad W_g = 48$$

คำตอบที่เหมาะสม (optimum solution) ของเป้าหมายล่องหน้าที 2 นี้จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมขั้นสุดท้ายของแบบจำลองเป้าหมายล่องหน้า (preemptive goal model) โดยคำตอบที่เหมาะสมจะได้ค่าระยะเยื้องศูนย์น้อยสุดที่ $e = 0.002$ เมตร ซึ่งมีค่าระยะเยื้องศูนย์น้อยกว่าระยะเยื้องศูนย์จากแบบจำลองเป้าหมายล่องหน้าที 1 ที่มีค่าระยะเยื้องศูนย์ $e = 0.233$ เมตร ขณะที่ค่าน้ำหนักเกเบี่ยนจะได้เท่ากับแบบจำลองเป้าหมายล่องหน้าที 1 เนื่องจากน้ำหนักเกเบี่ยนนี้ ได้ถูกกำหนดไว้แล้วในสมการข้อจำกัด (4.80) ที่ $W_g = 48$ kN/m ซึ่งได้ค่าน้ำหนักเท่ากับโปรแกรมเป้าหมายล่องหน้าขั้นตอนแรก เนื่องจากน้ำหนักที่น้อยสุดที่ได้จากคำตอบที่เหมาะสมในโปรแกรมเป้าหมายล่องหน้าขั้นตอนแรก ได้ถูกกำหนดเป็นสมการข้อจำกัดในโปรแกรมเป้าหมายล่องหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่สอง ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเปรียบเทียบของคำตอบที่เหมาะสม (optimum solution) จากโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าขั้นตอนแรกและโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าขั้นตอนที่สอง เทียบกับระบบ 27 และระบบ 39 จาก Enviromesh (2007)

ตารางที่ 5.3 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh และโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า

รายการ	ระบบ 27	ระบบ 39	GP1	GP2
ความสูง (Height, H) (m)	3.1	3.0	3.0	3.0
น้ำหนักต่อเมตร (Weight, W_g) (kN/m)	61.92	72.0	48.0	48.0
ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity, e) (m)	0.086	0.172	0.233	0.002
อัตราส่วนความปลอดภัยการหมุนคว่ำ, FSO	2.72	2.87	2.00	2.45
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการไถล, FSS	1.87	1.83	1.52	1.52
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อกำลังแบกทาน, FSB	7.14	6.18	4.89	9.37

หมายเหตุ 27 คือระบบ 27 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบียงสูง 3.1 เมตร ส่วน 39 คือระบบ 39 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบียงสูง 3.0 เมตร GP1 คือโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าขั้นตอนแรกที่ใช้สมการเป้าหมายที่ 1 GP2 โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าขั้นตอนแรกที่ใช้สมการเป้าหมายที่ 2 และตั้งคำตอบที่เหมาะสมที่ได้จากสมการเป้าหมายที่ 1 เป็นข้อจำกัด ค่าจำกัดความของสัญลักษณ์อื่นๆ มีความหมายเดียวกันกับที่อธิบายไว้แล้วในตารางที่ 5.2

5.4 โปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก

โปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (weighted goal programming) จะใช้การกำหนดน้ำหนักความสำคัญ (weights of importance) ให้กับจุดมุ่งหมายทั้งสองซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายเหมือนกับที่กำหนดในโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า ซึ่งจุดมุ่งหมายทั้งสองคือ ต้องการออกแบบให้มีน้ำหนัก (W_g) น้อยสุด และ ต้องการออกแบบให้มีระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) น้อยสุด ซึ่งสมการจุดมุ่งหมายคือ สมการจุดมุ่งหมายของเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก (weighted goal objective function)

$$\text{Min } w_g W_g + w_e (e^+ + e^-)$$

(5.81)

โดยที่ชุดสมการข้อจำกัดจะเป็นชุดสมการเดียวกันกับแบบจำลอง MINP

ค่าน้ำหนัก w_g และ w_e คือค่าน้ำหนักที่แสดงถึงระดับความสำคัญ (level of importance) ของจุดมุ่งหมาย โดยค่าน้ำหนัก w_g เป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของจุดมุ่งหมายแรกที่ต้องการออกแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีน้ำหนัก (W_g) น้อยสุด และค่าน้ำหนัก w_e เป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของจุดมุ่งหมายที่สองที่ต้องการออกแบบให้มีระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) น้อยสุด ซึ่งค่าน้ำหนัก w_g ควรมีค่ามากกว่าค่าน้ำหนัก w_e เนื่องจากจุดมุ่งหมายแรกมีความสำคัญมากกว่าจุดมุ่งหมายที่สอง

จากการที่กำหนดน้ำหนักเอง (subjectively) ให้ $w_g = 2$ และ $w_e = 1$ คำตอบที่เหมาะสม (optimum solution) ของโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนักให้คำตอบเดียวกับโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า โดยให้ค่าน้ำหนักน้อยสุด (W_g) เท่ากับ 48 กิโลนิวตันต่อเมตรและให้ระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) เท่ากับ 0.002 เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับคำตอบที่เหมาะสมจากโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าที่แสดงใน GP2 ในตารางที่ 5.3

โดยการทดลองเปลี่ยนค่าน้ำหนัก คำคำตอบที่เหมาะสมไม่เปลี่ยนแปลง (invariant) ตัวอย่างน้ำหนักที่ทดลองเปลี่ยนคือคู่ของ $w_g = 3$ และ $w_e = 2$, คู่ของ $w_g = 1$ และ $w_e = 1$, และคู่ของ $w_g = 1$ และ $w_e = 2$

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าคำตอบที่เหมาะสมจากแบบจำลองทั้งหมด ขณะที่ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดการคำนวณที่รวมถึงความกว้างและระยะขจัดเซย์ (offset) ของแบบจำลองทั้งหมด

ตารางที่ 5.4 ผลการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก

รายการ	ระบบ 27	ระบบ 39	MINP	Goal
ความสูง (Height, H) (m)	3.1	3.0	3.0	3.0
น้ำหนักต่อเมตร (Weight, W_g) (kN/m)	61.92	72.0	48.0	48.0
ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity, e) (m)	0.086	0.172	0.233	0.002
อัตราส่วนความปลอดภัยการหมุนคว่ำ, FSO	2.72	2.87	2.00	2.45
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการไถล, FSS	1.87	1.83	1.52	1.52
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อกำลังแบกทาน, FSB	7.14	6.18	4.89	9.37

หมายเหตุ 27 คือระบบ 27 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบี่ยนสูง 3.1 เมตร ส่วน 39 คือระบบ 39 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบี่ยนสูง 3.0 เมตร และ MINP คือ โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming) Goal เป็นทั้งโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนักที่ทั้งสองแบบจำลองให้คำตอบเดียวกัน

ตารางที่ 5.5 รายละเอียดจากผลของการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า และโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า

รายการ	27	39	MINP	Goal
ความสูง (Height, H) (m)	3.1	3	3	3
มุมลาดเอียงด้านหน้า (wall inclination), α	10	6	10	10
ความกว้างเกเบี่ยนที่ชั้นฐาน (b_w) (m)	1.7	2.0	1.5	1.5
ความกว้างเกเบี่ยนที่ชั้นที่ 2 (b_2) (m)	1.4	1.5	1.5	1
ความกว้างเกเบี่ยนที่ชั้นที่ 3 (b_3) (m)	1.0	1.0	1	1
ความกว้างเกเบี่ยนที่ชั้นที่ 4 (b_4) (m)	0.7	-	1	1
ความกว้างเกเบี่ยนที่ชั้นที่ 5 (b_5) (m)	-	-	0.5	1
ความกว้างเกเบี่ยนที่ชั้นที่ 6 (b_6) (m)	-	-	0.5	0.5
Offset ด้านหน้าที่ชั้นที่ 2 (x_{2F}) (m)	0	0	0	0.5
Offset ด้านหลังที่ชั้นที่ 2 (x_{2B}) (m)	0.3	0.5	0	0
Offset ด้านหน้าที่ชั้นที่ 3 (x_{3F}) (m)	0.4	-	0.145	0
Offset ด้านหลังที่ชั้นที่ 3 (x_{3B}) (m)	0	0.5	0.355	0
Offset ด้านหน้าที่ชั้นที่ 4 (x_{4F}) (m)	0.3	-	0	0
Offset ด้านหลังที่ชั้นที่ 4 (x_{4B}) (m)	-	-	0	0
Offset ด้านหน้าที่ชั้นที่ 5 (x_{5F}) (m)	-	-	0.048	0
Offset ด้านหลังที่ชั้นที่ 5 (x_{5B}) (m)	-	-	0.452	0
Offset ด้านหน้าที่ชั้นที่ 6 (x_{6F}) (m)	-	-	0	0.5
Offset ด้านหลังที่ชั้นที่ 6 (x_{6B}) (m)	-	-	0	0
น้ำหนักต่อเมตร (Weight, W_g) (kN/m)	61.92	72.0	48.0	48.0
ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity, e) (m)	0.086	0.172	0.233	0.002

หมายเหตุ 27 คือระบบ 27 จาก Enviromesh ที่กำหนดเกเบี่ยนสูง 3.1 เมตร ส่วน 39 คือระบบ 39 จาก Enviromesh ที่กำหนดเกเบี่ยนสูง 3.0 เมตร และ MINP คือ โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming) Goal เป็นทั้งโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าที่ทั้งสองแบบจำลองให้คำตอบเดียวกัน

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) รายละเอียดจากผลของการออกแบบจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP
โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า และโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าหนัก

รายการ	27	39	MINP	Goal
โมเมนต์ต้าน (Resisting Moment, M_r) (kN-m)	96.4	101.9	67.0	82.0
โมเมนต์หมุน (Overturn Moment, M_o) (kN-m)	35.5	35.5	33.5	33.5
อัตราส่วนความปลอดภัยการหมุนคว่ำ, FSO	2.72	2.87	2.00	2.45
แรงต้าน (Resisting Force, F_r) (kN)	49.4	53.3	40.7	40.7
แรงขับ (Driving Force, F_d) (kN)	26.4	29.1	26.7	26.7
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการไถล, FSS	1.87	1.83	1.52	1.52
กำลังแบกทานดิน (q_d) (kPa)	437.1	481.7	407.3	407.3
ความเค้นแนวตั้งที่ด้านหน้า (σ_t) (kPa)	61.2	78.0	83.3	43.5
อัตราส่วนความปลอดภัยต่อกำลังแบกทาน, FSB	7.14	6.18	4.89	9.37

หมายเหตุ 27 คือระบบ 27 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบียงสูง 3.0 เมตร ส่วน 39 คือระบบ 39 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบียงสูง 3.1 เมตร และ MINP คือ โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming) Goal เป็นทั้งโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าหนักที่ทั้งสองแบบจำลองให้คำตอบเดียวกัน

บทที่ 6

วิเคราะห์และอภิปรายผล

บทนี้แสดงการวิเคราะห์และอภิปรายผล โดยเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมจากแบบจำลองทั้งหมดใน 6.1 ตรวจสอบคำตอบที่ถูกต้องของแบบจำลองและประเด็นการได้ค่าที่เหมาะสมใน 6.2 คำตอบที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายในการคำนวณใน 6.3

6.1 เปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมจากแบบจำลองทั้งหมด

จากคำตอบที่เหมาะสมจากแบบจำลองทั้งหมดที่แสดงในตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าคำตอบที่เหมาะสมจาก MINP มีค่าเดียวกับคำตอบที่เหมาะสมจากการใช้โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าขั้นตอนแรก ที่ต้องการออกแบบให้ได้ค่าน้ำหนักเกเบียนน้อยสุด และหลังจากใช้โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าขั้นตอนที่สองที่ต้องการสมดุลความเค้นแนวตั้งที่ปลายฐานทั้งสองข้าง โดยการออกแบบให้มีระยะเยื้องศูนย์กลางน้อยสุด โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าให้ระยะเยื้องศูนย์กลางที่ 0.002 เมตร (GP2 ในตารางที่ 5.3) ซึ่งมิต้าน้อยกว่าระยะเยื้องศูนย์กลางที่ 0.223 เมตร จากการใช้ MINP (MINP ในตารางที่ 5.3) นอกจากนี้ โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าให้คำตอบที่เหมาะสมเหมือนกับโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า (Goal ในตารางที่ 5.4) โดยที่ค่าตัวเลขในตารางที่ 5.4 จะเหมือนกับค่าตัวเลขในตารางที่ 5.3 ต่างกันเพียงคำอธิบายชื่อแบบจำลองเท่านั้น

6.2 ตรวจสอบคำตอบที่ถูกต้องของแบบจำลองและประเด็นการได้ค่าที่เหมาะสม

คำตอบของค่าที่เหมาะสมจากทั้งสามแบบจำลองคือ MINP โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าหนักได้มาจากการใช้โปรแกรม GAMS (General Algebraic Modeling Software) ซึ่ง GAMS สามารถรวมโปรแกรมหาค่าตอบในการหาค่าที่เหมาะสมจากบริษัทอื่น (third-party optimization solvers) โดยในงานศึกษานี้ใช้ MINLP solver โดย MINLP (Mixed Integer Nonlinear Program) ที่สามารถแก้ปัญหาแบบจำลองที่ผสมทั้งพจน์ไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear terms) และตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (discrete variables) จาก Brooke A. et. al. (1992)

แบบจำลอง MINP อาจจะไม่ได้อันดับที่เหมาะสมโดยรวม (optimality problem) หรือไม่ได้ลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสม (convergence problem) จาก Belotti P. et. al. (2013) ดังนั้นงานศึกษานี้ทำตามหลักการปฏิบัติ (practice) ในการเขียนโปรแกรม GAMS เพื่อให้แน่ใจว่าจะได้แบบจำลองที่เพียงพอ (adequate model) หลักการปฏิบัติเหล่านั้นมาจาก Brooke A. et. al. (1992) คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นที่ดีพอในการประมาณหาค่าคำตอบ (specifying sensible initial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

values) การกำหนดขอบเขตของค่าตัวแปร (setting variable bounds) การย่อหรือขยายมาตรา ส่วนของตัวแปรและสมการ (scaling variables and equations) การหลีกเลี่ยงการเขียนสมการใน รูปไม่เป็นเส้นตรง (avoiding expressions in nonlinear functions) การเปลี่ยนรูปหรือการ ประมาณค่าไม่ต่อเนื่อง (reformulating and approximating for discontinuous)

งานศึกษาที่ใช้หลักการปฏิบัติในการเขียนโปรแกรมดังนี้คือ การกำหนดขอบเขตของค่าตัว แปรในสมการสัดส่วนความกว้างต่อความสูง (5.67) – (5.73) การหลีกเลี่ยงการเขียนสมการในรูปไม่ เป็นเส้นตรงเช่นสมการระยะเยื้องศูนย์ (5.62) และสมการความเค้นแนวตั้งที่ปลาย (5.64) การเปลี่ยน รูปหรือการประมาณค่าไม่ต่อเนื่องเช่นการแสดงค่าสัมบูรณ์ (absolute value) ในสมการข้อกำหนด ระยะเยื้องศูนย์ (5.63) งานศึกษาที่ใช้ค่าเริ่มต้นที่กำหนดเอง (default) จากในการประมาณหาค่า คำตอบซึ่งมีค่าตั้งต้นที่ศูนย์ และงานศึกษาที่ไม่ได้มีการย่อหรือขยายมาตราส่วนของตัวแปรและ สมการ เนื่องจากค่าออกแบบมาจากหน่วยการวัด (measurement units) เดียวกัน ถึงแม้ว่าคำตอบ ที่เหมาะสมโดยรวม (global optimal solutions) จะไม่สามารถรับประกันได้จากแบบจำลอง เนื่องจากสมการข้อจำกัด (constraints) บางสมการเป็นแบบ convex อย่างไรก็ตาม งานศึกษานี้ได้ เสนอแบบจำลองที่เพียงพอ (adequate model) เพราะมีการทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ (varying parameters) และแบบจำลองไม่มีปัญหาด้านการลู่เข้าหาคำตอบเพราะคำตอบที่ได้ไม่ปรากฏว่ามีค่า ไม่สามารถมีคำตอบได้ (infeasible solution)

6.3 คำคำตอบที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายในการคำนวณ

คำตอบของค่าที่เหมาะสมจากแบบจำลอง MINP และแบบจำลองโปรแกรมเป้าหมาย (ทั้ง แบบจำลองโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก) สามารถประหยัดน้ำหนัก เกเบี่ยนสูงในช่วง 3 เมตรลงเหลือ 1 เท่า จากกำแพงเกเบี่ยนระบบ 27 ที่มีน้ำหนักเกเบี่ยน 1.29 เท่า และจากกำแพงเกเบี่ยนระบบ 39 ที่มีน้ำหนักเกเบี่ยน 1.5 เท่า แต่แบบจำลอง MINP ให้ค่าระยะเยื้อง ศูนย์ที่ 0.233 เมตร ซึ่งมีความมากกว่าระยะเยื้องศูนย์ของระบบ 27 ที่ 0.086 เมตร และระบบ 39 ที่มี ระยะเยื้องศูนย์ที่ 0.172 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 6.1 การประยุกต์ใช้โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนักให้น้ำหนักเกเบี่ยนต่ำสุดเท่ากันที่ 48 กิโลนิวตันต่อเมตรและให้ ระยะเยื้องศูนย์ที่ 0.002 เมตร ดังแสดงใน Goal ในตารางที่ 6.1 ดังนั้น ทั้งโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนักสามารถเป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบกำแพงเกเบี่ยนหาก น้ำหนักเกเบี่ยนที่ประหยัดได้คุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายในการคำนวณ

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบน้ำหนักและระยะเยื้องศูนย์กลางจากตัวอย่างของ Enviromesh MINP โปรแกรมเป้าหมาย ล่วงหน้า และโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก

รายการ	ระบบ 27	ระบบ 39	MINP	Goal
ความสูง (Height, H) (m)	3.1	3.0	3.0	3.0
น้ำหนักต่อเมตร (Weight, W_g) (kN/m)	61.92	72.0	48.0	48.0
สัดส่วนน้ำหนัก (Weight ratio)	1.29	1.5	1	1
ระยะเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity, e) (m)	0.086	0.172	0.233	0.002

หมายเหตุ 27 คือระบบ 27 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบื้องสูง 3.1 เมตร ส่วน 39 คือระบบ 39 จาก Enviromesh ที่กำแพงเกเบื้องสูง 3.0 เมตร และ MINP คือ โปรแกรมไม่เป็นเส้นตรงที่เป็นจำนวนเต็มแบบผสม (mixed integer nonlinear programming) Goal เป็นทั้งโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการคำนวณ (computational cost) ของ MINP โปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าและโปรแกรมเป้าหมายถ่วงน้ำหนัก จะเห็นว่า MINP เป็นแบบจำลองขั้นตอนเดียว (one-step model) ถึงแม้ว่าโปรแกรมเป้าหมายล่วงหน้าเป็นแบบจำลองสองขั้นตอน (two-step model) แต่ขั้นตอนที่สองต้องการเพิ่มสมการข้อจำกัดเพียงสมการเดียวสำหรับบรรลุสมการจุดมุ่งหมายในขั้นตอนแรก สมการเป้าหมายถ่วงน้ำหนักก็เป็นแบบจำลองขั้นตอนเดียว (one-step model) แต่อาจจะต้องมีการทดลองเปลี่ยนค่าน้ำหนักความสำคัญให้แก่วัตถุประสงค์ทั้งสองในสมการจุดมุ่งหมายเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการได้คำตอบเป็นค่าที่เหมาะสมเฉพาะที่ (local optimality problem)

บรรณานุกรม

- Araki H, Hirakawa D. 2019. “Effects of Thrust Protecting Method for Buried Pipe Using Geogrid Gabion of Different Sizes.” **International Journal of GEOMATE**, June 2019, Vol.16, Issue 58. pp.62 – 68.
- ASTM A975-97. 2003. “Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Coating).” **America Standard Testing Association**.
- Basudhar, P. K., Vashistha, A., Deb, K. and Dey, A. 2008. “Cost Optimization of Reinforced Earth Walls.” **Geotechnical and Geological Engineering**, Vo1.26, No.l, February 2008. pp. 1 - 12.
- Belotti, P., Kirches, C., Leyffer, S., Linderoth, J., Luedtke, J., & Mahajan, A. 2013. Mixed-Integer Nonlinear Optimization. **Acta Numerica**, 22. pp. 1–131.
- Bowles J. E. 2001. **Foundation Analysis and Design**. McGraw-Hill.
- Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R.1992. **GAMS: A User’s Guide**, GAMS Development Corporation.
- BS443. 1982. **Specification for Testing Zinc Coatings on Steel Wire and for Quality Requirements**. British Standards Institution.
- BS729. 1971. **Specification for Hot Dip Galvanised Coatings on Iron and Steel Articles**. British Standards Institution.
- BS1052. 1980. **Specification for Mild Steel Wire for General Engineering Purposes**. British Standards Institution.
- BS4102. 1998. **Specification for Steel Wire for General Fencing Purposes**. British Standards Institution.
- BS4102. 1998. **Specification for Steel Wire for General Fencing Purposes**. British Standards Institution.
- BS5390. 1976. **Code of Practice for Stone Masonry**. British Standards Institution.
- BS8002. 2015. **Code of Practice for Earth Retaining Structures**. British Standards Institution.
- Budhu Muni. 2011. **Soil Mechanics and Foundations**. 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- Dungca J., Galupino J., Sy C., Chiu S. F. 2018. Linear Optimization of Soil Mixes in the Design of Vertical Cut-off Walls. **International Journal of GEOMATE**, Vol.14, Issue 44, pp.159-165.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Enviromesh. 2007. **Designing with Gabions Volume 1. A Reference Guide for the Designing of Mass Gravity Gabion Walls.**
- FHWA-NHI-00-043. 2001. **Mechanical Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.** Federal Highway Administration and National Highway Institute (NHI). U.S. Department of Transportation.
- FHWA-NHI-10-024. 2009. **Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I.** Federal Highway Administration and National Highway Institute (NHI). U.S. Department of Transportation.
- FHWA-SA-96-038. 1996. **Geotechnical Engineering Circular No. 2. Earth Retaining Systems.** Federal Highway Administration.
- Kravanja, S., Soršak, A., & Kravanja, Z. 2003. “Efficient Multilevel MINLP Strategies for Solving Large Combinatorial Problems in Engineering.” **Optimization and Engineering**, 4(1/2), pp. 97–151.
- Kravanja, S., Zula, T., Klanšek, U. 2017. “Multi-Parametric MINLP Optimization Study of a Composite I Beam Floor system.” **Engineering Structures**, 2017, No. 130, p. 316-335.
- Klanšek, U. 2016. “Mixed-Integer Nonlinear Programming Model for Nonlinear Discrete Optimization of Project Schedules under Restricted Costs.” **Journal of Construction Engineering and Management**, No. 142(3), pp. 1-13.
- Komarudin F. M, Purba C, Rahma I. 2017. “Multi-period Maritime Logistics Network Optimization Using Mixed Integer Programming.” **International Journal of GEOMATE**, Vol.13, Issue 36, pp.94-99.
- Ćwirko M., Jastrzebska, M., ; Kwiecien S., 2017. “The Analysis of the Usefulness of Welded Meshes to Embankment Reinforcement.” **Studia Geotechnica et Mechanica**, Vol. 39, No. 3.
- Ortigao A. R., Sayao A. S. 2004. **Handbook of Slope Stabilisation.** Springer.
- Ravirala, V., Grivas, D. A. 1995. Goal-Programming Methodology for Integrating Pavement and Bridge Programs. **Journal of Transportation Engineering**, 121(4), pp. 345–351.
- Saribas A., Erbatur F. 1996. “Optimization and Sensitivity of Retaining Structures.” **Journal of Geotechnical Engineering**. pp. 649-656.

Tamiz M., Jones D. Romero C. 1998. "Goal Programming for Decision Making: An Overview of the Current State-of-the-art." **European Journal of Operational Research**, pp. 569-581.

Taylor B. W. 2006. **Introduction to Management Science**, 9th Edition, Prentice Hall.

Techi Development Co. Ltd. 2021. Products. [Online]. Available: <https://www.techewiremesh.com/chain-link-fencing>

Zein A. K. M., Karim W. A. 2017. "Stability of Slopes on Clays of Variable Strength by Limit Equilibrium and Finite Element Analysis Methods." **International Journal of GEOMATE**, Vol.13, Issue 38, pp.157-164.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวุฒิชัยชาติพัฒนานันท์
ประวัติการศึกษา	2535 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542 Master of Business Administration, University of Tennessee, USA 2544 Master of Science (Management Science), University of Tennessee, USA 2547 Master of Science (Statistics), University of Tennessee, USA 2547 Doctor of Philosophy (Management Science), University of Tennessee, USA 2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (ปฐพีเทคนิค) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้