



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-29

รายงานการวิจัย

การจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติ
โดยใช้แบบจำลองเชิงกายภาพย่อส่วน

(Simulation of Surface Subsidence in 3-Dimensions
Using Scaled-down Physical Model)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-55-24-29

รายงานการวิจัย

การจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติ
โดยใช้แบบจำลองเชิงกายภาพย่อส่วน

(Simulation of Surface Subsidence in 3-Dimensions
Using Scaled-down Physical Model)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 และ 2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2556



บทคัดย่อ

โครงการทดสอบได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นสำหรับใช้จำลองเชิงกายภาพในสามมิติแบบย่อส่วนของการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากช่องเหมืองใต้ดิน โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อหาผลกระทบของลักษณะช่องเหมืองใต้ดินต่อค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน โดยได้นำกรวดคละขนาด (2.0–9.5 มิลลิเมตร) มาใช้จำลองเป็นชั้นหินปิดทับ มีการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดกรวดและการทดสอบกำลังเฉือนแบบตรงเพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของกรวด การทรุดตัวของชั้นหินปิดทับได้ถูกจำลองขึ้นภายใต้ปัจจัยที่ผันแปรคือความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน 5 ถึง 20 เซนติเมตร ความกว้าง 5 ถึง 25 เซนติเมตร ความสูง 1 ถึง 5 เซนติเมตร และความยาว 5 ถึง 25 เซนติเมตร ซึ่งการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับได้ถูกจำลองขึ้นภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ผลการทดสอบระบุว่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะถูกรับควบคุมด้วยความลึก ความกว้าง ความสูง และความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน โดยมุมการไหลของชั้นหินปิดทับและการทรุดตัวสูงสุดจะลดลงเมื่อทำการเพิ่มความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน และเมื่อเพิ่มความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินจะส่งผลให้มุมการไหลลดลง ในขณะที่ค่าการทรุดตัวสูงสุดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มุมการไหลของชั้นหินปิดทับและการทรุดตัวสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความสูงและความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน โดยมุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเริ่มคงที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 3:1 หรือมากกว่า ผลการทดสอบจากแบบจำลองเชิงกายภาพสามารถนำมาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบของการทรุดตัวด้วยไฮเปอร์โบลิกโปรไฟล์ฟังก์ชัน และมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม PFC^{2D}

Abstract

A test frame has been designed and fabricated for use in the physical scaled-down model simulation of surface subsidence induced by underground opening in 3-dimension. The objective of this research is to determine the effects of underground opening characteristics on the angle of draw and maximum subsidence. Clean gravel (2.0–9.5 mm) is used simulate the overburden. The grain size analysis and direct shear test are performed to determine the mechanical properties of gravel. Overburden subsidence is simulated under a variety of parameters; depth of the underground openings is varied from 5 to 20 cm, width of the underground openings from 5 to 25 cm, height of the underground openings from 1 to 5 cm, and length of the underground openings from 5 to 25 cm. The overburden subsidence has been simulated under real gravitational force. Results indicate that the angle of draw is controlled by the depth, widths, heights and lengths of the openings. The angle of draw and maximum subsidence decreases with increasing opening depth, increasing the opening width could reduce the angle of draw but maximum subsidence is increases. The angle of draw and maximum subsidence increase with increasing opening height and length, and tend to approach a certain limit when the ratio of opening length-to-width (L/W) equals to 3. The results from the physical model simulations can be used to calculate the components of subsidence by hyperbolic profile function, and compare reasonably well with those calculated from the computer simulations using a discrete element method (PFC^{2D} code).

สารบัญ

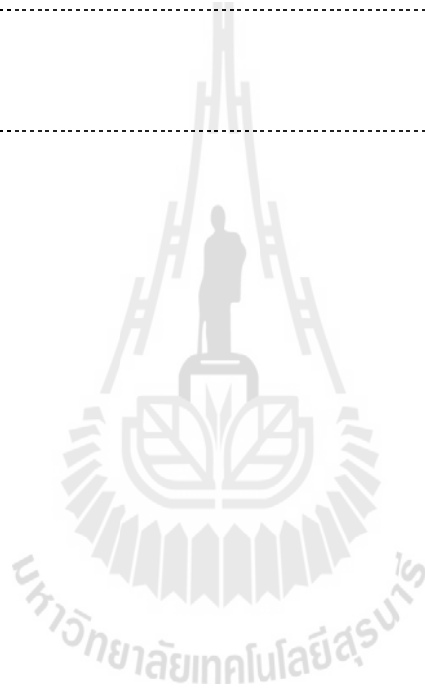
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	8
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน.....	9
2.1.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน.....	9
2.1.2 การคำนวณการทรุดตัวด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID.....	11
2.1.3 ซอฟต์แวร์ PFC2D.....	11
2.2 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาโครงทดสอบ.....	19
3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์.....	19
3.2 รูปแบบของโครงจำลอง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การจัดเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ.....	29
4.1 วัตถุประสงค์.....	29
4.2 การจัดเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ.....	29
4.2.1 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดกรวด.....	29
4.2.2 การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง.....	31
บทที่ 5 การทดสอบ.....	37
5.1 วัตถุประสงค์.....	37
5.2 วิธีการทดสอบ.....	37
5.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	41
5.4 ผลการทดสอบ.....	43
5.4.1 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน.....	43
5.4.2 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดิน.....	45
5.4.3 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน.....	45
5.4.4 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน.....	45
บทที่ 6 การคำนวณองค์ประกอบการทรุดตัวของผิวดิน.....	59
6.1 วัตถุประสงค์.....	59
6.2 การคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function.....	59
บทที่ 7 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	75
7.1 วัตถุประสงค์.....	75
7.2 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	75
7.3 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	75
7.4 ผลของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	91
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
บรรณานุกรม.....	93
ประวัตินักวิจัย.....	95



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังรับแรงเฉือนคงเหลือที่ผันแปรตามค่าความเค้นตั้งฉาก.....	35
4.2 ค่าความเค้นยึดติด (c) และมุมของความเสียดทาน (ϕ) ของกรวดคละขนาด.....	36
4.3 ค่าความแข็งตั้งในแนวเฉือนและในแนวตั้งฉากของกรวดคละขนาด.....	36
5.1 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน.....	44
5.2 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความสูงของช่องเหมืองใต้ดิน.....	46
5.3 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน.....	47
5.4 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน.....	48
5.5 ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_5/W เท่ากับ 0.1.....	52
5.6 ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_5/W เท่ากับ 0.05.....	53
5.7 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_5/W เท่ากับ 0.1.....	55
5.8 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_5/W เท่ากับ 0.05.....	56
7.1 ตัวแปรต่างๆ ที่มีการผันแปรในแต่ละชุดการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	77
7.2 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับโดยมีการผันแปรความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน.....	79
7.3 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับโดยมีการผันแปรความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน.....	80
7.4 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับโดยมีการผันแปรความสูงของช่องเหมืองใต้ดิน.....	86

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบจากลักษณะของโพรงและ ธรณีวิทยาโครงสร้างต่างกัน และผลกระทบทางกลศาสตร์ เมื่อ S_{max} คือ ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด.....	4
1.2 แนวคิดเบื้องต้นในการออกแบบเครื่องมือทดสอบการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติ.....	6
2.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงหรือช่องเหมือง และธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน.....	10
2.2 โครงจำลองทางกายภาพสำหรับคาดคะเนการทรุดตัวที่เสนอโดย Asadi et al. (2005)	13
2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูก ละลายบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับที่เสนอโดย Aracheeploha et al. (2009).....	15
2.4 ตัวอย่างการทดสอบแบบจำลองเชิงกายภาพในแนวตั้งแบบสองมิติที่เสนอโดย Fuenkajorn & Phuekphum (2010).....	17
3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติที่ ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว.....	22
3.2 ภาพเพอร์สเปคทีฟแบบแยกส่วนของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหิน ในสามมิติ.....	23
3.3 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ..	24
3.4 ภาพตัดขวางด้านข้างของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ ซึ่งทำให้เห็นส่วนประกอบของส่วนโครงและส่วนชุดจำลองโพรงชัดเจนขึ้น.....	25
3.5 ภาพตัดขวางด้านบนของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ ที่แสดงตำแหน่งส่วนโครงและส่วนชุดจำลองโพรง.....	26
3.6 ภาพเพอร์สเปคทีฟของส่วนชุดตรวจวัดการทรุดตัวของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัว ของผิวดินและชั้นหินในสามมิติที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว.....	28
4.1 กรวดคละขนาดที่นำมาจำลองเป็นชั้นหินปิดทับ.....	30
4.2 ตะแกรงร่อนสำหรับการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน.....	30
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงและขนาดของเม็ดดิน.....	32
4.4 เครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear device).....	32

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	33
4.6	34
4.7	35
4.8	36
5.1	38
5.2	39
5.3	40
5.4	41
5.5	44
5.6	46
5.7	47
5.8	48
5.9	50
5.10	51

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 องค์ประกอบของการทรุดตัวที่คำนวณด้วย Profile function.....	60
6.2 ผลกระทบที่เกิดจากความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินต่อการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับ..	60
6.3 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	62
6.4 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	63
6.5 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	63
6.6 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	64
6.7 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	64
6.8 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 17.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	65
6.9 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	65
6.10 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 1 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความลึก ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	66

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	71
6.21 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	71
6.22 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	72
6.23 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	72
6.24 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 25 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	73
7.1 พื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนและหลังการจำลองช่องเปิดใต้ดินโดยใช้โปรแกรม PFC ^{2D} .	78
7.2 พื้นผิวการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	80
7.3 พื้นผิวการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	81
7.4 พื้นผิวการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิด เพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	81
7.5 พื้นผิวการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	82

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.15 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้าน ความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 2 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมี ความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	87
7.16 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้าน ความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 3 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมี ความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	88
7.17 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้าน ความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 4 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมี ความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	88
7.18 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้าน ความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมี ความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัญหาแผ่นดินทรุด (Subsidence) หรือการเกิดหลุมยุบ (Sinkhole) มักจะเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นและได้ยื่นกันบ่อยครั้งจากสื่อโทรทัศน์ วิทยุ และหนังสือพิมพ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้คน สัตว์เลี้ยง ที่อยู่อาศัย รวมทั้งพื้นที่การเกษตร สาเหตุของการเกิดแผ่นดินทรุดมีด้วยกันหลายประการ อาทิ การทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลเค็ม การทำเหมืองใต้ดิน การละลายของหินปูน เป็นต้น การทรุดตัวที่เกิดจากสาเหตุข้างต้นเหล่านี้ไม่สามารถคาดคะเนถึงตำแหน่งของโพรงหรือช่องเหมืองและขอบเขตพื้นที่ของการทรุดตัวบนผิวดินได้ แม้ว่าปัญหาเรื่องการทรุดตัวของผิวดินจะสามารถแก้ไขได้ด้วยการสำรวจหาตำแหน่งของโพรงใต้ดินแล้วทำการอุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัวเกิดขึ้น ซึ่งการสำรวจหาตำแหน่งของโพรงสามารถกระทำได้โดยอาศัยการสำรวจด้วยการหยั่งธรณีฟิสิกส์ ซึ่งวิธีดังกล่าวทำให้ทราบถึงความลึกและรูปร่างของโพรง อย่างไรก็ตามวิธีการเช่นนี้ต้องอาศัยการสำรวจแบบสุ่มและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง และยังไม่สามารถคาดคะเนขอบเขตของการทรุดตัวบนผิวดินได้

การคาดคะเนขอบเขตการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดินและความลึกของโพรงหรือช่องเหมืองใต้ดินสามารถคำนวณได้อย่างคร่าวๆ โดยใช้ตัวแปร Angle of draw (γ) โดย Angle of draw จะถูกประเมินจากความลึกและความกว้างของช่องเหมืองหรือโพรง และจากค่ามุมเสียดทานของหิน ซึ่งเป็นค่าที่มีช่วงกว้างทำให้ไม่สามารถกำหนด Angle of draw ที่แน่นอนได้ อีกทั้งในภาคสนามยังไม่สามารถตรวจวัดค่า Angle of draw ที่แท้จริงได้ แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถประเมินค่า Angle of draw โดยใช้วิธีการสังเกตจากช่องเหมืองที่มีการขุดเจาะอย่างต่อเนื่องและใช้การคำนวณด้วยวิธี Profile function ที่เสนอโดย Singh (1992) โดยนำค่าความลึกของช่องเหมืองกับขอบเขตของการทรุดตัว หรือประเมินจากวิธีเชิงสถิติที่เสนอโดย Archeoploha (2009) ซึ่งต้องใช้การสังเกตการณ์การทรุดตัวบนผิวดินเป็นระยะเวลายาวนานมาคำนวณเพื่อประเมินค่า Angle of draw นอกจากนี้ทฤษฎีและหลักการที่สร้างขึ้นจากนักวิจัยหลายๆ ท่านยังไม่เคยได้รับการพิสูจน์ว่าทฤษฎีและหลักการใดมีความถูกต้องแม่นยำที่สุด ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่า Angle of draw ที่ถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคสนาม ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประดิษฐ์โครงสร้างทดสอบการทรุดตัวในสามมิติเพื่อจำลองลักษณะการทรุดตัวภายใต้รูปร่างลักษณะโพรงที่แตกต่างกันและทำการตรวจวัดองค์ประกอบของการทรุดตัวต่างๆ อาทิ ค่าการทรุดตัวสูงสุด ค่าความลาดชันสูงสุด ค่าส่วนโค้งสูงสุด รวมไปถึงตรวจวัดขอบเขตพื้นที่การทรุดตัวของ Angle of draw และมีการพิจารณาคุณสมบัติและความหนาของชั้นหินปิดทับ

โครงการทดสอบการท่รุดตัวที่จะพัฒนาขึ้นมาี้ต้องอาศัยคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินเพื่อจำลองชั้นหินปิดทับในแต่ละชั้นแล้วนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการท่รุดตัวค่า Angle of draw และความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการท่รุดตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่มีผลจากการท่รุดตัวด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับทดสอบการท่รุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากช่องเหมืองใต้ดินรูปแบบต่างๆ ในสามมิติ โดยมีการผันแปรความกว้าง ความยาว ความลึก และรูปร่างของช่องเหมือง
- 2) ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการท่รุดตัวกับขอบเขตของการท่รุดตัว ความกว้าง ความยาว ความสูงของช่องเหมือง ความลึก และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์โครงการทดสอบการท่รุดตัวในสามมิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตของการท่รุดตัว ความกว้าง ความยาว ความสูงของช่องเหมือง ความลึก และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) ประดิษฐ์โครงการทดสอบการท่รุดตัวในสามมิติที่สามารถผันแปรช่องเหมืองในรูปแบบต่างๆ ได้
- 3) แบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ทดสอบการท่รุดตัวในสามมิติมีขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ $0.95 \times 0.95 \times 0.60$ ลูกบาศก์เมตร โดยมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนที่ใช้จำลองชั้นหินปิดทับมีขนาด $0.95 \times 0.95 \times 0.40$ ลูกบาศก์เมตร 2) ส่วนที่ใช้จำลองระดับและรูปแบบของช่องเหมืองจะอยู่ด้านล่างของส่วนที่ 1 มีขนาด $0.25 \times 0.25 \times 0.20$ ลูกบาศก์เมตร และ 3) ส่วนของระบบการปรับเลื่อนระยาะการแอนตัวและความสูงของโพรง
- 4) แบบจำลองทางกายภาพได้ใช้กรวด ทราย หรือวัสดุผสมอื่นๆ ที่มีความยืดหยุ่นเพื่อจำลองเป็นชั้นหินปิดทับ ส่วนช่องเหมืองที่อยู่ด้านล่างได้ใช้วัสดุแข็งสร้างเป็นบล็อกเพื่อจำลองลักษณะของช่องเหมืองขึ้นมา โดยที่ความหนาของชั้นหินปิดทับจะผันแปรระหว่าง 1–20 เท่า ของความสูงช่องเหมือง
- 5) การทดสอบมีทั้งช่องเหมืองเดี่ยว ช่องเหมืองกลุ่ม และช่องเหมืองเป็นแนวยาว (Panel)

- 6) การทดสอบได้ทำที่อุณหภูมิห้องและอยู่ในสภาวะแห้ง
- 7) ผลจากแบบจำลองทางกายภาพได้นำไปเปรียบเทียบกับการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function และโปรแกรม PFC2D
- 8) มีการเขียนคู่มือการใช้เครื่องมืออย่างละเอียดและเป็นขั้นตอนโดยมีรูปถ่ายประกอบ
- 9) มีการจดสิทธิบัตรเครื่องมือ วิธีการใช้ และวิธีการประมวลผล
- 10) จัดอบรมแก่บุคคลในองค์กรของรัฐบาลหรือประชาชนที่เป็นกลุ่มเป้าหมายและนำเทคโนโลยีนี้เผยแพร่แก่นักวิชาการที่เกี่ยวข้อง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

การศึกษาในโครงการวิจัยนี้ได้เน้นไปที่การทดสอบด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการ โดยมีการจำลองการทรุดตัวในสามมิติโดยใช้โครงทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่เพื่อที่จะสามารถตรวจวัดค่า Angle of draw ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคสนาม ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วความนี้ไม่สามารถตรวจวัดได้โดยตรงดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยกรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้คือ การทดสอบด้วยแบบจำลองการทรุดตัวเชิงกายภาพในสามมิติที่นำข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินในแนวตั้ง ขอบเขตของการทรุดตัว และ Angle of draw ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในห้องปฏิบัติการมาวิเคราะห์และหาสมการความสัมพันธ์ร่วมกับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับเพื่อหาความสัมพันธ์กับขอบเขตของการทรุดตัว ความกว้าง ความยาวและความสูงของช่องเหมือง ความลึกของชั้นหินปิดทับ ระยะแอนตัวของหลังคาช่องเหมือง คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ และรูปแบบของช่องเหมืองที่ต่างกัน

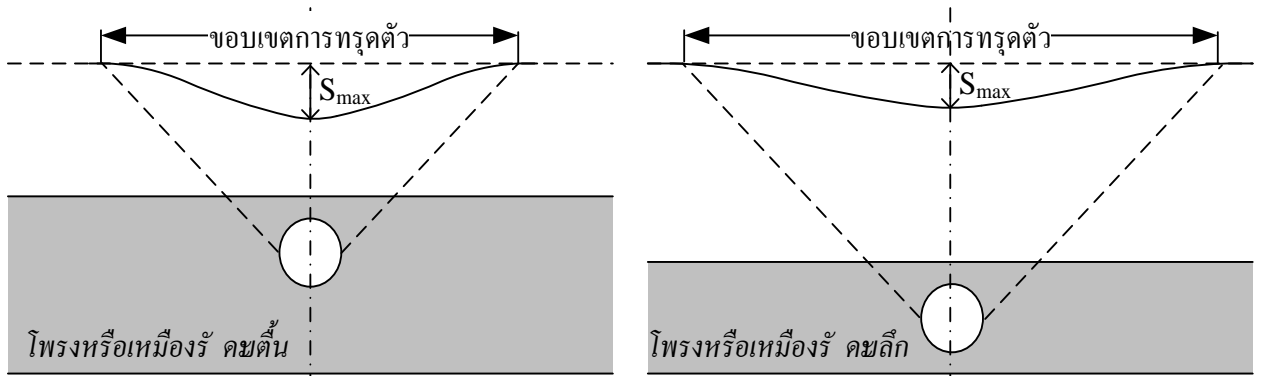
การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์หรือมีปัจจัยที่ขึ้นกับรูปร่างของช่องเหมืองและคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ รวมไปถึงธรณีวิทยาโครงสร้าง ดังนั้น การที่ช่องเหมืองมีรูปร่างหรือรูปแบบ คุณสมบัติของชั้นหินปิดทับและมีลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกันจะส่งผลให้ลักษณะการทรุดตัวในแนวตั้งและลักษณะของผิวดินแตกต่างกันไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 1.1

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

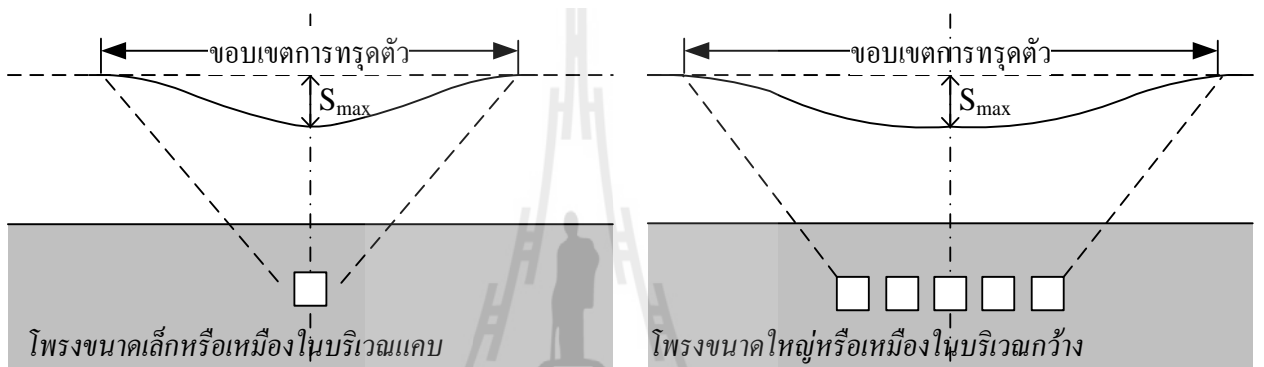
การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

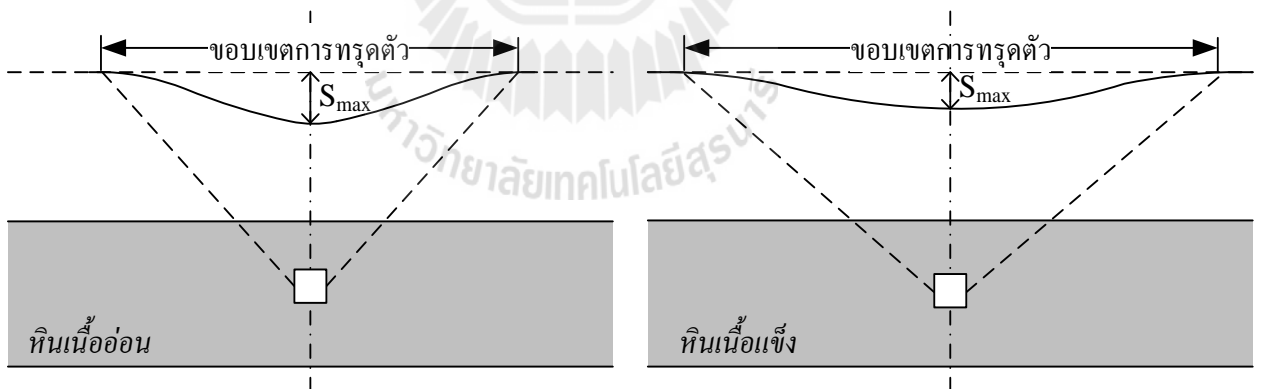
ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแผ่นดินทรุดที่เกิดขึ้นทั้งในและต่างประเทศ ธรณีวิทยาเกี่ยวกับความหนา ความลึก และคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหิน รวมทั้งสมการที่ใช้ในการประเมินลักษณะของพื้นผิวในบริเวณที่เกิดแผ่นดินทรุด (การทรุดตัวสูงสุด การปิดโค้งของผิวดิน) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัย



(ก) ผลกระทบจากการผันแปรลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง



(ข) ผลกระทบจากการผันแปรรูปร่างของโพรง หรือพื้นที่การทำเหมืองใต้ดิน



(ค) ผลกระทบทางกลศาสตร์

รูปที่ 1.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดิน (ก) - (ข) ที่เกิดจากผลกระทบจากลักษณะของโพรงและธรณีวิทยาโครงสร้างต่างกัน และ (ค) เป็นผลกระทบทางกลศาสตร์ เมื่อ S_{max} คือ ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบเครื่องมือทดสอบ

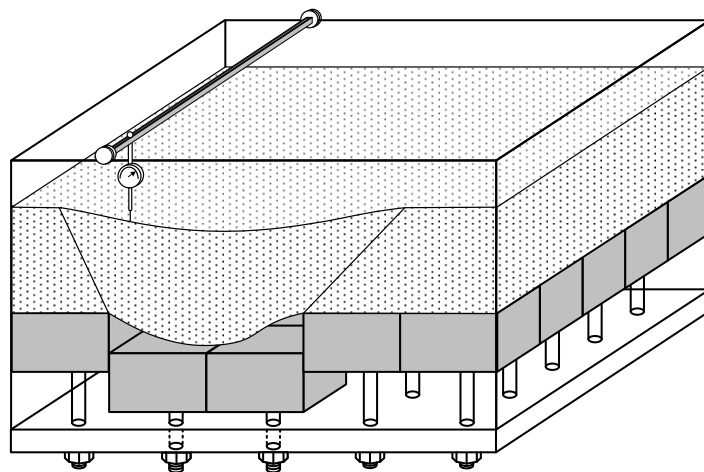
วัตถุประสงค์ของการศึกษาในขั้นตอนนี้ คือ เพื่อออกแบบโครงสร้างทดสอบการทรุดตัวของสามมิติสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยการออกแบบได้ใช้โปรแกรม Solid Work สร้างเป็นแบบขึ้นมา ข้อกำหนดสำคัญ (Specification) ที่ใช้ในการออกแบบ คือ 1) มีกลไกที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดและความลึกของช่องเหมือนในรูปแบบต่างๆ ได้ตามต้องการ 2) วัสดุทำจากอะคริลิกแข็ง เพื่อให้สามารถสังเกตการทรุดตัวได้ในเชิงเวลา 3) มีกลไกที่ใช้ตรวจวัดค่าการทรุดตัวและ Angle of draw บนผิวของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับได้ตลอดพื้นที่ และ 4) ทนทานและมีราคาถูกรูปที่ 1.2 แสดงภาพตัวอย่างโครงสร้างทดสอบที่ออกแบบไว้ในเบื้องต้น (อาจมีการตัดแปลงเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการทดสอบ)

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการได้มีการศึกษาผลกระทบของความกว้าง ความยาว และความสูงของช่องเหมือน ผลกระทบด้านความลึกและด้านคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ โดยใช้วัสดุจำลองและมีการเทียบค่าไปสู่คุณสมบัติที่แท้จริงต่อไป ซึ่งจะมีการตรวจวัด 1) ค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่จุดวิกฤต 2) ความลาดชันของผิวดินที่เกิดจากการทรุดตัว และ 3) Angle of draw และขอบเขตของการทรุดตัวบนผิวดินจากสภาวะต่างๆ

ขั้นตอนที่ 4 การจำลองการทรุดตัวด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้นำมาใช้คำนวณหาปริมาณการทรุดตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากผลกระทบของช่องเหมือน ผลที่ได้ได้นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวและรูปแบบของช่องเหมือนที่มีลักษณะต่างกัน และเชื่อมโยงผลจากแบบจำลองเพื่อนำไปสู่สภาวะจริงในภาคสนาม



รูปที่ 1.2 แนวคิดเบื้องต้นในการออกแบบเครื่องมือทดสอบการทรุดตัวบนผิวดินในสามมิติ

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างสมการความสัมพันธ์

ค่าที่ได้จากการตรวจวัดการทรุดตัวในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบการทรุดตัวในสามมิติได้นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว และความสูงของช่องเหมือง ความลึกและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ โดยจะพัฒนาความสัมพันธ์ของ Angle of draw ที่ตรวจวัดได้ในห้องปฏิบัติการกับรูปแบบที่แตกต่างกันของช่องเหมืองเพื่อให้ได้มาซึ่งสมการที่ใช้คำนวณ Angle of draw ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ประกอบด้วย การนำเสนอบทความในการประชุมทางด้านวิชาการ การนำผลงานวิจัยชิ้นนี้ตีพิมพ์ในวารสาร และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1) แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

เครื่องมือทดสอบการทรุดตัวในสามมิติถือเป็นนวัตกรรมใหม่ที่สามารถทดสอบการทรุดตัวที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม ส่งผลให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น ผู้ประกอบการเหมืองใต้ดิน สามารถนำเครื่องทดสอบนี้ไปใช้วิเคราะห์ผลกระทบต่อการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากการเปิดช่องเหมืองที่อยู่ใต้ดินได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์ในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบและศึกษาการทรุดตัวของผิวดิน และนำไปสู่การเข้าใจเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้น การศึกษาดังกล่าวได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินเพื่อใช้ในการระบุขอบเขตการทรุดตัวของโพรงใต้ดิน เพื่อแก้ไขและลดผลกระทบของแผ่นดินทรุดในบริเวณที่มีปัญหาหรือคาดว่าจะมีปัญหาคารทรุดตัวของดิน

3) บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การเผยแพร่ความรู้ในการประชุมวิชาการระดับชาติและการตีพิมพ์เอกสารการประชุมในหัวข้อที่เกี่ยวข้องจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานและชุมชนในพื้นที่ อาทิ กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำบาดาล บริษัทชุดเจาะบ่อบาดาล กรมทรัพยากรธรณีและสิ่งแวดล้อม และองค์กรท้องถิ่น (อบต., อบจ.) ผู้วางแผนการจัดการใช้น้ำสำหรับอุปโภค-บริโภค และการกำหนดตำแหน่งบ่อบาดาล เป็นต้น

4) บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาคธุรกิจ อาทิ อุตสาหกรรมเหมืองใต้ดิน และบริษัทที่เกี่ยวข้องกับการชุดเจาะใต้ดินต่างๆ เพื่อให้ผู้ประกอบการพึงระวังผลกระทบจากการชุดเจาะอันเป็นสาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว

5) นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

เครื่องมือทดสอบการทรุดตัวของตัวที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปจดสิทธิบัตร เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ ซึ่งเครื่องมือทดสอบการทรุดตัวดังกล่าวอาจเป็นสิ่งประดิษฐ์เดียวที่ได้พัฒนาขึ้นภายในประเทศไทย

6) เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

ในปัจจุบันนี้การทำเหมืองใต้ดินส่วนใหญ่ไม่คำนึงถึงผลกระทบที่จะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินขนาดใหญ่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้าง เช่น อาคารที่อยู่อาศัย โรงงาน สะพาน เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถใช้ในการปรับเปลี่ยนวิธีและการประเมินผลกระทบในการชุดเจาะเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ของเหมืองและพื้นที่ใกล้เคียง

7) เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

เป็นการให้ความรู้แก่ผู้ประกอบการเหมืองใต้ดินเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเกิดและวิธีป้องกันการเกิดแผ่นดินไหว

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 4) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 5) ศูนย์วิจัย บริษัทเหมืองแร่ และบริษัทที่ปรึกษาทั้งในและต่างประเทศ



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือการทบทวนวรรณกรรมวิจัย โดยได้ทำการค้นคว้า ศึกษา และสรุปบทความ รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการทรุดตัวโดยมีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการและองค์ประกอบสำคัญที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการทรุดตัว รวมไปถึงหลักการหรือวิธีการคำนวณ และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ประเมินหรือคาดคะเนการทรุดตัวที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

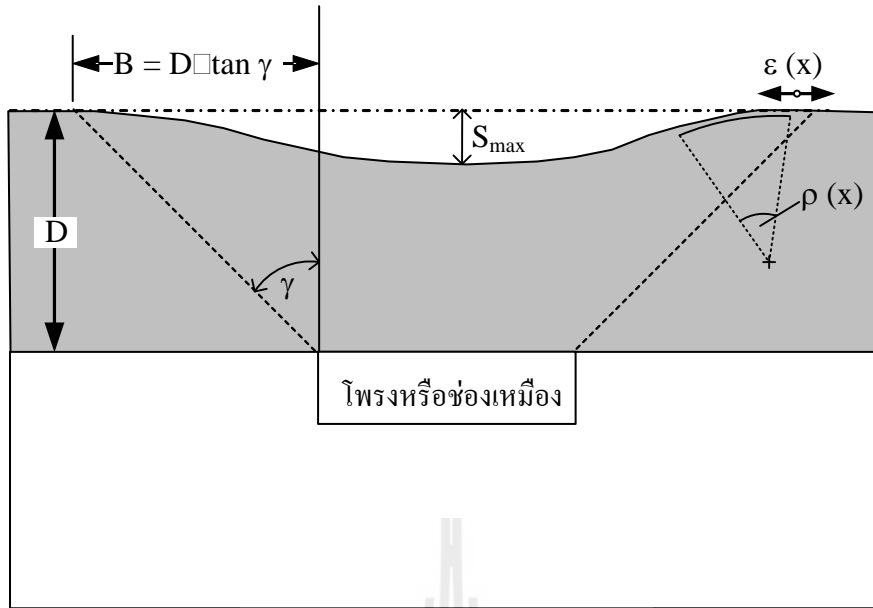
2.1 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน

2.1.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Singh (1992) กล่าวว่า การทรุดตัวเป็นผลจากการถูกรบกวนด้วยความเค้นภายนอก ซึ่งความเค้นที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนที่ของชั้นดินหรือชั้นหิน ขอบเขตของการทรุดตัวจะขึ้นกับขนาดของความเค้นและขนาดของโพรงหรือช่องเหมืองที่จะส่งผลต่อความไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้น การทรุดตัวของผิวดินจึงสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ได้ดินที่เกิดจากการถล่มในโพรงใต้ดิน การทรุดตัวของผิวดินโดยทั่วไปจะนำมาซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ด้านข้าง

การทรุดตัวของผิวดินเกิดได้ 3 แบบ คือ 1) มีรอยแตก ร่องแยก หรือระดับของการแตก 2) บ่อหรือหลุมยุบ 3) เกิดเป็นแอ่งน้ำหรือเป็นรูปท้องช้าง การแตกของผิวดินอาจจะอยู่ในรูปแบบของการเปิดรอยแตก ระดับการเลื่อนไถลหรือโพรงที่อยู่ในบ่อ และผลสะท้อนของความเค้นตั้งและความเค้นเฉือนใต้ดิน

การคำนวณด้วย Profile function มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องกรอกเข้าไปในสมการประกอบด้วยการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรงหรือช่องเหมือง (D) มุมที่วัดจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw: γ) ระยะทางในแนวระนาบ (x) Arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่โพรงหรือช่องเหมือง (B) รูปที่ 2.1 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวของผิวดิน



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงหรือช่องเหมืองและกรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน

การคำนวณองค์ประกอบของการทรุดตัวด้วย Profile function (Singh, 1992)

1) การทรุดตัวสูงสุด:

$$S(x) = \frac{1}{2} S_{\max} [1 - \tanh (cx/B)] \quad (2.1)$$

2) ความชันของผิวดิน:

$$G(x) = S'(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} (c/B) \operatorname{sech}^2 (cx/B) \quad (2.2)$$

3) ค่าส่วนโค้งของผิวดิน:

$$\rho(x) = S''(x) = S_{\max} (c^2/B^2) [\operatorname{sech}^2 (cx/B) \tanh (cx/B)] \quad (2.3)$$

4) การเคลื่อนตัวในแนวนอนของผิวดิน:

$$u(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} (bc/B) \operatorname{sech}^2 (cx/B) \quad (2.4)$$

5) ความเครียดในแนวนอนของผิวดิน:

$$\varepsilon(x) = S_{\max} (bc^2/B^2) [\operatorname{sech}^2 (cx/B) \tanh (cx/B)] \quad (2.5)$$

2.1.2 การคำนวณการทรุดตัวด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

โปรแกรม SALT_SUBSID (Nielan, 1991) ถูกพัฒนาโดยบริษัท RE/SPEC Inc. เพื่อมอบให้กับ Solution Mining Institute สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือโพแทชและถ่านหิน โปรแกรมนี้ยังใช้วิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในเชิงเวลาได้ด้วย ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวกับเวลา ภาพตัดขวางแสดงการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวรวมทั้งเส้นชั้นการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวสามารถใส่ข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรม

ค่าคงที่ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับการคำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β สำหรับเหมืองละลาย และ Y_0 , β และ N สำหรับเหมืองแบบแห้ง โดยตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการทรุดตัวสูงสุดได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการทรุดตัว การทรุดตัวที่ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x,y,t)$ มีสมการดังนี้

$$Z(x,y,t) = Z_u(x,y) \cdot G(t) \quad (2.6)$$

$$G(t) = Y_{ss} \cdot t + Y_0 [1 - \exp(-\beta E^N t)] \quad (2.7)$$

$$G(t) = 1 \text{ ถ้า } Y_{ss} \cdot t + Y_0 [1 - \exp(-\beta E^N t)] > 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ Y_{ss} , Y_0 , β และ N คือตัวแปรแบบจำลอง t คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทำการขุดเจาะ E คืออัตราการสกัดแร่ออกมาได้จากการทำเหมือง (extraction ratio) และ Z_u คือ การเคลื่อนที่ของพื้นผิวสูงสุดที่ตำแหน่งใดๆ โดยเงื่อนไข $G(t) = 1$ จะถูกใช้เมื่อโพรงถูกปิดสนิทแล้ว

2.1.3 ซอฟต์แวร์ PFC2D

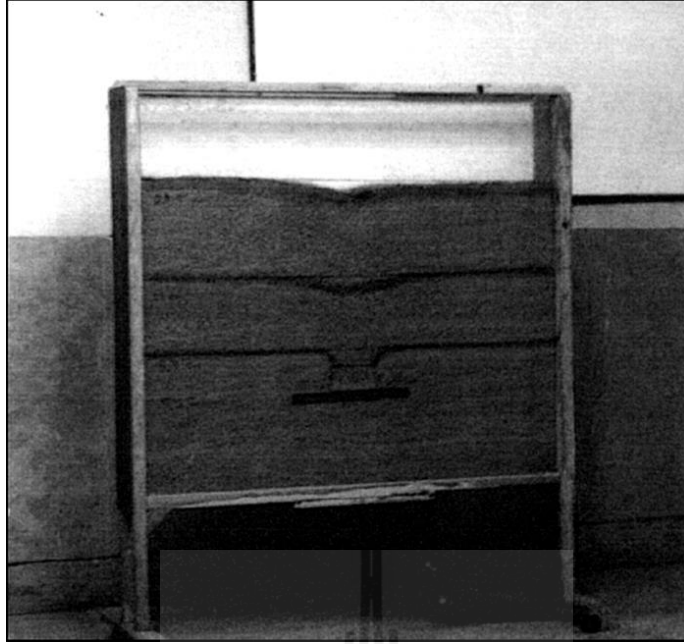
PFC2D (Particle flow code in 2 dimensions) ถูกพัฒนาโดยบริษัท Itasca Consulting Group Inc. (2008) โดยซอฟต์แวร์ PFC2D เป็นการจำลองการเคลื่อนที่และการตอบสนองของอนุภาคทรงกลม โดยวิธีดิสครีตอีลิเมนต์ (Distinct Element Method: DEM) ที่ได้อธิบายไว้โดย Cundall and Strack (1979) ซึ่งการใช้งานแบบดั้งเดิมของวิธีนี้คือจะใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด ตัวแทนของอีลิเมนต์จะประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากที่ถูกนำมาทดสอบในเชิงตัวเลข รูปแบบของอนุภาคจะถูกนำมาใช้เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของอีลิเมนต์ ซึ่งในแต่ละสภาวะอนุภาคจะมีรูปแบบที่เหมือนกันและวิธีการแบบต่อเนื่อง (Continuum method) จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีความซับซ้อน (พฤติกรรมของอนุภาคจะได้มาจากการทดสอบ

แบบจำลองของอนุภาค) ดังนั้น PFC2D จึงถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองปัญหาที่มีความซับซ้อนด้านกลศาสตร์ของแข็ง และการไหลของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

Park et al. (2004) กล่าวว่า การทรุดตัวของพื้นผิวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการพัง และการเสื่อมสภาพของอาคาร โครงสร้างพื้นฐาน เขื่อน เส้นทางสาธารณูปโภคใต้ดิน รวมถึงระบบน้ำใต้ดิน ส่งผลให้เกิดความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง สาเหตุสำคัญของการทรุดตัวคือกิจกรรมการทำเหมืองใต้ดิน ดังนั้นเพื่อลดหรือป้องกันอันตรายจากความเสียหายที่เกิดจากการทรุดตัวของผิวดิน จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจปรากฏการณ์ของการทรุดตัว ซึ่งถือเป็นเรื่องยากที่จะจำลองหรือทำนายกระบวนการทรุดตัว เนื่องจากความซับซ้อนของลักษณะทางกายภาพ เช่น การพังของมวลหิน พฤติกรรมแตกของหิน ขนาดของเม็ดดิน และหินที่มีความแตกต่างกัน และพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา ในบทความนี้ได้แนะนำเทคนิคของการจำลองการทรุดตัวเชิงกายภาพแบบใหม่ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งสามารถสแกนพื้นผิวของวัสดุใดๆ รวมถึงวัสดุที่มีความละเอียด หรือมีความหนืด เป็นการตรวจวัดระยะทางแบบดิจิทัลในแนวตั้งที่มีความแม่นยำและมีความละเอียดสูง ด้วยเทคนิคแบบใหม่นี้ ผลกระทบของรูปร่าง ขนาด ความลึกของโพรง และค่าตัวแปรต่างๆ ของวัสดุจึงสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ด้วยการใช้เทคนิคที่เป็นเอกลักษณ์ และวิธีการวิเคราะห์นี้ทำให้ได้โปรไฟล์ของการทรุดตัว ปัจจัยการทรุดตัว และมุมของการทรุดตัวที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เทคนิคนี้ยังคงถูกใช้อย่างต่อเนื่องในการจำลองการทรุดตัวสำหรับวัสดุต่างๆ ที่มีความแตกต่างกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาดของโพรงใต้ดิน และการทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลา

Asadi et al. (2005) ได้ศึกษาการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดินในพื้นที่ของเหมือง การคาดคะเนการทรุดตัวบนผิวดินในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวและมีความชันมากไม่นิยมเท่ากับการคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นถ่านหินที่อยู่ในแนวระนาบ เนื่องจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวสูงทำได้ยาก ทำให้มีการพัฒนาวิธีการคำนวณหรือการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวมีน้อย โดยได้ทำการสร้างเครื่องจำลองเชิงกายภาพในสองมิติเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินหลังจากการทำเหมือง เพื่อให้ทราบว่าแร่ที่นำออกมาจะส่งผลให้ผิวดินเกิดการทรุดตัวเท่าใดในเหมืองถ่านหิน โดยแบบจำลองทำจากไม้ที่สร้างเป็นโครงเพื่อใช้จำลองชั้นหินในรูปแบบของภาพตัดขวางในแนวตั้ง (รูปที่ 2.2) ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการคำนวณด้วย Profile function แบบใหม่ที่ใช้สำหรับการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัว โดยผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีใหม่นี้จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม



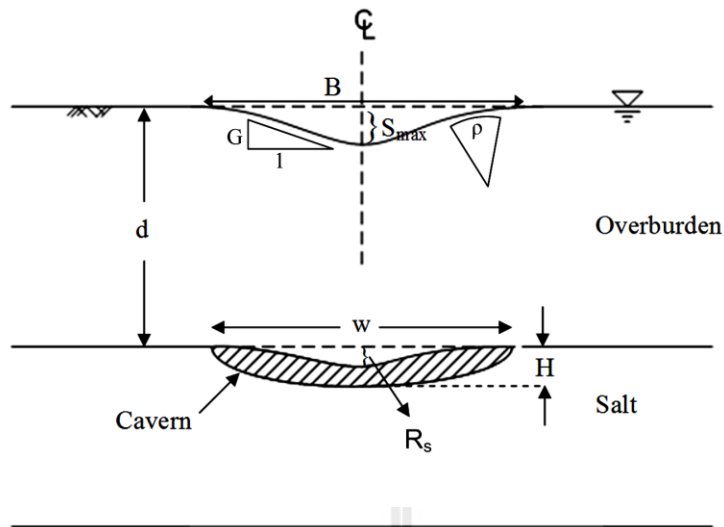
รูปที่ 2.2 โครงจำลองทางกายภาพสำหรับคาดคะเนการทรุดตัวของเสาโดย Asadi et al. (2005)

Ren and Li (2008) ได้ศึกษาขอบเขตของการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งขอบเขตการทรุดตัวจะถูกกำหนดให้มีมุมจำกัด (Limit angles) ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินปิดทับและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำเหมือง รวมไปถึงมุมเอียงของชั้นแร่ด้วย ข้อมูลการสังเกตการณ์จากทั่วโลกและจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขระบุว่า ค่าความแข็ง ค่ากำลังรับแรง และการวิบัติของชั้นหินปิดทับถือว่ามีบทบาทสำคัญต่อลักษณะการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งหากชั้นหินปิดทับมีความแข็งแรงและไม่มีการพังหรือการแตกของหลังคาเหมืองใต้ดิน ค่ามุมของการทรุดตัวมักจะมีแนวโน้มมากขึ้นในหินที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นไป อย่างไรก็ตามถ้าหากหลังคาเหมืองเกิดการทรุดตัว ชั้นหินที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะมีค่ามุมที่น้อยกว่าบริเวณพื้นผิว และชั้นหินที่อ่อนกว่าจะให้ค่ามุมที่มากกว่า เมื่อชั้นหินปิดทับมีความแข็งแรงพอ ก็จะมีความเป็นไปได้ว่าการทรุดตัวที่ต่ำกว่าจุดวิกฤตจะถูกพัฒนามากกว่าช่องเหมืองที่มีความกว้างเกินกว่าจุดวิกฤต ค่ากำลังรับแรงและความแข็งแรงของหินจะมีผลต่อขนาดการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับ โดยทั่วไปการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีความแข็งแรงจะมีค่าน้อยกว่าในชั้นหินปิดทับที่อ่อนกว่า แบบจำลองเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความลาดเอียงของชั้นแร่ที่มีต่อค่ามุมจำกัด กล่าวคือค่ามุมจำกัดของการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นตรงบริเวณที่ชั้นแร่มีการเอียงตัวลง และค่ามุมจะลดลงตรงด้านที่ชั้นแร่มีการเอียงตัวขึ้น ซึ่งค่าของมุมจำกัดนี้สามารถสร้างขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของการทดสอบระหว่างค่ามุมจำกัดและมุมการเอียงของชั้นแร่อาจได้มาจากการใช้เทคนิคของการจำลองเชิงตัวเลข หรือจากข้อมูลการสังเกตการณ์ในบริเวณที่มีการทำเหมือง

Tan Zhi-xiang et al. (2009) ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์ของการทรุดตัว ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของพื้นดิน และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีการทำเหมืองภายใต้สิ่งก่อสร้างของอาคาร แหล่งน้ำ หรือทางรถไฟ ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวที่มีความถูกต้องแม่นยำจึงถือเป็นสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการทรุดตัวของเหมือง โดย Support Vector Machine (SVM) คือวิธีการแบบใหม่ที่อยู่บนพื้นฐานของความรู้เชิงสถิติ ซึ่งเมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมแล้ว SVM สามารถดำเนินการได้ภายใต้เงื่อนไขของตัวอย่างที่มีความบกพร่อง รวมถึงผลของการสังเกตการณ์ที่มีความผิดปกติ โดยสามารถกำจัดสิ่งเหล่านี้ออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมถึงปัจจัยผลกระทบของสัมประสิทธิ์การทรุดตัว เช่น ลักษณะทางกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ ความหนาที่เกิดจากการทับถมของตะกอนแม่น้ำ อัตราส่วนของความลึกต่อความหนาของเหมือง และวิธีการทำเหมือง ข้อมูลจากสถานีสังเกตการณ์หลายแห่งจะถูกใช้เป็นตัวอย่งของการศึกษา รูปแบบความสัมพันธ์เชิงถดถอยของ SVM มีการออกแบบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบ มีการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยผลของการวิจัยเพื่อแสดงให้เห็นว่า รูปแบบความสัมพันธ์ SVM สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งช่วยตอบสนองความต้องการเชิงวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้หลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การคำนวณยังสามารถนำมาพิจารณาได้อย่างครอบคลุมด้วยวิธีการนี้

Shahriar et al. (2009) ได้ศึกษาและคาดคะเนการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดิน ซึ่งการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองที่มีช่องเหมืองต้น 2 ช่อง ในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวสามารถคาดคะเนการทรุดตัวด้วยโปรแกรม Finite difference method (FLAC 3D) การคาดคะเนลักษณะการทรุดตัวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทั้งค่าที่ตรวจวัดจริงและจากการคำนวณด้วย Profile function สำหรับการวิเคราะห์จากค่าตัวแปรต่างๆ สามารถระบุตำแหน่งของการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดิน อัตราส่วนความกว้าง (W) ต่อความลึก (H) ที่จุดวิกฤต (W/H) จะมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 1.4 โดยผลที่ได้จากวิธีการเชิงตัวเลขสามารถอธิบายให้เห็นถึงกลไกการทรุดตัวได้ดีกว่าการคำนวณด้วย Profile function เนื่องจากมีการคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังนั้นผลที่ได้จากวิธีการคำนวณด้วย Profile function จึงยากต่อการคาดเดาจากเหมืองถ่านหินเหมืองหนึ่งไปยังเหมืองถ่านหินอื่น หรือแม้แต่จากช่องเหมืองหนึ่งไปยังอีกช่องเหมืองหนึ่งก็ตาม

Aracheeploha et al. (2009) ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ขึ้นมาโดยใช้สมการควบคุมแบบไฮเปอร์โบลิกในการวิเคราะห์ข้อมูลสำรวจผิวดินเชิงสถิติเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูกละลายบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับ รูปที่ 2.3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งวิธีนี้สามารถกำหนดตำแหน่งของโพรง ค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวดิน



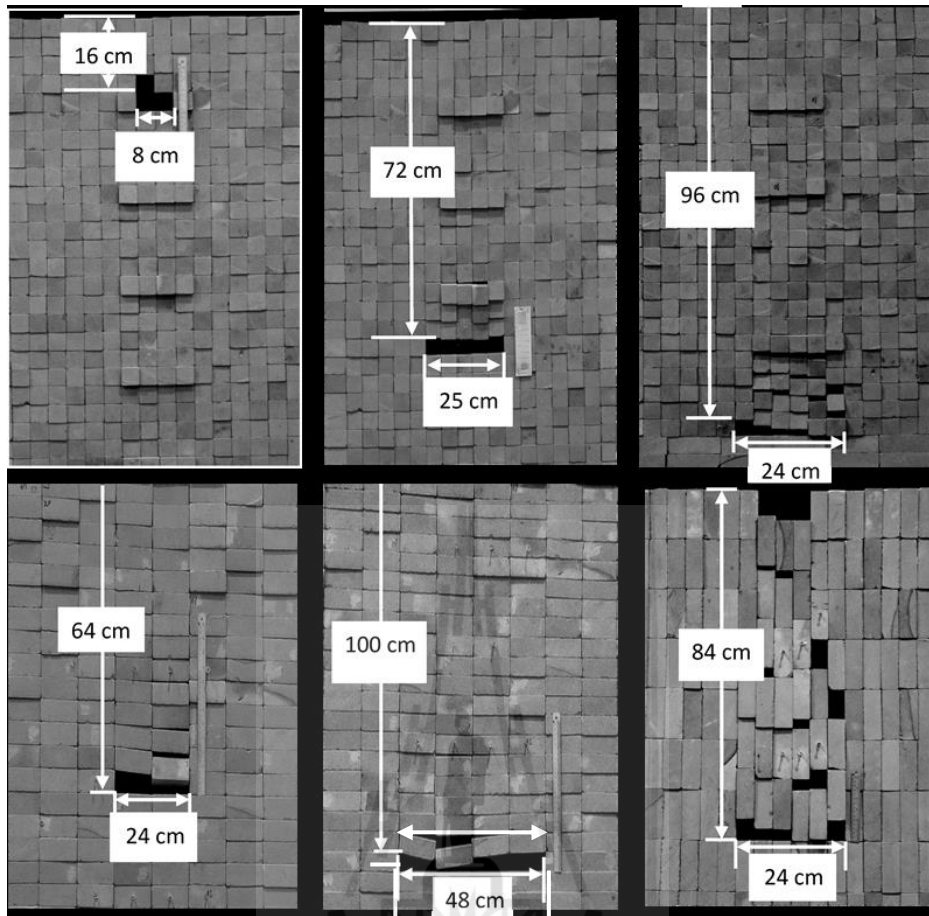
รูปที่ 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูกละลายบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับที่เสนอโดย Aracheeploha et al. (2009)

ค่าความเค้นสูงสุด และค่าความโค้งสูงสุดภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตและที่จุดวิกฤตของการทรุดตัว โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์นี้จะให้ค่าองค์ประกอบการทรุดตัวและลักษณะการทรุดตัวที่สามารถใช้เป็นตัวแทนภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต และที่จุดวิกฤต การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับขนาดและความลึกของโพรง โดยมีการผันแปรความแข็งและความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับเข้ามาพิจารณาด้วย ผลที่ได้คือชุดของสมการความสัมพันธ์ที่เชื่อมระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับคุณลักษณะของโพรงและคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ การศึกษาภายใต้สภาวะที่เกินกว่าจุดวิกฤตได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (โปรแกรม UDEC) เพื่อแสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนของการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับและการเกิดหลุมยุบเป็นผลมาจากความซับซ้อนของการเปลี่ยนรูปร่างของหินหลังจากเกิดการแตกและการเคลื่อนตัวของรอยแตกที่มีอยู่ก่อนในชั้นหินปิดทับ ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับและรูปทรงเรขาคณิตของโพรงจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีคุณสมบัติภายในขอบเขตของงานวิจัยนี้ อาทิ โพรงมีรูปร่างครึ่งรูปไข่ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นหินปิดทับและชั้นเกลือ ชั้นหินอยู่ในแนวระนาบ ผิวดินมีความเรียบสม่ำเสมอ และชั้นหินปิดทับอิมมิดีด้วยน้ำเกลือ ผลจากงานวิจัยอาจไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีที่มีการทรุดตัวเกิดจากลักษณะของชั้นหินและรูปร่างของโพรงที่ต่างไปจากงานวิจัยนี้ วิธีที่เสนอมานี้จะไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ภายใต้สภาวะเกินกว่าจุดวิกฤต ที่ซึ่งพฤติกรรมหลังการพังทลายของชั้น

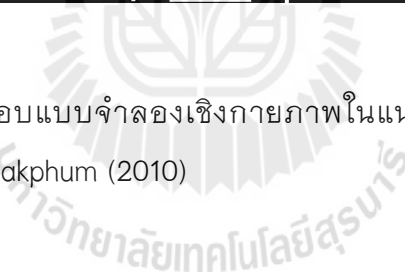
หินปิดทับไม่สามารถคาดคะเนได้และมีความซับซ้อนด้วยระบบของรอยแตกที่มีอยู่ก่อน ดังแสดงให้เห็นจากผลของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อย่างไรก็ตามวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้ในการหารูปร่างของโพรง และองค์ประกอบของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการสูบน้ำเกลือ เพื่อให้สามารถดำเนินการแก้ไขได้ทันเวลาที่และลดผลกระทบที่เกิดจากโพรงใต้ดินก่อนที่จะเกิดการทรุดตัวอย่างรุนแรงหรือเกิดหลุมยุบบนผิวดิน

Wen-Xiu Li et al. (2010) แนะนำวิธีการตรวจวัดความน่าจะเป็นของฟัซซีแบบใหม่ (New Fuzzy Probability Measures: FPM) สำหรับใช้ทำนายการทรุดตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองในชั้นถ่านหินที่มีความลาดเอียง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาในสองมิติได้รับการพัฒนาและนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินตรงบริเวณรอยต่อของถ่านหินที่ลาดเอียง โดยข้อดีของวิธีการแบบใหม่นี้คือ สามารถใช้งานได้ง่ายและผลการคาดคะเนเชิงทฤษฎีสามารถหาได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลข นอกจากนี้วิธีนี้ยังมีความเหมาะสมสำหรับการศึกษาการทรุดตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองในชั้นถ่านหินที่มีความลาดเอียง และเหมืองแบบราบในพื้นที่ที่เป็นภูเขา โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีแบบใหม่นี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีแบบดั้งเดิมในแง่ของความถูกต้องและความมีเสถียรภาพ ซึ่งผลจากการจำลองโดยวิธีการตรวจวัดความน่าจะเป็นของฟัซซีแบบใหม่บ่งชี้ให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม

Fuenkajorn and Phueakphum (2010) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความลึกระยะห่างของรอยแตก (Joint spacing) และระยะที่ไม่มีการค้ำยันสูงสุด (Maximum unsupported span) ของช่องเปิดใต้ดินที่ระดับต้นภายใต้แรงแบบสถิตและแบบไดนามิคด้วยการจำลองรูปแบบทางกายภาพในแนวตั้งแบบสองมิติ ในการทดสอบได้ใช้หินทรายชุดภูพานที่ตัดเป็นรูปทรงลูกบาศก์และทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาจัดเรียงให้มีรอยแตกสองทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (รูปที่ 2.4) แล้วทำการจำลองช่องเปิดแบบเดี่ยวในระดับความลึกต่างๆ ผลการทดสอบระบุว่าระยะที่ไม่มีการค้ำยันสูงสุดต่อระยะห่างของรอยแตกในแนวตั้ง (W/S_V) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับความลึกของช่องเปิดใต้ดินต่อระยะห่างของรอยแตกในแนวระนาบ (D/S_H) และมีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้ขีดจำกัดของแต่ละอัตราส่วนระยะห่างของรอยแตก ($S_V:S_H$ ratio) ซึ่งระยะที่ไม่มีการค้ำยันสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะห่างของรอยแตกลดลง และภายใต้สภาวะที่ระยะห่างของรอยแตกในแนวตั้งเท่ากับในแนวระนาบ ($S_V=S_H$) การเพิ่มมุมรอยแตกจาก 0 องศาถึง 45 องศา จะส่งผลให้ระยะที่ไม่มีการค้ำยันสูงสุดมีค่าลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ การเร่งความเร็ว 0.225 กรัม ที่ความลึกในระดับต้นจะทำให้ระยะที่ไม่มีการค้ำยันสูงสุดลดลงมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามผลกระทบของการให้แรงแบบไดนามิคจะไปลดระดับความลึกของช่องเปิดใต้ดินที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการทดสอบแบบจำลองเชิงกายภาพในแนวตั้งแบบสองมิติที่เสนอโดย Fuenkajorn & Phueakphum (2010)



บทที่ 3

การออกแบบและพัฒนาโครงทดสอบ

3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์

โครงจำลองทางกายภาพเพื่อจำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติสร้างขึ้นโดยใช้หลักการจำลองลักษณะของช่องเหมืองที่เกิดอยู่ใต้ชั้นดิน โดยสังเกตการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากลักษณะของช่องเหมืองใต้ดินที่ได้ทำการจำลองในรูปแบบต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติสามารถจำลองลักษณะการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่อยู่ติดกับชั้นหินที่มีการขุดเจาะ

อุปกรณ์จำลองทางกายภาพที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติสำหรับระบุขอบเขตและรูปแบบการทรุดตัวได้โดยมีข้อด้อยและข้อจำกัดดังนี้

- 1) สามารถจำลองได้เพียงสองมิติ ไม่สามารถจำลองในสามมิติได้
- 2) ไม่สามารถจำลองช่องเหมืองใต้ดินในรูปแบบต่างๆ ได้ อาทิ ความสูง ความกว้าง และความลึกของช่องเหมือง
- 3) ไม่สามารถตรวจวัดการทรุดตัวที่มีผลกระทบจากชั้นตอนและอัตราการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินได้
- 4) ไม่สามารถจำลองเพื่อสังเกตการณ์การทรุดตัวทั้งในแบบตัดขวางและแบบสามมิติพร้อมๆ กันได้

การประดิษฐ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้นด้วยการออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดที่ต่างจากการประดิษฐ์ที่มีอยู่เดิม กล่าวคือ สิ่งประดิษฐ์ใหม่นี้เป็นโครงจำลองทางกายภาพโดยออกแบบให้การจำลองมีลักษณะใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ โดยการออกแบบอุปกรณ์นี้สามารถทำให้ทราบถึงลักษณะการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากค่าความยืดหยุ่นของชั้นหินนั้นๆ ทำให้สามารถทราบขอบเขตการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในอัตราส่วนที่ลดขนาดลงมาจากของจริง โดยการทดสอบอุปกรณ์นี้ มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของผิวดินและชั้นหินปิดทับว่าเป็นเช่นใด

3.2 รูปแบบของโครงจำลอง

โครงจำลองการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ ถูกออกแบบให้สามารถจำลองช่องเหมืองที่เกิดอยู่ใต้ชั้นหินปิดทับในรูปแบบและอัตราการขุดเจาะที่แตกต่างกัน และมีชั้นหินปิดทับที่มีคุณสมบัติต่างกันด้วย ซึ่งจะทำให้ทราบถึงรูปแบบการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินปิดทับนั้นๆ ว่ามีลักษณะและมีขอบเขตการหลุดตัวอย่างไร และมีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนามมากที่สุด อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาแล้วยังสามารถสังเกตการณ์การหลุดตัวของชั้นผิวดินและชั้นหินได้อย่างเป็นชุดๆ สามารถวัดค่าตัวแปรเชิงวิศวกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหลุดตัวได้ สามารถจำลองเพื่อสังเกตการณ์การหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินทั้งในแบบตัดขวาง แบบสองมิติ ทางด้านหน้า และแบบสามมิติพร้อมๆ กันได้ และยังสามารถจำลองชั้นหินที่ปิดทับในช่องเหมืองได้ด้วย ในการออกแบบอุปกรณ์จำลองการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง ชุดตรวจวัดค่าการหลุดตัว ประกอบด้วย คานเหล็ก ใช้สำหรับเป็นรางเลื่อนให้เซ็นเซอร์เคลื่อนที่ไปกลับในแนวระดับได้อย่างอิสระ โดยเซ็นเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจวัดค่าการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหิน สายพานเป็นตัวส่งผ่านแรงไปยังเซ็นเซอร์ สเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนเซ็นเซอร์ใช้ในการเคลื่อนที่ของเซ็นเซอร์ เพื่อทำหน้าที่ถ่ายแรงจากสเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนเซ็นเซอร์ไปยังสายพาน โดยมีชุดสายไฟทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าและเก็บค่าการหลุดตัวจากเซ็นเซอร์ ล้อเลื่อนช่วยในการเคลื่อนที่ไปกลับของคานเหล็ก สเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อเลื่อนทำงานผ่านสายพานเพื่อถ่ายแรงให้กับล้อเลื่อน ส่วนที่สอง คือ ส่วนโครง ประกอบด้วย เหล็กฉากรูปสี่เหลี่ยมหงายมีความหนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นรางให้ชุดตรวจวัดเคลื่อนที่เชื่อมติดกับเหล็กฉากรูปสี่เหลี่ยมคว่ำมีความหนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร ประกอบอยู่ด้านล่าง โดยเหล็กฉากรูปสี่เหลี่ยมคว่ำทำหน้าที่ยึดแผ่นอะคริลิกด้านซ้าย แผ่นอะคริลิกด้านขวา และแผ่นอะคริลิกด้านหลัง ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนาไม่น้อยกว่า 1 เซนติเมตร ทำหน้าที่ป้องกันวัสดุไม่ให้ไหลออกมาจากอุปกรณ์จำลองการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ และยังสามารถมองเห็นทะลุเข้าไปด้านในได้เนื่องจากมีความโปร่งใส ขนาดตั้ง 4 ชั้น หนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ยึดโครงทั้งสี่ด้านและยึดแผ่นอะคริลิกด้านซ้าย แผ่นอะคริลิกด้านขวา และแผ่นอะคริลิกด้านหลัง ฝาหน้าประกอบด้วย โครงเหล็กรูปสี่เหลี่ยม หนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ยึดแผ่นอะคริลิกด้านหน้า โดยด้านในจะมีร่องขนาดเท่ากับความหนาของแผ่นอะคริลิก ฝาหน้าจะทำหน้าที่ป้องกันหิน ทราย และน้ำไม่ให้ไหลออกจากโครงของอุปกรณ์จำลองการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ แล้วยังสามารถสังเกตการณ์การหลุดตัวของชั้นผิวดินและชั้นหินที่เกิดขึ้นแบบสองมิติได้เนื่องจากวัสดุมีความโปร่งใส ด้านนอกมีบานพับ 4 ชั้น ใช้ยึดติดระหว่างโครงเหล็กรูปสี่เหลี่ยมและเหล็กฉากรูปสี่เหลี่ยมหงาย มือจับมีไว้เพื่อตั้งเปิดปิดอุปกรณ์จำลองการหลุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติในช่วงเตรียมการทดสอบและเสร็จสิ้นการทดสอบ ตะปูเกลียว 6

ตัว ใช้สำหรับยึดโครงเหล็กรูปสี่เหลี่ยมกับขาตั้ง ส่วนที่สาม คือ ชุดจำลองโพรง ประกอบด้วย แผ่นไม้หนาเท่ากับควมลึกของโพรงหรือช่องเหมือนที่ต้องการจำลอง โดยพื้นที่หนึ่งในสี่ของ ด้านหน้าแผ่นไม้ถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความสูงเท่ากับควมหนาของแผ่นไม้เพื่อใช้ในการ จำลองช่องเหมือน ด้านล่างของแผ่นไม้มีเหล็กฉากสูงเท่ากับควมหนาของแผ่นไม้จำนวน 4 ชิ้น ยึดติดอยู่กับขาตั้งทางด้านในทั้งสี่มุมทำหน้าที่ค้ำยัน ด้านล่างของแผ่นไม้ที่ถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม จตุรัสแต่ละอันจะมีตลับลูกปืนยึดระหว่างแผ่นไม้กับแท่งเหล็ก ซึ่งมีความยาวไม่น้อยกว่าสองเท่า ของควมหนาของแผ่นไม้ ส่วนกลางของแท่งเหล็กมีขนาดใหญ่กว่าส่วนบนของแท่งเหล็กเล็กน้อย โดยในส่วนนี้ได้ถูกทำเกลียวเพื่อใช้เป็นตัวไขแผ่นไม้ที่ถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้เลื่อนลงมาด้านล่าง เพื่อจำลองการเจาะช่องเหมือน ซึ่งส่วนนี้จะถูกยึดติดอยู่กับฐานเหล็กเจาะรูที่อยู่ทางด้านล่าง ฐาน เหล็กเจาะรูมีเกลียวขนาดเท่ากับแท่งเหล็ก โดยมีแท่งเหล็กเจาะรูเป็นตัวยึดด้านซ้ายและ ด้านขวาของส่วนโครง ส่วนล่างของแท่งเหล็กเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยื่นออกมาเพื่อยึดติดกับหัวไขที่มีรู รูปสี่เหลี่ยมขนาดเท่ากับปลายของส่วนล่างของแท่งเหล็ก เพื่อใช้ในการปรับระดับขึ้นลงของแท่ง เหล็กสำหรับการจำลองรูปแบบของช่องเหมือน

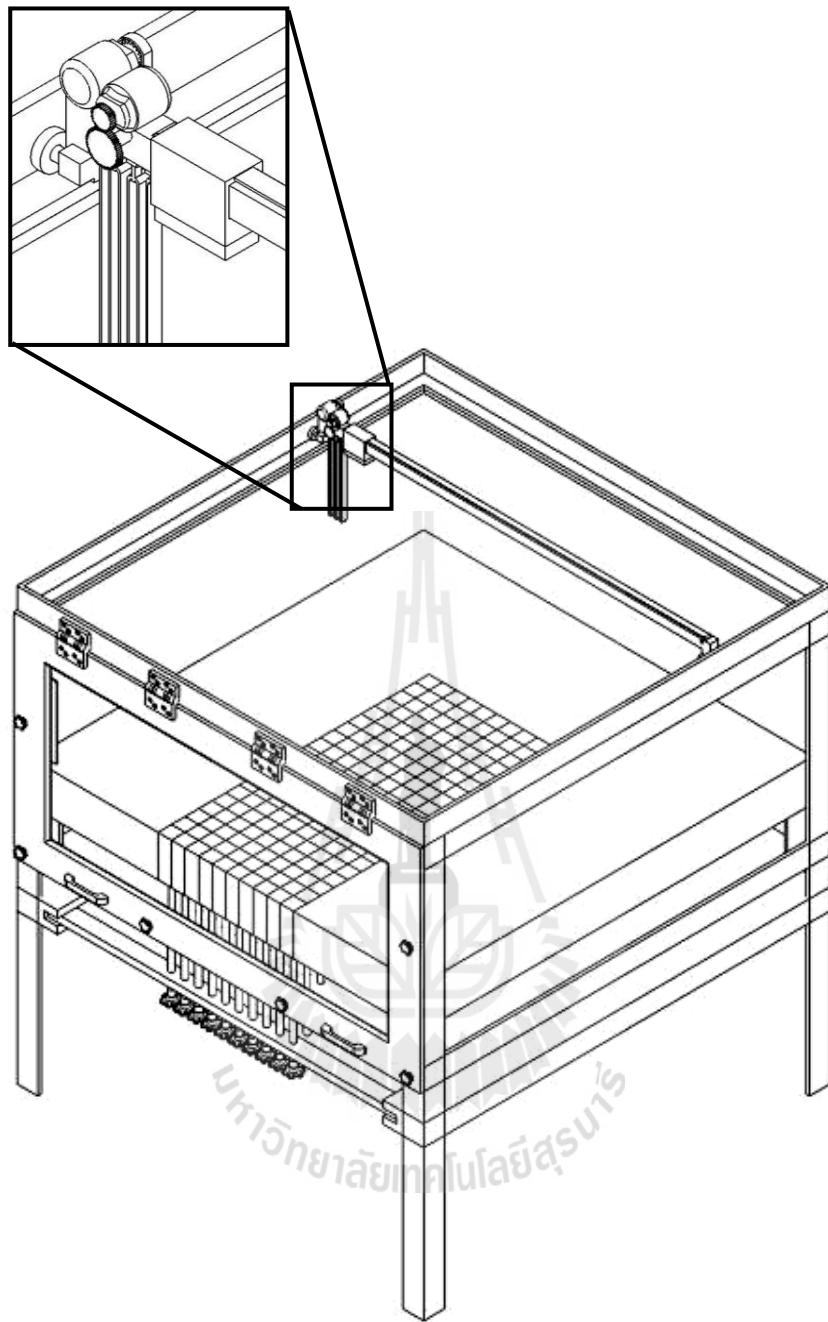
รูปที่ 3.1 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้น หินในสามมิติที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว ซึ่งแสดงองค์ประกอบและตำแหน่งของสามส่วน หลัก คือ ส่วนที่หนึ่ง ชุดตรวจวัดค่าการทรุดตัว ส่วนที่สอง ส่วนโครง และส่วนที่สาม ชุดจำลอง โพรง

รูปที่ 3.2 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟแบบแยกส่วนของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของ ผิวดินและชั้นหินในสามมิติ ตามการประดิษฐ์นี้ประกอบด้วยสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง ชุดตรวจวัด ค่าการทรุดตัว ส่วนที่สอง คือ ส่วนโครง และส่วนที่สาม คือชุดจำลองโพรง

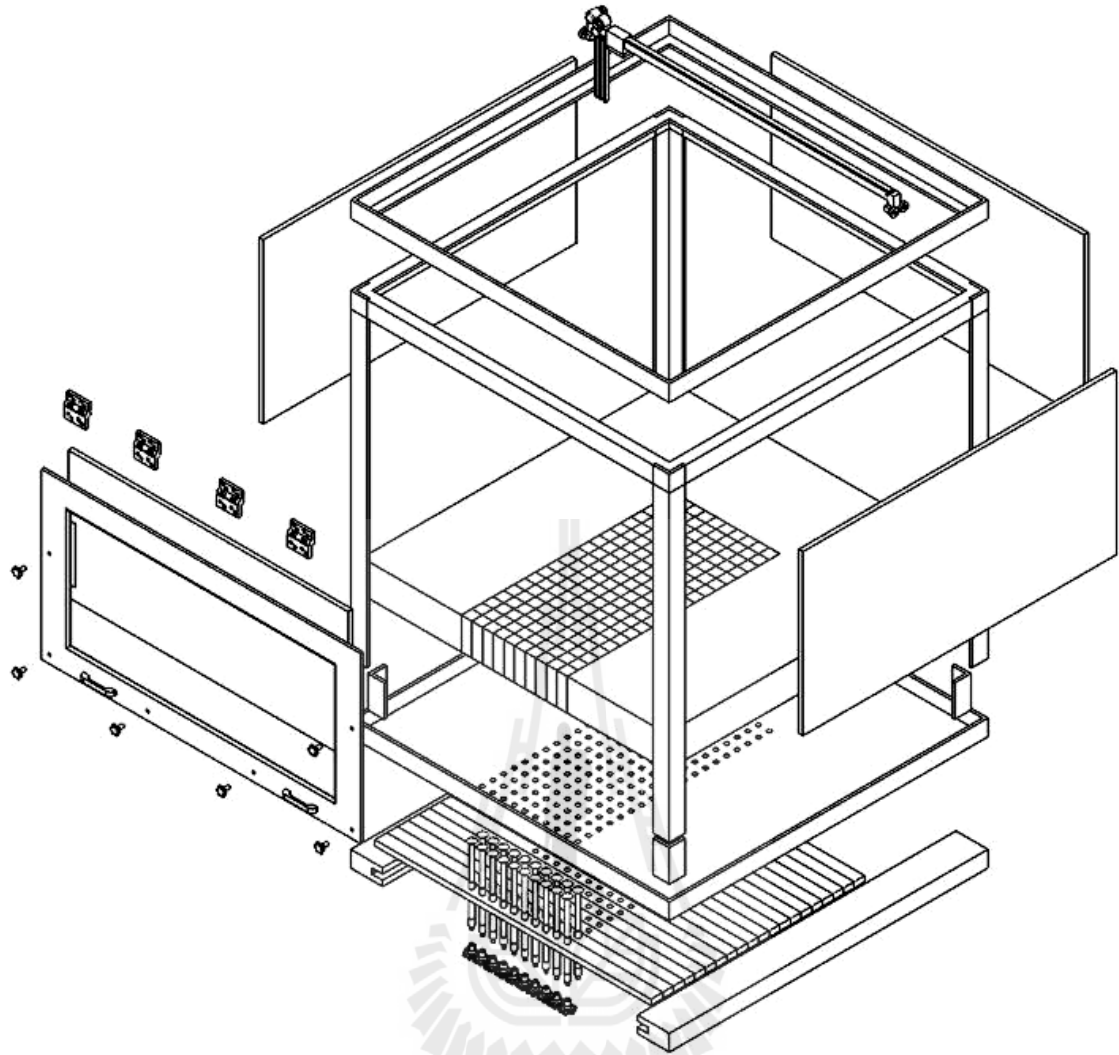
รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและ ชั้นหินในสามมิติที่แสดงองค์ประกอบและตำแหน่งของสามส่วนหลัก คือ ส่วนที่หนึ่ง ชุดตรวจวัด ค่าการทรุดตัว ส่วนที่สอง คือ ส่วนโครง และส่วนที่สาม คือชุดจำลองโพรง

รูปที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและ ชั้นหินในสามมิติ ซึ่งทำให้เห็นส่วนประกอบของส่วนที่สองและส่วนที่สามชัดเจนขึ้น ดังนี้ ส่วนที่ สอง คือ ส่วนโครง และส่วนที่สาม คือ ชุดจำลองโพรง

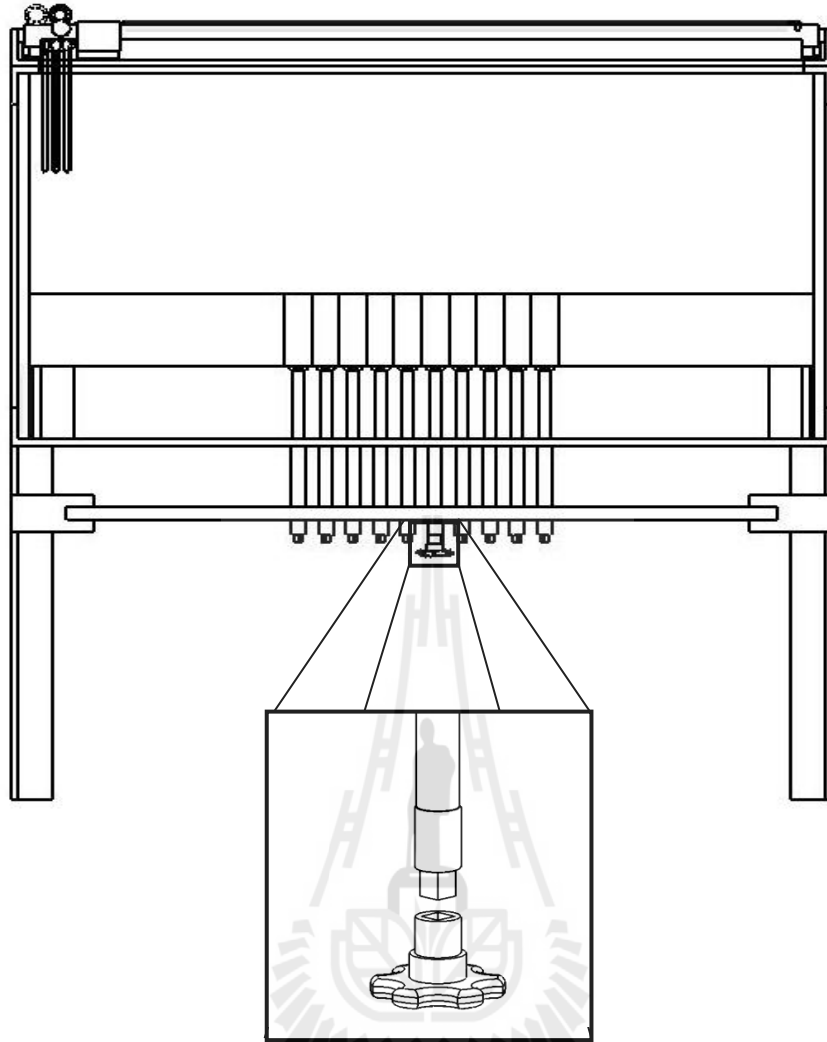
รูปที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางด้านบนของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและ ชั้นหินในสามมิติที่แสดงตำแหน่งส่วนที่สอง คือ ส่วนโครง และส่วนที่สาม คือ ชุดจำลองโพรง ประกอบด้วย แผ่นไม้ โดยพื้นที่หนึ่งในสี่ของด้านหน้าแผ่นไม้จะถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี ความสูงเท่ากับควมหนาของแผ่นไม้เพื่อใช้ในการจำลองโพรงหรือช่องเหมือน โดยรายละเอียด ของตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆ จากภาพตัดขวางทางด้านบนที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว



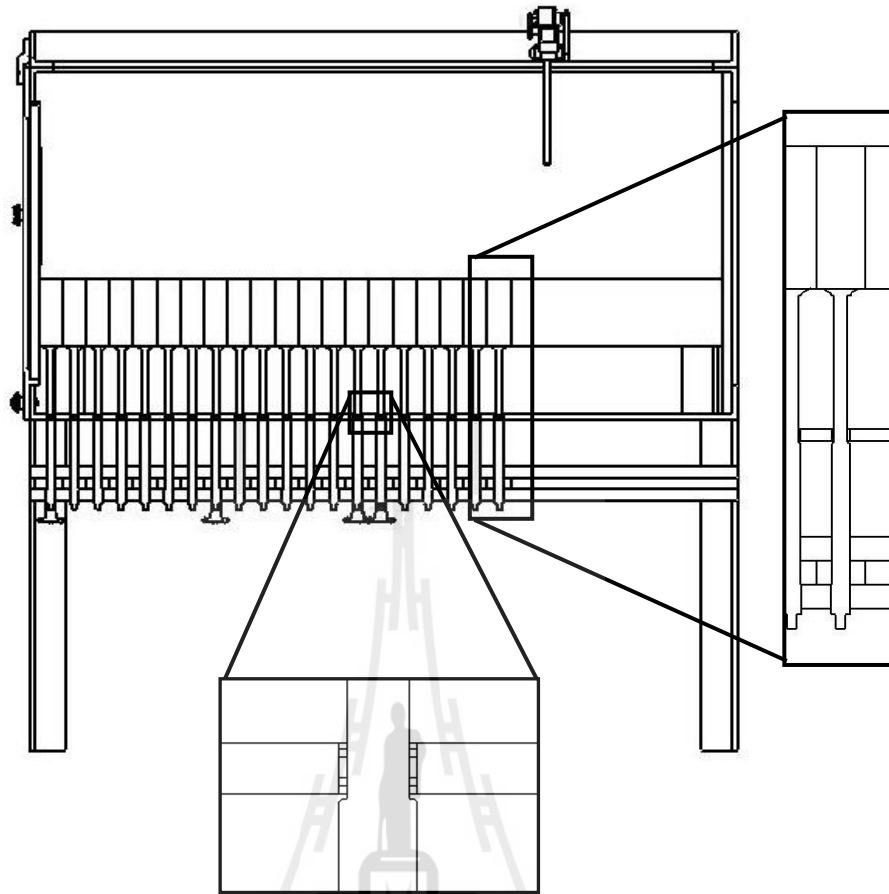
รูปที่ 3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว



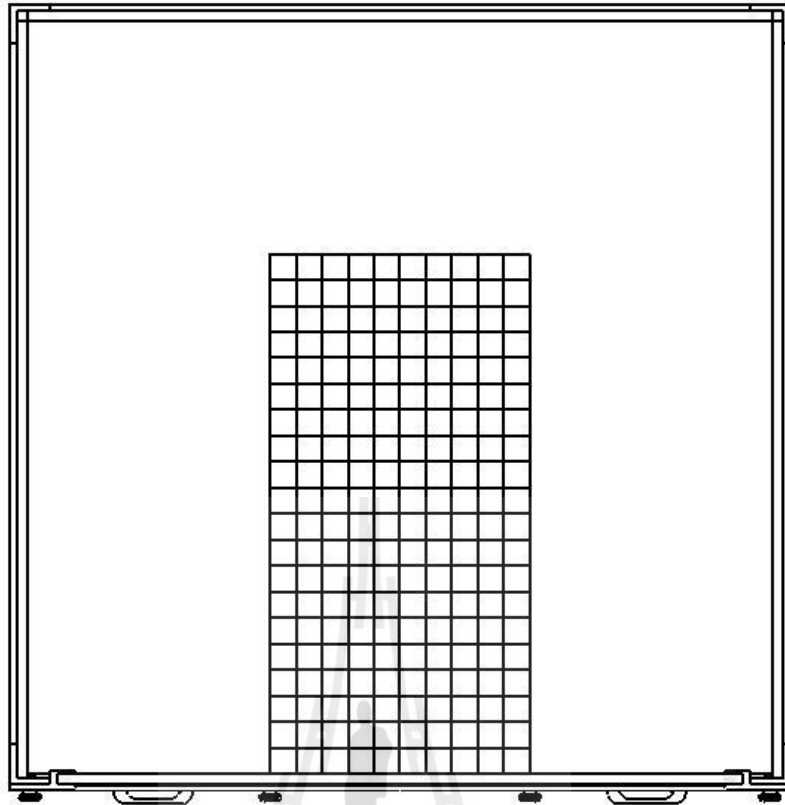
รูปที่ 3.2 ภาพเพอร์สเปคทีฟแบบแยกส่วนของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหิน
ในสามมิติ



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางด้านข้างของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ
ซึ่งทำให้เห็นส่วนประกอบของส่วนโครงและส่วนชุดจำลองโพรงชัดเจนขึ้น

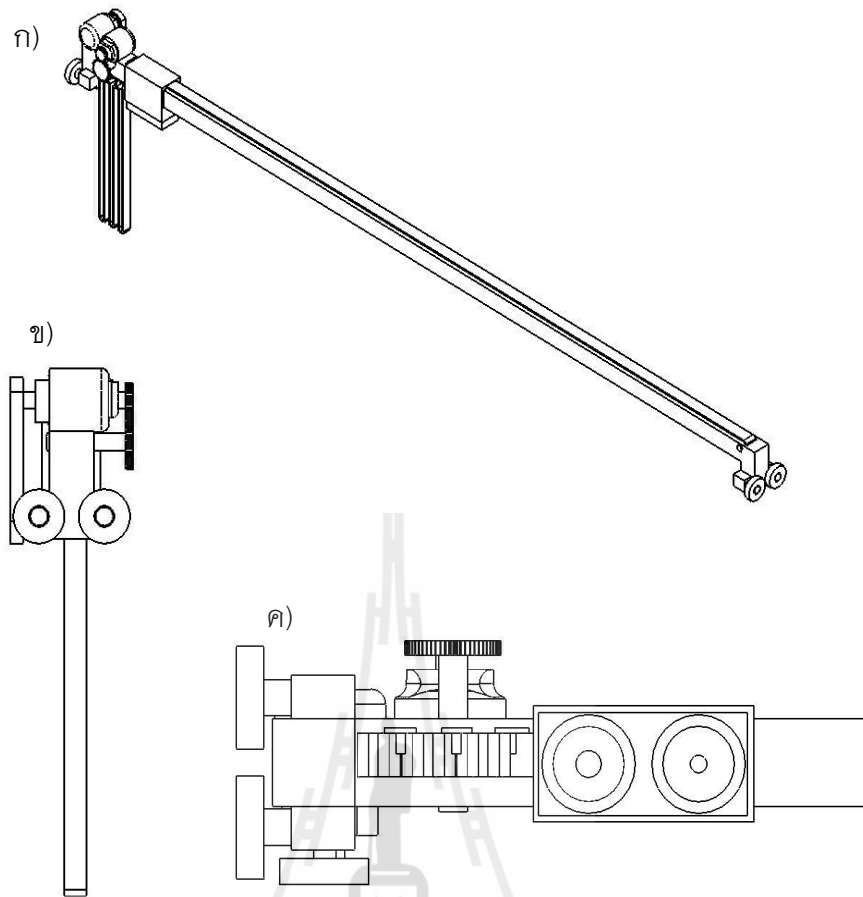


รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางด้านบนของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติที่แสดงตำแหน่งส่วนโครงและส่วนชุดจำลองโพรง

รูปที่ 3.6 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟของส่วนที่หนึ่ง คือ ชุดตรวจวัดการทรุดตัวของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินในสามมิติ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย คือ (ก) ชุดตรวจวัดการทรุดตัว (ข) ภาพตัดขวางด้านข้างของชุดตรวจวัดการทรุดตัว และ (ค) ภาพตัดขวางด้านล่างของชุดตรวจวัดการทรุดตัว

สิ่งประดิษฐ์นี้สามารถจำลองทางกายภาพในสามมิติเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการณ์การทรุดตัวของชั้นผิวดินจากตัวแปรต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับสภาวะความเป็นจริง และยังสามารถแก้ไขข้อบกพร่องของการทดสอบแบบเก่าได้ดังนี้

- 1) สามารถทำการจำลองในสามมิติได้อย่างแท้จริง อีกทั้งยังสอดคล้องกับความ เป็นจริงมาก
- 2) สามารถจำลองโพรงที่เกิดอยู่ใต้ชั้นดินในลักษณะต่างๆ อาทิ ความสูง ความ กว้าง และความลึกของช่องเหมืองได้
- 3) สามารถตรวจวัดการทรุดตัวที่มีผลกระทบจากชั้นตอนและอัตราการขุดเจาะ ช่องเหมืองใต้ดิน และสามารถวัดค่าตัวแปรเชิงวิศวกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การทรุดตัวได้
- 4) สามารถจำลองเพื่อสังเกตการณ์การทรุดตัวทั้งในแบบตัดขวางสองมิติทาง ด้านหน้าและสามมิติพร้อมๆ กันได้



รูปที่ 3.6 ภาพเพอร์สเปคทีฟของส่วนชุดตรวจวัดการทรุดตัวของอุปกรณ์จำลองการทรุดตัวของ
ผิวดินและชั้นหินในสามมิติที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว

บทที่ 4

การจัดเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ

4.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เป็นผลจากการทำเหมืองใต้ดินด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้ใช้วัสดุจำลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีการจัดเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุดังกล่าว

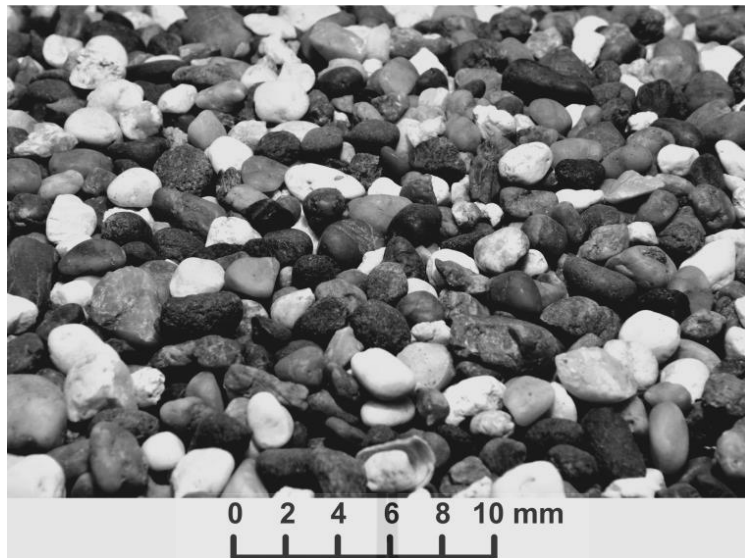
4.2 การจัดเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ

การทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับภายใต้สภาวะความกว้างของช่องเหมืองที่เกินกว่าจุดวิกฤตได้ใช้กรวดคละขนาดเป็นวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ โดยกรวดที่ใช้ทดสอบคัดเลือกมาจากแม่น้ำโขงจังหวัดอุบลราชธานี เพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของกรวดคละขนาดสำหรับนำไปใช้เป็นค่าพารามิเตอร์ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions) โดยนำกรวดมาทำการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดิน (Grain size analysis) แล้วทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear test)

4.2.1 การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดกรวด

เนื่องจากกรวดที่นำมาทดสอบมีขนาดของเม็ดค่อนข้างหยาบ (รูปที่ 4.1) จึงใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM D-422 เพื่อหาขนาดและการกระจายส่วนคละของเม็ดดิน โดยใช้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันออกไป สำหรับเบอร์ตะแกรงที่ใช้คือขนาด 1/2, 3/8, 1/4 นิ้ว เบอร์ 4, 8, 10, 16, 18, 40 และ 60 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่บนและไล่ตามลำดับลงมา (รูปที่ 4.2) เม็ดกรวดที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะหล่นลงมาในชั้นต่อไป ส่วนที่เม็ดใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะค้างอยู่บนตะแกรง แต่ก็ไม่แน่เสมอไปเพราะว่าตะแกรงนั้นไม่สามารถแบ่งแยกความแบน ความยาวได้ บางครั้งเม็ดเล็กแต่มีความยาวกว่าขนาดของตะแกรงก็สามารถค้างอยู่บนตะแกรงนั้นได้

การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาร่อนผ่านตะแกรง ทำได้ด้วยการนำเม็ดกรวดมาล้างทำความสะอาด จากนั้นตากแดดให้แห้ง นำตัวอย่างมาคลุกเคล้าให้เข้ากันบนพื้นเรียบแล้วเกลี่ยตัวอย่างให้กระจาย ใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่างโดยนำกรวด 2 ใน 4 ส่วนมาทำการวิเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการสุ่มเลือกตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของทั้งหมด สำหรับปริมาณของตัวอย่างที่ทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 1000 กรัม หลังจากนำตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรงแล้ว นำผลที่ได้มาคำนวณดังนี้



รูปที่ 4.1 กรวดคละขนาดที่นำมาจำลองเป็นชั้นหินปิดทับ



รูปที่ 4.2 ตะแกรงร่อนสำหรับการทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน

สมการคำนวณน้ำหนักของดินที่ค้างบนตะแกรง (Weight of soil retained)

$$\text{Weight of soil retained} = (\text{Wt. sieve} + \text{Soil}) - (\text{Wt. sieve}) \quad (4.1)$$

สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง (Percent retained)

$$\text{Percent retained} = (\text{Wt. soil retained} / \text{Wt. of sample}) \times 100 \quad (4.2)$$

สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์ค้างสะสม (Cumulative percent retained)

$$\text{Cumulative percent retained} = \text{นำ Percent retained มาบวกแบบสะสม} \quad (4.3)$$

สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรง (Percent finer or percent passing)

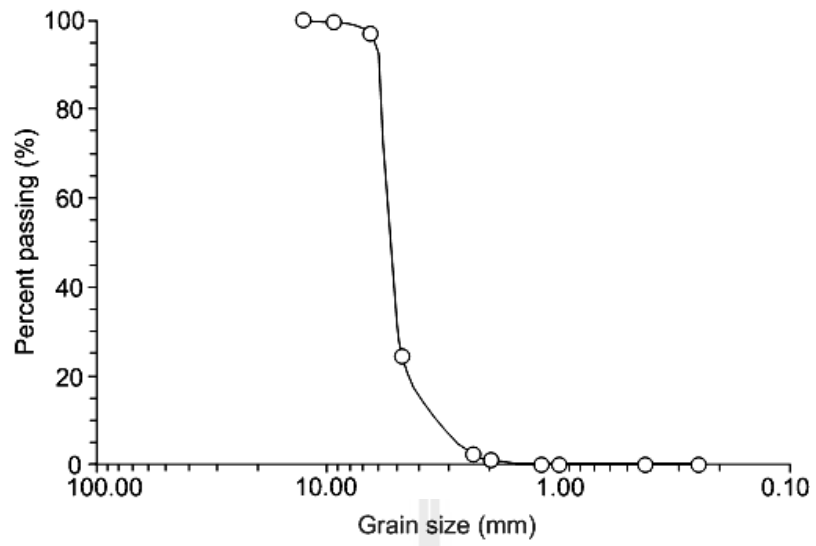
$$\text{Percent finer} = 100 - \text{Cumulative percent retained} \quad (4.4)$$

จากการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงและขนาดของเม็ดดิน (ในหน่วยมิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่ากรวดที่นำมาทดสอบมีขนาดเฉลี่ยตั้งแต่ 2.0–9.5 มิลลิเมตร จากการจำแนกโดยระบบ Unified soil classification พบว่าตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นดินจำพวก GW (Well-graded gravel) คือ เป็นกรวดเม็ดหยาบที่มีเม็ดคละหลายขนาด

4.2.2 การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง

การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าคงที่ของแรงเฉือนได้แก่ ค่าความเค้นยึดติดและมุมของความเสียดทานของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ โดยใช้เครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D-3080 เนื้อหาในส่วนนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอน วิธีการปฏิบัติ และผลการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง

การติดตั้งตัวอย่างเม็ดกรวดเพื่อทดสอบกำลังเฉือนเริ่มจากการประกอบชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือน (Direct shear device, SBEL DR44) โดยวางเข้าทดสอบ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 นิ้ว) สำหรับใส่เม็ดกรวดทั้งสองส่วนล่างและบนให้ตรงกัน จากนั้นใส่เม็ดกรวดคละขนาดที่ผ่านการล้างทำความสะอาดและตากจนแห้งแล้วลงในเข้าทดสอบจนเกือบเต็มดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยเหลือระยะขอบบนไว้ประมาณ 1 นิ้ว ซึ่งเท่ากับความหนาของแผ่นเหล็กกลมสำหรับปิดทับด้านบน ใส่คานเหล็กกดด้านบนเพื่อส่งแรงในแนวตั้งจากกับระนาบการเฉือน และใส่แรงคานเหล็กด้านข้างเพื่อส่งแรงเฉือนในแนวขนานกับแนวระนาบการเฉือน จากนั้นทำการติดตั้งมาตรวัดระยะการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทั้งในแนวตั้งจากและแนวขนานกับระนาบการเฉือน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงและขนาดของเม็ดดิน



รูปที่ 4.4 เครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct shear device)



รูปที่ 4.5 เบ้าทดสอบกำลังรับแรงเฉือนส่วนบนและส่วนล่างก่อนใส่เม็ดกรวด (รูปบน) และหลังใส่เม็ดกรวด (รูปล่าง) ลงในเบ้าทดสอบโดยเหลือระยะขอบบนไว้ประมาณ 1 นิ้ว

หลังจากประกอบชุดคานเหล็กส่งแรงและมาตรวัดระยะเสร็จแล้ว จึงกดตัวอย่างด้วยคานเหล็กด้านบนเพื่อให้ความเค้นตั้งฉากกับระนาบการเฉือนด้วยปั๊มไฮดรอลิกตามขนาดแรงกดที่กำหนดไว้ โดยการทดสอบนี้จะมีการผันแปรความเค้นตั้งฉากจาก 0.08, 0.16, 0.24 ถึง 0.32 MPa เมื่อตัวอย่างเม็ดกรวดอยู่ภายใต้ความเค้นตั้งฉากจึงทำการให้แรงเฉือนกับตัวอย่างด้วยปั๊มไฮดรอลิกโดยการใส่แรงเฉือนไปอย่างต่อเนื่อง (อัตราการให้แรงเฉือนเท่ากับ 0.02 MPa/s) จนระยะการเคลื่อนตัวในแนวขนานกับระนาบการเฉือนเคลื่อนที่ไปด้านหน้าเท่ากับ 8 มิลลิเมตร

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการอ่านและบันทึกค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่าง ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าความเค้นยึดติด (c) และมุมของความเสียดทาน (ϕ) ของตัวอย่างหินได้จากสมการตามกฎของคูลอมบ์ (Jaeger et al., 2007) คือ

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (4.5)$$

โดยที่ τ คือความเค้นในแนวเฉือน c คือความเค้นยึดติดของตัวอย่างเม็ดกรวด σ_n คือความเค้นในแนวตั้งฉาก และ ϕ คือมุมของความเสียดทาน รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน (d_s) โดยผันแปรตามค่าความเค้นตั้งฉาก รูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังรับแรงเฉือนคงเหลือที่ผันแปรตามค่าความเค้นตั้งฉาก สำหรับค่าความเค้นยึดติดและมุมของความเสียดทานของกรวดคละขนาดแสดงในตารางที่ 4.2

ค่าความแข็งตึงในแนวเฉือน (Shear stiffness, K_s) จะคำนวณที่ 50% ของค่าความเค้นเฉือนสูงสุดดังสมการ (Indraratna and Ranjith, 2001)

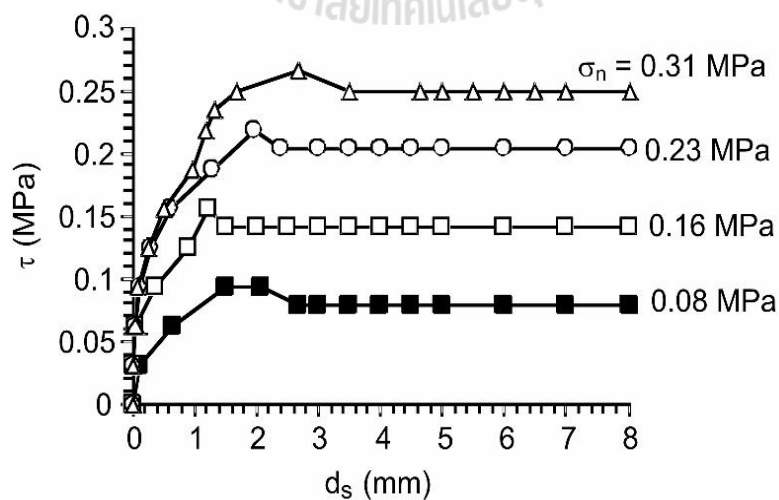
$$K_s = \tau_s / \delta_s$$

โดยที่ τ_s คือความเค้นในแนวเฉือนและ δ_s คือการเคลื่อนตัวในแนวเฉือน

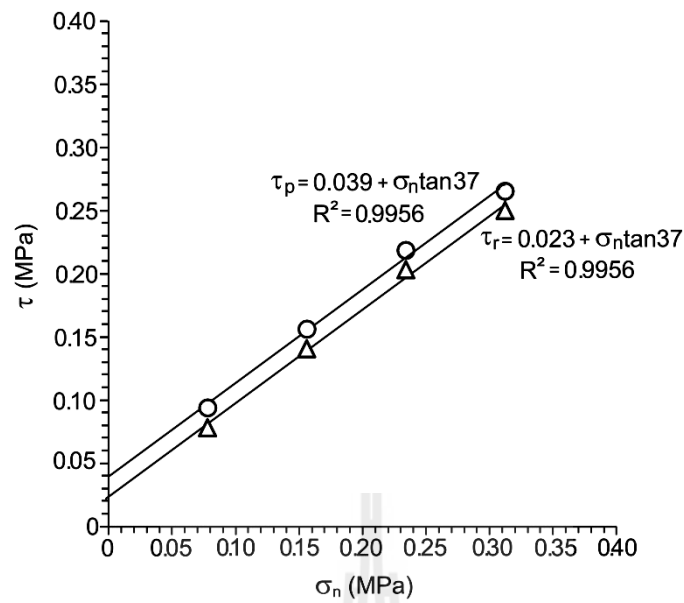
สำหรับค่าความแข็งตึงในแนวตั้งฉาก (Shear stiffness, K_n) คำนวณได้จากสมการ

$$K_n = \sigma_n / \delta_n$$

โดยที่ σ_n คือความเค้นในแนวตั้งฉากและ δ_n คือการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก รูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งตึงในแนวเฉือนและในแนวตั้งฉากของเม็ดกรวด ซึ่งค่าที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองการทรุดตัวของผิวดินทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.6 ความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนโดยผันแปรตามค่าความเค้นตั้งฉาก



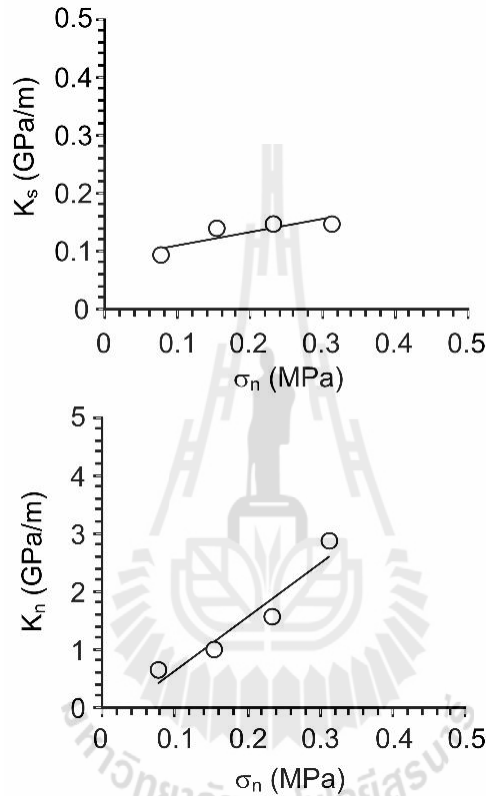
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังรับแรงเฉือนคงเหลือ แสดงในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและค่ากำลังรับแรงเฉือนคงเหลือที่ผันแปรตามค่าความเค้นตั้งฉาก

σ_n (MPa)	Shear stress	
	τ_{peak} (MPa)	$\tau_{residual}$ (MPa)
0.08	0.09	0.08
0.16	0.16	0.14
0.23	0.22	0.20
0.31	0.27	0.25

ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นยึดติด (c) และมุมของความเสียดทาน (ϕ) ของกรวดคละขนาด

Shear stress	c (MPa)	ϕ (Degrees)	R^2
τ_{peak} (MPa)	0.039	37	0.99
τ_{residual} (MPa)	0.023	37	0.99



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการหาค่าความแข็งตั้งในแนวเฉือนและแนวตั้งฉากในฟังก์ชันของความเค้นตั้งฉาก

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งตั้งในแนวเฉือนและในแนวตั้งฉากของกรวดคละขนาด

σ_n (MPa)	K_s (GPa/m)	K_n (GPa/m)
0.08	0.09	0.65
0.16	0.13	0.98
0.23	0.14	1.56
0.31	0.15	2.83
Average	0.13 ± 0.03	1.51 ± 0.96

บทที่ 5

การทดสอบ

5.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เป็นผลจากการทำเหมืองใต้ดินด้วยแบบจำลองทางกายภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการทรุดตัวของบ่อนผิวดินซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสถานะจริงในภาคสนาม เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายวิธีและผลการจำลองการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับภายใต้สภาวะต่างๆ ประกอบด้วย การผันแปรระดับความลึก ความสูง ความกว้าง และความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน

5.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เป็นผลจากการทำเหมืองใต้ดินด้วยแบบจำลองทางกายภาพมีรูปแบบการทดสอบ 4 รูปแบบ ได้แก่

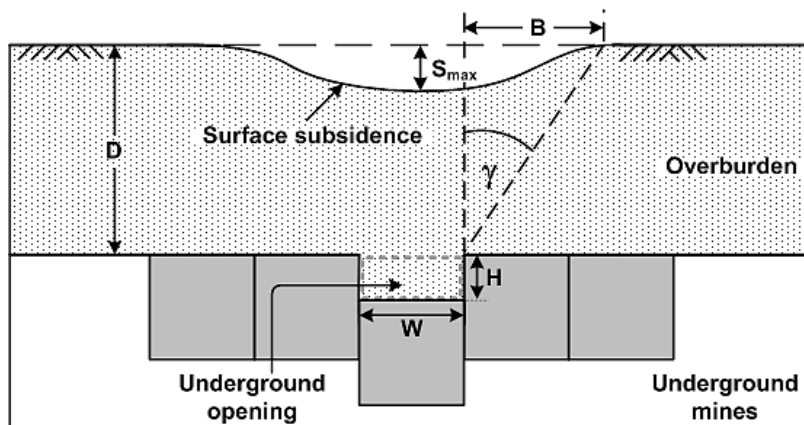
1) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของบ่อนผิวดินที่เกิดจากผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินที่แตกต่างกัน โดยผันแปรความลึกของช่องเหมืองใต้ดินหลายระดับ คือ 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 เซนติเมตร กำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

2) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของบ่อนผิวดินที่เกิดจากผลกระทบด้านระดับความสูงของช่องเหมืองใต้ดินที่แตกต่างกัน โดยผันแปรระดับความสูงของช่องเหมืองใต้ดินตั้งแต่ 1 ถึง 5 เซนติเมตร (ปรับระดับความสูงทีละ 1 เซนติเมตร) กำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

3) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของบ่อนผิวดินที่เกิดจากผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินที่แตกต่างกัน โดยผันแปรความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินตั้งแต่ 5 ถึง 25 เซนติเมตร (เพิ่มความกว้างทีละ 5 เซนติเมตร) กำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

4) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของบ่อนผิวดินที่เกิดจากผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินที่แตกต่างกัน โดยผันแปรความยาวของช่องเหมืองใต้ดินตั้งแต่ 5 ถึง 25 เซนติเมตร (เพิ่มความยาวทีละ 5 เซนติเมตร) กำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

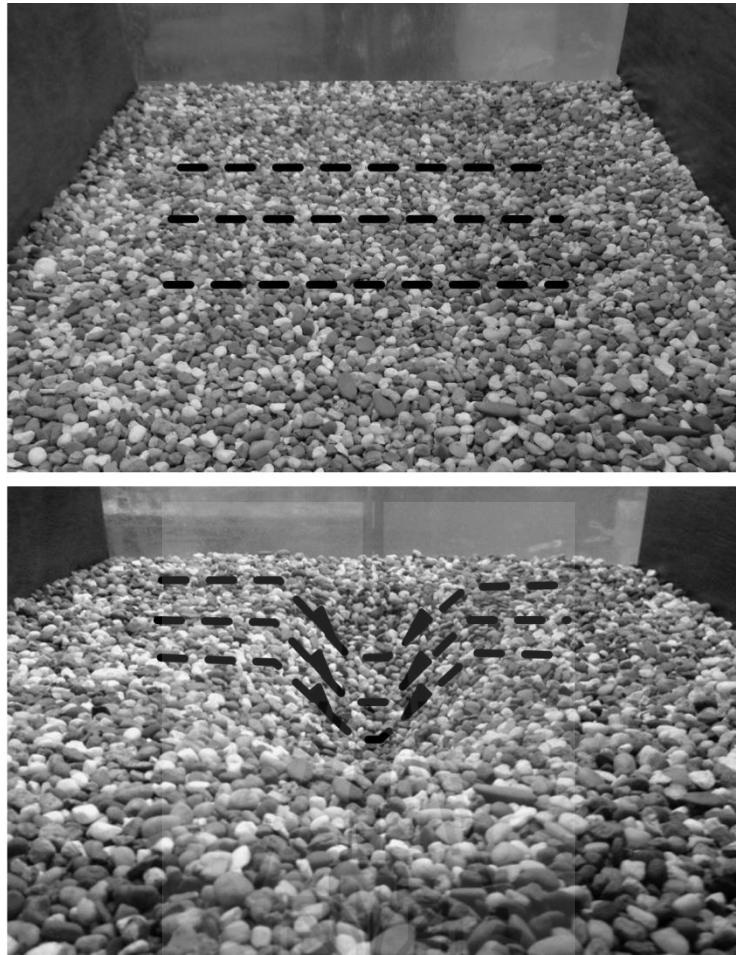
รูปที่ 5.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่ D คือความลึกของช่องเหมืองใต้ดินจากระดับผิวดิน (ความหนาของชั้นหินปิดทับ) W คือความกว้างช่องเหมืองใต้ดิน H คือความสูงช่องเหมืองใต้ดิน L คือความยาวช่องเหมืองใต้ดิน γ คือมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (โดยที่ $B = D \cdot \tan \gamma$) และ S_{max} คือระดับการทรุดตัวสูงสุด



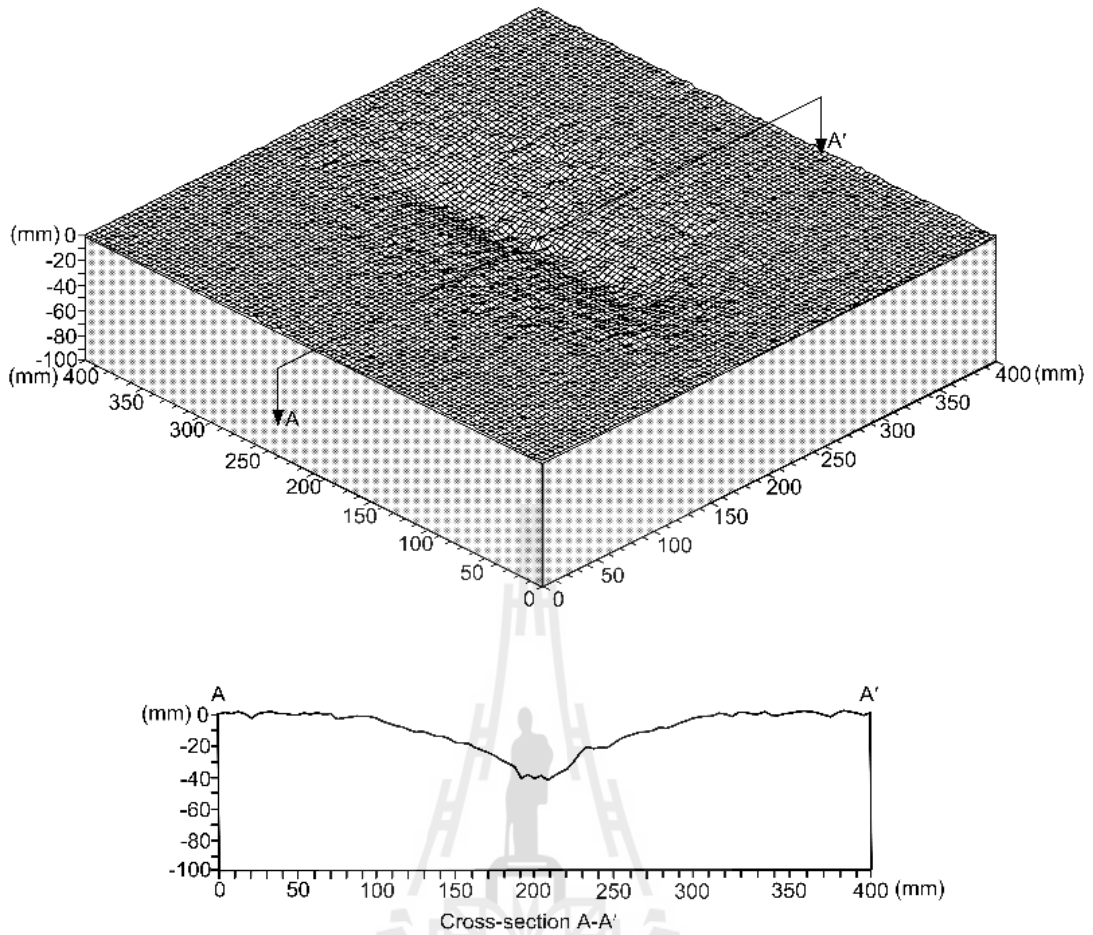
รูปที่ 5.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบโดยมีการผันแปรความกว้าง ความสูง ความยาว และความลึกของช่องเหมือง

ในแต่ละการทดสอบจะทำการสแกนพื้นผิวของชั้นหินปิดทับทั้งก่อนและหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน โดยใช้เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ความละเอียด 20 ไมครอน ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดระดับความสูงต่ำของพื้นผิวได้อย่างละเอียดและแม่นยำ รูปที่ 5.2 แสดงพื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนและหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน จากนั้นนำผลการสแกนพื้นผิวดังกล่าวมาทำการประเมินค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการทรุดตัวสูงสุดสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบขององค์ประกอบของช่องเหมืองใต้ดิน (ความลึก ความกว้าง ความยาว และความสูงช่องเหมืองใต้ดิน) และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับต่อขอบเขตของการทรุดตัว โดยตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประเมินค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการทรุดตัวสูงสุดคือ ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องเหมืองใต้ดินดังแสดงในรูปที่ 5.3

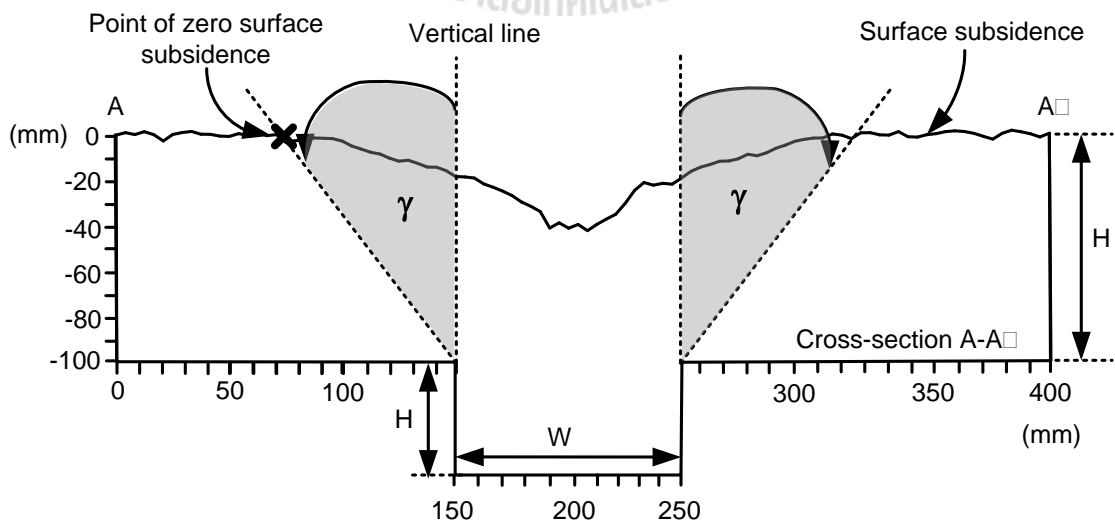
วิธีการประเมินมุมการไหลของชั้นหินปิดทับซึ่งเป็นมุมที่แสดงทิศทางการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับทำได้โดยการวัดค่ามุมจากเส้นในแนวตั้งที่ตำแหน่งขอบของช่องเหมืองจนถึงตำแหน่งขอบเขตสุดท้ายของการทรุดตัว (จุดที่ไม่เกิดการทรุดตัวของผิวดิน) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 มุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเป็นตัวกำหนดอาณาเขตบนผิวดินที่มีผลกระทบจากการทำเหมืองหรือการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน โดยทั่วไปแล้วค่ามุมนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของมวลหิน ระดับน้ำบาดาล และความเค้นในที่ สำหรับค่าการทรุดตัวสูงสุดคือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของช่องเหมืองใต้ดินโดยวัดหลังจากการจำลองช่องเหมืองแล้ว ซึ่งจะวัดจากระดับพื้นผิวเดิมในแนวตั้งจนถึงจุดที่มีความลึกมากที่สุดที่เกิดการทรุดตัว



รูปที่ 5.2 พื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อน (บน) และหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน (ล่าง)



รูปที่ 5.3 ภาพสแกนของพื้นผิวที่เกิดการทรุดตัว (บน) และภาพตัดขวางในสองมิติ (ล่าง) โดยที่ A-A' เป็นตำแหน่งที่ใช้ประเมินค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ และค่าการทรุดตัวสูงสุด



รูปที่ 5.4 การวัดมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ

5.3 ขั้นตอนการทดสอบ

วิธีการทดสอบของแต่ละรูปแบบดังกล่าวข้างต้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.3.1 รูปแบบการทดสอบที่ 1 การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของดินที่เกิดจากผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินที่ต่างกัน

- 1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้คือความยาวช่องเหมืองเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25 เซนติเมตร ความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร และความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร
- 2) ตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้คือความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน โดยจะทำการผันแปรตั้งแต่ 5 ถึง 20 เซนติเมตร
- 3) บรรจุรวดคละขนาดลงในโครงจำลองการทรุดตัวของดินในสามมิติโดยให้ช่องเหมืองใต้ดินมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร เคลื่อนพื้นผิวด้านบนให้เรียบและอยู่ในแนวระดับตลอดทั้งพื้นที่ จากนั้นทำการสแกนพื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนทำการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน
- 4) ดึงบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัสลงเพื่อจำลองช่องเหมืองใต้ดินตามความกว้าง ความยาว และความสูงที่กำหนดไว้
- 5) สแกนพื้นผิวการทรุดตัวเพื่อนำข้อมูลไปทำการประเมินมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ
- 6) ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง ภายใต้สภาวะเดิมเพื่อความแม่นยำของผลการทดสอบ โดยทุกครั้งที่ทำการทดสอบซ้ำจะต้องทำการคลุกเคล้าเม็ดกรวดใหม่ทุกครั้งก่อนเคลื่อนพื้นหน้าให้เรียบ
- 7) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3) ถึง 6) แต่บรรจุรวดลงในโครงจำลองการทรุดตัวอีกเพื่อเพิ่มระดับความลึกของช่องเหมืองใต้ดินจาก 5 เซนติเมตร เป็น 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ

5.3.2 รูปแบบการทดสอบที่ 2 การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของดินที่เกิดจากผลกระทบด้านระดับความสูงของช่องเหมืองใต้ดินที่ต่างกัน

- 1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้คือความลึกช่องเหมืองเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร และความยาวเท่ากับ 20 เซนติเมตร
- 2) ตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้คือความสูงของช่องเหมืองใต้ดิน โดยจะทำการผันแปรตั้งแต่ 1 ถึง 5 เซนติเมตร
- 3) บรรจุรวดคละขนาดลงในโครงจำลองการทรุดตัวของดินในสามมิติโดยให้ช่องเหมืองใต้ดินมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร เคลื่อนพื้นผิวด้านบนให้เรียบและอยู่ในแนวระดับตลอดทั้งพื้นที่ จากนั้นทำการสแกนพื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนทำการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน

4) ดึงบล็อกเพื่อจำลองช่องเหมือนใต้ดินลงที่ละ 1 เซนติเมตร แล้วทำการสแกนพื้นผิวการทรุดตัวทุกครั้งหลังการดึงจนถึง 5 เซนติเมตร โดยดึงบล็อกให้มีความกว้าง และความยาวตามที่กำหนดไว้

5) ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง ภายใต้สภาวะเดิมเพื่อความแม่นยำของผลการทดสอบ โดยทุกครั้งที่ทำการทดสอบซ้ำจะต้องทำการคลุกเคล้าเม็ดกรวดใหม่ทุกครั้งก่อนเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ

6) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3) ถึง 5) แต่เพิ่มระดับความลึกของช่องเหมือนใต้ดินจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ

5.3.3 รูปแบบการทดสอบที่ 3 การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของบดพื้นผิวดินที่เกิดจากผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินที่ต่างกัน

1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้คือความลึกช่องเหมือนเท่ากับ 5 เซนติเมตร ความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร และความยาวเท่ากับ 5 และ 10 เซนติเมตร

2) ตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้คือความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน โดยจะทำการผันแปรตั้งแต่ 5 ถึง 25 เซนติเมตร

3) บรรจุกรวดคละขนาดลงในโครงจำลองการทรุดตัวของบดพื้นผิวดินในสามมิติโดยให้ช่องเหมือนใต้ดินมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร เกลี่ยพื้นผิวด้านบนให้เรียบและอยู่ในแนวระดับตลอดทั้งพื้นที่ จากนั้นทำการสแกนพื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนทำการจำลองช่องเหมือนใต้ดิน

4) ดึงบล็อกเพื่อจำลองช่องเหมือนใต้ดินลงให้มีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยความสูงและความยาวเป็นไปตามที่กำหนดไว้ แล้วทำการสแกนพื้นผิวการทรุดตัว

5) ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง ภายใต้สภาวะเดิมเพื่อความแม่นยำของผลการทดสอบ โดยทุกครั้งที่ทำการทดสอบซ้ำจะต้องทำการคลุกเคล้าเม็ดกรวดใหม่ทุกครั้งก่อนเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ

6) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3) ถึง 5) แต่เพิ่มระดับความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10, 15, 20 และ 25 เซนติเมตร ตามลำดับ

5.3.4 รูปแบบการทดสอบที่ 4 การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของบดพื้นผิวดินที่เกิดจากผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมือนใต้ดินที่ต่างกัน

1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้คือความลึกช่องเหมือนเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร และความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร

2) ตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้คือความยาวของช่องเหมือนใต้ดิน โดยจะทำการผันแปรตั้งแต่ 5 ถึง 25 เซนติเมตร

3) บรรจุกวรดคละขนาดลงในโครงจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติโดยให้ช่องเหมือนใต้ดินมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร เกลี่ยพื้นผิวด้านบนให้เรียบและอยู่ในแนวระดับตลอดทั้งพื้นที่ จากนั้นทำการสแกนพื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนทำการจำลองช่องเหมือนใต้ดิน

4) ดึงบล็อกเพื่อจำลองช่องเหมือนใต้ดินลงให้มีความยาวเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยความสูงและความกว้างเป็นไปตามที่กำหนดไว้ แล้วทำการสแกนพื้นผิวการทรุดตัว

5) ทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง ภายใต้สภาวะเดิมเพื่อความแม่นยำของผลการทดสอบ โดยทุกครั้งที่ทำการทดสอบซ้ำจะต้องทำการคลุกเคล้าเม็ดกรวดใหม่ทุกครั้งก่อนเกลี่ยผิวน้ำให้เรียบ

6) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3) ถึง 5) แต่เพิ่มระดับความยาวของช่องเหมือนใต้ดินจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10, 15, 20 และ 25 เซนติเมตร ตามลำดับ

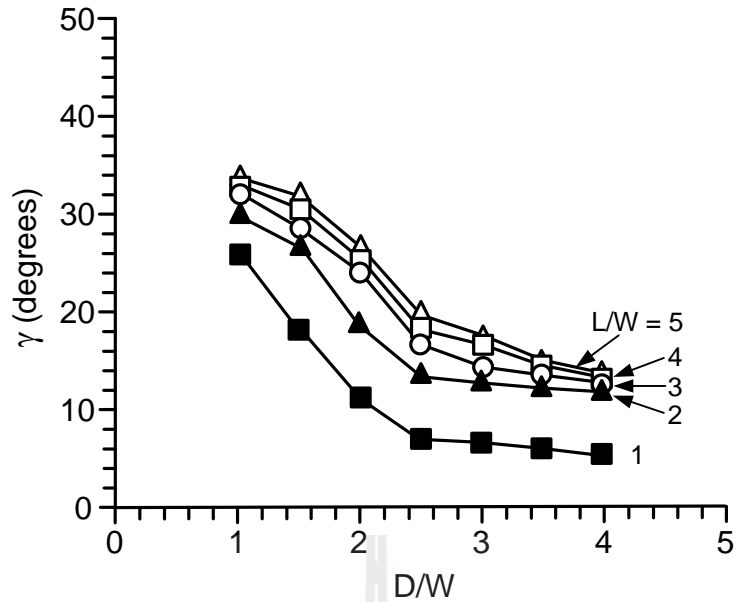
7) บรรจุกวรดลงในโครงจำลองการทรุดตัวอีกครั้งเพื่อเพิ่มระดับความลึกของช่องเหมือนใต้ดินจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร แล้วทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 3) ถึง 6)

5.4 ผลการทดสอบ

เนื่องจากในแต่ละชุดการทดสอบได้ทำการผันแปรค่าตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลจากการจำลองรูปแบบทางกายภาพของการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากการทำเหมือนใต้ดินมีดังต่อไปนี้

5.4.1 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดิน

ผลการทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินระบุว่า ถ้าช่องเหมือนมีความลึกจากผิวดินมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือชั้นหินปิดทับมีความหนาจะส่งผลให้การทรุดตัวของผิวดินมีค่าน้อย กล่าวคือ ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดินจะลดลง โดยการทรุดตัวจะมีลักษณะแบนราบแต่จะส่งผลกระทบต่อในวงกว้าง ในทางตรงกันข้ามถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนาน้อยลงจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ลึกและสูงชันแต่มีการกระจายตัวน้อย ซึ่งขนาดของการทรุดตัวจะขึ้นกับความหนาของชั้นหินปิดทับอย่างมาก รูปที่ 5.5 แสดงการผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของความลึกต่อความกว้างช่องเหมือนใต้ดิน และตารางที่ 5.1 แสดงผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้างต้น



รูปที่ 5.5 การผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน

ตารางที่ 5.1 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความลึกของช่องเหมือนใต้ดิน

L/W	γ (degrees)						
	D/W = 1	D/W = 1.5	D/W = 2	D/W = 2.5	D/W = 3	D/W = 3.5	D/W = 4
1	25.7	18.0	11.0	6.7	6.3	6.0	5.5
2	30.1	27.0	19.0	14.0	14.0	13.0	12.0
3	32.9	31.0	26.0	18.6	17.0	14.5	13.8
4	32.8	28.8	24.5	16.7	14.7	14.0	13.0
5	33.5	32.0	26.1	20.0	17.5	14.8	14.0

5.4.2 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดิน

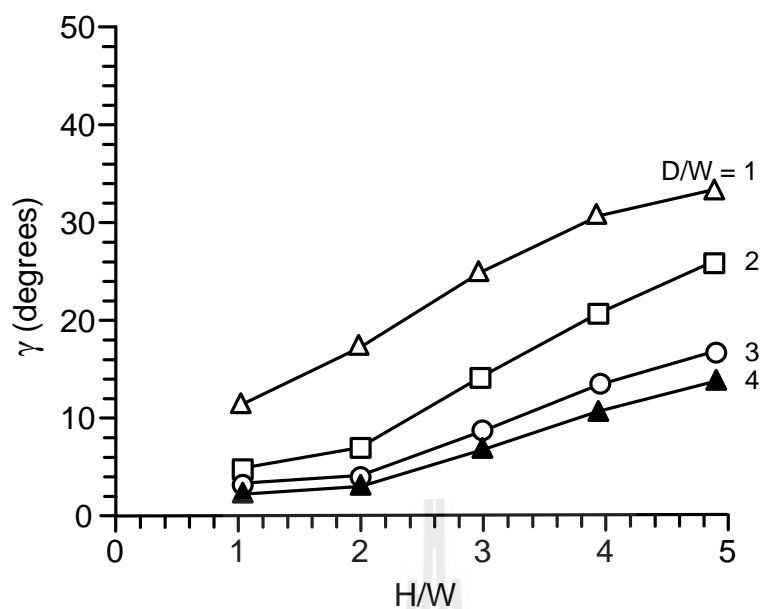
ผลการทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดินพบว่า เมื่อช่องเหมืองมีความสูงมากขึ้นจะทำให้ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อสังเกตในแต่ละระดับความลึกพบว่า ถ้าช่องเหมืองอยู่ในระดับลึกมาก ความสูงของช่องเหมืองจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อทรุดตัวบนผิวดิน กล่าวคือค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงแม้จะมีการเพิ่มระดับความสูงของช่องเหมือง ในทางกลับกัน ถ้าช่องเหมืองอยู่ในระดับตื้น (ชั้นหินปิดทับมีความหนาแน่นน้อยลง) พบว่าความสูงของช่องเหมืองจะมีผลต่อค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับอย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 5.6 แสดงการผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน และตารางที่ 5.2 แสดงผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้างต้น

5.4.3 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน

ผลการทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินระบุว่า เมื่อช่องเหมืองมีความกว้างมากขึ้นจะทำให้ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับลดลงและค่าการทรุดตัวบนผิวดินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยบริเวณผนังของการทรุดตัวจะมีลักษณะสูงชัน และแผ่ขยายอาณาเขตการทรุดตัวตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างช่องเหมือง รูปที่ 5.7 แสดงการผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน และตารางที่ 5.3 แสดงผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้างต้น

5.4.4 ผลการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน

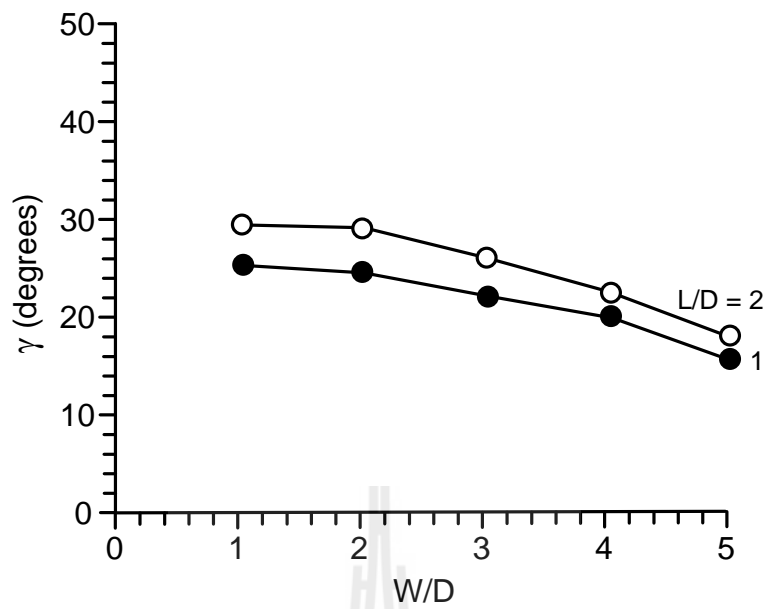
ผลการทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินพบว่า การเพิ่มขึ้นในแนวยาวของช่องเหมืองในขณะที่ความลึกและความกว้างมีค่าคงที่จะมีผลต่อมุมการไหลของชั้นหินปิดทับน้อยมาก กล่าวคือ มุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเริ่มคงที่เมื่อช่องเหมืองมีความยาวเป็นสามเท่าของความกว้างช่องเหมืองใต้ดิน โดยการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดินที่ระดับนี้จะไม่มีการยุบตัวลงมากกว่านี้ แต่จะแผ่ขยายอาณาเขตการทรุดตัวเป็นแนวยาวอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 5.8 แสดงการผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน และตารางที่ 5.4 แสดงผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้างต้น



รูปที่ 5.6 การผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน

ตารางที่ 5.2 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความสูงของช่องเหมือนใต้ดิน

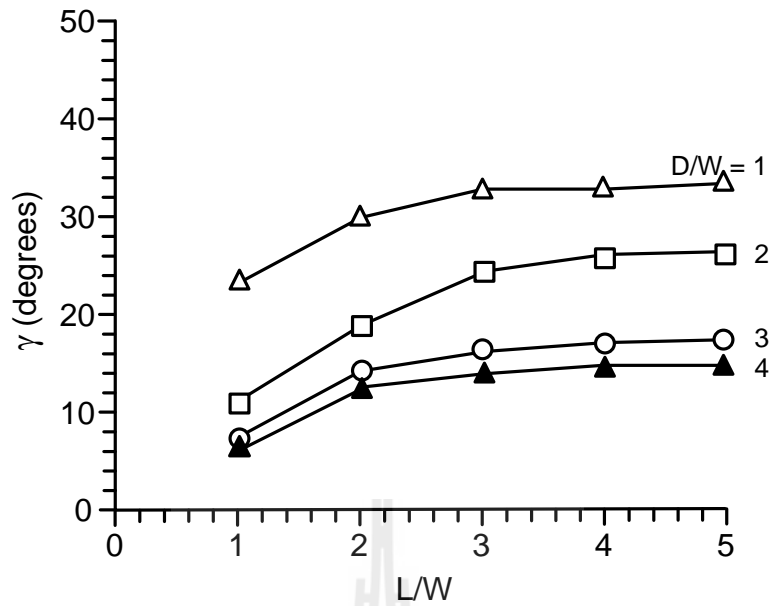
D/W	γ (degrees)				
	H/W = 0.2	H/W = 0.4	H/W = 0.6	H/W = 0.8	H/W = 1
1	11.6	17.8	25.6	31.7	32.9
2	5.0	7.3	14.4	21.0	26.0
3	4.0	4.2	9.0	14.0	17.0
4	3.0	3.5	7.0	11.0	13.8



รูปที่ 5.7 การผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน

ตารางที่ 5.3 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความกว้างของช่องเหมืองใต้ดิน

L/D	γ (degrees)				
	W/D = 1	W/D = 2	W/D = 3	W/D = 4	W/D = 5
1	25.7	25.0	22.2	20.4	16.0
2	30.1	29.6	26.5	22.9	18.1



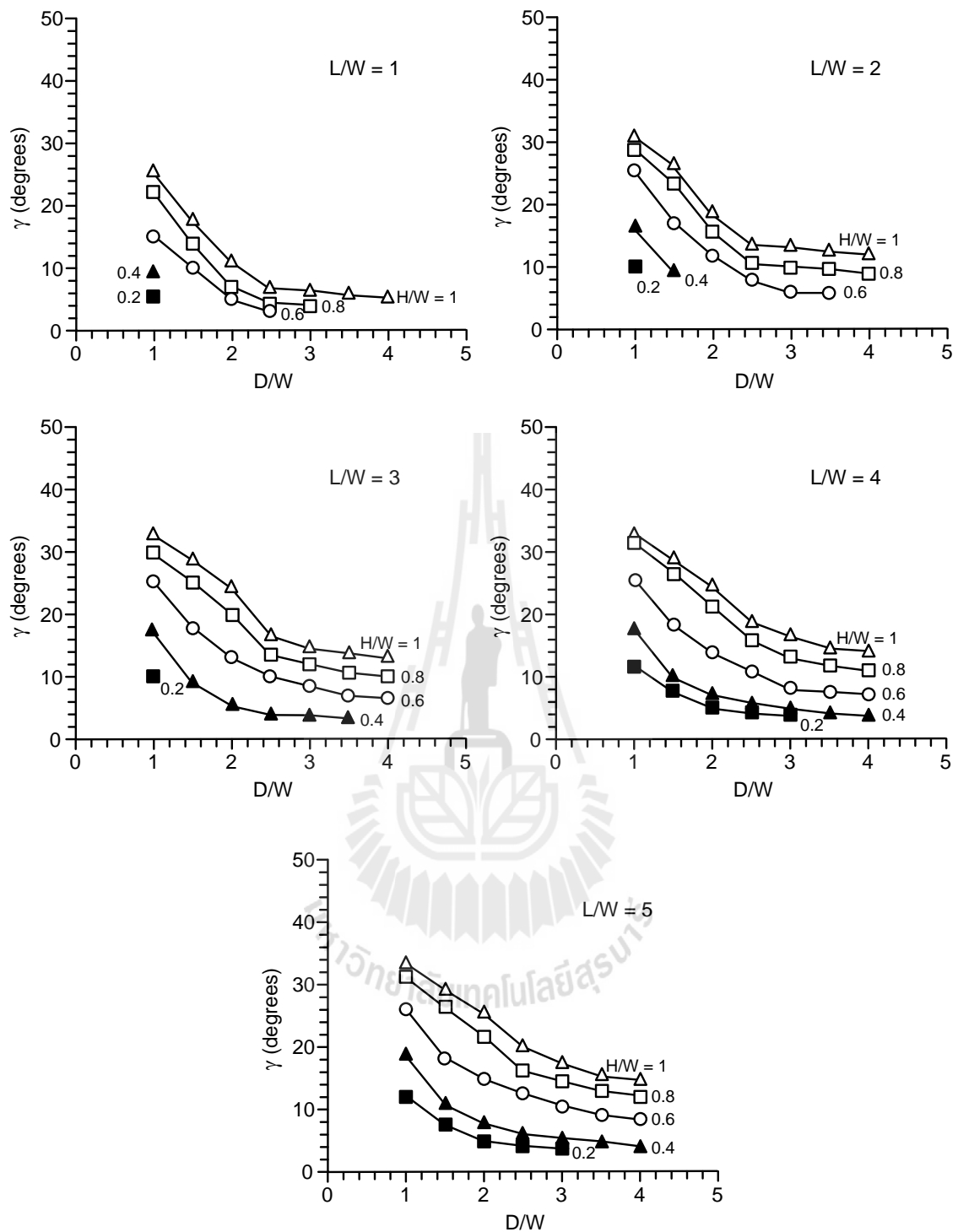
รูปที่ 5.8 การผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน

ตารางที่ 5.4 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ โดยมีการผันแปรความยาวของช่องเหมือนใต้ดิน

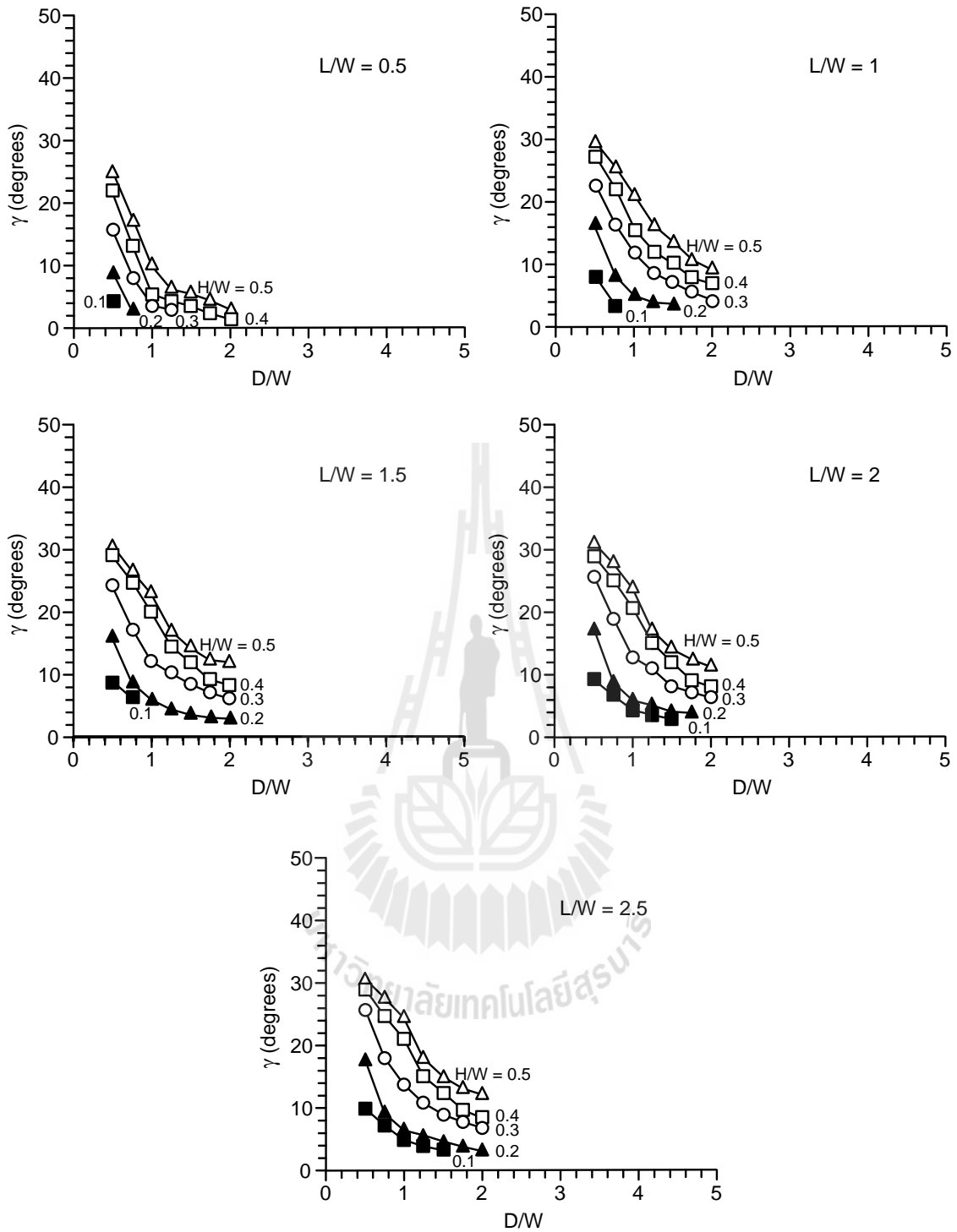
D/W	γ (degrees)				
	L/W = 1	L/W = 2	L/W = 3	L/W = 4	L/W = 5
1	25.7	30.1	32.8	32.9	33.5
2	11.0	19.0	24.5	26.0	26.1
3	6.3	14.0	14.7	17.0	17.5
4	5.5	12.0	13.0	13.8	14.0

ผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับมาสร้างความสัมพันธ์ ระหว่างค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและความลึก ความสูง ความกว้าง และความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน พบว่าค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเพิ่มขึ้นเมื่อช่องเหมืองมีขนาดความสูงและความยาวมากขึ้น นอกจากนี้ช่องเหมืองที่มีความลึกและความกว้างมากขึ้นจะทำให้ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับลดลง โดยมุมจะเริ่มคงที่เมื่อช่องเหมืองมีอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างเท่ากับ 3 ทั้งนี้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับถือเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงการผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึก ความสูง ความกว้าง และความยาวของช่องเหมือง ภายใต้สภาวะที่อัตราส่วนของขนาดเม็ดดินต่อความกว้างช่องเหมืองใต้ดิน (B_s/W) เท่ากับ 0.1 และ 0.05 ตามลำดับ (กำหนดให้ขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร) ตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6 แสดงผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ ตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 แสดงผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับในแต่ละการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ ที่กำหนด





รูปที่ 5.9 การผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมือนในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.1



รูปที่ 5.10 การผันแปรค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีความสัมพันธ์กับค่าความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมือนในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.05

ตารางที่ 5.5 ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และ ความกว้างของช่องเหมือนในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.1

D/W	L/W	γ (degrees)				
		H/W = 0.2	H/W = 0.4	H/W = 0.6	H/W = 0.8	H/W = 1.0
1	1	5.5	9.4	15.0	22.9	25.7
	2	10.1	16.8	26.3	29.1	30.1
	3	10.1	17.4	25.8	31.4	32.8
	4	11.6	17.8	25.6	31.7	32.9
	5	12.0	18.8	26.0	31.2	33.5
1.5	1	-	-	10.0	14.0	18.0
	2	-	9.0	16.6	24.8	27.0
	3	-	9.2	17.57	25.0	28.8
	4	7.8	9.2	18.2	26.7	28.9
	5	8.0	9.6	18.0	26.2	29.0
2	1	-	-	5.0	6.5	11.0
	2	-	-	13.0	15.5	19.0
	3	-	5.4	13.0	20.1	24.5
	4	5.0	7.3	14.4	21.0	26.0
	5	5.0	8.0	15.0	21.5	26.1
2.5	1	-	-	3.0	4.2	6.7
	2	-	-	8.5	10.0	14.0
	3	-	4.0	11.5	13.0	16.7
	4	4.2	4.3	12.6	15.7	18.6
	5	4.6	6.0	13.0	16.0	20.0
3	1	-	-	-	4.0	6.3
	2	-	-	6.2	10.0	14.0
	3	-	3.8	9.1	14.1	14.7
	4	4.0	4.2	9.0	14.0	17.0
	5	4.3	5.0	10.5	15.0	17.5

ตารางที่ 5.5 ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และ ความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.1 (ต่อ)

D/W	L/W	γ (degrees)				
		H/W = 0.2	H/W = 0.4	H/W = 0.6	H/W = 0.8	H/W = 1.0
3.5	1	-	-	-	-	6.0
	2	-	-	6.0	10.0	13.0
	3	-	3.5	7.0	10.6	14.0
	4	-	4.0	8.2	11.7	14.5
	5	-	4.5	9.0	13.0	14.8
4	1	-	-	-	-	5.5
	2	-	-	-	9.0	12.0
	3	-	-	6.1	10.0	13.0
	4	-	3.5	7.0	11.0	13.8
	5	-	3.0	8.0	12.0	14.0

ตารางที่ 5.6 ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และ ความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.05

D/W	L/W	γ (degrees)				
		H/W = 0.1	H/W = 0.2	H/W = 0.3	H/W = 0.4	H/W = 0.5
0.5	0.5	4.4	8.9	15.6	22.0	25.0
	1	7.9	16.6	22.6	28.5	29.6
	1.5	8.5	16.1	24.2	29.0	30.3
	2	9.2	17.1	25.5	28.9	30.9
	2.5	9.8	17.7	25.7	29.4	30.4
0.75	0.5	-	2.7	8.0	13.0	17.0
	1	3.0	8.0	16.0	24.6	25.0
	1.5	6.5	8.0	17.0	24.5	26.5
	2	7.0	8.1	18.9	25.1	27.0
	2.5	7.2	8.2	18.0	24.7	27.7

ตารางที่ 5.6 ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และ ความกว้างของช่องเหมือนในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.05 (ต่อ)

D/W	L/W	γ (degrees)				
		H/W = 0.1	H/W = 0.2	H/W = 0.3	H/W = 0.4	H/W = 0.5
1	0.5	-	-	3.6	5.0	10.0
	1	-	5.0	13.0	15.0	22.0
	1.5	-	5.3	12.0	20.0	23.0
	2	4.3	5.3	12.6	20.6	25.5
	2.5	5.0	6.0	13.7	21.5	25.5
1.25	0.5	-	-	3.0	4.0	5.5
	1	-	4.0	8.3	12.0	16.0
	1.5	-	4.0	11.2	14.5	16.0
	2	4.0	4.2	11.8	15.0	16.7
	2.5	4.5	5.3	12.3	15.2	17.3
1.5	0.5	-	-	-	4.0	5.4
	1	-	3.8	7.3	11.0	13.8
	1.5	-	3.9	8.3	12.0	14.7
	2	3.2	4.0	8.1	12.1	14.1
	2.5	3.5	4.5	9.0	12.6	15.0
1.75	0.5	-	-	-	3.0	4.6
	1	-	-	5.5	8.0	10.7
	1.5	-	3.0	7.0	9.0	12.3
	2	-	4.0	7.7	9.0	12.5
	2.5	-	4.0	8.0	9.2	13.0
3	0.5	-	-	-	2.0	3.0
	1	-	-	4.0	7.0	9.2
	1.5	-	3.0	6.2	8.0	12.0
	2	-	3.0	6.6	8.0	11.6
	2.5	-	3.0	7.0	8.5	12.3

ตารางที่ 5.7 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.1

D/W	L/W	S_{max}				
		H/W = 0.2	H/W = 0.4	H/W = 0.6	H/W = 0.8	H/W = 1.0
1	1	5.3	13.2	23.0	26.1	29.9
	2	7.6	15.9	24.8	30.3	33.7
	3	7.6	12.2	23.3	31.5	37.5
	4	7.8	15.6	22.0	31.5	34.2
	5	7.6	15.7	24.9	27.8	35.8
1.5	1	2.0	5.7	11.2	20.3	25.8
	2	4.8	8.5	16.4	24.3	28.5
	3	4.0	8.3	15.5	21.7	29.0
	4	5.4	9.1	15.5	20.6	28.2
	5	4.2	9.1	16.4	21.3	28.4
2	1	-	1.4	5.7	9.9	14.9
	2	2.9	7.8	13.9	19.4	26.1
	3	2.2	7.1	12.7	18.2	24.9
	4	4.3	7.2	12.1	18.8	24.3
	5	3.6	7.8	12.7	22.5	25.2
2.5	1	-	2.3	4.1	5.4	9.0
	2	4.5	6.9	10.5	13.6	19.7
	3	3.3	9.4	9.9	16.0	22.7
	4	4.5	6.3	10.0	16.1	22.8
	5	3.9	7.0	11.2	16.7	21.9
3	1	-	-	-	5.2	6.1
	2	-	4.7	7.1	12.0	14.4
	3	-	4.1	7.8	12.7	16.3
	4	3.5	5.3	9.0	13.8	16.8
	5	4.0	6.2	8.1	12.3	16.7

ตารางที่ 5.7 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.1 (ต่อ)

D/W	L/W	S_{max}				
		H/W = 0.2	H/W = 0.4	H/W = 0.6	H/W = 0.8	H/W = 1.0
3.5	1	-	-	-	-	-
	2	-	3.0	4.8	7.9	10.3
	3	-	3.5	6.0	7.7	13.4
	4	3.4	4.6	6.7	9.9	14.5
	5	2.5	3.7	6.2	9.3	14.5
4	1	-	-	-	-	-
	2	-	-	3.0	5.4	7.2
	3	-	3.3	5.1	7.6	10.6
	4	-	2.9	6.3	8.4	11.2
	5	1.8	3.0	5.4	9.3	12.9

ตารางที่ 5.8 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.05

D/W	L/W	S_{max}				
		H/W = 0.1	H/W = 0.2	H/W = 0.3	H/W = 0.4	H/W = 0.5
0.5	0.5	6.7	13.6	23.0	29.2	34.9
	1	7.0	16.2	28.3	37.4	45.5
	1.5	10.4	18.5	29.4	39.8	46.2
	2	9.7	18.9	28.7	38.5	46.7
	2.5	10.8	18.9	29.2	39.6	46.9
0.75	0.5	6.2	12.3	20.2	25.0	28.8
	1	6.9	14.8	27.0	35.6	44.6
	1.5	9.0	16.3	28.2	36.7	44.4
	2	9.1	16.9	26.6	36.4	44.3
	2.5	9.4	17.5	29.5	36.8	44.1

ตารางที่ 5.8 ค่าการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีการผันแปรความลึก ความยาว ความสูง และความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะที่ B_s/W เท่ากับ 0.05 (ต่อ)

D/W	L/W	S_{max}				
		H/W = 0.1	H/W = 0.2	H/W = 0.3	H/W = 0.4	H/W = 0.5
1	0.5	4.5	6.9	16.1	21.6	24.6
	1	5.4	12.0	24.7	34.7	43.6
	1.5	8.2	16.0	27.6	35.5	44.1
	2	8.2	16.6	25.1	35.4	43.4
	2.5	8.6	16.9	25.3	34.9	43.5
1.25	0.5	4.1	5.9	8.9	12.6	18.7
	1	4.8	11.7	21.0	28.1	36.2
	1.5	5.8	14.5	23.0	31.5	41.8
	2	5.3	14.8	24.6	31.0	42.3
	2.5	5.0	15.6	22.6	30.9	41.8
1.5	0.5	-	6.1	6.6	10.6	12.7
	1	3.8	8.7	15.4	22.7	25.8
	1.5	6.2	10.3	19.4	27.9	37.6
	2	6.8	11.3	21.4	28.6	38.7
	2.5	7.1	11.6	21.3	28.9	39.7
1.75	0.5	-	-	4.2	6.5	12.1
	1	-	-	9.0	17.6	23.8
	1.5	5.2	8.0	16.0	22.2	30.7
	2	5.2	10.1	16.9	23.4	31.3
	2.5	6	11.3	17.0	24.3	30.4
3	0.5	-	-	-	5.7	8.6
	1	-	5.6	8.0	11.7	16.5
	1.5	3.5	5.9	9.6	15.0	25.0
	2	4.9	9.0	15.9	18.9	26.6
	2.5	5.1	9.9	15.4	19.3	27.0

บทที่ 6

การคำนวณองค์ประกอบการทรุดตัวของผิวดิน

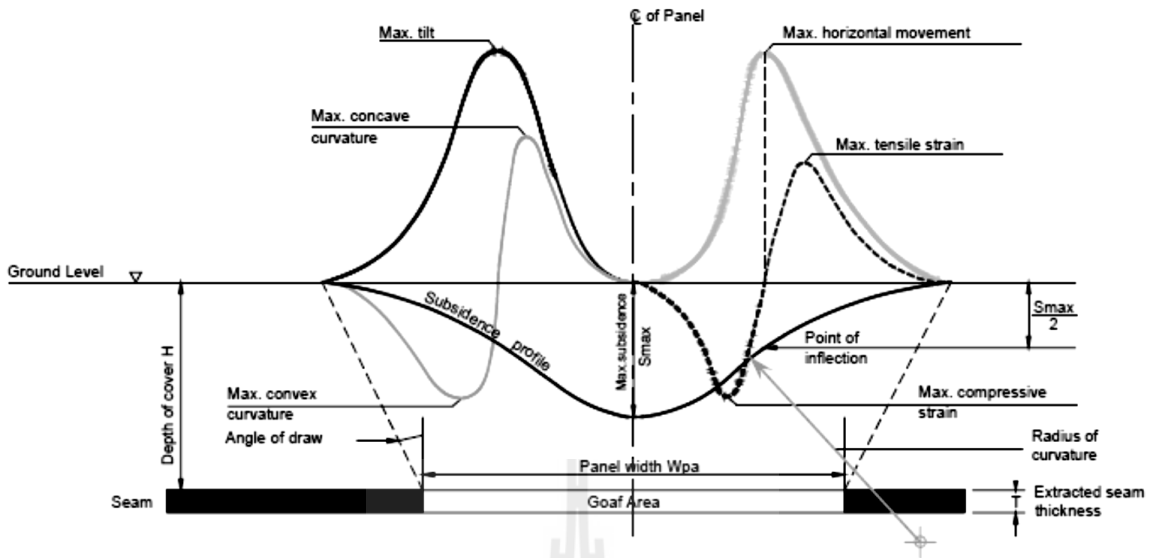
6.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลจากการทดสอบการทรุดตัวของผิวดินด้วยแบบจำลองทางกายภาพมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการทรุดตัวของผิวดินด้วย Profile function ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องหรือความแตกต่างในการคำนวณค่าการทรุดตัวของผิวดินของทั้งสองวิธี

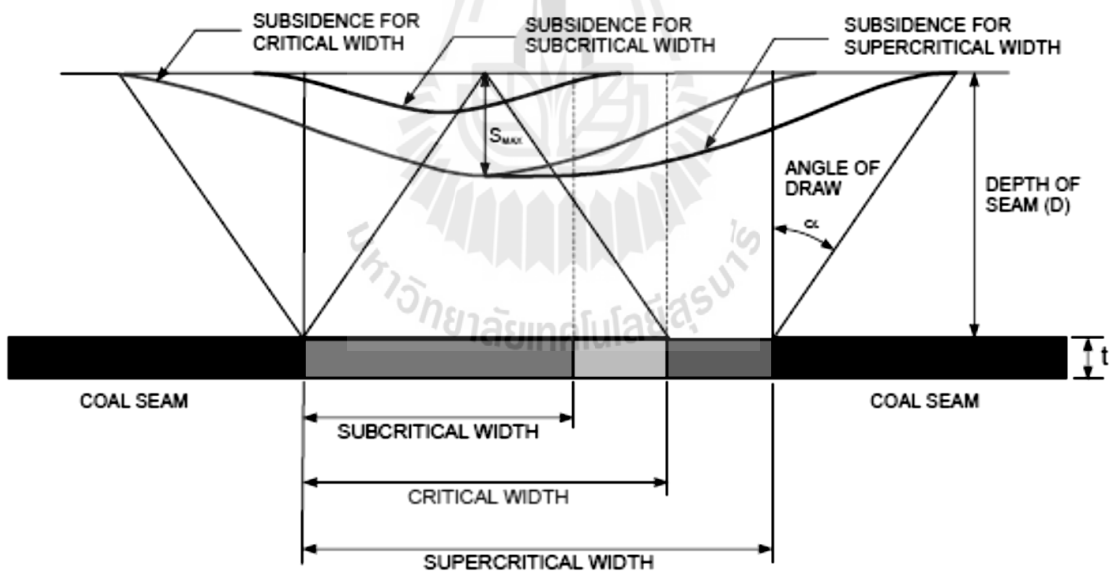
6.2 การคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function

สำหรับเหมืองใต้ดินโดยทั่วไปแล้วการทรุดตัวของผิวดินจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมและลักษณะธรรมชาติในพื้นที่เหมืองและพื้นที่ใกล้เคียง Singh (1992) ได้เสนอองค์ประกอบการทรุดตัวของผิวดินที่จะนำมาใช้กำหนดว่าจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างบนผิวดินหรือไม่และอย่างไร โครงสร้างเหล่านี้อาจประกอบด้วย อาคาร สะพาน ทางรถไฟ พื้นที่เกษตรกรรมและแหล่งน้ำใต้ดิน เป็นต้น องค์ประกอบของการทรุดตัวที่ Singh เสนอคือ ความเอียงของผิวดิน การเคลื่อนตัวในแนวระนาบ ความเครียดในแนวระนาบ และความโค้งของผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 องค์ประกอบเหล่านี้สามารถคำนวณได้ด้วยสมการหลากหลาย แต่สมการที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางและให้ผลในเชิงอนุรักษ์คือ Hyperbolic profile function ผลการคำนวณที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์หนึ่งเพื่อกำหนดระดับหรือความรุนแรงของการทรุดตัวต่อโครงสร้างบนผิวดิน พึงตระหนักว่า “ค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวดิน” ไม่เคยถูกนำมาพิจารณาเป็นหนึ่งในองค์ประกอบดังกล่าวและไม่เคยถูกใช้กำหนดผลกระทบต่อโครงสร้างบนผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดินทั่วไป

การคำนวณด้วย Profile function จะสามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว โดยข้อมูลที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในสมการประกอบด้วย การทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน (D) มุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (Angle of draw, γ) ระยะทางในแนวราบ (x) Arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่การทรุดตัวของผิวดิน (B) รูปที่ 6.2 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 6.1 องค์ประกอบของการทรุดตัวที่คำนวณด้วย Profile function (Singh, 1992)



รูปที่ 6.2 ผลกระทบที่เกิดจากความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินต่อการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับ (Singh, 1992)

การคำนวณองค์ประกอบของการทรุดตัวที่คำนวณด้วย Profile function (Singh, 1992)

สมการคำนวณการทรุดตัวบนผิวดิน

$$S(x) = \frac{1}{2} S_{\max} [1 - \tanh (cx/B)] \quad (6.1)$$

สมการคำนวณความชันของผิวดิน

$$G(x) = S'(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} (c/B) \operatorname{sech}^2 (cx/B) \quad (6.2)$$

สมการคำนวณค่าส่วนโค้งของผิวดิน

$$p(x) = S''(x) = S_{\max} (c^2/B^2) [\operatorname{sech}^2 (cx/B) \tanh (cx/B)] \quad (6.3)$$

สมการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวนอนของผิวดิน

$$u(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} (bc/B) \operatorname{sech}^2 (cx/B) \quad (6.4)$$

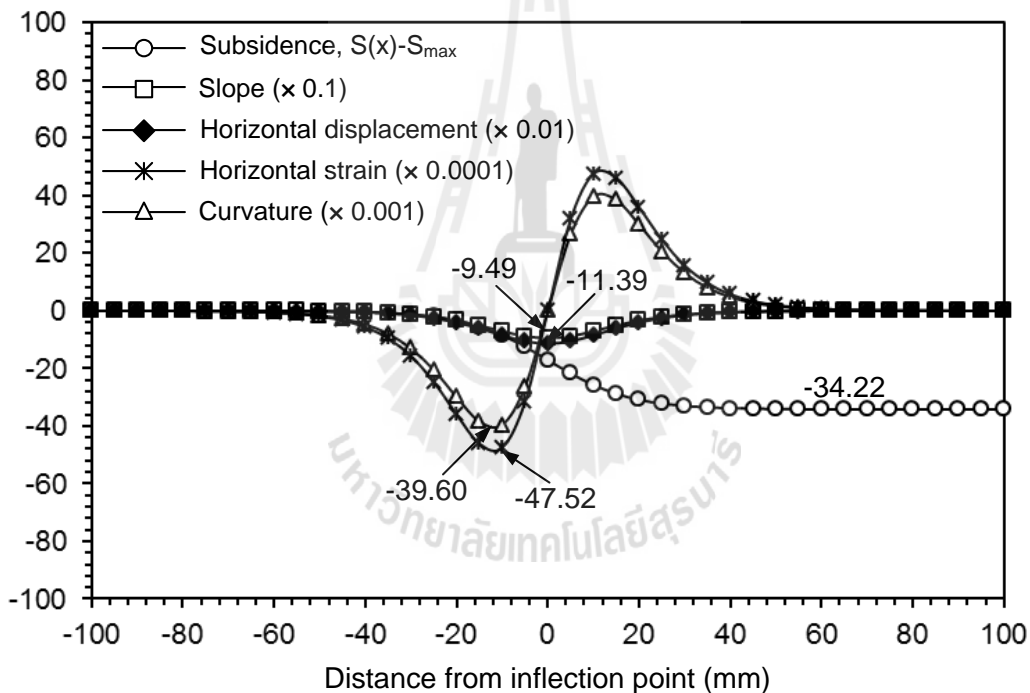
สมการคำนวณความเครียดในแนวนอนของผิวดิน

$$\varepsilon(x) = S_{\max} (bc^2/B^2) [\operatorname{sech}^2 (cx/B) \tanh (cx/B)] \quad (6.5)$$

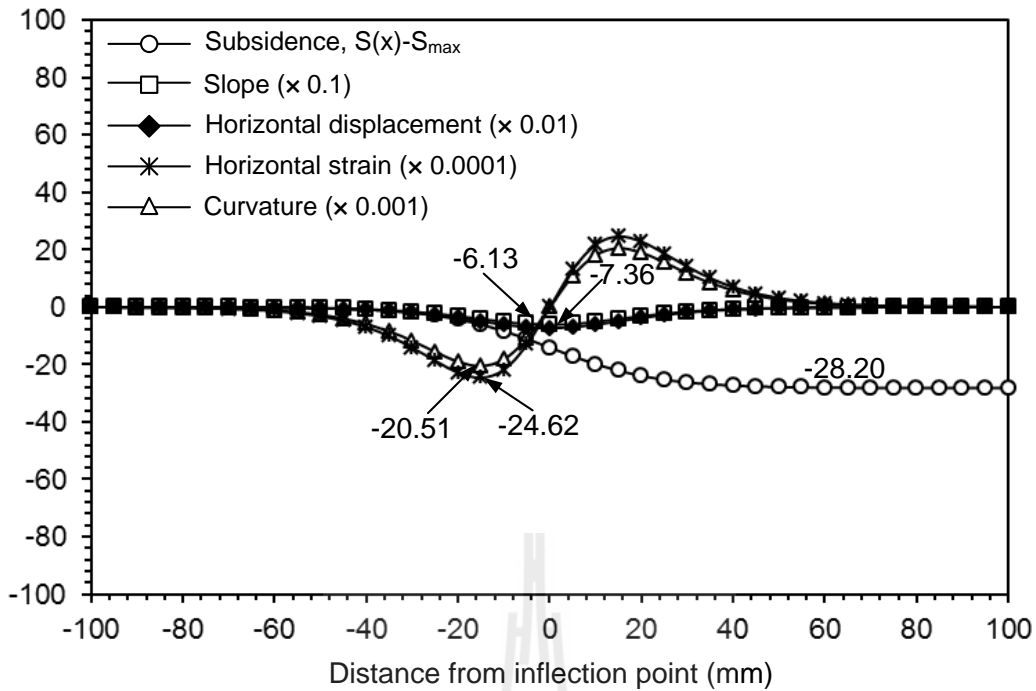
ในงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจากบทที่ 5 มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า Profile ของการทรุดตัวจากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ การทรุดตัวจะมีลักษณะคล้ายแอ่ง โดยส่วนที่ลึกที่สุดจะอยู่ตรงกลางของช่องเหมือนใต้ดิน ซึ่งตำแหน่งและขอบเขตของการทรุดตัวที่คำนวณด้วย Profile function มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ

ในการคำนวณหาขอบเขตการทรุดตัวด้วย Profile function จะต้องใช้ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ คือ ค่าการทรุดตัวสูงสุดและค่าความหนาของชั้นหินปิดทับ โดยจุดที่ใช้คำนวณได้มาจากการสังเกตบริเวณที่ไม่มีการทรุดตัวในแบบจำลองไปจนถึงจุดที่ลึกที่สุด โดยให้ระยะในแกน x มีค่าเป็นศูนย์ ไปจนถึงประมาณสองเท่าของขอบเขตการทรุดตัว เพื่อที่จะหาค่า

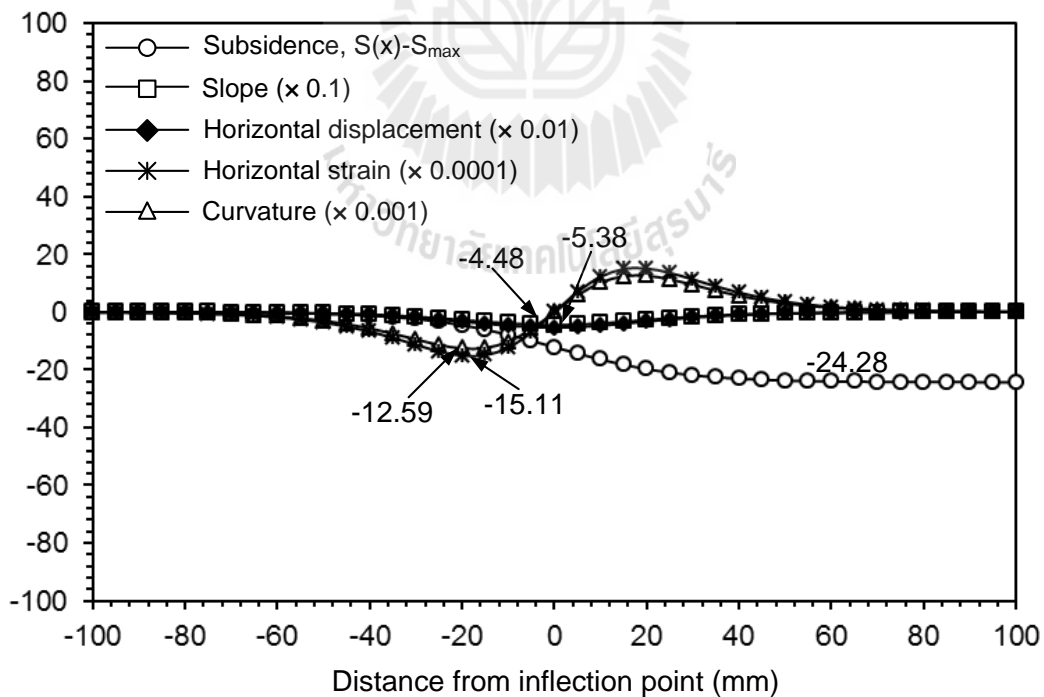
การทรุดตัว (S_x) ในสมการที่ 6.1 มีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ ซึ่งหมายถึงไม่มีการทรุดตัวที่ตำแหน่งนั้นๆ โดยตำแหน่งที่ไม่มีการทรุดตัวคือขอบเขตการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function รูปที่ 6.3 ถึงรูปที่ 6.9 แสดงผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดิน รูปที่ 6.10 ถึงรูปที่ 6.14 แสดงผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดิน รูปที่ 6.15 ถึงรูปที่ 6.19 แสดงผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน และรูปที่ 6.20 ถึงรูปที่ 6.24 แสดงผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมือนใต้ดิน



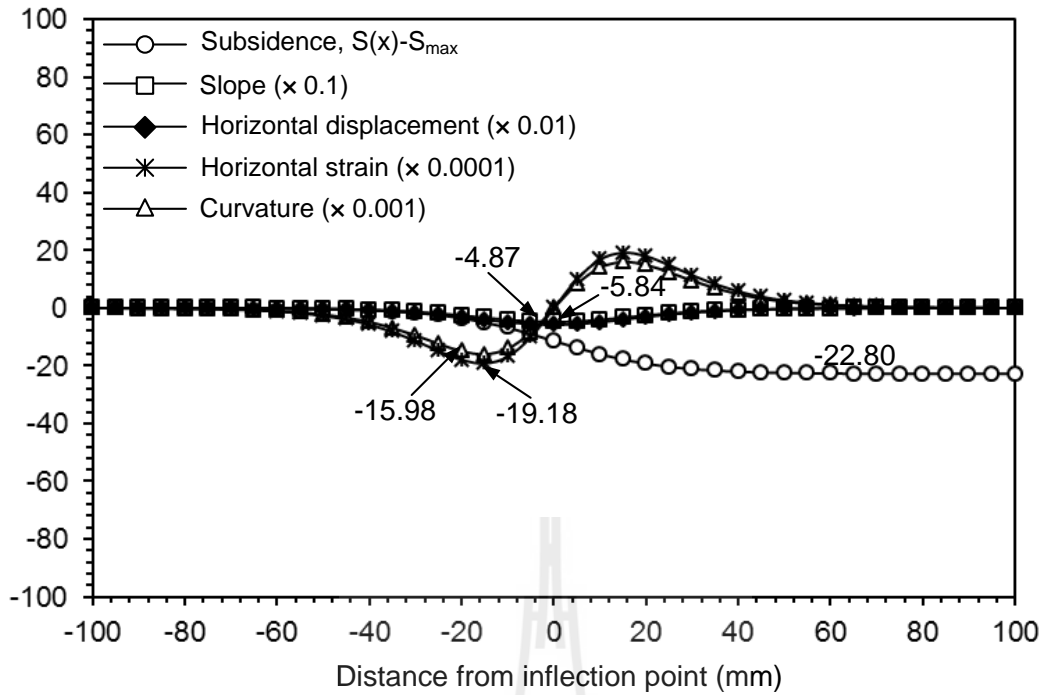
รูปที่ 6.3 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



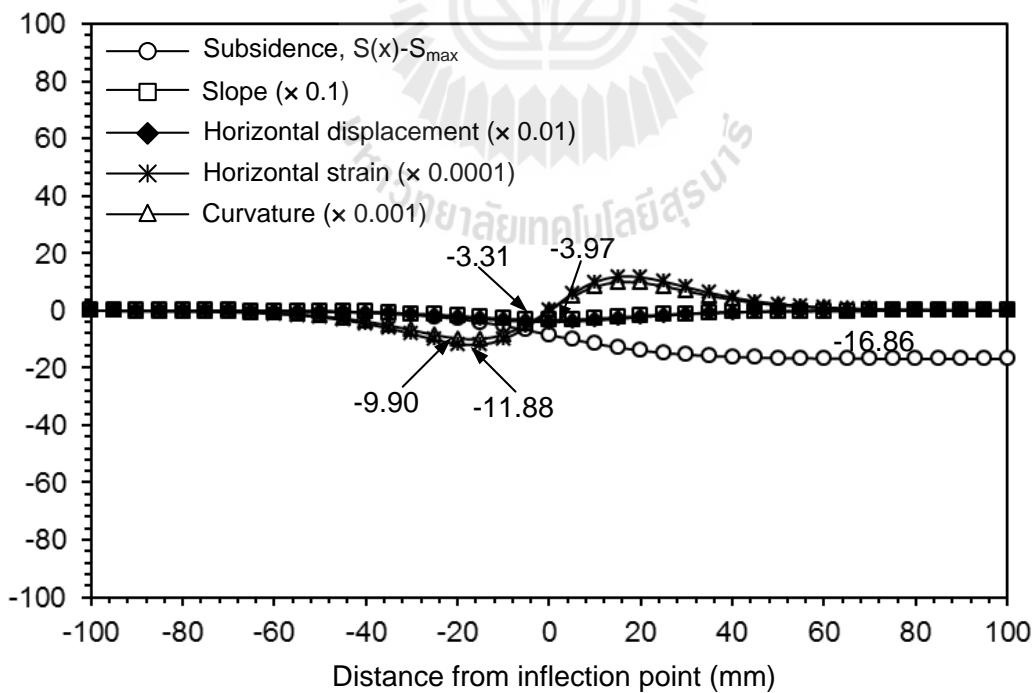
รูปที่ 6.4 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



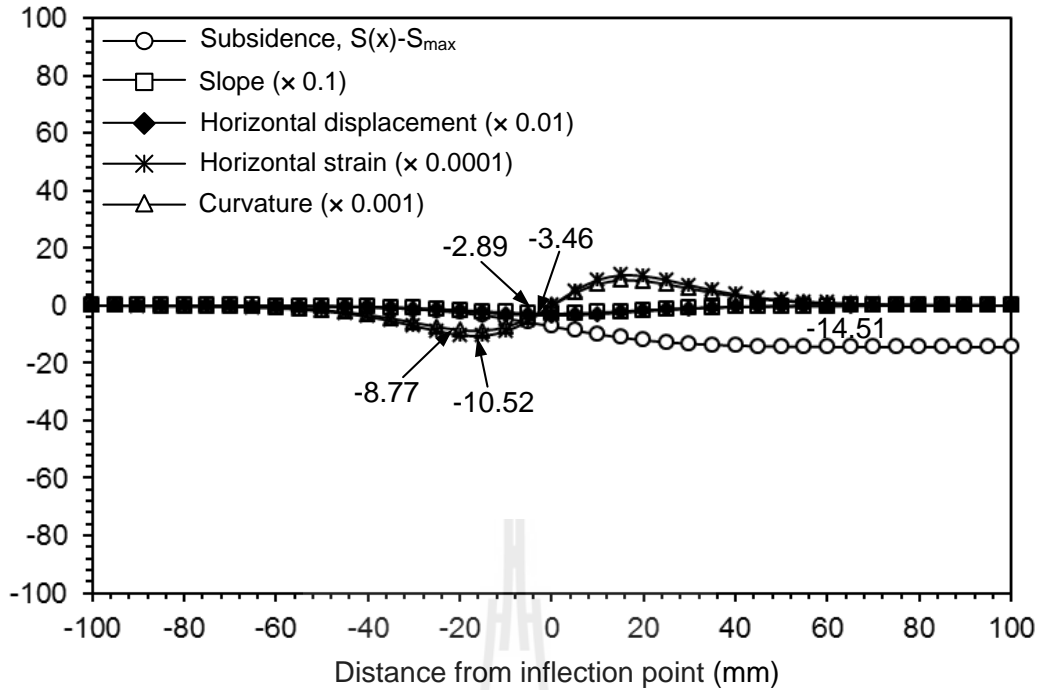
รูปที่ 6.5 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



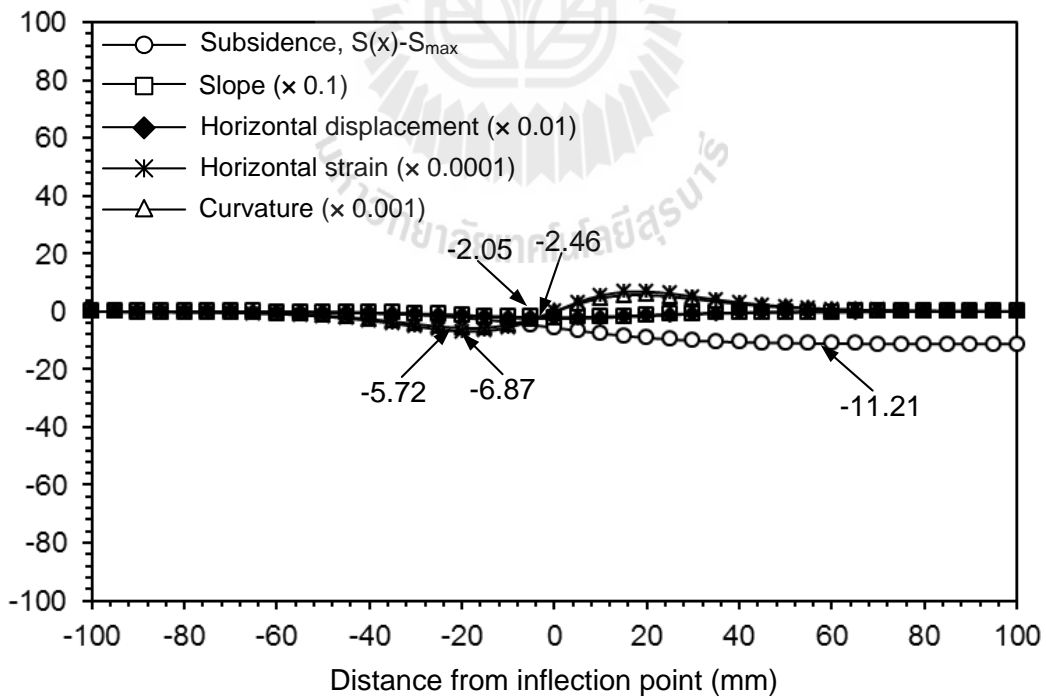
รูปที่ 6.6 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



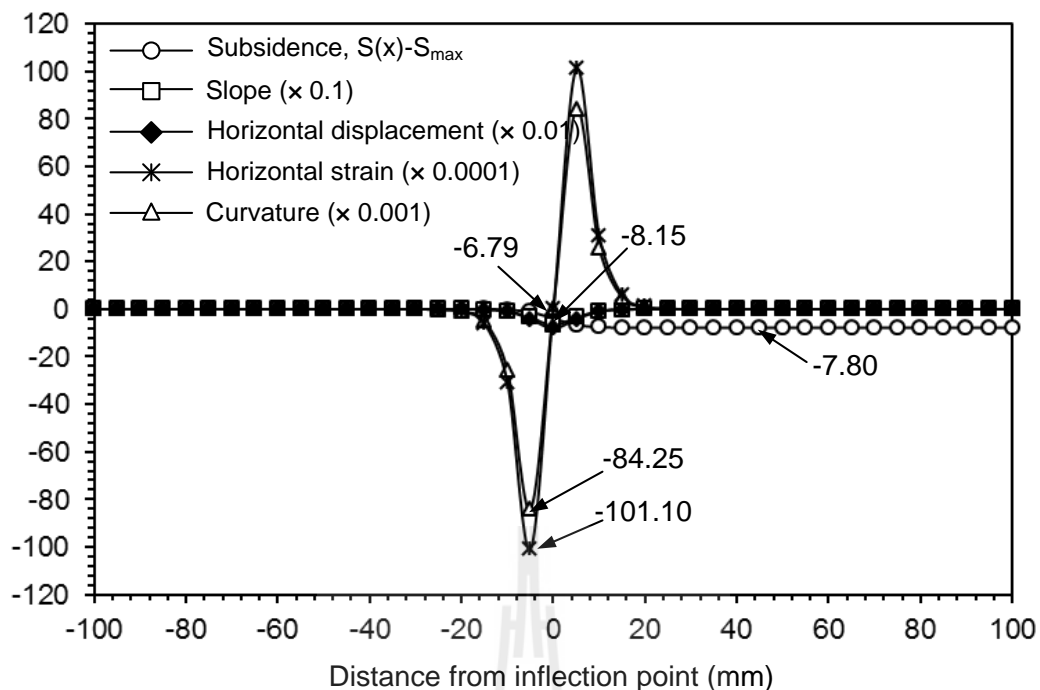
รูปที่ 6.7 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



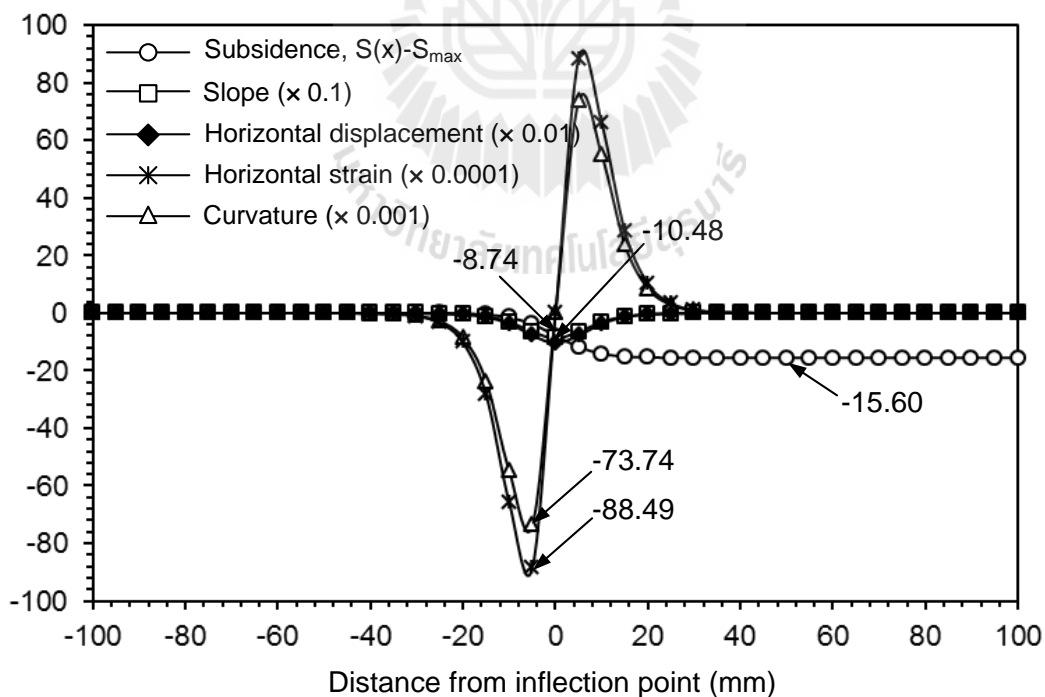
รูปที่ 6.8 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 17.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



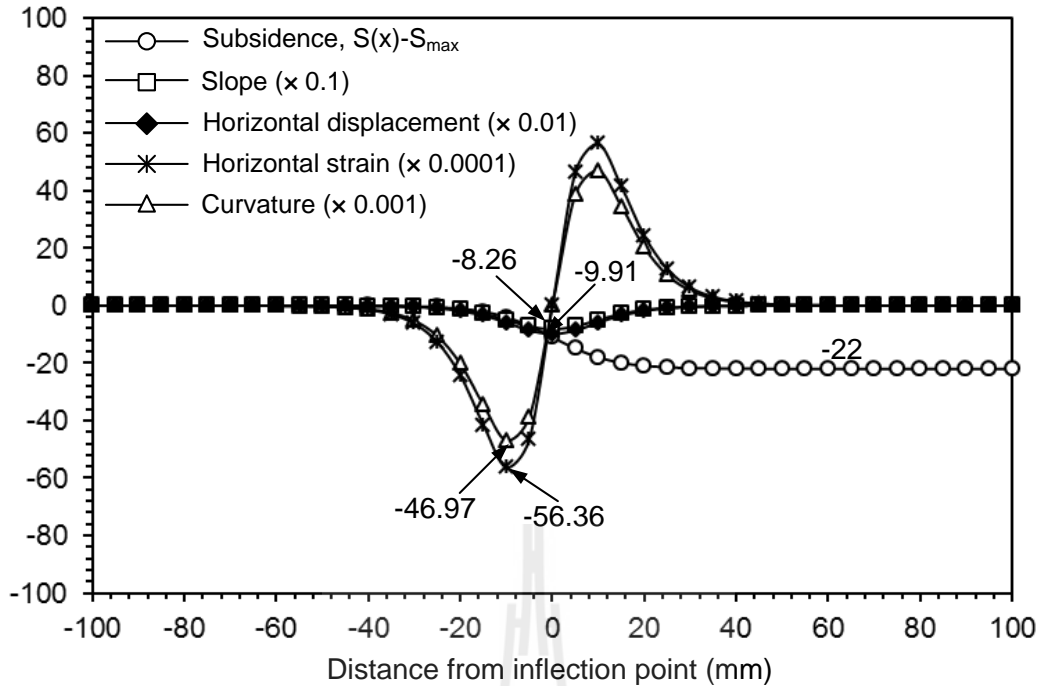
รูปที่ 6.9 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



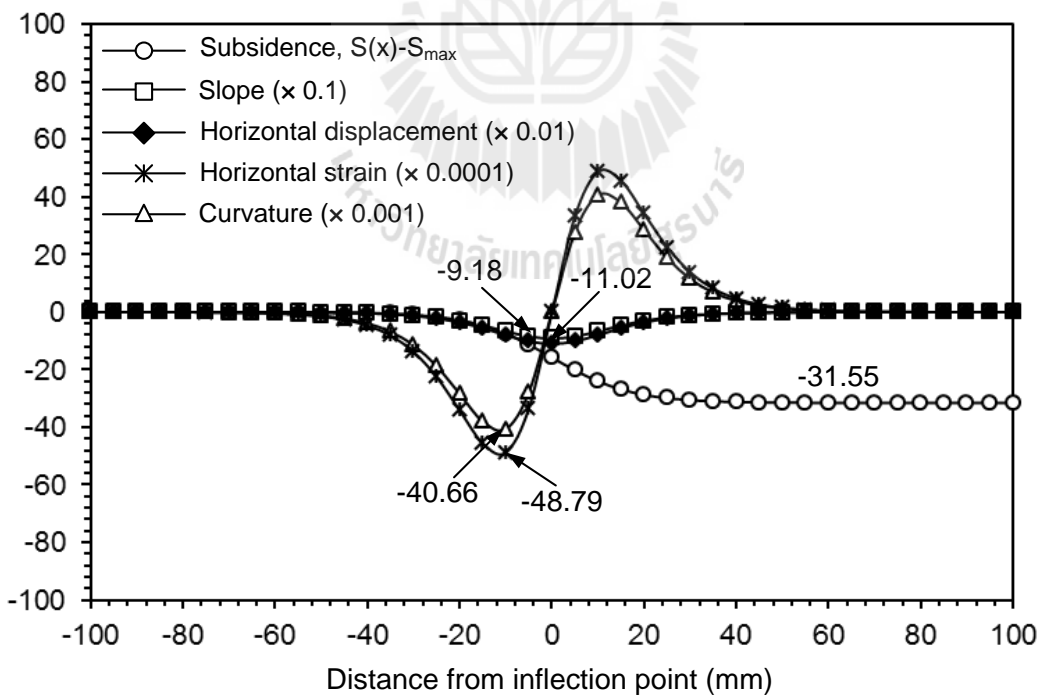
รูปที่ 6.10 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 1 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึก ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



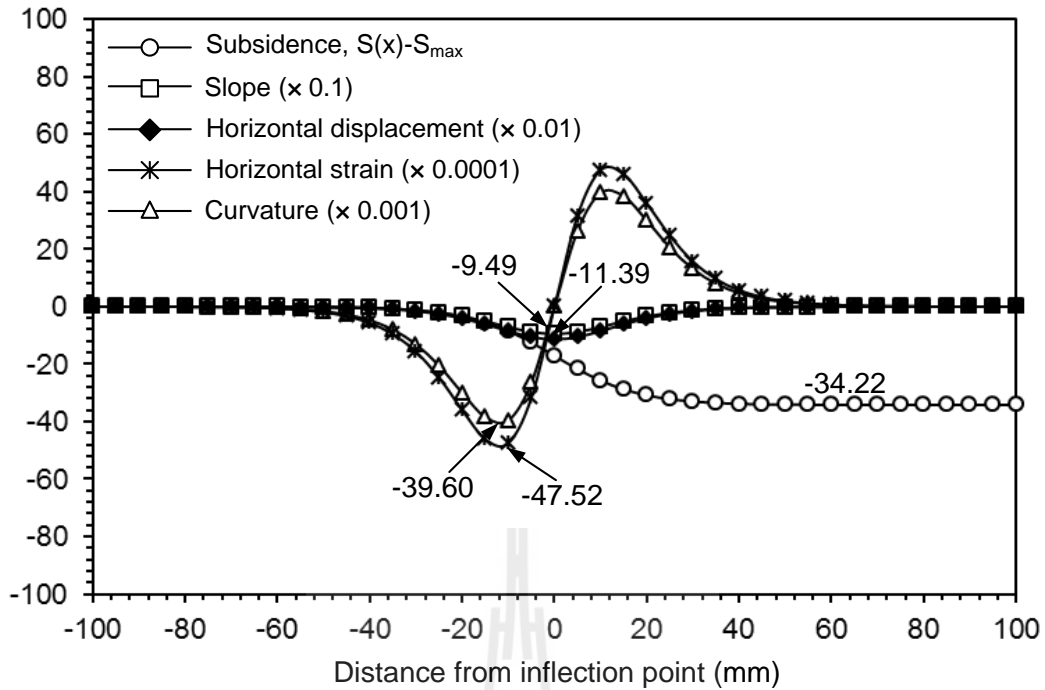
รูปที่ 6.11 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 2 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึก ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



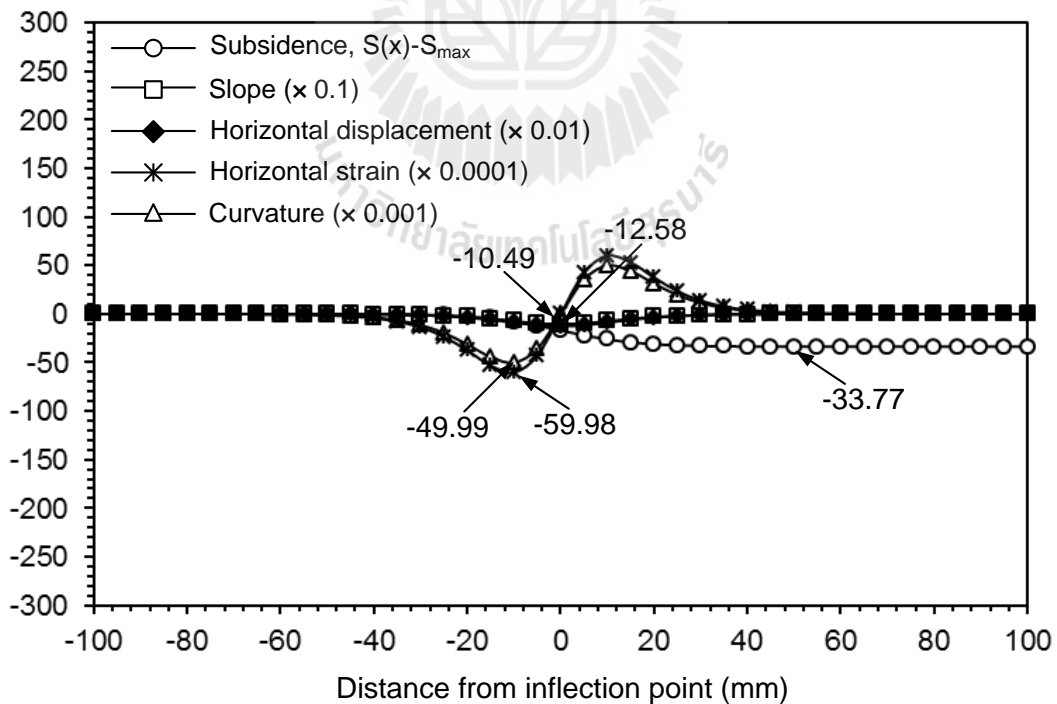
รูปที่ 6.12 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 3 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความลึก ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



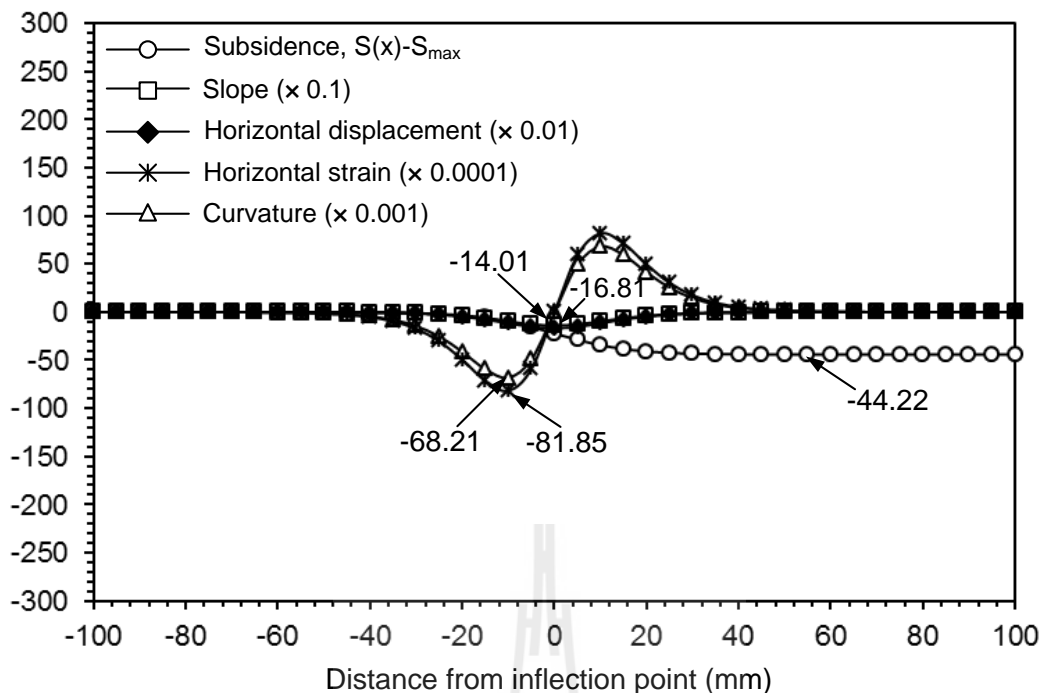
รูปที่ 6.13 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 4 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความลึก ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



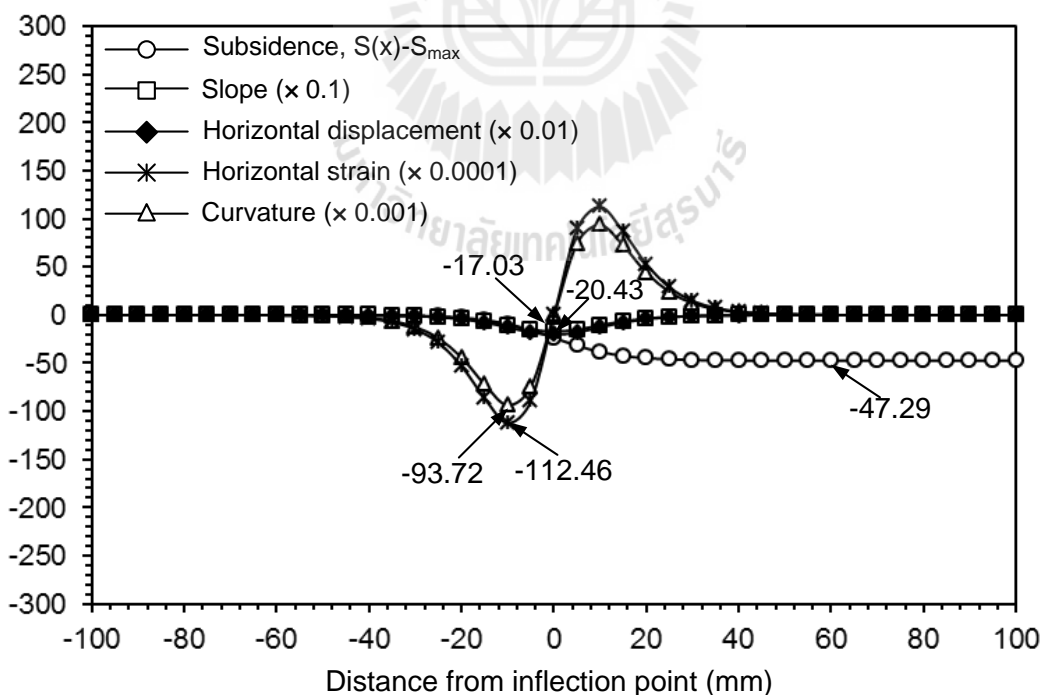
รูปที่ 6.14 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึก ความกว้าง และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ



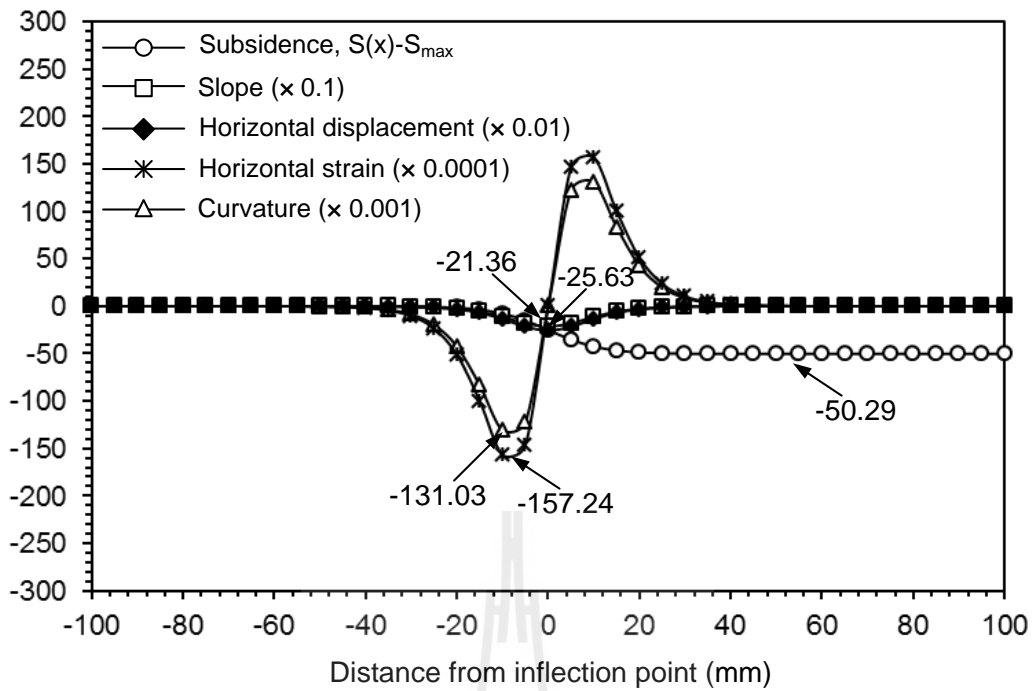
รูปที่ 6.15 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความลึก และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



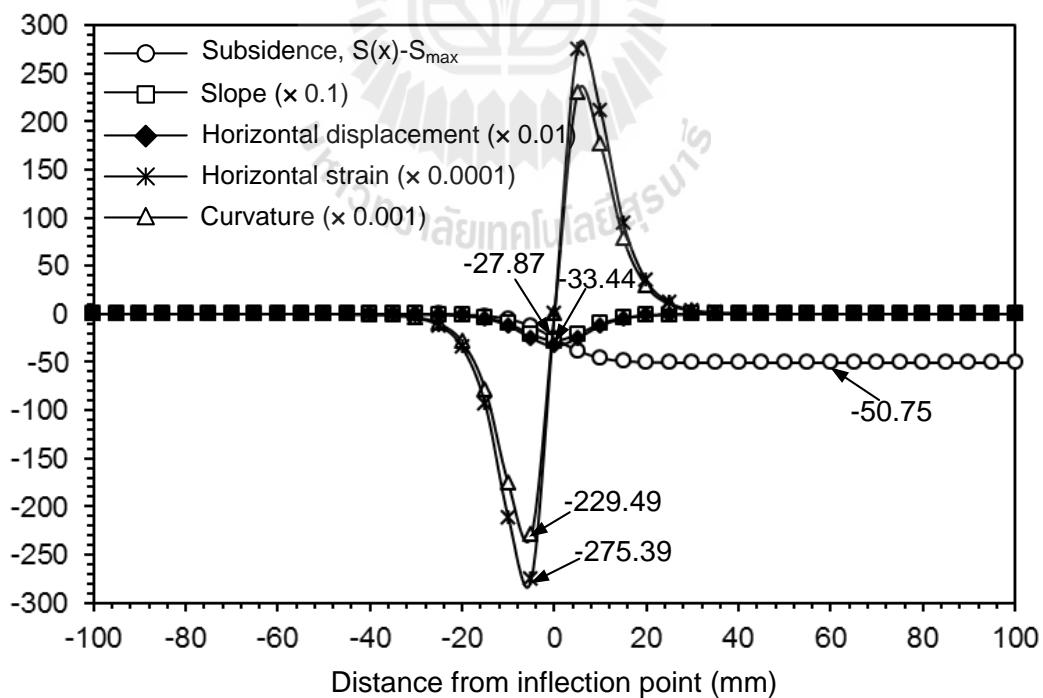
รูปที่ 6.16 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความลึก และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



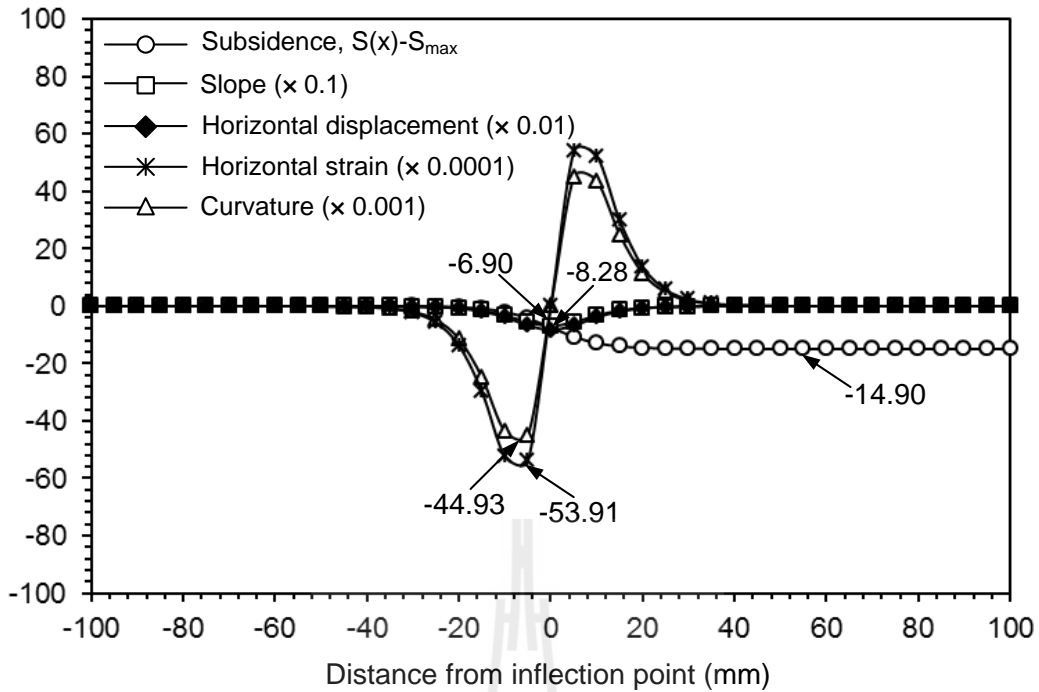
รูปที่ 6.17 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความลึก และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



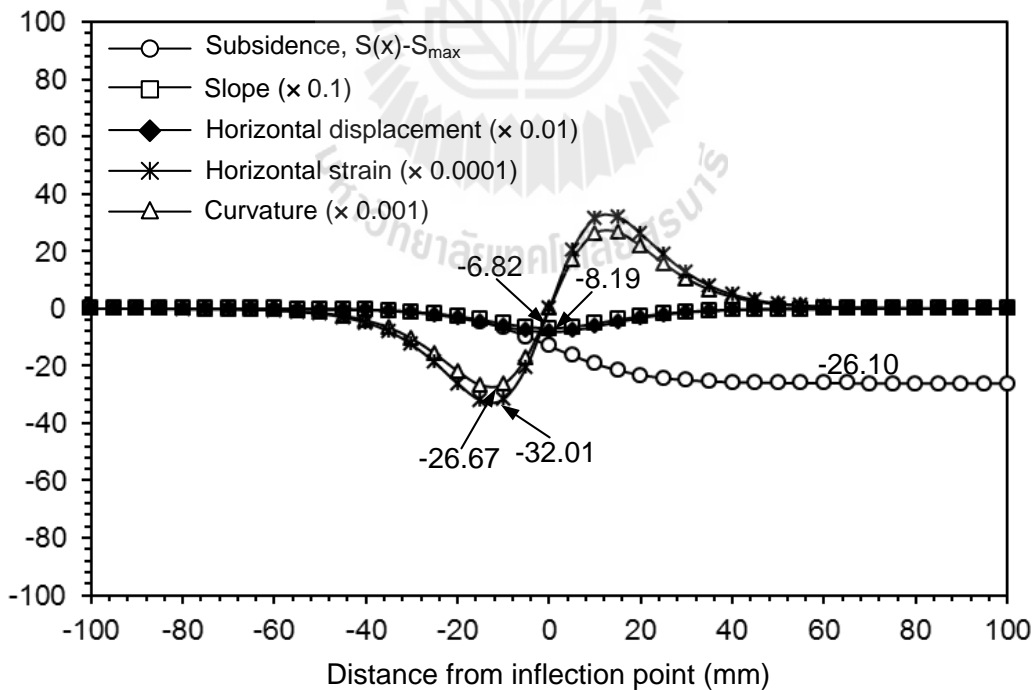
รูปที่ 6.18 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความลึก และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



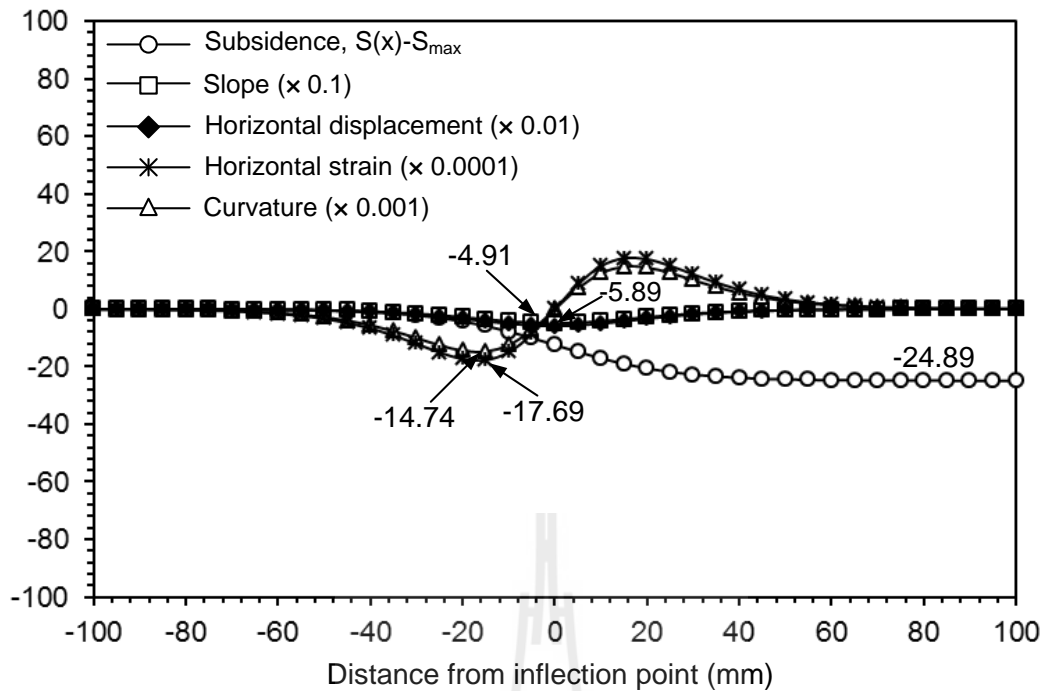
รูปที่ 6.19 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 25 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความลึก และความยาวเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



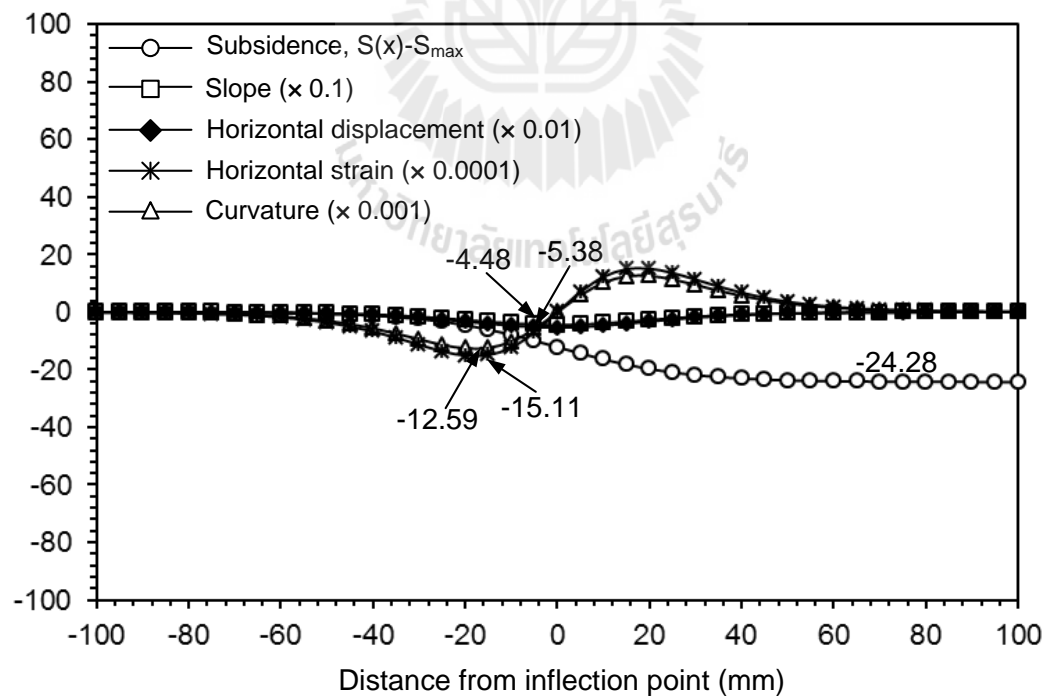
รูปที่ 6.20 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



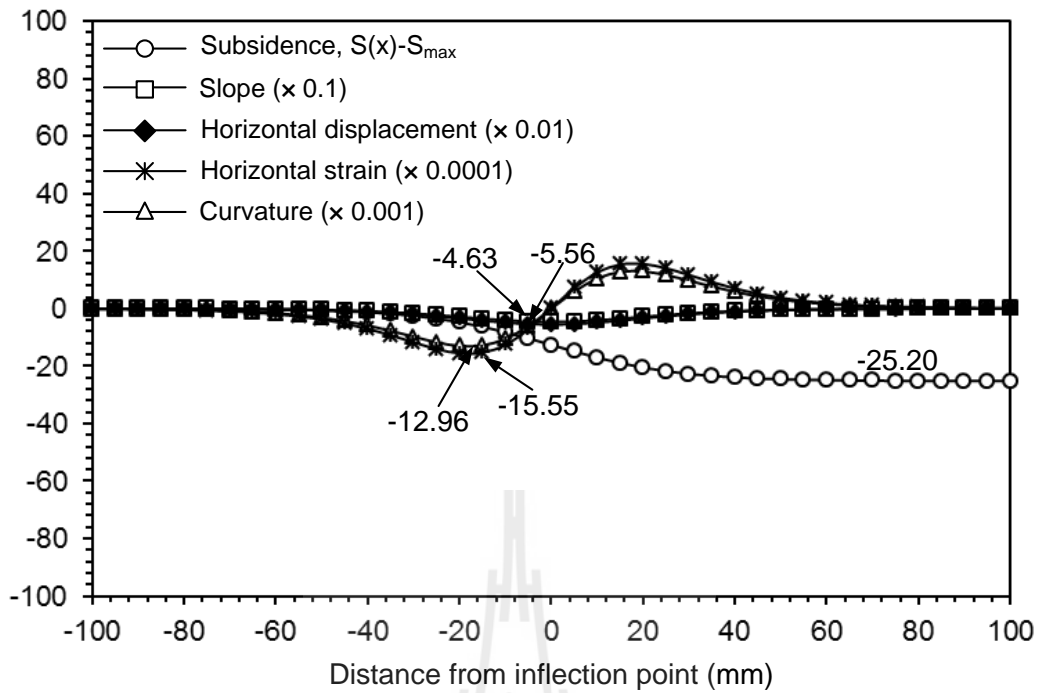
รูปที่ 6.21 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 6.22 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 6.23 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 6.24 ผลการคำนวณด้วย Profile function จากการทดสอบหาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 25 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความสูง ความกว้าง และความลึกเท่ากับ 5, 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ

บทที่ 7

การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

7.1 วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ PFC^{2D} (Particle Flow Code in 2 Dimensions) เพื่อศึกษาลักษณะการหลุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นตามคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับในสองมิติ โดยในบทนี้ได้อธิบายถึงตัวแปร ลักษณะของอนุภาคที่ใช้จำลองเป็นชั้นหินปิดทับ รวมถึงลักษณะการหลุดตัวของผิวดินหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน

7.2 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

PFC^{2D} เป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Itasca Consulting Group Inc. (2008) เพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่และการตอบสนองของอนุภาคทรงกลมโดยวิธีดิสครีตอีลิเมนต์ (Distinct Element Method: DEM) ที่ได้อธิบายไว้โดย Cundall and Strack (1979) ซึ่งการใช้งานแบบดั้งเดิมของวิธีนี้คือใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด แต่ละอีลิเมนต์จะถูกนำเสนอในรูปแบบของอนุภาคจำนวนมากที่นำมาทดสอบในเชิงตัวเลข รูปแบบของอนุภาคจะถูกนำมาใช้เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของอีลิเมนต์ ซึ่งในแต่ละสภาวะอนุภาคจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่มีความซับซ้อนจะใช้วิธีการแบบต่อเนื่อง (Continuum method) โดยพฤติกรรมของอีลิเมนต์ได้มาจากการทดสอบแบบจำลองของอนุภาค ดังนั้น PFC^{2D} จึงถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองปัญหาที่มีความซับซ้อนด้านกลศาสตร์ของแข็ง และการไหลของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7.3 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการวิจัยได้ใช้โปรแกรม PFC^{2D} เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนไหลของผิวดินในสองมิติภายใต้การผันแปรของความลึก ความกว้าง และความสูงของช่องเหมืองใต้ดิน โดยได้ทำการจำลองเม็ดดินที่มีอนุภาคทรงกลมและมีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ใกล้เคียงกับกรวดคละขนาด เพื่อใช้จำลองเป็นชั้นหินปิดทับในแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งคุณสมบัติของอนุภาคดังกล่าวได้มาจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง และการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดกรวด

จากการวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดกรวดพบว่ามีขนาด 1.0–9.5 มิลลิเมตร จึงได้กำหนดให้อนุภาคทรงกลมที่ใช้จำลองเป็นชั้นหินปิดทับในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีรัศมีเฉลี่ย 1.0–4.75 มิลลิเมตร และมีค่า Poisson's ratio เท่ากับ 0.20 ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของเม็ดกรวด กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอนุภาคทรงกลมที่ใช้จำลองเท่ากับ 0.75 ซึ่งหาได้จาก

$$\text{Friction coefficient} = \tan \phi$$

โดยที่ ϕ คือค่ามุมของความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบกำลังเฉือนแบบโดยตรง สำหรับค่าความแข็งดึงระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคทรงกลมในแนวเฉือนและในแนวตั้งฉากเท่ากับ 42 MN/m และ 3.64 MN/m ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้ได้มาจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเช่นเดียวกัน โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่ลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก และจำนวนของอนุภาคทรงกลมจะถูกกำหนดตามระดับความลึกของแต่ละการทดสอบ

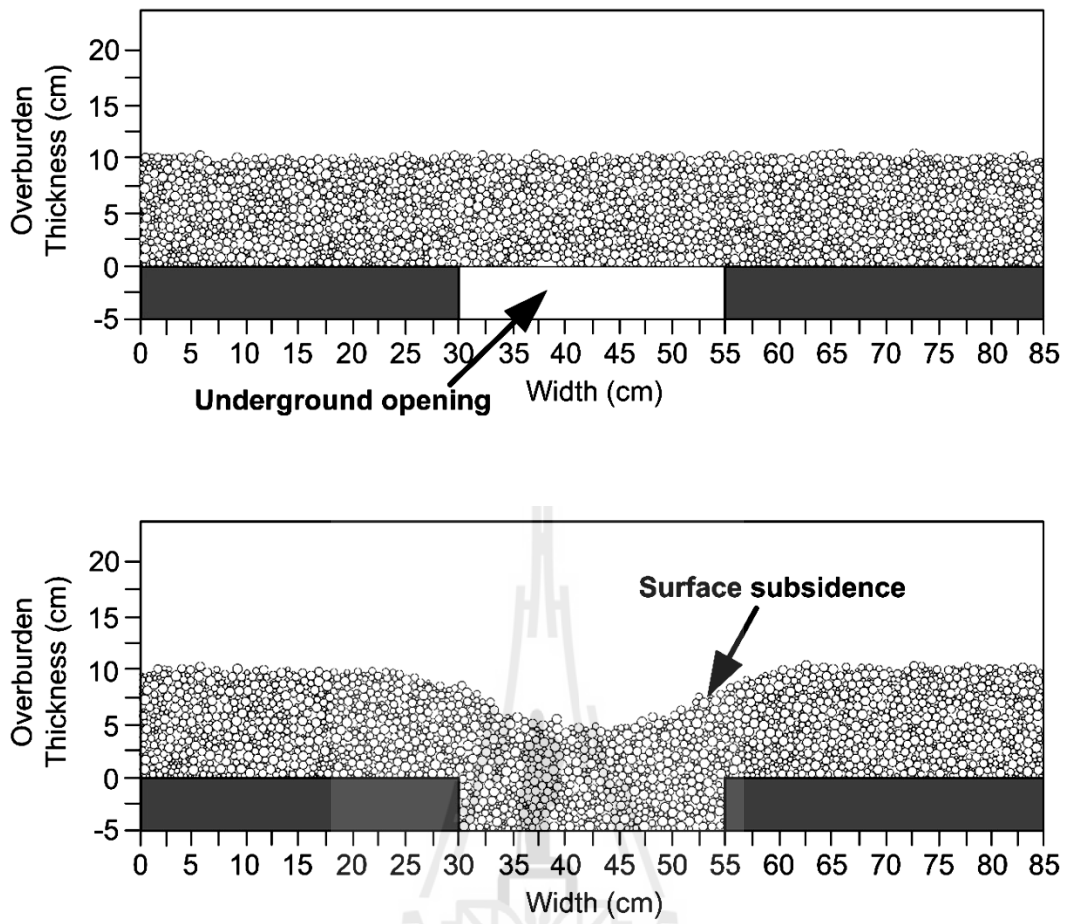
สำหรับขอบเขตของช่องเหมืองในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะกำหนดให้มีขอบเขตเดียวกับในแบบจำลองทางกายภาพ คือให้มีความลึกสูงสุดเท่ากับ 20 เซนติเมตร ความกว้างสูงสุดเท่ากับ 25 เซนติเมตร และความสูงมากที่สุดเท่ากับ 5 เซนติเมตร แต่ไม่สามารถกำหนดความยาวของช่องเหมืองได้เนื่องจากเป็นการจำลองการทรุดตัวในสองมิติ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานระหว่างอนุภาคทรงกลมและผนังช่องเหมืองเท่ากับ 0.6

7.4 ผลของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลจากการจำลองการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับจากโปรแกรม PFC^{2D} ไม่สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากแบบจำลองทางกายภาพได้โดยตรง เนื่องจากการทดสอบในแบบจำลองทางกายภาพเป็นแบบสามมิติ คือมีการผันแปรความลึก ความกว้าง ความสูง และความยาวของช่องเหมืองใต้ดิน แต่สำหรับการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เป็นเพียงการจำลองในสองมิติเท่านั้น จึงไม่สามารถทำการผันแปรความยาวของช่องเหมืองใต้ดินได้ ตารางที่ 7.1 แสดงตัวแปร ค่าคงที่ และจำนวนอนุภาคทรงกลมที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ รูปที่ 7.1 แสดงพื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนและหลังการจำลองช่องเปิดใต้ดินโดยใช้โปรแกรม PFC^{2D}

ตารางที่ 7.1 ตัวแปรต่างๆ ที่มีการผันแปรในแต่ละชุดการจำลองทางคอมพิวเตอร์

รูปแบบการทดสอบ	ตัวแปรในการทดสอบ			จำนวนอนุภาค ทรงกลม
	D (cm)	W (cm)	H (cm)	
ผลกระทบด้านความลึก (D)	5	25	5	1200
	7.5			1800
	10			2400
	12.5			3000
	15			3600
	17.5			4200
	20			4800
ผลกระทบด้านความกว้าง (W)	5	5	5	1200
		10		
		15		
		20		
		25		
ผลกระทบด้านความสูง (H)	5	5	1	1200
			2	
			3	
			4	
			5	



รูปที่ 7.1 พื้นผิวของชั้นหินปิดทับก่อนและหลังการจำลองช่องเปิดใต้ดินโดยใช้โปรแกรม PFC^{2D}

อย่างไรก็ตามเมื่อไม่มีการพิจารณาถึงความยาวของช่องเหมือนใต้ดิน พบว่าผลการจำลองที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางกายภาพ กล่าวคือ มุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความลึกและความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน ตารางที่ 7.2 และตารางที่ 7.3 แสดงค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับภายใต้การผันแปรความลึกและความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน ตามลำดับ รูปที่ 7.2 ถึงรูปที่ 7.8 แสดงลักษณะพื้นผิวที่เกิดการทรุดตัวหลังจากการจำลองช่องเหมือนใต้ดิน โดยทำการผันแปรความลึกของช่องเหมือน ในขณะที่ความกว้างและความสูงของช่องเหมือนมีค่าคงที่ ตามลำดับ รูปที่ 7.9 ถึงรูปที่ 7.13 แสดงลักษณะพื้นผิวที่เกิดการทรุดตัวหลังจากการจำลองช่องเหมือนใต้ดิน โดยทำการผันแปรความกว้างของช่องเหมือน ในขณะที่ความลึกและความสูงของช่องเหมือนมีค่าคงที่ นอกจากนี้มุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของช่องเหมือนใต้ดินดังแสดงในตาราง 7.4 ส่วนรูปที่ 7.14 ถึง 7.18 แสดงลักษณะพื้นผิวที่เกิดการทรุดตัวหลังจากการจำลองช่องเหมือนใต้ดิน โดยทำการผันแปรความสูงของช่องเหมือน ในขณะที่ความลึกและความกว้างของช่องเหมือนมีค่าคงที่

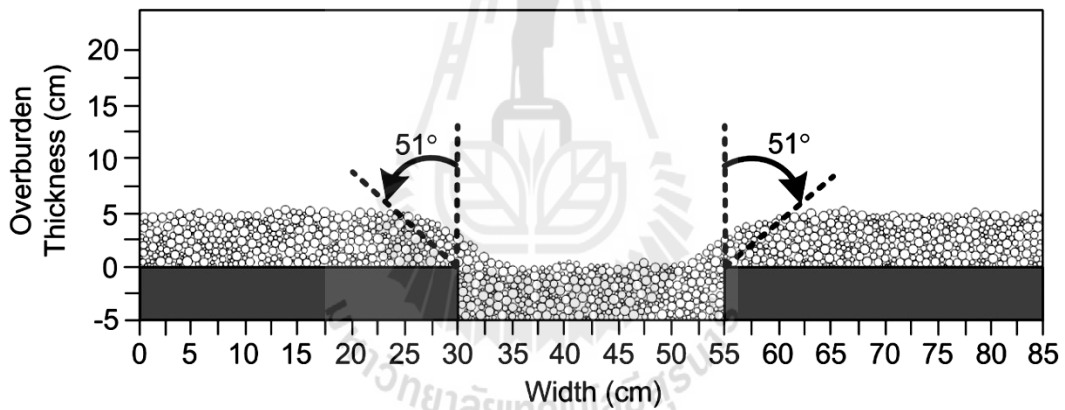
เหตุผลอีกประการหนึ่งที่ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพคือ อนุภาคทรงกลมที่ใช้ในการจำลองเป็นชั้นหินปิดทับในโปรแกรม PFC^{2D} มีความสมบูรณ์สม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิวเมื่อเทียบกับเม็ดกรวดที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีพื้นผิวขรุขระ และอาจเกิดการแตกหักในขณะที่ทำการทดสอบได้

ตารางที่ 7.2 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับโดยมีการผันแปรความลึกของช่องเหมือนใต้ดิน

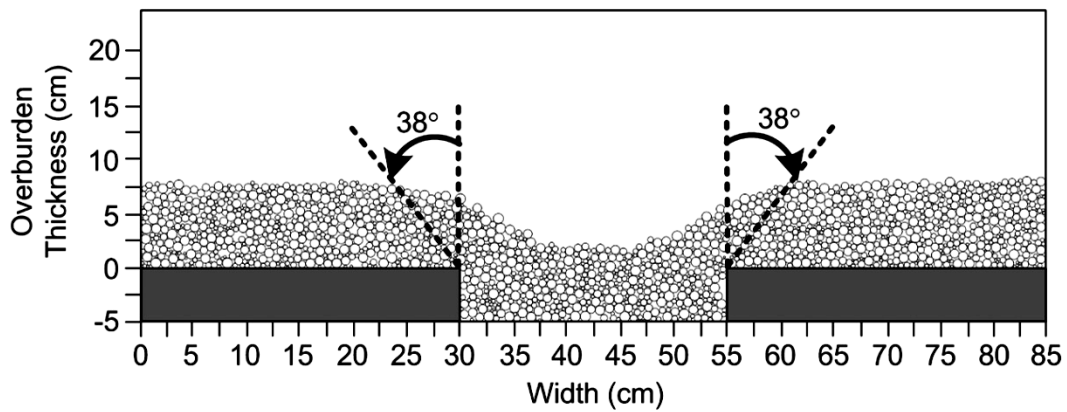
ตัวแปรในการทดสอบ			γ (degrees)
D (cm)	W (cm)	H (cm)	
5	25	5	50.9
7.5			37.6
10			33.1
12.5			25.8
15			18.3
17.5			16.3
20			13.8

ตารางที่ 7.3 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับโดยมีการผันแปรความกว้างของช่องเหมือนใต้ดิน

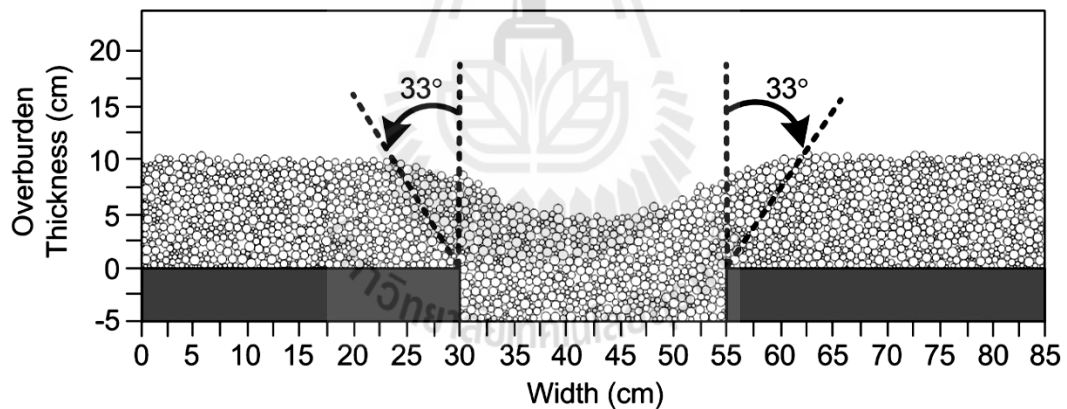
ตัวแปรในการทดสอบ			γ (degrees)
W (cm)	D (cm)	H (cm)	
5	5	5	40.5
10			39.3
15			35.3
20			33.9
25			32.8



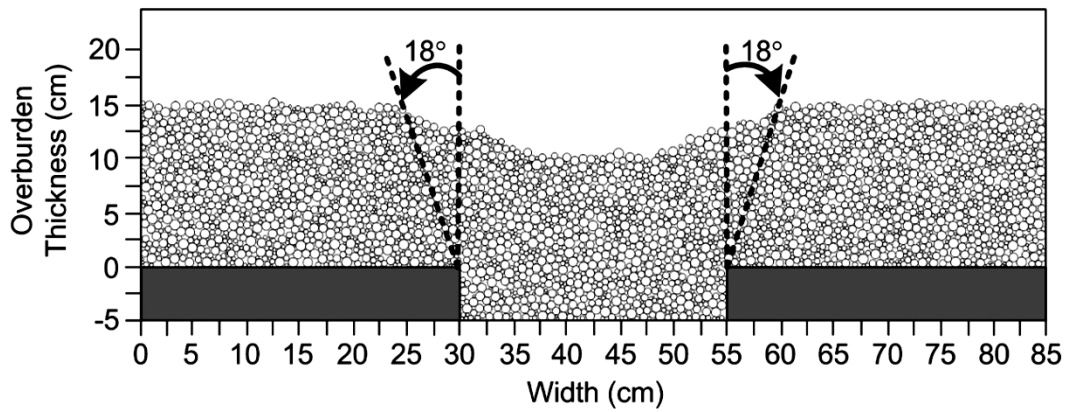
รูปที่ 7.2 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



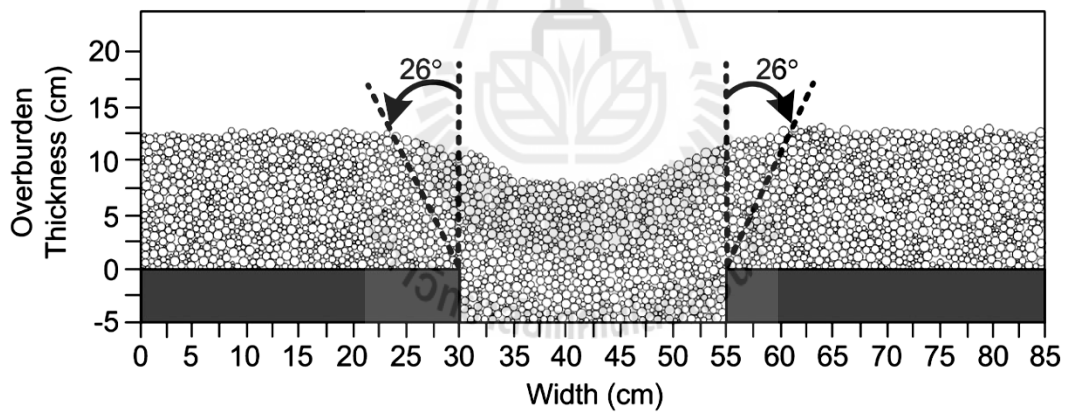
รูปที่ 7.3 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



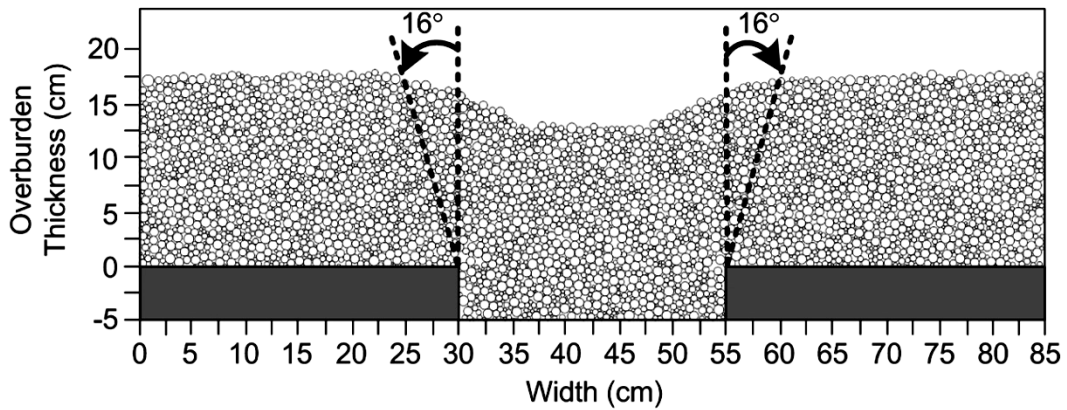
รูปที่ 7.4 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิด เพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



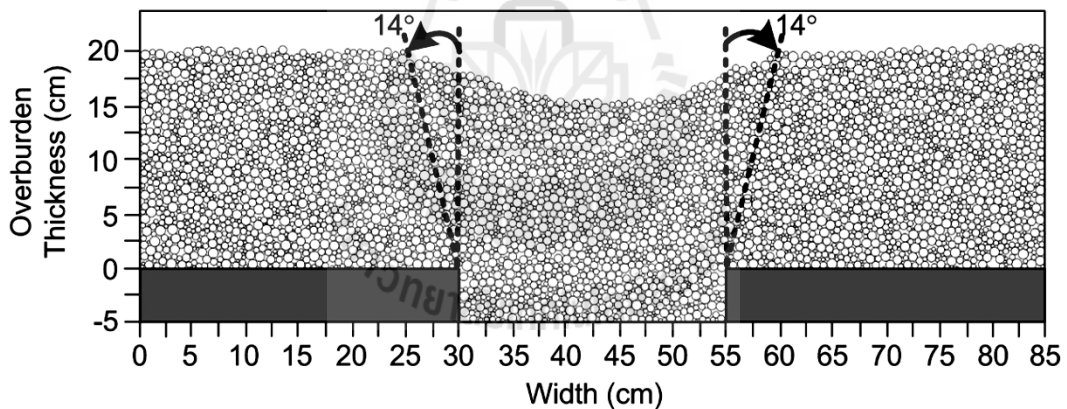
รูปที่ 7.5 พื้นที่ผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ



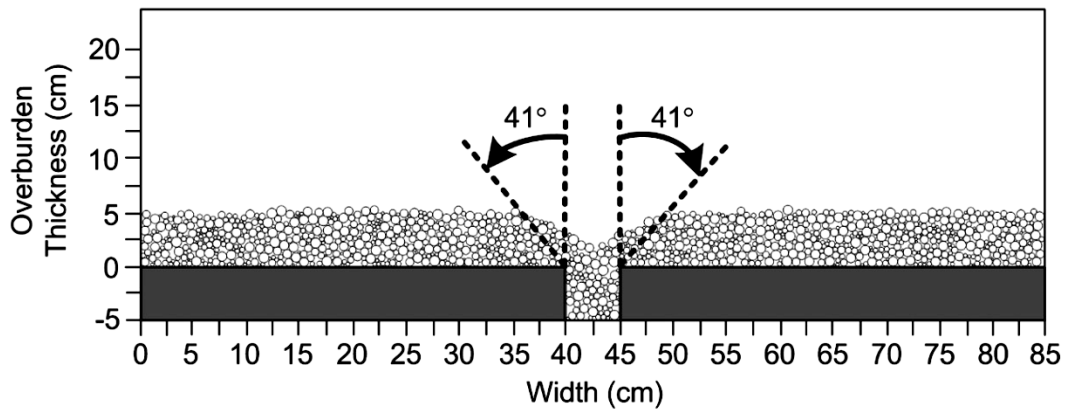
รูปที่ 7.6 พื้นที่ผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



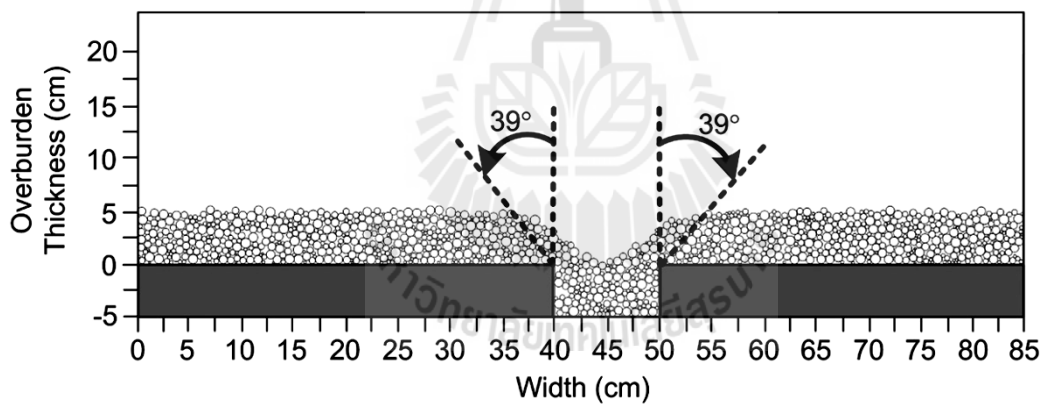
รูปที่ 7.7 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 17.5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



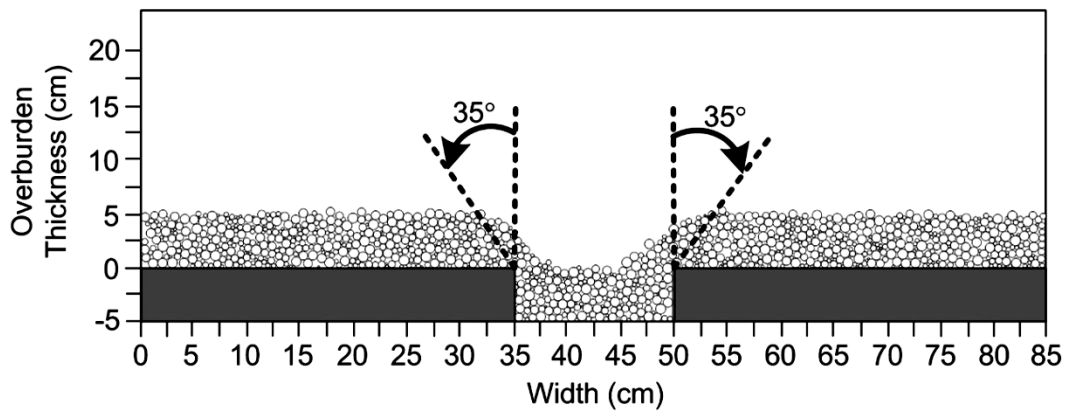
รูปที่ 7.8 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความกว้างเท่ากับ 25 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



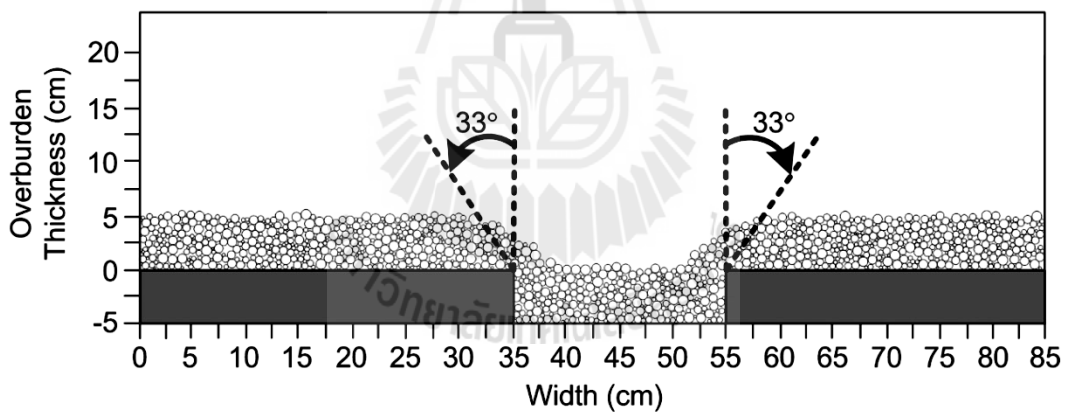
รูปที่ 7.9 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



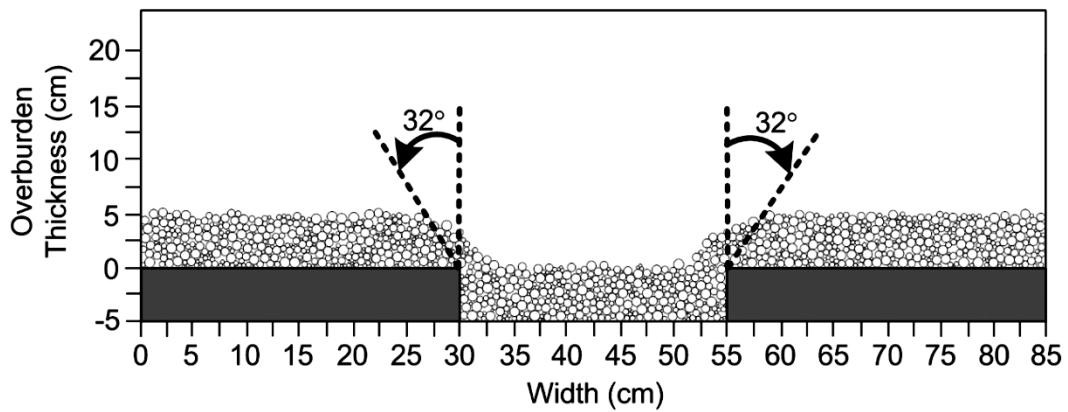
รูปที่ 7.10 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 10 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 7.11 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 15 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



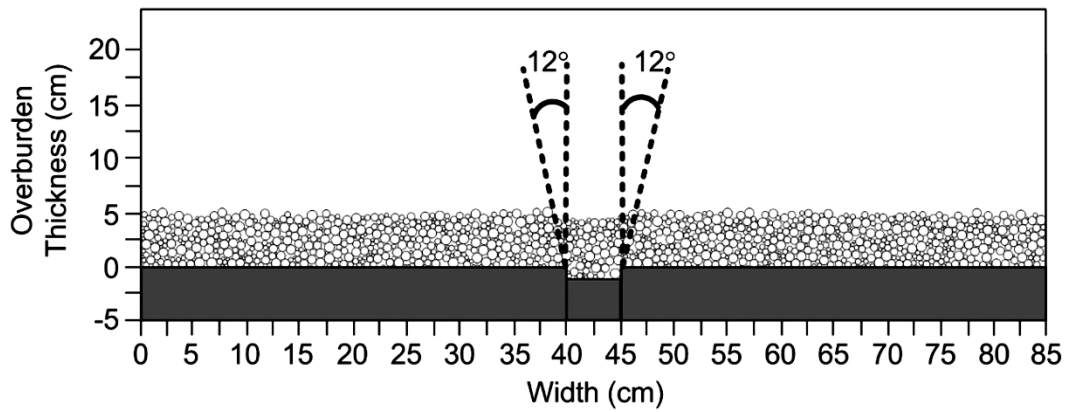
รูปที่ 7.12 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร



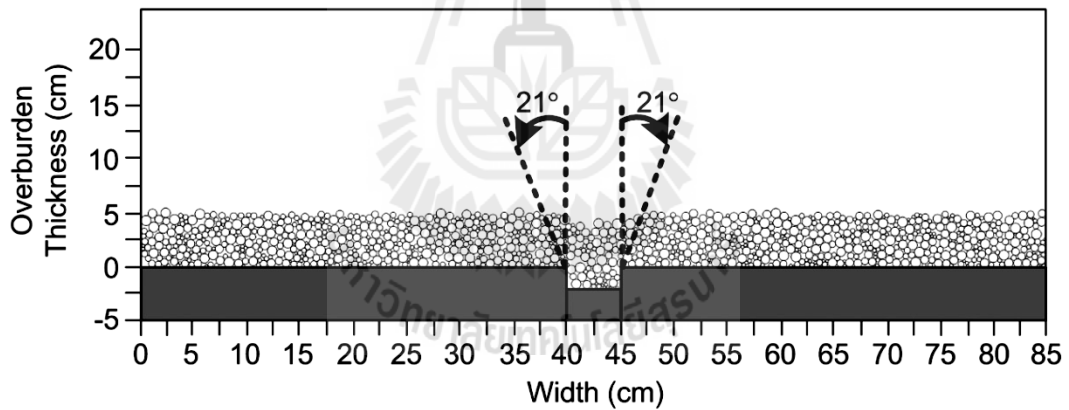
รูปที่ 7.13 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 25 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความสูงเท่ากับ 5 เซนติเมตร

ตารางที่ 7.4 ผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับโดยมีการผันแปรความสูงของช่องเหมือนใต้ดิน

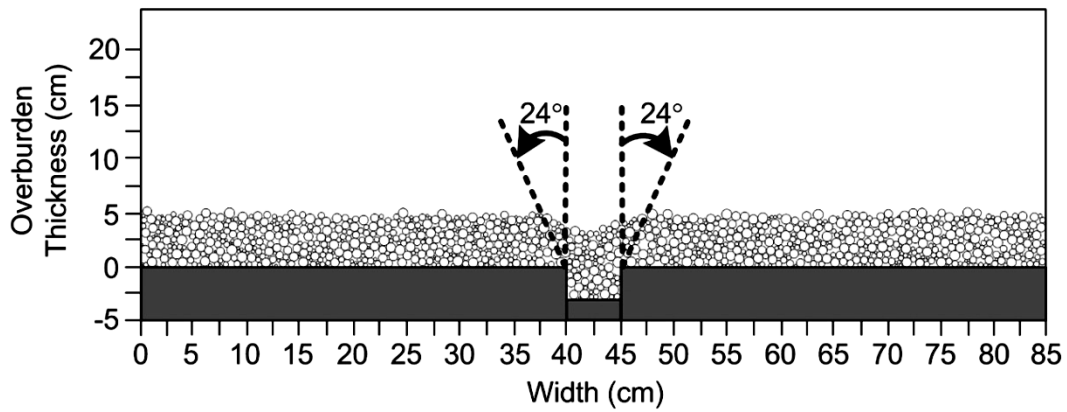
ตัวแปรในการทดสอบ			γ (degrees)
H (cm)	D (cm)	W (cm)	
1	5	5	12.5
2			21.2
3			24.1
4			34.9
5			40.9



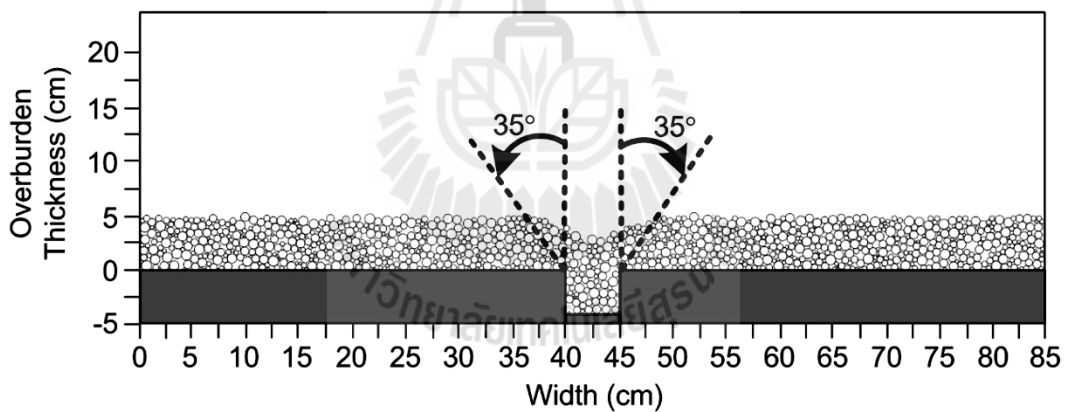
รูปที่ 7.14 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 1 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร



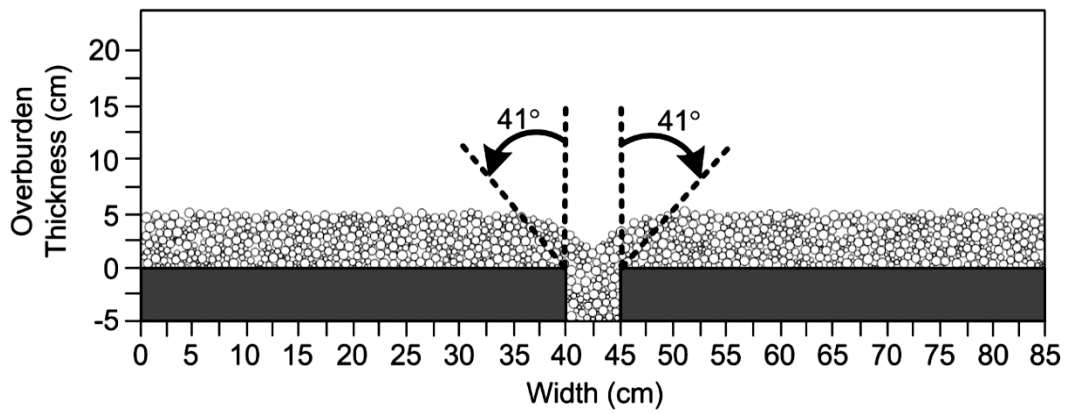
รูปที่ 7.15 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 2 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 7.16 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 3 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 7.17 พื้นผิวการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมือนใต้ดินเท่ากับ 4 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 7.18 พื้นผิวการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเปิดเพื่อหาผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดินเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ช่องเหมืองมีความลึกเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 5 เซนติเมตร



บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

8.1 สรุปผลการวิจัย

ปัญหาแผ่นดินทรุดเป็นปัญหาที่ได้ยินกันบ่อยครั้งตามสื่อต่างๆ ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักส่งผลกระทบต่อผู้คน สัตว์เลี้ยง ที่อยู่อาศัย รวมถึงพื้นที่ทางการเกษตร โดยสาเหตุหนึ่งของการเกิดแผ่นดินทรุดเกิดจากการทำเหมืองใต้ดิน ดังนั้นการคาดคะเนขอบเขตของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดินจึงถือเป็นสิ่งจำเป็นที่จะสามารถลดอันตรายและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้

การคาดคะเนขอบเขตการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดินสามารถคำนวณได้อย่างคร่าวๆ จากค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ โดยมุมดังกล่าวจะถูกประเมินจากค่ามุมเสียดทานของชั้นหินปิดทับ ความลึก และความกว้างของช่องเหมือง ซึ่งเป็นค่าที่มีช่วงกว้างทำให้ไม่สามารถกำหนดมุมการไหลของชั้นหินปิดทับที่แน่นอนได้ อีกทั้งในภาคสนามยังไม่สามารถตรวจวัดค่ามุมที่แท้จริงได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์โครงสร้างทดสอบการทรุดตัวในสามมิติเพื่อจำลองลักษณะการทรุดตัวของรูปร่างลักษณะของช่องเหมืองใต้ดินที่แตกต่างกัน โดยทำการตรวจวัดพื้นผิวของการทรุดตัวเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมการไหลของชั้นหินปิดทับกับองค์ประกอบของช่องเหมืองใต้ดิน (ความกว้าง ความยาว ความสูง และความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน) ซึ่งจะคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ โดยวัสดุที่นำมาใช้จำลองเป็นชั้นหินปิดทับในงานวิจัยนี้คือเม็ดกรวดคละขนาด ผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพได้นำมาคำนวณองค์ประกอบการทรุดตัวด้วย Profile function พร้อมทั้งนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนไหลของผิวดินด้วยโปรแกรม PFC^{2D}

ผลที่ได้จากการทดสอบการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากผลกระทบด้านความลึกของช่องเหมืองใต้ดินระบุว่า ถ้าช่องเหมืองมีความลึกจากผิวดินมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือชั้นหินปิดทับมีความหนามากจะส่งผลให้การทรุดตัวของผิวดินมีค่าน้อย กล่าวคือ ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดินจะลดลง หากพิจารณาถึงผลกระทบด้านความสูงของช่องเหมืองใต้ดินจะพบว่า เมื่อช่องเหมืองมีความสูงมากขึ้นจะทำให้ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อสังเกตในแต่ละระดับความลึกจะพบว่า ถ้าช่องเหมืองอยู่ในระดับลึกมาก ความสูงของช่องเหมืองจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการทรุดตัวของผิวดิน ในทางกลับกัน ถ้าช่องเหมืองอยู่ในระดับตื้น ความสูงของช่องเหมืองจะมีผลต่อค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการทดสอบเพื่อหาผลกระทบด้านความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินระบุว่า เมื่อช่องเหมืองมีความกว้างมากขึ้นจะทำให้ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับลดลง โดยบริเวณผนังของการทรุดตัวจะมีลักษณะสูงชัน และแผ่ขยายอาณาเขตการทรุดตัวตาม

การเพิ่มขึ้นของความกว้างช่องเหมือง และจากการศึกษาผลกระทบด้านความยาวของช่องเหมืองใต้ดินพบว่า การเพิ่มขึ้นในแนวยาวของช่องเหมืองในขณะที่ความลึกและความกว้างมีค่าคงที่จะมีผลต่อมุมการไหลของชั้นหินปิดทับน้อยมาก โดยมุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเริ่มคงที่เมื่อช่องเหมืองมีความยาวเป็นสามเท่าของความกว้างช่องเหมืองใต้ดิน ซึ่งผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม PFC^{2D}

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน ดังนั้นผลการศึกษาลักษณะการทรุดตัวของผิวดินภายใต้การผันแปรองค์ประกอบของช่องเหมืองใต้ดินอาจไม่เป็นไปตามที่กล่าวไว้ในข้างต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับที่เปลี่ยนแปลงไป

8.2 ข้อเสนอแนะ

1) สำหรับการวิจัยในอนาคตควรมีการเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่หลากหลาย เช่น ทราย ทรายแป้ง วัสดุที่มีความยืดหยุ่นหรือบล็อกหินที่สามารถจำลองรอยแตกในชั้นหินปิดทับ โดยมีการผันแปรรูปร่างของช่องเหมืองใต้ดินในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นการศึกษาขอบเขตและลักษณะการทรุดตัวที่แตกต่างกันในแต่ละวัสดุภายใต้สภาวะการทรุดตัวที่ต่ำกว่าจุดวิกฤต (Sub-critical) การทรุดตัวที่จุดวิกฤต (Critical) หรือการทรุดตัวที่เกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical)

2) ควรมีการจำลองการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับในสามมิติด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบลักษณะและขอบเขตการทรุดตัวกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อย่างใกล้เคียงมากที่สุด

บรรณานุกรม

- Adhikary, D. P., and Dyskin, A. V. (1997). Modelling the deformation of underground excavation in layered rock masses. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 34(3): 714–719.
- Aracheeploha, S., Horkaew, P., and Fuenkajorn, K. (2009). Prediction of cavern configurations from subsidence data. In **Proceedings of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics**. Chonburi: Suranaree University of Technology. 116–176.
- Asadi, A., Shahriar, K., Goshtasbi, K., and Najm, K. (2005). Development of new mathematical model for prediction of surface subsidence due to inclined coal-seam mining. **J.S. Afr. Inst. Min. Metall** 105: 15–20.
- Crowell, D. L. (2010). Mine subsidence. **Ohio Geology** 12: 1–2.
- Cui, X., Miao, X., Wang, J., Yang, S., Liu, H., Song, Y., Liu, H., and Hu, X. (2000). Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci** 37(4): 615–627.
- Donnelly, L. J., Cruz, H. D. L., Asmar, I., Zapata, O., and Perez, J. D. (2001). The monitoring and prediction of mining subsidence in the Amaga, Angelopolis, Venecia and Bolombolo Regions, Antioquia, Colombia. **Engineering Geology** 59(1–2): 103–114.
- Duk-Won, P., and Jiliang, L. (2004). Subsidence Simulation Using Laser Optical Triangulation Distance Measurement Devices. In **6th North America Rock Mechanics Symposium**. Texas.
- Ge, H., and Jackson, M. P. A. (1998). Physical modeling of structures formed by salt withdrawal; implications for deformation caused by salt dissolution. **AAPG Bulletin** 82(2): 228–250.
- Indraratna, B., and Ranjith, P. G. (2001). Laboratory measurement of two-phase flow parameters in rock joints based on high pressure triaxial testing. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** 127(6): 530–542.

- Itasca, 2008a, **PFC2D—Particle Flow Code in 2 Dimensions, Version 4.0**, User Manual, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA.
- Ren, G., and Li, J. (2008). A study of angle of draw in mining subsidence using numerical modeling techniques. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering** 13: 1–14.
- Shahriar, K., Amoushahi, S., and Arabzadeh, M. (2009). Prediction of surface subsidence due to inclined very shallow coal seam mining using FDM. In **Coal Operators Conference**. 130–139.
- Shu, D. M., and Bhattacharyya, A. K. (1993). Prediction of sub–surface subsidence movements due to underground coal mining. **Geotechnical and Geological Engineering** 11(4): 221–234.
- Singh, M. M., (1992). **Mine subsidence**. In: SME Mining Engineering Handbook. Hartman, H.L. (ed). Society for Mining Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, pp. 938–971.
- Stimpson, B. (1979). Simple physical modelling technique for the demonstration of interaction between underground openings. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts** 16(3): 217–219.
- Tan, Z., Li, P., Yan, L., and Deng, K. (2009). Study of the method to calculate subsidence coefficient based on SVM. **Procedia Earth and Planetary Science** 1(1): 970–976.
- Wen–Xiu, L., Lin, L., and Lan–Fang, D. (2010). Fuzzy probability measures (FPM) based non–symmetric membership function: Engineering examples of ground subsidence due to underground mining. **Applications of Artificial Intelligence** 23(3): 420–431.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์