



รหัสโครงการ SUT7-719-59-12-69

รายงานการวิจัย

การจำลองเชิงกายภาพและเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของลำดับการ
ขุดเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินที่เกินกว่าจุดวิกฤต

(Physical and Numerical Modelling to Access the Effects of Mining
Sequence on Super-Critical Subsidence)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-12-69

รายงานการวิจัย

การจำลองเชิงกายภาพและเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของลำดับการ
ขุดเจาะต่อการทรุดตัวของผิวดินที่เกินกว่าจุดวิกฤต

(Physical and Numerical Modelling to Access the Effects of Mining
Sequence on Super-Critical Subsidence)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและพิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2560



บทคัดย่อ

การศึกษามุ่งเน้นด้านผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องเหมือง และการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับภายใต้สภาวะที่มีการทรุดตัวเกินกว่าจุดวิกฤตด้วยการใช้โครงจำลองแบบย่อส่วน ผลการทดสอบระบุว่ามุมการไหลและอัตราส่วนระหว่างการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความสูงของช่องเหมืองเพิ่มขึ้นภายใต้ความสูงของช่องเหมืองมีค่าคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร และความลึกของช่องเหมืองผันแปรจาก 50 ถึง 200 มิลลิเมตร ความต่อเนื่องของลำดับการขุดเจาะจากตรงกลางแผงเหมืองจะให้มุมการไหลน้อยที่สุดและมีค่าการทรุดตัวมากที่สุด ขณะที่การขุดเจาะจากขอบไปยังตรงกลางของแผงเหมืองจะส่งผลให้ค่าของมุมการไหลมากที่สุดและการทรุดตัวบนผิวดินน้อยที่สุด ภายใต้การผันแปรการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับส่งผลให้มุมการไหลที่ส่วนบนและส่วนล่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนระหว่างการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองมีค่าลดลง ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง PFC^{2D} มีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพในทุกกรณี วิธีการเชิงประจักษ์ที่ถูกรวบรวมโดย Rankin ไม่เหมาะสำหรับการคำนวณลักษณะการทรุดตัวของลำดับการทำเหมืองที่แตกต่างกันและชั้นหินปิดทับแบบเอียง ผลงานวิจัยนี้อาจนำไปใช้ในการประเมินลักษณะการทรุดตัวภายใต้การผันแปรวิธีการขุดเจาะเหมืองใต้ดินที่ได้รับผลกระทบจากลำดับการขุดเจาะและการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ

Abstract

The study focuses on the effects of the mining sequences and overburden slope on the super-critical condition subsidence by using scale-down test model. The results indicate that the angle of draw and S_{\max}/H ratio decrease with increasing Z/H ratio when the opening height (H) is maintained constant at 50 mm and the opening depth (Z) varies from 50 mm to 200 mm. Consecutive mining sequence from the center of mine panel gives the lowest angle of draw and highest subsidence value while excavation from the edge to center of the panel induces the largest angle of draw and lowest subsidence. Under various overburden slopes, the angle of draw on up-slope and down-slope increases with increasing slope angle. The S_{\max}/H ratio decreases with increasing Z/H ratio and slope angle. The results obtained from PFC^{2D} simulations are higher than those of the physical model for all cases. The empirical solution provided by Rankin does not allow for subsidence profile calculation of different mining sequences and overburden slopes. The findings may be used to evaluate the subsidence profile as affected by excavation sequence and overburden slope in a heavily fractured rock mass.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การคำนวณการหลุดตัวของผิวดิน.....	7
2.1.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน.....	7
2.1.2 ซอฟต์แวร์ PFC ^{2D}	9
2.2 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 การทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ.....	13
3.1 วัตถุประสงค์.....	13
3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	13
3.3 การทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ.....	13
3.3.1 ลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน.....	16
3.3.2 การเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	23
4.1 วัตถุประสงค์.....	23
4.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	23
4.2.1 ลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน.....	23
4.2.2 การเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ.....	28
บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และแบบจำลองทางกายภาพ	33
5.1 วัตถุประสงค์.....	33
5.2 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และ แบบจำลองทางกายภาพ.....	33
บทที่ 6 ปริมาตรของร่องการทรุดตัว	39
6.1 วัตถุประสงค์.....	39
6.2 การศึกษาเกี่ยวกับร่องการทรุดตัวในอดีต.....	39
6.3 การเปรียบเทียบรูปร่างของร่องการทรุดตัวบนผิวดิน.....	40
6.4 ปริมาตรของร่องการทรุดตัวบนผิวดิน.....	40
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต	43
7.1 การอภิปรายผล.....	43
7.2 สรุปผลการวิจัย.....	44
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม	47
ประวัตินักวิจัย	51

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ.....	14
4.1	ผลจากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ PFC ^{2D} ของลำดับการขุดเจาะช่อง เหมืองใต้ดิน กำหนดความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 50 มิลลิเมตร.....	26
4.2	การจำลองทางคอมพิวเตอร์ของชั้นหินปิดทับที่มีการเอียง.....	28
4.3	มุมของการไหลและการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับแบบเอียง.....	32



สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงหรือช่องเหมืองและ ธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน.....	8
2.2 ลักษณะของการตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวของความลาดชันเพื่อการทำเหมืองใต้ดิน.....	11
3.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับ.....	14
3.2 โครงทดสอบ Trap door apparatus.....	15
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองทางกายภาพและการวิเคราะห์โดยที่ W คือความกว้างของ ช่อง.....	15
3.4 รูปแบบการจำลองลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองในแต่ละกรณี.....	16
3.5 ตัวอย่างภาพถ่ายตัดขวาง แสดงการทรุดตัวของพื้นผิวสำหรับลำดับการขุดเจาะเหมืองแร่ที่ แตกต่างกัน.....	17
3.6 อัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง (S_{max}/H) ในฟังก์ชันของอัตราส่วน ความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง (Z/H).....	19
3.7 มุมของการไหล (γ) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของ ช่องเหมือง (Z/H).....	19
3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองรูปแบบทางกายภาพภายใต้ชั้นหินปิดทับที่มีการเอียงตัว.....	20
3.9 ภาพถ่ายตัดขวางร่องของการทรุดตัวของพื้นผิวที่มีการเอียงตัวแตกต่างกัน.....	21
3.10 อัตราส่วนของทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง.....	22
3.11 มุมของการไหลในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่อง เหมืองภายใต้การผันแปรความชันของชั้นหินปิดทับ.....	22
4.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินก่อนการจำลอง ช่องเหมืองใต้ดิน.....	24
4.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินหลังการจำลอง ช่องเหมืองใต้ดิน.....	25
4.3 อัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนา ของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง.....	27
4.4 ตัวอย่างการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับก่อนการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน.....	29
4.5 ตัวอย่างการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน.....	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 อัตราส่วนการทุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความลึกของช่องเหมือง (a) และมุมของการไหลในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความลึกของช่องเหมือง (b).....	31
5.1 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพในเชิงของค่าการทุดตัวสูงสุดที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน.....	34
5.2 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพในเชิงของค่ามุมการไหลที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน.....	35
5.3 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพในเชิงของค่าการทุดตัวสูงสุดที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรความลาดเอียงของชั้นหินปิดทับ.....	36
5.4 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพในเชิงของค่ามุมการไหลบริเวณด้านบนที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ.....	37
5.5 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพในเชิงของค่ามุมการไหลบริเวณด้านล่างที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ.....	38
6.1 การเปรียบเทียบปริมาตรของร่องการทุดตัวบนผิวดินที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพและวิธีการเชิงประจักษ์.....	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การออกแบบการขุดเจาะเหมืองแร่ใต้ดินจะต้องคำนึงถึงความคุ้มทุน (Extraction ratio) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ จะต้องออกแบบให้มีขนาดห้องใหญ่ที่สุดเพื่อนำแร่ออกมาให้มากที่สุด และในขณะเดียวกันต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกินเกณฑ์มาตรฐานของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กำหนดไว้ โดยปัญหาหลักที่มักเกิดขึ้นหลังการขุดเจาะเสร็จสิ้นคือ เกิดการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากการพังทลายของชั้นหินปิดทับ (Overburden) บริเวณหลังคาลงไปยังช่องเหมือง การทรุดตัวดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคาร บ้านเรือน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ เช่น รางรถไฟ ท่อน้ำขนาดใหญ่หรือแหล่งน้ำธรรมชาติบนผิวดินได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดินประกอบด้วยหลายปัจจัย เช่น ขนาดความกว้าง ความยาว ความสูงของช่องเหมือง ลำดับการขุดเจาะช่องเหมือง และลักษณะของพื้นผิวหรือการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับด้านบน ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อขนาดและขอบเขตของการทรุดตัวของผิวดินทั้งสิ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประดิษฐ์เครื่องมือที่สามารถจำลองการทรุดตัวในสามมิติขึ้นมาในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและการทำงานของเครื่องมือดังกล่าว ภายใต้สภาวะการทรุดตัวของช่องเหมืองที่มีการพังทลายหรือสภาวะที่ความกว้างของช่องเหมืองเกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical condition) (Thongprapha และคณะ, 2015) โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ศึกษาผลกระทบด้านขนาดของความกว้าง ความยาว และความสูงของช่องเหมือง รวมถึงความหนาของชั้นหินปิดทับ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้มีการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับลำดับการขุดเจาะช่องเหมือง และผลกระทบจากการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับด้านบน ดังนั้น เพื่อให้การคาดคะเนขนาดและขอบเขตการทรุดตัวของบริเวณผิวดินมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นหรือใกล้เคียงกับสภาวะที่จะเกิดขึ้นจริงในภาคสนามจึงเป็นที่มาของการศึกษาในครั้งนี้ ทั้งนี้เพื่อหาผลกระทบดังกล่าวต่อขนาดและขอบเขตการทรุดตัวซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการตรวจสอบการออกแบบและการทรุดตัวของอันเนื่องมาจากการทำเหมืองใต้ดินในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน และการเอียงตัวของผิวดินต่อขนาดและขอบเขตของการทรุดตัวของผิวดิน โดยอาศัยแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

- 2) เพื่อหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบการทрудตัว (มุมการไหล การทрудตัวสูงสุด และ ปริมาตรของร่องการทрудตัว) ภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะช่องเหมือนไต้ดิน และการเอียงตัวของผิวดิน
- 3) เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) การทดสอบเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการได้ใช้โครงทดสอบจำลองการทрудตัวของผิวดิน (Trap door apparatus) ในสามมิติที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นจากงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ของ Thongprapha และคณะ (2015)
- 2) ช่องเหมือนไต้ดินมีการวางตัวในแนวระนาบ
- 3) แบบจำลองทางกายภาพใช้วัสดุเป็นหินกรวดทรายขนาด 2 มิลลิเมตร ในการจำลองชั้นหินปิดทับ
- 4) การจำลองอยู่ภายใต้สภาวะการทрудตัวของช่องเหมือนไต้ที่มีการพังทลายหรือสภาวะที่มีความกว้างของช่องเหมือนไต้เกินกว่าจุดวิกฤต
- 5) มีการจำลองการทрудตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องและผลกระทบของการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับด้านบน
- 6) การศึกษาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องได้กำหนดความหนาของชั้นหินปิดทับให้ผันแปรตั้งแต่ 1 ถึง 4 เท่า ของความสูงของช่องเหมือนไต้ โดยกำหนดความสูง ความกว้าง และความยาวของช่องเหมือนไต้เท่ากับ 50, 50 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ
- 7) การศึกษาผลกระทบของการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับได้กำหนดความหนาของชั้นหินปิดทับผันแปรตั้งแต่ 2 ถึง 4 เท่า ของความสูงของช่องเหมือนไต้ โดยกำหนดมุมการเอียงตัวของผิวดินเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 องศา และกำหนดความสูง ความกว้าง และความยาวของช่องเหมือนไต้เท่ากับ 50, 50 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ
- 8) ใช้โปรแกรม Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC^{2D}) ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 9) ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการและวารสารระดับนานาชาติ

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทрудตัวของช่องเหมือนไต้ที่มีการพังทลายหรือในสภาวะที่มีความกว้างของช่องเหมือนไต้เกินกว่าจุดวิกฤตด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการจำลองการทрудตัวโดยใช้โครงทดสอบการจำลองการทрудตัวของผิวดินในสามมิติ

(Thongprapha และคณะ, 2015) โดยเครื่องมือดังกล่าวได้เคยใช้ในการศึกษาผลกระทบของขนาดช่องเหมือน และความหนาของชั้นหินปิดทับต่อการหลุดตัวของผิวดินในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และในการศึกษาครั้งนี้ได้นำโครงทดสอบดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องเหมือน และการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับต่อค่าการหลุดตัวสูงสุด (S_{max}) มุมการไหล (γ) และปริมาตรของร่องการหลุดตัว โดยใช้หินกรวดทรายจำลองเป็นชั้นหินปิดทับในภาคสนาม ผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Particle Flow Code in 2 Dimensions

การหลุดตัวที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับรูปร่างของช่องเหมือนและคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ รวมไปถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยา ดังนั้น ช่องเหมือนที่มีรูปร่าง คุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ และลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้ลักษณะการหลุดตัวในแนวตั้งและลักษณะบนผิวดินแตกต่างกันไปด้วย

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหรือองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการหลุดตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองใต้ดินภายใต้การผันแปรขนาดและความลึกของช่องเหมือน การเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ ลำดับการทำเหมือง และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบ

ได้นำหินกรวดทรายขนาด 2 มิลลิเมตร มาใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับในแบบจำลองทางกายภาพ โดยก่อนนำไปทดสอบจะต้องล้างให้สะอาดและคัดขนาดตามต้องการ พร้อมนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเพื่อหาค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานของวัสดุ

ขั้นตอนที่ 3 การจำลองการหลุดตัวด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

การจำลองการหลุดตัวของผิวดินได้ใช้โครงทดสอบการหลุดตัวในสามมิติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ และการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะของช่องเหมือนใต้ดินต่อค่าองค์ประกอบการหลุดตัว (มุมการไหล การหลุดตัวสูงสุด และปริมาตรของร่องการหลุดตัว) โดยแบบจำลองทางกายภาพได้กำหนดความสูง ความกว้าง และความยาวของช่องเหมือนให้มีค่าเท่ากับ 50, 50 และ 200 มิลลิเมตร และความหนาของ

ชั้นหินปิดทับจะผันแปรตั้งแต่ 50 ถึง 200 มิลลิเมตร สำหรับการจำลองเพื่อศึกษากระทบของการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับได้ผันแปรมุมเอียงเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 องศา และการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะมีทั้งหมด 4 รูปแบบ โดยการตรวจวัดพื้นผิวการหลุดตัวของผิวดินจะดำเนินการทั้งก่อนและหลังการจำลองช่องเหมือง หลังจากนั้นจึงนำผลการทดสอบมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบการหลุดตัวต่อการผันแปรมุมการเอียงตัวและลำดับการขุดเจาะช่องเหมือง

ขั้นตอนที่ 4 การจำลองการหลุดตัวด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้นำมาใช้คำนวณลักษณะการหลุดตัวของพื้นผิว โดยพิจารณาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินและการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับด้านบน โดยการสร้างแบบจำลองดังกล่าวได้ใช้โปรแกรม Particle Flow Code in 2 Dimensions

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลการทดสอบ

นำผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพในขั้นตอนที่ 3 และผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนที่ 4 มาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือไม่ ถ้าผลการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องกันจึงสรุปได้ว่าสามารถนำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้ในการประเมินเพื่อคาดคะเนผลกระทบของการหลุดตัวของผิวดินได้ ผลการศึกษาสามารถนำมาคาดคะเนขนาดและขอบเขตของการหลุดตัวอันเนื่องมาจากการขุดเจาะช่องเหมืองในรูปแบบต่างๆ หรือคาดการณ์ในกรณีที่ชั้นหินปิดทับมีการเอียงตัว

ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยถูกนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปได้นำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการขุดเจาะเหมืองแร่ใต้ดิน ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้ทำให้ผู้ประกอบการเหมืองแร่สามารถออกแบบการขุดเจาะเพื่อนำแร่ออกมาให้ได้มากที่สุด และในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมขอบเขตและระยะการหลุดตัวของผิวดินได้ อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดปัญหา

ทางด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ผลที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงแก่ประชาชนในพื้นที่ หรือผู้เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองใต้ดินให้เข้าใจถึงกระบวนการเกิด ขนาด และขอบเขตของการหลุดตัวได้อย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับคณาจารย์อย่างน้อย 1 คน

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์โดยตรงกับหลายภาคส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ และการออกแบบการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งหน่วยงานเหล่านี้ได้แก่ กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์และความลาดชันในมวลหิน ศูนย์วิจัย บริษัทเหมืองแร่ และบริษัทที่ปรึกษาทั้งในและต่างประเทศ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์ของการทบทวนวรรณกรรมวิจัยในหัวข้อนี้คือ เพื่อค้นคว้า ศึกษา และสรุป บทความและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการทรุดตัวของดินที่มีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นดินปิดทับเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการและองค์ประกอบสำคัญที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการทรุดตัว รวมไปถึงวิธีการคำนวณ และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ประเมินหรือคาดคะเนการทรุดตัวที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

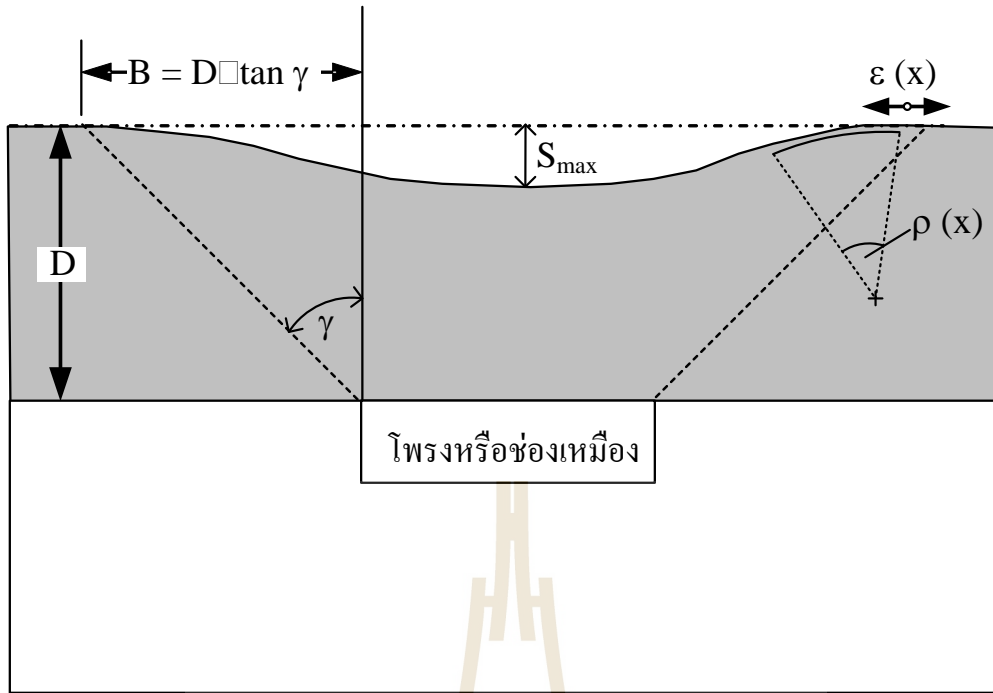
2.1 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน

2.1.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Singh (1992) กล่าวว่า การทรุดตัวเป็นผลจากการถูกรบกวนด้วยความเค้นภายนอก ซึ่งความเค้นที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนที่ของชั้นดินหรือชั้นหิน ขอบเขตของการทรุดตัวจะขึ้นกับขนาดของความเค้นและขนาดของโพรงหรือช่องเหมืองที่จะส่งผลต่อความไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้น การทรุดตัวของผิวดินจึงสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ใต้ดินที่เกิดจากการถล่มในโพรงใต้ดิน การทรุดตัวของผิวดินโดยทั่วไปจะนำมาซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ด้านข้าง

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

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงหรือช่องเหมืองและ
ธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน

องค์ประกอบของการทรุดตัว (Singh, 1992)

1) การทรุดตัวสูงสุด:

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

2) ความชันของผิวดิน:

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

3) ค่าส่วนโค้งของผิวดิน:

$$\rho(x) = S''(x) = S_{\max} \frac{c^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (3)$$

4) การเคลื่อนตัวในแนวนอนของผิวดิน:

$$u(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} \frac{bc}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \quad (4)$$

5) ความเครียดในแนวนอนของผิวดิน:

$$\epsilon(x) = S_{\max} \frac{bc^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (5)$$

2.1.2 ซอฟต์แวร์ PFC^{2D}

PFC^{2D} (Particle flow code in 2 dimensions) ถูกพัฒนาโดยบริษัท Itasca Consulting Group Inc. (2008) โดยซอฟต์แวร์ดังกล่าวเป็นการจำลองการเคลื่อนที่และการตอบสนองของอนุภาคทรงกลมด้วยวิธีดิสครีตอิลิเมนต์ (Distinct Element Method: DEM) ที่ได้อธิบายไว้โดย Cundall and Strack (1979) ซึ่งการใช้งานแบบดั้งเดิมของวิธีนี้คือจะใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด ตัวแทนของอิลิเมนต์จะประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากที่ถูกนำมาทดสอบในเชิงตัวเลข รูปแบบของอนุภาคจะถูกนำมาใช้เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของอิลิเมนต์ ซึ่งในแต่ละสภาวะอนุภาคจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน โดยได้นำวิธีการแบบต่อเนื่อง (Continuum method) มาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีความซับซ้อน (พฤติกรรมของอนุภาคจะได้มาจากการทดสอบแบบจำลองของอนุภาค) ดังนั้น PFC^{2D} จึงถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองปัญหาที่มีความซับซ้อนด้านกลศาสตร์ของแข็ง และการไหลของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเม็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

Thongprapha และคณะ (2015) ได้ศึกษาการทรุดตัวที่เกิดจากช่องเหมืองใต้ดินภายใต้สภาวะที่เกินกว่าจุดวิกฤติ โดยดำเนินการจำลองทั้งเชิงกายภาพและเชิงตัวเลข เพื่อมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของรูปร่างทรงเรขาคณิตของช่องเหมือง ความลึก และขนาดก้อนของชั้นหินปิดทับที่มีผลกระทบต่อมุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุด ในการจำลองเชิงกายภาพของชั้นหินปิดทับได้ใช้กรวดสามขนาดคือ 3, 6 และ 12 มิลลิเมตร ผลการทดสอบบ่งชี้ว่ามุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุดมีค่าลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างขนาดก้อนต่อความกว้างของช่องเหมือง และมุมการไหลเพิ่มขึ้นตามความสูงและความยาวของช่องเหมือง อัตราส่วนระหว่างการทรุดตัวสูงสุดต่อความกว้างของช่องเหมืองและมุมการไหลจะมีค่าคงที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของช่องเหมืองมีค่าเกินกว่า 3 นอกจากนี้ภายใต้รูปร่างของช่องเหมืองที่เหมือนกัน การเพิ่มขึ้นของความลึกของช่องเหมืองส่งผลให้มุมการไหลและการทรุดตัวมีค่าลดลง และผลจากแบบจำลอง PFC^{2D} มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงกายภาพในทุกกรณี

Shahriar และคณะ (2009) ได้ศึกษาและคาดคะเนการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดิน ซึ่งการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองที่มีช่องเหมืองต้น 2 ช่อง ในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวสามารถคาดคะเนการทรุดตัวโดยใช้โปรแกรม Finite Difference Method (FLAC 3D) การคาดคะเนลักษณะการทรุดตัวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทั้งค่าที่ตรวจวัดจริงและจากการคำนวณด้วย Profile function สำหรับการวิเคราะห์จากค่าตัวแปรต่างๆ สามารถระบุตำแหน่งของการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดิน อัตราส่วนความกว้าง (W) ต่อความลึก (H) ที่จุดวิกฤติ (W/H) จะมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 1.4

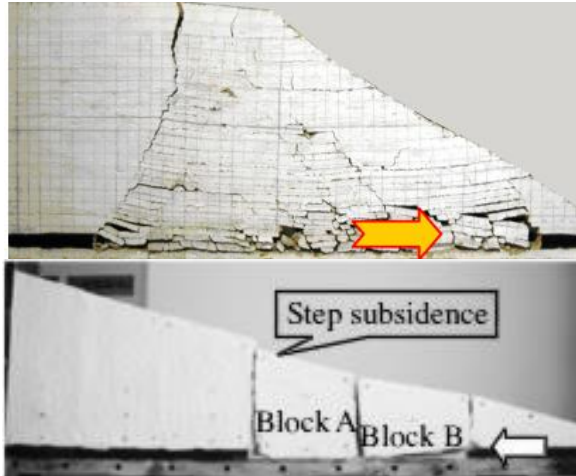
Asadi และคณะ (2005) ได้ศึกษาการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดินในพื้นที่ของเหมือง การคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นถ้ำหินที่อยู่ใต้น้ำที่มีการเอียงตัวและมีความชันมากไม่นิยมเท่ากับการคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นถ้ำหินที่อยู่ในแนวราบ เนื่องจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวสูงทำได้ยาก ทำให้มีการพัฒนาวิธีการคำนวณหรือการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวมีน้อย ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการคำนวณด้วย Profile function แบบใหม่ที่ใช้สำหรับคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัว โดยผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีใหม่นี้จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม

Aracheeploha และคณะ (2009) ได้ศึกษาการคาดคะเนลักษณะของโพรงเกลือใต้ดินโดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินได้มาจากการจำลองการทรุดตัวด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC แล้วนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัว อาทิ ค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ค่าความลาดชันสูงสุด (G) กับขนาดความลึกของโพรงเกลือ (d) เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงเกลือ (w) การยุบตัวของหลังคาโพรง (R_5) และขอบเขตของการทรุดตัว (B) ซึ่งผลลัพธ์จะได้สมการที่ใช้สำหรับคำนวณรูปร่างของโพรงเกลือที่อยู่ใต้ดิน

Alejanoa และคณะ (1999) ได้ศึกษาการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากโครงสร้างของชั้นถ้ำหินที่มีการเอียงตัวที่ต่างกันมากในบริเวณรอยต่อของถ้ำหิน โดยมีลักษณะการเอียงตัวแบบเกือบแนวราบ และเอียงมากเกือบตั้งฉาก ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดการทรุดตัว โดยในขั้นแรกของการคาดคะเนได้ใช้วิธีการจำแนกลักษณะทางกายภาพและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้มีการคำนวณโดยใช้ Profile function, Influence function หรือ Physical model และ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC ที่มีการคำนวณอยู่บนพื้นฐานของการคำนวณแบบ Finite Difference Method (FDM) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยกระบวนการดังกล่าวทำให้ทราบถึงเหตุผลของการทรุดตัวที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเอียงตัวที่ไม่เท่ากันของชั้นถ้ำหิน

Zhang และคณะ (2011) ได้ศึกษาการเคลื่อนตัวของมวลหินที่มีความชันภายใต้การทำเหมืองใต้ดินด้วยแบบจำลองทางกายภาพและการวิเคราะห์ทางทฤษฎี จากการศึกษาพบว่าชั้นหินปิดทับในแนวนอนในการตอบสนองต่อทิศทางการขุดช่องเหมือง โดยมีการจำลองในแง่ของบล็อกกรุปหลายเหลี่ยมเป็นโครงสร้างของชั้นหินปิดทับและมีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวราบและแรงเฉือนที่ขอบของช่องเหมืองในเชิงความสัมพันธ์กับมุมเอียงของชั้นหินปิดทับ (รูปที่ 2.2) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงในแนวนอนมีการลดลงขณะที่มุมบนชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น และมีการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนเมื่อเพิ่มมุมเอียงของชั้นหินปิดทับ

มีทฤษฎีและสมการควบคุมต่างๆ มากมายที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อคาดคะเนลักษณะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดินที่เป็นผลมาจากการทำเหมืองใต้ดินซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Whittaker และคณะ (1985); Wold (1985); Huayang และคณะ (2010); Liu และคณะ (2011); Ghabraie และคณะ (2014), Cui และคณะ (2000) และ Yao และคณะ (1991)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของการตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวของความลาดชันเพื่อการทำเหมืองใต้ดิน
(Zhang และคณะ, 2011)



บทที่ 3

การทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

3.1 วัตถุประสงค์

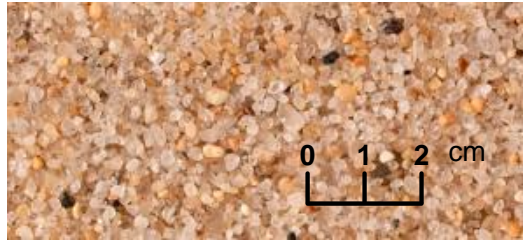
วัตถุประสงค์ของการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพในการศึกษานี้คือ เพื่อประเมินผลกระทบของวิธีการขุดเจาะใต้ดิน (ลำดับการขุดเจาะช่องเหมือง) และการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับที่ส่งผลกระทบต่อมุมการไหล การทรุดตัวสูงสุด รูปร่างและปริมาตรของร่องการทรุดตัว ภายใต้สภาวะที่ความกว้างของช่องเหมืองเกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical condition) บทนี้ได้อธิบายถึงวิธีการทดสอบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบ

3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

นำทรายสะอาดขนาด 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.1) มาใช้เป็นวัสดุการทดสอบเพื่อจำลองเป็นชั้นหินปิดทับในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเม็ดทรายมีอนุภาคขนาดเล็กทำให้ผลกระทบของรูปร่างมีน้อย (Thongprapha และคณะ, 2015) ผลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (Grain size analysis และ direct shear test) ของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นผลการทดสอบของ Thongprapha และคณะ (2015) ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

3.3 การทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

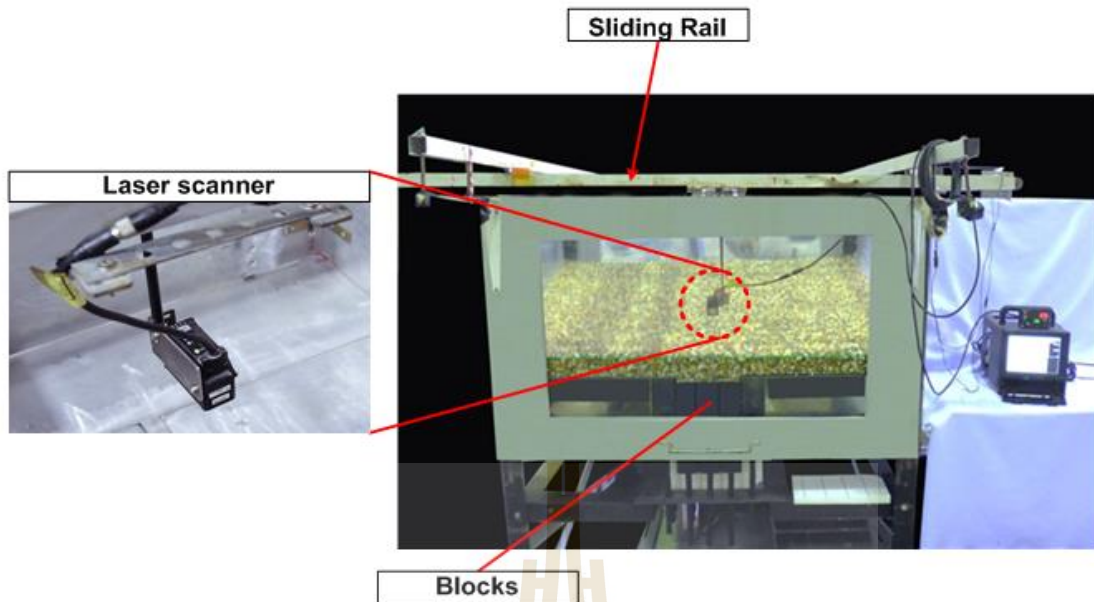
โครงทดสอบ Trap door apparatus (Thongprapha และคณะ, 2015) ได้ถูกนำมาใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยทำการบรรจุทรายสะอาดใส่ในโครงทดสอบให้ได้ระดับความลึกของชั้นหินปิดทับที่กำหนดไว้ ทำการปรับระดับผิวด้านบนให้เรียบเพื่อจำลองเป็นชั้นหินปิดทับก่อนจำลองช่องเหมืองใต้ดินด้วยการตั้งบล็อกที่อยู่ด้านล่างของชั้นหินปิดทับตามความกว้าง ความยาว และความสูงที่กำหนดด้วยความเร็วเท่าๆ กัน เลเซอร์สแกนเนอร์เป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้วัดการทรุดตัวบนผิวดินโดยใช้วัดก่อนและหลังการทรุดตัว รูปที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบและตัวแปรที่กำหนดไว้ในการจำลองเครื่องมือ โดยโครงทดสอบนี้สามารถจำลองความกว้างของช่องเหมือง (W) ได้ตั้งแต่ 50 ถึง 250 มิลลิเมตร สามารถเพิ่มความกว้างได้ทุกๆ 50 มิลลิเมตร ความสูงของช่องเหมือง (H) ผันแปรตั้งแต่ 5 ถึง 50 มิลลิเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 มิลลิเมตร และความยาวของช่องเหมือง (L) สามารถจำลองได้ตั้งแต่ 50 ถึง 500 มิลลิเมตร ในการศึกษานี้ได้กำหนดความหนาของชั้นหินปิดทับ (Z) ผันแปรตั้งแต่ 50 ถึง 200 มิลลิเมตร ในทุกกรณี สำหรับการศึกษผลกระทบของการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับได้ทำการผันแปรมุมของผิวดินด้านบนตั้งแต่ 5, 10, 15 และ 20 องศา



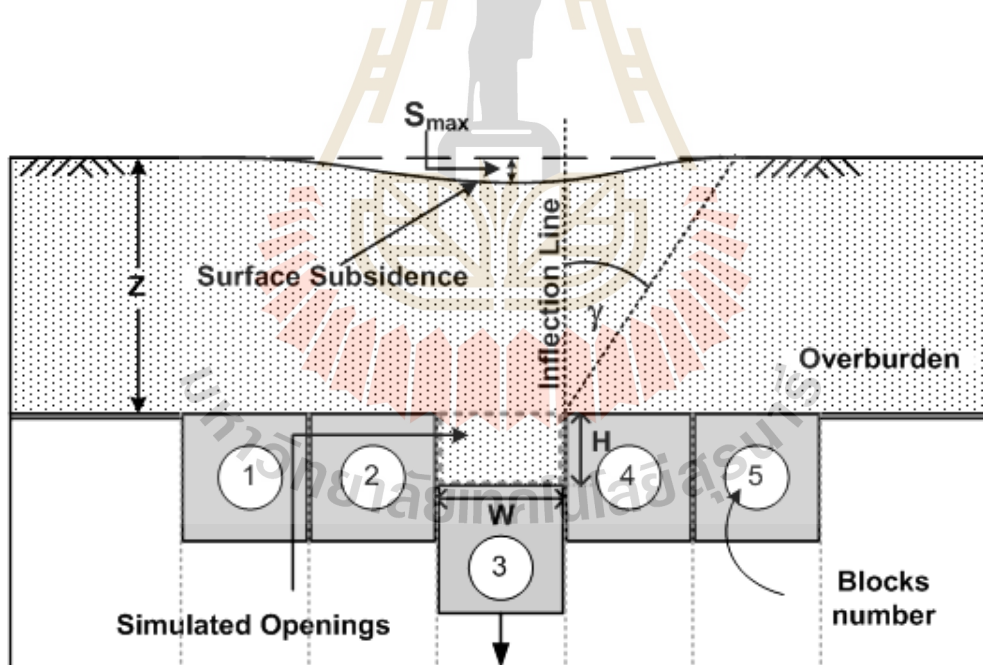
รูปที่ 3.1 ทรายที่ใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ (Thongprapha และคณะ, 2015)

Test method	Soil properties	Values	
Grain size Analysis	Uniformity coefficient, C_u	1.29	
	Coefficient of curvater, C_c	1.07	
	Type of soil		Poorly-graded sand
	Grain Shape	Sphericity	High sphericity
		Roundness	Subangular
Direct shear test	Bulk density (kN/m^3)	1455	
	Cohesion, c (kPa)	15.61	
	Friction angle, ϕ (degree)	24.7	
	Normal stiffness, K_n (MPa/m)	1590.72	
	Shear stiffness, K_s (MPa/m)	26.07	



รูปที่ 3.2 โครงทดสอบ Trap door apparatus (Thongprapha และคณะ, 2015)



รูปที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองทางกายภาพและการวิเคราะห์โดยที่ W คือความกว้างของช่องเหมือน H คือความสูงของช่องเหมือน Z คือความสูงของชั้นหินปิดทับ γ คือมุมของการไหล และ S_{max} คือการทรุดตัวสูงสุด

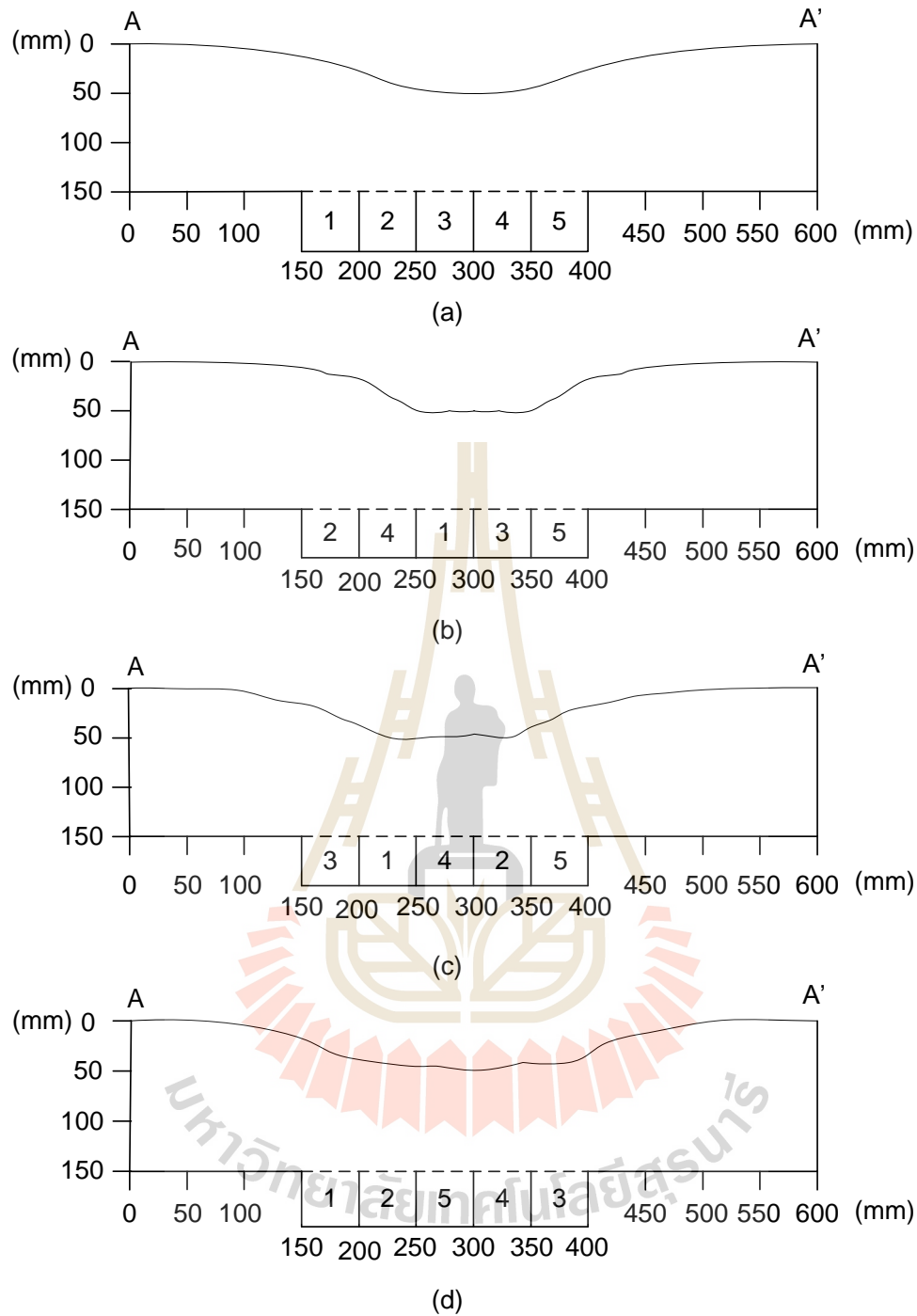
3.3.1 ลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน

การศึกษาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองดำเนินการด้วยการผันแปรรูปแบบการขุดเจาะออกเป็น 4 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยตัวเลขที่ระบุบนแต่ละบล็อกแสดงลำดับก่อน-หลังของการขุดช่องเหมือง การทดสอบนี้ได้กำหนดให้ความยาวของช่องเหมืองมีค่าคงที่เท่ากับ 300 มิลลิเมตร และความกว้างช่องเหมืองในแต่ละบล็อกเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ($L/W=6$) ในการจำลองได้ทำการเพิ่มความกว้างของช่องเหมืองจาก 50 มิลลิเมตร ไปจนถึง 250 มิลลิเมตร และอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมืองผันแปรตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 ในทุกกรณี ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงลักษณะการทรุดตัวภายใต้การผันแปรของลำดับการขุดเจาะแสดงในรูปที่ 3.5

ผลการทดสอบได้นำเสนอในเชิงมุมของการไหล (γ) และการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) โดยมุมของการไหลเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับกำหนดตำแหน่งสุดท้ายที่เกิดการทรุดตัวที่ผิวดิน ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นแนวตั้งจากขอบของช่องเหมืองใต้ดินและจุดสุดท้ายที่มีการทรุดตัวเกิดขึ้นและการทรุดตัวสูงสุดของพื้นผิวจะอยู่ในตำแหน่งของร่องการทรุดตัวที่ต่ำที่สุด

Case	Mine opening				
(A)	1	2	3	4	5
	(a)				
(B)	2	4	1	5	3
	(b)				
(C)	3	1	5	2	4
	(c)				
(D)	1	2	5	4	3
	(d)				

รูปที่ 3.4 รูปแบบการจำลองลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองในแต่ละกรณี



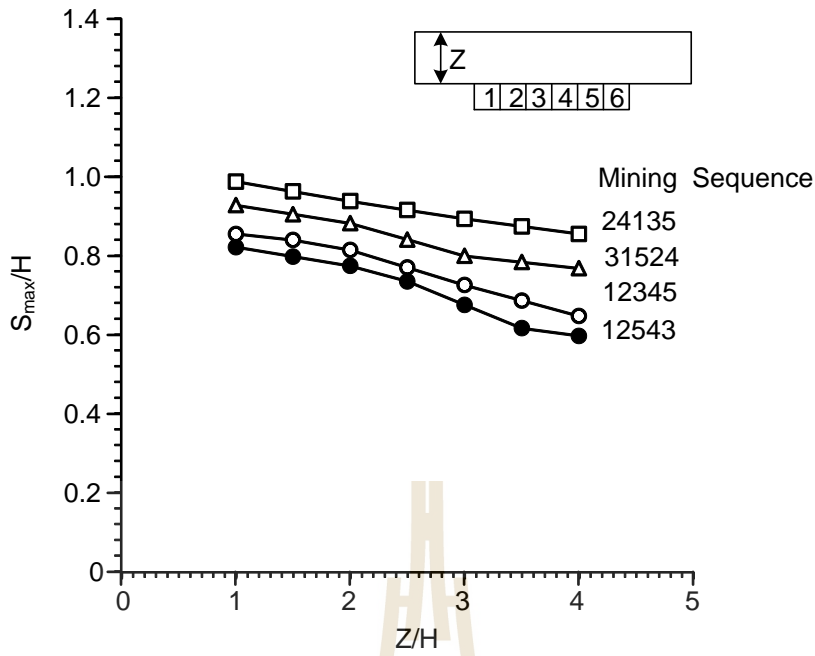
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพตัดขวาง แสดงการทรุดตัวของพื้นผิวสำหรับลำดับการขุดเจาะเหมืองแร่ที่แตกต่างกัน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าลักษณะของช่องเหมืองที่มีลำดับการขุดเจาะที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การทรุดตัวที่ผิวดินมีความแตกต่างกันออกไป โดย Case (A) แสดงลักษณะของร่องการทรุดตัวที่มีลักษณะเรียบมากกว่ารูปแบบการขุดอื่นที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.5(a) โดยอัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง (S_{max}/H) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง (Z/H) (รูปที่ 3.6) รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการไหลและอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมืองภายใต้ลำดับการขุดเจาะเหมืองใต้ดินที่ต่างกัน ผลที่ได้ระบุว่ามุมของการไหลมีการลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง ผลกระทบที่เกิดจากลำดับการขุดเจาะจะเห็นได้อย่างเด่นชัดในกรณีที่อัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมืองมีค่าเท่ากับ 1 ส่วน Case (B) มีมุมการไหลที่ต่ำสุด ในขณะที่ Case (D) มีค่าการทรุดตัวมากที่สุดในทุกความลึก ทั้งนี้เนื่องจากลำดับของการขุดเจาะทำให้ความสามารถของการไหลเข้าไปในช่องเหมืองของชั้นหินปิดทับมีความแตกต่างกัน

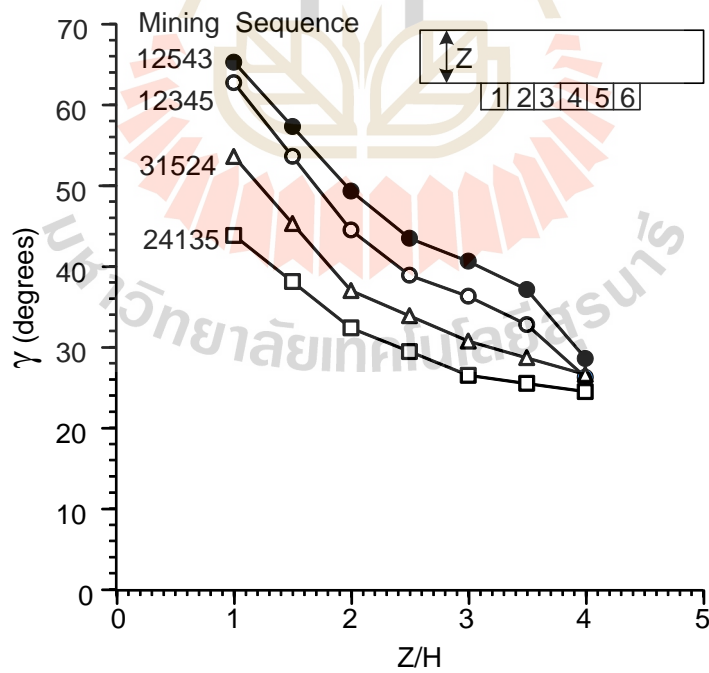
3.3.2 การเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ

การศึกษาผลกระทบการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับภายใต้การผันแปรความลึกของช่องเหมืองตั้งแต่ 100 ถึง 200 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความลึกที่วัดจากผิวบนของชั้นหินปิดทับไปยังจุดศูนย์กลางของหลังคาช่องเหมือง (รูปที่ 3.8) มุมของการเอียงตัว (θ) ผันแปรจาก 5, 10, 15 และ 20 องศา ในการทดสอบนี้กำหนดให้ความกว้างของช่องเหมืองเท่ากับ 50 มิลลิเมตร และความยาวของช่องเหมืองเท่ากับ 250 มิลลิเมตร รูปที่ 3.9 แสดงภาพตัดขวางของร่องการทรุดตัวภายใต้การผันแปรการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ โดยมุมของการไหลในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจวัด 2 จุด คือ มุมของการไหลที่ความชันส่วนบน (γ_{up}) และส่วนล่าง (γ_{down}) ผลจากการทดสอบระบุว่ามุมของการไหลที่ความชันส่วนบนมีค่ามากกว่ามุมการไหลความชันที่ส่วนล่าง ทั้งนี้ เนื่องจากความสามารถในการไหลของชั้นหินปิดทับที่ส่วนบนของความชันสามารถไหลได้ง่ายกว่าชั้นหินปิดทับที่ส่วนล่าง

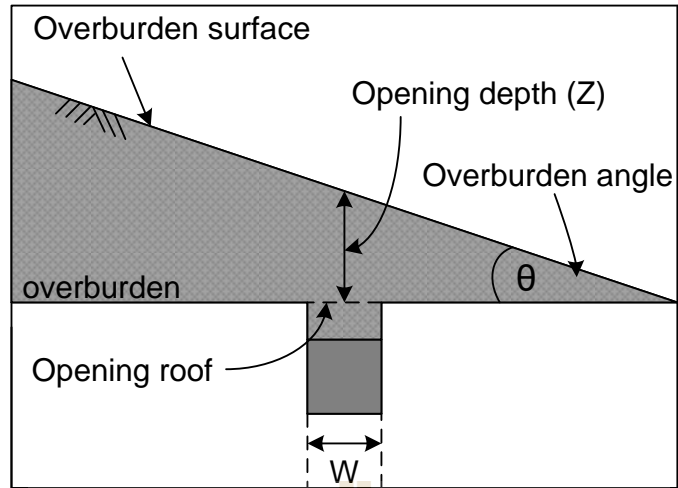
รูปที่ 3.10 แสดงอัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมืองและการเพิ่มขึ้นของมุมเอียงของชั้นหินปิดทับจาก 0, 5, 10, 15 ถึง 20 องศา มุมของการไหลบริเวณส่วนบนเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงของชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น ในขณะที่มุมการไหลจะลดลงที่ส่วนล่างของความชัน (รูปที่ 3.11) เนื่องจากความหนาของชั้นหินปิดทับที่ส่วนบนที่มากกว่าจึงกระตุ้นให้เกิดการไหลของอนุภาคเข้าไปในช่องเหมืองได้มากกว่า



รูปที่ 3.6 อัตราส่วนการหลุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง (S_{max}/H) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง (Z/H)

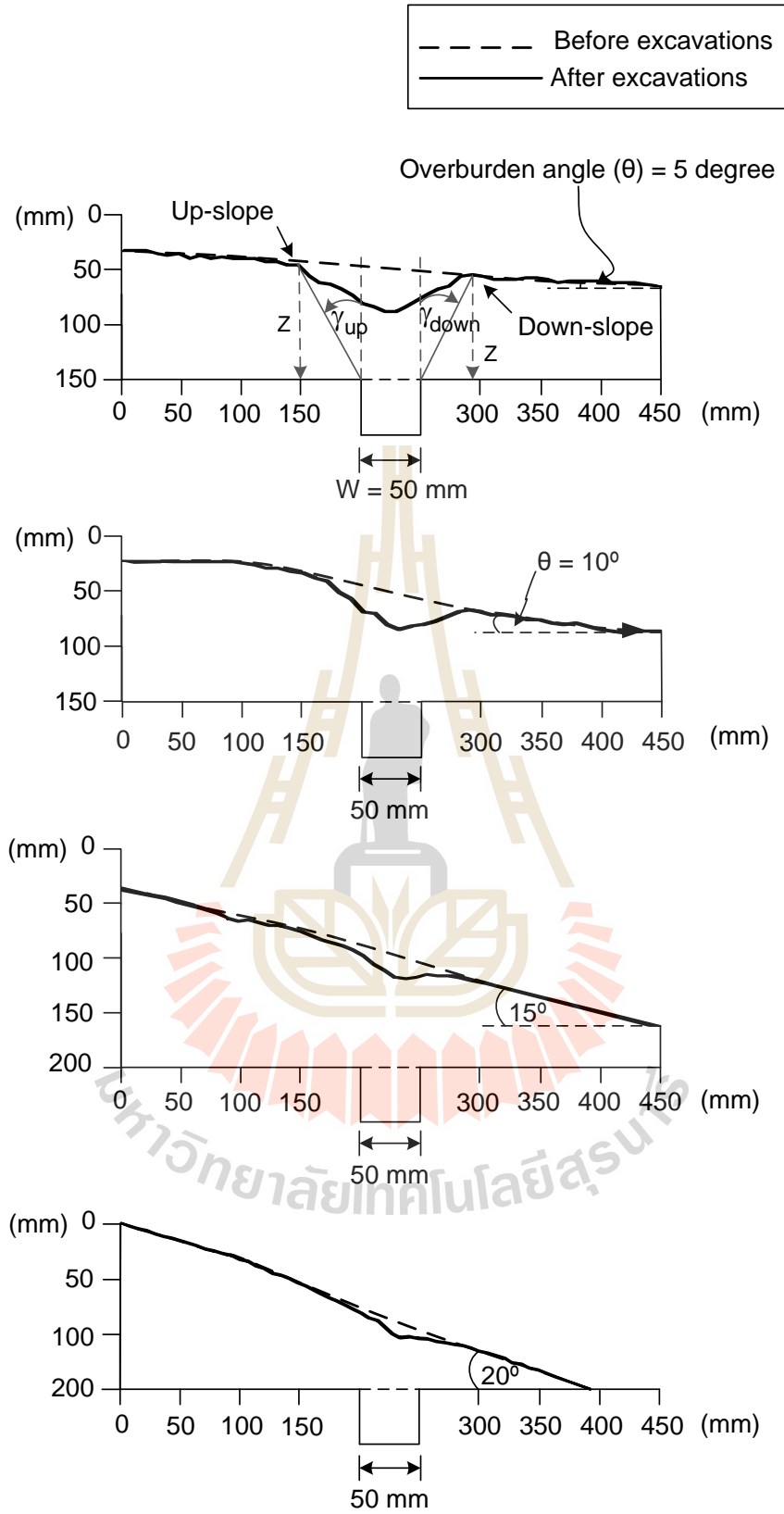


รูปที่ 3.7 มุมของการไหล (γ) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง (Z/H)

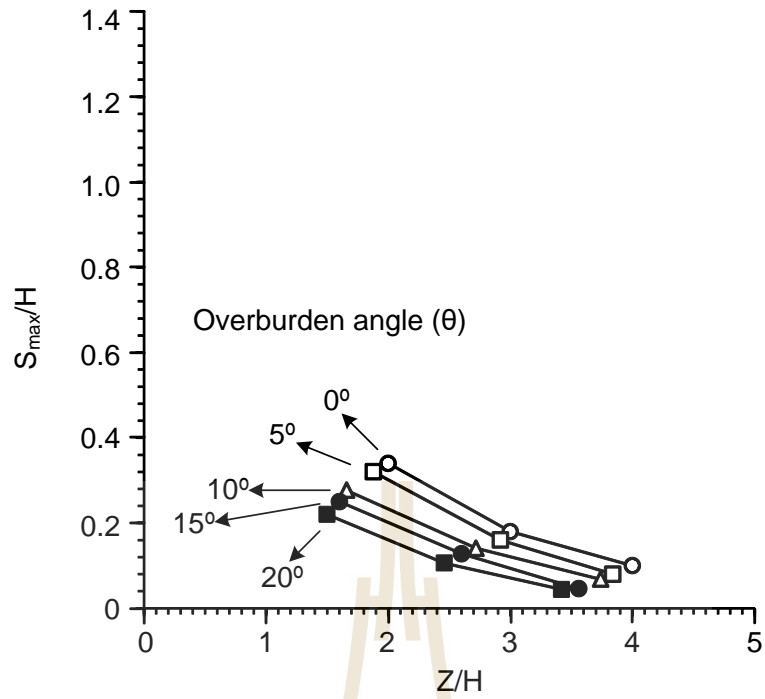


รูปที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองรูปแบบทางกายภาพภายใต้ชั้นหินปิดทับที่มีการเอียงตัว

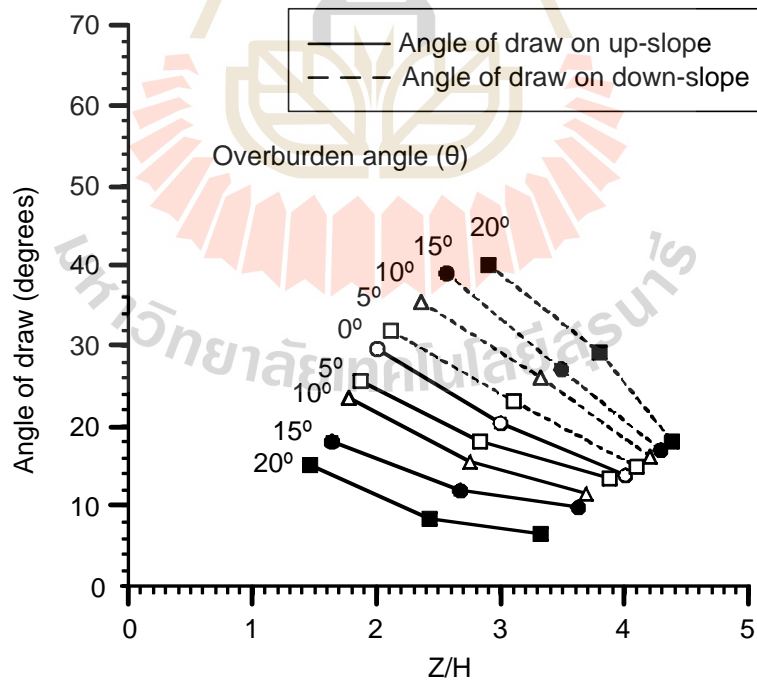




รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางร่องของการทรุดตัวของพื้นผิวที่มีการเอียงตัวแตกต่างกัน



รูปที่ 3.10 อัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง



รูปที่ 3.11 มุมของการไหลในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรความชันของชั้นหินปิดทับ

บทที่ 4

การจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

4.1 วัตถุประสงค์

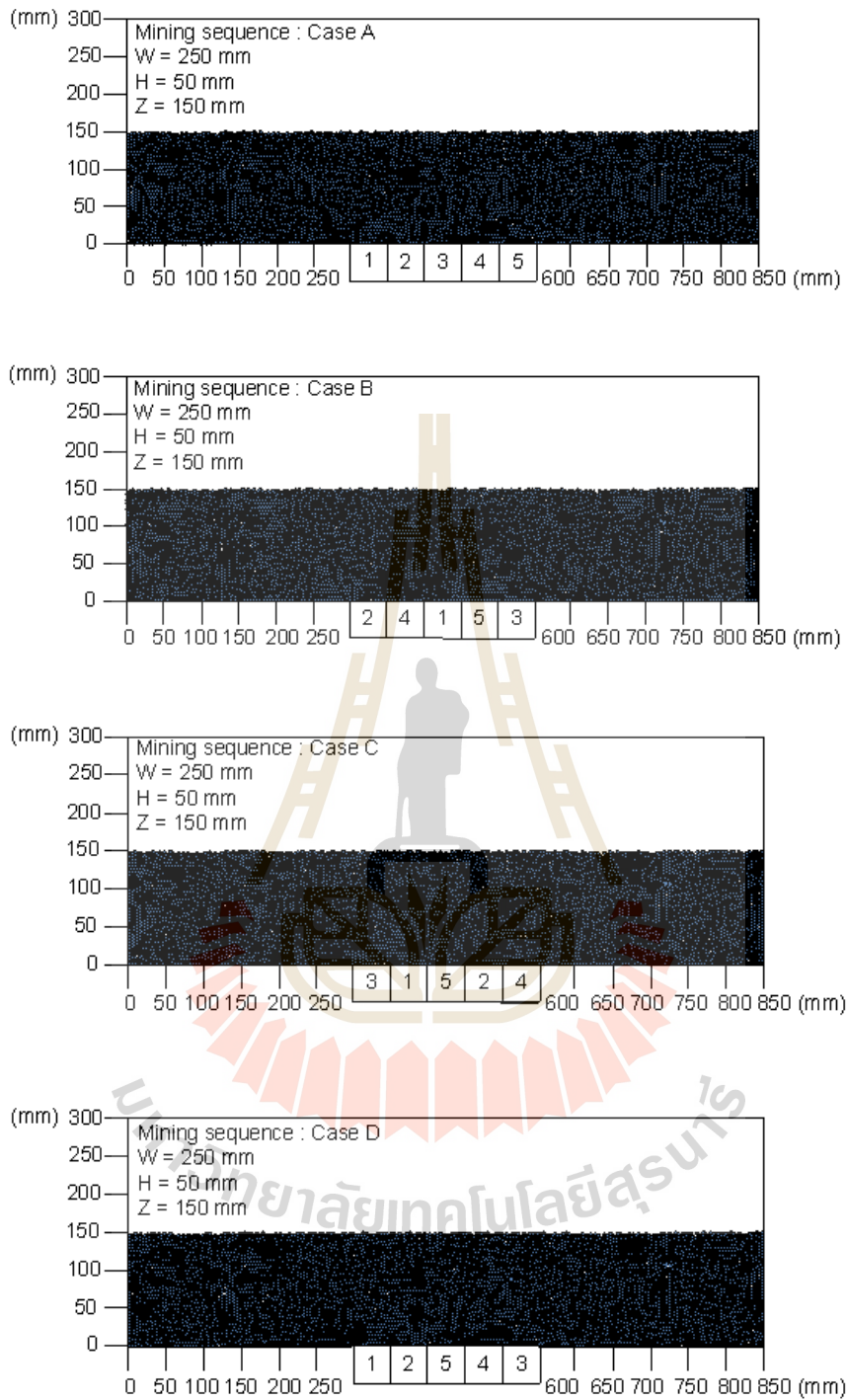
ในบทนี้ได้ศึกษาถึงการทรุดตัวของอนุภาคที่มีความไม่ต่อเนื่องกันของชั้นหินปิดทับด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Particle Flow Code in Two Dimensions (PFC^{2D}: Itasca, 2008) เพื่อจำลองการทรุดตัวภายใต้การผันแปรการขุดเจาะและการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับในสถานะที่ช่องเหมืองเกินกว่าจุดวิกฤติ (Super-critical subsidence) โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

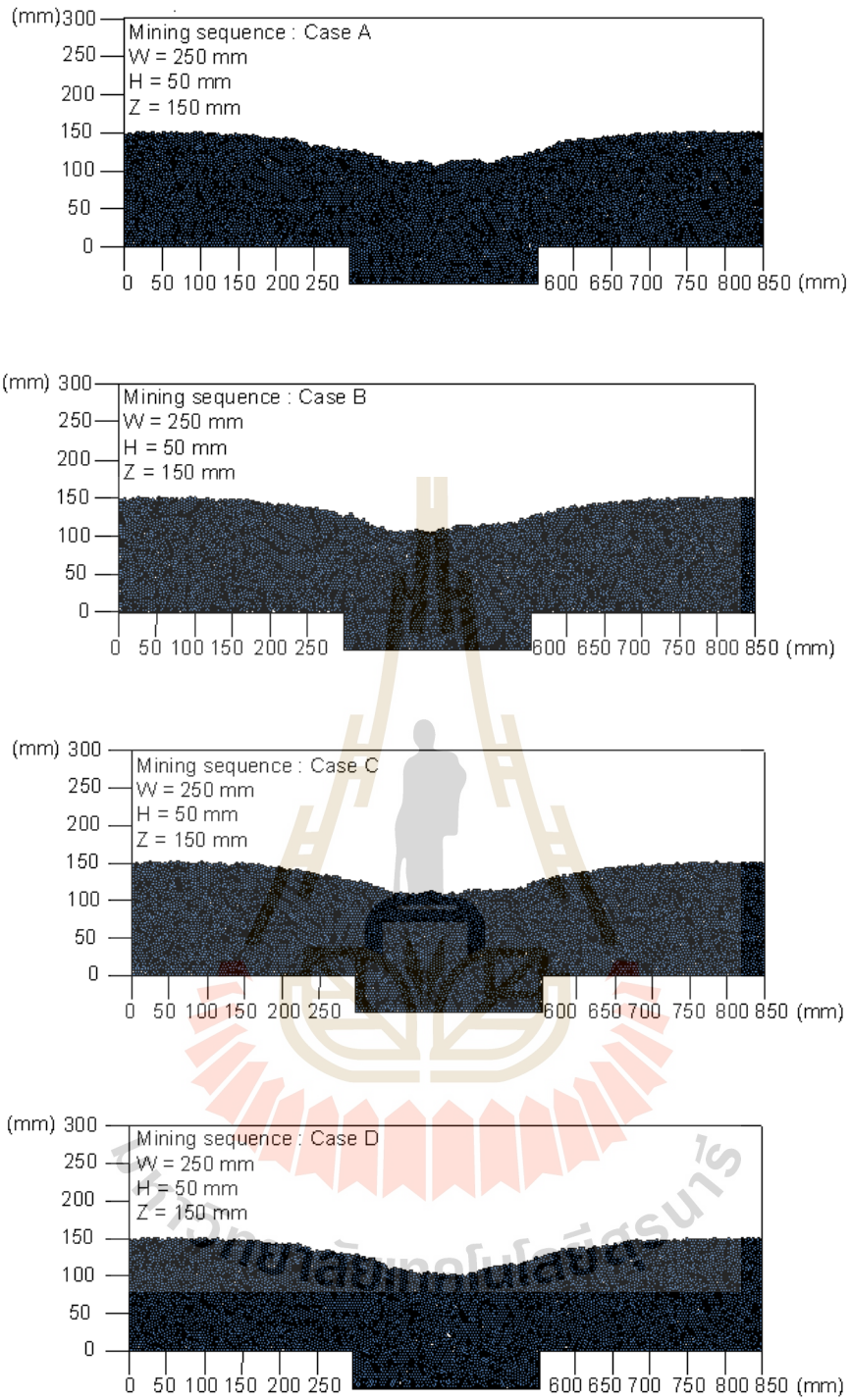
ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุที่เป็นเม็ดได้ใช้โปรแกรม PFC^{2D} ในการจำลองการทรุดตัวของหินดินภายใต้ลำดับการขุดเจาะที่ต่างกันและการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับที่ไม่เท่ากัน ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าเหมือนกันกับตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองทางกายภาพ ขนาดของอนุภาคทรงกลมที่ใช้ในแบบจำลองมีรัศมี 1 มิลลิเมตร ค่าความหนาแน่นจำเพาะ 1,455 kN/m³ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (ϕ) 0.46 ค่าความแข็งตึงในแนวเฉือน (Shear stiffness, K_s) 0.73 MN/m และค่าความแข็งตึงในแนวตั้งฉาก (Shear stiffness, K_n) 44.54 MN/m

4.2.1 ลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้กำหนดคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับและลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองให้มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยหลังจากการจำลองช่องเปิดใต้ดินส่งผลให้อนุภาคของชั้นหินปิดทับไหลลงสู่ช่องเหมืองอย่างต่อเนื่องจนเต็มและเข้าสู่สภาวะสมดุลพร้อมทั้งเกิดการทรุดตัวของหินดิน (รูปที่ 4.2) ตารางที่ 4.1 แสดงผลการจำลองภายใต้การผันแปรลำดับของการขุดเจาะเมื่อผลการจำลองระบุว่า อัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง (S_{max}/H) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความหนาแน่นของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง (Z/H) เพิ่มขึ้น มุมของการไหล (γ) มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราของ Z/H เพิ่มขึ้น ผลกระทบของลำดับการขุดเจาะมีผลต่อการทรุดตัวของหินดินมากในกรณีที่ช่องเหมืองอยู่ในระดับตื้นหรือมีอัตราส่วนของ Z/H เท่ากับ 1 และแทบจะไม่มีผลกระทบต่อทรุดตัวของหินดินเลยเมื่ออัตราส่วนของ Z/H เท่ากับ 4 (รูปที่ 4.3) โดยการทรุดตัวของหินดินจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเริ่มการขุดเจาะจากขอบไปยังจุดศูนย์กลางของช่องเหมือง



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินก่อนการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน



รูปที่ 4.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน

ตารางที่ 4.1 ผลจากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ PFC^{2D} ของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน กำหนดความสูงของช่องเหมืองเท่ากับ 50 มิลลิเมตร

Parameter variable			Results	
Case	Z/H	W/H	γ (degrees)	S_{\max}/H
Case A (12345)	1	5	60.4	1.07
	2		48.2	1.05
	3		38.4	1.02
	4		28.6	0.99
Case B (24135)	1		57.6	1.15
	2		45.3	1.11
	3		35.0	1.06
	4		28.5	1.03
Case C (31524)	1		52.8	1.23
	2		38.9	1.18
	3		33.4	1.13
	4		27.5	1.09
Case D (12543)	1		65.0	1.00
	2		52.0	1.00
	3		40.1	0.98
	4		28.0	0.95

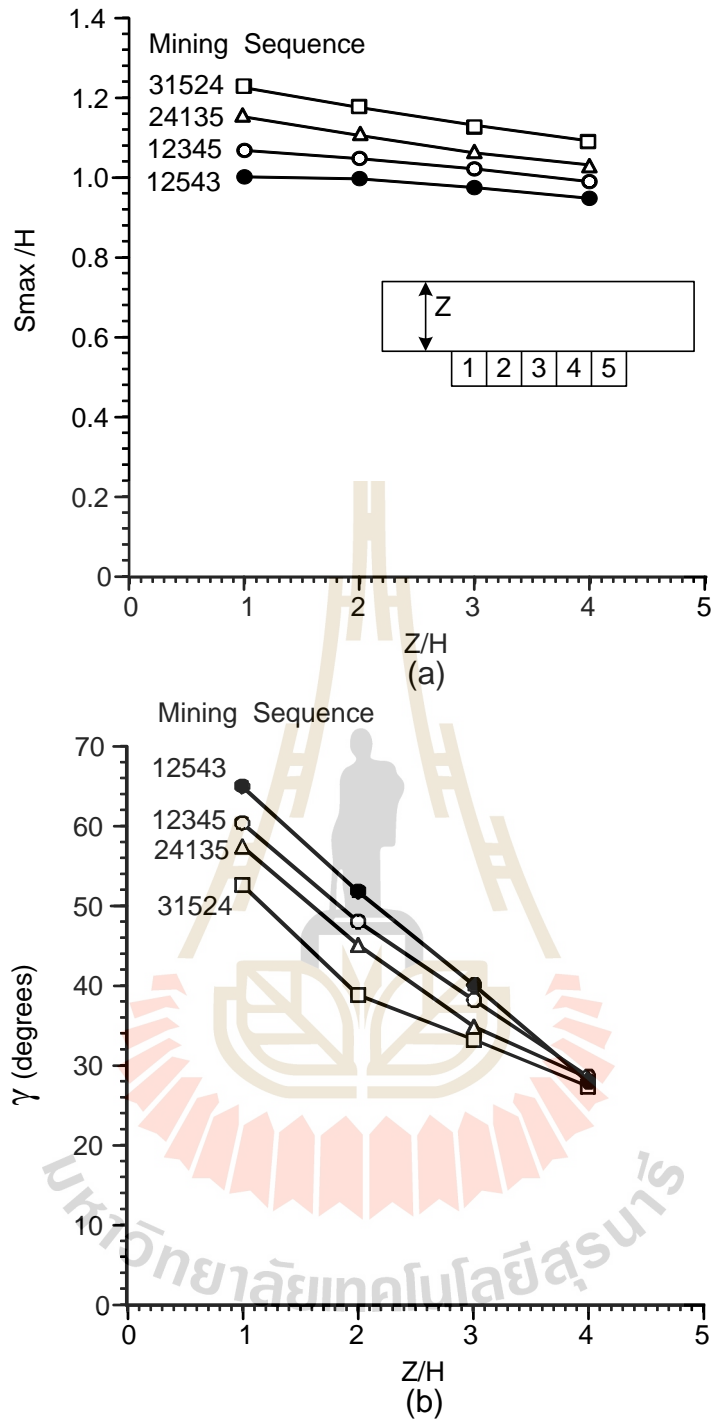
กำหนดให้ Z = ความหนาของชั้นหินปิดทับ (มิลลิเมตร)

W = ความกว้างของช่องเหมือง (มิลลิเมตร)

H = ความสูงของช่องเหมือง (มิลลิเมตร)

γ = มุมของการไหล (องศา)

S_{\max} = การทรุดตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)



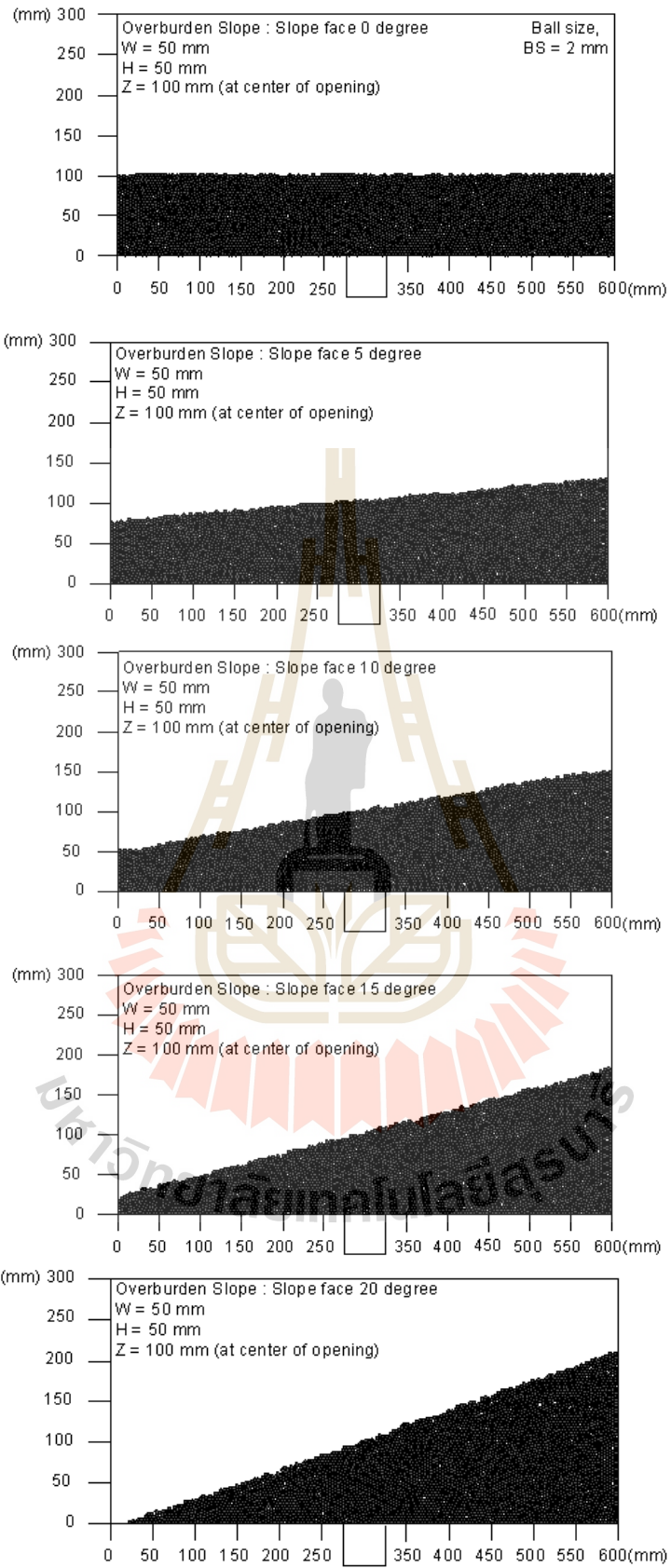
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง

4.2.2 การเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ

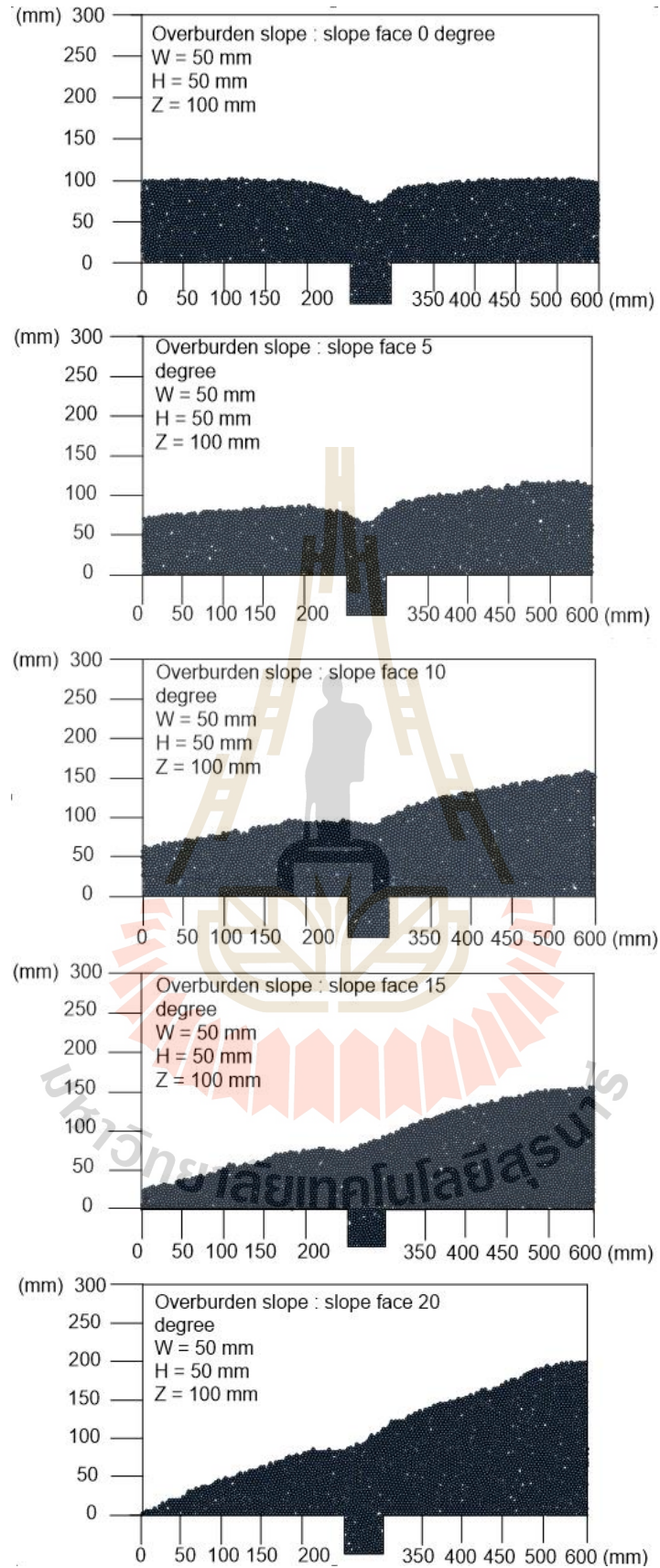
ขอบเขตของช่องเหมืองที่กำหนดในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองทางกายภาพที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับผันแปรตั้งแต่ 0, 5, 10, 15 และ 20 องศา ความกว้าง และความสูงของช่องเหมืองกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50 มิลลิเมตร สำหรับทุกกรณี ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงในตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงตัวอย่างการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับที่มีการเอียงตัวก่อนและหลังการจำลองช่องเหมือง ผลการจำลองระบุว่าอัตราส่วน S_{max}/H มีแนวโน้มคงที่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นหินปิดทับ (รูปที่ 4.6 (a)) และมุมของการไหลที่ส่วนบน (γ_{up}) มีค่ามากกว่าความชันส่วนล่าง (γ_{down}) ของชั้นหินปิดทับแบบเอียง (รูปที่ 4.6 (b)) ตารางที่ 4.3 แสดงผลการตรวจวัดค่ามุมการไหลที่บริเวณการเอียงตัวส่วนบนและส่วนล่างของชั้นหินปิดทับแบบเอียงรวมถึงค่าการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดินที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์ของชั้นหินปิดทับที่มีการเอียง

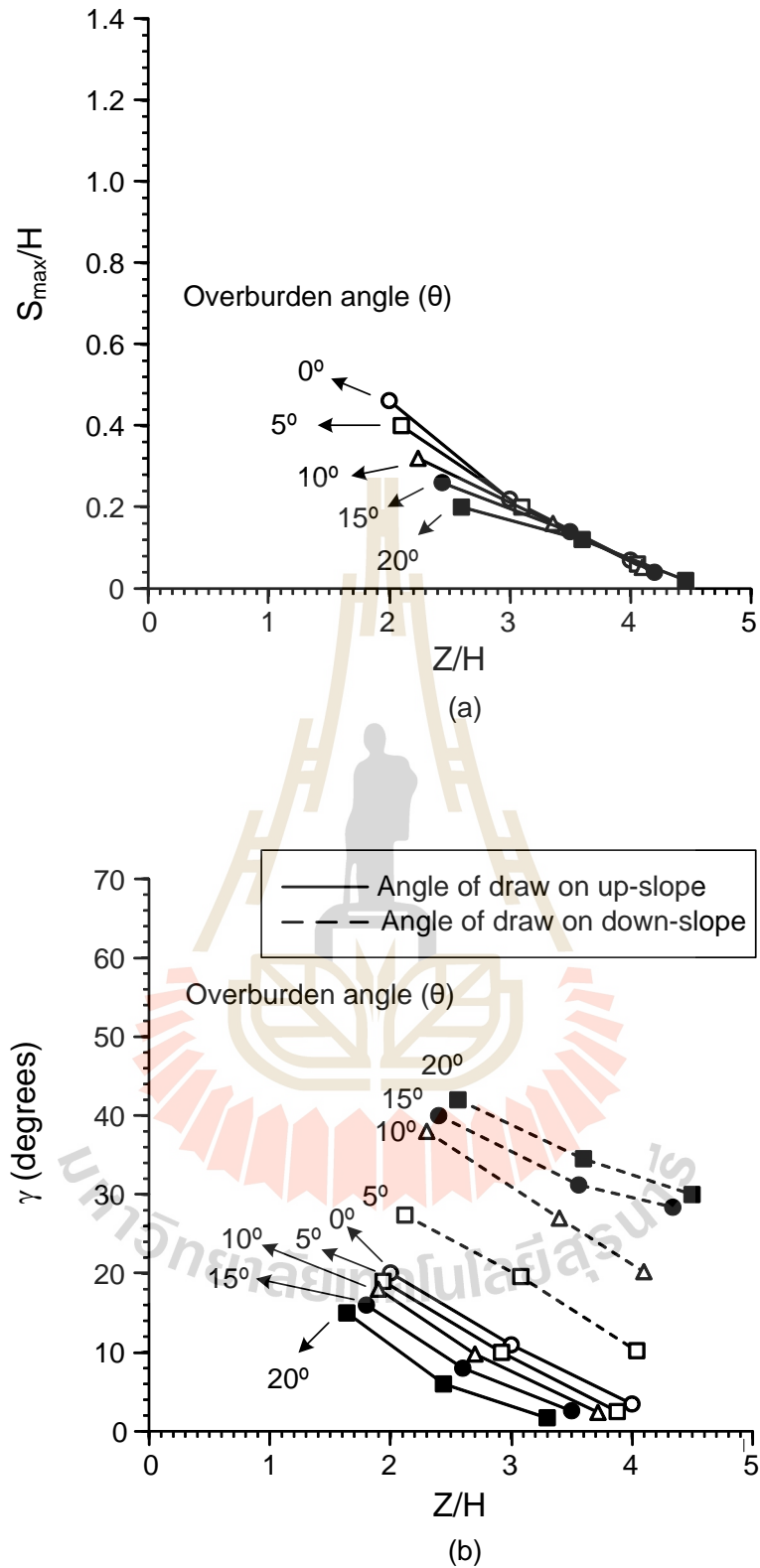
Parameter variable			Results		
Slope angle (degrees)	Z (mm) at center of opening	W (mm)	γ (degrees)		S_{max}/H
			Up-slope	Down-slope	
0°	100	50	20.1	20.1	0.46
	150		11.0	11.0	0.22
	200		3.5	3.5	0.07
5°	100		32.3	19.0	0.40
	150		18.6	10.0	0.20
	200		14.9	2.5	0.06
10°	100		38.0	18.0	0.32
	150		27.0	9.8	0.16
	200		20.2	2.4	0.05
15°	100		40.0	16.0	0.26
	150		31.2	8.0	0.14
	200		28.4	2.6	0.04
20°	100	42.0	12.3	0.20	
	150	34.5	6.0	0.12	
	200	30.0	1.7	0.02	



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับก่อนการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับหลังการจำลองช่องเหมืองใต้ดิน



รูปที่ 4.6 อัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความลึกของช่องเหมือง (a) และมุมของการไหลในฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความลึกของช่องเหมือง (b)

ตารางที่ 4.3 มุมของการไหลและการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับแบบเอียง

Slope angle (degrees)	Z (mm) at center of opening	Depth of overburden (mm)		
		Up-slope	Down-slope	S_{max}/H
0°	100	100	100	2.0
	150	150	150	3.0
	200	200	200	4.0
5°	100	109	97	2.1
	150	172	146	3.1
	200	204	194	4.1
10°	100	115	95	2.2
	150	170	135	3.4
	200	205	186	4.1
15°	100	120	90	2.4
	150	178	130	3.5
	200	217	175	4.2
20°	100	128	82	2.6
	150	180	122	3.6
	200	225	165	4.5

บทที่ 5

การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และแบบจำลองทางกายภาพ

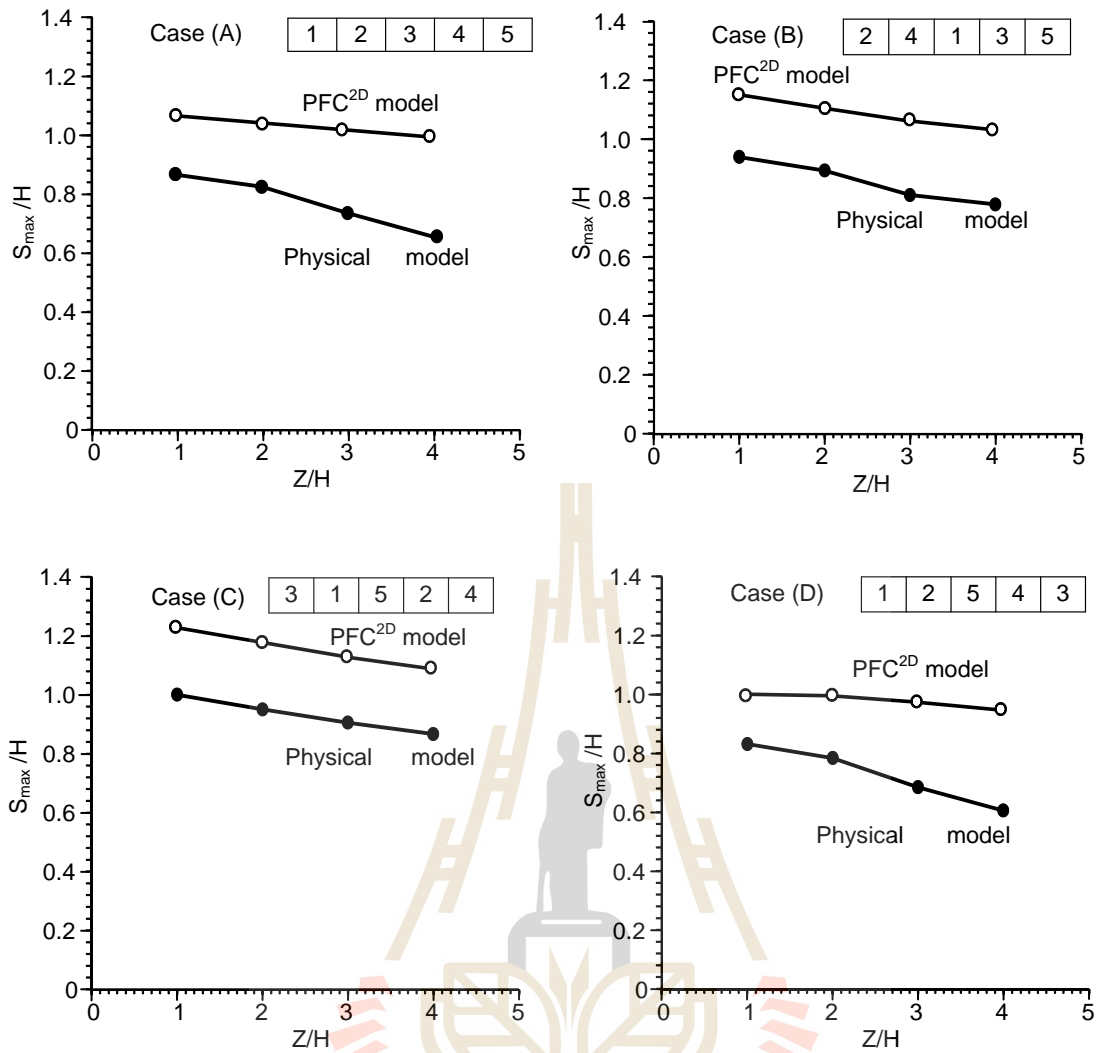
5.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของบทนี้คือ เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (PFC^{2D}) และแบบจำลองทางกายภาพ ในแง่ของค่าการทรุดตัวสูงสุดและมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ

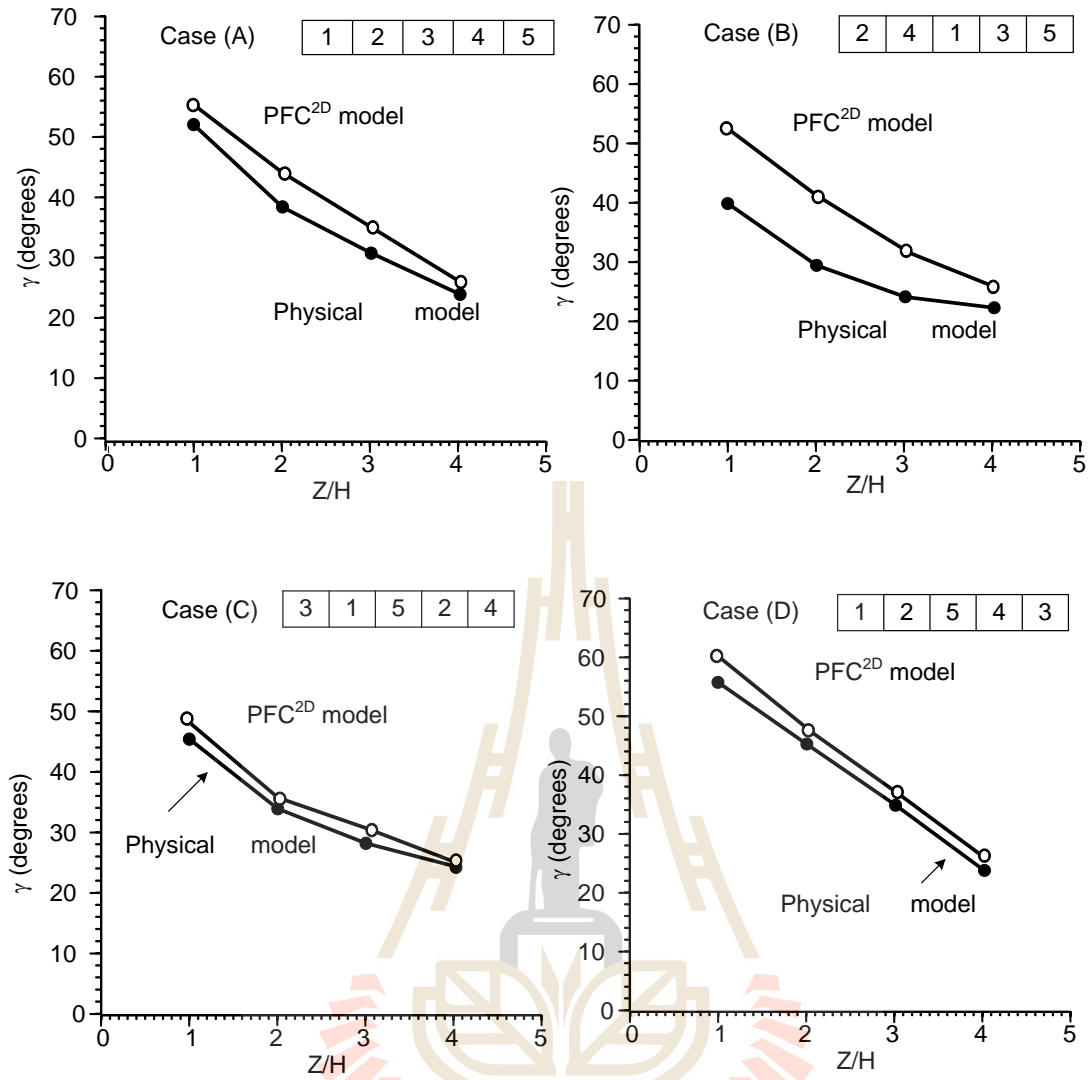
5.2 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และ แบบจำลองทางกายภาพ

ผลจากการจำลองการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากแบบจำลองเชิงกายภาพ รูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความสูงของช่องเหมือง (S_{max}/H) และมุมของการไหล (γ) ที่ได้ตรวจวัดจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพในรูปแบบการจำลองลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินที่แตกต่างกัน ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ แสดงแนวโน้มการลดลงของอัตราส่วน S_{max}/H และ γ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นหินปิดทับ (Z) โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพมีอัตราส่วนของ S_{max}/H และ γ ต่ำกว่าแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากอนุภาคที่จำลองในโปรแกรม PFC^{2D} มีลักษณะเป็นวงกลม ในขณะที่วัสดุเม็ดที่ใช้ในการจำลองทางกายภาพมีพื้นผิวขรุขระ ไม่เป็นวงกลมและไม่มีความสม่ำเสมอ

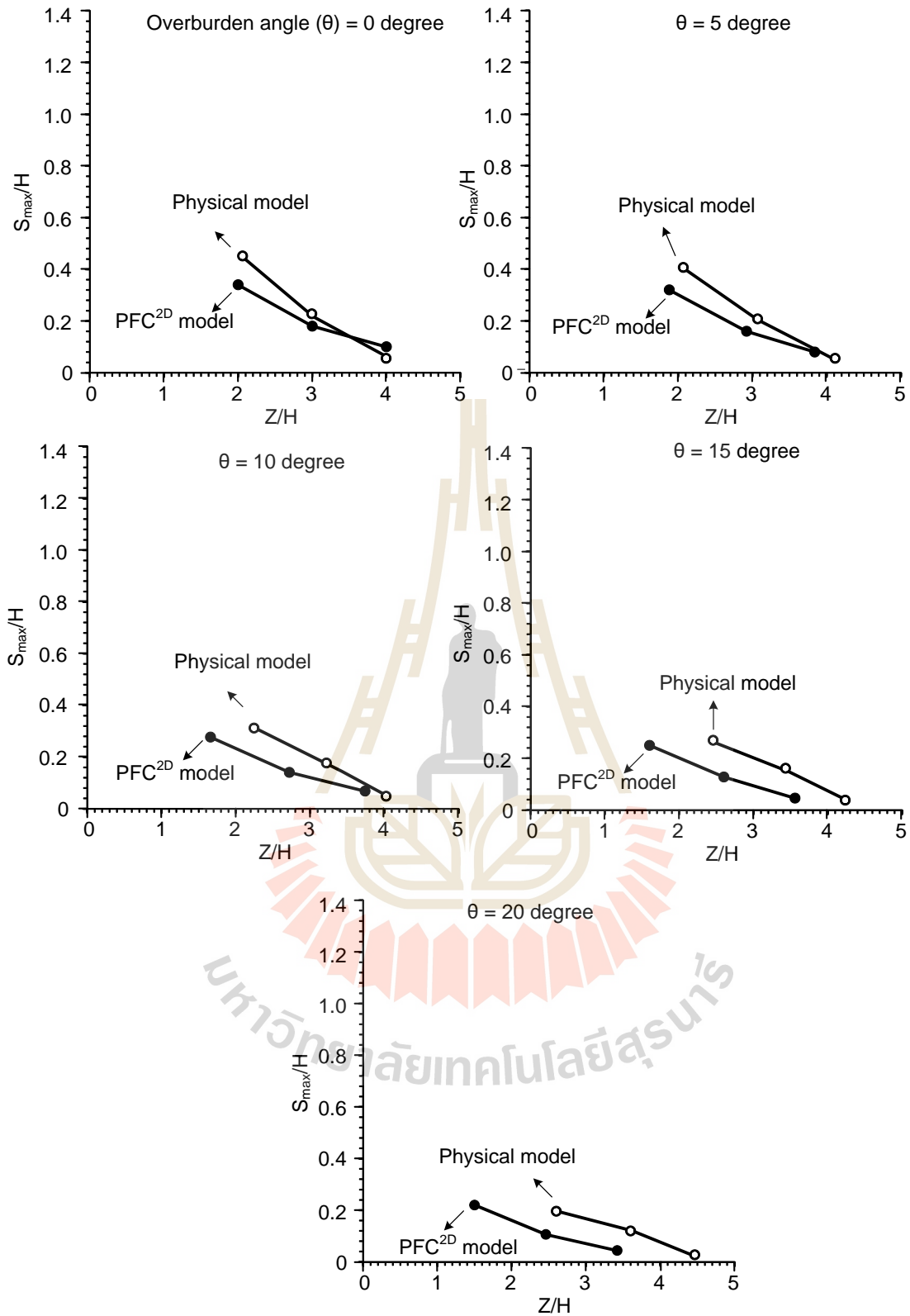
สำหรับกรณีที่ชั้นหินปิดทับมีความลาดเอียง รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของผิวดินสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ รูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 แสดงมุมของการไหลที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของชั้นหินปิดทับแบบเอียง ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าที่ได้จากทั้งแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพมีการลดลงของอัตราส่วน S_{max}/H และ γ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราความหนาของชั้นหินปิดทับต่อความสูงของช่องเหมือง (Z/H) โดยที่อัตราส่วน S_{max}/H และมุมของการไหลที่บริเวณความชันส่วนบน (γ_{up}) ของแบบจำลองทางกายภาพมีค่าน้อยกว่าผลจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในขณะที่มุมของการไหลที่บริเวณความชันส่วนล่างของชั้นหินปิดทับแบบเอียง (γ_{down}) มีค่ามากกว่าผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาที่บริเวณด้านล่างน้อยกว่าบริเวณด้านบนของชั้นหินปิดทับแบบเอียง และลักษณะอนุภาคเม็ดของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพมีความแตกต่างกัน



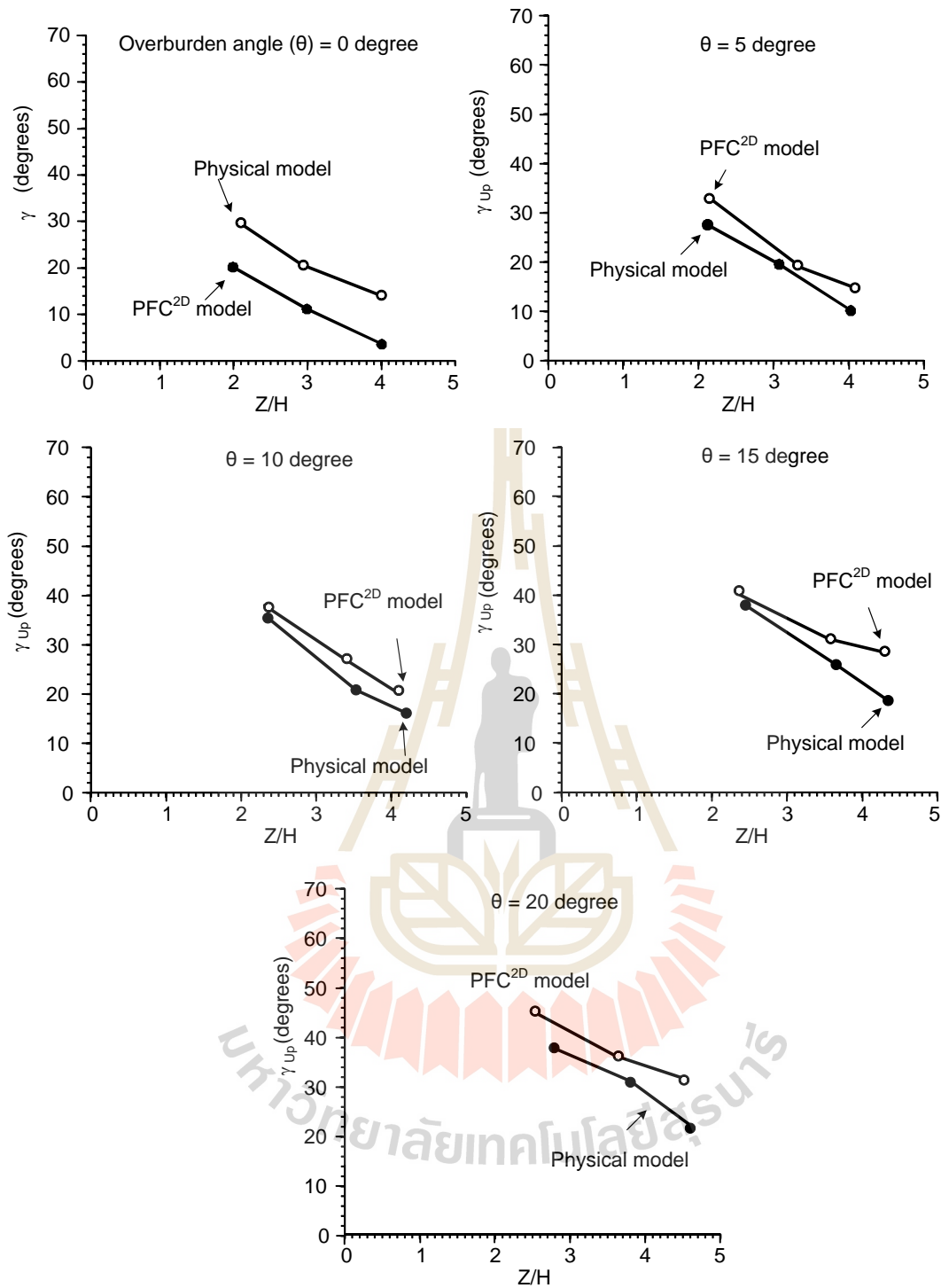
รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพ ในเชิงของค่าการทรุดตัวสูงสุดที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน



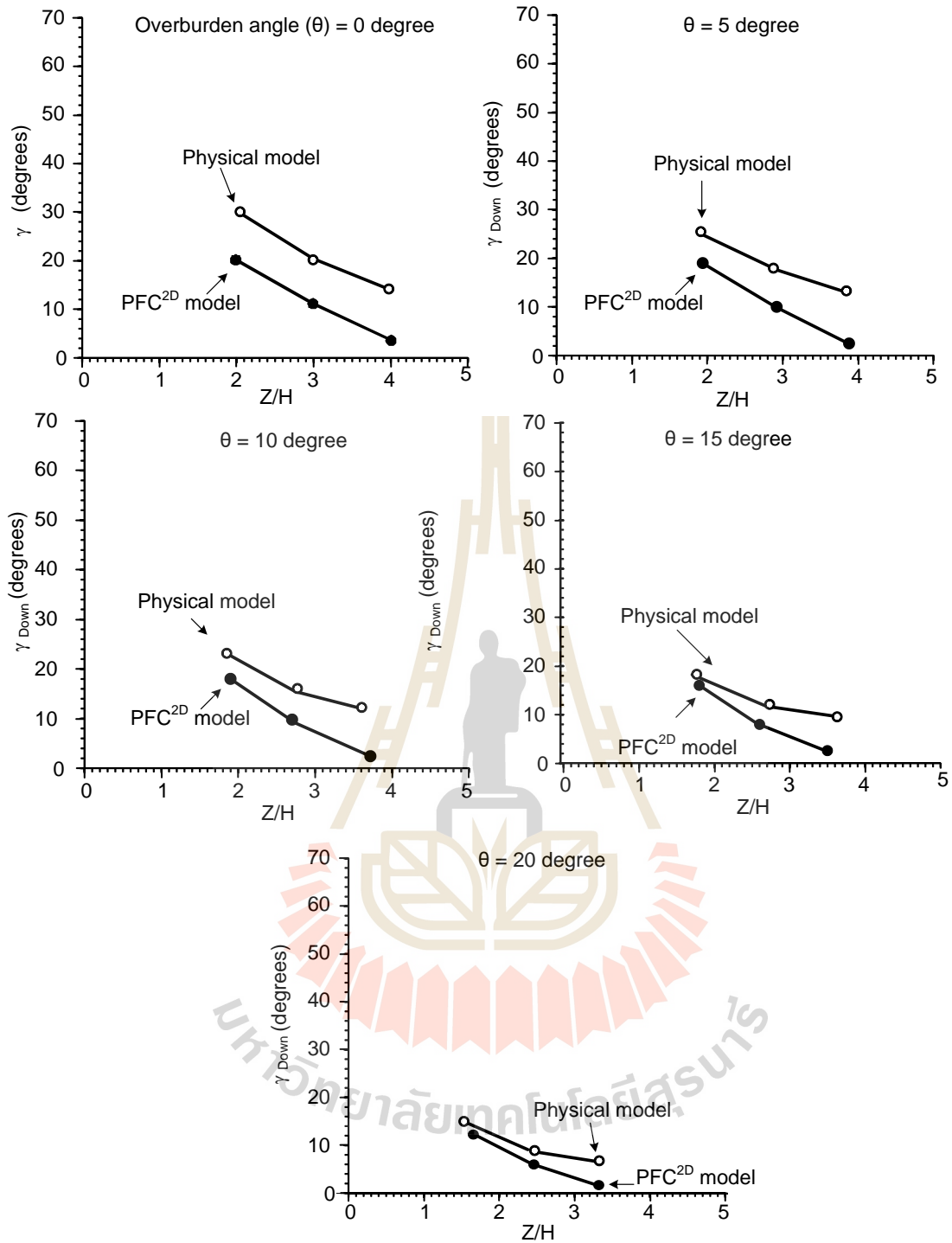
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพ ในเชิงของค่ามุมการไหลที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดิน



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพ ในเชิงของค่าการทรุดตัวสูงสุดที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรความลาดเอียงของชั้นหินปิดทับ



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพ ในเชิงของค่ามุมการไหลบริเวณด้านบนที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางกายภาพ ในเชิงของค่ามุมการไหลบริเวณด้านล่างที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความสูงต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ

บทที่ 6

ปริมาตรของร่องการทรุดตัว

6.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาตรของร่องการทรุดตัวบนผิวดินภายใต้การจำลองลำดับการขุดที่แตกต่างกัน และมีลักษณะของชั้นดินปิดทับแบบเอียง ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical method)

6.2 การศึกษาเกี่ยวกับร่องการทรุดตัวในอดีต

ผลกระทบเนื่องจากการขุดเจาะใต้ดินส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่บริเวณผิวดิน การศึกษาปริมาณและการกระจายของการทรุดตัวดังกล่าวได้มีผู้ศึกษาอย่างกว้างขวาง (เช่น Schmidt, 1979; Peck, 1969; Clough and Schmidt, 1981; O'Reilly and New, 1982; Rankin, 1988; Mair et al, 1993; Kim, 1996; Franzius, 2003) ลักษณะรูปร่างของร่องการทรุดตัวจะมีจุดสมมาตรสองจุดที่บริเวณ Inflection points เรียกว่า Sagging ในกรณีที่มีโครงสร้างบนผิวดินของร่องการทรุดตัวเรียกว่า Hogging (Kim, 1996 และ Franzius, 2003) ซึ่งรูปร่างของร่องการทรุดตัวดังกล่าวสามารถนำมาศึกษาเพื่ออธิบายผลกระทบจากการขุดเจาะใต้ดินสมการ (Gaussian)

$$S(x) = S_{\max} \exp(-x^2/2i_x^2) \quad (6.1)$$

เมื่อ $S(x)$ คือจุดที่มีการทรุดตัวที่ระยะใดๆ และ S_{\max} คือการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน ความกว้างของร่องการทรุดตัว (i) วัดจากระยะจุดศูนย์กลางของช่องเหมืองไปยังจุด Inflection points โดยสมการที่ 6.1 เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาปริมาตรของร่องการทรุดตัว (V_s) สำหรับหนึ่งหน่วยความยาว

$$\bar{V}_s = \sqrt{2\pi} i_x S_{\max} \quad (6.2)$$

สำหรับ Undrained soil จะมีปริมาตรของร่องการทรุดตัวเท่ากับปริมาตรของช่องเหมืองที่ขุดเจาะ มีสมการจำนวนมากที่นักวิจัยหลายท่านได้เสนอเพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ i กับความลึกของช่องเหมืองใต้ดิน เช่น Schmidt, 1979; Cording and Hansmire, 1975; Attewell 1978; Clough and Schmidt, 1981; O'Reilly and New, 1982; Rankin, 1988; Schmidt, 1988; Mair et al, 1993 สำหรับวัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติสันนิษฐานว่าพารามิเตอร์ " i " ขึ้นอยู่กับความลึกของการเปิด (Z_0) โดยหาได้จากสมการ

$$i = Kz_0 \quad (6.3)$$

ในขณะที่ K คือค่าคงที่ Rankin (1988) แนะนำให้ใช้ค่า K เท่ากับ 0.25 ในกรณีที่เป็นการขุดเจาะช่องเหมืองใน Cohesionless soil

Thongprapha และคณะ (2015) ได้ใช้วิธีการเชิงประจักษ์ของ Peck (1969) เพื่อประเมินการทรุดตัวของผิวดินและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (การจำลองทางกายภาพ) โดยใช้ค่า K จาก Rankin (1988) ซึ่งพบว่าสมการสำหรับ Cohesionless soils สามารถเข้ากันได้ดีกับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและปริมาณของร่องการทรุดตัวในห้องปฏิบัติการนั้นมีค่าน้อยกว่าปริมาณของช่องเหมืองที่ขุดออกไป โดยปริมาณของร่องการทรุดตัวมากที่สุดประมาณ 60% ของปริมาณช่องเหมือง ปริมาณของร่องการทรุดตัวมีการลดลงตามอัตราส่วนของความสูงของชั้นหินปิดทับที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 3

6.3 การเปรียบเทียบรูปร่างของร่องการทรุดตัวบนผิวดิน

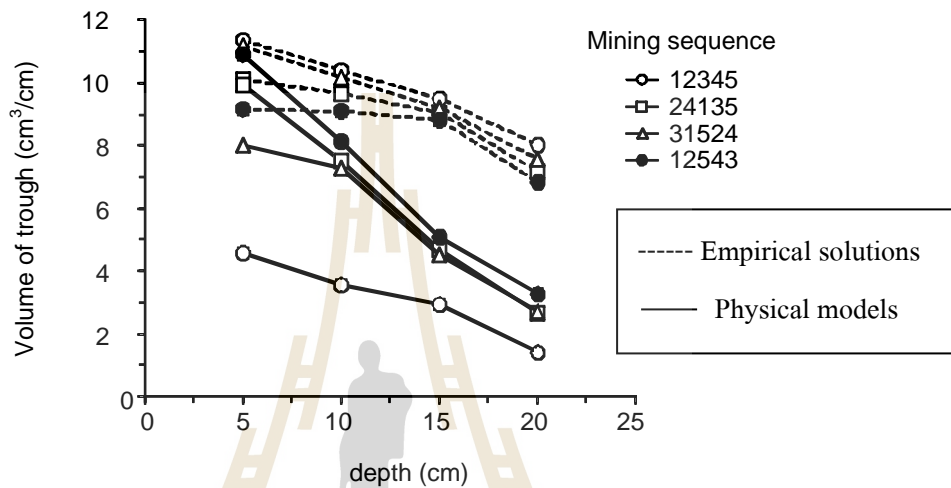
วิธีการเชิงประจักษ์ที่เสนอโดย Peck (1969) สำหรับใช้ในการคำนวณรูปร่างของร่องการทรุดตัวบนผิวดินแสดงดังสมการที่ 6.1 ผลการคำนวณดังกล่าวได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

โดยการคำนวณหาความกว้างของร่องการทรุดตัว (i) ที่เสนอโดย Rankin (1988) แสดงดังสมการที่ 6.3 โดยกำหนดค่า K เท่ากับ 0.25 สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบ Cohesionless soils จากผลการทดสอบของ Thongprapha และคณะ (2015) พบว่าสมการที่เสนอโดย Peck (1969) ในการคำนวณรูปร่างของร่องการทรุดตัวและการคำนวณค่าคงที่ (K) ที่เสนอโดย Rankin (1998) สำหรับชั้นหินปิดทับที่มีคุณสมบัติแบบ Cohesionless soil มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับแบบจำลองทางกายภาพ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้จากสมการของ Rankin (1988) ไม่มีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางกายภาพสำหรับการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะเหมืองใต้ดินและชั้นหินปิดทับที่มีความลาดเอียง

6.4 ปริมาตรของร่องการทรุดตัวบนผิวดิน

ปริมาตรของร่องการทรุดตัวต่อหนึ่งหน่วยความยาว (V_r) สามารถคำนวณได้จากสมการที่เสนอโดย Peck (1969) (สมการ 6.2) ด้วยการวัดระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไปยังจุด Inflection point ของส่วนโค้งของร่องการทรุดตัวนั้น จากผลการทดสอบทำให้สามารถอธิบายผลกระทบของอัตราการขุดเจาะต่อปริมาตรของร่องการทรุดตัวบนผิวดินได้ โดยปริมาตรของร่องการทรุดตัวบนผิวดินจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินขึ้นเหนือบริเวณช่องเหมืองภายหลังการขุดเจาะ (รูปที่ 6.1) ผลการทดสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Thongprapha และคณะ (2015)

การเปรียบเทียบปริมาตรของร่องการหลุดตัวระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical solution) ภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะของช่องเหมืองใต้ดินพบว่า ปริมาตรของร่องการหลุดตัวที่ได้รับจากวิธีการเชิงประจักษ์มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้รับจากแบบจำลองทางกายภาพ (รูปที่ 6.1) ผลการทดสอบที่ได้รับจากวิธีการเชิงประจักษ์นี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้กับผลการทดสอบทางกายภาพที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากค่าที่ได้ทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความเอียง



รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบปริมาตรของร่องการหลุดตัวบนผิวดินที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพและวิธีการเชิงประจักษ์

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

7.1 การอภิปรายผล

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของลำดับการขุดเจาะช่องเหมืองและความลาดเอียงของชั้นหินปิดทับต่อค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการหลุดตัวสูงสุดที่ผิวดินภายหลังจากการขุดเจาะช่องเหมืองใต้ดินภายใต้สภาวะที่มีการหลุดตัวเกินกว่าจุดวิกฤต โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ผลการทดสอบดังกล่าวได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของนักวิจัยท่านอื่น

การศึกษาผลกระทบของความลึกหรือความหนาของชั้นหินปิดทับโดยการผันแปรอัตราส่วน Z/H จาก 1, 2, 3 ถึง 4 ภายใต้อัตราส่วน Z/H ที่มีพื้นที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Z/H ทำให้มุมการไหลของชั้นหินปิดทับและค่าการหลุดตัวสูงสุดลดลง เนื่องจากการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่บริเวณเหนือช่องเหมือง ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Thongprapha และคณะ (2015)

สำหรับการหลุดตัวภายใต้ชั้นหินปิดทับที่มีการเอียงตัว พบว่ามุมการไหลที่บริเวณความชันส่วนบนของพื้นที่เอียงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น และบริเวณความชันส่วนล่างจะมีค่ามุมของการไหลลดลงภายใต้ชั้นหินปิดทับที่มีมุมเอียงเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Zhang et al. (2011) และ Liu et al. (2011) โดยบริเวณด้านบนของพื้นที่เอียงตัวจะสามารถไหลเข้าไปในช่องเหมืองได้ง่าย ทำให้มุมการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการเอียงตัวของชั้นหินปิดทับ และอัตราส่วนของ S_{max}/H จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Z/H จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของ S_{max}/H ภายใต้อัตราส่วน Z/H จะมีการผันแปรมุมเอียงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความหนาของชั้นหินปิดทับที่บริเวณส่วนบนของพื้นที่เอียงมีความหนามากกว่าบริเวณส่วนล่าง มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์รูปแบบการคำนวณโดย Yao et al. (1991) ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของแรงเค้นในชั้นหินปิดทับที่มีการหลุดตัวของพื้นผิวและพบว่ามุมของการไหลมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลของชั้นหินปิดทับ ความลึก และลักษณะของการทำเหมืองใต้ดิน โดยจะมีความถูกต้องในกรณีที่อัตราของ Z/H มากกว่า 1 ($Z/H > 1$) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าไม่สามารถตรวจวัดค่าการหลุดตัวสูงสุดที่ผิวดินและมุมการไหลในกรณีที่อัตราส่วนของ Z/H เท่ากับ 1 ทั้งนี้เนื่องจากความหนาที่บริเวณความชันส่วนล่างของชั้นหินปิดทับไม่เพียงพอหรือมีความหนาน้อยเกินไป ($Z < H$)

การศึกษาผลกระทบของขนาดเม็ดดินกับปริมาตรของร่องการหลุดตัวบนดินโดย Rankin (1988) พบว่าสมการสำหรับการหาความกว้างของร่องการหลุดตัว สำหรับวัสดุที่เป็น Cohesionless มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับแบบจำลองทางกายภาพและปริมาตรของร่องการหลุดตัวบนดิน ซึ่งจะมีค่ามากกว่าปริมาตรของช่องเหมืองใต้ดินเสมอ และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นหินปิดทับ

เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับ Thongprapha และคณะ (2015) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินเหนือช่องเหมืองใต้ดินโดยใช้กรวดเป็นวัสดุในการจำลองชั้นหินปิดทับ

การขุดเจาะแบบเหลือเสาค้ำยันสลัช่องเหมืองไว้ส่งผลให้รูปร่างของร่องการทรุดตัวภายหลังจากการขุดเจาะเสร็จสิ้นแล้วมีขนาดเล็กกว่าในกรณีที่มีการขุดต่อเนื่องจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง อย่างไรก็ตามการขุดเจาะในกรณีหลังจะพบว่ารูปร่างของร่องการทรุดตัวมีความเรียบมากกว่าสำหรับการขุดเจาะที่เริ่มขุดจากศูนย์กลางของช่องเหมืองขยายไปยังด้านข้างหรือทั้งสองด้านพบว่า มุมการไหลมีค่าน้อยที่สุดแต่จะมีการทรุดตัวมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น และการขุดเจาะที่เริ่มจากขอบของช่องเหมืองไปยังจุดศูนย์กลางของช่องเหมืองจะส่งผลให้มีค่ามุมการไหลมากที่สุดและมีค่าการทรุดตัวที่พื้นผิวน้อยที่สุด ผลจากการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Liu et al. (2011), Huayang et al. (2010), Wold (1985) และ Whittaker (1985) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของชั้นหินปิดทับในการทำเหมืองแบบ Longwall mining

7.2 สรุปผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ การคำนวณเชิงประจักษ์ และแบบจำลองคอมพิวเตอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการทดสอบจากแบบจำลองทางกายภาพแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุดถูกควบคุมโดยวิธีการขุดหรือลำดับของการขุดช่องเหมืองใต้ดินและความลาดเอียงของชั้นหินปิดทับ

การทรุดตัวบนผิวดินจะมีค่าต่ำสุดและมีมุมการไหลสูงสุดในกรณีที่ทำการขุดเจาะช่องเหมืองโดยเริ่มจากขอบไปยังกึ่งกลางช่องเหมือง

การเอียงตัวของชั้นหินปิดทับที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อมุมการไหลและการทรุดตัวที่ผิวดิน โดยมุมการไหลที่บริเวณส่วนบนของพื้นแบบเอียงจะเพิ่มขึ้น และการทรุดตัวที่ผิวดินจะลดลงภายใต้การเพิ่มขึ้นของมุมเอียงของชั้นหินปิดทับ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่บริเวณความชันส่วนบนของชั้นหินปิดทับสามารถเคลื่อนที่หรือไหลเข้าช่องเหมืองได้ง่ายกว่าอนุภาคที่บริเวณส่วนล่าง

การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าค่ามุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากอนุภาคทรงกลมในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีขนาดและคุณสมบัติเท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งมีความแตกต่างกับเม็ดดินในแบบจำลองทางกายภาพที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน

การตรวจวัดปริมาตรของร่องการทรุดตัวจากแบบจำลองทางกายภาพพบว่าภายใต้การผันแปรลำดับการขุดเจาะที่แตกต่างกันการขุดเจาะที่เริ่มขุดจากขอบของช่องเหมืองไปยังกึ่งกลางของช่องเหมืองส่งผลให้ปริมาตรของร่องการทรุดตัวมีค่าน้อยที่สุด

7.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) การวิจัยในอนาคตควรมีการเปลี่ยนขนาดของวัสดุที่ใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับให้มีขนาดที่หลากหลายภายใต้การผันแปรลำดับของการขุดช่องเหมืองใต้ดินและความลาดเอียงที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของวัสดุดังกล่าวต่อการทรุดตัวของดิน
- 2) ควรมีการศึกษาผลกระทบของแรงที่กระทำในแนวตั้งและแนวนอนภายใต้การผันแปรลำดับของการขุดช่องเหมืองใต้ดินที่เกิดขึ้นบนร่องการทรุดตัวที่ผิวดินในแต่ละความหนาของชั้นหินปิดทับ
- 3) ควรมีการศึกษาผลกระทบของน้ำใต้ดินที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของการทรุดตัวของดิน
- 4) วัสดุจำพวก Cohesive ควรนำมาใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับในสถานะที่มีการทรุดตัวเกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical subsidence) เพื่อศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของวัสดุที่จำลองเป็นชั้นหินปิดทับที่อาจส่งผลต่อองค์ประกอบการทรุดตัวของดิน

บรรณานุกรม

- Alejano, L. R., Ramirez-Oyanguren, P., Taboada, J. (1999). FDM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 36: 475-491.
- 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** (pp. 116-176). Chonburi: Suranaree University of Technology.
- 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.
- Attewell, P. B. (1978). Ground movements caused by tunnelling in soil. **Large ground movements and structures** (pp. 812-948). Pentech Press, London.
- Clough, G.W. and Schmidt, B. (1981). Design and performance of excavations and tunnels in soft clay. **Soft Clay Engineering** (Chapter 8).
- Cording, E.J. and Hanmire, J.B. (1975). Displacements around soft ground tunnels. In **Proceedings of the Fifth Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering** (pp. 571-633). Buenos Aires.
- 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. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 37: 615-627.
- Cundall P. A. and Strack O. D. L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique** 29. No.1. 47-65.
- Franzius, J.N. (2003). **Behavior of buildings due to tunnel induced subsidence**. Dr. Thesis, Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London. pp.358.
- Ghabraie B., Ren G., Ghabraie, K., Xie Y. and Smith, J. (2014). Physical modeling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics. **International Journal of Coal Geology**. 80: 219-230.

- Huayang, D., Xugang, L., Jiyang, L., Yixin, L., Yameng, Z., Weinan, D. and Yinfei, C. (2010). Model study of deformation induced by fully mechanized caving below a thick loess layer. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 47: 1027 – 1033.
- Itasca. (2008a). **PFC^{2D}—Particle Flow Code in 2 Dimensions, Version 4.0**. User Manual, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA.
- Kim, S.H. (1996). **Model testing and analysis of interactions between tunnel in clay**. Ph.D. Thesis, University of Oxford. pp. 242.
- Liu, Y., Zhou, F., Liu, L., Liu, C. and Hu, S. (2011). An experimental and numerical investigation on the deformation of overlying coal seams above double-seam extraction for controlling coal mine methane emissions. **International Journal of Coal Geology**. 87: 139 – 149.
- Mair, R. J., Taylor, R. N. and Bracegirdle, A. (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. **Geotechnique**. 43(2): 315–320.
- O'Reilly, M. P. and New, B. M. (1982). Settlements above tunnels in the united kingdom - their magnitude and prediction. **Tunnelling 82, The Institution of Mining and Metallurgy** (pp. 55–64). London.
- Peck, R.B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. In **Proceedings of the Seventh international conference on soil mechanics and foundation engineering, State of the art volume** (pp. 225–290). Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos: Mexico.
- Rankin, W. (1988). Ground movements resulting from urban tunneling. In **Prediction and effects, Proceedings of the Twenty-third conference of the engineering group of the geological society** (pp. 79–92). London Geological Society.
- Schmidt, B. (1979). **Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil**. Ph.D. thesis, University of Illinois.
- Schmidt, B. (1988). Discussion on: Sagaseta, c.: Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. **Geotechnique**. 38(4): 647.
- 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.

- Singh, M.M. (1992). Mine subsidence. In H.L. Hartman (ed). **SME Mining Engineering Handbook** (pp. 938–971). Society for Mining Metallurgy and Exploration: Inc. Littleton, Colorado.
- Thongprapha, T., Fuenkajorn, K., and Daemen, J.J.K. (2015). Study of surface subsidence above an underground opening using a trap door apparatus. **Tunnelling and Underground Space Technology**. 46: 94–103.
- Whittaker, B. N. (1985). Ground fractures due to longwall mining subsidence. In **International Mine Water Association Proceedings** (pp.1057–1072). Spain.
- Wold, M. B. (1985). Blocky physical model of longwall caving under strong roof conditions. In **Proceedings - Symposium on Rock Mechanics** (Vol. 2, pp.1007–1014). CSIRO, Div of Geomechanics, Australia.
- Yao, X.L., Whittaker, B.N., and Reddish, D.J. (1991). Influence of overburden mass behavioural properties on subsidence limit characteristics. **Mining Science and Technology**. 13: 167–173.
- Yavuz H. and Fowell R.J.(2003). *Factors governing the strength and elastic properties of a physical model material used for strata mechanics investigations*. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, vol. 103, pp.63-71. 2003.
- Zhang, H., Liu, L. and Liu, H. (2011). Mountain ground movement prediction caused by mining based on BP-neural network. **Journal of Coal Science Engineering** (vol.17, pp.12–50). China.

ประวัตินักวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering เมื่อปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows เมื่อปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์หินในเชิงการทดลอง การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 20 โครงการ ทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีผลงานตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งสารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา 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 UNISEACH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co., ในประเทศเนเธอร์แลนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี