



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-41

## รายงานการวิจัย

การศึกษาการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือและเหมือง  
โพแทชใต้ดินที่ความกว้างของช่องเหมืองต่ำกว่าจุดวิกฤต  
โดยใช้แบบจำลองเชิงกายภาพในสามมิติ

(Assessment of Surface Subsidence Induced by Salt and  
Potash Mines under Sub-Critical Condition Using Three-  
Dimension Physical Model)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-59-24-41

## รายงานการวิจัย

การศึกษาการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือและเหมือง  
โพแทชใต้ดินที่ความกว้างของช่องเหมืองต่ำกว่าจุดวิกฤต  
โดยใช้แบบจำลองเชิงกายภาพในสามมิติ

(Assessment of Surface Subsidence Induced by Salt and  
Potash Mines under Sub-Critical Condition Using Three-  
Dimension Physical Model)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เพ็องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2560

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและ พิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2560



## บทคัดย่อ

แบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขได้นำมาศึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรไฟล์ฟังก์ชันในการกำหนดโปรไฟล์การหลุดตัวภายใต้สภาวะที่ต่ำกว่าจุดวิกฤติ ชั้นหินปิดทับได้จำลองด้วยส่วนผสมของเจลสังเคราะห์และพาราฟิน คุณสมบัติของเจลและขนาดความกว้างและความลึกของช่องเหมือนที่ใช้ในแบบจำลองสามารถสัมพันธ์กับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับบริเวณเหมือนเกลือและเหมือนโพแทชในหมวดหินมหาสารคามโดยใช้กฎการเปรียบเทียบของขนาด ค่าตรวจวัดจากแบบจำลองทางกายภาพนำมาคำนวณหาค่าการหลุดตัวสูงสุด ค่าความชัน ค่าความเครียดในแนวระนาบและค่ามุมความโค้ง ผลจากแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขของช่องเหมือนเดี่ยวในแนวระนาบมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยพบว่าช่องเหมือนในระดับลึกส่งผลให้ค่าการหลุดตัวและค่าความชันน้อย องค์ประกอบของการหลุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนเพิ่มขึ้น ภายใต้ความกว้างของร่องการหลุดตัวที่เท่ากัน ฟังก์ชันตรีโกณมิติสามารถประเมินค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวได้ต่ำกว่าแบบจำลองทางกายภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่องเหมือนที่มีขนาดเล็ก ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกให้ค่าการประเมินสูงกว่าแบบจำลองทางกายภาพประมาณร้อยละ 10 และฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลสามารถประเมินค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองทางกายภาพมากที่สุด ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพประมาณร้อยละ 5 ในทุกกรณี



## Abstract

Physical and numerical simulations are performed to verify the representativeness of some profile functions used to define the subsidence profiles under sub-critical to critical conditions. Synthetic gel with paraffin is used to simulate the overburden. Based on the scale law the gel properties and the opening depths and widths can be correlated with those of the prototypes of the overburden above salt and potash mines in the Maha Sarakham formation. The model measurements are used to calculate the maximum subsidence, slope, horizontal strains and curvature angle. The physical model results under single isolated horizontal opening agree well with those obtained from numerical analyses that deeper opening induces smaller maximum subsidence and slope. All components increase with opening width-to-depth ratio. Under the same trough width, the trigonometric function underpredicts the subsidence components particularly for small openings. The hyperbolic predictions are about 10% greater than the physical model results. The exponential function gives the closest predictions while it underestimates the model results by less than 5% for all cases.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการการวิจัย.....	3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของการวิจัย.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>9</b>
2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน.....	9
2.2 การจำลองเชิงกายภาพ.....	14
2.3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	16
2.4 ผลกระทบของคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับต่อการทรุดตัวของผิวดิน.....	18
<b>บทที่ 3 การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....</b>	<b>21</b>
3.1 วัตถุประสงค์.....	21
3.2 การจัดเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ.....	21
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	23
3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	31
4.1 วัตถุประสงค์.....	31
4.2 ทฤษฎีความเท่ากัน (Similarity theory).....	31
4.3 วิธีการทดสอบ.....	35
4.4 ผลการทดสอบ.....	38
บทที่ 5 การจำลองการหลุดตัวด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	53
5.1 วัตถุประสงค์.....	53
5.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	53
5.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงกายภาพ.....	55
5.4 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa.....	57
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างสมการความสัมพันธ์.....	67
6.1 วัตถุประสงค์.....	67
6.2 การสร้างสมการความสัมพันธ์.....	67
บทที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการคำนวณเชิงตัวเลข.....	73
7.1 วัตถุประสงค์.....	73
7.2 การคำนวณการหลุดตัวด้วย Profile function.....	73
7.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณการหลุดตัวด้วย Profile function และแบบจำลองเชิงกายภาพ.....	75
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	91
8.1 อภิปรายผลการวิจัย.....	91
8.2 สรุปผลการวิจัย.....	91
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	92
บรรณานุกรม.....	93
ประวัตินักวิจัย.....	97

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการที่คำนวณแบบ Profile function.....	10
2.2 สมการที่คำนวณแบบ Influence function.....	11
2.3 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงของชั้นหินปิดทับกับค่ามุมการหลุดตัว.....	20
3.1 สมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ.....	22
4.1 ความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหมวดหินมหาสารคาม.....	34
4.2 ค่าสัดส่วนระหว่างการจำลองในห้องปฏิบัติการและชั้นหินในสภาวะจริง.....	35
4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	37
4.4 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa.....	49
4.5 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3 MPa.....	49
4.6 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa.....	50
5.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับและขนาดของช่องเหมืองที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	54
5.2 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa.....	56
5.3 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3 MPa.....	56
5.4 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa.....	57
6.1 ผลการจำลองในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับช่องเหมืองในสภาวะจริง.....	71
7.1 ค่าความชันสูงสุด ( $\times 10^{-3}$ ) ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function.....	82
7.2 อัตราการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมืองที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function.....	83
7.3 ค่าความเครียดสูงสุด ( $\times 10^{-3}$ ) ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function.....	84
7.4 ค่ามุมความโค้ง (องศา) ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function.....	85



## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงหรือช่องเหมืองและ ธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน.....	10
2.2 คุณสมบัติของข้อผิดพลาดของฟังก์ชันเส้นโค้งแสดงเป็นภาพตัดขวางของร่องเหนือ ช่องเหมือง.....	13
2.3 โครงการลองทางกายภาพสำหรับคาดคะเนการทรุดตัว.....	14
2.4 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวกับระยะทางที่ได้จากภาคสนามกับจากสมการที่พัฒนาขึ้น.....	15
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรของช่องเหมืองใต้ดินและ อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของช่องเหมือง และอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง ของช่องเหมือง.....	16
2.6 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูกละลาย บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับ.....	17
2.7 เปอร์เซนต์การทรุดตัวสูงสุดต่อค่ามุมการทรุดตัวภายใต้การผันแปรค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด ของหิน.....	19
3.1 ตัวอย่างวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	21
3.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว.....	23
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วน พาราฟินเท่ากับ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์.....	24
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วน พาราฟินเท่ากับ 32 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์.....	25
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วน พาราฟินเท่ากับ 36 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์.....	26
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วน พาราฟินเท่ากับ 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์.....	27
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วน พาราฟินเท่ากับ 45 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์.....	28
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพาราฟิน...	29
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ Poisson และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพาราฟิน.....	29
4.1 พื้นที่ศึกษาในสภาวะจริงบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	32

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ลำดับชั้นหินในแต่ละพื้นที่ที่ทำการศึกษา.....	33
4.3 โครงทดสอบจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติ.....	36
4.4 การอบเจลในตู้อบภายใต้อุณหภูมิ 60°C.....	36
4.5 การเทเจลลงในโครงทดสอบ.....	36
4.6 ตัวแปรและองค์ประกอบของการทรุดตัวที่ทำการศึกษา.....	39
4.7 ตัวอย่างภาพสแกนของพื้นผิวและโปรไฟล์ที่เกิดการทรุดตัวสำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึก 40 mm และกว้าง 250 mm และความลึกเท่ากับ 100 mm และความกว้างเท่ากับ 100 mm.....	39
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ และอัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหลี่ยม ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหลี่ยม ภายใต้การผันแปรสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ.....	40
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันสูงสุดและมุมความโค้ง ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหลี่ยมภายใต้การผันแปรสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ.....	41
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหลี่ยมและค่าความเครียดสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหลี่ยมภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ.....	41
4.11 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหลี่ยมในกรณีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1 MPa.....	43
4.12 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหลี่ยมในกรณีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 3 MPa.....	44
4.13 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 40 mm.....	45
4.14 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 60 mm.....	46
4.15 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 80 mm.....	47

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหมืองที่มีความลึกเท่ากับ 100 mm.....	48
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาตรร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ.....	51
5.1 ตัวอย่างโครงข่ายแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ช่องเหมืองมีความลึกจากผิวดินเท่ากับ 40, 60, 80 และ 100 mm.....	55
5.2 ผลการเปรียบเทียบค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (ก) และอัตราส่วนการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	58
5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความชันสูงสุด (ก) และค่ามุมความโค้ง (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	59
5.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมืองและค่าความเครียดสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	59
5.5 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาตรร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	60
5.6 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหมืองในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1 MPa.....	31
5.7 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหมืองในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 3 MPa.....	62
5.8 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหมืองที่มีความลึกเท่ากับ 40 mm.....	63

## สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 60 mm.....	64
5.10 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 80 mm.....	65
5.11 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 100 mm.....	66
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหลี่ยม และค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหลี่ยมภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ.....	68
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันสูงสุดบนผิวดินและมุมความโค้งในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหลี่ยมภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ.....	69
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวระนาบต่อความลึกของช่องเหลี่ยมและความเครียดในแนวระนาบสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหลี่ยมภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ....	69
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการทรุดตัวต่อปริมาตรของช่องเหลี่ยมในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างกับความลึกของช่องเหลี่ยม.....	70
7.1 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa ภายใต้การผันแปรความลึกและความกว้างของช่องเหลี่ยม.....	76
7.2 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3 MPa ภายใต้การผันแปรความลึกและความกว้างของช่องเหลี่ยม.....	77

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.3 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมืองเท่ากับ 40 mm.....	78
7.4 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมืองเท่ากับ 60 mm.....	79
7.5 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมืองเท่ากับ 80 mm.....	80
7.6 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมืองเท่ากับ 100 mm.....	81
7.7 กราฟเปรียบเทียบแสดงค่าความชันสูงสุดระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองกรณีความเค้น 1, 3 และ 5 MPa.....	86
7.8 กราฟเปรียบเทียบแสดงค่ามุมความโค้งระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองกรณีความเค้น 1, 3 และ 5 MPa.....	87
7.9 กราฟเปรียบเทียบแสดงอัตราการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองกรณีความเค้น 1, 3 และ 5 MPa.....	88
7.10 เปรียบเทียบค่าความเครียดสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง.....	89

# บทที่ 1

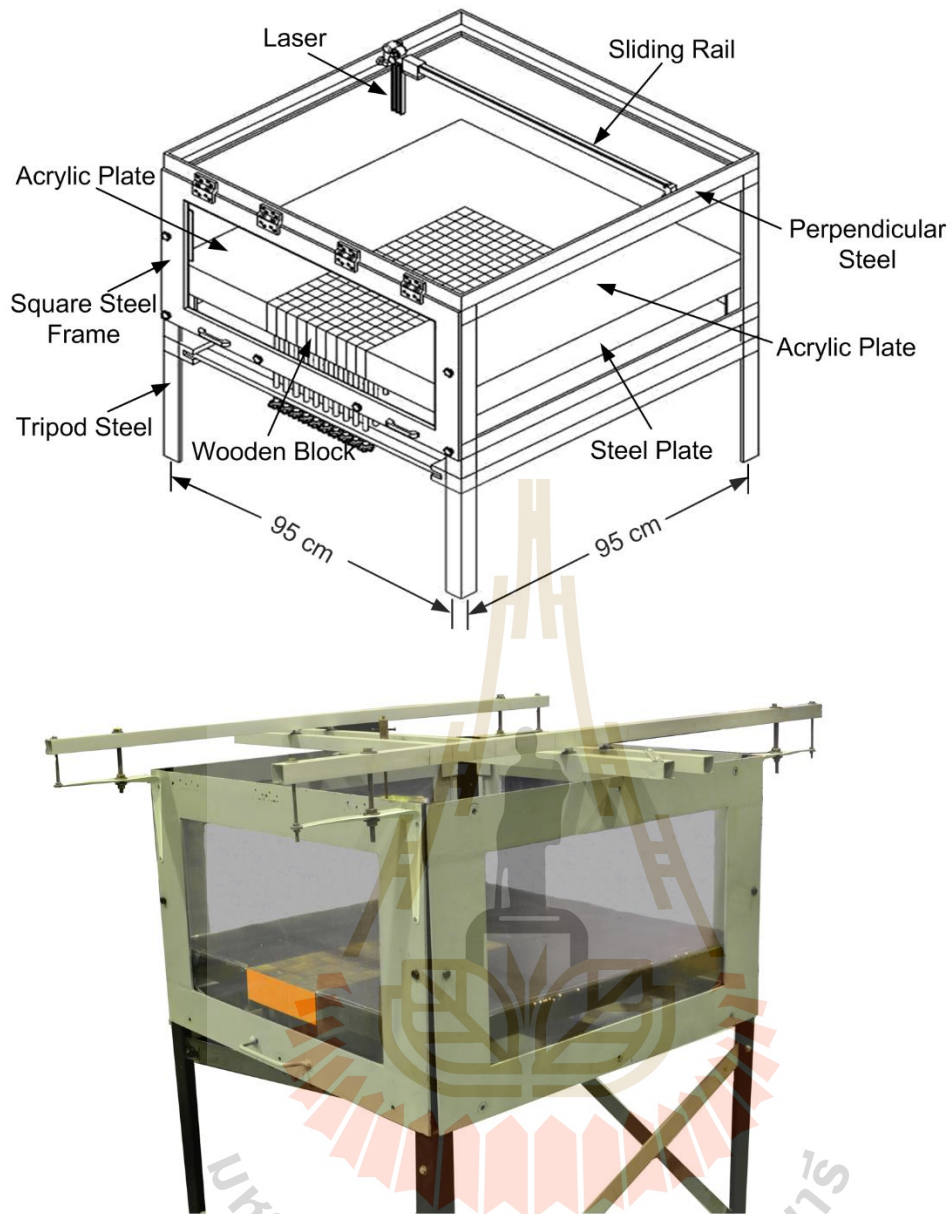
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การทำเหมืองเกลือหรือเหมืองโพแทชใต้ดินอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปของการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งแท้จริงแล้วในกระบวนการทำเหมือง ผู้ประกอบการจะพยายามไม่ให้เกิดการพังทลายของช่องเหมืองโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่หลังคาและเสาค้ำยัน ดังนั้น สภาวะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการทำเหมืองย่อมต้องเป็นสภาวะการทรุดตัวที่ช่องเหมืองยังคงมีเสถียรภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่า สภาวะการทรุดตัวที่ความกว้างของช่องเหมืองต่ำกว่าจุดวิกฤต (Sub-critical condition) ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศมากมายได้พัฒนาสมการเพื่อที่จะอธิบายพฤติกรรมทรุดตัวที่สภาวะดังกล่าว และยังไม่ได้รับการพิสูจน์ในเชิงประจักษ์ว่าสมการหรือความสัมพันธ์ใดจะสามารถอธิบายพฤติกรรมทรุดตัวได้อย่างถูกต้องและแม่นยำที่สุดจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประดิษฐ์เครื่องมือที่สามารถจำลองการทรุดตัวในสามมิติขึ้นมาในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ 1.1 ชื่อว่าโครงทดสอบการจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติ และได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและการทำงานของเครื่องมือดังกล่าวที่สภาวะการทรุดตัวของช่องเหมืองที่มีการพังทลายหรือสภาวะที่ความกว้างของช่องเหมืองเกินกว่าจุดวิกฤต (Thongprapha และ Fuenkajorn, 2013) จึงกล่าวได้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของช่องเหมืองที่แท้จริงได้ แต่ในงานวิจัยใหม่นี้ได้มุ่งเน้นไปที่การจำลองการทรุดตัวของช่องเหมืองที่สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตเท่านั้น เพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของนักวิจัยท่านอื่นที่เกี่ยวข้องกับการประเมินการทรุดตัวว่าความสัมพันธ์ในรูปแบบใดสามารถอธิบายพฤติกรรมทรุดตัวได้อย่างเหมาะสม และเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของผิวดิน อาทิ คุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ ลักษณะการขุดของช่องเหมือง รวมถึงรูปร่าง ความสูง ความลึก และอัตราการขุดเจาะของช่องเหมือง ซึ่งเป็นตัวกำหนดผลกระทบการทรุดตัวของผิวดินและปริมาตรการทรุดตัวบนผิวดิน (Volume of trough) ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสามารถใช้สำหรับเป็นตัวแทนและสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชใต้ดินที่กำลังจะเกิดขึ้นอีกมากมายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งเป็นแหล่งเกลือหินและโพแทชที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก





รูปที่ 1.1 โครงทดสอบการจำลองการท่รุดตัวของผิวดินในสามมิติ (Thongprapha และ Fuenkajorn, 2013)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อทดสอบการทรุดตัวของดินภายใต้สภาวะความกว้างของช่องเหมืองต่ำกว่าจุดวิกฤติ โดยใช้โครงทดสอบการจำลองการทรุดตัวของดินในสามมิติ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับมีสมบัติที่มีความยืดหยุ่นสูง ในการทดสอบมีการมีแผ่นแปรงความกว้าง ความลึก เส้นผ่าศูนย์กลาง และรูปร่างของช่องเหมือง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของช่องเหมืองใต้ดินที่มีผลต่อองค์ประกอบของการทรุดตัวของดิน (ระดับการทรุดตัวสูงสุด การเอียงตัว ความโค้ง การบิดตัว และความเครียดของดิน) และเพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวให้เห็นได้ในเชิงประจักษ์โดยใช้แบบจำลองการทรุดตัวในสามมิติ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นมาใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับเพื่อจำลองการทรุดตัวของดินภายใต้สภาวะช่องเหมืองที่ต่ำกว่าจุดวิกฤติ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างหรือลักษณะของช่องเหมืองและความลึกของช่องเหมืองที่มีผลต่อขอบเขตการทรุดตัว
- 2) การทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้จำลองชั้นหินปิดทับ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ก่อนนำมาทดสอบการทรุดตัว ได้แก่การผันแปรอัตราส่วนของวัสดุผสมต่อน้ำ 5 ระดับโดยน้ำหนัก เป็นอย่างน้อย
- 3) การทดสอบเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการที่ใช้โครงทดสอบการจำลองการทรุดตัวของดินในสามมิติโดยอาศัยเครื่องที่ประดิษฐ์ขึ้นจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Thongprapha และ Fuenkajorn (2013) โดยหล่อวัสดุผสมที่มีสมบัติความยืดหยุ่น เพื่อจำลองเป็นชั้นหินปิดทับที่กำหนดให้มีความกว้าง 30 cm และทำการผันแปรความสูงอย่างน้อย 4 ระดับ ตั้งแต่ 5, 10, 15, และ 20 cm จากพื้นผิว
- 4) การทดสอบนี้เป็นการจำลองช่องเปิดใต้ดินที่มีรูปร่างแตกต่างกัน คือ ช่องเหมืองรูปทรงกระบอก รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีการผันแปรขนาดพื้นที่หน้าตัดช่องเหมืองอย่างน้อย 4 ขนาด ตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 cm<sup>2</sup> และจำลองให้ช่องเหมืองมีความยาวไปตลอดทั้งความยาวของชั้นหินปิดทับ
- 5) ช่องเหมืองใต้ดินจะมีการวางตัวในแนวระนาบ (Horizontal) ที่ระดับความลึกจากผิว 5, 10, 15 และ 20 cm
- 6) การทดสอบทำที่อุณหภูมิห้อง
- 7) ผลจากแบบจำลองทางกายภาพนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function และโปรแกรม FLAC version 4.0



- 8) การทดสอบนี้แสดงด้วยการเขียนขั้นตอนการทดสอบอย่างละเอียดและเป็นขั้นตอนโดยมีรูปถ่ายประกอบ

#### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของการวิจัย

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการทรุดตัวของผิวดินจะมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินปิดทับ ลักษณะการขุดเจาะของช่องเหมือง ตลอดจนรูปร่าง ความสูง ความลึก และอัตราการเจาะของช่องเหมือง ปัจจัยดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดปริมาณและการแพร่กระจายการทรุดตัวของผิวดินที่แตกต่างกันออกไป

โครงการวิจัยจะเน้นศึกษาในเรื่องของการทดสอบด้านการจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติโดยใช้แบบจำลองเชิงกายภาพที่ได้มีการออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นจากผู้วิจัยก่อนหน้านี้ (Thongprapha และ Fuenkajorn, 2013) วัสดุที่มีความยืดหยุ่นจะถูกนำมาใช้ในการจำลองเป็นชั้นหินปิดทับ โดยสมมติให้ชั้นหินปิดทับมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ในการทดสอบจะมีการจำลองรูปร่างของโพรงหรืออุโมงค์หรือช่องเหมืองที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ได้แก่ รูปทรงกระบอก สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีการวางตัวในแนวระนาบ และมีการผันแปรเส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของช่องเหมืองที่แตกต่างกัน

ตัวแปรมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ ความกว้าง ความยาว และความลึกของช่องเหมือง อีกทั้งคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับจะถูกนำมาประเมินการทรุดตัวของผิวดิน และปริมาตรการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดิน (Volume of trough) โดยใช้การคำนวณด้วย Profile function ที่เสนอโดย Singh (1992) และใช้สมการที่เสนอขึ้นโดย Peck (1969) และ Rankin (1988) สำหรับการทรุดตัวของผิวดินและความกว้างของร่องการทรุดตัวของผิวดิน เพื่อนำมาวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองใต้ดินดังกล่าว

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

##### ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและค้นคว้าจากรายงาน งานวิจัย และเอกสาร ที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ เกี่ยวกับเรื่องการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดในชั้นหินที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น การเจาะช่องเหมืองรูปร่างต่างๆ และการใช้สมการ รวมถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคาดคะเนการทรุดตัวของผิวดิน

## ขั้นตอนที่ 2 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาการทรุดตัวของดินในสภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต วัสดุผสมที่เลือกใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับมีสมบัติความยืดหยุ่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน รวมถึงสามารถวางอุโมงค์หรือช่องเหมืองเข้าไปได้ โดยมีการผันแปรอัตราส่วนของวัสดุผสมต่อน้ำอย่างน้อย 5 ระดับโดยน้ำหนัก ซึ่งมีการทดสอบสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้จำลองชั้นหินปิดทับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นก่อนนำมาทดสอบ

## ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบการทรุดตัวของดินที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินภายใต้การผันแปรรูปร่าง (ช่องเหมืองรูปทรงกระบอก สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า) และขนาดของอุโมงค์หรือช่องเหมืองที่มีความลึก 5, 10, 15, 20 cm ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องเหมืองใต้ดินตั้งแต่ 1, 2, 3 จนถึง 4 cm<sup>2</sup> เป็นอย่างน้อย มีการจำลองชั้นหินปิดทับในสภาวะที่ต่ำกว่าจุดวิกฤตด้วยการใช้วัสดุจำลองที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ซึ่งมีการตรวจวัดค่าการทรุดตัวสูงสุด และมุมของการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณของร่องการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดิน

## ขั้นตอนที่ 4 การจำลองการทรุดตัวด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการนำมาคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FLAC version 4.0 ในการคำนวณปริมาณการทรุดตัวของดิน โดยโปรแกรมสามารถคำนวณค่าความเค้น-ความเครียดในสองมิติได้ และสามารถคาดคะเนพฤติกรรมหินได้ด้วยการสร้างความสัมพันธ์เป็นแบบพลาสติกและความหนืดแบบยืดหยุ่น ผลที่ได้ถูกเชื่อมโยงไปสู่สภาวะจริงในภาคสนาม

## ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างสมการความสัมพันธ์

ค่าที่ได้จากการตรวจวัดการทรุดตัวในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบการทรุดตัวในสามมิติที่ผู้วิจัยได้พัฒนาไว้แล้วนั้น นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความกว้างและความสูงของช่องเหมือง ความลึกของชั้นหินปิดทับ และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ ซึ่งมีการสร้างหรือการพัฒนาความสัมพันธ์เป็นแบบพลาสติก แบบความหนืดแบบยืดหยุ่น หรือมีความหนืดแบบยืดหยุ่น

### ขั้นตอนที่ 6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการคำนวณเชิงตัวเลข

ผลจากการทดสอบเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากสมการต่างๆ โดยหาความสัมพันธ์และสมการที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อหาสมการที่ใช้ในการคำนวณและคาดคะเนการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติที่มีความใกล้เคียงกับสภาวะความเป็นจริงที่สุด

### ขั้นตอนที่ 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ประกอบด้วย การนำเสนอบทความในการประชุมทางด้านวิชาการ การนำผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสาร และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

### ขั้นตอนที่ 8 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานด้านเหมืองแร่ใต้ดินและงานวิศวกรรมธรณี โดยสรุปได้ดังนี้

### 1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มศึกษาการทรุดตัวของผิวดินในสภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต ซึ่งในการศึกษาได้นำองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินมาใช้เพื่อศึกษาการทรุดตัวของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ปริมาตรของร่องการทรุดตัว ในการแก้ไขปัญหาในบริเวณที่อาจเกิดการทรุดตัวของดินหรือชั้นหินปิดทับอันเกิดมาจากการทำเหมืองใต้ดิน

### 1.6.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การเผยแพร่ความรู้ในการประชุมวิชาการระดับชาติและการตีพิมพ์เอกสารการประชุมในหัวข้อที่เกี่ยวข้องจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานและชุมชนในพื้นที่ อาทิ กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำบาดาล บริษัทชุดเจาะบ่อบาดาล กรมทรัพยากรธรณีและสิ่งแวดล้อม และองค์กรท้องถิ่น (อบต., อบจ.) เป็นต้น

### 1.6.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาคธุรกิจ อาทิ อุตสาหกรรมเหมืองใต้ดินและบริษัทที่เกี่ยวข้องกับการขุดเจาะใต้ดินต่างๆ เพื่อให้ผู้ประกอบการพึงระวังผลกระทบจากการขุดเจาะอันเป็นสาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว

### 1.6.4 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

เป็นการให้ความรู้แนะแนวทางให้ผู้ประกอบเหมืองใต้ดินเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเกิดและปริมาณของการทรุดตัวในชั้นหินปิดทับที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น เพื่อเป็นการป้องกัน แก้ว และลดผลกระทบที่เกิดจากการทรุดตัว

## 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

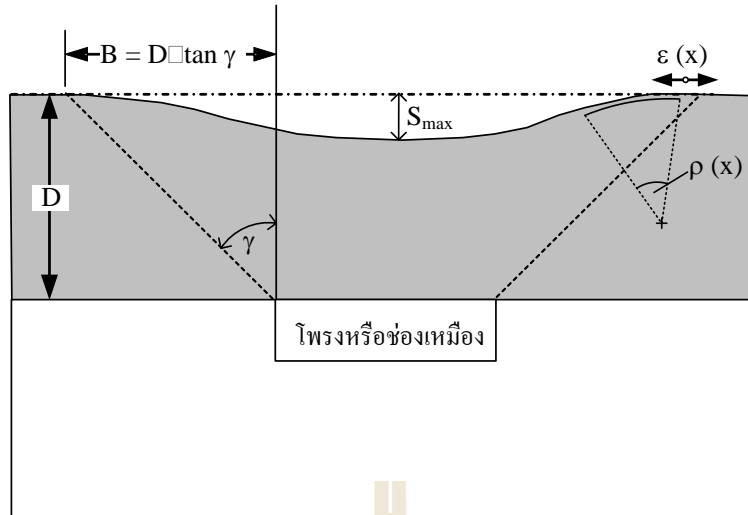
กิจกรรมเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือการทบทวนวรรณกรรมวิจัย โดยได้ทำการศึกษา ค้นคว้า และสรุปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการทรุดตัวในชั้นหินปิดทับที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ทำให้สามารถรู้ และเข้าใจกระบวนการและปัจจัยที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการทรุดตัวในชั้นหิน รวมทั้งการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและหลักวิธีการคำนวณเพื่อประเมินหรือคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

#### 2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน

Singh (1992) ได้ศึกษาการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองแร่ถ่านหิน และได้จำแนก ลักษณะของการทรุดตัวด้วยการใช้ขนาดของช่องเหมืองเป็นเกณฑ์ที่สัมพันธ์กับการทรุดตัว ซึ่งแบ่ง ออกเป็น 3 ระดับ คือ 1) ความกว้างของช่องเหมืองที่ต่ำกว่าจุดวิกฤติ (Sub-critical width) 2) ความ กว้างของช่องเหมืองที่จุดวิกฤติพอดี (Critical width) และ 3) ความกว้างของช่องเหมืองที่เกินกว่าจุด วิกฤติ (Super-critical width) โดยลักษณะการทรุดตัวดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความลึกของช่องเหมือง ความสูงของช่องเหมือง และคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับเป็นสำคัญ การทรุดตัวของผิวดินเกิดขึ้น เนื่องจากมีความเค้นภายนอก ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการเคลื่อนที่ของชั้นหิน โดยมีการเคลื่อนที่ด้านข้างและการเคลื่อนที่ในแนวตั้งอันเนื่องมาจากความเค้นดึงและความเค้นเฉือนใต้ดิน

องค์ประกอบของการทรุดตัว (รูปที่ 2.1) ที่ Singh เสนอจะเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของการ ทรุดตัวของผิวดิน โดยคำนวณด้วยสมการ Profile function ซึ่งองค์ประกอบของการทรุดตัว ประกอบด้วย การเอียงตัวของผิวดิน ความโค้งของผิวดิน การเคลื่อนตัวในแนวระนาบ และความเครียด ในแนวระนาบตามระยะทางที่วัดจากขอบของพื้นที่เหมือง (Inflection point) ในการคำนวณได้ใช้ค่า การทรุดตัวสูงสุด ( $S_{max}$ ) ความลึกของช่องเหมือง และบริเวณหรือขอบเขตการทรุดตัว (ตารางที่ 2.1)

การคำนวณการทรุดตัวของผิวดินนอกจากคำนวณด้วยสมการ Profile function แล้วยังมี การคำนวณด้วยสมการ Influence function ซึ่งมีการคำนวณแบบแบ่งย่อยพื้นที่ให้เล็กเป็นพื้นฐานของ การคำนวณ โดยสมมติให้ชั้นหินปิดทับมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความเท่ากันในทุกทิศทางที่ถูกเสนอ ขึ้นโดยนักวิจัยหลายๆ ท่าน (ตารางที่ 2.2)



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงหรือช่องเหมืองและ  
ธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน (Singh, 1992)

ตารางที่ 2.1 สมการที่คำนวณแบบ Profile function (Brauner, 1973 และ Hood และคณะ, 1981)

Conditions	Function	แหล่งอ้างอิง
Critical Extraction	Hyperbolic: $S(x) = 1/2 S_{max} [1 - \tanh(cx/B)]$	King และ Whetton (1957) Wardell (1965) Cherny (1966)
	Exponential: $S(x) = S_{max} \exp[-(1/2)((x+B)^2/B^2)]$	Martos (1958) Marr (1958-59)
	Trigonometric: $S(x) = S_{max} \sin^2[(\pi/4)(x/B-1)]$	Hoffman (1964)
Subcritical	Trigonometric : $S(x) = S_{max} (n_1, n_2)^{1/2} [n^2 (1-x + (\sin 2\pi x/2\pi)) + (1 - n^2/4) (1 + \cos \pi x)^2]$	General Institute of Mine Surveying (Anon., 1958)
	Hyperbolic : $S(x) = 1/2 S_{max} [(\tanh(2(x+w)/B) - \tanh(2x/B))]$	Knothe (1957) Wardell และ Webster (1957) Peng (1978)

โดยที่  $x$  = ระยะทางในแนวระนาบ  
 $c$  = ค่าคงที่  
 $B$  = รัศมีของพื้นที่ในสภาวะวิกฤต  
 $u$  = ค่าตัวแปรการอินทิเกรต และ  
 $w$  = ความกว้างของช่องเหมือง

ตารางที่ 2.2 สมการที่คำนวณแบบ Influence function (Brauner, 1973 และ Hood และคณะ, 1981)

Function	แหล่งอ้างอิง
$\phi(r) = S_{\max} / \pi \{ \sin\gamma \cos\gamma + [ (\pi/2) - \gamma ] B^3 \tan^3 \gamma / r (r^2 + B^2 \tan^2 \gamma)^2$	Bals (1932-1933)
$\phi(r) = (3 S_{\max} / \pi B^2) [1 - (r/B)^2]^2$	Beyer (1945)
$\phi(r) = [(n (2)(1/n) S_{\max}) / (\pi B \Gamma(1/2n)r) \exp [-4 (r/B)^{2n}]$	Sann (1949)
$\phi(r) = (2 S_{\max} / \pi^{3/2} Br) \exp [-4 (r/B)^2]$ when $n = 1$	
$\phi(r) = 0.216 (S_{\max} / Br) \exp [-4 (r/B)^6]$ when $n = 3$	
$\phi(r) = (n S_{\max} / B^2) \exp [ - n \pi (r/B)^2]$	Litwiniszyn (1957)
$\phi(r) = (S_{\max} / B^2) \exp [ - \pi (r/B)^2]$ when $n=1$	
$\phi(r) = (2 S_{\max} / B^2) \exp [ -2 \pi (r/B)^2]$ when $n = 2$	
$\phi(r) = (4.6 S_{\max} / \pi B^2) \exp [ -4.6 (r/B)^2]$	Ehrhardt และ Sauer (1959)
$\phi(r) = [n S_{\max} / 2\pi r_0^2 \Gamma(2/n)] \exp (-r/r_0)^n$	Kochmanski (1959)
$\phi(r) = (7 S_{\max} / B^2) \exp [ -6.65 (r/B)]$ when $n = 1$ and $B = 6.65 r_0$	

โดยที่  $r$  = ระยะทางของรัศมีจากจุดอ้างอิง  
 $B$  = รัศมีของพื้นที่ในสภาวะวิกฤต  
 $\gamma$  = ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (Angle of draw)  
 $n$  = ค่าตัวแปรลักษณะสภาวะของชั้นหินปิดทับ



- $\phi(r)$  = Influence function  
 $S_{\max}$  = ค่าการทรุดตัวสูงสุด  
 $\Gamma$  = Gamma function และ  
 $r_0$  = ตัวแปร Independent

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:

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

โดยที่

- $S_{\max}$  = ค่าการทรุดตัวสูงสุด  
 $D$  = ความลึกเฉลี่ยของช่องเหมือง  
 $B$  = ขอบเขตการทรุดตัว (วัดจากขอบของช่องเหมือง)  
 $\gamma$  = ค่ามุมแสดงขอบเขตการทรุดตัวเหนือช่องเหมืองมีค่าประมาณ  $30^\circ$ - $50^\circ$   
 $C$  = ค่าคงที่ (สำหรับการเปิดช่องเหมืองเกินจุดวิกฤต) และ  
 $B$  = ค่าคงที่แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบต่อความชันของผิวดิน  $u(x)/G(x)$  มีค่าประมาณ 0.12

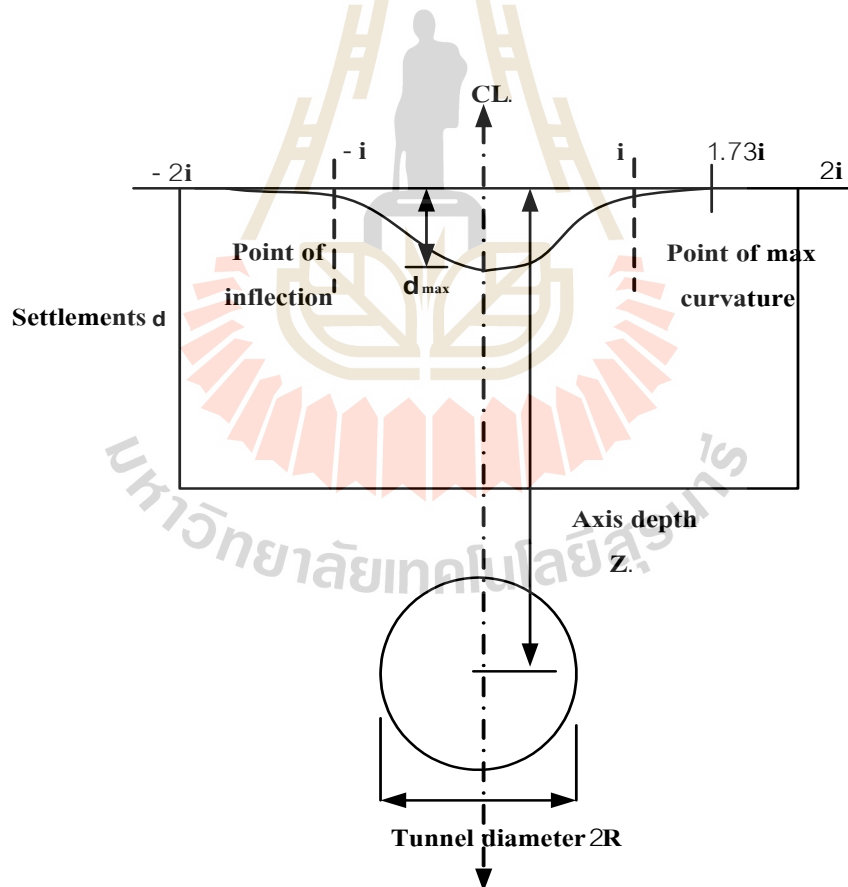


Peck (1969) ได้อธิบายรูปร่างของร่องการทรุดตัวจากตัวอย่างมากกว่าสี่สิบกรณี ด้วยการประมาณการกระจายแบบปกติ หรือใช้ Gaussian curve ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และได้เสนอสมการเพื่อหารูปร่างของร่องการทรุดตัว โดยใช้ค่าการทรุดตัวสูงสุด ( $S_{max}$ ) ระยะทางตามขวางจากกึ่งกลางของช่องเหมือง ( $x$ ) และความกว้างของร่องการทรุดตัว ( $i$ ) ดังสมการ 2.6

$$S = S_{max} \exp(-x^2/2i^2) \tag{2.6}$$

Rankin (1988) ได้เสนอสมการในการคำนวณค่าความกว้างของช่องเหมือง โดยกำหนดให้ Dimensionless ( $k$ ) เป็นค่าคงที่ กำหนดให้  $k=0.5$  สำหรับดินเหนียว (clay) และ  $k=0.25$  สำหรับ Cohesionless soil ส่วนความลึกของช่องเหมืองหรืออุโมงค์จะวัดจากจุดกึ่งกลางถึงผิวดินก่อนการทรุดตัว ( $Z_0$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้ได้สมการ 2.7

$$i = k \cdot Z_0 \tag{2.7}$$

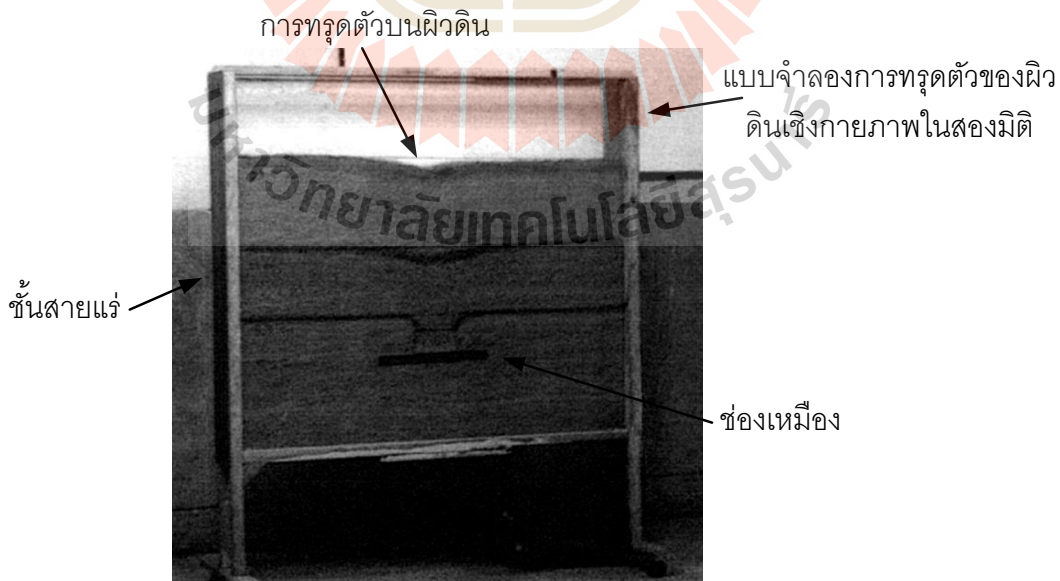


รูปที่ 2.2 สมบัติของข้อผิดพลาดของฟังก์ชันเส้นโค้งที่แสดงเป็นภาพตัดขวางของร่องเหนือช่องเหมือง (Peck, 1969)

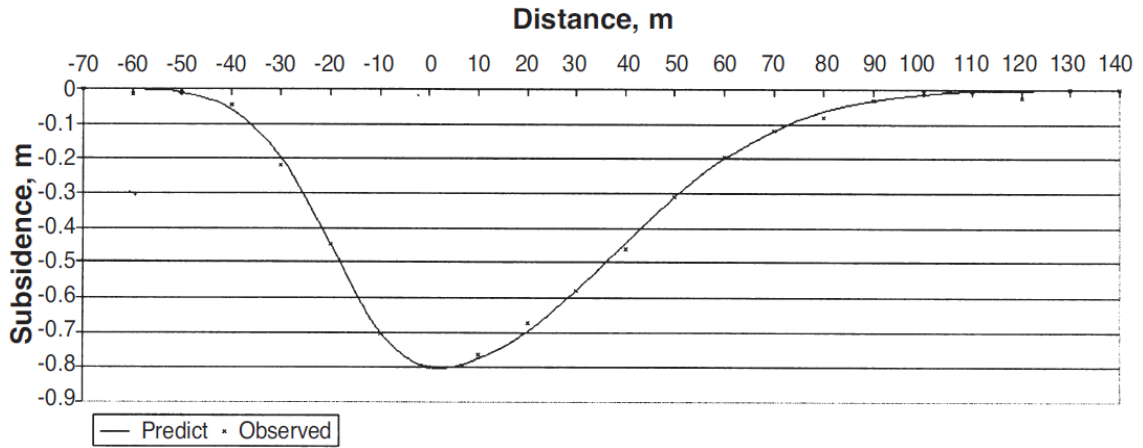
Elashiry และคณะ (2008) ทำการศึกษาการทรุดตัวของบ่อนผิวดินของเหมือง Phosphate โดยได้ทำการเปรียบเทียบวิธีคำนวณการทรุดตัวของ Bal, Peng, Knothe และ Peck กับค่าที่ทำการตรวจวัดได้จริงในภาคสนาม นำมาเปรียบเทียบค่าความชัน ความโค้ง และการยืดตัว ผลที่ได้พบว่าวิธีของ Peck ให้ค่าสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง คือให้ค่าสัมประสิทธิ์ความถูกต้องมากกว่า 0.9

## 2.2 การจำลองเชิงกายภาพ

Asadi และคณะ (2005) ได้ศึกษาการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดินในพื้นที่ของเหมือง การคาดคะเนการทรุดตัวของบ่อนผิวดินในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวและมีความชันมากไม่นิยมเท่ากับการคาดคะเนการทรุดตัวของชั้นถ่านหินที่อยู่ในแนวระนาบ เนื่องจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวสูงทำได้ยาก ทำให้มีการพัฒนาวิธีการคำนวณหรือการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวค่อนข้างน้อย โดยได้ทำการสร้างเครื่องจำลองเชิงกายภาพในสองมิติเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินหลังจากการทำเหมือง เพื่อให้ทราบว่าแร่ที่นำออกมาจะส่งผลให้ผิวดินเกิดการทรุดตัวเท่าใดในเหมืองถ่านหิน โดยแบบจำลองทำจากไม้ที่สร้างเป็นโครงเพื่อใช้จำลองชั้นหินในรูปแบบของภาพตัดขวางในแนวดิ่ง (รูปที่ 2.3) ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการคำนวณด้วย Profile function แบบใหม่ที่ใช้สำหรับการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัว โดยผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีใหม่นี้จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม (รูปที่ 2.4)

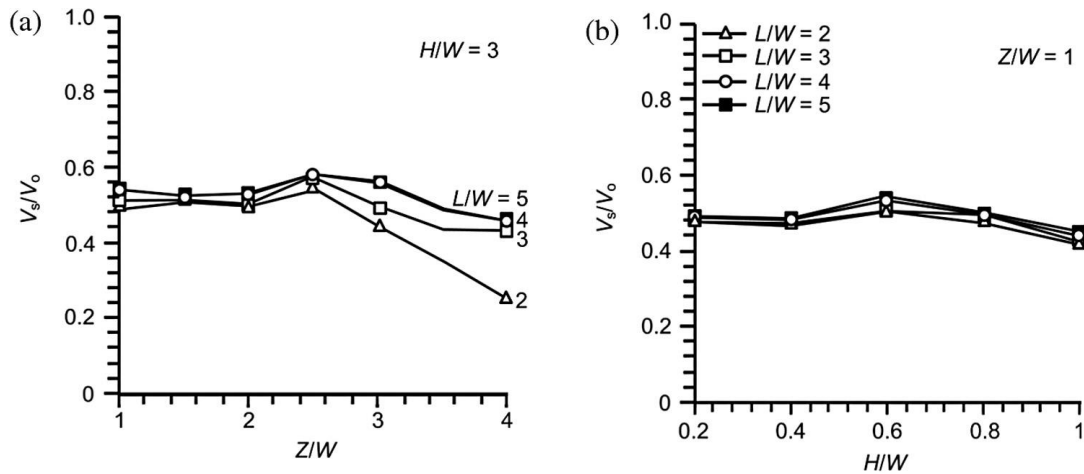


รูปที่ 2.3 โครงจำลองทางกายภาพสำหรับคาดคะเนการทรุดตัวที่เสนอโดย Asadi และคณะ (2005)



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวกับระยะทางที่ได้จากภาคสนามและจากสมการที่พัฒนาขึ้น (Asadi และคณะ, 2005)

Thongprapha และคณะ (2015) ศึกษาพื้นผิวการทรุดตัวที่เกิดจากช่องเหมืองใต้ดิน ภายใต้สภาวะที่เกินกว่าจุดวิกฤต ภายใต้ผลกระทบของรูปร่างทรงเรขาคณิตของช่องเหมือง ความลึก และขนาดก้นของชั้นหินปิดทับที่มีผลต่อมุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุด ผลการทดสอบระบุว่ามุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างขนาดก้นต่อความกว้างของช่องเหมือง และมุมการไหลที่เพิ่มขึ้นตามความสูงและความยาวของช่องเหมือง อัตราส่วนระหว่างการทรุดตัวสูงสุดต่อความกว้างของช่องเหมืองและมุมการไหลจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของช่องเหมืองมีค่าเกินกว่า 3 นอกจากนี้ภายใต้รูปร่างของช่องเหมืองที่เหมือนกัน การเพิ่มขึ้นของความลึกของช่องเหมืองส่งผลให้มุมการไหลและการทรุดตัวสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดกรวดในชั้นหินปิดทับที่อยู่เหนือช่องเหมืองตามความลึกที่เพิ่มขึ้น การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการเชิงประจักษ์ที่นำเสนอโดย Peck และแบบจำลอง PFC2D กับผลการทดสอบเชิงกายภาพ วิธีการเชิงประจักษ์สำหรับวัสดุที่ไม่มีความเค้นยึดติดที่นำเสนอโดย Rankin และ O'Reilly and New มีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลองเชิงกายภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างของช่องเหมืองมากกว่า 2 ผลการคำนวณโดยวิธีการเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่าปริมาณของร่องการทรุดตัวมักจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณของช่องเหมืองใต้ดิน (รูปที่ 2.5) นอกจากนี้ผลจากแบบจำลอง PFC2D มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงกายภาพในทุกกรณี ดังนั้นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้รับการตรวจสอบนี้จึงสามารถใช้ในการประเมินเพื่อทำการคาดคะเนพฤติกรรมทรุดตัวของผิวดินภายใต้สภาวะที่เกินกว่าจุดวิกฤตของมวลหินที่มีรอยแตกบริเวณเหนือช่องเหมืองได้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรของช่องเหมืองใต้ดินและอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของช่องเหมือง (ซ้าย) และอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของช่องเหมือง (ขวา) (Thongprapha et al., 2015)

โดยที่  $V_s$  = ปริมาตรของร่องการทรุดตัว  
 $V_0$  = ปริมาตรช่องเหมือง  
 $H$  = ความสูงของช่องเหมือง และ  
 $W$  = ความกว้างของช่องเหมือง

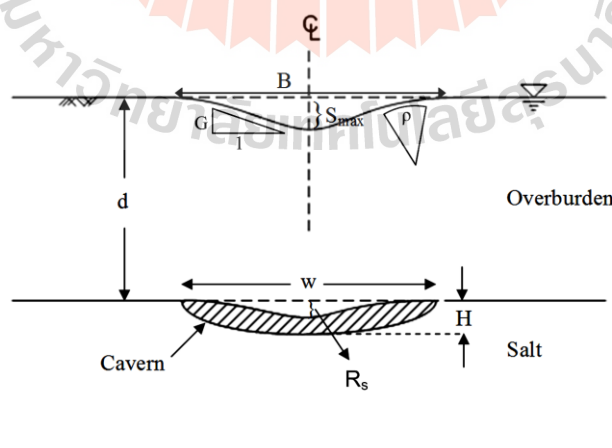
### 2.3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการอธิบายพฤติกรรมของหินในเชิงความเค้น ความเครียด และความซึมผ่าน อันเนื่องมาจากความซับซ้อนทางธรณีวิทยาของชั้นหินปิดทับและรูปแบบของการทำเหมือง ส่งผลให้การคำนวณหรือการคาดคะเนตามสูตรไม่มีประสิทธิภาพมากพอ อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาการคำนวณที่นานเกินไปในทางด้านวิศวกรรมธรณีจึงเป็นสิ่งที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของหินดังกล่าวได้ โดยสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นไปตามทฤษฎีของความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง หรือสร้างให้ความสัมพันธ์เป็นแบบพลาสติก และมีความหนืดแบบยืดหยุ่น หรือมีความหนืดแบบพลาสติก เป็นต้น อีกทั้งการวิเคราะห์ยังสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบสองมิติและสามมิติ ซึ่งอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข

โปรแกรม FLAC version 4.0 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้เพื่อประเมินการทรุดตัวของผิวดินและการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งกรณีนี้โครงข่ายแบบจำลองมีการออกแบบให้ครอบคลุมลึกลงไปจากผิวดินถึงความลึกของช่องเหมือง ทำให้สามารถคำนวณการทรุดตัวสูงสุด การเอียงตัว และความโค้งของผิวดินได้ โดยใช้หลักการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาวิเคราะห์ในรูปแบบสองมิติ ทำให้สามารถจำลองพฤติกรรมของหินคำนวณความเค้น ความเครียด และคาดคะเนพฤติกรรมของหินในอนาคตได้

Fuenkajorn และ Aracheeploha (2009) ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ขึ้นมากับการใช้สมการควบคุมแบบไฮเปอร์โบลิกเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูกละลายบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับ รูปที่ 2.6 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งวิธีนี้สามารถกำหนดตำแหน่งของโพรง ค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวดิน ค่าการเอียงสูงสุด และค่าความโค้งสูงสุดภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตและที่จุดวิกฤตของการทรุดตัว โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์นี้จะให้ค่าองค์ประกอบการทรุดตัวและลักษณะการทรุดตัวที่สามารถใช้เป็นตัวแทนภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต และที่จุดวิกฤต การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับขนาดและความลึกของโพรง โดยมีการผันแปรความแข็งและความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับเข้ามาพิจารณาด้วย ผลที่ได้คือชุดของสมการความสัมพันธ์ที่เชื่อมระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับคุณลักษณะของโพรงและคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ การศึกษาภายใต้สภาวะที่เกินกว่าจุดวิกฤตได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (โปรแกรม UDEC) เพื่อแสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนของการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับและการเกิดหลุมยุบเป็นผลมาจากความซับซ้อนของการเปลี่ยนรูปร่างของหินหลังจากเกิดการแตกและการเคลื่อนตัวของรอยแตกที่มีอยู่ก่อนในชั้นหินปิดทับ

Mohammed และคณะ (2013) ได้ศึกษาและคาดคะเนร่องการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์หรือช่องเหมืองในชั้นดินเหนียว โดยใช้วิธีการที่แตกต่างออกไป ได้แก่ วิธีการแบบ Namely analytical solution, Empirical solution และ Numerical solution ซึ่งใช้การคำนวณแบบ Finite element method (FEM) โดยสร้างให้มีความสัมพันธ์แบบ Elastic-plastic ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการทรุดตัวในช่องเหมืองของชั้นดินเหนียวและค่าความกว้างของการทรุดตัว ซึ่งจากการสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวให้ผลการคาดคะเนที่ดีกว่าแบบ Linear elastic ผลการศึกษาพบว่าค่าตัวแปรที่ซับซ้อนสำหรับ  $Z/D=1.5$  มีความเหมาะสมในการใช้คาดคะเน ในขณะที่ใช้  $Z/D=2$  และ  $Z/D=3$  พบว่ากราฟมีการโค้งที่แตกต่างในพื้นที่ห่างไกลจากศูนย์กลางของช่องเหมือง



รูปที่ 2.6 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูกละลายบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับที่เสนอโดย Fuenkajorn และ Aracheeploha (2009)

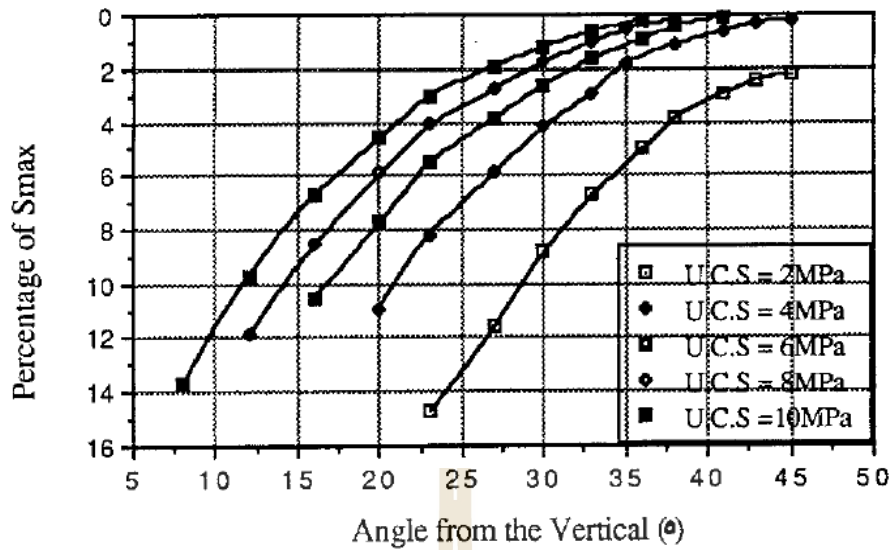


Shahriar และคณะ (2009) ได้ศึกษาและคาดคะเนการทรุดตัวของดินที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดิน ซึ่งการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองที่มีช่องเหมืองต้น 2 ช่อง ในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัว สามารถคาดคะเนการทรุดตัวด้วยโปรแกรม Finite difference method (FLAC 3D) การคาดคะเนลักษณะการทรุดตัวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทั้งค่าที่ตรวจวัดจริงในภาคสนามและจากการคำนวณด้วย Profile function สำหรับการวิเคราะห์จากค่าตัวแปรต่างๆ สามารถระบุตำแหน่งของการทรุดตัวสูงสุดบนผิวดิน ด้วยอัตราส่วนความกว้าง (W) ต่อความลึก (H) ที่จุดวิกฤต (W/H) จะมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 1.4 ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการเชิงตัวเลขสามารถอธิบายให้เห็นถึงกลไกการทรุดตัวได้ดีกว่าการคำนวณด้วย Profile function เนื่องจากการคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังนั้นผลที่ได้จากวิธีการคำนวณด้วย Profile function จึงยากต่อการคาดเดาจากเหมืองถ่านหินเหมืองหนึ่งกับเหมืองถ่านหินอื่น หรือแม้แต่จากช่องเหมืองหนึ่งกับช่องเหมืองอื่น

Alejanoa และคณะ (1999) ศึกษาการทรุดตัวของดินที่เกิดจากโครงสร้างของชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวที่แตกต่างกันมากในบริเวณรอยต่อของถ่านหิน โดยมีลักษณะการเอียงตัวแบบเกือบแบนราบ และเอียงมากเกือบตั้งฉาก ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดการทรุดตัว โดยในขั้นแรกของการคาดคะเนได้ใช้วิธีการจำแนกลักษณะทางกายภาพและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้มีการคำนวณด้วย Profile function, Influence function, Physical model และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยการใช้โปรแกรม FLAC อยู่บนพื้นฐานของการคำนวณแบบ Finite Difference Method (FDM) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยกระบวนการดังกล่าวทำให้ทราบถึงเหตุผลของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเอียงตัวที่ไม่เท่ากันของชั้นถ่านหิน

## 2.4 ผลกระทบของคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับต่อการทรุดตัวของผิวดิน

Yao และคณะ (1991) ได้เสนอวิธีการคำนวณค่ามุมการทรุดตัว (Angle of draw) ด้วยการใช้ระเบียบการเชิงตัวเลขที่เสนอโดย Reddish (1989) ผู้วิจัยได้ศึกษาผลกระทบของความแข็งของชั้นหินปิดทับและคุณสมบัติของมวลหินที่แตกต่างกันต่อองค์ประกอบของการทรุดตัว ผลที่ได้พบว่าค่ามุมการทรุดตัวมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ ความลึก และรูปร่างของช่องเหมือง จากการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติชั้นหินปิดทับทั้ง 5 กรณี พบว่าเมื่อชั้นหินมีความแข็งมากขึ้น จะส่งผลให้มีค่ามุมการทรุดตัวน้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งคือเมื่อชั้นหินปิดทับอ่อนลงจะส่งผลให้ค่ามุมการทรุดตัวมากขึ้น รูปที่ 2.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวสูงสุดต่อค่ามุมการทรุดตัวภายใต้การผันแปรค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของหิน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่เปอร์เซ็นต์การทรุดตัวเดียวกัน หินที่มีค่ากำลังรับแรงกดต่ำกว่าจะให้ค่ามุมการทรุดตัวมากกว่าหินที่มีค่ากำลังรับแรงกดสูงกว่า

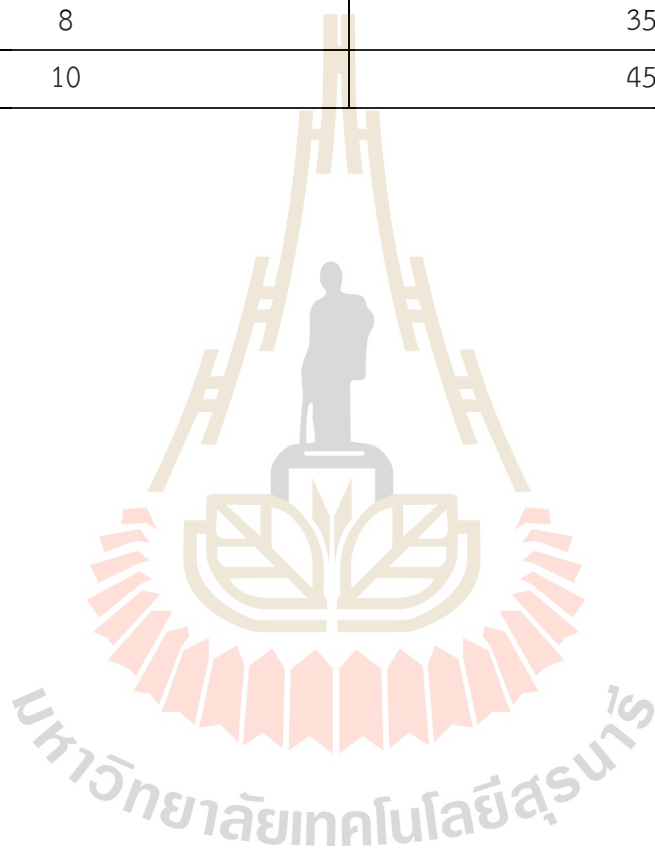


รูปที่ 2.7 เปอร์เซนต์การทรุดตัวสูงสุดต่อค่ามุมการทรุดตัวภายใต้การผันแปรค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของหิน (Yao และคณะ, 1991)

Ren และ Li (2008) ได้ศึกษาขอบเขตของการทรุดตัวที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งขอบเขตการทรุดตัวจะถูกกำหนดโดยมุมจำกัด (Limit angles) ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกควบคุมด้วยลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินปิดทับและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำเหมือง รวมไปถึงมุมเอียงของชั้นแร่ด้วย ข้อมูลการสังเกตการณ์จากทั่วโลกและการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขระบุว่า ค่าความแข็ง ค่ากำลังรับแรง และการวิบัติของชั้นหินปิดทับถือว่ามีความสำคัญต่อลักษณะการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งหากชั้นหินปิดทับมีความแข็งแรงมากพอและไม่มีการพังหรือการแตกของหลังคาเหมืองใต้ดิน ค่ามุมของการทรุดตัวมักจะมีแนวโน้มมากขึ้นในหินที่มีความแข็งสูงขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าหากหลังคาเหมืองเกิดการทรุดตัว ชั้นหินที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะมีค่ามุมที่น้อยกว่าบริเวณพื้นผิว และชั้นหินที่อ่อนจะให้ค่ามุมที่มากกว่า (ตารางที่ 2.3) เมื่อชั้นหินปิดทับมีความแข็งแรงมากพอ ก็จะเป็นไปได้ว่าการทรุดตัวที่ต่ำกว่าจุดวิกฤตจะถูกพัฒนามากกว่าช่องเหมืองที่มีความกว้างเกินกว่าจุดวิกฤต ค่ากำลังรับแรงและความแข็งแรงของหินจะมีผลต่อขนาดการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับ โดยทั่วไปการทรุดตัวสูงสุดของชั้นหินปิดทับที่มีความแข็งแรงจะมีค่าน้อยกว่าในชั้นหินปิดทับที่อ่อนกว่า แบบจำลองเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความลาดเอียงของชั้นแร่ที่มีต่อค่ามุมจำกัด กล่าวคือค่ามุมจำกัดของการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นตรงบริเวณที่ชั้นแร่มีการเอียงตัวลง และค่ามุมจะลดลงตรงด้านที่ชั้นแร่มีการเอียงตัวขึ้น ซึ่งค่าของมุมจำกัดนี้สามารถสร้างขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของการทดสอบระหว่างค่ามุมจำกัดและมุมการเอียงของชั้นแร่อาจได้มาจากการใช้เทคนิคของการจำลองเชิงตัวเลข หรือจากข้อมูลการสังเกตการณ์ในบริเวณที่มีการทำเหมือง

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงของชั้นหินปิดทับกับค่ามุมการทรุดตัว (Ren และ Li, 2008)

ค่ากำลังรับแรงของชั้นหินปิดทับ (MPa)	ค่ามุมการทรุดตัว (Degrees)
2	27
4	29
6	33
8	35
10	45





## บทที่ 3

### การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาการทรุดตัวของดินในสภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตได้ใช้วัสดุจำลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับที่มีผลต่อการทรุดตัวของดิน เนื้อหาในบทนี้อธิบายวิธีการเตรียมวัสดุเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยวัสดุที่เลือกใช้มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีการผันแปรอัตราส่วนของวัสดุผสมเพื่อให้ได้มาซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสม และมีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้จำลองชั้นหินปิดทับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนของ Poisson ก่อนนำมาจำลองชั้นหิน

#### 3.2 การเตรียมวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ

ส่วนผสมระหว่างเจลสังเคราะห์และพาราฟินได้ถูกนำมาจำลองเป็นชั้นหินปิดทับในการทดสอบในห้องปฏิบัติการแทนวัสดุที่กล่าวไว้ในข้อเสนอโครงการ เนื่องจากวัสดุผสมที่นำมาศึกษาในครั้งนี้สามารถนำกลับมาใช้ทดสอบได้หลายครั้งและควบคุมสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้ดีกว่า โดยวัสดุทั้งสองชนิดเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่กลั่นแยกออกมาจากน้ำมันดิบ ลักษณะทางกายภาพของเจลสังเคราะห์คือใส ไม่มีสีถึงสีขาวขุ่นเล็กน้อย ลักษณะกึ่งแข็ง มีจุดหลอมเหลวประมาณ 60-70°C พาราฟินมีสีเหลืองอ่อนถึงขาวขุ่น ไม่มีกลิ่น มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีจุดหลอมเหลวประมาณ 47-64°C การเตรียมวัสดุเพื่อจำลองชั้นหินปิดทับดำเนินการโดยผสมเจลสังเคราะห์และพาราฟินภายใต้อุณหภูมิ 60°C แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิ 32°C จะได้ส่วนผสมที่มีลักษณะกึ่งแข็ง และได้ทำการผันแปรอัตราส่วนของวัสดุทั้งสองชนิด โดยผันแปรพาราฟินตั้งแต่ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการจำลองชั้นหินปิดทับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเป็นเกณฑ์ในการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยเตรียมส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนให้มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 mm ยาว 25.5 mm (รูปที่ 3.1) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D695-10 (ASTM, 2010) ซึ่งแต่ละอัตราส่วนจะเตรียมไว้อย่างละ 5 ตัวอย่าง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดและหาค่าความหนาแน่น ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ

ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความยาว (mm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)
P10-UCS-01	3.05	12.49	25.42	3.11	0.98
P10-UCS-02	3.02	12.51	25.31	3.11	0.97
P10-UCS-03	3.06	12.48	25.54	3.12	0.98
P10-UCS-04	3.06	12.49	25.21	3.09	0.99
P10-UCS-05	3.04	12.52	24.89	3.06	0.99
P32-UCS-01	3.05	12.51	25.22	3.10	0.98
P32-UCS-02	3.07	12.52	25.31	3.12	0.99
P32-UCS-03	3.05	12.49	25.34	3.10	0.98
P32-UCS-04	3.00	12.48	25.41	3.11	0.97
P32-UCS-05	3.01	12.51	24.89	3.06	0.98
P36-UCS-01	3.05	12.48	25.31	3.10	0.99
P36-UCS-02	3.05	12.48	25.14	3.08	0.99
P36-UCS-03	3.10	12.51	25.41	3.12	0.99
P36-UCS-04	3.01	12.47	24.89	3.04	0.99
P36-UCS-05	2.98	12.50	24.89	3.05	0.98
P40-UCS-01	3.07	12.49	25.22	3.09	0.99
P40-UCS-02	3.08	12.50	25.31	3.11	0.99
P40-UCS-03	3.05	12.48	25.34	3.10	0.98
P40-UCS-04	3.03	12.49	24.89	3.05	0.99
P40-UCS-05	3.04	12.51	25.31	3.11	0.98
P45-UCS-01	3.06	12.50	25.34	3.11	0.98
P45-UCS-02	3.02	12.51	24.89	3.06	0.99
P45-UCS-03	3.02	12.48	24.89	3.04	0.99
P45-UCS-04	3.10	12.49	25.54	3.13	0.99
P45-UCS-05	3.05	12.51	25.22	3.10	0.98
P50-UCS-01	3.07	12.47	25.31	3.09	0.99
P50-UCS-02	3.06	12.50	25.34	3.11	0.98
P50-UCS-03	3.02	12.49	24.89	3.05	0.99
P50-UCS-04	3.07	12.50	25.22	3.09	0.99
P50-UCS-05	3.06	12.51	25.31	3.11	0.98

### 3.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

วัตถุประสงค์ของการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวคือ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของวัสดุในแต่ละอัตราส่วน โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine (Instron รุ่น 5565) มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ ตัวเครื่อง ส่วนวัดแรง อุปกรณ์จับชิ้นทดสอบ และคอมพิวเตอร์ควบคุมการทดสอบ เครื่องนี้สามารถรับแรงได้สูงสุด 5 kN อัตราการเคลื่อนตัวต่ำสุดอยู่ที่ 0.01 mm/min และอัตราการเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1000 mm/min ก่อนการทดสอบจะต้องทำการตั้งค่าประเภทของการทดสอบ อัตราการกด และขนาดของแท่งตัวอย่าง การทดสอบได้ดำเนินการให้แรงในแนวแกนกับแท่งตัวอย่าง (รูปที่ 3.2) ซึ่งในระหว่างการทดสอบได้บันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและในแนวแกนกับแท่งตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการแตก

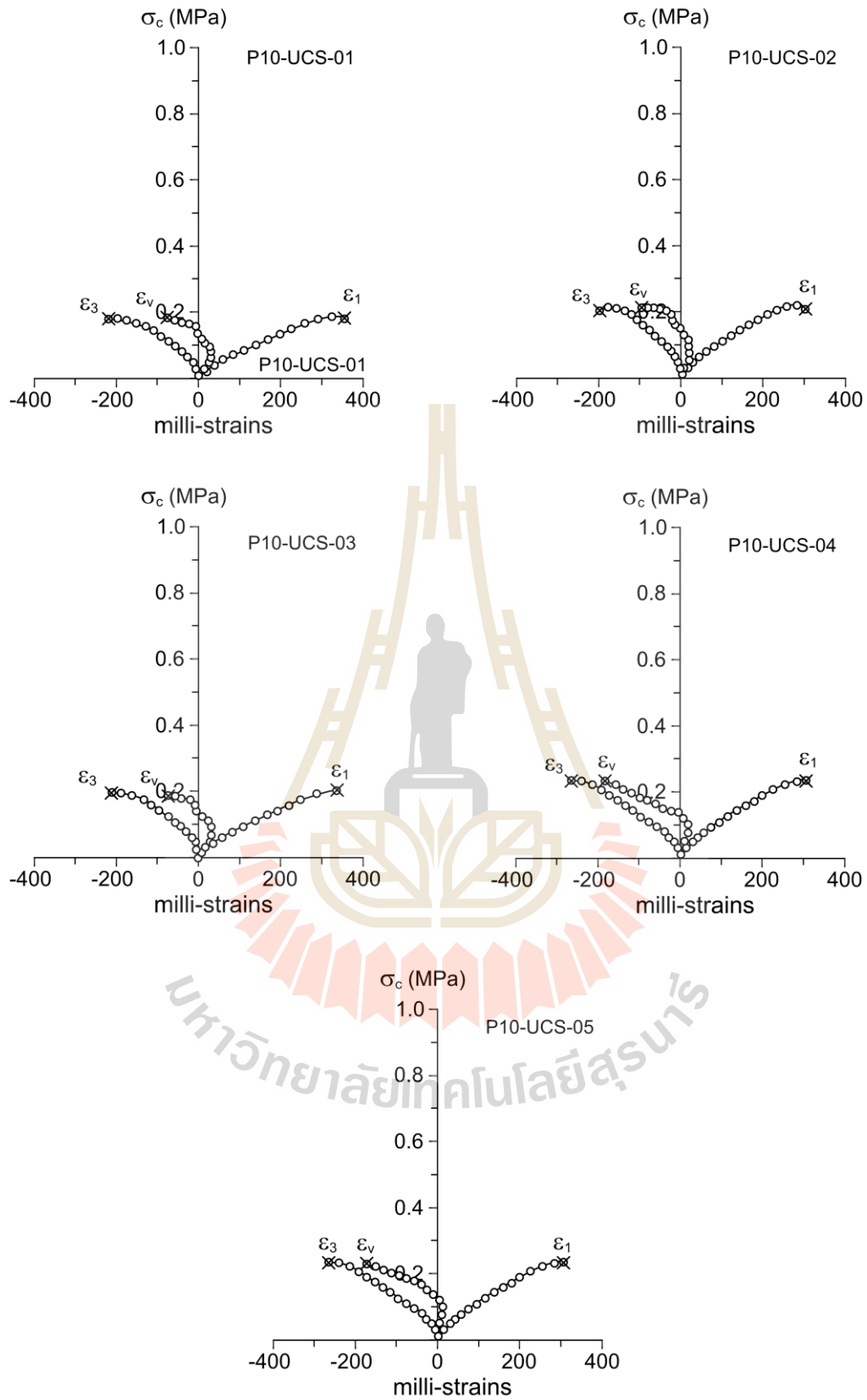
### 3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว

รูปที่ 3.3 ถึง 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับภายใต้การผันแปรอัตราส่วนผสม ผลที่ได้จะนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และอัตราส่วนของ Poisson จากกราฟแสดงให้เห็นว่าภายใต้อัตราส่วนพาราฟินต่อเจลสังเคราะห์น้อยจะส่งผลให้ความเค้นมีค่าต่ำ ในขณะที่ความเครียดมีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่มีพาราฟินมาก รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนพาราฟิน ผลที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีการเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียลเมื่ออัตราส่วนพาราฟินเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของ Poisson มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของพาราฟิน (รูปที่ 3.9)

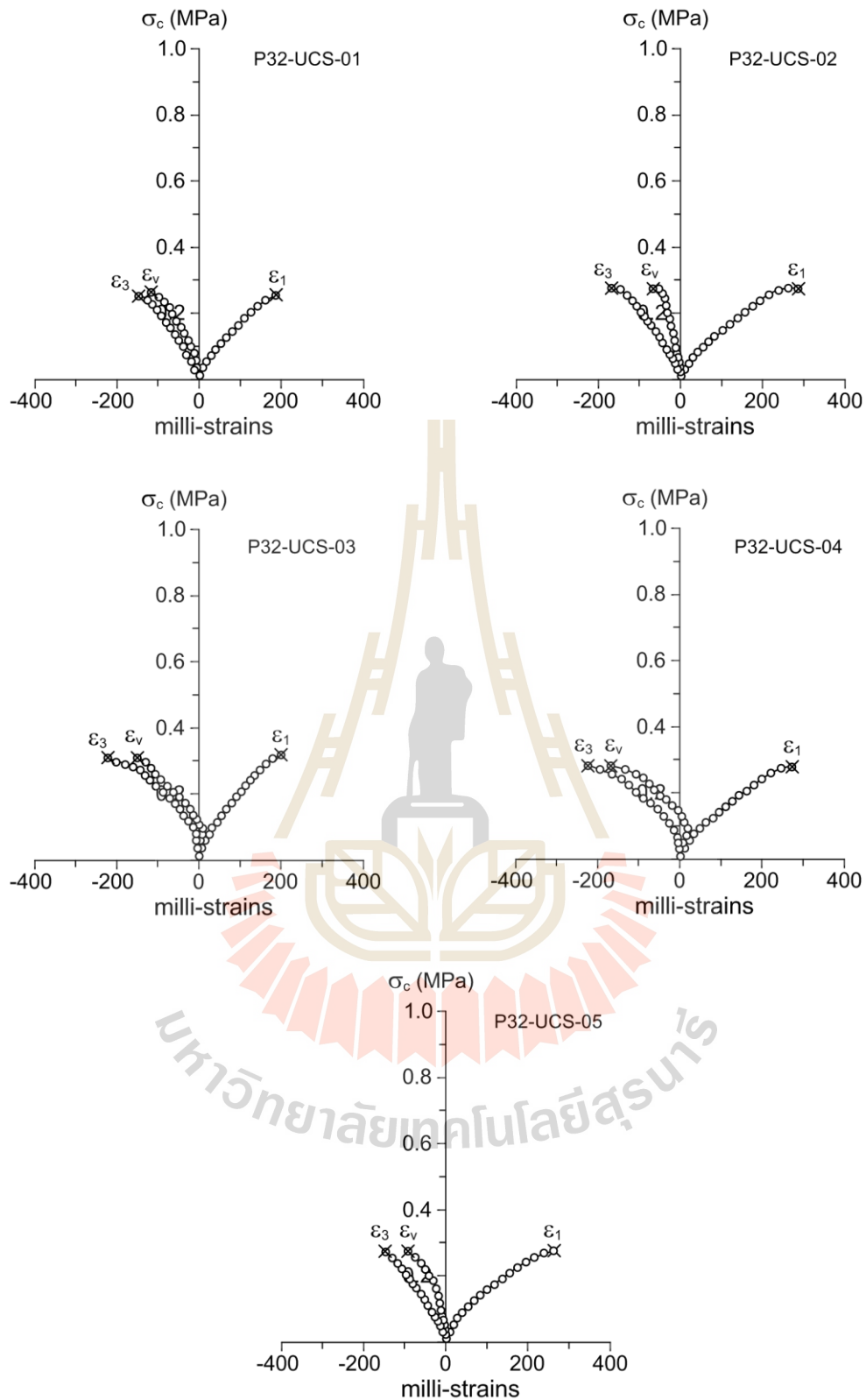
อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้เลือกมาเป็นตัวแทนของชั้นหินปิดทับคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1, 3 และ 5 MPa ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถเทียบเคียงได้กับชั้นหินปิดทับของหมวดหินมหาสารคาม ซึ่งค่าที่เลือกมานั้นมีอัตราส่วนของ Poisson เท่ากับ 0.34, 0.36 และ 0.36 และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ  $0.99 \text{ g/cm}^3$



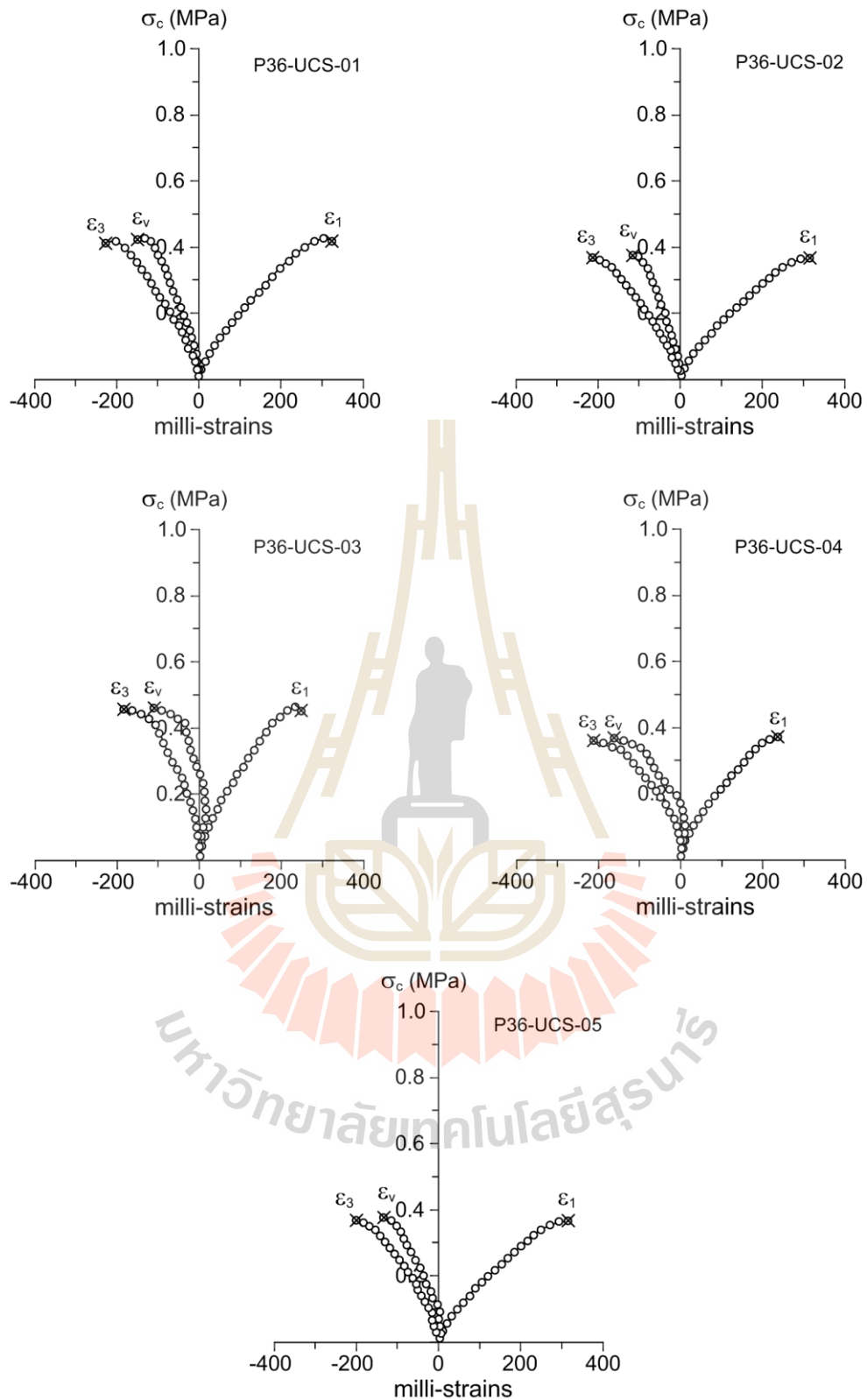
รูปที่ 3.2 การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว



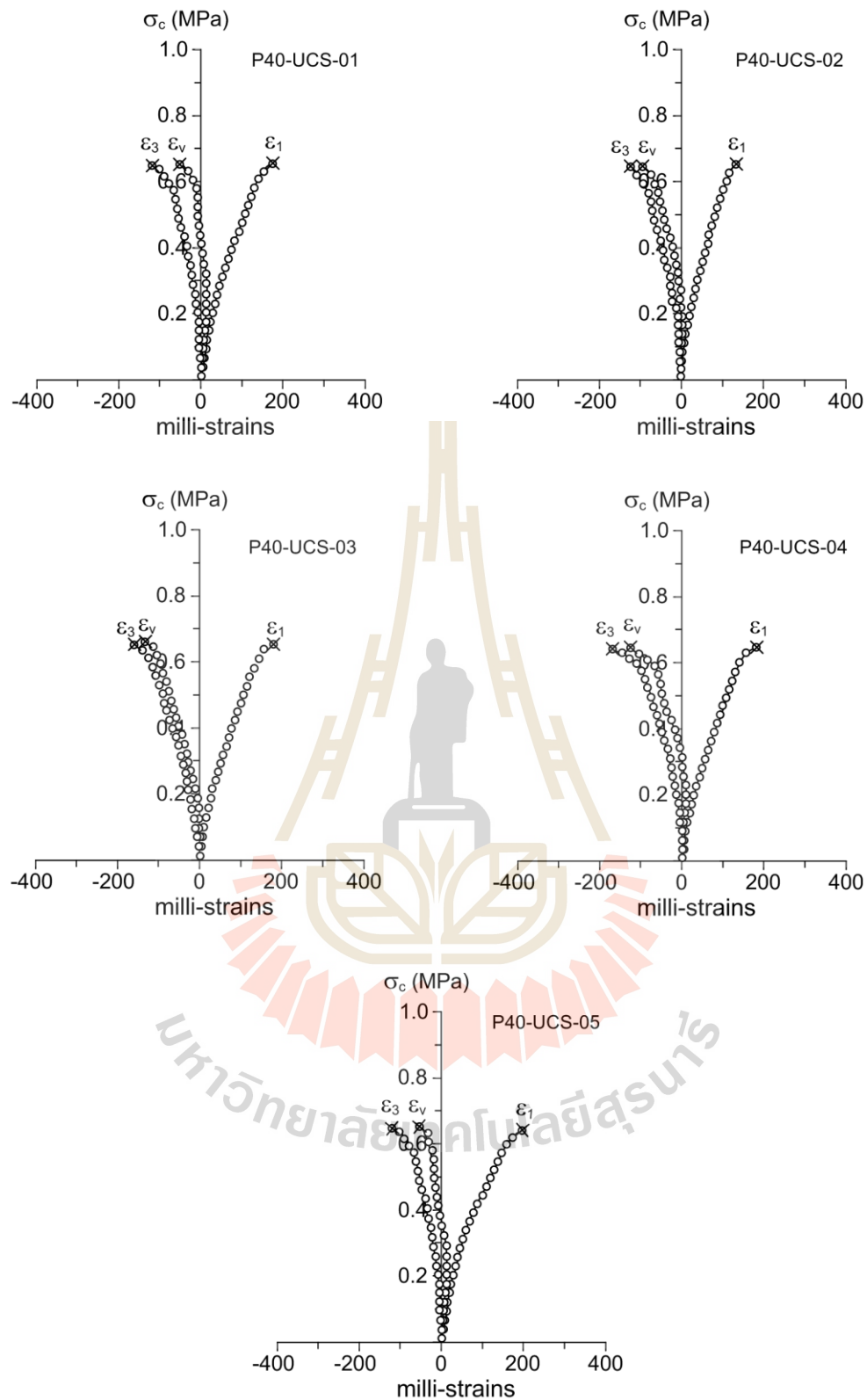
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วนพาราฟินเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วนพาราฟินเท่ากับ 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์

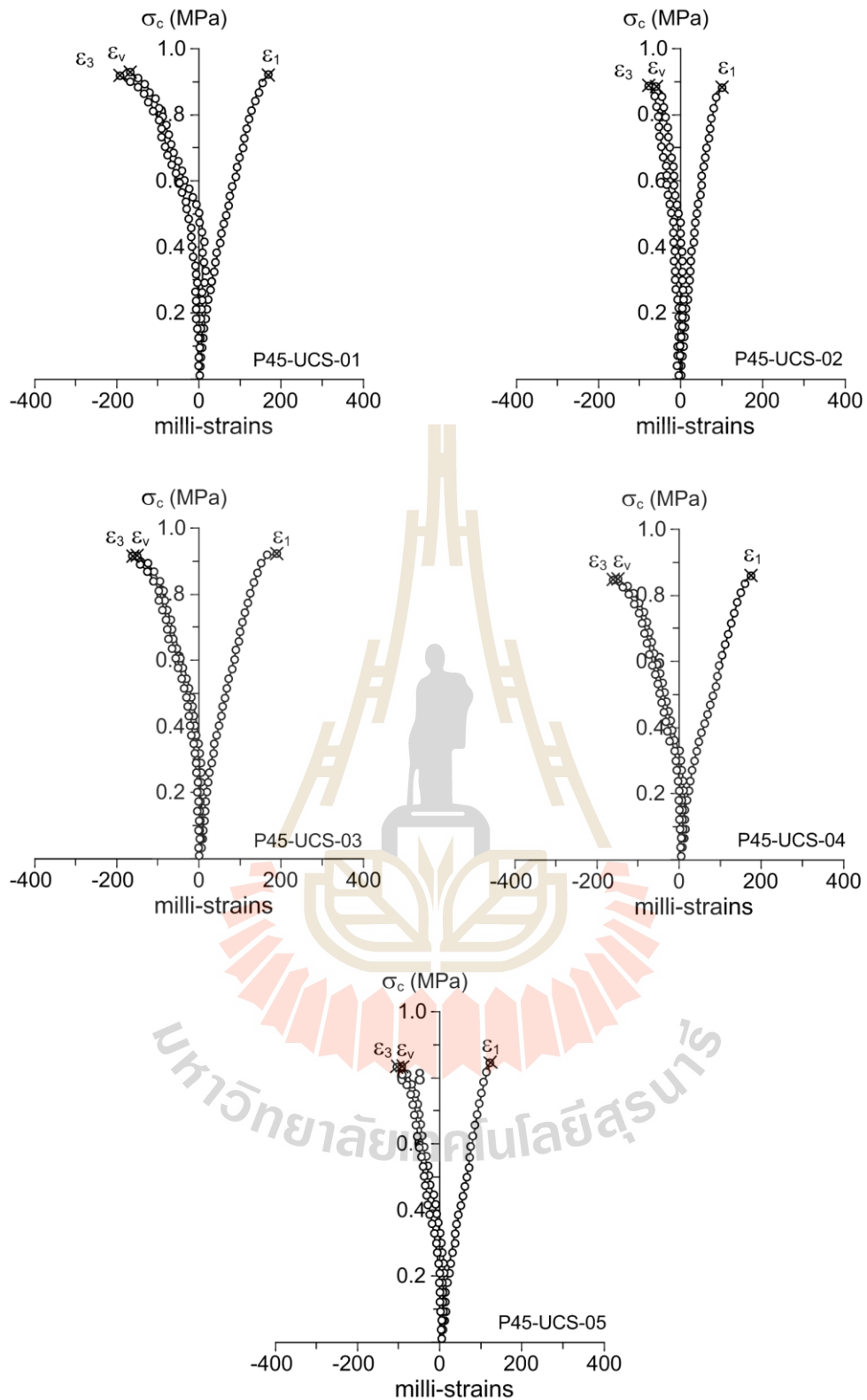


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วนพาราฟินเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์



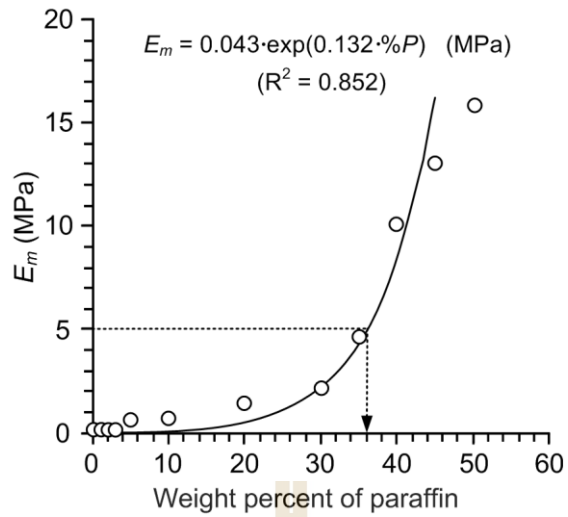
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วนพาราฟินเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์



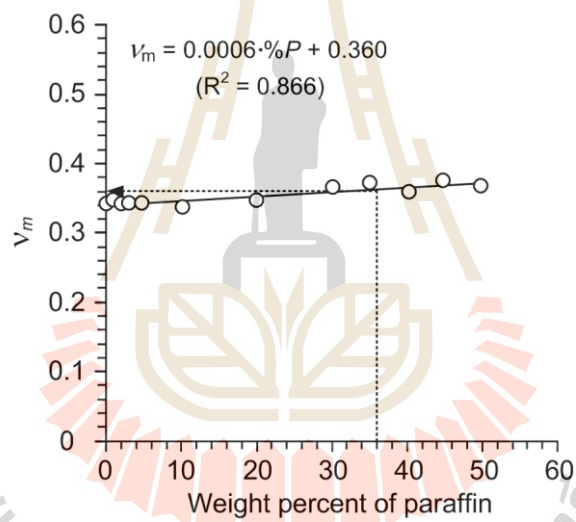


รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับที่มีอัตราส่วนพาราฟินเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเจลสังเคราะห์





รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพาราฟิน



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ Poisson และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพาราฟิน

## บทที่ 4

### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพคือ เพื่อศึกษาผลกระทบของความกว้างและความลึกของช่องเหมือง รวมทั้งคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับต่อพฤติกรรมการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดิน ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุจำลองชั้นหินปิดทับ (เจล) และรูปร่างของช่องเหมืองสามารถสัมพันธ์กับช่องเหมืองบริเวณเหมืองเกลือและเหมืองโพแทชในหมวดหินมหาสารคามได้ด้วยการใช้ทฤษฎีความเท่ากัน (กฎการเปรียบเทียบของขนาด)

#### 4.2 ทฤษฎีความเท่ากัน (Similarity theory)

ตามหลักของทฤษฎีนี้หรือบางครั้งเรียกว่า กฎการเปรียบเทียบของขนาด (Yavuz และ Fowell, 2013) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ความหนาแน่นของเจล และขนาดของช่องเหมืองจะมีความสัมพันธ์กับช่องเหมืองในสภาวะจริงดังสมการ (4.1)

$$C_E/C_p \times C_L = 1 \quad (4.1)$$

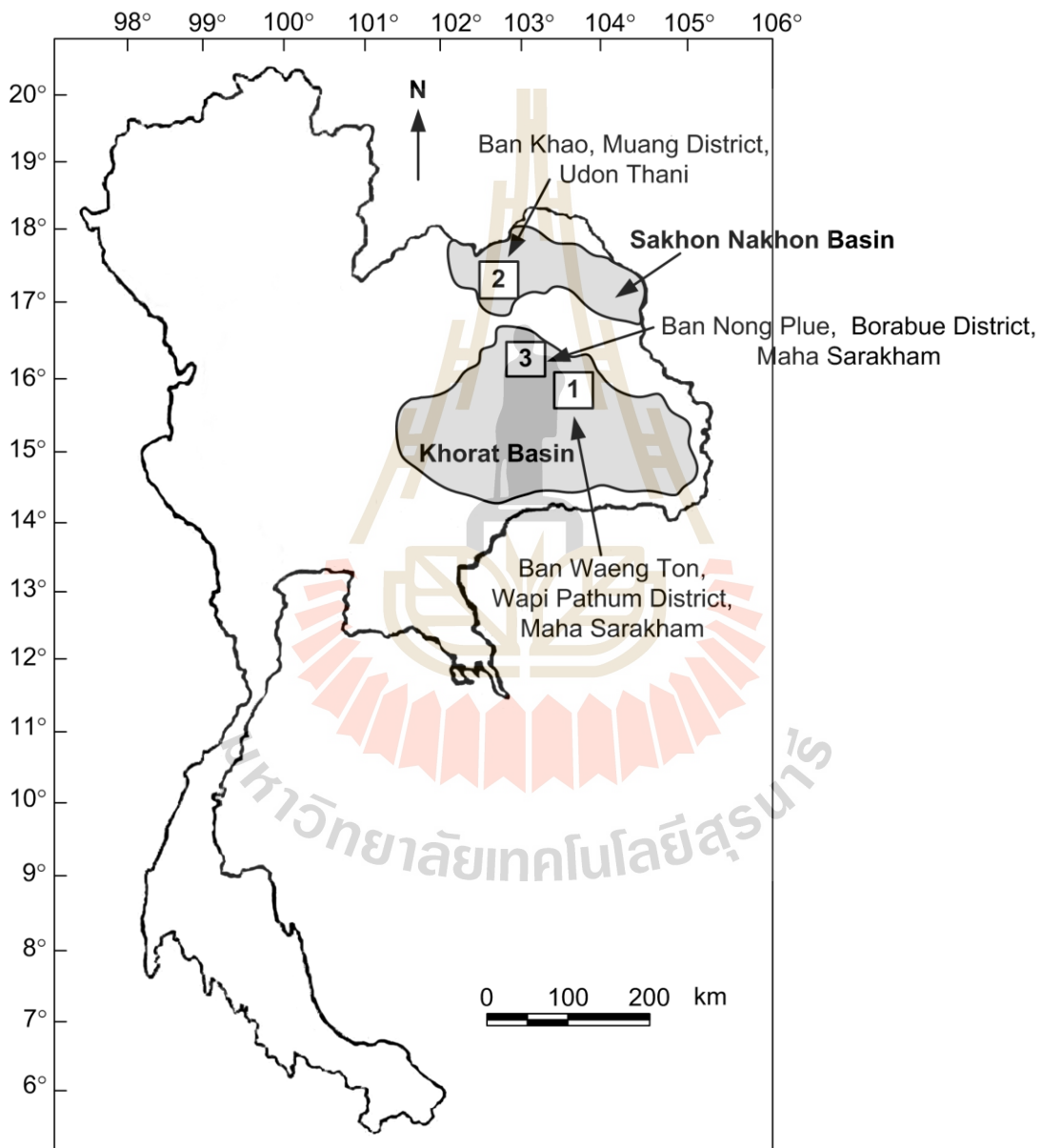
โดยที่  $C_E$  คือ สัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นระหว่างเจลและชั้นหินในสภาวะจริง  
 $C_p$  คือ สัดส่วนของความหนาแน่นระหว่างเจลและชั้นหินในสภาวะจริง และ  
 $C_L$  คือ สัดส่วนของขนาดระหว่างแบบจำลองช่องเหมืองและช่องเหมืองในสภาวะจริง

ค่าสัดส่วนสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.2)

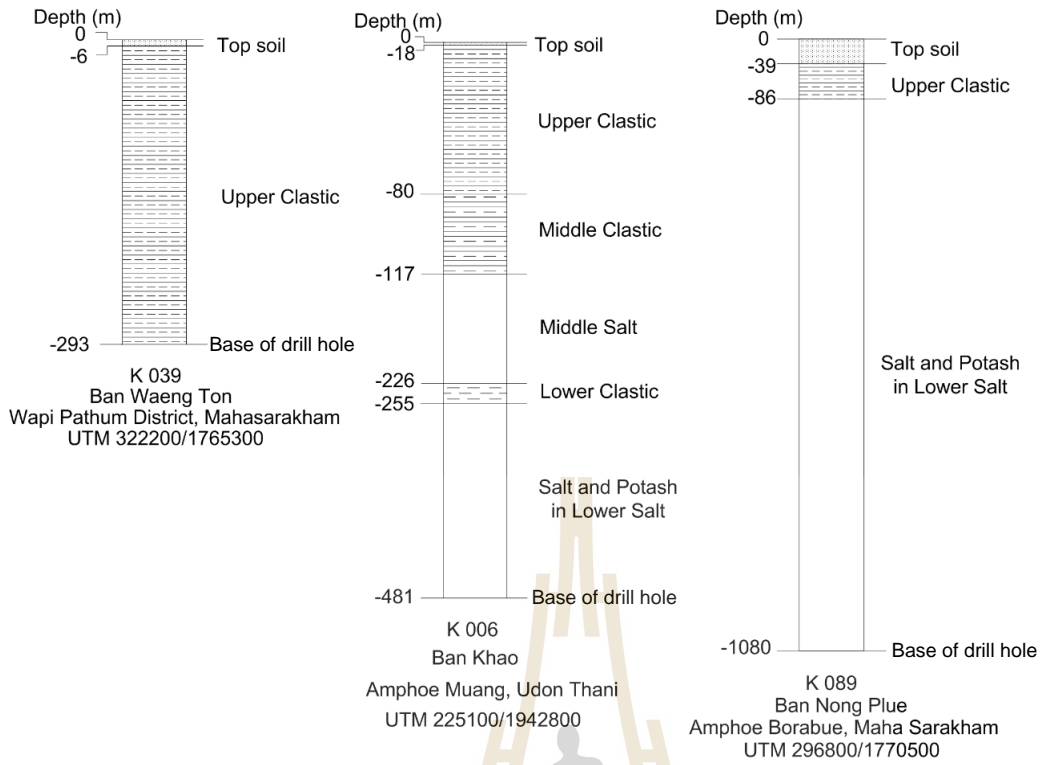
$$C_E = E_p/E_m, \quad C_p = \rho_p/\rho_m, \quad C_L = L_p/L_m \quad (4.2)$$

โดยที่  $E_p, \rho_p, L_p$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ความหนาแน่น และขนาดในสภาวะจริง และ  
 $E_m, \rho_m, L_m$  คือ คุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ

คุณสมบัติเชิงกายภาพและกลศาสตร์ในสภาวะจริงที่นำมาศึกษาในครั้งนี้อยู่ในพื้นที่บริเวณ (1) บ้านแวงต้อน อำเภอลำปำ จังหวัดมหาสารคาม (2) บ้านเก่า อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี และ (3) บ้านหนองปรู อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยดังแสดงในรูปที่ 4.1 ลำดับชั้นหินในบริเวณพื้นที่ศึกษาแสดงในรูปที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและความหนาของชั้นหินทั้ง 3 พื้นที่เหนือช่องเหมืองที่ระดับความลึก 500 m แสดงในตารางที่ 4.1 ค่าสัดส่วนสามารถคำนวณจากสมการที่ (4.2) ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 พื้นที่ศึกษาในสภาวะจริงบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย



รูปที่ 4.2 ลำดับชั้นหินในแต่ละพื้นที่ที่ทำการศึกษา



ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหมวดหินมหาสารคาม (Crosby, 2007; Wetchasat, 2002)

ชั้นหิน	หน่วยหิน	ความหนา (m)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (GPa)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m <sup>3</sup> )	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเฉลี่ย (GPa)
1	ดินชั้นบน	6	2,160	0.08	2,486	3.76
	คลาสติกชั้นบน	494	2,490	3.80		
2	ดินชั้นบน	18	2,160	0.08	2,178	10.97
	คลาสติกชั้นบน	62	2,490	3.80		
	คลาสติกชั้นกลาง	37	2,110	0.47		
	เกลือชั้นกลาง	109	2,140	2.42		
	คลาสติกชั้นล่าง	29	2,160	3.24		
	เกลือชั้นล่าง	245	2,130	19.90		
3	ดินชั้นบน	39	2,160	0.08	2,166	16.84
	คลาสติกชั้นบน	47	2,490	3.80		
	เกลือชั้นล่าง	414	2,130	19.90		

หมายเหตุ: ความหนาแน่นเฉลี่ย = ผลรวมของความหนา × ความหนาแน่นแต่ละชั้น / ความหนารวม  
 สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเฉลี่ย = ผลรวมของความหนา × สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแต่ละชั้น / ความหนารวม

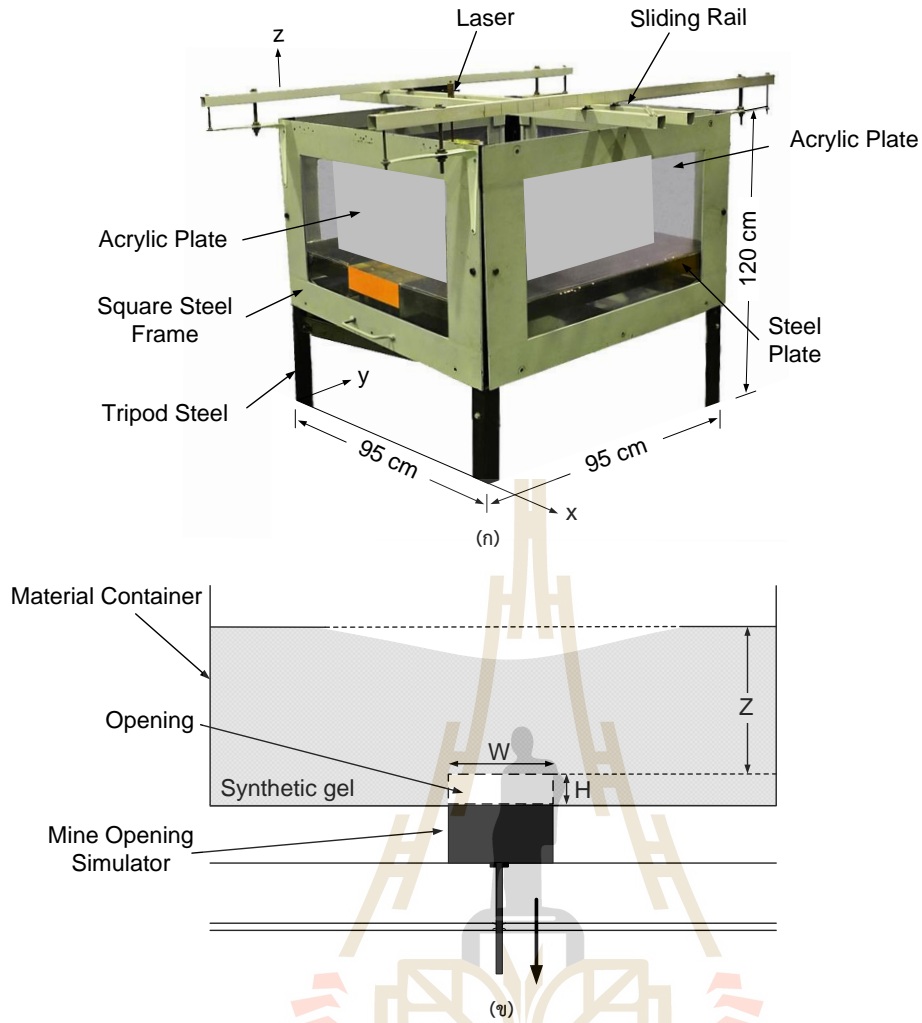
ตารางที่ 4.2 ค่าสัดส่วนระหว่างการจำลองในห้องปฏิบัติการและชั้นหินในสภาวะจริง

ชั้นหิน	E (MPa)		$C_E = E_p/E_m$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		$C_\rho = \rho_p/\rho_m$	L (m)		$C_L = L_p/L_m$
	Model ( $E_m$ )	Prototype ( $E_p$ )		Model ( $\rho_m$ )	Prototype ( $\rho_p$ )		Model ( $L_m$ )	Prototype ( $L_p$ )	
1	1	3,755	3,755	980	2,486	2.53	0.05	74	1,484
2	3	10,964	3,655	990	2,178	2.20	0.05	83	1,661
3	5	16,841	3,368	990	2,146	2.19	0.05	77	1,538

หมายเหตุ E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น  $\rho$  คือ ความหนาแน่น  $C_E$  คือ สัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นระหว่างเจลและชั้นหินในสภาวะจริง  $C_\rho$  คือ สัดส่วนของความหนาแน่นระหว่างเจลและชั้นหินในสภาวะจริง และ  $C_L$  คือ สัดส่วนของขนาดระหว่างแบบจำลองช่องเหมืองและช่องเหมืองในสภาวะจริง

### 4.3 วิธีการทดสอบ

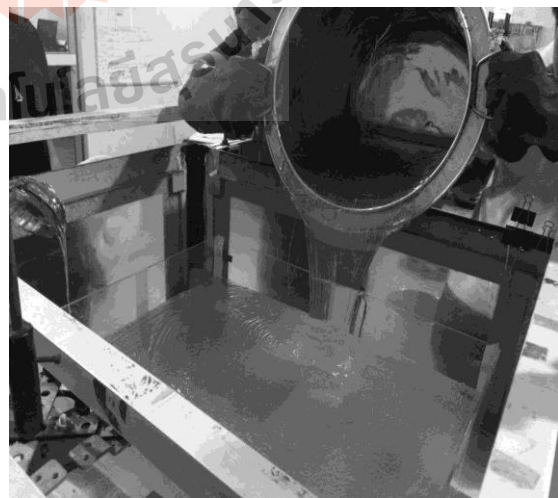
การจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการได้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างของช่องเหมืองและคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับต่อการหลุดตัวของผิวดินภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤติ โดยใช้โครงทดสอบจำลองการหลุดตัวของผิวดินในสามมิติ (Thongprapha และ Fuenkajorn, 2013) ดังรูปที่ 4.3 (ก) โครงทดสอบมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุเจล ส่วนที่ใช้สำหรับจำลองรูปร่างของช่องเหมือง และส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการหลุดตัว โครงทดสอบมีขนาด  $0.95 \times 0.95$  m<sup>2</sup> และทั้งสี่ด้านของโครงทดสอบจะติดตั้งแผ่นอะคริลิกใสเพื่อทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลออกของเจล พื้นที่ในการจำลองการหลุดตัวมีขนาด  $0.75 \times 0.75 \times 0.30$  m<sup>3</sup> ส่วนที่ใช้จำลองช่องเหมืองทำมาจากแผ่นพลาสติกแล้วนำมาประกอบเป็นบล็อกรูปร่างสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 50 mm สูง 10 mm และยาว 200 mm ซึ่งบล็อกพลาสติกเหล่านั้นจะจำลองช่องเหมืองด้วยการดันขึ้นมาเหนือพื้นของส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุเจลให้มีความสูงเท่ากับ 10 mm (รูปที่ 4.3 (ข)) แล้วจึงนำเจลที่ผ่านการให้ความร้อนภายใต้อุณหภูมิ 60°C (รูปที่ 4.4) จนมีลักษณะเหลวไหลในโครงทดสอบ (รูปที่ 4.5) รอให้เจลเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จึงทำการจำลองช่องเหมืองด้วยการดึงบล็อกพลาสติกลงมาเป็นระยะ 10 mm ส่งผลให้เกิดการหลุดตัวของผิวด้านบนของเจล โดยรางเลื่อนและเซ็นเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจวัดการหลุดตัว ผลที่ได้จากการตรวจวัดดังกล่าวจะนำไปสร้างโปรไฟล์การหลุดตัวในสองมิติ ซึ่งโปรไฟล์สามารถนำมาคำนวณองค์ประกอบของการหลุดตัวของผิวดินประกอบด้วย การหลุดตัวสูงสุด ( $S_{max}$ ) มุมการไหลของชั้นหินปิดทับ ( $\gamma$ ) ความชันสูงสุด ( $G_{max}$ ) มุมความโค้ง ( $\psi$ ) การเคลื่อนตัวสูงสุด ( $U_{max}$ ) ความเครียดในแนวระนาบสูงสุด ( $\epsilon_{max}$ ) และปริมาตรของร่องการหลุดตัวต่อปริมาตรช่องเหมือง ( $V_r/V_o$ ) ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการแสดงในตารางที่ 4.3 โดยความกว้างของช่องเหมือง ( $W_m$ ) ผันแปรตั้งแต่ 50, 100, 150, 200 และ 250 mm ความลึกของช่องเหมือง ( $Z_m$ ) ผันแปรตั้งแต่ 40, 60, 80 และ 100 mm ความสูง ( $H_m$ ) และความยาวของช่องเหมือง ( $L_m$ ) จะกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 10 และ 200 mm ตามลำดับ ในแต่ละการทดสอบจะดำเนินการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ( $E_m$ ) เท่ากับ 1, 3 และ 5 MPa ซึ่งขนาดของช่องเหมืองในสภาวะจริง ( $W_p$  และ  $Z_p$ ) ที่สอดคล้องกับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการด้วยการใช้ทฤษฎีความเท่ากันได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงทดสอบจำลองการทรุดตัวของผิวดินในสามมิติ



รูปที่ 4.4 การอบเจลในตู้อบภายใต้อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 4.5 การเทเจลลงในโครงทดสอบ



ตารางที่ 4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

$E_m$ (MPa)	$E_p$ (GPa)	$W_m$ (mm)	$W_p$ (m)	$Z_m$ (mm)	$Z_p$ (m)	$W_m/Z_m = W_p/Z_p$
1	3.76	50	74	100	148	0.5
		100	148	100	148	1.0
		200	297	100	148	2.0
				60	89	3.3
				40	59	5.0
3	10.97	50	88	100	166	0.5
		100	166	100	166	1.0
		200	332	100	166	2.0
				60	100	3.3
				40	66	5.0
5	16.84	50	77	40	62	1.3
				60	92	0.8
				80	123	0.6
				100	154	0.5
		100	154	40	62	2.5
				60	92	1.7
				80	123	1.3
				100	154	1.0
		150	231	40	62	3.8
				60	92	2.5
				80	123	1.9
				100	154	1.5
		200	308	40	62	5.0
				60	92	3.3
				80	123	2.5
				100	154	2.0
250	385	40	62	6.3		
		60	92	4.2		
		80	123	3.1		
		100	154	2.5		

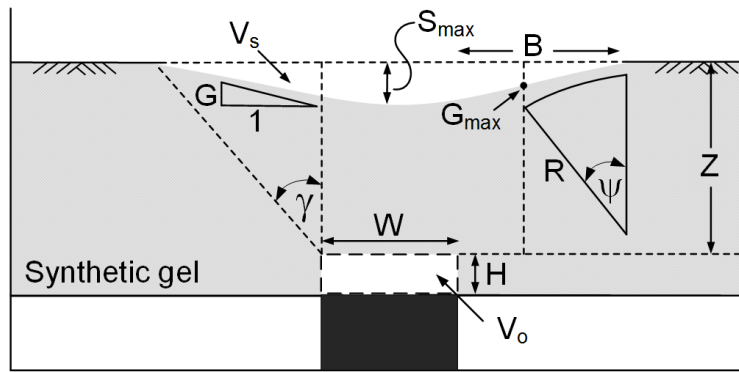
หมายเหตุ  $E_p$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินในสภาวะจริง  $E_m$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของเจลในห้องปฏิบัติการ  $W_m$  คือ ความกว้างของช่องเหมืองในโมเดล  $W_p$  คือ ความกว้างของช่องเหมืองในสภาวะจริง  $Z_m$  คือ ความลึกของช่องเหมืองในโมเดล  $Z_p$  คือ ความลึกของช่องเหมืองในสภาวะจริง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้จำลองสภาวะการขุดเจาะช่องเหมือนแบบห้องสลัปลาเคียว ซึ่งมีลักษณะของช่องเหมือนแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและพื้นผิวเท่านั้น ไม่ได้ทำการจำลองช่องเหมือนรูปทรงกระบอกดังที่เสนอในข้อเสนอโครงการ เนื่องจากช่องเหมือนส่วนใหญ่มีลักษณะรูปทรงแบบสี่เหลี่ยม จึงทำการจำลองให้เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาวะจริง

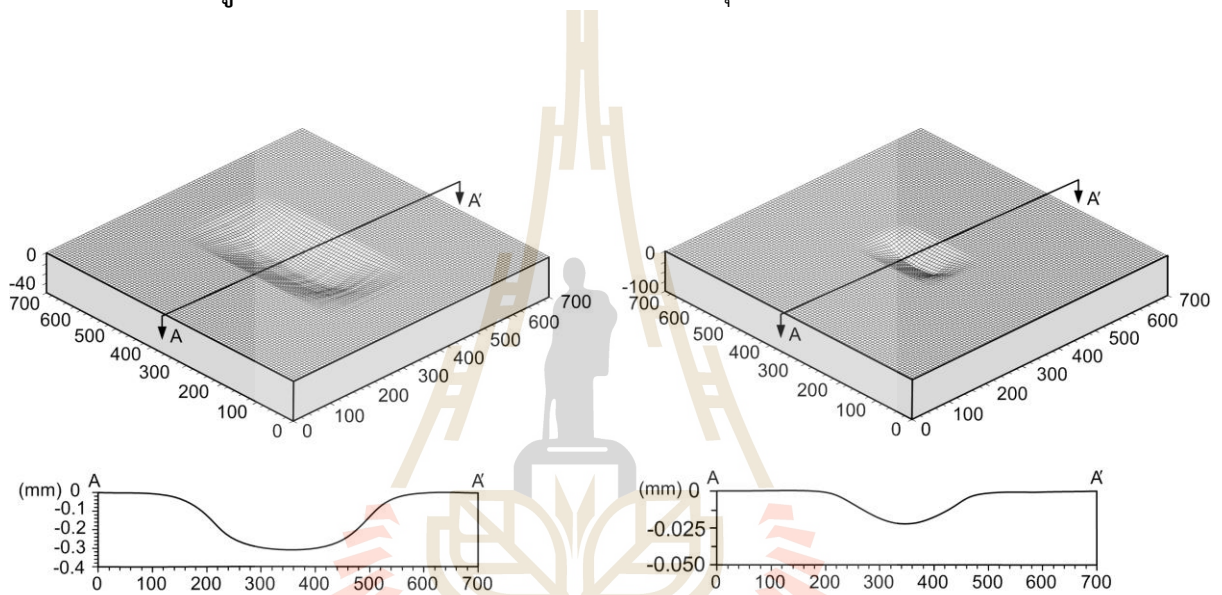
#### 4.4 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.6 แสดงตัวแปรและองค์ประกอบของการทรุดตัวที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ โดยมุมการไหลของชั้นหินปิดทับคือมุมที่แสดงทิศทางการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับด้วยการวัดค่ามุมจากเส้นในแนวตั้งที่ตำแหน่งขอบของช่องเหมือนจนถึงตำแหน่งขอบเขตสุดท้ายของการทรุดตัว (จุดที่ไม่เกิดการทรุดตัว) ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับจะเป็นตัวกำหนดอาณาเขตบนผิวดินที่มีผลกระทบจากการทำเหมือง โดยทั่วไปแล้วค่ามุมนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของมวลหิน ระดับน้ำบาดาล และความเค้นในที่ สำหรับค่าการทรุดตัวสูงสุดคือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของช่องเหมือนใต้ดิน ซึ่งทำการวัดหลังจากจำลองช่องเหมือนแล้ว โดยวัดจากระดับพื้นผิวเดิมในแนวตั้งจนถึงจุดที่มีความลึกมากที่สุดที่เกิดการทรุดตัว ค่าความชันสามารถคำนวณได้จากผลต่างของการทรุดตัวระหว่างจุดสองจุด ซึ่งจุด Inflection คือจุดที่จะให้ค่าความชันสูงสุด ความโค้งสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างความชันของจุดสองจุดแล้วหารด้วยระยะความยาวระหว่างจุดสองจุดนั้นๆ การเคลื่อนตัวในแนวระนาบจะเกิดในทิศทางที่เข้าสู่จุดกึ่งกลางของช่องเหมือน ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดบริเวณจุดที่มีความชันสูงสุด และจะลดลงเข้าใกล้ศูนย์ในบริเวณที่ไม่เกิดการทรุดตัวและบริเวณที่มีการทรุดตัวสูงสุด โดยที่ค่าความเครียดในแนวระนาบจะสามารถคำนวณได้จากค่าการเคลื่อนตัวในแนวระนาบ

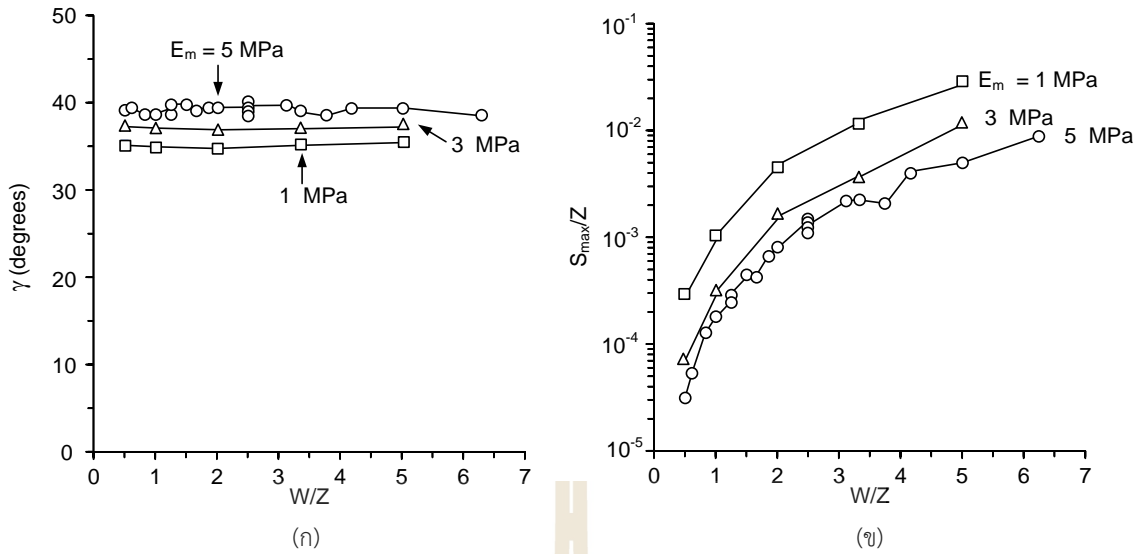
รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างภาพการตรวจวัดพื้นผิวของเจลและแสดงโปรไฟล์ภายใต้กรณีช่องเหมือนมีความลึกเท่ากับ 40 mm กว้าง 250 mm (ซ้าย) และช่องเหมือนที่มีความลึก 100 mm และกว้าง 100 mm (ขวา) ตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 แสดงผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบการทรุดตัวในทุกกรณีของการทดสอบที่กำหนดไว้ รูปที่ 4.8 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการไหลของชั้นหินปิดทับกับอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือน ( $W/Z$ ) ผลที่ได้ระบุว่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะไม่ขึ้นต่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือน กล่าวคือเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวในบริเวณกว้าง ซึ่งทำให้ค่ามุมการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการตรวจวัดดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาโดย Yao และคณะ (1991) ซึ่งระบุว่าชั้นหินปิดทับอ่อนจะให้ค่ามุมการไหลสูงกว่าชั้นหินแข็ง



รูปที่ 4.6 ตัวแปรและองค์ประกอบของการทดสอบที่ทำการศึกษา



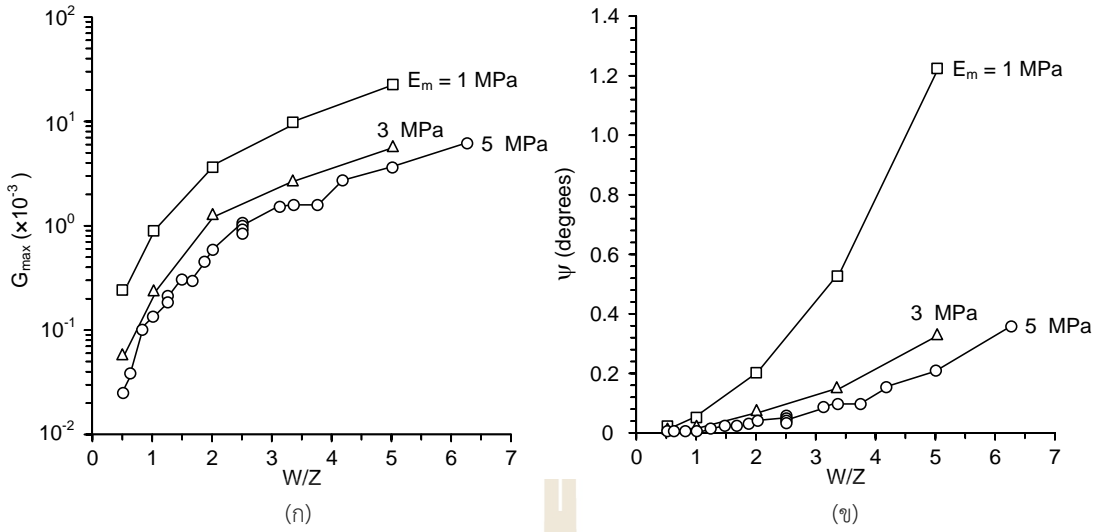
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างภาพสแกนของพื้นผิวและโปรไฟล์ที่เกิดการทรุดตัวสำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึก 40 mm และกว้าง 250 mm (ซ้าย) และความลึกเท่ากับ 100 mm และความกว้างเท่ากับ 100 mm (ขวา)



**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการไหลของชั้นหินปิดทับ ( $\gamma$ ) (ก) และอัตราส่วนการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง ( $S_{max}/Z$ ) (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง ( $W/Z$ ) ภายใต้การผันแปรสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

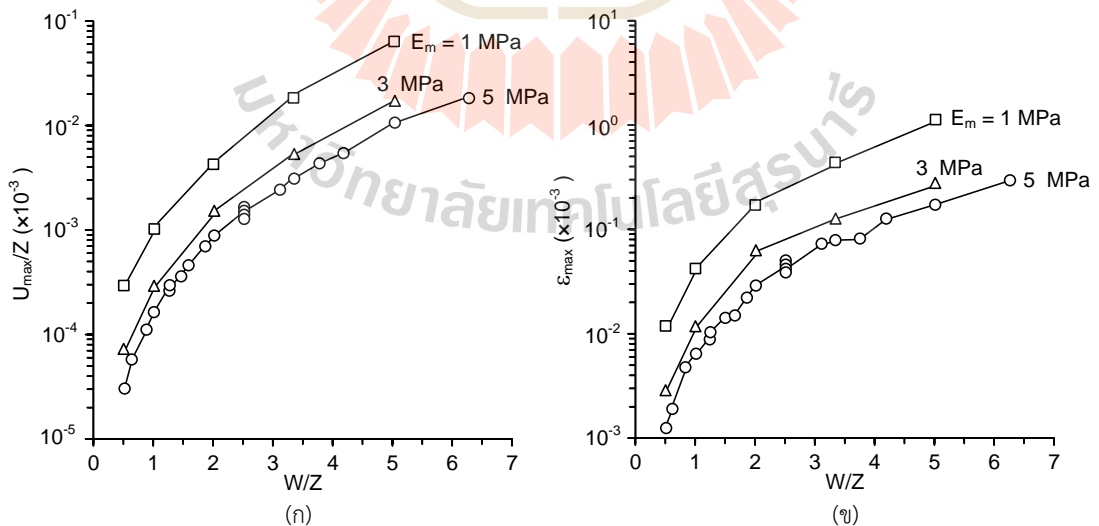
ผลการทดสอบการหลุดตัวของชั้นหินปิดทับที่เกิดจากผลกระทบด้านความลึก ความกว้าง และคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับระบุว่า ถ้าช่องเหมืองมีความลึกจากผิวดินมากหรืออีกนัยหนึ่งคือชั้นหินปิดทับมีความหนาจะส่งผลให้การหลุดตัวบนผิวดินมีค่าน้อย กล่าวคือค่าการหลุดตัวสูงสุดบนผิวดินจะมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนาน้อยจะทำให้เกิดการหลุดตัวมาก รูปที่ 4.8 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง ( $S_{max}/Z$ ) กับอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง เมื่อพิจารณาสมบัติของชั้นหินปิดทับแล้วพบว่า การหลุดตัวสูงสุดพบในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1 MPa โดยที่การหลุดตัวสูงสุดมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของความลึกของช่องเหมือง (ความหนาของชั้นหินปิดทับ) และพบว่าค่าการหลุดตัวจะลดลงเป็นร้อยละ 3 และ 2 เมื่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 3 และ 5 MPa ตามลำดับ จากผลการจำลองในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าชั้นหินปิดทับที่อ่อนกว่าจะทำให้เกิดการหลุดตัวมากกว่าชั้นหินแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการศึกษาโดย Iwanec และคณะ (2016)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันสูงสุด ค่ามุมความโค้ง และอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองแสดงในรูปที่ 4.9 ผลที่ได้พบว่าความชันสูงสุดและมุมความโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าค่าทั้งสองไม่อ่อนไหวต่อสมบัติของชั้นหินปิดทับมากนัก จะสังเกตได้ว่าค่าความชันสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองมีค่าน้อยกว่า 2.0



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชันสูงสุด (ก) และมุมความโค้ง (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือน และความเครียดสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ พบว่าองค์ประกอบของการทรุดตัวทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกเพิ่มขึ้น และพบว่ามีค่าลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับมีค่าเพิ่มขึ้น

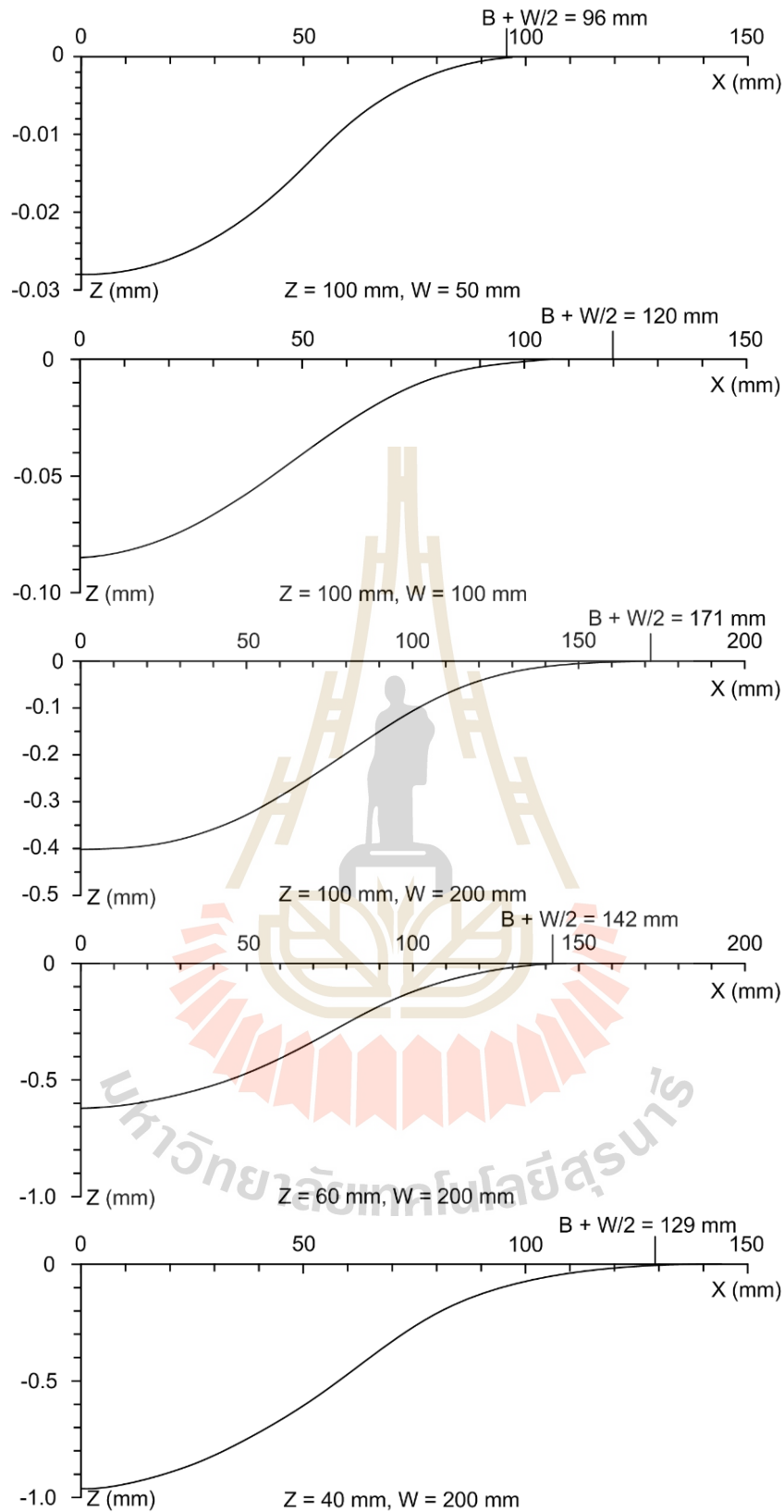


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือน (ก) และค่าความเครียดสูงสุด (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

รูปที่ 4.11 ถึง 4.16 แสดงโปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้ทำการตรวจวัดจากการจำลองเชิงกายภาพในทุกกรณี ขนาดความกว้างและความลึกของช่องเหมืองที่แตกต่างกันส่งผลให้ลักษณะการทรุดตัวและองค์ประกอบของการทรุดตัวแตกต่างกันไปด้วยดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ปริมาตรของร่องการทรุดตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.3)

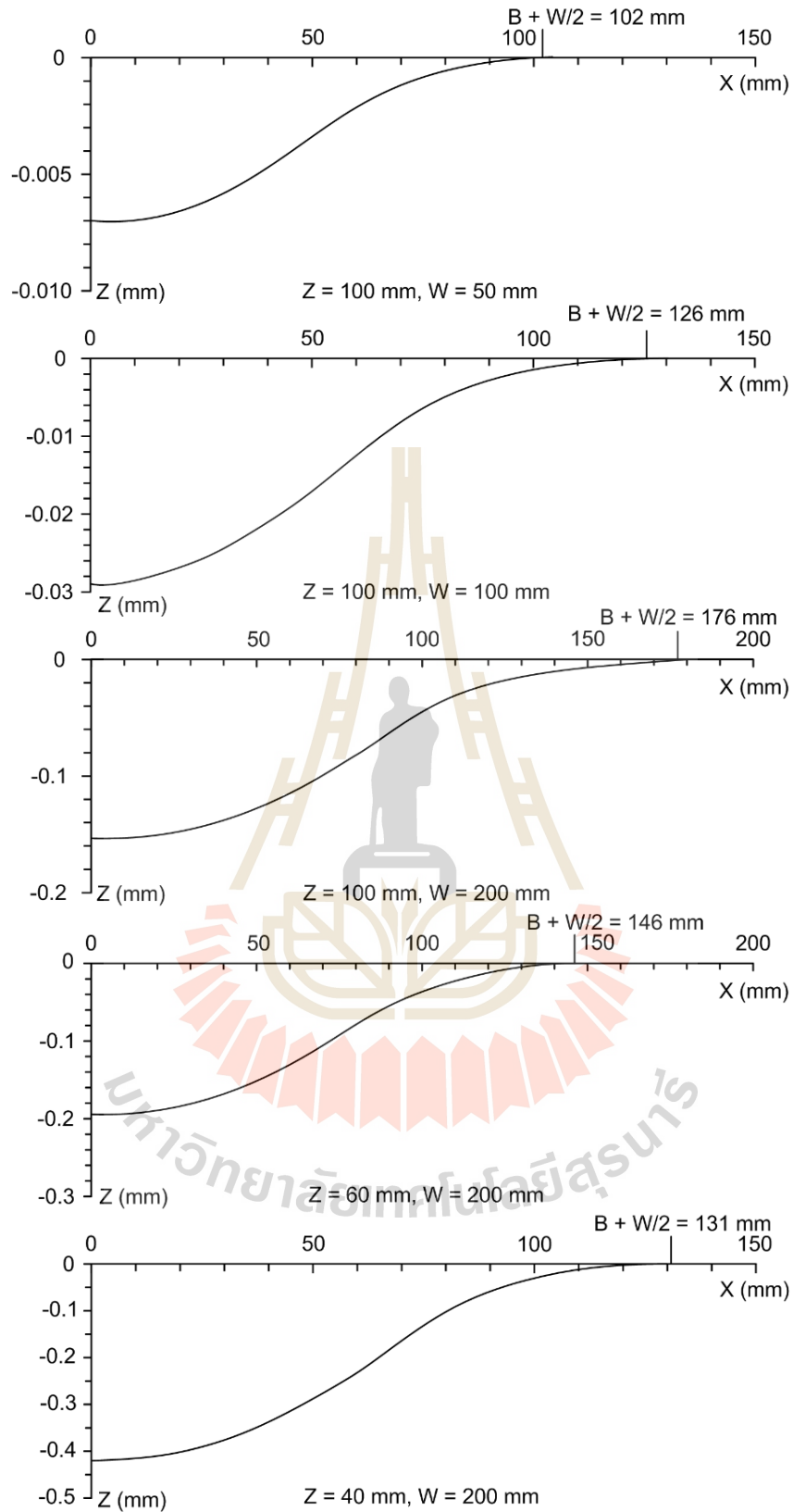
$$V_s = 2 \int_{-w/2}^B S(x) dx \quad (4.3)$$

โดยความกว้างของร่องการทรุดตัวสามารถคำนวณได้จากค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับดังแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.6 ผู้วิจัยมีความพยายามที่จะศึกษาผลกระทบของความกว้าง ความลึก รวมทั้งคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับต่อปริมาตรของร่องการทรุดตัว โดยรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาตรร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรของช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง ผลการจำลองเชิงกายภาพแสดงให้เห็นว่าปริมาตรของร่องการทรุดตัวจะมีค่าน้อยกว่าปริมาตรของช่องเหมืองซึ่งเป็นจริงในทุกกรณี ในกรณีที่อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองมีค่าเท่ากับ 5.0 และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa จะให้ค่าปริมาตรของร่องการทรุดตัวสูงสุด มีค่าประมาณร้อยละ 5 ของปริมาตรช่องเหมือง ผลที่ได้พบว่าปริมาตรของร่องการทรุดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ชั้นหินปิดทับอ่อน (ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่ำ)

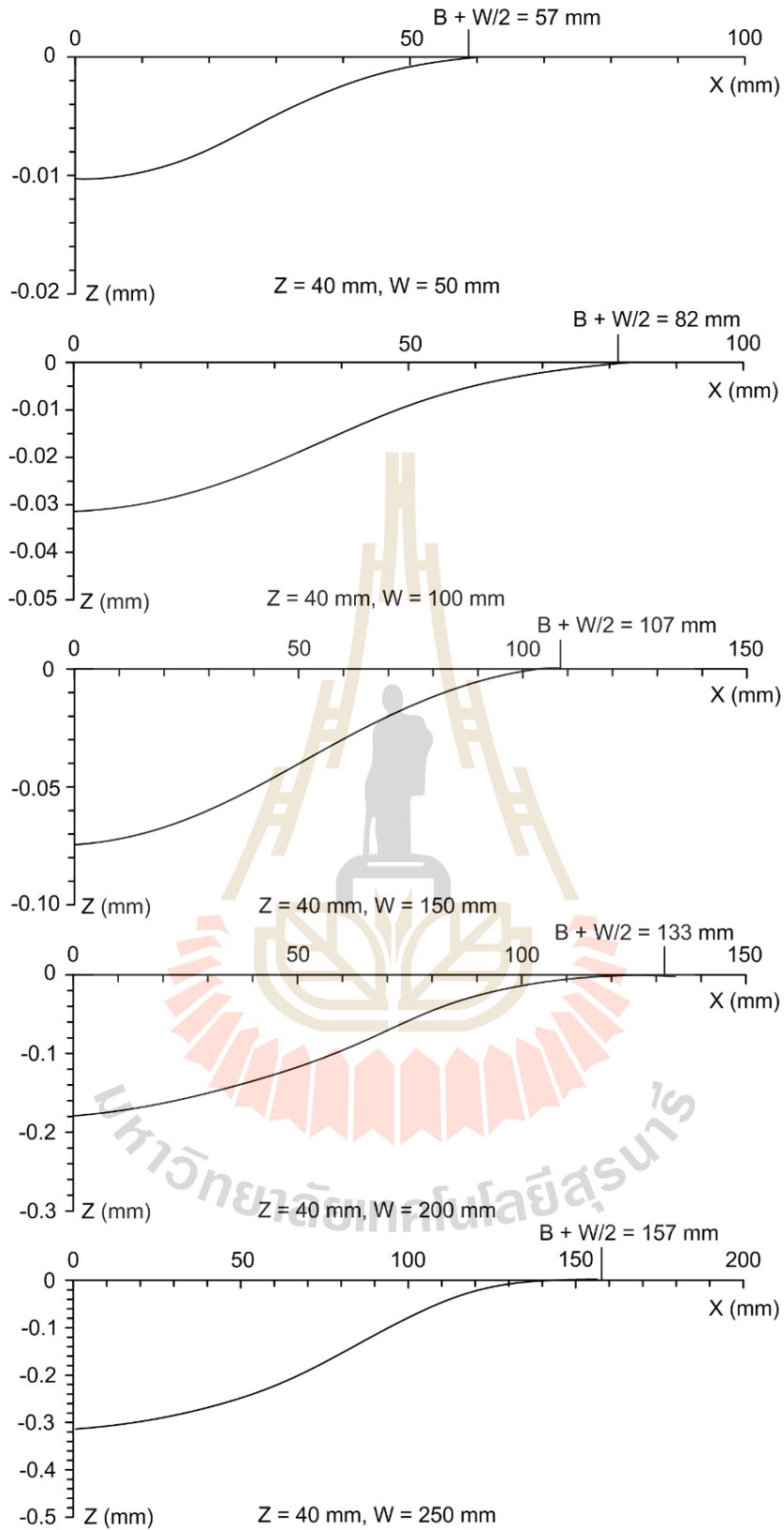


รูปที่ 4.11 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหมือนในกรณีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1 MPa

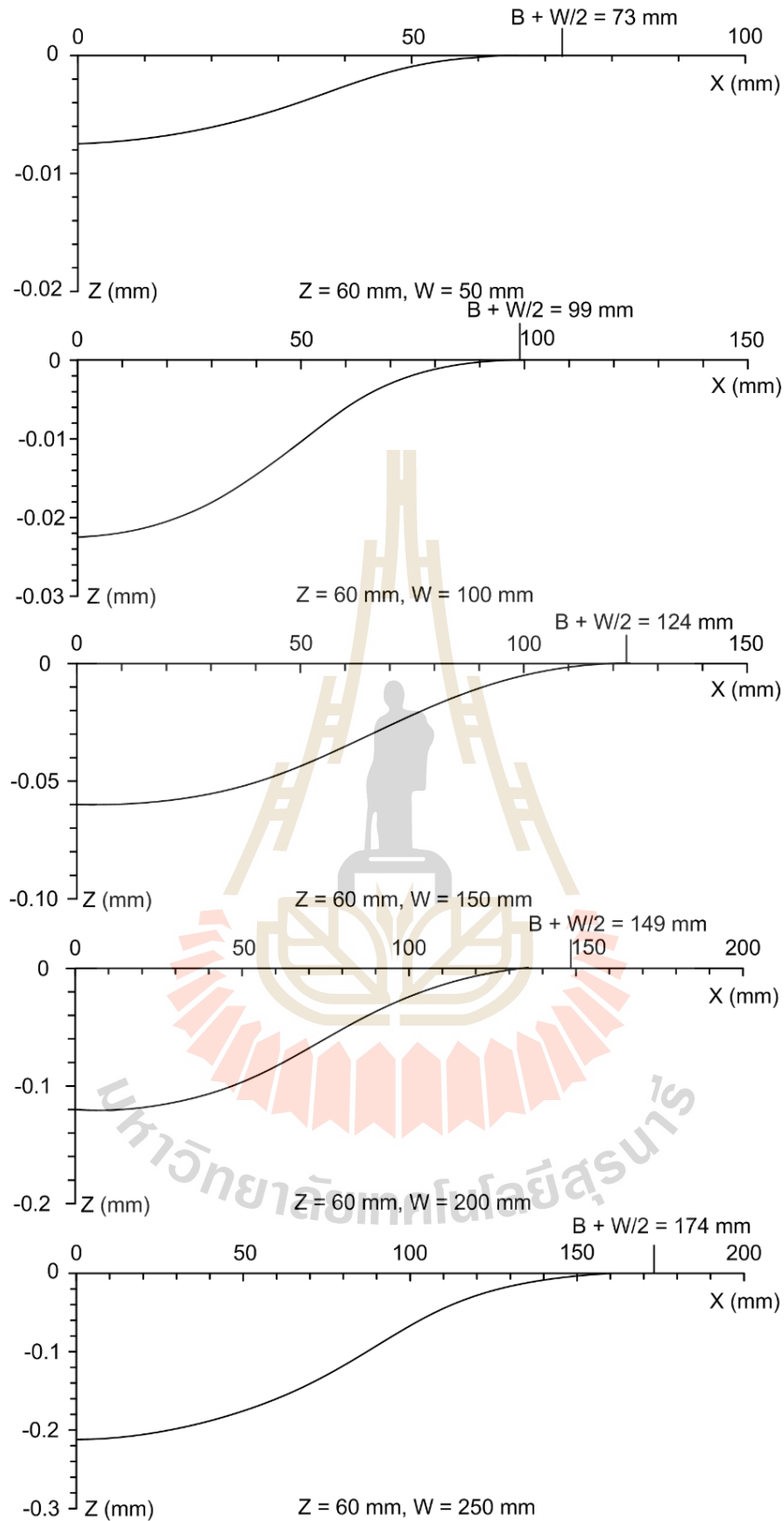




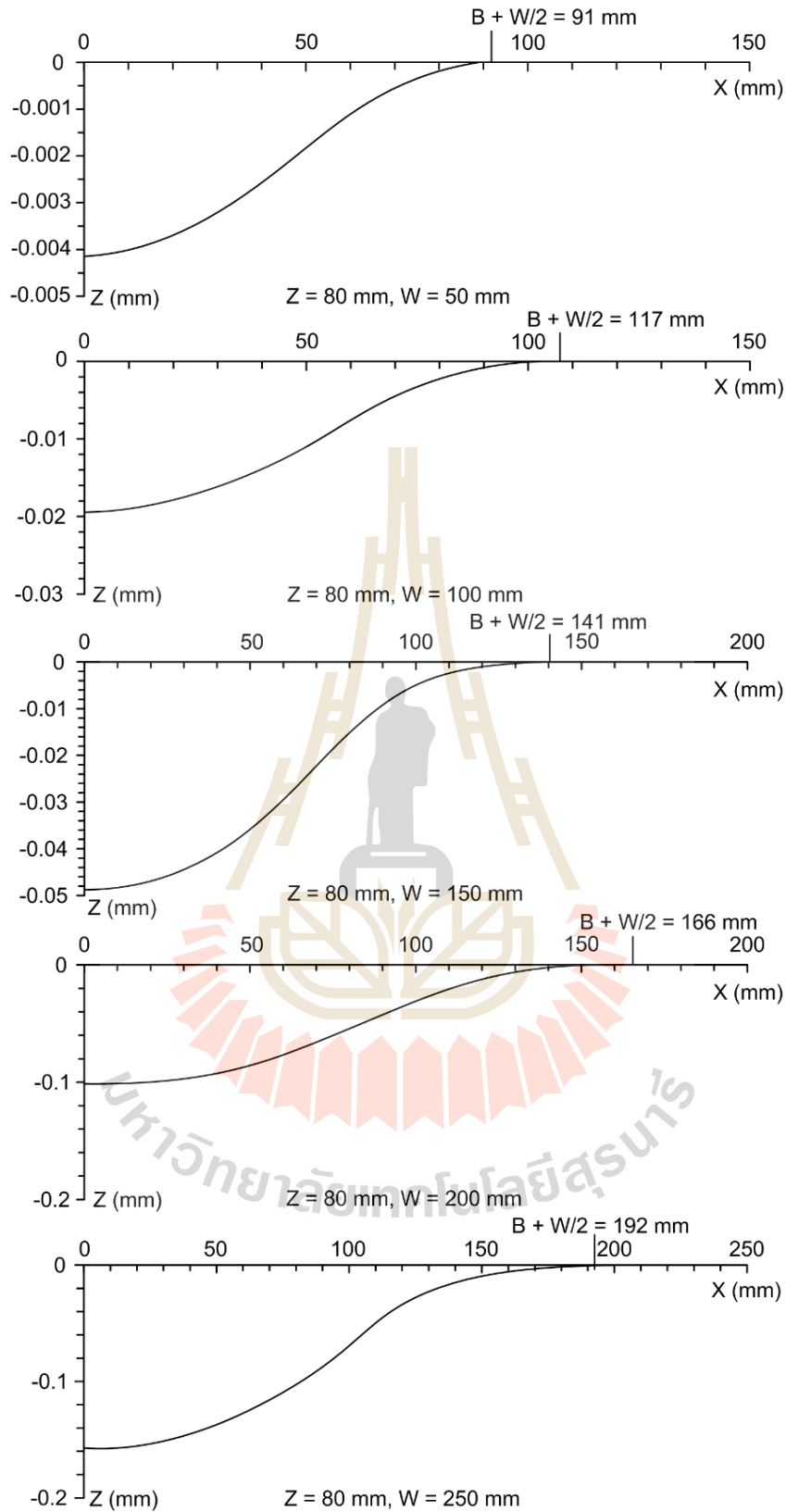
รูปที่ 4.12 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหมือนในกรณีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 3 MPa



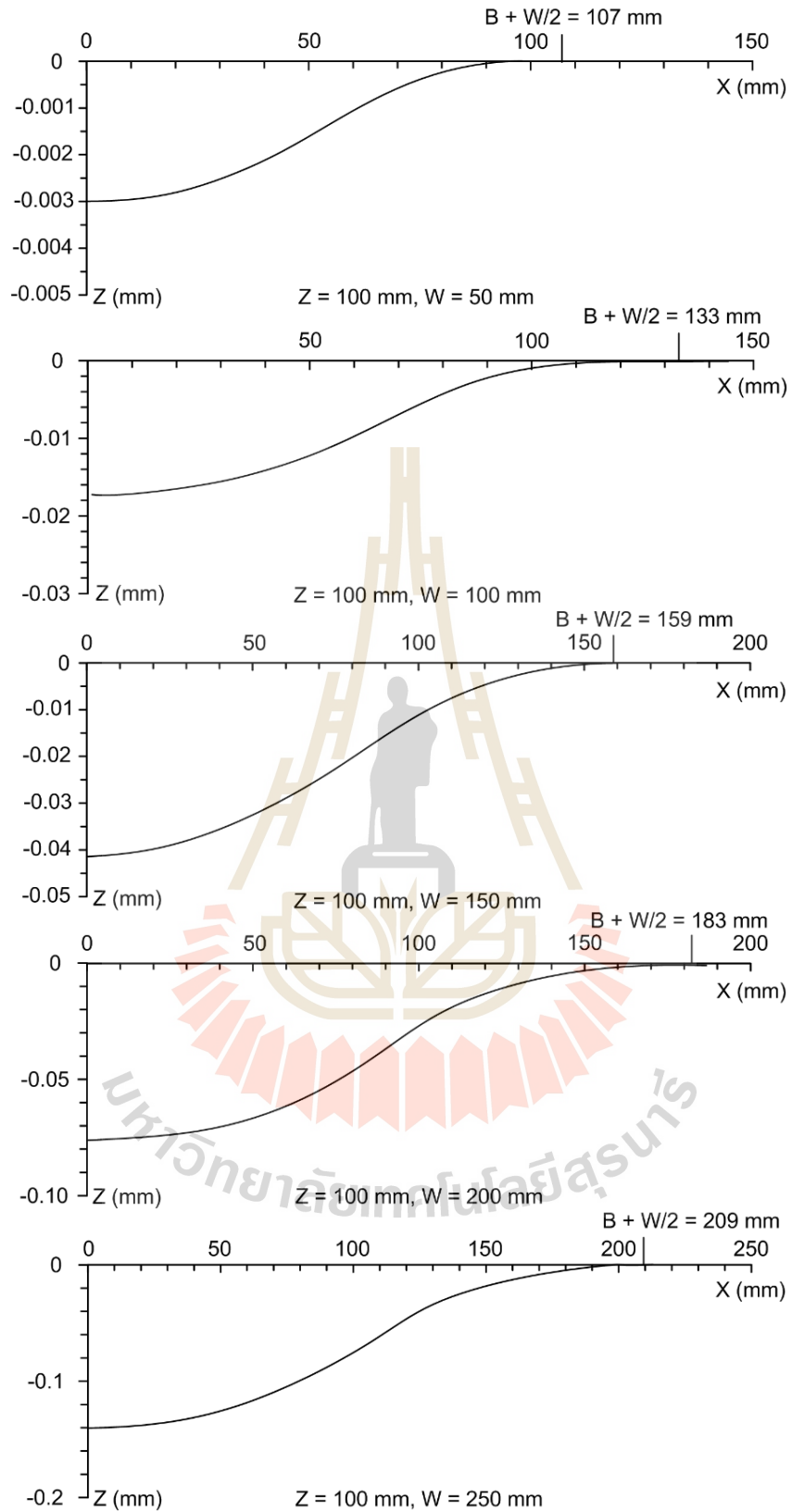
รูปที่ 4.13 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 40 mm



รูปที่ 4.14 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหมืองที่มีความลึกเท่ากับ 60 mm



รูปที่ 4.15 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 80 mm



รูปที่ 4.16 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหมืองที่มีความลึกเท่ากับ 100 mm

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa

Test variables			Results						
W (mm)	Z (mm)	W/Z	$S_{\max}/Z$	$\gamma$ (°)	$G_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{\max}/Z$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\epsilon_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\psi$ (°)	$V_s/V_o$
50	100	0.5	0.0003	35.4	0.25	0.0003	0.012	0.014	0.005
100	100	1.0	0.0009	35.0	0.88	0.0007	0.042	0.050	0.011
200	100	2.0	0.0247	35.5	21.50	0.0645	1.032	1.232	0.048
200	60	3.3	0.0103	35.2	9.22	0.0184	0.443	0.528	0.043
200	40	5.0	0.0040	35.5	3.52	0.0042	0.169	0.202	0.034

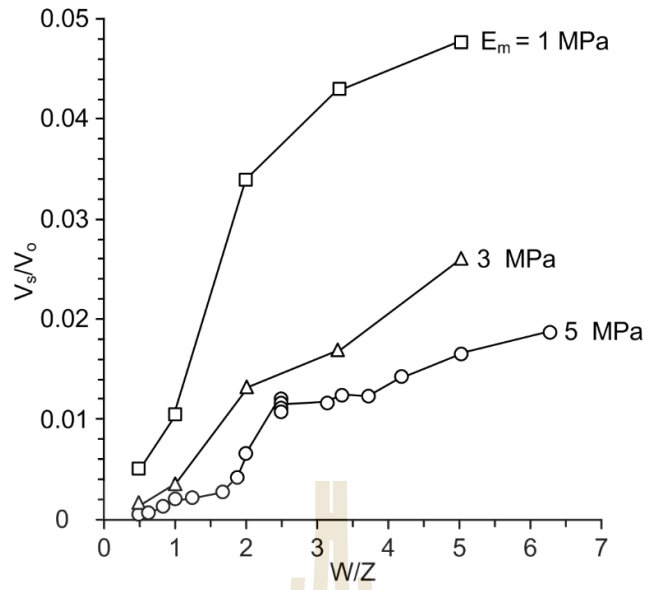
ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3 MPa

Test variables			Results						
W (mm)	Z (mm)	W/Z	$S_{\max}/Z$	$\gamma$ (°)	$G_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{\max}/Z$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\epsilon_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\psi$ (°)	$V_s/V_o$
50	100	0.5	0.0001	37.6	0.06	0.0001	0.003	0.003	0.001
100	100	1.0	0.0003	37.2	0.24	0.0003	0.012	0.014	0.003
200	100	2.0	0.0104	37.8	5.72	0.0172	0.275	0.328	0.026
200	60	3.3	0.0032	37.2	2.61	0.0052	0.125	0.150	0.017
200	40	5.0	0.0015	37.1	1.28	0.0015	0.061	0.073	0.013

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa

Test variables			Results						
W (mm)	Z (mm)	W/Z	$S_{\max}/Z$	$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	$G_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{\max}/Z$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\epsilon_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\psi$ ( $^{\circ}$ )	$V_s/V_o$
50	40	1.3	0.0003	38.4	0.22	0.0006	0.010	0.012	0.001
	60	0.8	0.0001	38.7	0.10	0.0002	0.005	0.006	0.001
	80	0.6	0.0001	39.5	0.04	0.0001	0.002	0.002	0.001
	100	0.5	0.0001	39.3	0.03	0.0000	0.001	0.001	0.001
100	40	2.5	0.0008	38.2	0.66	0.0020	0.032	0.038	0.002
	60	1.7	0.0004	39.2	0.30	0.0006	0.014	0.017	0.002
	80	1.3	0.0002	39.9	0.18	0.0003	0.009	0.011	0.002
	100	1.0	0.0002	38.8	0.13	0.0002	0.006	0.008	0.002
150	40	3.8	0.0019	38.7	1.54	0.0046	0.074	0.088	0.005
	60	2.5	0.0010	38.9	0.82	0.0016	0.039	0.047	0.005
	80	1.9	0.0006	39.6	0.46	0.0007	0.022	0.026	0.004
	100	1.5	0.0004	39.9	0.31	0.0004	0.015	0.018	0.004
200	40	5.0	0.0044	39.4	3.64	0.0109	0.175	0.208	0.016
	60	3.3	0.0020	39.2	1.57	0.0031	0.076	0.090	0.009
	80	2.5	0.0013	39.7	0.95	0.0014	0.046	0.055	0.008
	100	2.0	0.0007	39.6	0.59	0.0007	0.029	0.034	0.007
250	40	6.3	0.0078	38.7	6.23	0.0187	0.299	0.357	0.019
	60	4.2	0.0035	39.5	2.73	0.0055	0.131	0.156	0.014
	80	3.1	0.0020	39.9	1.53	0.0023	0.074	0.088	0.012
	100	2.5	0.0014	40.1	1.05	0.0013	0.050	0.060	0.011





รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาตรร่องการทุดตัวต่อปริมาตรช่องเหมือนในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนภายใต้การผันแปรสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

## บทที่ 5

### การจำลองการทรุดตัวด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

#### 5.1 วัตถุประสงค์

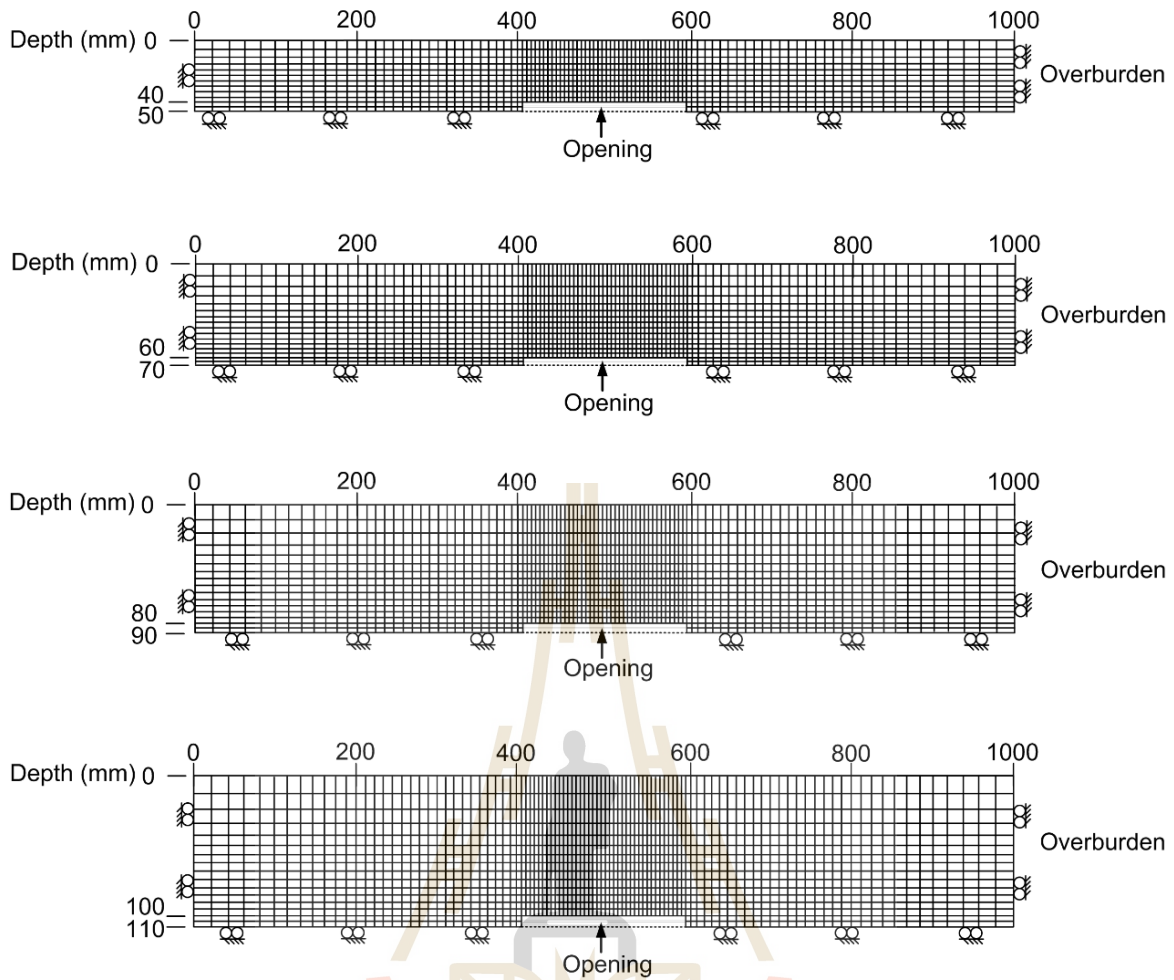
งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทรุดตัวของชั้นหินปิดทับภายใต้การผันแปรคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ ความลึก และความกว้างของช่องเหมืองใต้ดินภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤติ (Sub-critical subsidence) ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ FLAC version 4.0 (Itasca, 1992) แล้วนำผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการ

#### 5.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เหมือนกับแบบจำลองเชิงกายภาพในทุกกรณี โดยที่ความสูงของช่องเหมืองถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 10 mm มีการผันแปรความลึกของช่องเหมืองตั้งแต่ 40, 60, 80 และ 100 mm และผันแปรความกว้างของช่องเหมือง 5 ระดับ คือ 50, 100, 150, 200 และ 250 mm ในแต่ละแบบจำลองได้ดำเนินการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นเท่ากับ 1, 3 และ 5 MPa คุณสมบัติเชิงกายภาพและกลศาสตร์สำหรับใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 5.1 โครงข่ายแบบจำลองจำนวน 4,000 โครงข่าย ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมขนาดความกว้าง ความลึก และความสูงของช่องเหมือง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่ถูกต้องมากที่สุด และแบบจำลองได้ดำเนินการภายใต้สมมติฐานแบบ Plane strain โดยระยะห่างระหว่างขอบเขตทั้งสองด้านถึงกึ่งกลางช่องเหมืองมีระยะเท่ากับ 0.5 m ขอบเขตทั้งสองถูกจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ และส่วนล่างของแบบจำลองถูกกำหนดให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ทั้งนี้เพื่อจำลองลักษณะพื้นของช่องเหมืองให้ใกล้เคียงกับสถานะจริง โครงข่ายขนาดเล็กถูกกำหนดให้อยู่ใกล้กับบริเวณที่จำลองช่องเหมืองและจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่ออยู่ไกลออกไป รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีที่ช่องเหมืองมีความลึกเท่ากับ 40, 60, 80 และ 100 mm ส่วนที่ถูกจำลองเป็นชั้นหินปิดทับเหนือช่องเหมืองถูกกำหนดให้อยู่ภายใต้สมมติฐานเป็นวัสดุที่มีความยึดหยุ่น ในขั้นตอนของการจำลองช่องเหมือง โครงข่ายในบริเวณที่ถูกกำหนดเป็นช่องเหมืองจะถูกลบออก ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้ง (การทรุดตัว) และในแนวระนาบ จากนั้นจึงทำการตรวจวัดค่าการทรุดตัวสูงสุด มุมการไหลของชั้นหินปิดทับ ความชันสูงสุด การเคลื่อนตัว ความเครียด มุมความโค้ง และปริมาตรของร่องการทรุดตัว จากนั้นนำผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพและกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับและขนาดของช่องเหมืองที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

Model no.	$E_m$ (MPa)	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu_m$	$W_m$ (mm)	$Z_m$ (mm)	
1	1	980	0.35	50	100	
				100	100	
				200	100	
					60	
					40	
2	3	990	0.36	50	100	
				100	100	
				200	100	
					60	
					40	
3	5	990	0.36	50	40	
					60	
					80	
					100	
					100	40
				100	60	
					80	
					100	
					150	40
					60	
				150	80	
					100	
					200	40
					60	
					80	
				200	100	
					250	40
					60	
					80	
					100	



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างโครงข่ายแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ช่องเหมืองมีความลึกจากผิวดินเท่ากับ 40, 60, 80 และ 100 mm

### 5.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงกายภาพ

ตารางที่ 5.2 ถึง 5.4 แสดงองค์ประกอบการทรุดตัวที่ตรวจวัดได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในทุกกรณี รูปที่ 5.2 (ก) แสดงค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ พบว่ามุมการไหลมีแนวโน้มไม่ขึ้นกับความกว้างและความลึกของช่องเหมือง ผลจากการจำลองระบุได้ว่าแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองเชิงคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี มุมการไหลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าสูงกว่าแบบจำลองในห้องปฏิบัติการประมาณร้อยละ 1

ตารางที่ 5.2 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น เท่ากับ 1 MPa

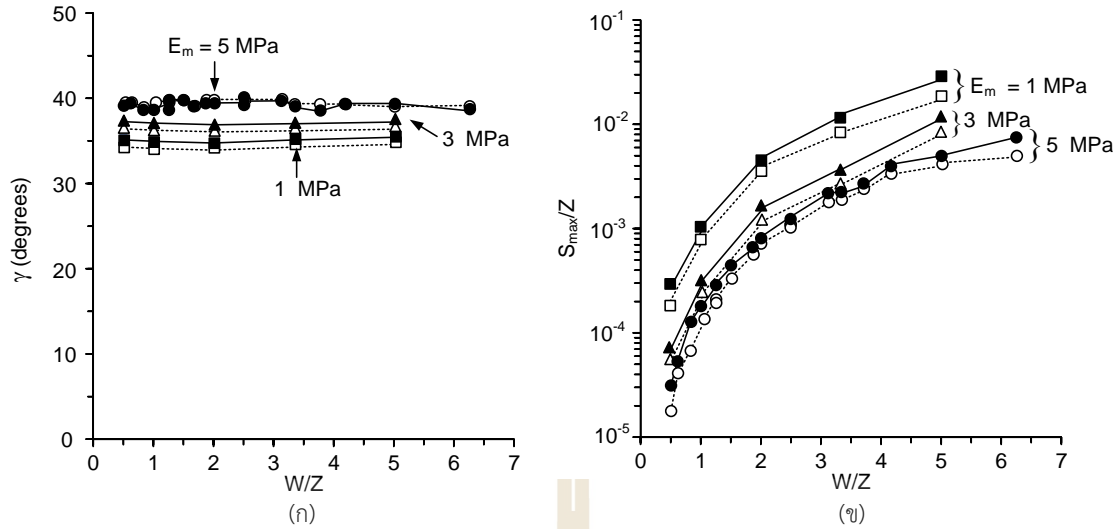
Test variables			Results						
W (mm)	Z (mm)	W/Z	$S_{\max}/Z$	$\gamma$ (°)	$G_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{\max}/Z$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\epsilon_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\psi$ (°)	$V_s/V_o$
50	100	0.5	0.0003	35.4	0.25	0.0003	0.012	0.014	0.005
100	100	1.0	0.0009	35.0	0.88	0.0007	0.042	0.050	0.011
200	100	2.0	0.0040	35.5	3.52	0.0042	0.169	0.202	0.034
200	60	3.3	0.0103	35.2	9.22	0.0184	0.443	0.528	0.043
200	40	5.0	0.0247	35.5	21.50	0.0645	1.032	1.232	0.048

ตารางที่ 5.3 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น เท่ากับ 3 MPa

Test variables			Results						
W (mm)	Z (mm)	W/Z	$S_{\max}/Z$	$\gamma$ (°)	$G_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{\max}/Z$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\epsilon_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\psi$ (°)	$V_s/V_o$
50	100	0.5	0.0001	37.6	0.06	0.0001	0.003	0.003	0.001
100	100	1.0	0.0003	37.2	0.24	0.0003	0.012	0.014	0.003
200	100	2.0	0.0015	37.1	1.28	0.0015	0.061	0.073	0.013
200	60	3.3	0.0032	37.2	2.61	0.0052	0.125	0.150	0.017
200	40	5.0	0.0104	37.8	5.72	0.0172	0.275	0.328	0.026

ตารางที่ 5.4 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวในกรณีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa

Test variables			Results						
W (mm)	Z (mm)	W/Z	$S_{\max}/Z$	$\gamma$ ( $^{\circ}$ )	$G_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$U_{\max}/Z$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\epsilon_{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\psi$ ( $^{\circ}$ )	$V_s/V_o$
50	40	1.3	0.0002	38.2	0.23	0.0007	0.011	0.013	0.002
	60	0.8	0.0001	38.5	0.10	0.0002	0.005	0.006	0.001
	80	0.6	0.0000	39.3	0.04	0.0001	0.002	0.002	0.001
	100	0.5	0.0000	39.5	0.03	0.0000	0.001	0.001	0.001
100	40	2.5	0.0007	38.2	0.69	0.0021	0.033	0.039	0.011
	60	1.7	0.0003	38.8	0.31	0.0006	0.015	0.018	0.006
	80	1.3	0.0002	39.7	0.19	0.0003	0.009	0.011	0.002
	100	1.0	0.0002	39.7	0.14	0.0002	0.007	0.008	0.002
150	40	3.8	0.0018	38.4	1.60	0.0048	0.077	0.091	0.014
	60	2.5	0.0009	38.9	0.83	0.0017	0.040	0.048	0.010
	80	1.9	0.0005	39.7	0.50	0.0007	0.024	0.028	0.007
	100	1.5	0.0004	39.7	0.32	0.0004	0.016	0.019	0.004
200	40	5.0	0.0043	38.2	3.78	0.0113	0.181	0.217	0.015
	60	3.3	0.0019	38.9	1.64	0.0033	0.079	0.094	0.011
	80	2.5	0.0012	39.7	1.01	0.0015	0.049	0.058	0.010
	100	2.0	0.0007	39.7	0.61	0.0007	0.029	0.035	0.008
250	40	6.3	0.0077	39.2	6.60	0.0198	0.317	0.378	0.016
	60	4.2	0.0034	39.1	2.88	0.0058	0.138	0.165	0.014
	80	3.1	0.0019	39.9	1.60	0.0024	0.077	0.092	0.012
	100	2.5	0.0013	40.0	1.10	0.0013	0.053	0.063	0.010

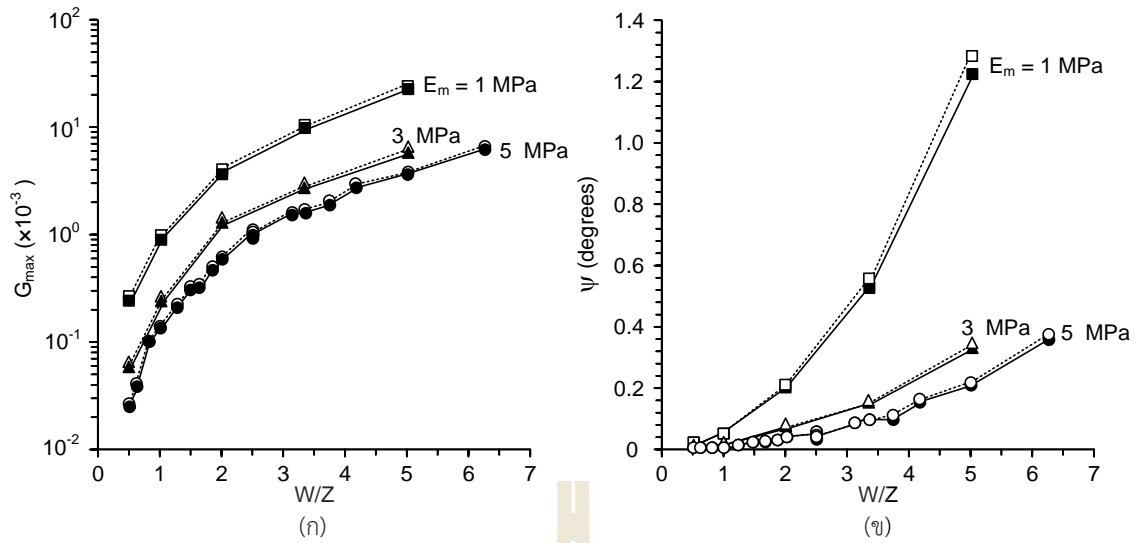


รูปที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (ก) และอัตราส่วนการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

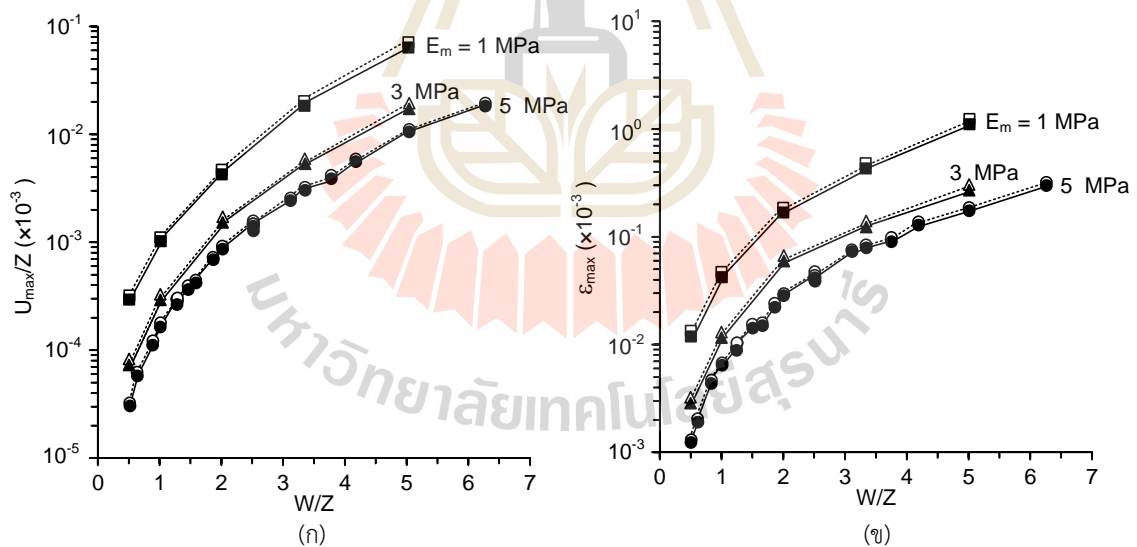
รูปที่ 5.2 (ข) แสดงการเปรียบเทียบอัตราการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1 MPa ส่งผลให้การหลุดตัวสูงสุดมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของความลึกของช่องเหมือง และมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 5 และ 3 ในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3 และ 5 MPa ตามลำดับ ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ให้ค่าประเมินต่ำกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพเพียงเล็กน้อย การประเมินค่าการหลุดตัวสูงสุดของทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันประมาณร้อยละ 5

ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของค่าความชันสูงสุดและค่ามุมความโค้ง เมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าแตกต่างจากแบบจำลองเชิงกายภาพเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 5.3) รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนตัวในแนวระนาบต่อความลึกของช่องเหมืองและความเครียดสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง ผลที่ได้พบว่าค่าองค์ประกอบของการหลุดตัวทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองวิธีให้ค่าการประเมินที่ใกล้เคียงกัน





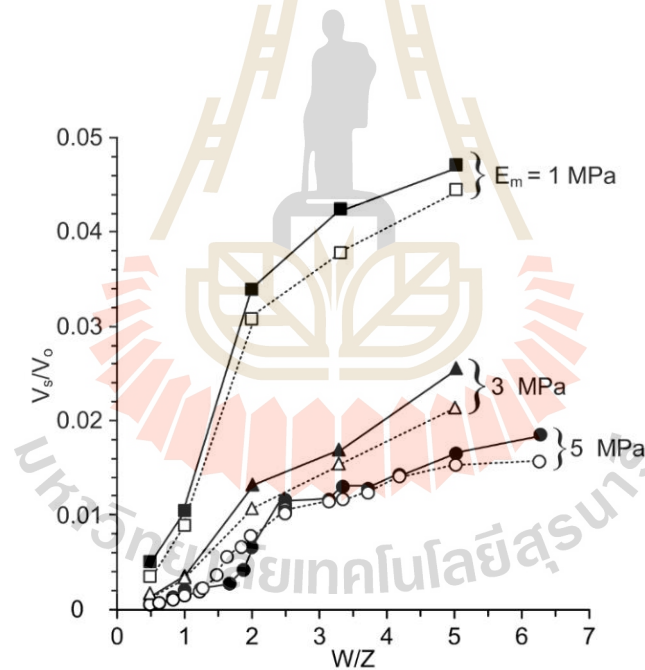
รูปที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าความชันสูงสุด (ก) และค่ามุมความโค้ง (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์



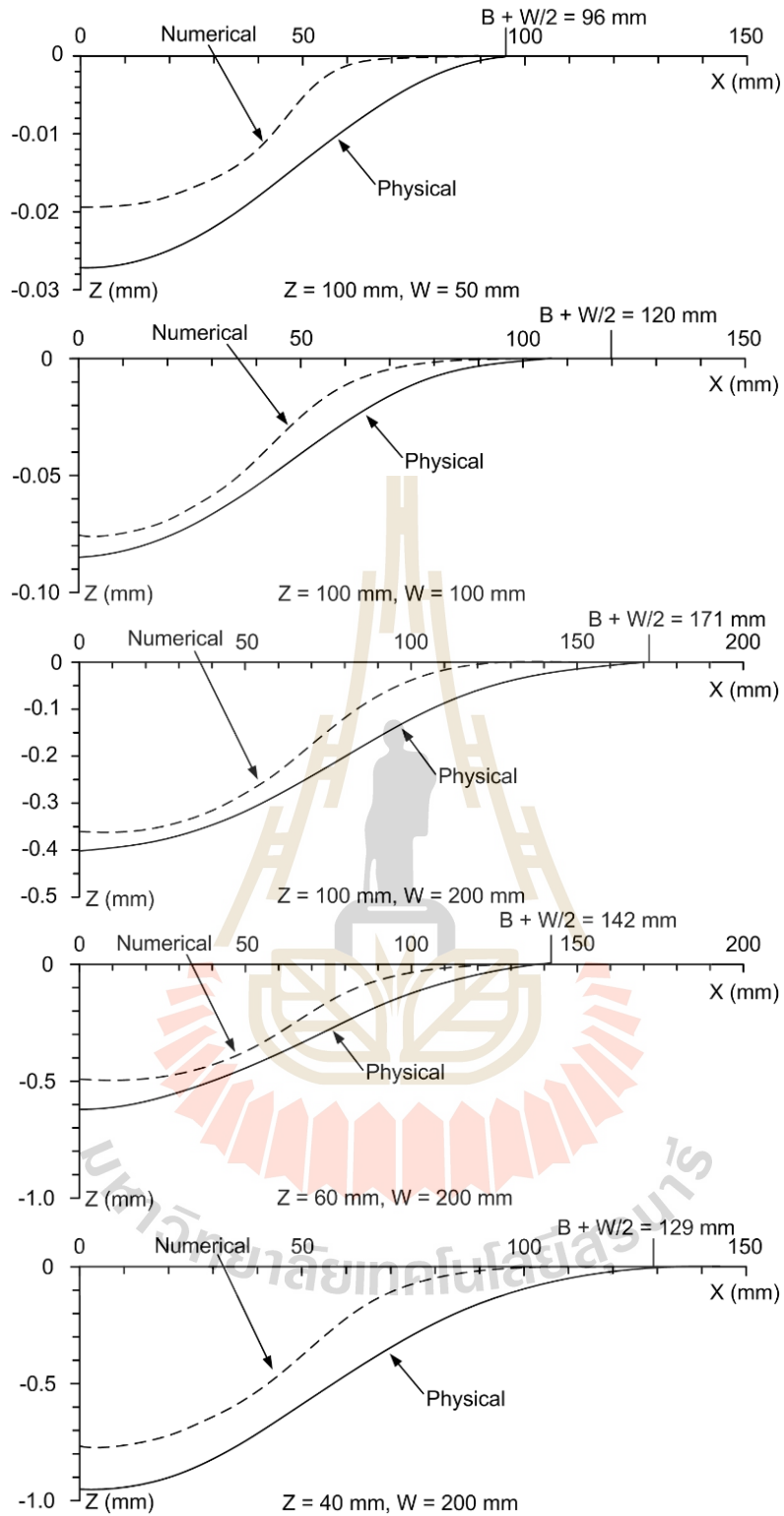
รูปที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือน (ก) และค่าความเครียดสูงสุด (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือน ระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรของช่องเหมืองต่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองแสดงในรูปที่ 5.5 ผลที่ได้ระบุว่าปริมาตรของร่องการทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงกายภาพมีค่าประมาณร้อยละ 10, 7 และ 5 เมื่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1, 3 และ 5 MPa ตามลำดับ ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองทั้งสองวิธีเป็นผลเนื่องมาจากขนาดและจำนวนของโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งโครงข่ายที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมากจะให้ค่าการประเมินองค์ประกอบของการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองเชิงกายภาพ

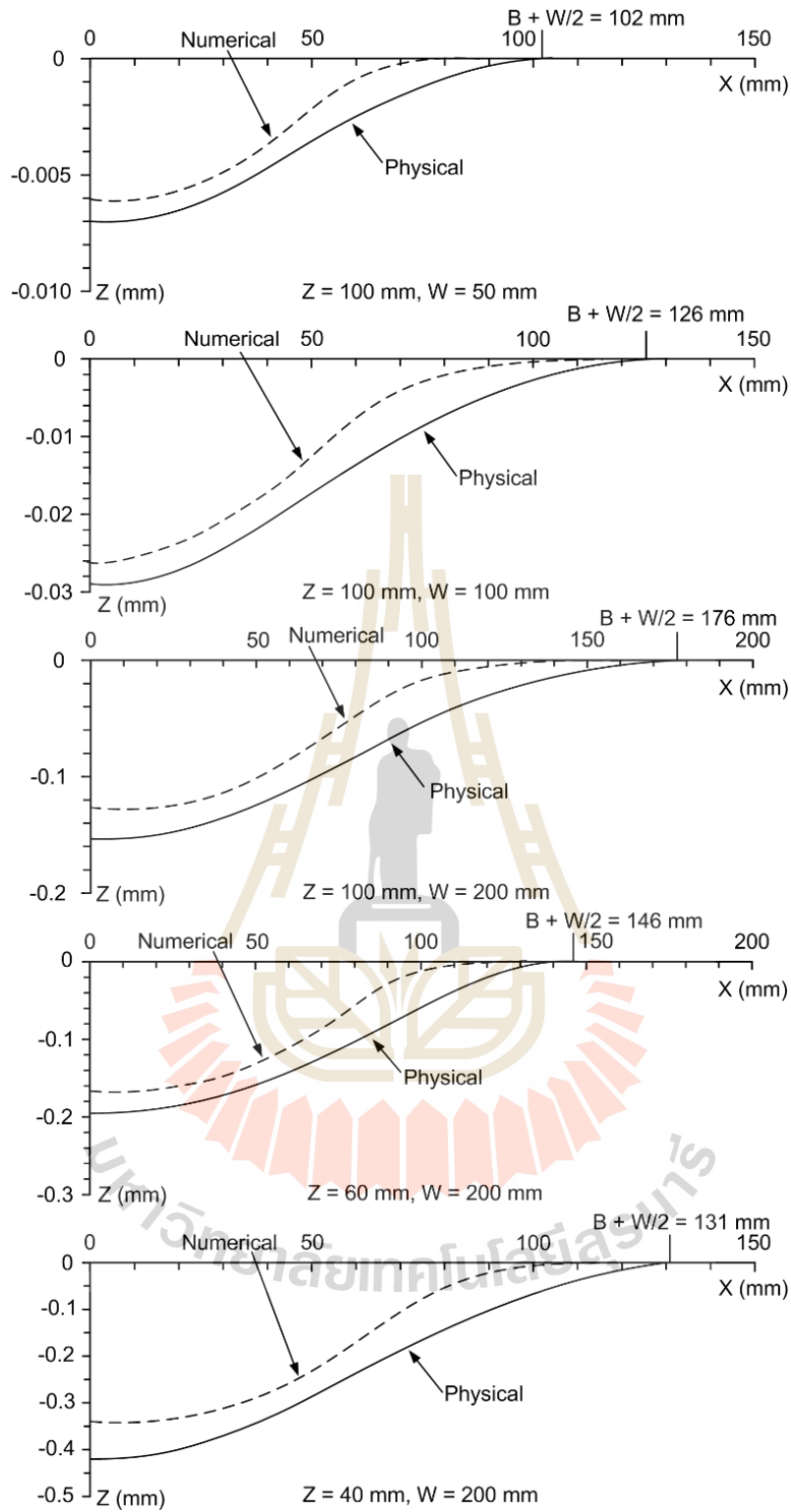
รูปที่ 5.6 ถึง 5.11 แสดงโปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงกายภาพภายใต้การผันแปรคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ ความกว้างและความลึกของช่องเหมือง โปรไฟล์การทรุดตัวที่ตรวจวัดได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะให้ค่าการทรุดตัวน้อยและมีขอบเขตการทรุดตัวแคบกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพ ภายใต้ความลึกของช่องเหมืองที่เท่ากันชั้นหินปิดทับที่อ่อนกว่าจะให้ค่าการทรุดตัวสูงและมีขอบเขตการทรุดตัวกว้างกว่าชั้นหินแข็ง



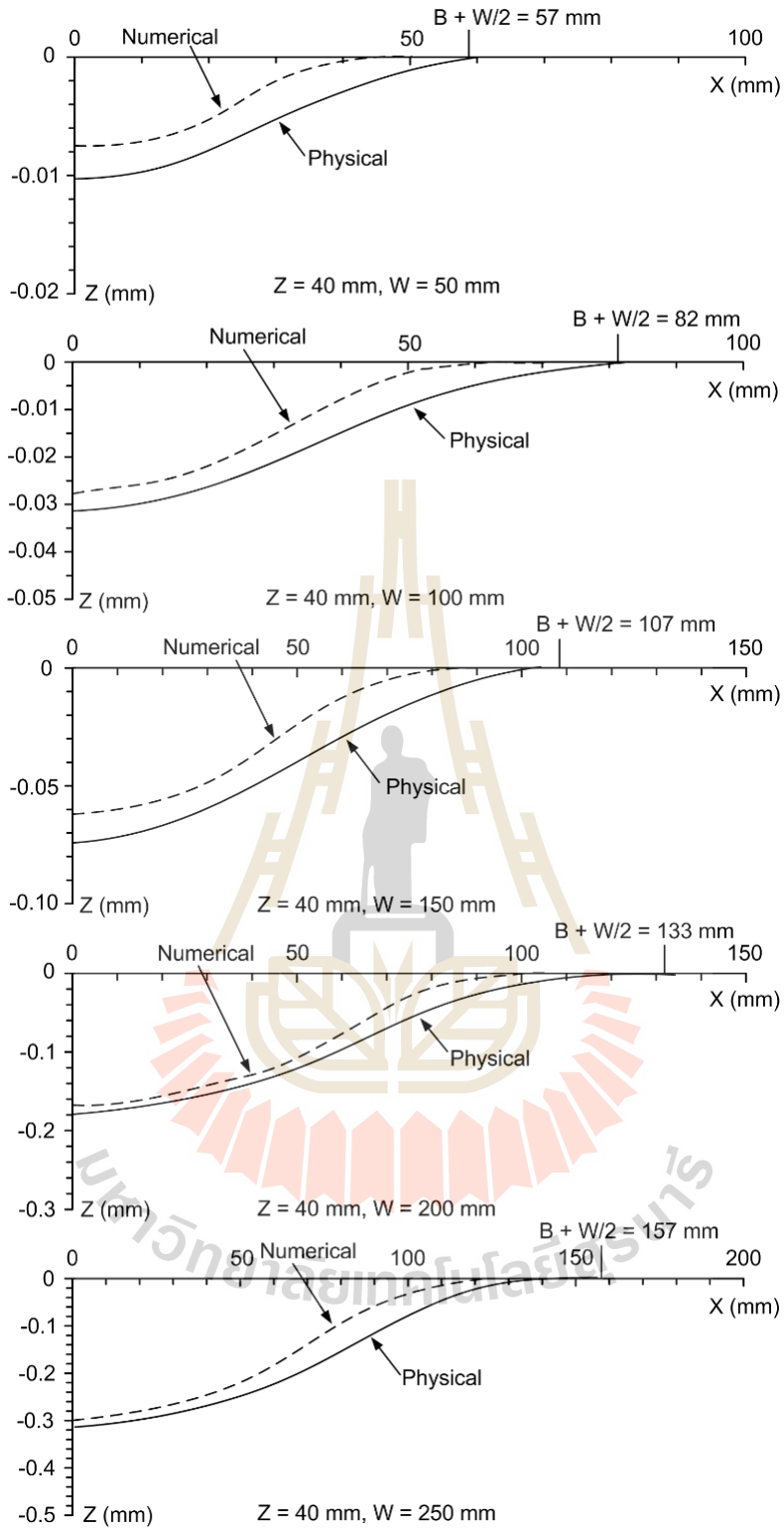
รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาตรร่องการทรุดตัวต่อปริมาตรช่องเหมืองในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองระหว่างแบบจำลองเชิงกายภาพและแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์



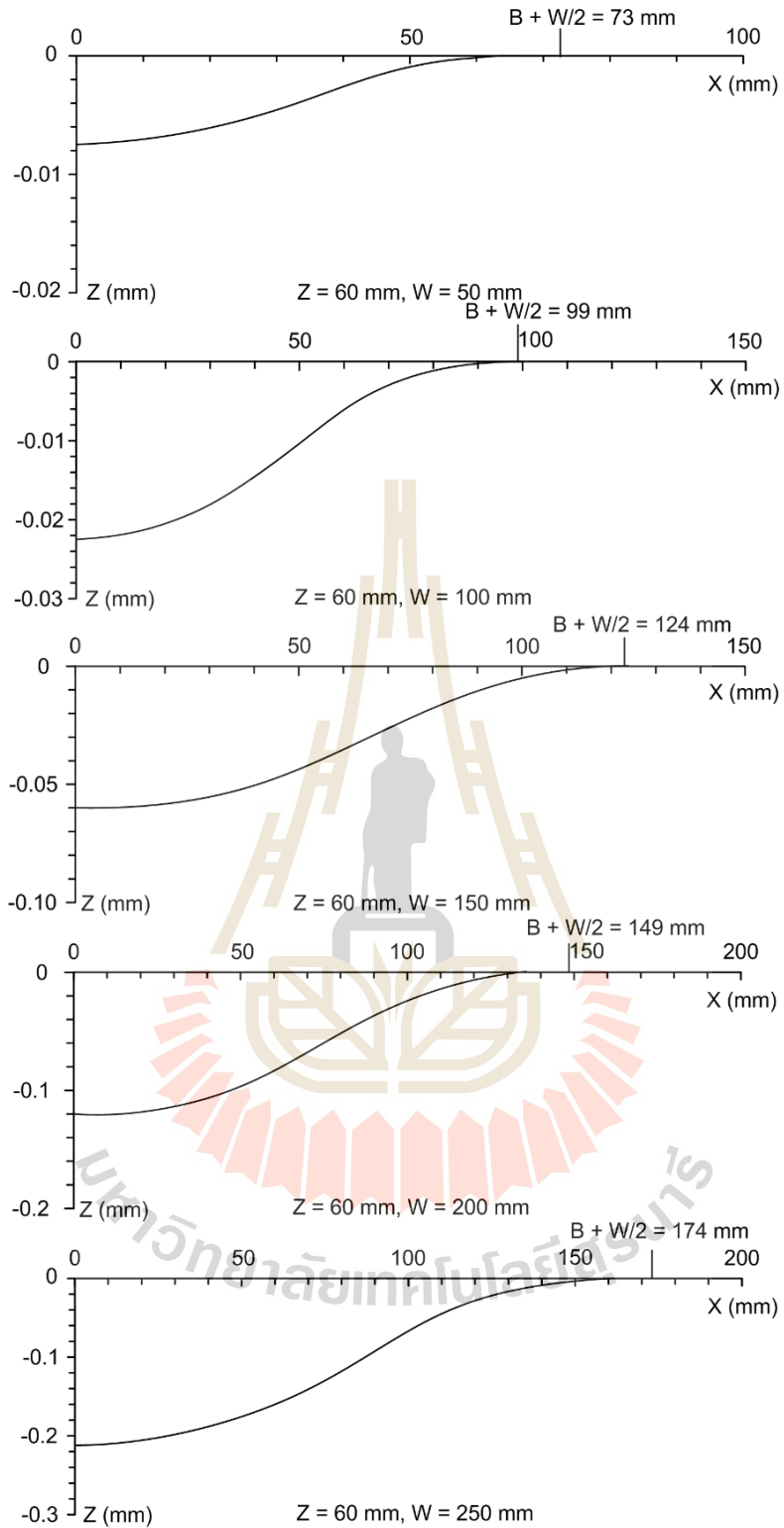
รูปที่ 5.6 โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหมือนในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 1 MPa



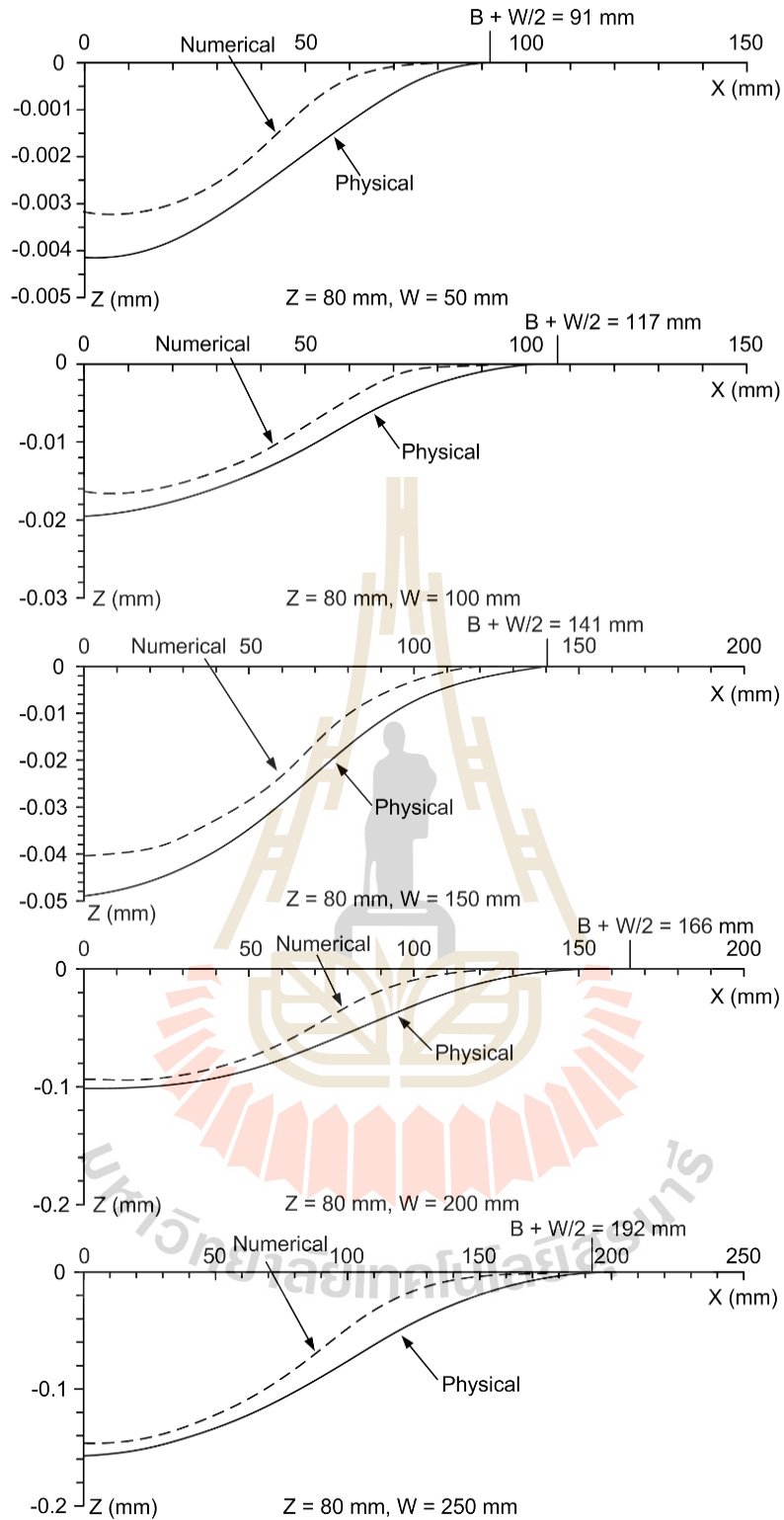
รูปที่ 5.7 โพรไฟล์การหลุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้การผันแปรความกว้างและความลึกของช่องเหมือนในกรณีที่สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 3 MPa



**รูปที่ 5.8** โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 40 mm

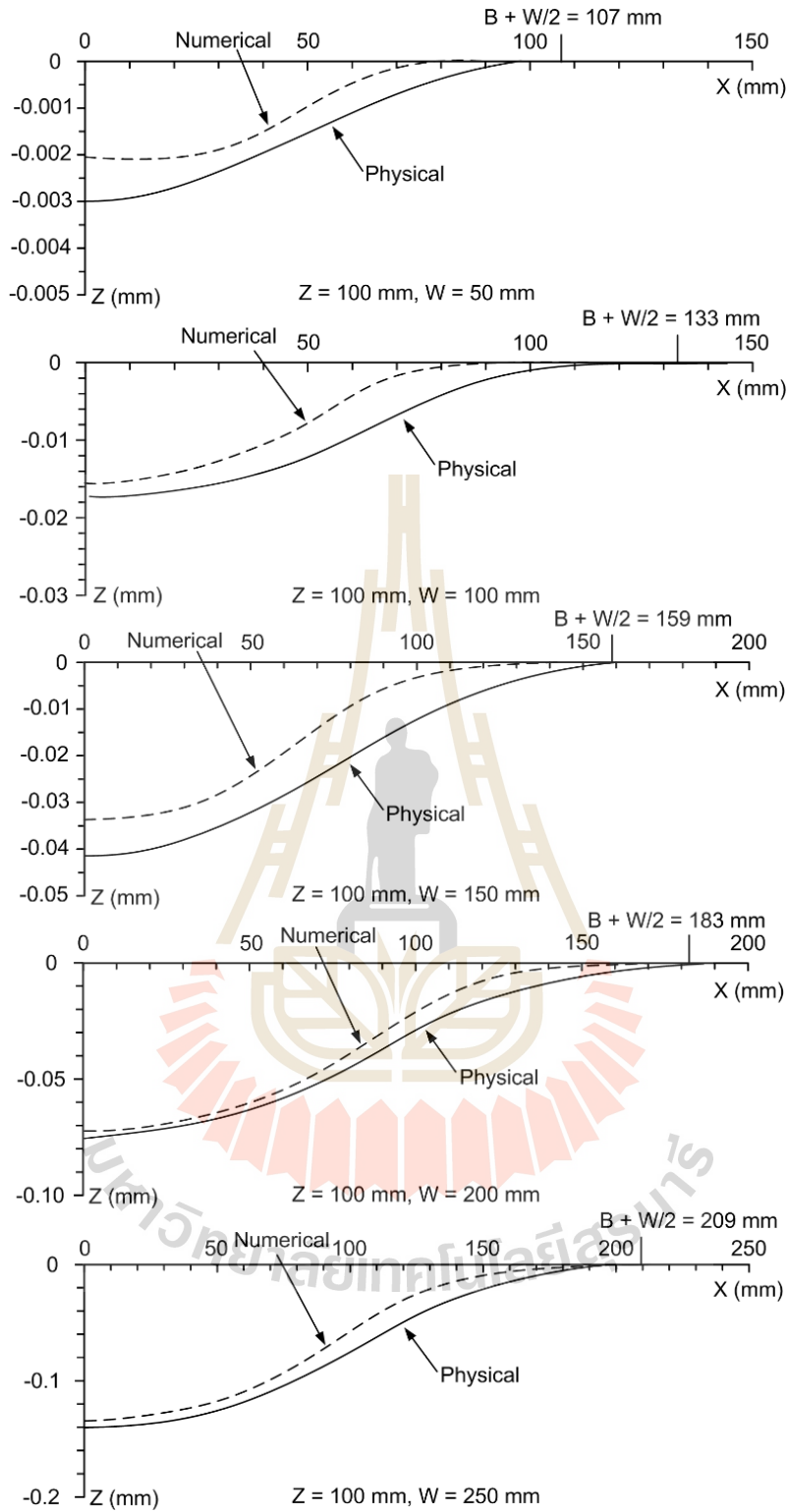


**รูปที่ 5.9** โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 60 mm



รูปที่ 5.10 โปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหมืองที่มีความลึกเท่ากับ 80 mm





**รูปที่ 5.11** โพรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa สำหรับช่องเหลี่ยมที่มีความลึกเท่ากับ 100 mm

## บทที่ 6

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างสมการความสัมพันธ์

#### 6.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลที่ตรวจวัดได้จากแบบจำลองเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบการหลุดตัวในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนและความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ โดยใช้โปรแกรม SPSS (Wendai, 2000) ในการสอบเทียบสมการที่ได้เสนอกับผลจากห้องปฏิบัติการ

#### 6.2 การสร้างสมการความสัมพันธ์

ผลการจำลองการหลุดตัวในห้องปฏิบัติการดังแสดงในบทที่ 4 สามารถนำมาสร้างสมการเชิงประจักษ์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือน ( $S_{max}/Z$ ) มุมการไหลของชั้นหินปิดทับ ( $\gamma$ ) ความชันสูงสุด ( $G_{max}$ ) มุมความโค้ง ( $\psi$ ) อัตราการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือน ( $U_{max}/Z$ ) ความเครียดในแนวระนาบสูงสุด ( $\epsilon_{max}$ ) และปริมาตรของร่องการหลุดตัวต่อปริมาตรช่องเหมือน ( $V_r/V_0$ ) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือน ( $W/Z$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ ( $E_m$ ) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient correlation,  $R^2$ ) จะเป็นดัชนีชี้วัดความสัมพันธ์ระหว่างสมการเชิงประจักษ์ที่สร้างขึ้นและผลจากห้องปฏิบัติการ

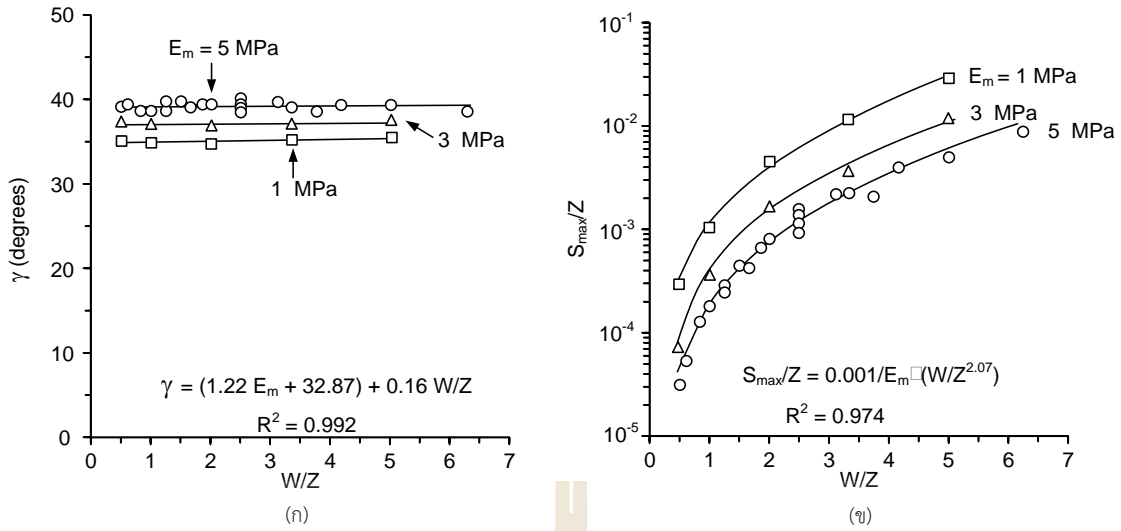
ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างมุมการไหล อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\gamma = (1.22 \cdot E_m + 32.87) + 0.16 \cdot W/Z \quad (\text{องศา}) \quad (6.1)$$

ค่าคงที่ในสมการข้างต้นได้มาจากการสอบเทียบผลการตรวจวัดจากแบบจำลองเชิงกายภาพ รูปที่ 6.1(ก) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสมการและผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งพบว่าสมการและผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี ( $R^2 > 0.9$ )

การหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการยกกำลังดังแสดงในรูปที่ 6.1(ข)

$$S_{max}/Z = 1 \times 10^{-3} / E_m \cdot (W/Z)^{2.07} \quad (6.2)$$



**รูปที่ 6.1** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง (ก) และค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับ (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

จากผลการจำลองในห้องปฏิบัติการดังแสดงในบทที่ 4 พบค่าความชันสูงสุดบนผิวดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.2(ก) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังสมการ (6.3)

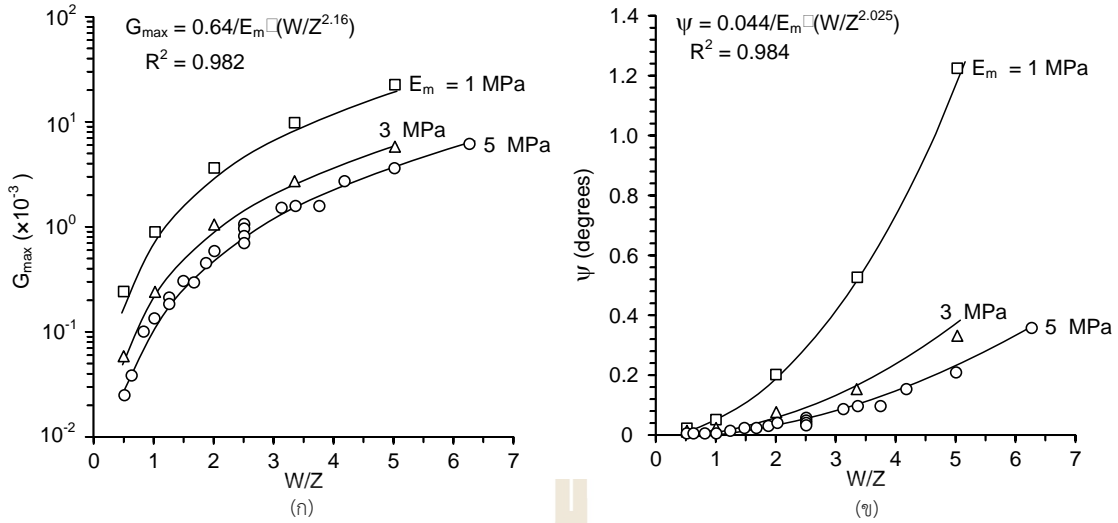
$$G_{max}/Z = 0.64 / E_m \cdot (W/Z)^{2.16} \quad (\times 10^{-3}) \quad (6.3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมความโค้งและอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองภายใต้การผันแปรความยืดหยุ่น สามารถอธิบายได้ดังสมการ (6.4)

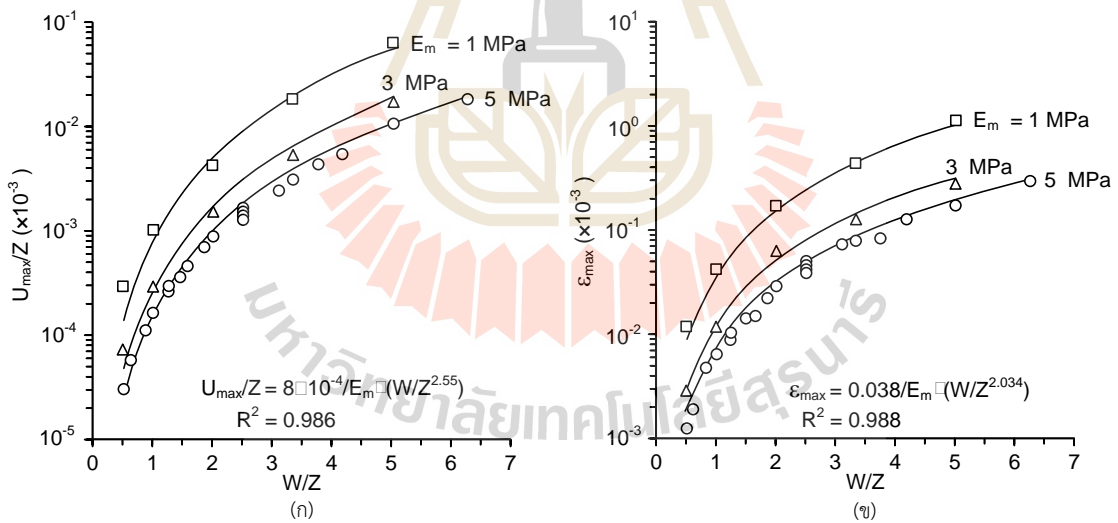
$$\psi = 0.044 / E_m \cdot (W/Z)^{2.03} \quad (\text{องศา}) \quad (6.4)$$

รูปที่ 6.2(ข) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการและจากสมการข้างต้นในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองและความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวระนาบมีการเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองและความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 6.3(ก)) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันสูงสุดบนผิวดิน ( $G_{max}$ ) (ก) และมุมความโค้ง ( $\psi$ ) (ข) ในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง ( $W/Z$ ) ภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวระนาบต่อความลึกของช่องเหมือง ( $U_{max}$ ) (ก) และความเครียดในแนวระนาบสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง ( $W/Z$ ) ภายใต้การผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ

$$U_{\max}/Z = 8 \times 10^{-4} / E_m \cdot (W/Z)^{2.55} \quad (6.5)$$

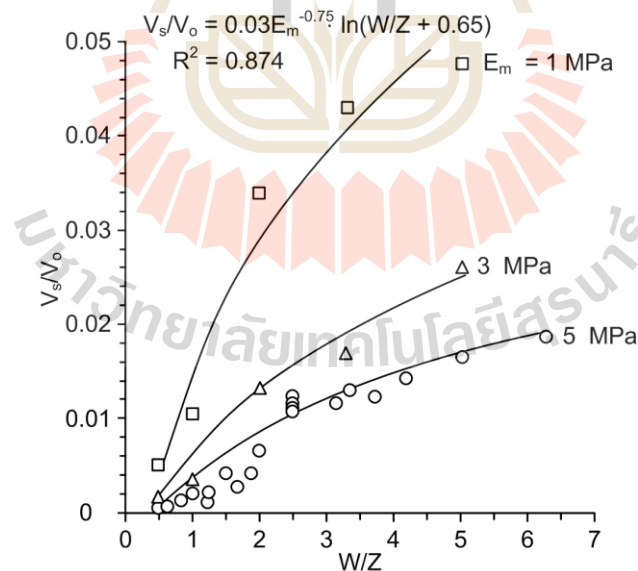
ซึ่งคล้ายคลึงกับสมการข้างต้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดในแนวระนาบต่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนแสดงดังสมการ (6.6) (รูปที่ 6.3ข)

$$\varepsilon_{\max} = 0.038 / E_m \cdot (W/Z)^{2.03} \quad (\text{milli-strains}) \quad (6.6)$$

รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของร่องการทรุดตัวต่อปริมาณของช่องเหมือนในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างและความลึกของช่องเหมือนภายใต้การผันแปรความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ ผลที่ได้พบว่าปริมาณร่องการทรุดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นจริงในทุกกรณีดังแสดงในสมการ (6.7)

$$V_s/V_o = 0.03 E_m^{-0.75} \cdot \ln(W/Z + 0.65) \quad (6.7)$$

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถเปรียบเทียบได้กับช่องเหมือนจริงในภาคสนามภายใต้กฎการเปรียบเทียบของขนาดดังแสดงในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัวต่อปริมาณของช่องเหมือนในฟังก์ชันของอัตราส่วนความกว้างกับความลึกของช่องเหมือน

ตารางที่ 6.1 ผลการจำลองในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับช่องเหมืองในสภาวะจริง

ตัวแปร			แบบจำลอง		ช่องเหมืองในสภาวะจริง	
$E_m$ (MPa)	$E_p$ (GPa)	$W_m/Z_m = W_p/Z_p$	$S_{max,m}$ (mm)	$B_m$ (mm)	$S_{max,p}$ (cm)	$B_p$ (m)
1	3.75	0.5	0.028	77.0	0.42	114.3
		1.0	0.095	76.0	1.41	112.8
		2.0	0.401	75.6	5.95	112.2
		3.3	0.618	45.5	9.17	67.5
		5.0	0.989	31.0	14.68	46.0
3	10.97	0.5	0.007	71.0	0.12	117.9
		1.0	0.029	70.0	0.48	116.3
		2.0	0.152	71.3	2.52	118.5
		3.3	0.193	42.4	3.21	70.4
		5.0	0.416	28.5	6.91	47.3
5	16.84	0.5	0.003	81.9	0.05	126.0
		0.6	0.004	66.0	0.06	101.5
		0.8	0.007	48.0	0.11	73.8
		1.0	0.017	80.5	0.27	123.8
		1.3	0.011	31.7	0.16	48.8
		1.3	0.019	67.0	0.29	103.0
		1.5	0.041	83.5	0.63	128.4
		1.7	0.023	49.0	0.35	75.4
		1.9	0.049	66.2	0.75	101.8
		2.0	0.074	82.8	1.14	127.3
		2.5	0.032	31.5	0.49	48.4
		2.5	0.060	48.5	0.92	74.6
		2.5	0.100	66.5	1.55	102.3
		2.5	0.139	84.2	2.14	129.5
		3.1	0.157	67.0	2.42	103.0
		3.3	0.121	49.0	1.86	75.4
		3.8	0.076	32.0	1.17	49.2
4.2	0.210	49.4	3.23	76.0		
5.0	0.177	32.8	2.72	50.4		
6.3	0.314	32.0	4.82	49.2		

## บทที่ 7

### การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการคำนวณเชิงตัวเลข

#### 7.1 วัตถุประสงค์

เพื่อนำผลจากการจำลองในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function ซึ่งจะแสดงให้เห็นความสอดคล้องและความแตกต่างกัน และเพื่อหาสมการที่สามารถประเมินค่าองค์ประกอบของการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับผลการจำลองในห้องปฏิบัติการมากที่สุด

#### 7.2 การคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function

การทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดินจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมและลักษณะธรรมชาติในพื้นที่เหมืองและพื้นที่ใกล้เคียง Singh (1992) ได้เสนอองค์ประกอบการทรุดตัวของผิวดินที่จะนำมาใช้กำหนดผลกระทบต่อโครงสร้างบนผิวดิน ประกอบด้วย อาคาร สะพาน ทางรถไฟ พื้นที่เกษตรกรรม และแหล่งน้ำใต้ดิน เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก เอกซ์โพเนนเชียลและตรีโกณมิติมาใช้ในการประเมิน ซึ่งแต่ละฟังก์ชันสามารถอธิบายได้ดังสมการ (7.1), (7.2) และ (7.3) ต่อไปนี้

$$\text{ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก} \quad S(x) = 0.5 \cdot S_{\max} \left[ 1 - \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (7.1)$$

$$\text{ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล} \quad S(x) = S_{\max} \cdot \exp\left[-0.5 \frac{(x+B)^2}{B^2}\right] \quad (7.2)$$

$$\text{ฟังก์ชันตรีโกณมิติ} \quad S(x) = S_{\max} \cdot \sin^2\left[\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{x}{B} - 1\right)\right] \quad (7.3)$$

- โดยที่
- $S(x)$  คือ ค่าการทรุดตัว
  - $x$  คือ ระยะทางในแนวราบ
  - $c$  คือ ค่าคงที่ (ในกรณีนี้  $c$  มีค่าเท่ากับ 1.4) และ
  - $B$  คือ ขอบเขตของการทรุดตัว ( $B = Z \cdot \tan \cdot \gamma$ )

ความชันผิวดิน ( $G(x)$ ) สามารถคำนวณได้จากการอนุพันธ์อันดับแรกของ  $S(x)$  เทียบกับค่า  $x$  ในสมการที่ (7.1), (7.2) และ (7.3) ซึ่งทั้งสามฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดังสมการ (7.4), (7.5) และ (7.6) ต่อไปนี้



ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก  $\frac{\partial S(x)}{\partial x} = G(x) = 0.5 \cdot S_{\max} \cdot \frac{c}{B} \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right)$  (7.4)

ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล  $\frac{\partial S(x)}{\partial x} = G(x) = \frac{(x+B) \cdot S_{\max} \cdot \exp\left[-0.5 \frac{(x+B)^2}{B^2}\right]}{B^2}$  (7.5)

ฟังก์ชันตรีโกณมิติ  $\frac{\partial S(x)}{\partial x} = G(x) = S_{\max} \frac{\pi \cdot \cos\left(\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{x}{B} - 1\right)\right)}{2B}$  (7.6)

$$\frac{\sin\left(\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{x}{B} - 1\right)\right)}{2B}$$

ความโค้งของผิวดิน ( $K(x)$ ) คำนวณได้จากการอนุพันธ์อันดับแรกของ  $G(x)$  เทียบกับค่า  $x$  ในสมการที่ (7.4), (7.5) และ (7.6) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (7.7), (7.8) และ (7.9) ต่อไปนี้

ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก  $\frac{\partial G(x)}{\partial x} = K(x) = \frac{c^2}{B^2} \cdot S_{\max} \left[ \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \cdot \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right]$  (7.7)

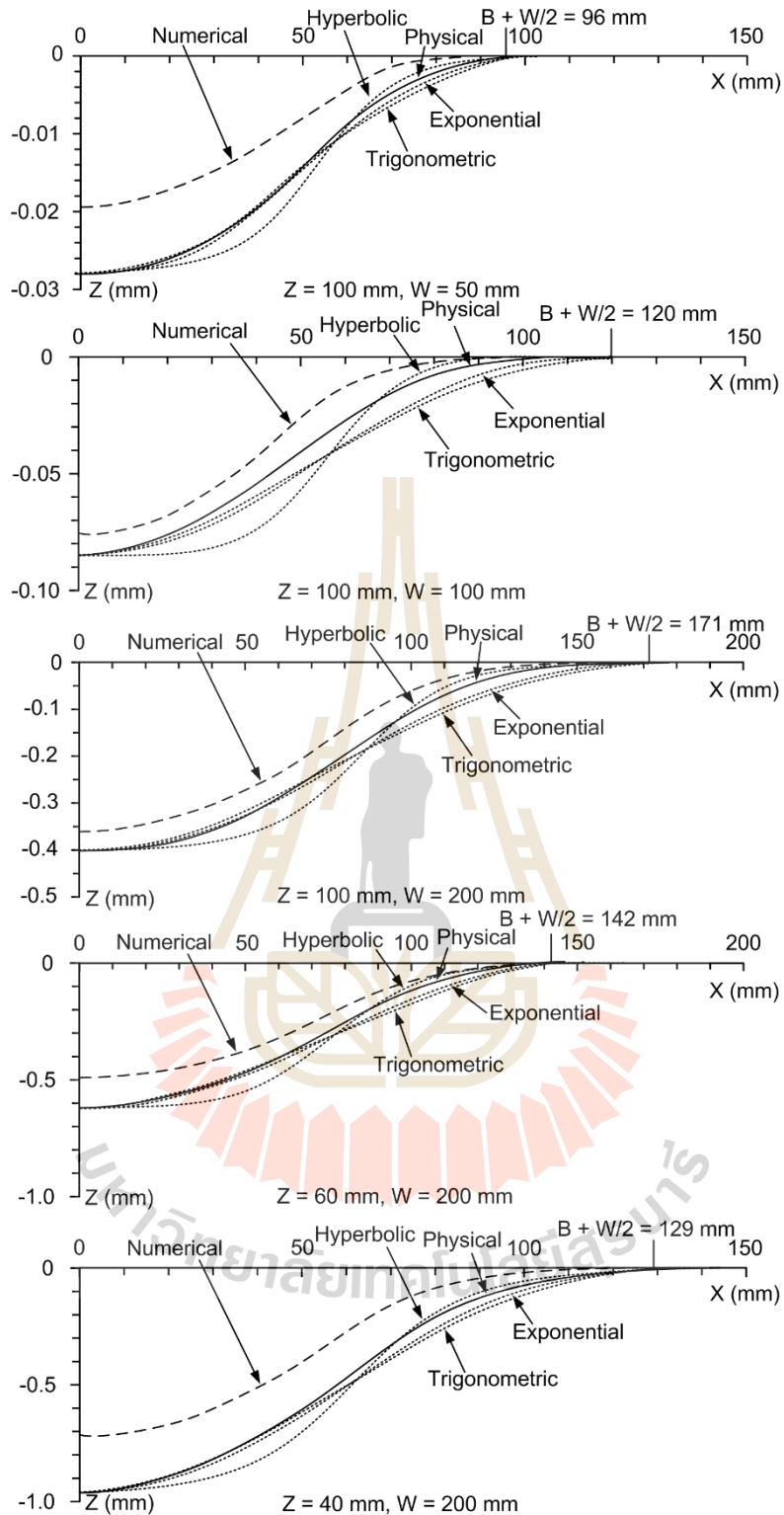
ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล  $\frac{\partial G(x)}{\partial x} = K(x) = \frac{(x+B)^2 \cdot S_{\max} \cdot \exp\left[\frac{-0.5(x+B)^2}{B^2}\right]}{B^4} - \frac{S_{\max} \cdot \exp\left[\frac{-0.5(x+B)^2}{B^2}\right]}{B^2}$  (7.8)

ฟังก์ชันตรีโกณมิติ  $\frac{\partial G(x)}{\partial x} = K(x) = \frac{\pi \cdot S_{\max} \left\{ \pi \cdot \cos^2\left[\frac{\pi(x-B)}{4B}\right] \right\}}{8B^2} - \frac{\pi \cdot S_{\max} \left\{ \pi \cdot \sin^2\left[\frac{\pi(x-B)}{4B}\right] \right\}}{8B^2}$  (7.9)

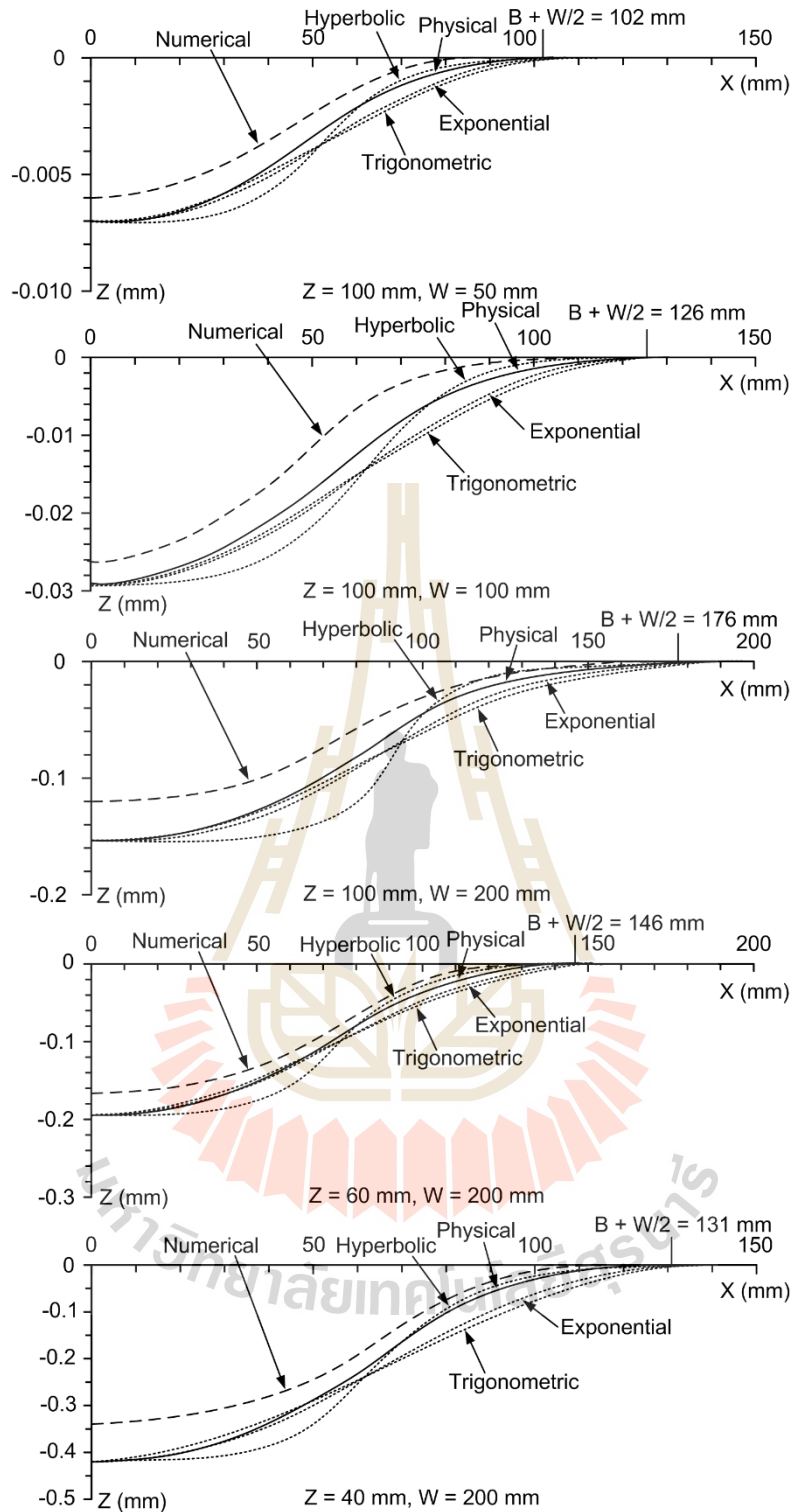
### 7.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function และแบบจำลองเชิงกายภาพ

รูปที่ 7.1 ถึง 7.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างโปรไฟล์การทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ profile function และโปรไฟล์ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรความกว้าง ความลึกของช่องเหมือง และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับ รูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบโปรไฟล์การทรุดตัวระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการสำหรับเจลที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 และ 3 MPa ตามลำดับ ภายใต้การผันแปรความลึกและความกว้างของช่องเหมือง ผลที่ได้ระบุว่าโปรไฟล์การทรุดตัวของเจลที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นน้อยแสดงค่าการทรุดตัวและขอบเขตของการทรุดตัวมากกว่าเจลที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมากในทุกกรณี รูปที่ 7.3 ถึงรูปที่ 7.6 แสดงการเปรียบเทียบโปรไฟล์การทรุดตัวระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมืองเท่ากับ 40, 60, 80 และ 100 mm ตามลำดับ ผลที่ได้ระบุว่าทั้งสามฟังก์ชันแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างลักษณะของการทรุดตัวเช่น ความชัน ความโค้ง และรูปร่างของร่องการทรุดตัว ในแต่ละกรณีทั้งสามฟังก์ชันถูกกำหนดให้มีค่าการทรุดตัวสูงสุดและขอบเขตการทรุดตัวเท่ากัน เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลและตรีโกณมิติให้ค่าการประเมินความชันต่ำกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพ ในขณะที่ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกให้ค่าการประเมินความชันสูงกว่าผลตรวจวัดจากห้องปฏิบัติการ

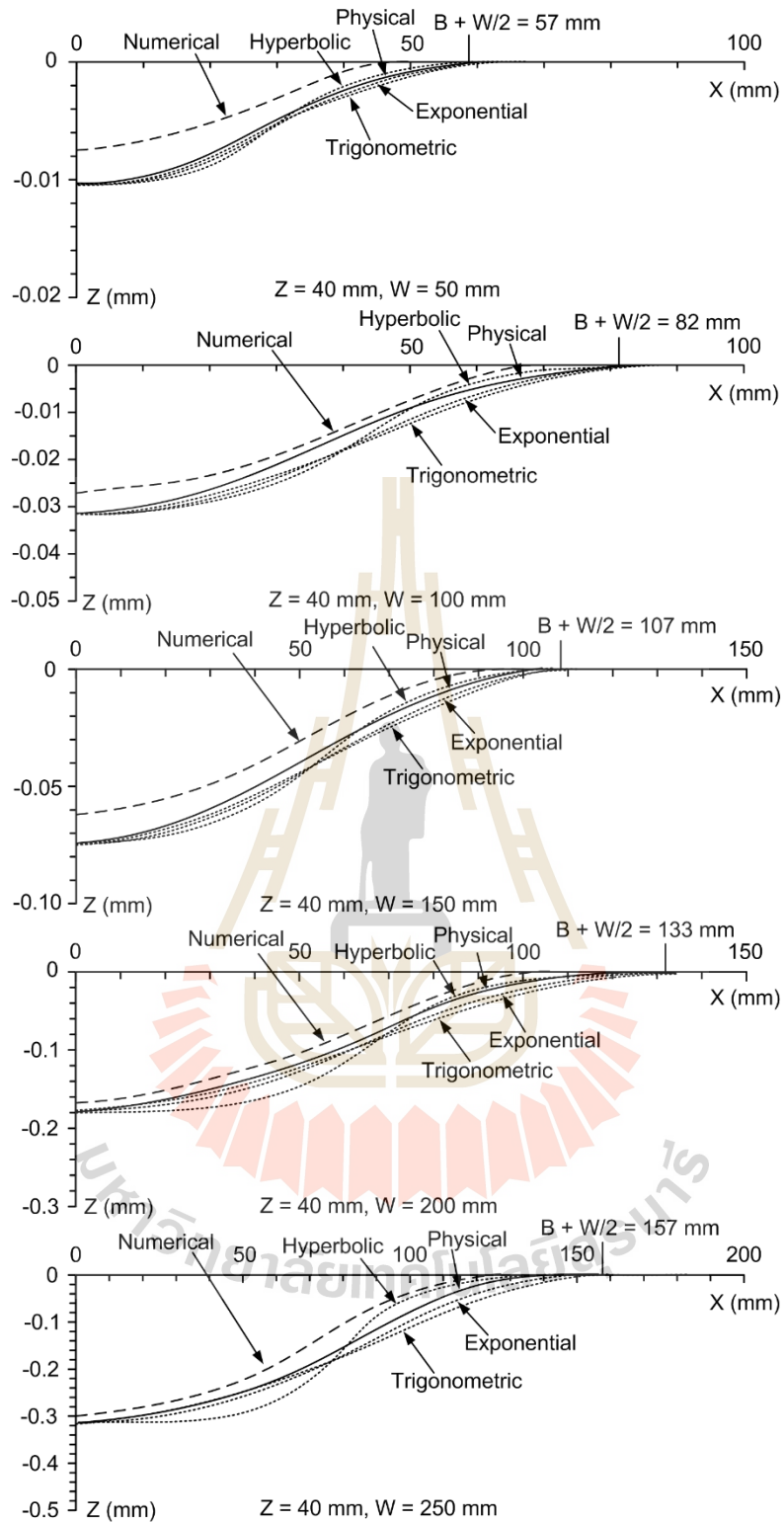
ตารางที่ 7.1 ถึงตารางที่ 7.4 แสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลขจาก Profile function ในเทอมของค่าความชันสูงสุด ( $\times 10^{-3}$ ) อัตราการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง ค่าความเครียดสูงสุด ( $\times 10^{-3}$ ) และค่ามุมความโค้ง (องศา) ภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1, 3 และ 5 MPa โดยแสดงในรูปของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง (W/Z) เปรียบเทียบกับผลที่ตรวจวัดได้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ 7.7 ถึง 7.10 ทุกฟังก์ชันแสดงให้เห็นว่าความชันสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือง (W/Z) เพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งเป็นจริงในทุกความกว้างและความลึก แต่อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของทั้งสามฟังก์ชันยังคงมีอยู่ โดยพบว่าฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกประเมินค่าความชันสูงสุดสูงกว่าค่าความชันในห้องปฏิบัติการประมาณร้อยละ 10 ส่วนฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลและตรีโกณมิติให้ค่าการประเมินต่ำกว่าผลจากแบบจำลองเชิงกายภาพประมาณร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 7.7) ซึ่งความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ามุมความโค้ง (รูปที่ 7.8) อัตราการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง (รูปที่ 7.9) และค่าความเครียดสูงสุด (รูปที่ 7.10) มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



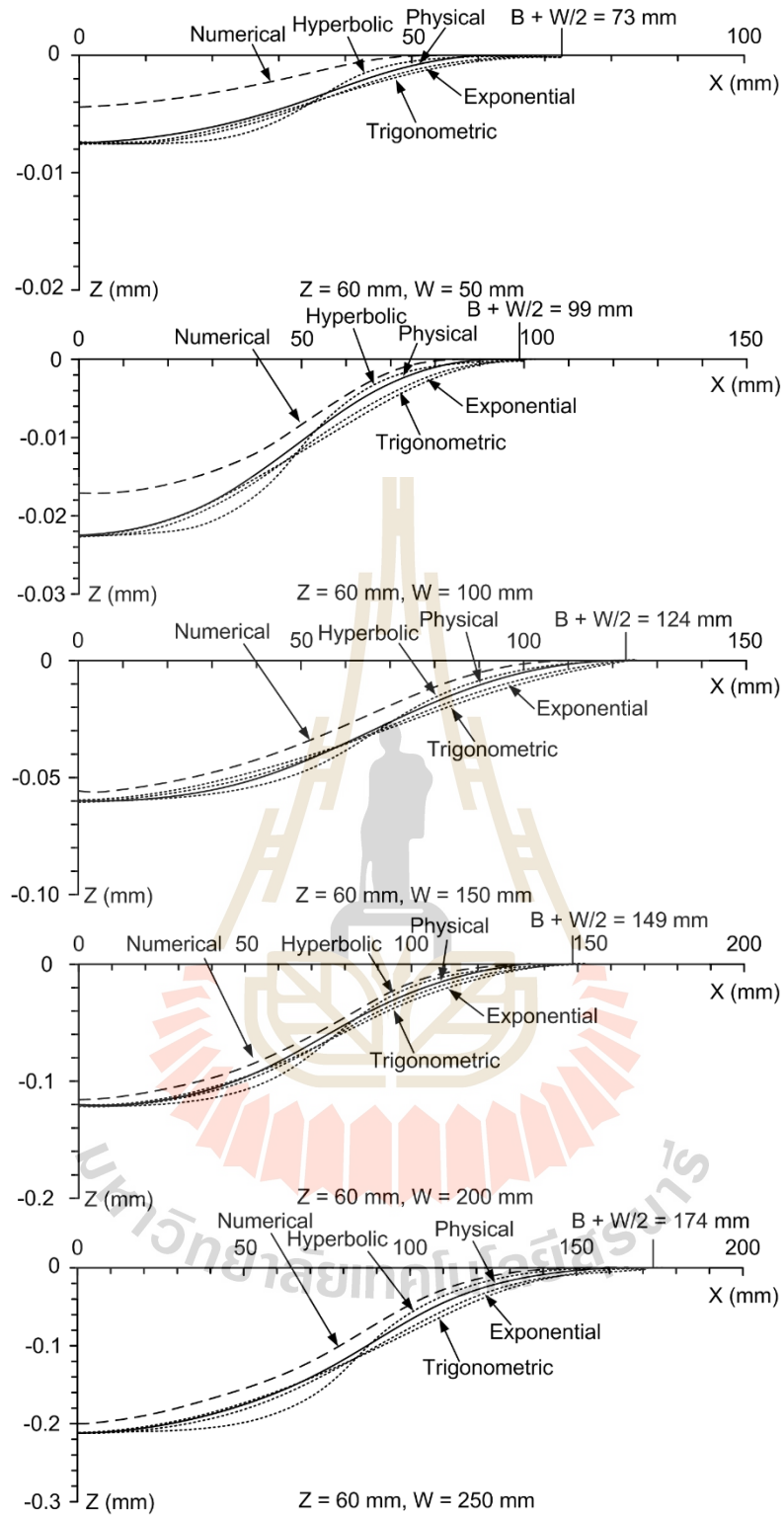
รูปที่ 7.1 โปรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa ภายใต้การผันแปรความลึกและความกว้างของช่องเหมือน



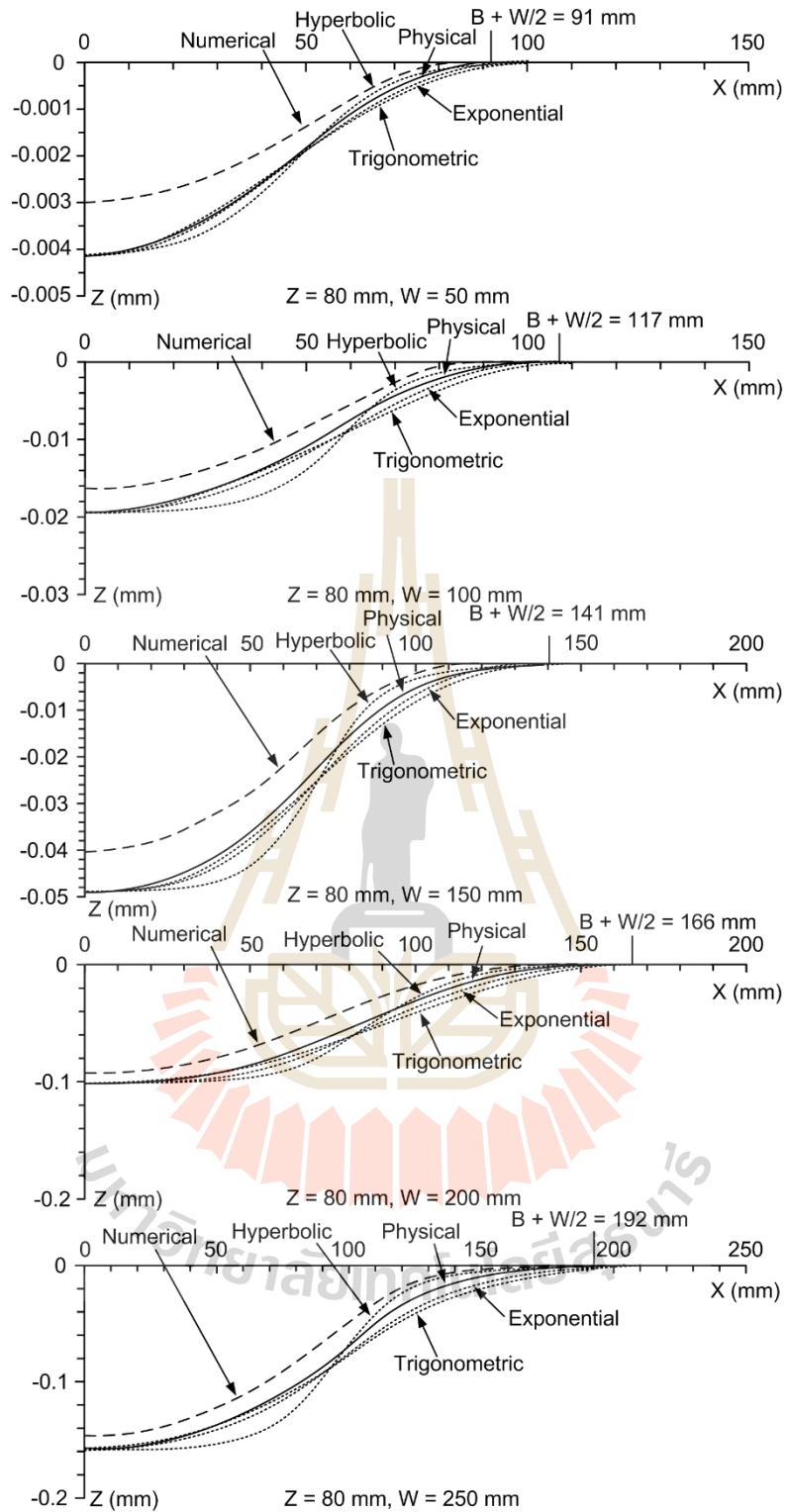
รูปที่ 7.2 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3 MPa ภายใต้การผันแปรความลึกและความกว้างของช่องเหมือง



รูปที่ 7.3 โพรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมือนเท่ากับ 40 mm

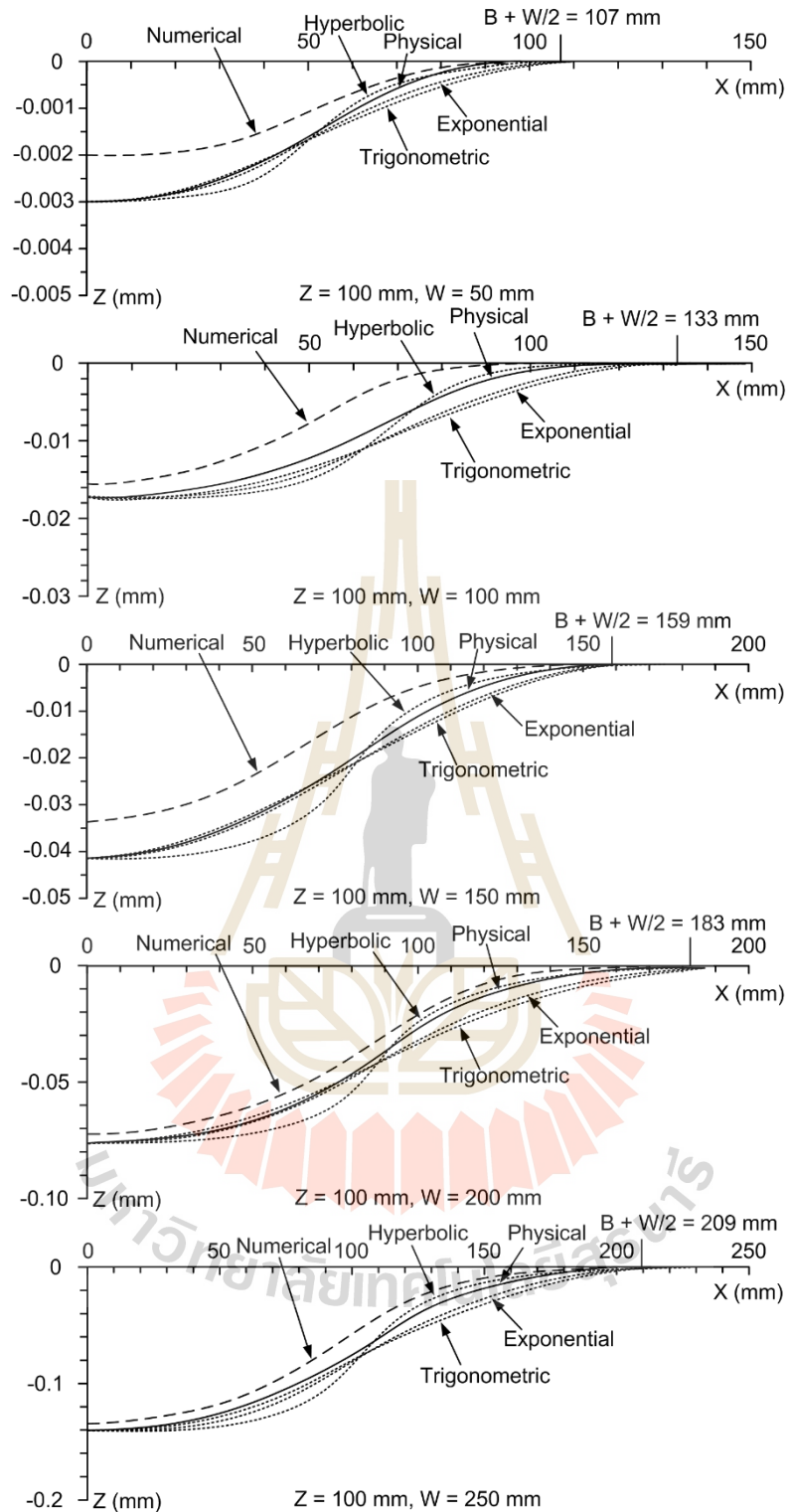


รูปที่ 7.4 โปรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมือนเท่ากับ 60 mm



รูปที่ 7.5 โปรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมือนเท่ากับ 80 mm





รูปที่ 7.6 โปรไฟล์การทรุดตัวเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันกับผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 5 MPa และความลึกของช่องเหมือนเท่ากับ 100 mm

ตารางที่ 7.1 ค่าความชันสูงสุด ( $\times 10^{-3}$ ) ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function

ตัวแปร		แบบจำลองเชิง กายภาพ	Profile functions		
$E_m$ (MPa)	W/Z		ไฮเปอร์โบลิก	เอกซ์โพเนนเชียล	ตรีโกณมิติ
1	0.5	0.25	0.28	0.24	0.21
	1.0	0.88	0.95	0.82	0.80
	2.0	3.52	3.94	3.41	3.27
	3.3	9.22	10.20	8.84	8.59
	5.0	21.50	24.00	20.80	17.80
3	0.5	0.06	0.06	0.06	0.05
	1.0	0.24	0.27	0.23	0.23
	2.0	1.28	1.41	1.22	1.15
	3.3	2.61	2.97	2.57	2.44
	5.0	5.72	6.23	5.40	5.20
5	0.5	0.03	0.03	0.02	0.02
	0.6	0.04	0.04	0.04	0.04
	0.8	0.10	0.11	0.09	0.08
	1.0	0.13	0.15	0.13	0.10
	1.3	0.18	0.20	0.17	0.16
	1.3	0.22	0.23	0.20	0.18
	1.5	0.31	0.35	0.30	0.26
	1.7	0.30	0.32	0.28	0.25
	1.9	0.46	0.52	0.45	0.41
	2.0	0.59	0.63	0.54	0.52
	2.5	0.66	0.71	0.62	0.57
	2.5	0.82	0.87	0.75	0.68
	2.5	0.95	1.06	0.92	0.83
	2.5	1.05	1.16	1.00	0.94
	3.1	1.53	1.64	1.42	1.31
	3.3	1.57	1.73	1.50	1.40
3.8	1.54	1.66	1.44	1.37	
4.2	2.73	2.98	2.58	2.38	
5.0	3.64	3.91	3.28	3.19	
6.3	6.23	6.86	5.95	5.63	

ตารางที่ 7.2 อัตราการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมืองที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function

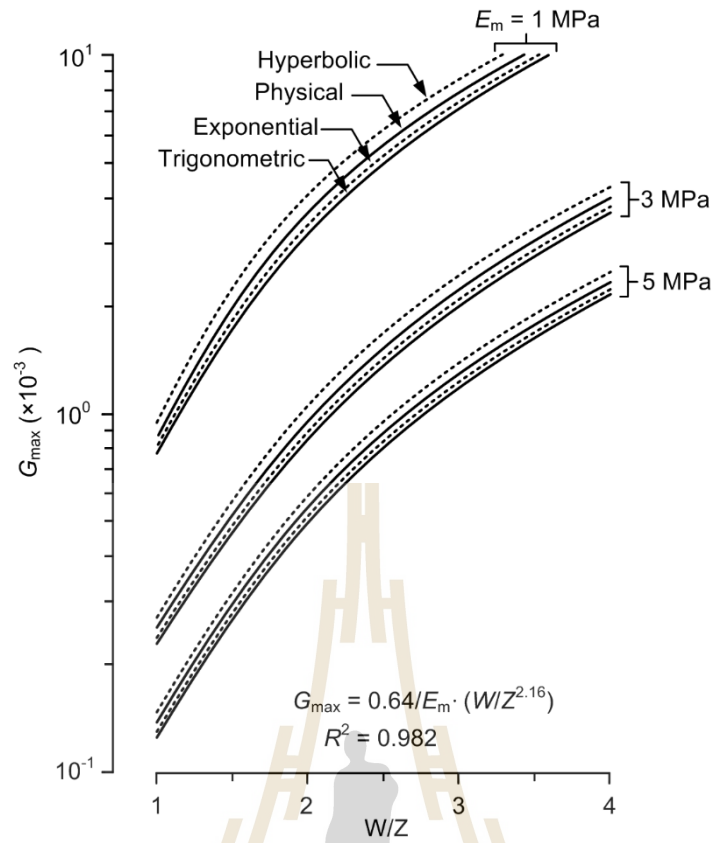
ตัวแปร		แบบจำลองเชิง กายภาพ	Profile functions		
$E_m$ (MPa)	W/Z		ไฮเปอร์โบลิก	เอกซ์โพเนนเชียล	ตรีโกณมิติ
1	0.5	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
	1.0	0.0007	0.0005	0.0004	0.0004
	2.0	0.0042	0.0047	0.0041	0.0039
	3.3	0.0184	0.0204	0.0177	0.0172
	5.0	0.0645	0.0720	0.0624	0.0534
3	0.5	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	1.0	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
	2.0	0.0015	0.0017	0.0015	0.0014
	3.3	0.0052	0.0059	0.0051	0.0049
	5.0	0.0172	0.0187	0.0162	0.0156
5	0.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.6	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	0.8	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
	1.0	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001
	1.3	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
	1.3	0.0006	0.0007	0.0006	0.0006
	1.5	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
	1.7	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005
	1.9	0.0007	0.0008	0.0007	0.0006
	2.0	0.0007	0.0008	0.0007	0.0006
	2.5	0.0013	0.0014	0.0012	0.0011
	2.5	0.0014	0.0016	0.0014	0.0012
	2.5	0.0016	0.0017	0.0015	0.0014
	2.5	0.0020	0.0021	0.0019	0.0017
	3.1	0.0023	0.0025	0.0021	0.0020
	3.3	0.0031	0.0035	0.0030	0.0028
	3.8	0.0046	0.0050	0.0043	0.0041
4.2	0.0055	0.0060	0.0052	0.0048	
5.0	0.0109	0.0117	0.0098	0.0096	
6.3	0.0187	0.0206	0.0178	0.0169	

ตารางที่ 7.3 ค่าความเครียดสูงสุด ( $\times 10^{-3}$ ) ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function

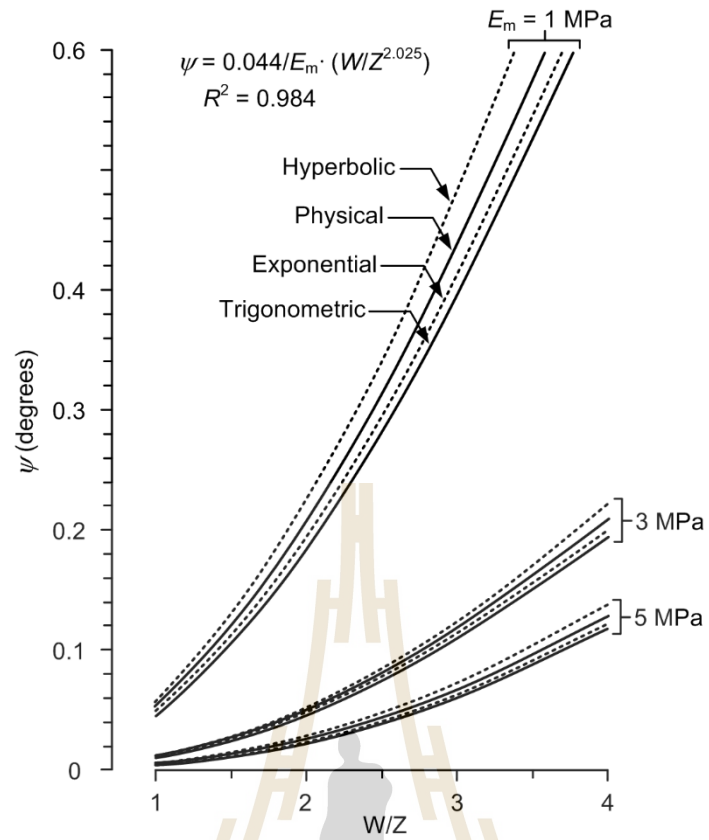
ตัวแปร		แบบจำลองเชิง กายภาพ	Profile functions		
$E_m$ (MPa)	W/Z		ไฮเปอร์โบลิก	เอกซ์โพเนนเชียล	ตรีโกณมิติ
1	0.5	0.012	0.013	0.011	0.010
	1.0	0.042	0.046	0.040	0.039
	2.0	0.169	0.189	0.164	0.157
	3.3	0.443	0.490	0.424	0.412
	5.0	1.032	1.152	0.998	0.854
3	0.5	0.003	0.003	0.003	0.002
	1.0	0.012	0.013	0.011	0.011
	2.0	0.061	0.068	0.059	0.055
	3.3	0.125	0.143	0.123	0.117
	5.0	0.275	0.299	0.259	0.250
5	0.5	0.001	0.001	0.001	0.001
	0.6	0.002	0.002	0.002	0.002
	0.8	0.005	0.005	0.005	0.004
	1.0	0.006	0.007	0.006	0.005
	1.3	0.009	0.010	0.008	0.008
	1.3	0.010	0.011	0.010	0.009
	1.5	0.015	0.017	0.014	0.013
	1.7	0.014	0.015	0.013	0.012
	1.9	0.022	0.025	0.022	0.020
	2.0	0.029	0.030	0.026	0.025
	2.5	0.032	0.034	0.030	0.027
	2.5	0.039	0.042	0.036	0.033
	2.5	0.046	0.051	0.044	0.040
	2.5	0.050	0.055	0.048	0.045
	3.1	0.074	0.079	0.068	0.063
	3.3	0.076	0.083	0.072	0.067
3.8	0.074	0.080	0.069	0.066	
4.2	0.131	0.143	0.124	0.114	
5.0	0.175	0.188	0.158	0.153	
6.3	0.299	0.329	0.285	0.270	

ตารางที่ 7.4 ค่ามุมความโค้ง (องศา) ที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการและการคำนวณเชิงตัวเลข ด้วย Profile function

ตัวแปร		แบบจำลองเชิง กายภาพ	Profile functions		
$E_m$ (MPa)	W/Z		ไฮเปอร์โบลิก	เอกซ์โพเนนเชียล	ตรีโกณมิติ
1	0.5	0.014	0.016	0.014	0.012
	1.0	0.050	0.054	0.047	0.046
	2.0	0.202	0.226	0.195	0.187
	3.3	0.528	0.584	0.506	0.492
	5.0	1.232	1.375	1.192	1.020
3	0.5	0.003	0.004	0.003	0.003
	1.0	0.014	0.015	0.013	0.013
	2.0	0.073	0.081	0.070	0.066
	3.3	0.150	0.170	0.147	0.140
	5.0	0.328	0.357	0.309	0.298
5	0.5	0.001	0.001	0.001	0.001
	0.6	0.002	0.002	0.002	0.002
	0.8	0.006	0.006	0.005	0.005
	1.0	0.008	0.009	0.007	0.006
	1.3	0.011	0.011	0.010	0.009
	1.3	0.012	0.013	0.012	0.011
	1.5	0.018	0.020	0.017	0.015
	1.7	0.017	0.018	0.016	0.014
	1.9	0.026	0.030	0.026	0.023
	2.0	0.034	0.036	0.031	0.030
	2.5	0.038	0.041	0.035	0.033
	2.5	0.047	0.050	0.043	0.039
	2.5	0.055	0.061	0.053	0.047
	2.5	0.060	0.066	0.057	0.054
	3.1	0.088	0.094	0.081	0.075
	3.3	0.090	0.099	0.086	0.080
	3.8	0.088	0.095	0.083	0.078
4.2	0.156	0.171	0.148	0.136	
5.0	0.208	0.224	0.188	0.183	
6.3	0.357	0.393	0.341	0.323	

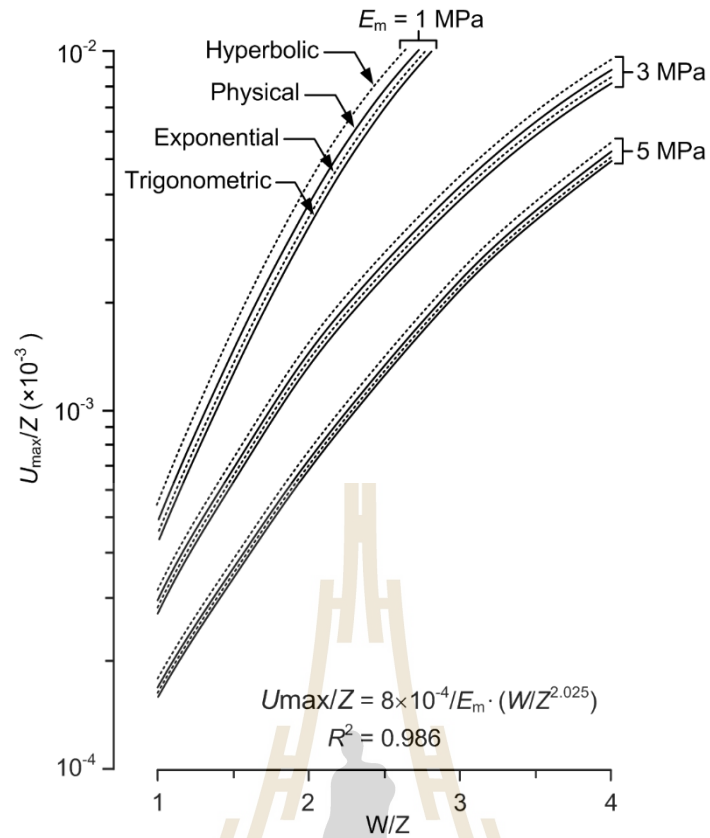


รูปที่ 7.7 กราฟเปรียบเทียบค่าความชันสูงสุดระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนกรณีความเค้น 1, 3 และ 5 MPa

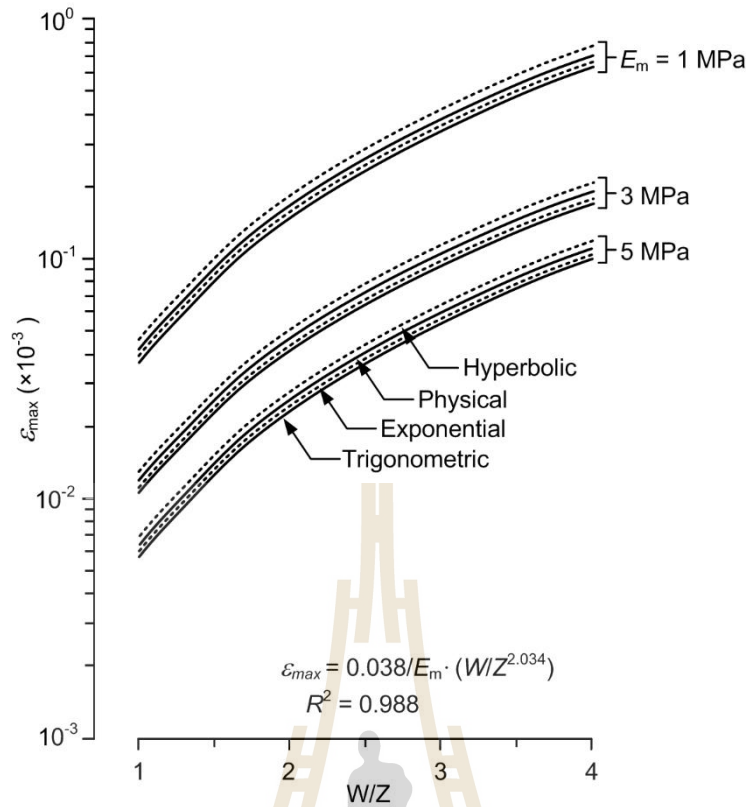


รูปที่ 7.8 กราฟเปรียบเทียบแสดงค่ามุมความโค้งระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมือนกรณีความเค้น 1, 3 และ 5 MPa





รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบแสดงอัตราการเคลื่อนตัวในแนวระนาบสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือง ระหว่างการคำนวณเชิงตัวเลขทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองกรณีความเค้น 1, 3 และ 5 MPa



รูปที่ 7.10 เปรียบเทียบค่าความเครียดสูงสุดต่อความลึกของช่องเหมือนระหว่างการค้าคำนวณเชิงตัวเลข ทั้งสามฟังก์ชันและผลการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการภายใต้การผันแปรอัตราส่วนความกว้าง ต่อความลึกของช่องเหมือน

## บทที่ 8

### บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

#### 8.1 อภิปรายผลการวิจัย

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความน่าเชื่อถือและความเพียงพอของการทดสอบ รวมทั้งการเปรียบเทียบผลลัพธ์และข้อเสนอแนะที่ได้ค้นพบจากการศึกษาครั้งนี้ จำนวนของการจำลองเชิงกายภาพมีความเพียงพอทั้งในด้านขนาด ความกว้าง และความลึกของช่องเหมือง รวมไปถึงคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ จากผลการจำลองในห้องปฏิบัติการระบุว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดมีความอ่อนไหวต่อขนาดความกว้างและความลึกของช่องเหมือง ซึ่งจากการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองเชิงกายภาพพบว่าทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งการทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองเพิ่มขึ้น และค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับมีแนวโน้มไม่ขึ้นต่อกับความกว้างและความลึกของช่องเหมือง แต่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ เมื่อพิจารณาโปรไฟล์การทรุดตัวพบว่าแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะให้โปรไฟล์ที่ตื้นและแคบกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพ ซึ่งภายใต้ความลึกของช่องเหมืองเดียวกันพบว่าชั้นหินปิดทับที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นน้อยจะให้ขอบเขตการทรุดตัวแคบกว่าชั้นหินปิดทับที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากชั้นหินที่อ่อนกว่าจะเกิดการทรุดตัวได้ง่ายกว่าชั้นหินแข็ง

ผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วย Profile function แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก เอกซ์โพเนนเชียล และตรีโกณมิติ ซึ่งผลที่ได้พบว่าฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลและตรีโกณมิติให้ค่าการประเมินต่ำกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพ และฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกให้ค่าการประเมินสูงกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพในทุกกรณี และพบว่าปริมาตรของร่องการทรุดตัวทั้งสามฟังก์ชันให้ค่าเท่ากัน

#### 8.2 สรุปผลการวิจัย

ผลกระทบด้านรูปร่างของช่องเหมืองและคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับสามารถสังเกตได้จากค่าองค์ประกอบของการทรุดตัว ซึ่งพบว่าการทรุดตัวสูงสุด ความชันสูงสุด มุมความโค้ง อัตราการเคลื่อนตัวและความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ามุมการไหลของชั้นหินปิดทับไม่ขึ้นกับความกว้างและความลึกของช่องเหมือง

ผลการตรวจวัดปริมาตรของร่องการทรุดตัวพบว่ามีค่าน้อยกว่าปริมาตรของช่องเหมืองเสมอ ซึ่งปริมาตรของร่องการทรุดตัวที่มากที่สุดพบในกรณีที่อัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของช่องเหมืองมีค่าเท่ากับ 5 และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 1 MPa ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 5 ของ

ปริมาตรช่องเหมือง โดยที่ปริมาตรของร่องการหลุดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อช่องเหมืองกว้างขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ชั้นหินปิดทับมีค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นน้อย

สำหรับทุกกรณีพบว่า ค่ามุมการไหลที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าสูงกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 ในขณะที่การหลุดตัวสูงสุดและอัตราส่วนปริมาตรของร่องการหลุดตัวต่อปริมาตรของช่องเหมืองที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าน้อยกว่าแบบจำลองเชิงกายภาพประมาณร้อยละ 5 และ 7 ซึ่งความแตกต่างระหว่างผลการจำลองทั้งสองวิธีนี้เป็นผลเนื่องมาจากขนาดและจำนวนของโครงข่ายที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งโครงข่ายที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมากจะให้ค่าการประเมินองค์ประกอบของการหลุดตัวได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองเชิงกายภาพ

### 8.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) การวิจัยในอนาคตควรมีการผันแปรรูปร่างของช่องเหมืองในรูปแบบต่างๆ ทั้งในด้านความกว้าง ความสูง ความยาว และความลึกของช่องเหมือง และเพิ่มชนิดของวัสดุที่ใช้ในการจำลองชั้นหินปิดทับให้มีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่มีความหลากหลาย
- 2) ควรมีการจำลองการหลุดตัวโดยพิจารณาถึงผลกระทบของแรงในแนวระนาบที่กระทำต่อชั้นหิน
- 3) ควรมีการศึกษาลักษณะการหลุดตัวที่มีลักษณะของชั้นหินเป็นชั้นๆ เพื่อให้การศึกษามีความใกล้เคียงกับชั้นหินในสภาวะจริงมากที่สุด

## บรรณานุกรม

- Alejano L. R., Ram6rez-Oyanguren P. and Taboada J. (1999). FDM predictive methodology for subsidence due to at and inclined coal seam mining. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 36: 475-491.
- Anon (1958). **The Movements of the Rock Masses and the Surface in the Main Coalfields of the Soviet Union**. General Institute of Mine Surveying, Ugletekhizdat, Moscow, 250 pp.
- 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. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**. 105(11): 15-20.
- ASTM D695-10 (2010). **Standard test method for compressive properties of rigid plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Cherny, G.J. (1966). Determination of surface subsidence and deformation by rock movements in the form of rheologic flow. **Izvestia VUZ Gorny Journal**. 9(7): 3-9.
- Crosby, K.S. (2007). Integration of rock mechanics and geology when designing the Udon South sylvinitic mine. In **Proceedings of the 1th Thailand Symposium on Rock Mechanics** (pp. 3-22).
- Elashiry, A.A., Gomaa, W.A. and Imbaby, S.S. (2008). Surface subsidence prediction over working longwall panel at abu-tartur phosphate mines. **Journal of Engineering Sciences**. 36(3): 749-758.
- Fuenkajorn, K. and Archeeploha, S. (2009). Prediction of cavern configurations from subsidence data. **Engineering Geology**. 110: 21-29.
- Hoffman, H. (1964). The Effects of Direction of Working and Rate of Advance on the Scale-Deformation of a Self-Loaded Stratified Model of a Large Body of Ground. In **Proceedings of the International Conference on Strata Control**. (pp. 397-411). New York, NY.

- Hood, M., Ewy, R.T., and Riddle, L.R. (1981). Empirical Methods of Subsidence Prediction- A case study. In **Proceedings of the Workshop on Surface subsidence Due to Underground Mining**. (pp. 100-123). West virginia University, Morgantown, WV.
- Itasca (1992). **User Manual for FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua**. Version 4.0, Minneapolis, Minnesota.
- Iwanec, A.M., Carter, J.P. and Hambleton, J.P. (2016). Geomechanics of subsidence above single and multi-seam coal mining. **International Journal of Rock Geotechnical Engineering**. 1-10.
- King, H.J. and Whetton, J.T. (1957). Mechanics of Mine Subsidence. In **Proceedings of the European Congress on Ground Movement**. (pp. 27–38). University of Leeds, Leeds, UK.
- Knothe, S. (1957). Observations of Surface Movements Under Influence of Mining and Their Theoretical Interpretation. In **Proceedings of the European Congress on Ground Movement**. (pp. 210–218). University of Leeds, Leeds, UK.
- Litwiniszyn, J. (1957). The Theories and Model Research on Movements of Ground Masses. In **Proceedings European Congress on Ground Movements**. (pp. 202–209). University of Leeds, Leeds, UK.
- Marr, J.E. (1958). A New Approach to the Estimation of Mining Subsidence. **Transactions, Institution of Mining Engineers**, Vol. 118, pp. 692–706.
- Martos, F. (1958). Concerning An Approximate Equation of the Subsidence Trough and Its Time Factor. In **Proceedings of the International Strata Control Congress**. (pp. 191–205). Leipzig, Germany.
- Mohammed Y. F., Kais T. S., and Nahla M. S. (2013). Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground. **Acta Geotechnica**. 8: 167–179.
- Peck, R.B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. In **Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art volume** (pp. 225-290). Mexico.
- Peng, S.S. (1978). **Coal Mine Ground Control**. Wiley, New York, 456 pp.
- Rankin, W. (1988). Ground movements resulting from urban tunneling. In **Proceedings of the 23rd Conference of the Engineering Group of the Geological Society** (pp. 79-92). London Geological Society.

- 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 **Proceedings of the 2009 Coal Operators' Conference** (pp. 130-139). University of Wollongong, NSW.
- 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. and Fuenkajorn, K. (2013). Physical model simulations of surface subsidence induced by underground openings. In **Proceedings of the Fourth Thailand Symposium on Rock Mechanics**. Nakhon Ratchasima.
- 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.
- Wardell, K. (1965). **Surface Ground Movements Associated With the Total and Partial Extraction of Stratified Mineral Deposits**. MSc thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- Wardell, K. and Webster, N.E. (1957). Some Surface Observations and Their Relationship to Movement Underground. In **Proceedings of the European Congress on Ground Movements**. (pp. 141-148). Leeds, England.
- Wendai, L. (2000). **Regression Analysis, Linear Regression and Profit Regression, In 13 Chapters; SPSS for Windows: Statistical Analysis**. Publishing House of Electronics Industry, Beijing.
- Wetchasat, K. (2002). **Assessment of mechanical performance of rock salt formations for nuclear waste repository in northeastern Thailand**. MS thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Yao, X.L., Reddish, D.J. and Whittaker, B.N. (1991). Influence of overburden mass behavioural properties on subsidence limit characteristics. **Mining Science and Technology**. 13: 167-173.



Yavuz, H. and Fowell, R.J. (2013). Factors governing the strength and elastic properties of a physical model material used for strata mechanics investigations. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**. 63-71.



## ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดโช เผือกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี ในปี พ.ศ. 2552 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยวิจัยกลศาสตร์-ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทั้งงานที่เกี่ยวข้องกับเหมืองบนผิวดินและเหมืองใต้ดิน อีกทั้งมีความสนใจในการการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการอุดช่องเหมืองและงานในการבודอัดเพื่องานทางด้านวิศวกรรมธรณี มีสิ่งตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 20 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร และบทความการประชุมระดับชาติและนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “ธรณีเทคนิค (Geotechniques)” ที่ใช้ในการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี

