

รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-37

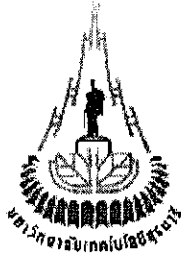
รายงานการวิจัย

การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อใช้คำนวณขนาด รูปร่าง
และความลึกของโพรงเกลือ โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวบนผิวดิน

**Development of Computer Program to Determine Size, Shape
and Depth of Salt Caverns Using Surface Subsidence and Data Input**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-51-24-37

รายงานการวิจัย

การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อใช้คำนวณขนาด รูปร่าง
และความลึกของโพรงเกลือ โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวของพื้นดิน

Development of Computer Program to Determine Size, Shape
and Depth of Salt Caverns Using Surface Subsidence and Data Input

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เพ็องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 และ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2552

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2551 และ 2552 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากนางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

สิงหาคม 2552

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ขึ้นมาชุดหนึ่ง โดยใช้สมการควบคุมแบบไฮเปอร์โบลิกในการวิเคราะห์ข้อมูลสำรวจผิวดินเชิงสถิติเพื่อคาดคะเนตำแหน่ง ความลึก และขนาดของโพรงที่ถูกละลายบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับ ซึ่งวิธีนี้สามารถกำหนดตำแหน่งของโพรง ค่าทรุดตัวสูงสุดของผิวดิน ค่าความเอียงสูงสุด และค่าความโค้งสูงสุดภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตและที่จุดวิกฤตของการทรุดตัว โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์นี้จะให้ค่าองค์ประกอบการทรุดตัวและลักษณะการทรุดตัวที่สามารถใช้เป็นตัวแทนภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต และที่จุดวิกฤต การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับขนาดและความลึกของโพรง โดยมีการผันแปรความแข็งและความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับเข้ามาพิจารณาด้วย ผลที่ได้คือชุดของสมการความสัมพันธ์ที่เชื่อมระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับคุณลักษณะของโพรง และคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ การศึกษาภายใต้สภาวะที่เกินกว่าจุดวิกฤตได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (โปรแกรม UDEC) เพื่อแสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนของการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับและการเกิดหลุมยุบเป็นผลมาจากความซับซ้อนของการเปลี่ยนรูปร่างของหินหลังจากเกิดการแตกและการเคลื่อนตัวของรอยแตกที่มีอยู่ก่อนในชั้นหินปิดทับ ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับและรูปทรงเรขาคณิตของโพรงจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีคุณสมบัติภายในขอบเขตของงานวิจัยนี้ อาทิ โพรงมีรูปร่างครึ่งรูปไข่ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นหินปิดทับและชั้นเกลือ ชั้นหินอยู่ในแนวระนาบ ผิวดินมีความเรียบสม่ำเสมอ และชั้นหินปิดทับอิมตัวด้วยน้ำเกลือ ผลจากงานวิจัยอาจไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีที่การทรุดตัวเกิดจากลักษณะของชั้นหินและรูปร่างของโพรงที่ต่างไปจากงานวิจัยนี้ วิธีที่เสนอนี้จะไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ภายใต้สภาวะเกินกว่าจุดวิกฤต ที่ซึ่งพฤติกรรมหลังการพังทลายของชั้นหินปิดทับไม่สามารถคาดคะเนได้และมีความซับซ้อนด้วยระบบของรอยแตกที่มีอยู่ก่อน ดังแสดงให้เห็นจากผลของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อย่างไรก็ตามวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำมาใช้ในการหารูปร่างของโพรง และองค์ประกอบของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการสูบน้ำเกลือ เพื่อให้สามารถดำเนินการแก้ไขได้ทันที่และลดผลกระทบที่เกิดจากโพรงใต้ดินก่อนที่จะเกิดการทรุดตัวอย่างรุนแรงหรือเกิดหลุมยุบบนผิวดิน

Abstract

An analytical method has been developed to predict the location, depth and size of caverns created at the interface between salt and overlying formations. A governing hyperbolic equation is used in a statistical analysis of the ground survey data to determine the cavern location, maximum subsidence, maximum surface slope and surface curvature under the sub-critical and critical conditions. A computer program is developed to perform the regression and produce a set of subsidence components and a representative profile of the surface subsidence under sub-critical and critical conditions. Finite difference analyses using FLAC code correlate the subsidence components with the cavern size and depth under a variety of strengths and deformation moduli of the overburden. Set of empirical equations correlates these subsidence components with the cavern configurations and overburden properties. For the super-critical condition a discrete element method (using UDEC code) is used to demonstrate the uncertainties of the ground movement and sinkhole development resulting from the complexity of the post-failure deformation and joint movements in the overburden. The correlations of the subsidence components with the overburden mechanical properties and cavern geometry are applicable to the range of site conditions specifically imposed here (e.g., half oval-shaped cavern created at the overburden-salt interface, horizontal rock units, flat ground surface, and saturated condition). These relations may not be applicable to subsidence induced under different rock characteristics or different configurations of the caverns. The proposed method is not applicable under super-critical conditions where post-failure behavior of the overburden rock mass is not only unpredictable but also complicated by the system of joints, as demonstrated by the results of the discrete element analyses. The proposed method is useful as a predictive tool to identify the configurations of a solution cavern and the corresponding subsidence components induced by the brine pumping practices. Subsequently, remedial measure can be implemented to minimize the impact from the cavern development before severe subsidence or sinkhole occurs.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	3
1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	9
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	11
2.1.1 โครงสร้างและลักษณะธรณีวิทยาของชั้นเกลือหิน.....	11
2.1.2 อุทกธรณีวิทยา.....	16
2.1.3 ข้อมูลหลุมเจาะและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.....	18
2.2 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน.....	21
2.2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน.....	21
2.2.2 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	25
2.2.3 การคำนวณการทรุดตัวด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID.....	27
2.3 การเกิดแผ่นดินทรุดเนื่องจากโพรงธรรมชาติ.....	27
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	33
3.1 วัตถุประสงค์.....	33
3.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง.....	33
3.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	35
บทที่ 4 การคำนวณด้วย Profile Function.....	43
4.1 วัตถุประสงค์.....	43
4.2 การคำนวณด้วย Profile Function.....	43
บทที่ 5 การคำนวณด้วย SALT-SUBSID.....	51
5.1 วัตถุประสงค์.....	51
5.2 การคำนวณ SALT-SUBSID.....	51
5.3 ผลการคำนวณ SALT-SUBSID.....	52
บทที่ 6 การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรม.....	55
6.1 วัตถุประสงค์.....	55
6.2 การวิเคราะห์เชิงสถิติของข้อมูลการสำรวจในภาคสนาม.....	55
6.3 การพัฒนาสมการควบคุม.....	55
บทที่ 7 การสร้างสมการคณิตศาสตร์.....	59
7.1 วัตถุประสงค์.....	59
7.2 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์.....	59
7.3 ตัวอย่างการคำนวณ.....	68
7.4 การสำรวจในภาคสนาม.....	68
บทที่ 8 สถานะการทรุดตัวเกินกว่าจุดวิกฤต.....	73
8.1 วัตถุประสงค์.....	73
8.2 สถานะการทรุดตัวที่เกินกว่าจุดวิกฤต.....	73
8.3 การคำนวณด้วย Discrete element method.....	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 9 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	81
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก ก SOURCE CODE.....	ก-1
ประวัตินักวิจัย.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินและหินชั้นหินปิดทับ.....	26
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (FLAC) โดยแต่ละแบบจำลอง จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปรตั้งแต่ 20, 40, 60 ถึง 80 MPa และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ผันแปรตั้งแต่ 20°, 40°, และ 60°.....	36
7.1	ตัวอย่างข้อมูลการสำรวจพืดดินที่ตรวจวัดในภาคสนามในพื้นที่ที่มีการทรุดตัว.....	69

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	รูปแบบต่าง ๆ ของโพรงที่ใช้ในการศึกษาด้วยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข..... 5
1.2	การจัดรูปแบบความสัมพันธ์ของการทรุดตัวที่ตรวจวัดได้จริงในภาคสนาม (หรือข้อมูลที่ถูกป้อนให้กับ โปรแกรม) ให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ (แบบ Profile Function) 7
2.1	แอ่งสกลนครและแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 13
2.2	ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 17
2.3	แสดงตำแหน่งของชื่อทางภูมิศาสตร์ที่สำคัญ และตำแหน่งเส้นสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของชั้นหิน 19
2.4	ภาพตัดขวางแสดงชั้นเกลือหินบางส่วนในแอ่งโคราช 22
2.5	ภาพตัดชั้นเกลือหินจากผลการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะเทือนบริเวณหลุมเจาะสำรวจ K-66 อ.บอระเพ็ด จ.มหาสารคาม 22
2.6	ลักษณะทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงและธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน 24
2.7	พื้นที่สูบน้ำเกลือในแอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร 30
3.1	ตัวอย่างของ finite difference mesh ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 โดยจะวิเคราะห์แบบสมมาตรในแนวแกน ซึ่งตัวอย่างนี้มีความสูงของโพรงเกลือ 5 เมตร ความลึกของโพรงเกลือ 60 เมตร ความกว้างของโพรงเกลือ 60 เมตร รัศมีของขอบเขตการทรุดตัว 172 เมตร โดยกำหนดให้ชั้นหินปิดทับมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 40 MPa และค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20° 34
3.2	ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 40 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร 37
3.3	ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 50 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร 38
3.4	ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 60 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร 39
3.5	ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 70 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร 40

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (Smax) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 80 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร.....	41
4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 20 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร.....	45
4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 40 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร.....	46
4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 60 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร.....	47
4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 20 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 60 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร.....	48
4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 40 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 60 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร.....	49
4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 60 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 60 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร.....	50

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	ภาพแสดงเส้นชั้นความสูงที่คำนวณได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID ที่มีความลึกของ หลังคาโพรง 40 m และความสูงของโพรง 5 m..... 53
5.2	ภาพแสดงเส้นชั้นความสูงที่คำนวณได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID ที่มีความลึกของ หลังคาโพรง 60 m และความสูงของโพรง 5 m..... 53
5.3	ภาพแสดงเส้นชั้นความสูงที่คำนวณได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID ที่มีความลึกของ หลังคาโพรง 80 m และความสูงของโพรง 5 m..... 54
6.1	ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยนี้..... 56
6.2	การ Regression analysis ของข้อมูลการสำรวจพื้นที่การทรุดตัว (รูปบน) ซึ่งถูกแทน ด้วย profile hyperbolic function (รูปล่าง) โดยที่มาตราส่วนในแกนตั้งมีขนาดมากเกินไป จริง..... 56
7.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัวต่อความกว้าง ของโพรงเกลือที่จุดวิกฤต (G/w_{cr}) กับค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี $A_0, B_0, \alpha_{A0}, \beta_{A0}, \alpha_{B0}$ และ β_{B0} เป็นค่าคงที่ 60
7.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความลึกของโพรงต่อความกว้างของโพรงเกลือ ที่จุดวิกฤต (d/w_{cr}) กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปรค่ามุมเสียดทาน (ϕ) โดยมี $A_1, B_1, \alpha_{A1}, \beta_{A1}, \alpha_{B1}$ และ β_{B1} เป็นค่าคงที่..... 62
7.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโพรงต่อค่า การทรุดตัวสูงสุดที่จุดวิกฤต ($R_s/S_{max, cr}$) กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปร ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) โดยมี $A_2, B_2, \alpha_{A2}, \beta_{A2}, \alpha_{B2}$ และ β_{B2} เป็นค่าคงที่..... 63
7.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบเขตการทรุดตัว ต่อความกว้างของโพรงเกลือที่จุดวิกฤต (B/w_{cr}) กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปร ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) โดยมี $A_3, B_3, \alpha_{A3}, \beta_{A3}, \alpha_{B3}$ และ β_{B3} เป็นค่าคงที่..... 64
7.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัวต่อความกว้าง ของโพรงเกลือ (G/w) กับค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น มวลหิน (E_m) โดยมี $A_4, B_4, \alpha_{A4}, \beta_{A4}, \alpha_{B4}$ และ β_{B4} เป็นค่าคงที่..... 65

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความลึกของโพรงต่อความกว้างของโพรงเกลือ (d/w) กับค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัว (G) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี $A_5, B_5, \alpha_{A5}, \beta_{A5}, \alpha_{B5}$ และ β_{B5} เป็นค่าคงที่.....	66
7.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโพรงต่อความกว้างของโพรงเกลือ (R_s/w) กับค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี $A_6, B_6, \alpha_{A6}, \beta_{A6}, \alpha_{B6}$ และ β_{B6} เป็นค่าคงที่.....	67
8.1	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรค่ามุมเสียดทานของรอยแตกที่ 20 องศา (บน) 30 องศา (กลาง) และ 40 องศา (ล่าง) ความสูงของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงคงที่เท่ากับ 100 เมตร.....	75
8.2	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรทิศทางการวางตัวของรอยแตกที่ 45 องศา (บน) 30 องศา (กลาง) และ 15 องศา (ล่าง) ความสูงของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงคงที่เท่ากับ 100 เมตร.....	76
8.3	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่ 50 เมตร (บน) 75 เมตร (กลาง) และ 100 เมตร (ล่าง) ความสูงของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และมีทิศทางการวางตัวของรอยแตกคงที่เท่ากับ 45 องศา.....	78
8.4	ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรความสูงของโพรงที่ 10 เมตร (บน) 20 เมตร (กลาง) และ 30 เมตร (ล่าง) เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 100 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และมีทิศทางการวางตัวของรอยแตกคงที่เท่ากับ 45 องศา.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัญหาแผ่นดินทรุดหรือการเกิดหลุมยุบมักจะเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นและได้ยืงกับบ่อยครั้ง จากสื่อทางโทรทัศน์ วิทยุ และหนังสือพิมพ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้คน สัตว์เลี้ยง ที่อยู่อาศัย รวมทั้ง พื้นที่การเกษตร แผ่นดินทรุดเกิดจากการที่น้ำใต้ดินกัดกร่อนหรือละลายเอาหินบางส่วนออกไปจนทำให้เกิดเป็นโพรงใต้ดินขึ้น และเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน กล่าวคือ มีการลดระดับของน้ำใต้ดินจนทำให้ชั้นหินหรือดินด้านบนโพรงรองรับน้ำหนักของตัวเองไม่ได้ ท้ายที่สุดทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องของผิวดิน การทรุดตัวของผิวดินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเกิดจากการที่น้ำใต้ดินละลายเกลือบริเวณผิวดินของชั้นเกลือออกไปจนทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นหินที่ปิดทับ หรืออาจจะเกิดจากการทำอุตสาหกรรมเกลือแบบดั้งเดิม โดยผู้ผลิตฉีดน้ำจืดไปละลายเกลือบริเวณผิวดินของชั้นเกลือแล้วสูบน้ำเกลือขึ้นมา วิธีนี้จะส่งผลทำให้เกิดโพรงใต้ดินและทำให้เกิดแผ่นดินทรุดตามมา

ปัญหาหลุมยุบสามารถแก้ไขได้โดยการสำรวจหาตำแหน่งของโพรงใต้ดินแล้วทำการอุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัวเกิดขึ้น การสำรวจหาตำแหน่งของโพรงกระทำได้โดยอาศัยการสำรวจด้วยการหยั่งธรณีฟิสิกส์ วิธีดังกล่าวทำให้ทราบถึงความลึกและรูปร่างของโพรงได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเช่นนี้ต้องอาศัยการสำรวจแบบสุ่มและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าเกี่ยวกับตำแหน่งของโพรงได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสำรวจหาตำแหน่งของโพรง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาโปรแกรมสำหรับช่วยนักสำรวจในการระบุตำแหน่งของโพรงเบื้องต้นก่อนที่จะมีการสำรวจอย่างละเอียดด้วยวิธีการหยั่งธรณีฟิสิกส์

โปรแกรมที่จะพัฒนาขึ้นมานี้ต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยา โครงสร้างและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินในแต่ละชั้นมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัว ตำแหน่งและรูปร่างของโพรงใต้ดิน นอกจากนี้ยังต้องอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการทรุดตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่มีผลจากการทรุดตัวด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1) เพื่อประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหา รูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงละลายที่อยู่ในชั้นเกลือหรือในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือกับชั้นหินปิดทับ โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวในแนวตั้งของผิวดินที่วัดได้ในภาคสนามเป็นค่า Input

2) เพื่อประเมินความเสี่ยงภัยและอัตราการทรุดตัวรวมไปถึงขอบเขตของพื้นที่ที่คาดว่า จะมีการทรุดตัวในบริเวณที่มีโพรงดังกล่าวอยู่ซึ่งสามารถส่งผลไปสู่การป้องกันและแก้ไขได้ระยะยาว

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1) ศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ ประเทศไทย เพื่อทราบถึงลักษณะของการวางตัวและลำดับของชั้นหินในพื้นที่ดังกล่าว และทราบถึง คุณสมบัติของหินในแต่ละชั้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะนำไปประเมินการทรุดตัวของผิวดินในแต่ละพื้นที่

2) อาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เชิงเวลาเพื่อช่วยในการคำนวณรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงจากข้อมูลการทรุดตัว มีการนำโปรแกรม FLAC (version 4.0) มาใช้เพื่อประเมิน การทรุดตัวเนื่องจากการเกิดโพรงแบบต่าง ๆ และลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน ในแต่ละ พื้นที่

3) โพรงจะถูกสมมติให้เป็นรูปครึ่งทรงกลมหรือครึ่งทรงรีที่วางนอนอยู่หรือตั้งอยู่ โดย มีอัตราส่วนของแกนหลักและแกนรองของทรงรีหันแปรตั้งแต่ 1 ถึง 10 (โพรงจะมีลักษณะคล้ายกับ แผ่นแบน)

4) ลักษณะการเกิดแผ่นดินทรุดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินที่มีพฤติกรรมขึ้นกับเวลา (Time dependent) เท่านั้น ซึ่งจะไม่ครอบคลุมกรณีการทรุดตัวอย่างฉับพลัน เช่น การเกิดหลุมยุบเนื่องจากแผ่นดินไหว

5) จัดอบรมแก่นักศึกษาในองค์กรของรัฐบาลหรือประชาชนที่เป็นกลุ่มเป้าหมายและนำ เทคโนโลยีนี้เผยแพร่แก่นักวิชาการที่เกี่ยวข้อง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด

การศึกษาการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากโพรงใต้ดินส่วนใหญ่จะเริ่มมาจากการที่ทราบ ถึง ขนาด รูปร่าง และความลึกของโพรงที่อยู่ใต้ดินและคุณสมบัติของชั้นหินใกล้ผิวดินแล้วจึงนำ ข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณ ขนาดและการแพร่กระจายของการทรุดตัวของผิวดินซึ่งอาจดำเนินการได้ หลายวิธี เช่น การใช้สมการสำเร็จรูป (คำนวณด้วย Profile function) ดังนั้นการศึกษาเช่นนี้จึง จำเป็นต้องทราบถึงตำแหน่งและลักษณะของโพรงที่เกิดขึ้นในเบื้องต้นซึ่งวิธีนี้อาจจะสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ได้ดีสำหรับโพรงที่ออกแบบไว้ในเชิงวิศวกรรมโดยที่ตำแหน่ง รูปร่าง ขนาด และความลึก ได้ถูกกำหนดไว้ก่อนและเป็นข้อมูลที่แน่นอน

อย่างไรก็ตามสำหรับโพรงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น โพรงละลายในชั้นเกลือที่เกิดจากการไหลเวียนของชั้นน้ำบาดาลหรือโพรงละลายที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลในชั้นหินที่วางอยู่ บนชั้นเกลือ โพรงเหล่านี้อาจมีขนาดใหญ่ซึ่งขึ้นกับปริมาณการสูบน้ำเกลือ (ในอุตสาหกรรมเกลือ)

และอาจส่งผลเสียหายต่อพื้นที่เกษตรกรรม หุมชน และโครงสร้างทางวิศวกรรมอื่นๆ โพรงเหล่านี้เราจะไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนอีกทั้งขนาด รูปร่าง และความลึกก็ไม่สามารถประเมินได้ นอกจากจะต้องสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ซึ่งจะมีราคาสูง ใช้เวลานาน และดำเนินการได้ในพื้นที่แคบในแต่ละครั้ง อีกทั้งสูตรสำเร็จและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวข้างต้นก็ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้

กรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้คือ การคำนวณย้อนกลับโดยนำข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินในแนวตั้งซึ่งสามารถวัดได้จริงในพื้นที่ที่คาดว่าจะมีการทรุดตัวเกิดขึ้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกวัดในหลายจุดและมีการอ้างอิงถึงพิกัดที่แน่นอน จากนั้นจะใช้ข้อมูลเหล่านี้ร่วมกับคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับเพื่อคำนวณขนาด รูปร่าง ความลึก และตำแหน่งของโพรงที่เกิดขึ้นอยู่ใต้ดิน (โพรงเหล่านี้ อาจจะมีน้ำเกลือแทรกอยู่) เนื่องจากมีตัวแปรและค่าคงที่มากมายเข้ามาเกี่ยวข้องการคำนวณดังกล่าวจึงไม่สามารถทำได้ด้วยสูตรสำเร็จจำเป็นต้องมีการพัฒนาโปรแกรมเข้ามาช่วย อีกทั้งยังต้องมีการแปลงข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่เป็นไปได้ซึ่งอาจจะต้องอาศัยสมการที่มีตัวแปร 3-5 ตัว เป็นต้น การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์หรือมีปัจจัยที่ขึ้นกับรูปร่างของโพรงและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง ดังนั้นการที่โพรงมีรูปร่างและลักษณะธรณีวิทยาต่างกันจะส่งผลให้ลักษณะการทรุดตัวในแนวตั้งและลักษณะของผิวดินแตกต่างกันไปด้วย ประโยชน์ของโปรแกรมที่จะพัฒนาขึ้นจะช่วยให้การสำรวจธรณีฟิสิกส์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น กล่าวคือสามารถเจาะจงการสำรวจในพื้นที่ได้อย่างถูกต้องและสามารถออกแบบความลึกของการสำรวจได้อย่างแม่นยำซึ่งส่งผลให้ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย และพลังงานในการศึกษาสำรวจโพรงละลายที่อยู่ใกล้ผิวดิน

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแผ่นดินทรุดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ธรณีวิทยาหินเกี่ยวกับความหนาและความลึกและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหิน รวมทั้งสมการที่ใช้ในการประเมินลักษณะของพื้นผิวในบริเวณที่เกิดแผ่นดินทรุด (การทรุดตัวสูงสุด การบิดโค้งของผิวดิน) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัย โดยชื่อของสิ่งพิมพ์เหล่านี้จะนำมาแสดงอย่างละเอียดในรายงานขั้นสุดท้าย ซึ่งจะเขียนในรูปของ Bibliography

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาคุณสมบัติของชั้นหินที่อยู่เหนือโพรงเกลือ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในขั้นตอนนี้ คือ เพื่อกำหนดคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และความหนาของชั้นหินที่วางอยู่เหนือโพรงเกลือซึ่งคุณสมบัติและความลึกเหล่านี้อาจมิได้มาจากมายขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่ข้อมูลที่ได้จะสามารถกำหนดช่วงแปรผันของคุณสมบัติและความลึกในพื้นที่ต่าง ๆ กัน โดยเฉพาะในบริเวณที่มีอุตสาหกรรมนาเกลือ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณและการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิจัยมีความสอดคล้องกับสถานะจริงในภาคสนาม

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินการทรุดตัว

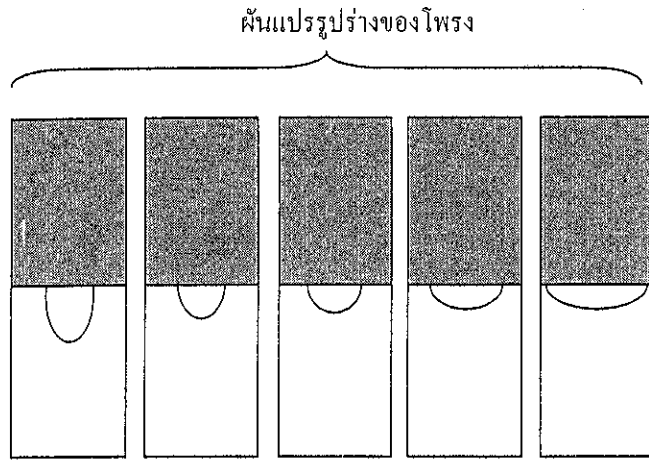
แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะนำมาใช้คำนวณหาปริมาณการทรุดตัวของผิวดินเนื่องจากผลกระทบของโพรงธรรมชาติที่อยู่ระหว่างรอยต่อของชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับ การคำนวณจะใช้โปรแกรม FLAC ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite difference analysis และสามารถคำนวณความเค้นและความเครียดของมวลหินในสองมิติ และคาดคะเนพฤติกรรมของหินในอนาคต โปรแกรมนี้เขียนขึ้นมาจากโครงสร้างทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อจำลองคุณสมบัติของวัตถุแบบ Elasticity, Plasticity, Visco-elasticity, Visco-plasticity, Brittle และ Ductile ผลที่ได้จากการคำนวณฐานข้อมูลการทรุดตัวที่มีผลกระทบจากรูปร่างและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบุตำแหน่งโพรงในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 1.1 แสดงรูปแบบต่างๆ ของโพรงที่ใช้ในการศึกษาด้วยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณด้วย Profile function และกฎการทรุดตัว

ในขั้นตอนนี้จะมีการคำนวณด้วย Profile function มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวดินใน 2 มิติที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องกรอกเข้าไปในสมการประกอบด้วยการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรง (D) มุมที่วัดออกไปจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw, γ)

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณการทรุดตัวด้วย Salt-Subsid

ในขั้นตอนนี้จะศึกษาการแพร่กระจายตัวและขอบเขตของการเกิดแผ่นดินทรุด โดยใช้โปรแกรม Salt-Subsid เพื่อที่จะแสดงลักษณะของการทรุดตัวใน 3 มิติ (ปริมาณการทรุดตัวในแนวตั้งที่แสดงเป็นเส้นชั้นการทรุดตัว) การศึกษานี้จะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่



รูปที่ 1.1 รูปแบบต่าง ๆ ของโพรงที่ใช้ในการศึกษาด้วยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

ขึ้นกับเวลา (Surface subsidence vs. Time) ในการศึกษาขั้นตอนที่ 3 เพื่อนำมาสอบเทียบค่าคงที่ในโปรแกรม Salt-Subsid ได้แก่ α และ β ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลา ส่วนค่าคงที่อีกตัวหนึ่งได้แก่ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ซึ่งได้จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 3 เช่นเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 6 การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์

การสร้างสมการหาความสัมพันธ์เพื่อคำนวณขนาด รูปร่าง และความลึกของโพรงจาก Subsidence Profile และคุณสมบัติศาสตร์และความหนาของชั้นหินปิดทับ โดยมีข้อมูลการทรุดตัวในแนวตั้งบนผิวดินที่จุดต่าง ๆ ในบริเวณที่โพรงอยู่เป็น Data input ข้อมูลที่ได้จะถูกประมวลผลให้สามารถอธิบายได้ในสมการเชิงตัวเลข (รูปที่ 1.2) สมการนี้จะมีความสมบูรณ์ในเชิงค่าคงที่และตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดและจะเป็นสมการหลักเพื่อที่จะบ่งบอกขนาด รูปร่าง และความลึกของโพรง โดยมีปริมาณและตำแหน่งการทรุดตัวในแนวตั้งเป็นตัวแปร ซึ่งสมการที่พัฒนานี้จะมีความซับซ้อนและไม่สามารถนำมาใช้คำนวณได้ง่ายดังเช่นสูตรสำเร็จรูปจึงจำเป็นต้องพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมเข้ามาช่วยในการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 7 การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรม

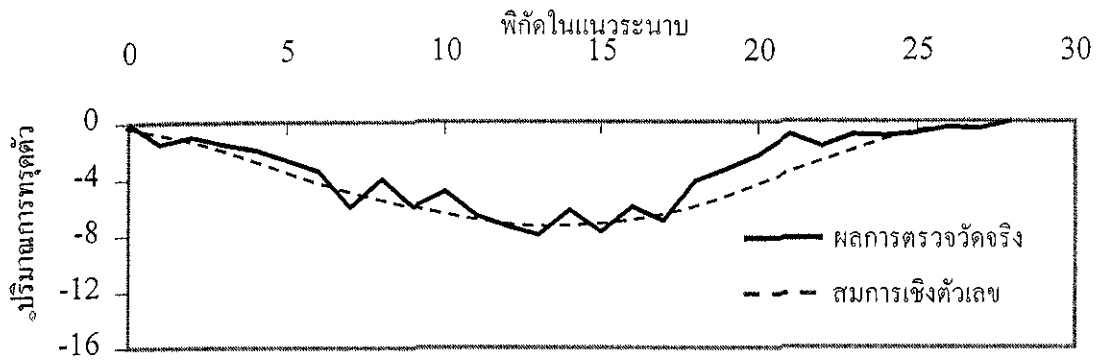
โปรแกรมที่ทำการพัฒนาจะเขียนอยู่ในรูปของภาษา C และ Microsoft Excel โดยจะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินในแต่ละชั้นมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัว ตำแหน่งและรูปร่างของโพรงใต้ดิน และอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการทรุดตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่มีผลจากการทรุดตัวด้วย

ขั้นตอนที่ 8 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ

ขั้นตอนที่ 9 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ คือ การจัดอบรมหลักสูตรระยะสั้นให้แก่บุคคลองค์กรของรัฐบาล ประชาชนที่เป็นกลุ่มเป้าหมาย หรือผู้ที่สนใจ และนำผลงานวิจัยชิ้นนี้ลงตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป



รูปที่ 1.2 การจัดรูปแบบความสัมพันธ์ของการทรุดตัวที่ตรวจวัดได้จริงในภาคสนาม (หรือข้อมูลที่ถูกป้อนให้กับ โปรแกรม) ให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ (แบบ Profile Function)

1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์มากมายกับงานด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1.6.1 แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

โปรแกรมที่จะถูกพัฒนาขึ้นนี้จะประโยชน์อย่างมากกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทางด้านภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น หน่วยงานบรรเทาสาธารณภัย กรมทรัพยากรธรณี กรมน้ำบาดาล รวมไปถึงกระทรวงคมนาคม กรมทางหลวง เป็นต้น ในการที่จะได้มาซึ่งข้อมูลการทรุดตัวและหาขนาด รูปร่าง และความลึกของโพรงเกลือเพื่อที่จะสามารถประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยหรือขอบเขตในการทรุดตัวได้โดยง่าย

1.6.2 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์ในการศึกษาการทรุดตัวของผิวดินและนำไปสู่การคำนวณหาขอบเขตของโพรงใต้ดินและมีความเข้าใจเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้น การศึกษาดังกล่าวได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์ดินเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่ง ขนาด และรูปร่างของโพรงใต้ดินเพื่อทำการอุดหรือแก้ไขและลดผลกระทบของแผ่นดินทรุด

1.6.3 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่ประชาชนเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเกิดและวิธีการป้องกันการเกิดหลุมยุบ และให้ความรู้แก่หน่วยงานหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง เช่น หน่วยงานบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรมทรัพยากรธรณี กรมน้ำบาดาล กระทรวงคมนาคม กรมทางหลวง และหน่วยงานอื่น ๆ รวมทั้งหน่วยงานท้องถิ่น เช่น อบต. และ อบจ. เป็นต้น

1.6.4 บริการความรู้แก่ภาครัฐกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาครัฐกิจ อาทิ อุตสาหกรรมนาเกลือที่ต้องสูบน้ำเกลือในชั้นหินปิดทับบนชั้นเกลือหินขึ้นมาใช้ทำเกลือและบริษัทผลิตเกลือต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ประกอบการพึงระวังผลกระทบจากการสูบน้ำเกลือขึ้นมาอันเป็นสาเหตุของการเกิดโพรงใต้ดินและเกิดแผ่นดินทรุด

1.6.5 นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

โปรแกรมที่จะถูกพัฒนาขึ้นจะนำไปสู่การจดลิขสิทธิ์และเผยแพร่ให้ประชาชนและหน่วยงานต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นเพื่อนำไปใช้เป็นประโยชน์และสามารถจำหน่ายแก่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศได้

1.6.6 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

ในปัจจุบันนี้การผลิตเกิดด้วยวิธีการสูบน้ำเกลือขึ้นมานั้นถ้าไม่คำนึงถึงผลกระทบจะส่งผลให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่จนเกิดการทรุดตัวของผิวดินขนาดใหญ่ได้ ซึ่งโปรแกรมที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมอบให้หน่วยงานหรือบริษัทต่าง ๆ เพื่อจะปรับเปลี่ยนวิธีและอัตราการสูบน้ำเกลือเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแผ่นดินทรุดในพื้นที่นาเกลือและพื้นที่ใกล้เคียง

1.6.7 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

เมื่อมีการให้ความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการหรือเอกชนแล้วจะส่งผลให้การแก้ไขปัญหาแผ่นดินทรุดเป็นไปอย่างทันท่วงทีและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงซึ่งสามารถส่งผลไปสู่การป้องกันและแก้ไขได้ในระยะยาว

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่ บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการทบทวนวรรณกรรมวิจัยในหัวข้อนี้คือ เพื่อค้นคว้า ศึกษา และสรุปบทความและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างทางธรณีวิทยาของที่ราบสูงโคราช (Khorat Plateau) การศึกษาและการสำรวจธรณีฟิสิกส์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการลำดับชั้นเกลือหินและหินข้างเคียงในเชิงการกระจายตัว ความหนา และความลึก รวมทั้งศึกษาคุณลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือหิน โดยใช้สิ่งตีพิมพ์ที่มีอยู่ในหน่วยงานต่างๆ เพื่อศึกษาพื้นที่ที่สัมพันธ์กับชั้นเกลือหินที่มีการทำอุตสาหกรรมเกลือและบริเวณที่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลเค็ม

2.1.1 โครงสร้างและลักษณะธรณีวิทยาของชั้นเกลือหิน

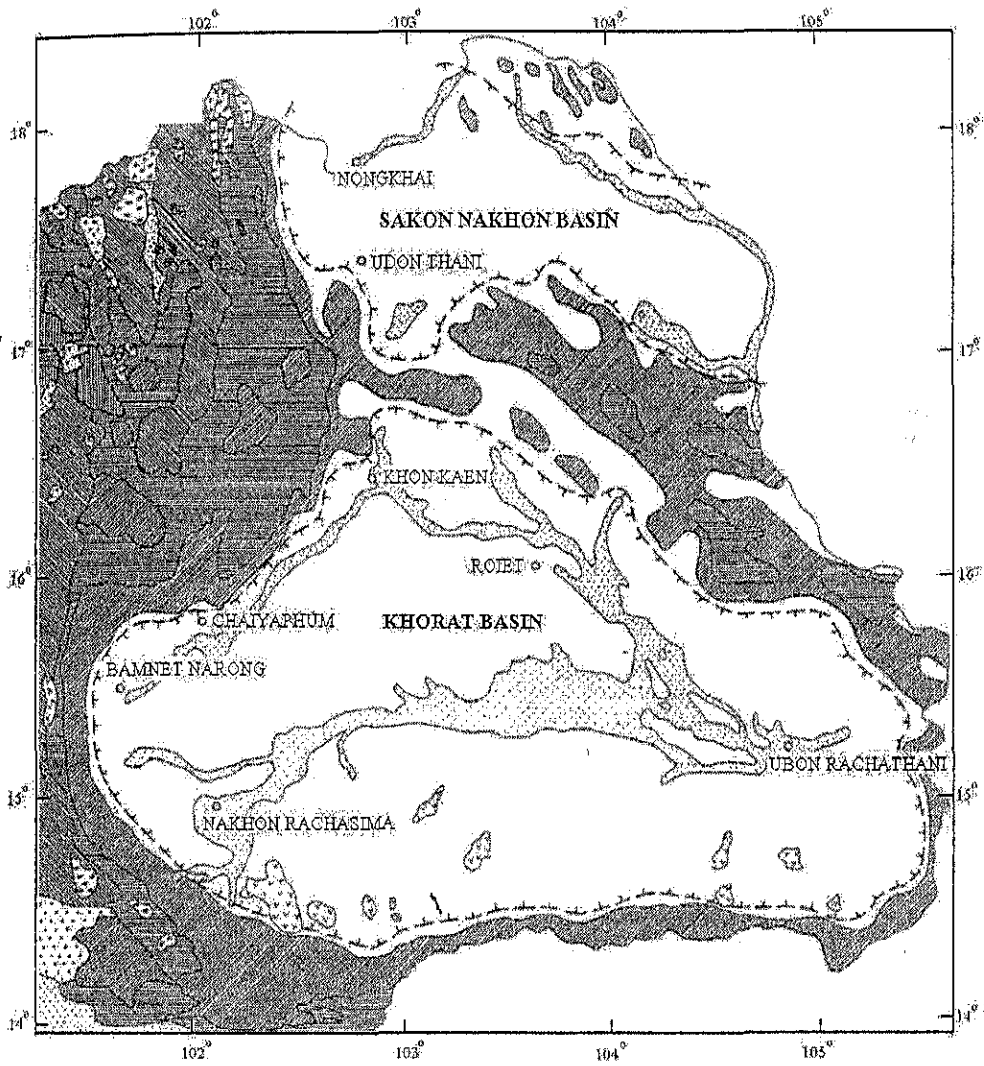
ที่ราบสูงโคราชมีพื้นที่ประมาณ 150,000 ตารางกิโลเมตร อยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 14 ถึง 19 องศาเหนือและเส้นแวงที่ 101 ถึง 106 องศาตะวันออก ทางทิศเหนือและทิศตะวันตกติดกับประเทศลาว ทางทิศใต้ติดประเทศกัมพูชา โครงสร้างทางธรณีวิทยาของที่ราบสูงโคราชมีรูปร่างเป็นแอ่ง (Structural Basin) เกิดจากการยกตัวในตอนเหนือและใต้ รวมทั้งการยกตัวของหินหน่วยภูพานในทิศตะวันออกเฉียงใต้เกิดเป็นโครงสร้างแอ่งสองแอ่งขึ้น แอ่งทั้งสองมีความลาดเอียงของชั้นหินประมาณ 20 องศา ไปทางกลางแอ่งที่มีความลึกเพิ่มขึ้น แอ่งสกนครอยู่ทางตอนเหนือ มีพื้นที่ประมาณ 17,000 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดหนองคาย อุดรธานี สกลนคร นครพนม มุกดาหาร และบางส่วนของประเทศลาว ส่วนแอ่งโคราชอยู่ทางตอนใต้มีพื้นที่ประมาณ 33,000 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น มหาสารคาม ร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ ยโสธร อุบลราชธานี และทางตอนเหนือของจังหวัดบุรีรัมย์ สุรินทร์และศรีสะเกษ (นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533; Wongsawat et al., 1992)

Sattayarak (1983) พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์ (2533) และ Sattayarak et al. (1998) ได้ทำการศึกษาการลำดับชุดหินในยุคมีโซโซอิก (Mesozoic) ในประเทศไทยพบว่าการตกทับถมของตะกอนยุคมีโซโซอิกในประเทศไทยมีการกระจายตัวอย่างกว้างขวางเกือบทุกภาคของประเทศ ที่พบได้ชัดเจน ได้แก่ชั้นตะกอนสีแดงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่าชุดหินโคราช (Khorat Group) ประกอบด้วยหมวดหินห้วยหินลาด หมวดหินน้ำพอง หมวดหินภูกระดึง หมวดหินพระวิหาร หมวดหินเสาขัว หมวดหินภูพาน และหมวดหินโคกกรวด สำหรับหมวดหินมหาสารคามซึ่งประกอบด้วย

เกลือหิน มีการตกทับถมของเกลือในทะเลระดับตื้น และมีการตกตะกอนของชั้นหินดินเหนียวในช่วงที่ทะเลเปิดเป็นการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลขึ้นและลง ชั้นตะกอนสีแดงเกิดทั้งจากการทับถมจากตะกอนบนพื้นทวีป (Non-marine deposits) การทับถมของตะกอนจากลมและน้ำ (Fluvio-Eolian deposits) การทับถมของตะกอนโดยลม (Eolian deposits) และตะกอนสีแดงอายุอ่อน (Younger redbeds) โดยหลังจากที่มีการเกิด Indosinian orogeny II แล้วจึงเกิดการตกทับถมของชุดหินโคราช จากนั้นเกิดการยกตัวขึ้นของรอยเลื่อนเลย-เพชรบูรณ์และทำให้เกิดการตกทับถมตัวของหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลทำให้เกิดชั้นสลับกับตะกอนดินเหนียว โดยหมวดหินนี้ประกอบไปด้วยเกลือชั้นล่าง (Lower Salt) ดินเหนียวชั้นล่าง (Lower Clay) เกลือชั้นกลาง (Middle Salt) ดินเหนียวชั้นกลาง (Middle Clay) และเกลือชั้นบน (Upper Salt) ซึ่งหลุมเจาะที่ทำการศึกษาจะพบชั้นแอนไฮไดรต์ (Anhydrite cap) อยู่ด้านบนเกือบทุกหลุม และมีหมวดหินภูทอก (Phutok Formation) ที่เกิดจากการตกทับถมตัวโดยลมและน้ำวางทับอยู่ด้านบนหมวดหินมหาสารคามอีกชั้นหนึ่ง (รูปที่ 2.1)

บริเวณที่ราบสูงโคราชสามารถอธิบายลักษณะของหมวดหินในชุดหินโคราช หมวดหินมหาสารคาม และหมวดหินภูทอก โดยเรียงลำดับจากอายุแก่ที่สุดถึงอายุอ่อนที่สุดได้ดังนี้

- 1) หมวดหินน้ำพอง ประกอบด้วยหินทรายและหินกรวดมนสีน้ำตาลแกมแดง ช่วงบนและล่างมีหินโคลนสลับกับหินทรายแข็ง ช่วงอายุตอนต้น Jurassic
- 2) หมวดหินภูกระดึง ประกอบด้วยหินโคลนและหินทรายแข็งสีน้ำตาลแกมแดง ช่วงอายุตอนต้น Jurassic
- 3) หมวดหินพระวิหาร ประกอบด้วยหินทรายสีขาว หินดินดานสีน้ำตาลแกมแดง และหินกรวดมน ช่วงอายุตอนกลาง Jurassic
- 4) หมวดหินเสาขัว ประกอบด้วยหินทราย หินทรายแข็ง หินโคลน และหินกรวดมนสีแดง ช่วงอายุตอนปลาย Jurassic
- 5) หมวดหินภูพาน ประกอบด้วยหินกรวดมนและหินทรายสีขาวและเทาอ่อน ช่วงอายุตอนต้น Cretaceous
- 6) หมวดหินโลกกรวด ประกอบด้วยหินทรายและหินโคลนสีน้ำตาลแกมแดง และหินกรวดมน ช่วงอายุตอนกลาง Cretaceous
- 7) หมวดหินมหาสารคาม ประกอบด้วยชั้นเกลือและชั้นตะกอนสลับกันสามกลุ่ม และมีแอนไฮไดรต์ปิดทับชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดของหมวดหินนี้ ช่วงอายุตอนปลาย Cretaceous
- 8) หมวดหินภูทอก ประกอบด้วยหินทรายสีอิฐและน้ำตาลแกมแดง หินทรายแข็งและหินโคลนสีอิฐและน้ำตาลแกมแดง ช่วงอายุตอนต้น Tertiary



Explanation

QUATERNARY	Aluvium	Basalt
CRETACEOUS	Sandstone, Shale Siltstone, Rock Salt	Andesite Rhyolite
JURASSIC	sandstone, Shale Conglomerate	Granite Granodiorite
JURASSIC TRIASSIC	Shale, Sandstone Conglomerate	Porphyry
TRIASSIC	Sandstone Siltstone, Conglomerate	Ultramafic
CARBONIFEROUS PERMIAN	Sandstone, Siltstone Shale, Limestone	Basin

0 20 40 60 80 100 km

รูปที่ 2.1 แอ่งสกลนครและแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์, 2533)

Yumuang (1983) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงจากชุดตะกอนสีแดงเป็นชั้นเกลือหินนั้นอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่พบความไม่ต่อเนื่องระหว่างหมวดหิน โลกกรวดกับหมวดหินมหาสารคาม ต่อมา Mouret et al. (1993, 1994) ได้ศึกษาทางด้านธรณีวิทยา ลักษณะการทับถมตามธรรมชาติ และลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของชุดหิน โคราชบริเวณเทือกเขาภูพาน พบว่าเป็นลักษณะของตะกอนที่เกิดจากแผ่นทวีปซึ่งต้องใช้เวลาอันยาวนานในการตกทับถมจนเป็นชั้นหิน โดยมีลักษณะการตกทับถม 2 แบบ คือ การทับถมจากธารประสานสาย (Braided deposits) และการทับถมจากที่ราบตะกอนน้ำพา (Alluvial plain deposits) สำหรับการตกตะกอนเนื่องจากการระเหยของน้ำเค็ม (Evaporite) และสิ่งทับถมที่เกิดจากทางน้ำพา (Younger fluvial) จะคล้ายคลึงกับการทับถมของตะกอนเนื่องจากลม จากการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอินโดจีนและยุคคาร์บอนิเฟอรัส โดยการทำแบบจำลองในช่วงตอนต้นของยุคซีโนโซอิก พบว่าลักษณะของเทือกเขาภูพานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับช่วงต้นของยุคซีโนโซอิก จากข้อมูลทางด้านคลื่นไหวสะเทือน และข้อมูลหลุมเจาะทำให้สามารถเข้าใจถึงกระบวนการก่อตัวของชุดหินโคราชในปัจจุบัน โดยจากการศึกษาพบว่า การที่ชุดหินโคราชมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเกิดจากการรวมกันของการเกิดแบบแรงดึงและแรงบีบอัดในส่วนที่เป็นรอยเลื่อนเหลิ้ม (Wrenching) มีลักษณะที่เกิดแรงดึงในยุคพาเลโอโซอิกตอนต้นและยุคไทรแอสซิกซึ่งกระจายตัวเป็นบริเวณกว้างและมีการวางตัวพุนทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ กระบวนการก่อเทือกเขาของอินโดจีนเนียนพบในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งเป็นผลจากบริเวณที่มีการชนกัน ในยุคมีโซโซอิกและช่วงซีโนโซอิกจะมีอัตราของการกร่อนสูงกว่าการยกตัวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่พบการก่อตัวเป็นเทือกเขามากนักในพื้นที่นี้

จากหลุมเจาะสำรวจโพแทชที่เจาะสำรวจโดยกรมทรัพยากรธรณีระหว่างปี พ.ศ. 2516-2526 จำนวน 194 หลุม (Japakasetr and Suwanich, 1982, 1983, 1984) ซึ่งได้เจาะสำรวจทะลุชั้นเกลือลงไปจนถึงหมวดหิน โลกกรวด สามารถเรียงลำดับชั้นจากหมวดหิน โลกกรวด ไปจนถึงชั้นบนสุดได้ดังนี้

- 1) หินทรายสีน้ำตาลแดง (Red bed sandstone) หรือหินทรายแป้งสีเขียวเทา (Greenish gray siltstone) เนื้อแน่น บางแห่งมีหินดินดานสีน้ำตาลปนแดงแทรกอยู่
- 2) แอนไฮไดรต์ชั้นล่าง (Basal anhydrite) มีสีขาวถึงเทาอมรับเกลือหินชั้นล่างก่อนถึงหมวดหิน โลกกรวด
- 3) เกลือหินชั้นล่าง (Lower Salt) เป็นชั้นเกลือที่หนาที่สุด สะอาดที่สุดและตอนล่างจะมีอินทรีย์วัตถุปนอยู่ บางพื้นที่เป็นชั้นหนามากกว่า 400 เมตร บางพื้นที่มีการก่อตัวเป็นโดมเกลือมีความหนาถึง 1,000 เมตร มีความหนาโดยเฉลี่ย 134 เมตร

- 4) โพแทช (Potash) ที่พบมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ คาร์เนลไลต์ (Carnallite-KCl·MgCl₂·6H₂O) ส่วนมากที่พบมีสีส้ม แดง และชมพู และซิลวิไนต์ (Sylvinite-KCl) จะพบเป็นส่วนน้อย มีสีขาวและส้มอ่อน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากคาร์เนลไลต์ พบใกล้กับบริเวณ โคมเกลือ และแทชซีไฮไดรต์ (Tachyhydrite-CaCl₂·2MgCl₂·12H₂O) มักเกิดและมีเนื้อผสมกับ คาร์เนลไลต์ มีสีส้ม ส้มเหลือง และสีเหลือง เกิดจากมีแร่เมกนีเซียมเกิดร่วมซึ่งละลายน้ำได้ง่าย
- 5) เกลือหินหลากสี (Rock salt) เป็นชั้นบาง ๆ มีสีแดง ส้ม น้ำตาล เทา และสีขาวใส มีความหนาโดยเฉลี่ย 3 เมตร
- 6) คลาสติกชั้นล่าง (Lower Clastic) เป็นดินเหนียวและหินโคลนสีน้ำตาลแดงค่อนข้างอ่อน มีสายแร่เกลือและสายแร่คาร์เนลไลต์ปน
- 7) เกลือชั้นกลาง (Middle Salt) เป็นเกลือสกปรก มีสีน้ำตาลอ่อนถึงสีควันดำ มีความหนามากกว่าเกลือชั้นบน ตอนล่างอาจมีแร่คาร์เนลไลต์หรือซิลไวต์ มีความหนาโดยเฉลี่ย 70 เมตร
- 8) คลาสติกชั้นกลาง (Middle Clastic) ดินเหนียวและหินโคลนสีน้ำตาลแดง ค่อนข้างอ่อน มียิปซัม (Gypsum) สีขาวแทรก
- 9) เกลือชั้นบน (Upper Salt) เป็นเกลือสกปรก มีตะกอนคาร์บอนปน สีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีควันดำ หรือสีส้มเมื่อปนดินเหนียว มีความหนา 3-65 เมตร
- 10) แอนไฮไดรต์ชั้นบน (Upper anhydrite) เป็นชั้นบาง ๆ สีขาวถึงสีเทา
- 11) ดินเหนียวและหินดินเหนียว (Clay and claystone) สีน้ำตาลแดง บางแห่งมีหินทรายแป้งและหินทรายสีน้ำตาลแดงเกิดร่วมอยู่ด้วย
- 12) ดินตะกอนชั้นบน เป็นดินเหนียวสีเทาแกมน้ำตาลปนดินร่วน ชั้นรองลงมาเป็นดินทรายและดินเหนียวปนดินทรายสีน้ำตาล สีชมพูและสีส้ม

Suwanich (1986) ทำการแปลข้อมูลหลุมเจาะเกลือหินและโพแทชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากลักษณะทางธรณีวิทยา ธรณีวิทยาโครงสร้าง และแร่วิทยา ในการจำแนกลักษณะของชั้นหินและเกลือหิน โดยทำภาพตัดขวางชั้นรายละเอียดจากหลุมเจาะจำนวน 115 หลุม จากหลุมเจาะที่มีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด 194 หลุม ในพื้นที่บ่อน้ำมันจระจก จักรราช บ้านทุ่ม ที่บ้านประด้า ขอนแก่น และพื้นที่นาเชือก พบว่าโครงสร้างของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครมีกลุ่มหินอีวาโพไรท์ (Evaporite) เช่น เกลือหิน และยิปซัม ซึ่งเกิดจากการยุบตัวในพื้นที่ด้านที่ติดกับทะเลในช่วงประมาณ Cretaceous และมีตะกอนสะสมจนถึงตอนกลางของยุค Cretaceous จากนั้นเกิดการสะสมตัวจากการระเหยของน้ำทะเล และในช่วงตอนปลายยุค Cretaceous จึงเกิดเป็นชั้นเกลือหินขึ้น ในช่วง

ยุค Tertiary เกิดการยกตัวสูงขึ้นของขอบแอ่งที่ราบสูงโคราชบริเวณเทือกเขาภูพาน เทือกเขาเพชรบูรณ์ และเทือกเขาพนมดงรักจนทำให้เกิดเป็นแอ่งซัดเงิน การสะสมตัวของตะกอนและการระเหยของน้ำทะเลได้แบ่งเป็นสามวัฏจักร แต่ละวัฏจักรจะมีการหมุนเวียนของกระแสน้ำทะเลเข้าและออกภายในแอ่ง โดยมีอัตราการระเหยของน้ำทะเลที่เหมาะสมทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่ เช่น แร่เฮไลต์ และแร่โพแทช แต่ละวัฏจักรประกอบด้วยชั้นอิวาโพไรท์และชั้นตะกอนที่เกิดเป็นวัฏจักรทับถมกันดังนี้

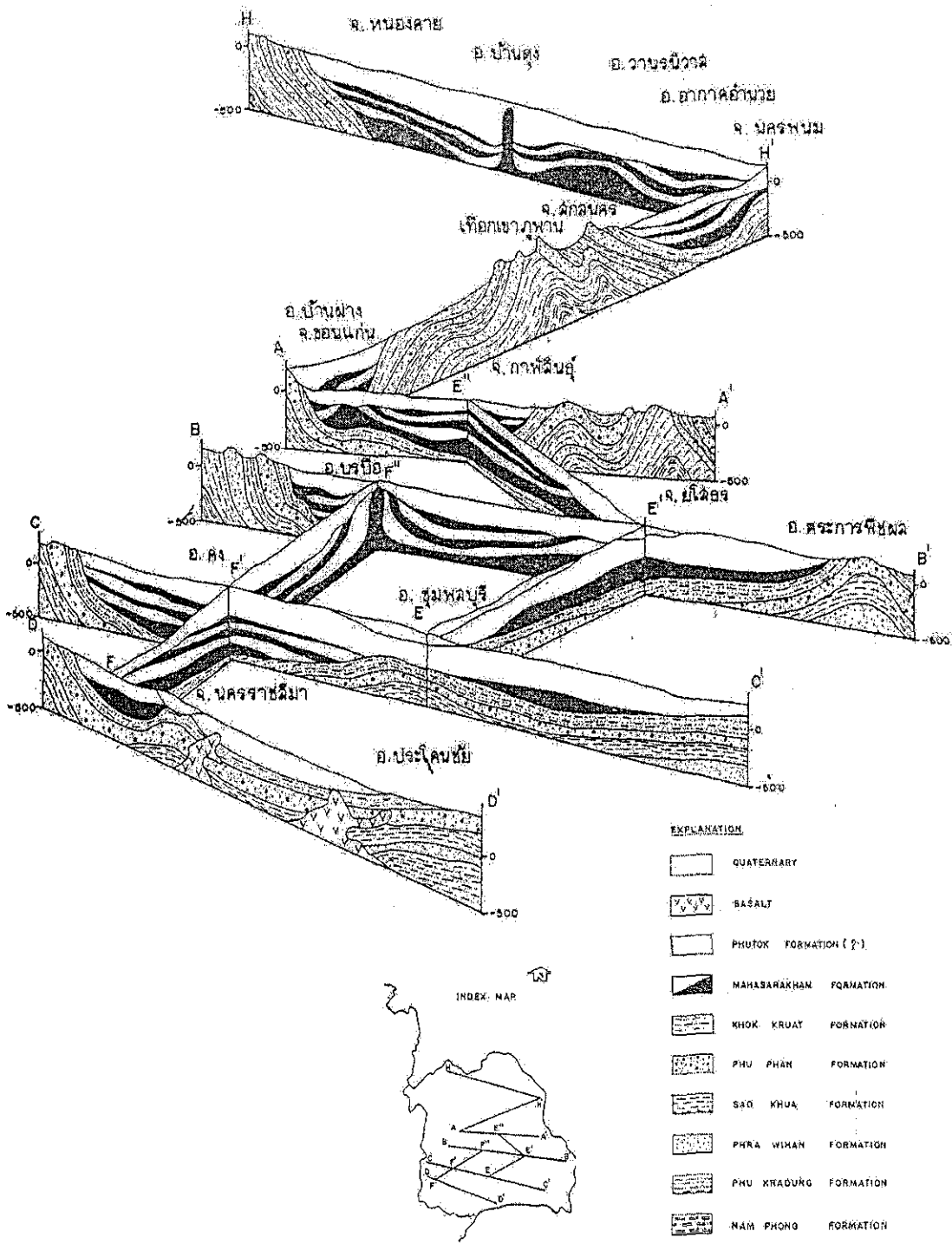
วัฏจักรล่าง (Lower cycle) ประกอบด้วย ตะกอนชั้นล่างเกิดระหว่างที่กระแสน้ำทะเลไหลเข้าภายในแอ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของชั้น Ferruginous clastic sediments และ Calcareous sandstone หินอิวา-โพไรท์ชั้นล่างเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลออกจากแอ่ง มีการตกตะกอนของ แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) เฮไลต์ (Halite) โพแทช (Potash) และซิลไวท์ (Sylvite)

วัฏจักรกลาง (Middle cycle) ประกอบด้วย ตะกอนชั้นกลางเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลไหลเข้าภายในแอ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของชั้นหินดินดาน และหินดินเหนียว หินอิวาโพไรท์ชั้นกลางเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลออกจากแอ่งและมีความเข้มข้นมากขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนของเฮไลต์และแอนไฮไดรต์เป็นชั้นบาง ๆ

วัฏจักรบน (Upper cycle) ประกอบด้วย ตะกอนชั้นบนเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลไหลเข้าภายในแอ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของชั้นดินเหนียวสีน้ำตาลแดง ส่วนหินอิวาโพไรท์ชั้นบนเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลออกจากแอ่ง

2.1.2 อุทกธรณีวิทยา

Wongsawat et al. (1992) ได้ศึกษาแหล่งน้ำบาดาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและนำเสนอรูปภาพตัดขวางของชั้นหินในทิศทางต่าง ๆ (รูปที่ 2.2) พบว่าระบบการไหลของน้ำบาดาลในภูมิภาค (Regional flow system) เป็นการไหลระหว่างพื้นที่รับน้ำ (พื้นที่สูงสุด) กับพื้นที่ให้น้ำ (พื้นที่ต่ำสุด) เมื่อพิจารณาในแอ่งโคราช พื้นที่รับน้ำจะเป็นบริเวณเทือกเขารอบแอ่ง (เทือกเขาภูพาน เทือกเขาเพชรบูรณ์ เทือกเขาสนกำแพง เทือกเขาพนมดงรัก) และพื้นที่ให้น้ำจะเป็นบริเวณพื้นที่ราบลุ่มทุ่งกุลาร้องไห้ สรุปได้ว่าน้ำบาดาลจะมีการไหลจากขอบแอ่งเข้าสู่กลางแอ่ง ส่วนแอ่งสกลนครก็มีรูปแบบการไหลของน้ำบาดาลที่เหมือนกับแอ่งโคราชชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) ได้เน้นไปที่ชั้นน้ำที่มีผลกระทบต่อชั้นเกลือหินที่วางตัวอยู่ชั้นบนและชั้นล่างของชั้นเกลือหิน ได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำภูทอก (Phutok aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำมหาสารคาม (Maha Sarakham aquifer) และชั้นหินอุ้มน้ำโคกกรวด (Khok Kruat aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำภูทอก มีความหนาเฉลี่ย 150 เมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม ร้อยเอ็ด ยโสธร และอุบลราชธานีเป็นส่วนใหญ่ การกักเก็บน้ำบาดาลส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรอยแตกที่เกิดจากการทรุดตัวหรือแทรกดันของเกลือหินที่อยู่ด้านล่าง สามารถจำแนกแหล่งน้ำ



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จาก Wongsawat et al., 1992)
 (หมายเหตุ : คุณภาพของรูปไม่สามารถปรับปรุงได้ดีกว่านี้ เนื่องจากต้นฉบับมีคุณภาพของรูปต่ำ)

บาดาลออกเป็นสามชนิดตามลักษณะโครงสร้าง คือ 1) แหล่งน้ำบาดาลในโครงสร้างประทุนหงาย (Syncline) น้ำบาดาลจะอยู่ในชั้นรอยต่อระหว่างชั้นหิน มีปริมาณน้ำสูบได้ 2-10 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง 2) แหล่งน้ำบาดาลในโครงสร้างประทุนคว่ำ (Anticline) มีความหนาชั้นน้ำบาดาลไม่มาก คุณภาพน้ำจะกร่อยและเค็ม มีปริมาณน้ำสูบได้ 5-20 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง และ 3) แหล่งน้ำบาดาลในโครงสร้างรอยต่อประทุนคว่ำกับประทุนหงาย เป็นแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่ มีปริมาณน้ำที่สูบได้ 20-100 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

ชั้นหินอุ้มน้ำมหาสารคาม ส่วนใหญ่น้ำจะมีคุณภาพกร่อยและเค็ม มีการแทรกซึมอยู่ในชั้นหินทรายหรือชั้นหินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ และจะกักเก็บน้ำบาดาลใต้บริเวณด้านบนของชั้นเกลือหินซึ่งเป็นชั้นน้ำเค็มที่มีปริมาณมาก

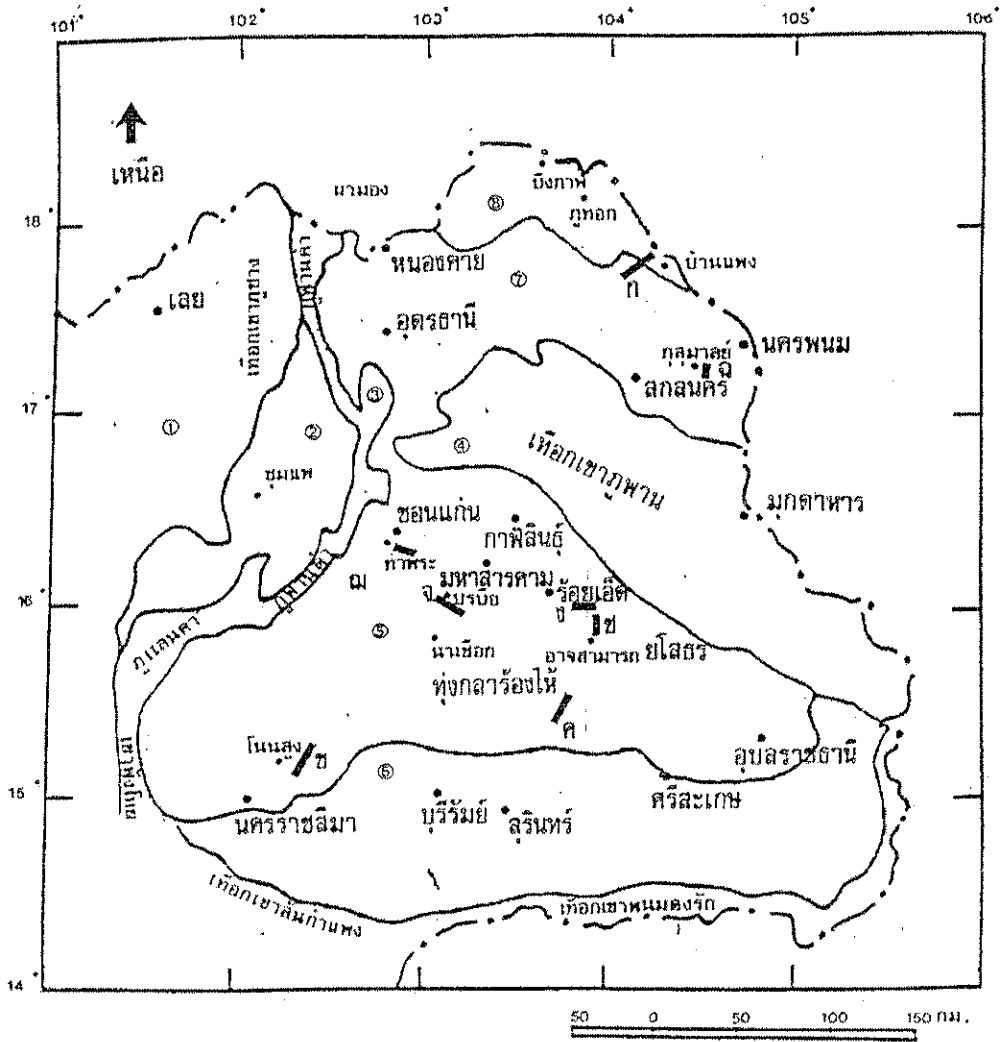
ชั้นหินอุ้มน้ำโคกกรวด มีโอกาสพบน้ำได้เพียงร้อยละ 60 เพราะหมวดหินนี้จะประกอบด้วยหินทรายเนื้อแน่นและค่อนข้างแข็ง มีปริมาณน้ำสูบได้ 3-5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

2.1.3 ข้อมูลหลุมเจาะและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

นเรศ สัตยารักษ์ และคณะ (2530) ศึกษาอิทธิพลของชั้นเกลือหินที่มีต่อน้ำใต้ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากการศึกษาธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยข้อมูลจากการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนและข้อมูลจากการสำรวจแร่โพแทชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าเกลือหินของหมวดหินมหาสารคามสะสมตัวอยู่ในแอ่งอุดร-สกลนคร และแอ่งโคราช-อุบล ทั้งนี้ได้คัดเลือกพื้นที่ตัวอย่างเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำใต้ดินที่ได้จากลักษณะธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยแผนที่อุทกธรณีวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและรายงานผลการสำรวจน้ำบาดาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างปี 2497-2508 จำนวน 7 พื้นที่ (รูปที่ 2.3) ประกอบด้วย 1) พื้นที่อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา 2) พื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดสุรินทร์-ร้อยเอ็ด 3) พื้นที่อำเภอรวิชัยบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด 4) พื้นที่อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม 5) พื้นที่อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดสกลนคร-นครพนม 6) พื้นที่อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด และ 7) พื้นที่อำเภอท่าพระ จังหวัดขอนแก่น

พื้นที่อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา การศึกษาได้จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจโพแทช หมายเลข K-023 และ K-026 พบเกลือหินอยู่ที่ความลึก 65 เมตรและ 73 เมตร โดยเกลือหินที่พบเป็นเกลือหินชั้นล่างของหมวดหินมหาสารคาม วางตัวอยู่บนหมวดหินโคกกรวดในแนวเกือบระนาบ ชั้นดินและชั้นหินที่ปิดทับอยู่ด้านบนมีความบางมาก

พื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดสุรินทร์-ร้อยเอ็ด ศึกษาจากหลุมเจาะสำรวจโพแทช หมายเลข K-64 พบว่าชั้นเกลือหินอยู่ที่ระดับความลึก 172 เมตร เป็นเกลือหินชั้นล่างของหมวดหินมหาสารคาม ส่วนบนถูกกัดเซาะหายไป



รูปที่ 2.3 แสดงตำแหน่งของช่องทางภูมิศาสตร์ที่สำคัญ และตำแหน่งเส้นสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของชั้นหิน (นเรศ สัตยรักษ์ และคณะ, 2530)

- ① บริเวณจังหวัดเลย
 - ② บริเวณอำเภอชุมแพ
 - ③ ที่ราบสูงโคราช
 - ④ เทือกเขาภูพาน
 - ⑤ แอ่งโคราช-อุบล
 - ⑥ บริเวณอีสานใต้
 - ⑦ แอ่งหนองคาย-สกลนคร
 - ⑧ บริเวณบึงกาฬ-บ้านแพง
- ก — ตำแหน่งเส้นสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของชั้นหิน

พื้นที่อำเภอธวัชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด มีลักษณะการวางตัวของหมวดหิน โลกกรวดและหมวดหินมหาสารคามขนานกัน จากหลุมเจาะสำรวจโพแทช K-015 พบชั้นเกลือหินที่ความลึก 165 เมตร เป็นเกลือชั้นล่าง

พื้นที่อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม ศึกษาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจโพแทช หมายเลข K-066 พบโดมเกลือหินที่ก่อให้เกิดการทำนาเกลือในบริเวณอำเภอบรบือ ระดับผิวดินบริเวณ โคมเกลือหินเป็นที่ลุ่มซึ่งเกิดจากน้ำใต้ผิวดินละลายเอาเกลือหินส่วนที่ปูดขึ้นมาทำให้เกิดการยุบตัวของชั้นดินและหินข้างบน และพบหมวดหินภูทอกปิดทับอยู่ด้านบน

พื้นที่อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดสกลนคร-นครพนม พบหมวดหิน โลกกรวดวางตัวอยู่ในแนวราบใต้หมวดหินมหาสารคามซึ่งถูกปิดทับด้วยหมวดหินภูทอก ชั้นเกลือมีความหนาประมาณ 240 เมตร

พื้นที่อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด หมวดหิน โลกกรวดมีการ โกงตัวและวางตัวเอียงเทลงมาทางทิศใต้ พบหมวดหินมหาสารคามที่วางตัวอยู่ด้านบนจึงเอียงเทตามไปด้วยและถูกปิดทับด้วยหมวดหินภูทอก

พื้นที่อำเภอท่าพระ จังหวัดขอนแก่น พบว่าหมวดหิน โลกกรวดมีการ โกงตัวเล็กน้อย หมวดหินมหาสารคามวางตัวอยู่บนหมวดหิน โลกกรวดโดยไม่มีการถูกกัดเซาะ เกลือชั้นล่างมีการเคลื่อนตัวจนเป็น โคมเกลือรูปหมอนขนาดเล็ก หมวดหินภูทอกที่วางตัวอยู่บนหมวดหินมหาสารคามในบริเวณนี้มีความหนาค่อนข้างมาก โดยเฉลี่ยประมาณ 540 เมตร

นเรศ สัตยารักษ์ และ ทรงภพ พลจันทร์ (2533) และกรมทรัพยากรธรณี (2541) ได้รวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์จากเกลือสินเธาว์ในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ข้อมูลการลำดับชั้นหินและตั้งชื่อชุดหิน โคราช ข้อมูลการเรียกชื่อหมวดหินมหาสารคาม ข้อมูลการเรียกชื่อหมวดหินภูทอก ข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจแร่โพแทช และข้อมูลที่ได้จากการแปลความคลื่นไหวสะเทือน ข้อมูลหลุมเจาะปิโตรเลียมแสดงให้เห็นว่าแอ่งโคราชวางตัวอยู่ในแนวทิศตะวันตก-ตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันออก-ตะวันออกเฉียงใต้ แต่ไม่พบลักษณะที่แสดงให้เห็นว่าโดมเกลือเกิดขึ้นก่อนการสะสมตัวของหมวดหินภูทอก โดยพบว่าบริเวณที่มีเกลือหินรูปหมอน เกลือชั้นล่างจะถูกปิดทับด้วยเกลือหินชั้นกลาง เกลือชั้นบนและหมวดหินภูทอก ในบริเวณที่เป็น โคมเกลือที่มีการยุบตัวจะไม่พบเกลือชั้นกลาง เกลือชั้นบนหรือหมวดหินภูทอกอยู่เลย และพบว่าโดมเกลือจะเริ่มเกิดขึ้นเนื่องจากการปูดขึ้นมาของเกลือชั้นล่างเท่านั้น ส่วนการกระจายตัวของชั้นเกลือในปัจจุบันพบว่าเกลือหินแบ่งเป็น 2 แอ่ง คือ แอ่งโคราช-อุบล และแอ่งอุดร-สกลนคร โดยชั้นเกลือหินของหมวดหินมหาสารคามซึ่งเคยปิดทับบนหินชุดโคราชบริเวณตั้งแต่ขอบแอ่งที่ราบสูงโคราชด้านตะวันตกและบริเวณเทือกเขาภูพานทั้งหมดถูกทำลายหมดไปจึงเหลือแต่ในบริเวณที่ลุ่มของสองแอ่งนี้ จากข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนภาพตัดขวางที่แอ่งโคราช-อุบล และแอ่งอุดร-สกลนคร พบว่าลักษณะชั้นเกลือหินแบ่งตามลักษณะรูปร่างได้สามแบบ คือ ชั้นเกลือหิน ชั้นเกลือหินคดโค้ง และ โคมเกลือหิน โดยหมวด

หินมหาสารคามและภูทอกจะมีการคดโค้งตามหินชุดโคราชและภาพตัดขวางชั้นเกลือหินบางส่วนในแอ่งโคราชได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ซึ่ง ผลกระทบจากการชนกันของทวีปเอเชียและอนุทวีปอินเดียในช่วงอายุ Tertiary ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างดันหินในหมวดหินภูทอกจนแตก เนื่องจากคุณสมบัติของเกลือหินที่คล้ายพลาสติกทำให้เคลื่อนไหลได้ง่ายชั้นเกลือหินจึงสามารถดันแทรกเข้าไปในรอยแตกได้ รวมทั้งน้ำหนักกดทับของดินและหินชั้นบน (Overburden) ในแต่ละพื้นที่ที่มีน้ำหนักกดทับไม่เท่ากันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากชั้นเกลือหินเป็นชั้นเกลือหินคดโค้ง และเป็น โคมเกลือตามลำดับ สมเกียรติ จันทรมหา (2530) และ Sattayarak et al. (1989) ยังพบว่าจากการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะท้อนบริเวณหลุมเจาะสำรวจ หมายเลข K-066 อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม (รูปที่ 2.5) และหลุมเจาะยางตลาด-1 อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์ โคมเกลือจะมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน บางแห่งเพิ่งเริ่มก่อตัวเป็น โคม และจะก่อตัวได้ดีถ้าเป็นเกลือชั้นล่าง

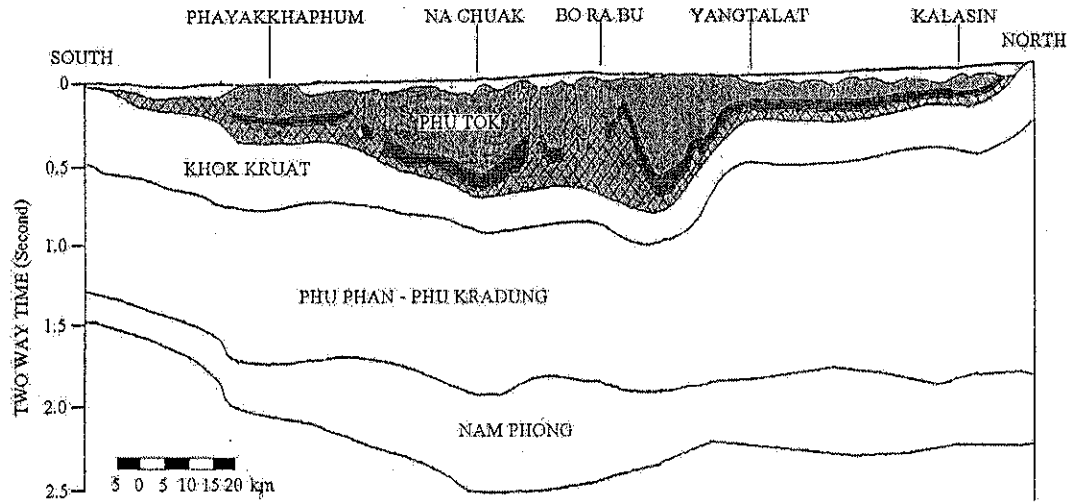
Booth (2000) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยาปีโครเลียมของแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยทำการเจาะหลุมสำรวจหาส่วนของคาร์บอนเนตในหมวดหินผานกเค้า (Pha Nok Khao Formation) เพื่อสำรวจแหล่งกักเก็บ มีหลุมเจาะสำรวจทั้งสิ้น 18 หลุม พบคาร์บอนเนตจำนวน 11 หลุม แต่อีก 7 หลุมเจาะสำรวจไม่พบ โดยคาดว่าเกิดจากแบบจำลองทางธรณีวิทยาไม่ถูกต้องหรืออาจเกิดจากการวิเคราะห์ทางด้านคลื่นไหวสะเทือนที่ไม่ถูกต้อง โดยใน 11 หลุมเจาะสำรวจที่พบคาร์บอนเนตนั้นมี 5 หลุมที่ทำการเจาะแล้วไม่ตรงตามแผนที่วางไว้เนื่องจากโครงสร้างของชั้นหินได้ก่อตัวหลังจากที่ก๊าซธรรมชาติได้แพร่จากโครงสร้างของชั้นหินไปแล้ว ซึ่งสรุปได้ว่าการหาลักษณะทางธรณีวิทยาของไฮโดรคาร์บอนในพื้นที่มีความสลับซับซ้อนจึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำเอาข้อมูลการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนมาทำการแปลความใหม่เพื่อให้ได้ผลสำรวจที่ดีขึ้น

2.2 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน

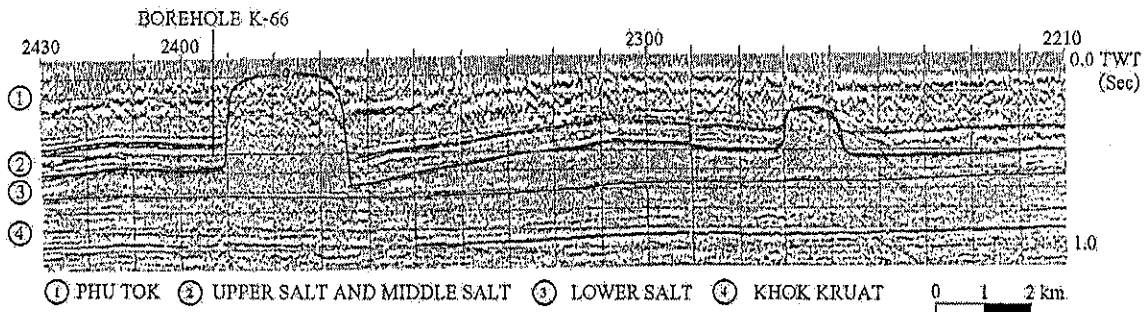
2.2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Singh (1992) กล่าวว่า การทรุดตัวเป็นผลจากการถูกรบกวนด้วยความเค้นภายนอก ซึ่งความเค้นที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนที่ของชั้นดินหรือชั้นหิน ขอบเขตของการทรุดตัวจะขึ้นกับขนาดของความเค้นและขนาดของโพรงที่จะส่งผลต่อความไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นการทรุดตัวของผิวดินจึงสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ได้ดินที่เกิดจากการถล่มในโพรงใต้ดิน การทรุดตัวของผิวดินโดยทั่วไปจะนำมาซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ด้านข้าง การทรุดตัวของผิวดินเกิดได้ 3 แบบ คือ

- 1) มีรอยแตก ร่องแยก หรือระดับของการแตก
- 2) บ่อหรือหลุมยุบ
- 3) เกิดเป็นแอ่งน้ำหรือเป็นรูปท้องช้าง



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางแสดงชั้นเกลือหินบางส่วนในแอ่งโคราช
(นเรศ สัตยารักษ์ และ ทรงภพ พลจันทร์, 2533)



รูปที่ 2.5 ภาพตัดชั้นเกลือหินจากผลการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะท้อนบริเวณหลุมเจาะสำรวจ K-66
อ.บอระเพ็ด จ.มหาสารคาม (สมเกียรติ จันทรมหา, 2530)

การแตกของผิวดินอาจจะอยู่ในรูปแบบของการเปิดรอยแตก ระดับการเลื่อนไถล หรือ โพรงที่อยู่ในบ่อ และผลสะท้อนของความเค้นดึงและความเค้นเฉือนใต้ดิน

การคำนวณด้วย Profile function มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องการกรอกเข้าไปในสมการประกอบด้วยการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรง (D) มุมที่วัดจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw, γ) ระยะทางในแนวระนาบ (x) arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่โพรง (B) รูปที่ 2.6 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดิน

การคำนวณการทรุดตัว Profile function

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

การคำนวณความชัน

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

การคำนวณค่าส่วนโค้ง

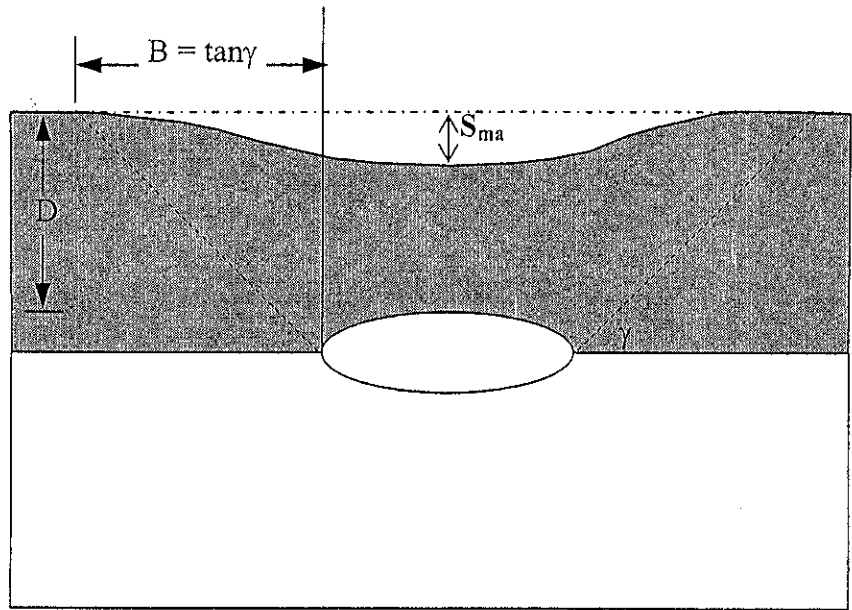
$$\rho(x) = S''(x) = S_{max} \frac{c^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (2.3)$$

การคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวนอน

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

การคำนวณความเครียดในแนวนอน

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



รูปที่ 2.6 ลักษณะทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงและธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน

2.2.2 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านวิศวกรรมธรณีเป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินรอบ ๆ โครงสร้างทางวิศวกรรมในเชิงกลศาสตร์ เช่น พฤติกรรมในเชิงความเค้น ความเครียด และความชื้นผ่าน เป็นต้น โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงพลาสติกและความเป็นพลาสติก โปรแกรมที่ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมทั้งในระยะเวลาสั้นและระยะเวลายาวมีอยู่หลายโปรแกรม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ในแต่ละโปรแกรมต่างก็ได้พัฒนาเพื่อให้การวิเคราะห์ง่าย สะดวกและรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและใช้กฎเกณฑ์พฤติกรรมเกลือหินในเชิง กลศาสตร์เป็นสมการหลักในการคำนวณ ค่าคงที่ต่าง ๆ จะหาได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละโปรแกรมจะไม่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ยกเว้นโปรแกรมที่จะนำมาใช้ใน โครงการวิจัยนี้เท่านั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือโปรแกรม FLAC (Itasca, 1992) ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณจะอธิบายการเปลี่ยนรูปและการแตกของชั้นหินปิดทับ (Overburden) โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Itasca (1992) ซึ่งจะอธิบายโดยย่อดังนี้

โปรแกรม FLAC เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (finite difference analysis) ใน 2 มิติที่ใช้จำลองพฤติกรรมของดิน หิน หรือวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ภายใต้สภาวะ plastic เมื่อถึงจุด yield และสามารถคำนวณความเค้นและความเครียดของมวลหินในสองมิติ และคาดคะเนพฤติกรรมของหินในอนาคต โปรแกรมนี้เขียนขึ้นมาจากโครงสร้างทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อจำลองคุณสมบัติของวัสดุแบบ Elasticity, Plasticity, Visco-elasticity, Visco-plasticity, Brittle และ Ductile โดยวัสดุที่ใช้จำลองในโปรแกรมจะถูกแทนด้วยอิลิเมนต์ (element) หรือ โซน (zone) ที่ซึ่งผู้ใช้สามารถปรับแต่งรูปแบบของ grid ได้ ในแต่ละอิลิเมนต์จะถูกกำหนดไว้ให้อยู่ในกฎความเค้นและความเครียดทั้งในเชิงเส้นตรงและไม่เป็นเส้นตรงที่ตอบสนองต่อแรงที่ใส่เข้าไป โดยส่งผลไปยังวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดตามลักษณะหรือรูปแบบจำลองที่ใช้หรือทำให้แบบจำลองมีการเปลี่ยนรูปร่างไป (ในโหมด large - strain)

โปรแกรม FLAC ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับธรณีเทคนิค และวิศวกรเหมืองแร่ซึ่งโปรแกรมจะสามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนในเชิงกลศาสตร์ด้วย constitutive models ที่เหมาะสมกับรูปแบบจำลองที่สอดคล้องกับปัญหาได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้โปรแกรม FLAC ยังมีโปรแกรมอื่นที่สามารถจำลองพฤติกรรมของหินได้ คือ โปรแกรม GEO ซึ่งรายละเอียดและทฤษฎีของโปรแกรมนี้สามารถศึกษาต่อได้จาก Fuenkajorn and Serata (1992, 1994) Serata and Fuenkajorn (1993) และ Stormont and Fuenkajorn (1994)

ตารางที่ 2.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินและหินชั้นหินปิดทับ

Code Names	Methods	References
BEFE	BEM (3D)	Beddoes (1994)
VELMINA	DDM (3D)	Frayne (1998)
VNFOLD	DDM (3D)	Beddoes (1994)
FLAC	FDM (2D)	Itasca (1992)
FLAC	FDM (3D)	Frayne (1996, 1998)
ADI	FEM (2D)	Pudewills and Hornberger (1996)
ANSALT	FEM (2D)	Heusermann et al. (1998)
ANSPRE	FEM (2D)	Honecker and Wulf (1988)
ANTEMP, ANSPP	FEM (2D)	Honecker and Wulf (1988)
ASTHER	FEM (2D)	Rolnik (1988)
CODE-BRIGHT	FEM (2D)	Olivella et al. (1996, 1998a, 1998b)
COY	FEM (2D)	Gartling (1981a)
DAPROK	FEM (2D)	Harrington et al. (1991)
FAST-BEST	FEM (2D)	Pudewills (1998)
GEO/REM	FEM (2D)	Serata (1991), and Serta and Fuenkajorn (1993)
GEOMEC	FEM (2D)	Nguyen-Minh and Menezes (1996)
JAC	FEM (2D)	Biffle (1984)
LUBBY-1	FEM (2D)	Rokahr and Staudtmeister (1996)
LUBBY-2	FEM (2D)	Lux and Schmidt (1996)
MA	FEM (2D)	Van Eekelen (1988)
MERLIN	FEM (2D)	Gartling (1981b)
SANCHO	FEM (2D)	Stone et al. (1985)
SPECTROM-32	FEM (2D)	de Vries and Callahan (1998)
VIPLEF	FEM (2D)	Vouille et al. (1996)
VISCOT	FEM (2D)	INTERA (1982), and Frayne (1996)
SUVIC-D	FEM (2D/3D)	Julien et al. (1998)

Notes: FEM is finite element method, FDM is finite difference method, DDM is displacement discontinuity method, BEM is boundary element method, 2D is two-dimension, and 3D is three-dimension.

2.2.3 การคำนวณการทรุดตัวด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

โปรแกรม SALT_SUBSID ถูกพัฒนาโดยบริษัท RE/SPEC Inc. เพื่อมอบให้กับ Solution Mining Institute สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือ โพแทช และ ถ่านหิน โปรแกรมนี้ยังใช้วิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในเชิงเวลาด้วย ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวกับเวลา ภาพตัดขวางแสดงการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว เส้นชั้นการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวสามารถใส่ข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมด้วย

ค่าคงที่ที่ Input ให้กับโปรแกรมสำหรับการคำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β สำหรับเหมืองละลาย และ Y_0 , β และ N สำหรับเหมืองแบบแห้ง สำหรับตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการทรุดตัวสูงสุด ได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการทรุดตัว การทรุดตัวที่ตำแหน่งใด ๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x,y,t)$ มีสมการทั่วไปดังนี้คือ

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

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

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

2.3 การเกิดแผ่นดินทรุดเนื่องจากโพรงธรรมชาติ

แผ่นดินทรุดหรือหลุมยุบเป็นธรณีพิบัติภัยประเภทหนึ่งที่เกิดตามธรรมชาติ แต่กิจกรรมของมนุษย์ก็สามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้ โดยทั่วไปในภูมิภาคที่ได้ผิวดินมีหินปูน หินโดโลไมต์ หินอ่อนและเกลือหินเป็นองค์ประกอบ หินเหล่านี้สามารถละลายได้ในน้ำใต้ดิน จึงทำให้เกิดโพรงหรือถ้ำใต้ดินขึ้นและเมื่อเพดานต้านทานน้ำหนักของดินและสิ่งก่อสร้างที่กดทับด้านบนไม่ไหวจึงพังทลายกลายเป็นหลุมยุบ (กรมทรัพยากรธรณี, 2548)

เมื่อหลุมยุบเกิดขึ้นจะสร้างความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้าง บ้านเรือน และพื้นที่ทางการเกษตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศชาติในการซ่อมบำรุงบ้านเรือนที่เสียหาย รวมถึงการกู้ภัยและช่วยเหลือผู้ที่ประสบกับภาวะแผ่นดินทรุด ทั้งนี้ภาครัฐได้มีการศึกษาหลุมยุบและได้กำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดหลุมยุบ โดยพบว่าพื้นที่เสี่ยงภัยหลุมยุบส่วนใหญ่อยู่นอกเขตเมืองประมาณร้อยละ 66 ของพื้นที่เสี่ยงภัยทั้งหมด

หลุมยุบที่เกิดจากโพรงหินปูน (Sink hole)

โดยทั่วไปหลุมยุบที่เกิดในบริเวณหินปูนมักเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสาเหตุตามธรรมชาติหรือมีส่วนที่มนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องน้อย หลุมยุบจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1-200 เมตรและลึกตั้งแต่ 1 – มากกว่า 20 เมตร ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณที่ราบใกล้กับภูเขาที่เป็นหินปูน โดยมีสาเหตุมาจากน้ำที่มีสภาพเป็นกรดไหลผ่านตามรอยแตกของหินปูนและเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้เนื้อหินปูนละลายจนเป็นช่องว่างหรือโพรงใต้ดิน เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวจึงเกิดการพังทลาย แผ่นดินด้านบนจึงทรุดตัวกลายเป็นหลุมยุบ ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการยุบพังของหินปูนได้แก่ ความหนาและการแผ่กระจายของหินปูน บริเวณที่มีหินปูนรองรับอยู่ในระดับตื้น (ลึกจากผิวดินไม่เกิน 50 เมตร) การวางตัวของชั้นหินเนื้อที่บ ลักษณะและจำนวนรอยแตกในหิน การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน และสภาพความเป็นกรดของน้ำ

หลุมยุบที่เกิดจากโพรงเกลือหิน

สำหรับหลุมยุบที่เกิดในบริเวณที่มีชั้นเกลือหินรองรับ มักเป็นผลมาจากการกระทำของมนุษย์ อันเนื่องมาจากการสูบน้ำเกลือใต้ดินเพื่อการผลิตเกลือในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัยหลุมยุบของ 5 จังหวัด ได้แก่ หนองคาย สกลนคร อุรธานี มหาสารคาม และนครราชสีมา ซึ่งมีพื้นที่ผลิตเกลือประมาณ 12,439 ไร่ ทั้งนี้การสูบน้ำเกลือใต้ดินทำให้น้ำบาดาลในบริเวณใกล้เคียงต้องไหลเข้าไปแทนที่ และเกิดการละลายของมวลเกลือตามเส้นทางการไหลของน้ำ เกิดเป็นโพรงและมีการขยายตัวขึ้นตามลำดับจนถึงจุดที่เพดานโพรงไม่สามารถรับน้ำหนักดินและหินที่ปิดทับอยู่ได้ นอกจากการเกิดหลุมยุบแล้ว การผลิตเกลือโดยไม่มีมาตรการควบคุมด้านสิ่งแวดล้อมที่รัดกุมเพียงพอมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของดินเค็มและน้ำเค็มสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ใกล้เคียง

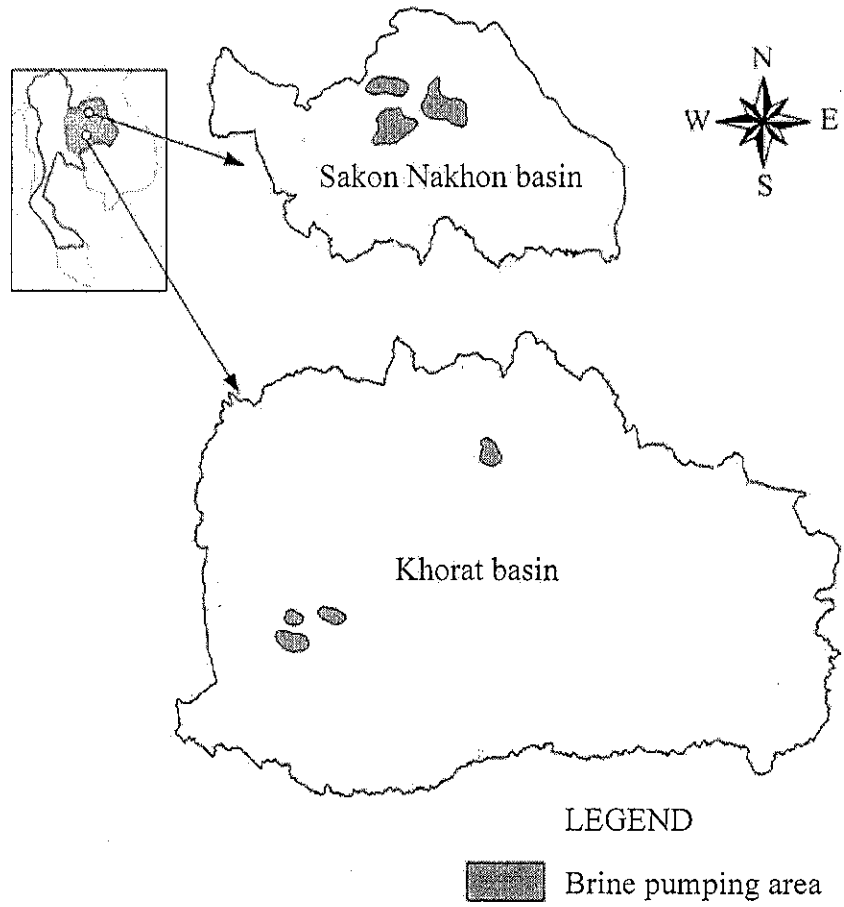
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกจากได้ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือแล้ว (ดังอธิบายในหัวข้อ 9.1) กรมทรัพยากรธรณีได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหลุมยุบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเอาไว้อย่างมากและมีข้อสรุปที่สำคัญโดย นเรศ สาตวรรษ (2545) ที่ได้ศึกษาถึงปัญหาการเกิดแผ่นดินทรุดเนื่องจากโพรงเกลือใต้ดินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าหลุมยุบจากโพรงเกลือใต้ดินเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ 1) โพรงเกลือที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเนื่องจากมีรอยแตกแล้วมีน้ำใต้ดินซึมลงไปละลายเกลือให้ขาดหายไปอย่างต่อเนื่อง และหากมีการเร่งให้โพรงเกลือขยายกว้างมากขึ้นด้วยการสูบน้ำเกลือในบริเวณใกล้เคียงเพื่อนำมาผลิตเกลือ โพรงก็จะขยายใหญ่ขึ้นและเกิดการยุบ และ 2) โพรงเกลือที่เกิดจากการเจาะบ่อสูบน้ำเกลือลงไปในพื้นที่เกลือหินและสูบน้ำเกลือกลับขึ้นมาเพื่อ

ผลิตเกลือ หลุมยุบจะเกิดบริเวณที่เป็นบ่อสูบลเกลือ ผลการศึกษาการประยุกต์ทางธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้า วัดคลื่นสั้นสะเทือน และวัดการนำไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบโพรงพบว่า การสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล ทั้งแบบ electrical profile และ electrical imaging สามารถตรวจสอบโพรงได้ผลชัดเจน การสำรวจด้วยวิธีนี้ทำได้รวดเร็วและเสียค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี โดยเมื่อพบลักษณะของโพรงจะปรากฏเป็นรูปร่างที่มีขอบเขตเป็นวงรอบและมีความต้านทานต่ำ (ประมาณ 0.1-0.5 โอห์ม-เมตร) การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะเทือนแบบสะท้อนและแบบหักเหสามารถหาความลึกของชั้นเกลือหินได้ แต่ไม่เหมาะในการหาโพรงในชั้นเกลือหินเพราะคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเหมีความไม่ต่อเนื่อง ค่าอัตราส่วนระหว่างคลื่นสัญญาณต่อคลื่นรบกวนมีค่าสูง (signal-to-noise) ทำให้ขาดความเชื่อมั่นในการแปลความหมายเมื่อเปรียบเทียบกับผลสำรวจด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ การสำรวจด้วยวิธีวัดการนำไฟฟ้ายังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของโพรงใต้ดินได้เนื่องจากมีขีดจำกัดการวัดที่ระดับตื้น (7-15 เมตร) นอกจากนี้ผลการสำรวจยังพบอีกว่ามีบริเวณที่คาดว่าจะมีโพรงเกลือที่บรรจุด้วยน้ำเกลือยาวประมาณ 700-800 เมตร กว้างประมาณ 20-40 เมตรความลึกไม่แน่นอนเนื่องจากชั้นเกลือหินมีการเอียงเท

Warren (1999) ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยาและชั้นเกลือหินโดยอาศัยหลุมเจาะสำรวจมากกว่า 300 หลุมซึ่ง Suwanich (1978) ได้ประเมินปริมาณสำรองของเกลือหินจากทั้งแอ่งโคราช และแอ่งสกลนครไว้ที่ 18 ล้านล้านตัน จากนั้น Vattanasak (2006) ได้รวบรวมข้อมูลหลุมเจาะเพื่อออกแบบการทำเหมืองเกลือแบบละลายในเบื้องต้นโดยอ้างอิงจากชุดการจำลองด้วยวิธี finite element analyses และได้ให้ปริมาณสำรองในการทำเหมืองเกลือแบบละลายของเกลือชั้นล่าง (Lower Salt member) ในแอ่งโคราชประมาณ 2 หมื่นล้านตันซึ่งการประเมินนี้ไม่ได้รวมพื้นที่ที่อยู่อาศัยและพื้นที่ป่าอนุรักษ์

Wannakao (2007) กล่าวว่า 1 ใน 3 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยทั่วไปจะวางตัวอยู่บนชั้นหินตะกอนของชุดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) การทับถมจะแยกเป็น 2 แอ่งคือ แอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร การผลิตเกลือจากสูบน้ำบาดาลเค็มส่วนใหญ่จะมีอยู่ในพื้นที่ของทั้ง 2 บ่อสูบน้ำบาดาลเค็มจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีท่ออัดอากาศเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีความลึกประมาณ 60-100 เมตร เมื่อน้ำบาดาลเค็มถูกสูบขึ้นมาแล้วจะนำไปตากแดดในบ่อพักเพื่อให้เกิดผลึกเป็นเกลือ วิธีการผลิตเกลือจากการสูบน้ำบาดาลเค็มนี้จะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวบนผิวดิน ซึ่งพบมากในพื้นที่บ้านโนนแสวง จังหวัดสกลนคร รูปที่ 2.7 แสดงพื้นที่ที่มีการทำนาเกลือแบบสูบลอยที่มีความลึกของชั้นเกลือที่ตื้นที่สุดในพื้นที่นั้นผันแปรตั้งแต่ 40 เมตร ถึง 200 เมตร ซึ่งจะเป็นเกลือชั้นกลางหรือเกลือชั้นล่างขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นที่ อย่างไรก็ตามโดยส่วนมากการทำนาเกลือแบบสูบลอยในพื้นที่ดังกล่าวจะมีลักษณะภูมิประเทศที่แบนราบ ระดับน้ำบาดาลอยู่ใกล้กับผิวดิน และในแอ่งสกลนครพบชั้นเกลือที่อยู่ลึกน้อยกว่า 50 เมตร ส่วนในแอ่งโคราชพบชั้นเกลือที่อยู่ลึกประมาณ 100



รูปที่ 2.7 พื้นที่สูบน้ำเกลือในแอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร

เมตร (Jenkunawat, 2005; Wannakao, 2005) ซึ่งอ้างอิงจากการสำรวจในภาคสนามของ (Jenkunawat, 2007) ที่กล่าวว่า การทรุดตัวของดินโดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่ชั้นเกลือมีความลึกน้อยกว่า 50 เมตร ชั้นหินปิดทับส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย mudstone siltstone และ sandstone ซึ่งอยู่ในชั้น Middle Clastic ส่วนในชั้น Lower Clastic จะประกอบด้วย claystone และ mudstone โดยมีรอยแตกทำมุมน้อยกว่า 30 องศา และบางรอยแตกทำมุม 70 องศา (Crosby, 2007) ในแต่ละชั้นของเกลือจะถูกจำแนกโดยใช้ปริมาณของแร่ halite และ แร่ anhydrite ที่ถูกแทรกอยู่ในรอยแตกโดยมีความหนาตั้งแต่ 2 เซนติเมตร ถึง 5 เซนติเมตร

บทที่ 3

การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

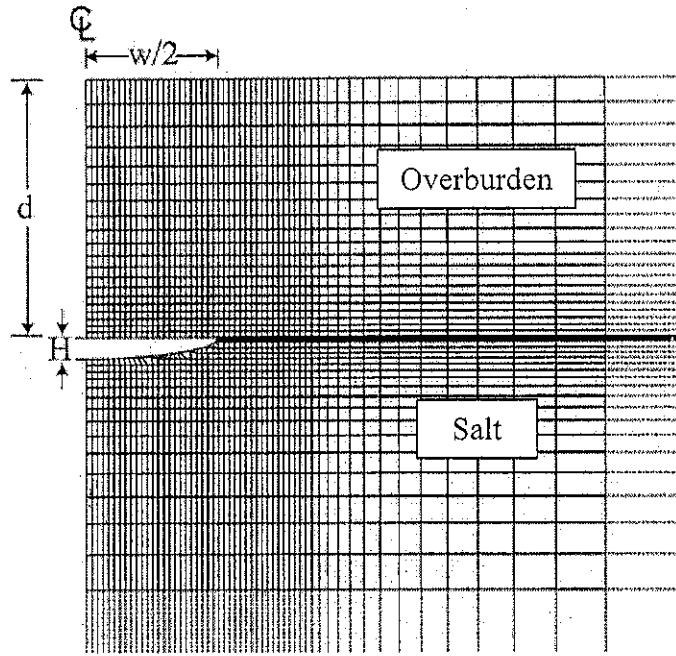
3.1 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการจำลองการทรุดตัวด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษา ลักษณะการทรุดตัวของดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ ความลึก และ เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง โดยในบทนี้ได้อธิบายตัวแปรและรูปแบบของโพรงที่ใช้ในการจำลอง รวมถึงไปถึงผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Finite difference analyses) จะนำมาสร้าง ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบบนพื้นผิวกับความลึก และเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่อยู่ใต้ดิน โดยใช้โปรแกรม FLAC (Itasca, 1992) ในการจำลองขนาดของการทรุดตัว ความชันของการทรุดตัว ที่อยู่บนผิวดิน การทรุดตัวของหลังคาโพรง การเปลี่ยนรูปร่าง และรัศมีของผลกระทบจากโพรงใต้ ดินที่เกิดบนผิวดิน ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง รวมถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง ความลึกของโพรง และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ โดยชั้นหินปิดทับนี้จะถูกแทนด้วยหน่วยหินเพียงชนิด เดียว คือ หินเนื้อประสม (clastic rock) และผืนแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ตั้งแต่ 20, 40, 60 ถึง 80 MPa และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) จะผืนแปรตั้งแต่ 20, 40 ถึง 60 องศา ในการ วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์จะสมมติให้ค่าความเค้นยึดติดมีค่าเป็นศูนย์ในทุกกรณี คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินเนื้อประสมที่ใช้ในการจำลองมีค่าอยู่ในช่วงที่พบได้ทั่วไปซึ่งรวบรวม ไว้โดย Thiel and Zabuski (1993)

เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะของ โพรงใต้ดินที่เกิดขึ้น รูปแบบการจำลองมากกว่า 400 รูปแบบจะถูกผืนแปรเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง (w) ตั้งแต่ 20 เมตร ถึง 100 เมตร โดยจะเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 เมตร และผืนแปรความลึก (d) จาก 40, 60 ถึง 80 เมตร โดยรูปแบบต่างๆ นี้จะมีการผืนแปร คุณสมบัติของชั้นหินปิดทับด้วย ในรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการ คำนวณ โดยการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของแกนสมมาตร (Axial Symmetry) และอยู่ภายใต้การอิมตัว ด้วยน้ำเกลือ ด้วยการสมมติให้ระดับน้ำบาดาลอยู่ที่ผิวดิน และแรงดันของน้ำเกลือในโพรงเป็นแบบ แรงดันสถิต (hydrostatic)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของ finite difference mesh ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLAC 4.0 โดยจะวิเคราะห์แบบสมมาตรในแนวแกน ซึ่งตัวอย่างนี้มีความสูงของโพรงเกลือ 5 เมตร ความลึกของโพรงเกลือ 60 เมตร ความกว้างของโพรงเกลือ 60 เมตร รัศมีของขอบเขตการทรุดตัว 172 เมตร โดยกำหนดให้ชั้นหินปิดทับมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 40 MPa และค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20°

ผลการคำนวณทุกรูปแบบทำให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่จุดวิกฤต (เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดก่อนเกิดการพังของชั้นหินปิดทับ) ซึ่งสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับความลึกของโพรง การเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโพรง และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ ซึ่งการทรุดตัวที่อยู่ในสภาวะวิกฤตนี้ได้อธิบายโดย Singh (1992) ความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจะใช้วิธีการคาดคะเนลักษณะของโพรงใต้ดินจากการตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งจะกล่าวเพิ่มเติมภายหลัง

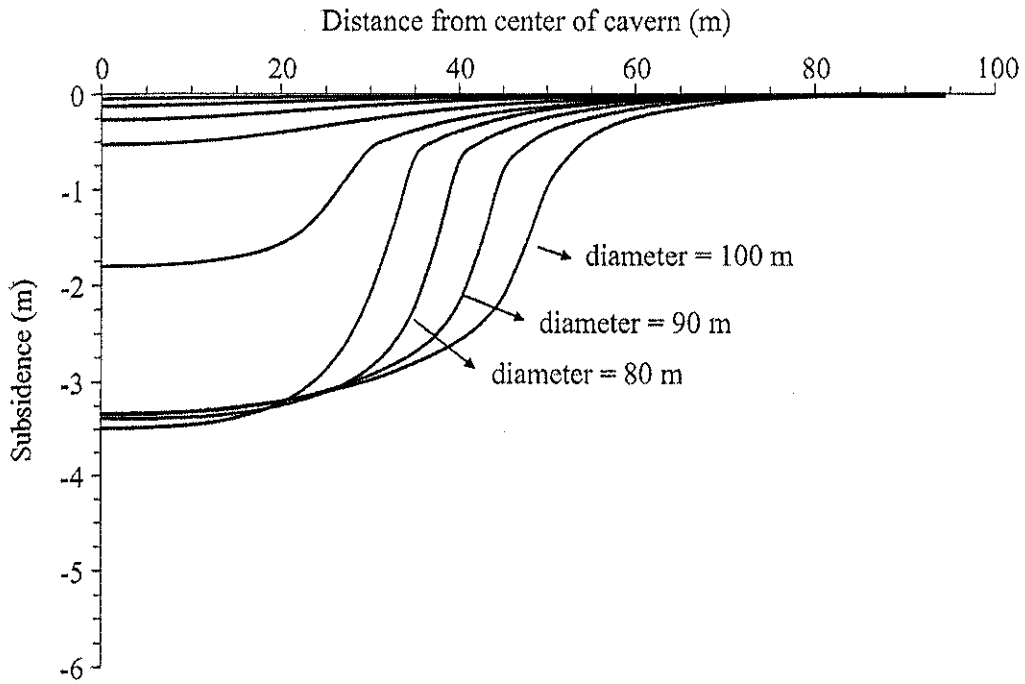
3.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ผลการจำลองจะแสดงในรูปของระดับการทรุดตัวของผิวดิน และการกระจายตัวของความเค้นเฉือนในระดับความลึกต่างๆ ซึ่งได้สรุปตัวแปรที่ใช้ในการจำลองไว้ในตารางที่ 3.1 ส่วนรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากโพรงเกลือที่ระดับความลึกต่างกัน 5 ระดับ โดยแต่ละความลึกได้มีการผันแปรเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโพรงด้วย ซึ่งผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินสามารถแสดงด้วย Hyperbolic curve ด้วยความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงซึ่งจะเป็นตัวแปรในการกำหนดค่าการทรุดตัวสูงสุดและความกว้างของการทรุดตัวในเชิงพื้นที่ ลักษณะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดินสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือ ผลการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 3.2 ถึง 3.6 ระบุว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อโพรงเกลือมีความลึกเพิ่มขึ้น และจะมีการทรุดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อโพรงเกลือมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น

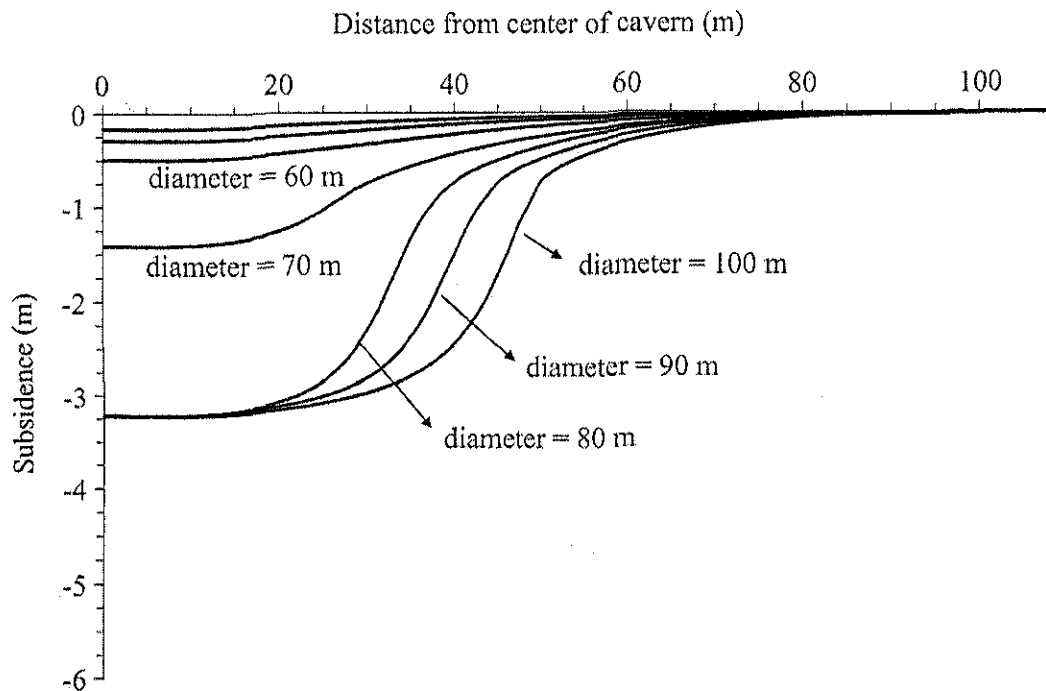
เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือมีค่าถึงจุดจุดหนึ่งที่ทำให้ Profile ของการทรุดตัวไม่เป็นแบบ hyperbolic หรือเกิดการทรุดตัวแบบไม่เป็น elastic เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่จุดนี้จะเรียกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่จุดวิกฤต (w_{cr}) ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือที่จุดนี้จะนำไปสร้างความสัมพันธ์กับค่าการทรุดตัวสูงสุดและค่าความชันของการทรุดตัวสูงสุด โดยที่สมการความสัมพันธ์นี้จะนำไปใช้คาดคะเนความลึก (d) เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือ (w) การยุบตัวของหลังคาโพรง (R_p) และรัศมีของขอบเขตการทรุดตัว ($B/2$) ซึ่งจะนำความสัมพันธ์เหล่านี้มาวิเคราะห์ในบทต่อไป

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (FLAC) โดยแต่ละแบบจำลองจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปรตั้งแต่ 20, 40, 60 ถึง 80 MPa และค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ผันแปรตั้งแต่ 20°, 40°, และ 60°

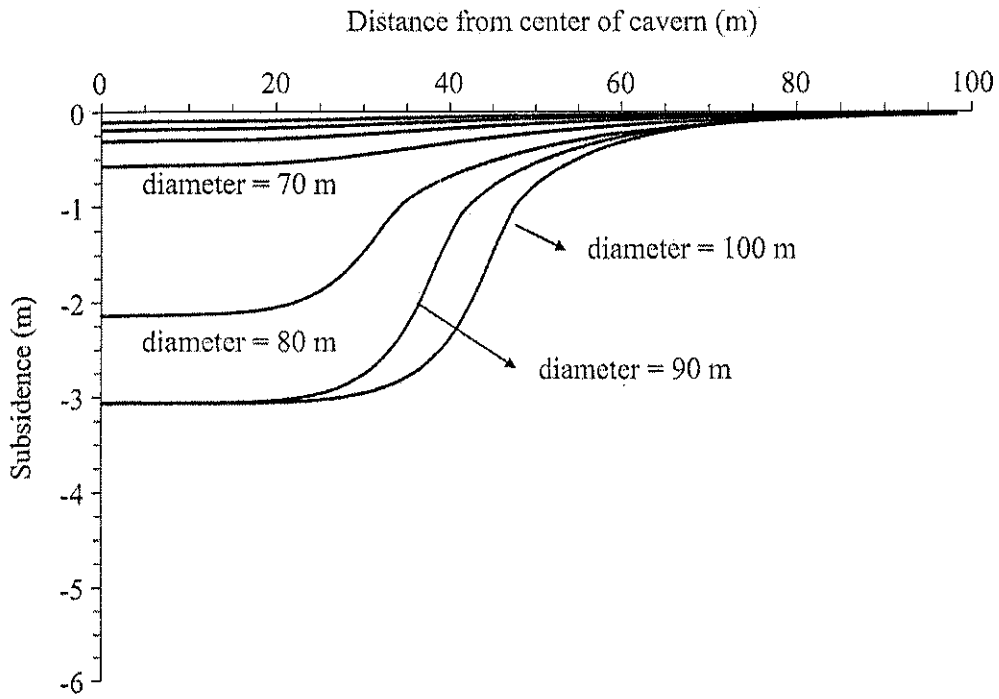
ความลึกของโพรง เกลือ (d)	ความสูงของโพรง เกลือ (H)	เส้นผ่าศูนย์กลางของ โพรงเกลือ (w)	อัตราส่วนความลึกต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง เกลือ (d/w)
40	5	20	2.00
		30	1.33
		40	1.00
		50	0.80
		60	0.66
		70	0.57
		80	0.50
60	5	20	3.00
		30	2.00
		40	1.50
		50	1.20
		60	1.00
		70	0.86
		80	0.75
		90	0.67
		100	0.60
		80	5
30	2.67		
40	2.00		
50	1.60		
60	1.33		
70	1.14		
80	1.00		
90	0.89		
100	0.80		



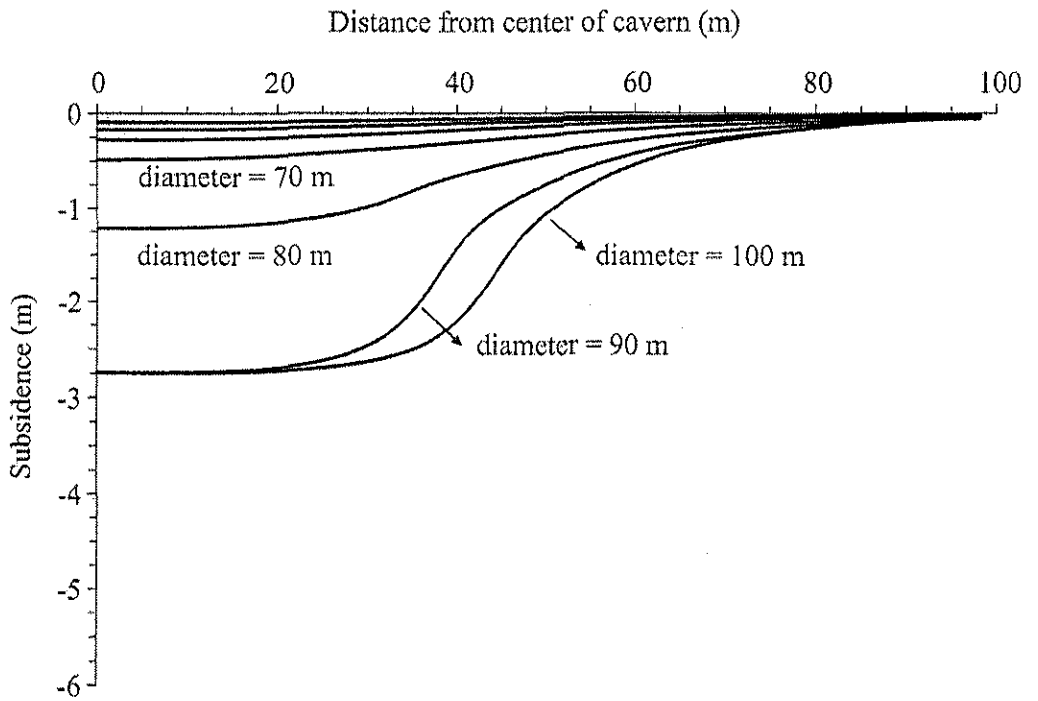
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 40 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร



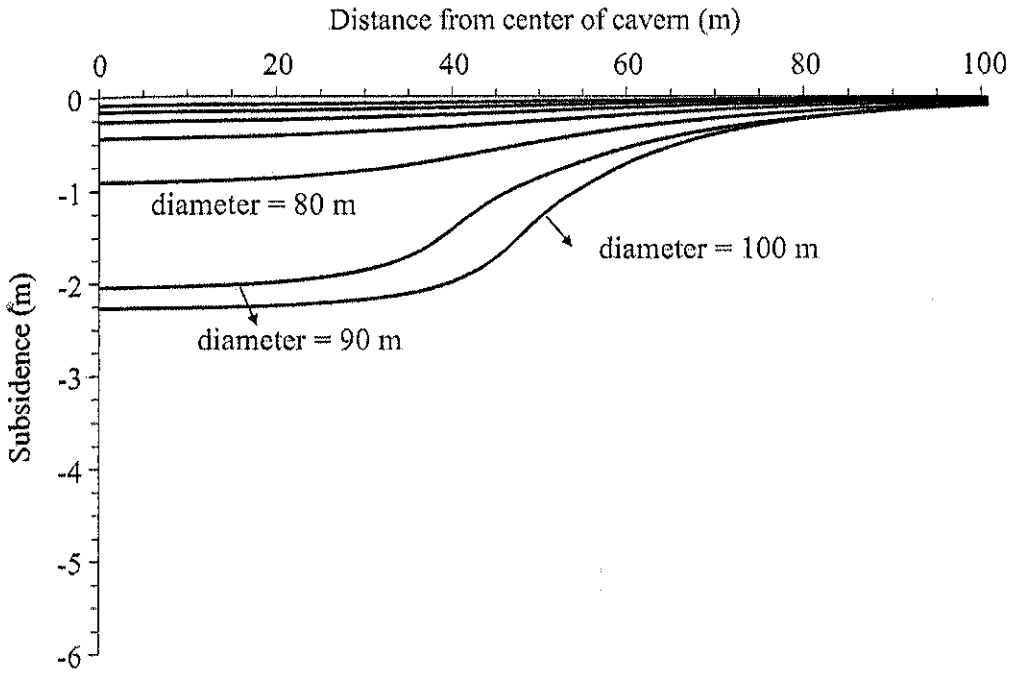
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมี ความลึกของโพรงที่ 50 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{\max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมี ความลึกของโพรงที่ 60 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีความลึกของโพรงที่ 70 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ที่ได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมี ความลึกของโพรงที่ 80 เมตร และความสูงของโพรง 5 เมตร

บทที่ 4

การคำนวณด้วย Profile Function

4.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการคำนวณด้วย Profile Function คือ การนำผลมาเปรียบเทียบกับผลของการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง

4.2 การคำนวณด้วย Profile Function

Singh (1992) กล่าวว่า การทรุดตัวเป็นผลมาจากการขุดเจาะใต้ดินซึ่งจะส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนที่ของชั้นดินหรือชั้นหินที่อยู่ด้านบน ขอบเขตของการทรุดตัวจะขึ้นกับขนาดของโพรงที่จะส่งผลต่อความไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นการทรุดตัวของผิวดินจึงสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ใต้ดินที่เกิดจากการถล่มในโพรงใต้ดิน การทรุดตัวของผิวดินโดยทั่วไปจะนำมาซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ด้านข้าง

การทรุดตัวของผิวดินเกิดได้ 3 แบบ คือ

- 1) มีรอยแตก ร่องแยก หรือระดับของการแตก
- 2) บ่อหรือหลุมยุบ
- 3) เกิดเป็นแอ่งน้ำหรือเป็นรูปท้องช้าง

การแตกของผิวดินอาจจะอยู่ในรูปแบบของการเปิดรอยแตก ระดับการเลื่อนไถล หรือโพรงที่อยู่ในบ่อ และผลสะท้อนของความเค้นดึงและความเค้นเฉือนใต้ดิน

การคำนวณด้วย Profile function จะสามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องป้อนเข้าไปในสมการประกอบด้วยการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรง (d) มุมที่วัดจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw, γ) ระยะทางในแนวระนาบ (x) arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่การทรุดตัวของผิวดิน (B)

การคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function จะใช้สมการ

$$S(x) = \frac{1}{2} S_{\max} \left[1 - \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (4.1)$$

การคำนวณความชัน

$$G(x) = S'(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} \frac{c}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \quad (4.2)$$

การคำนวณค่าส่วนโค้ง

$$\rho(x) = S''(x) = S_{\max} \frac{c^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (4.3)$$

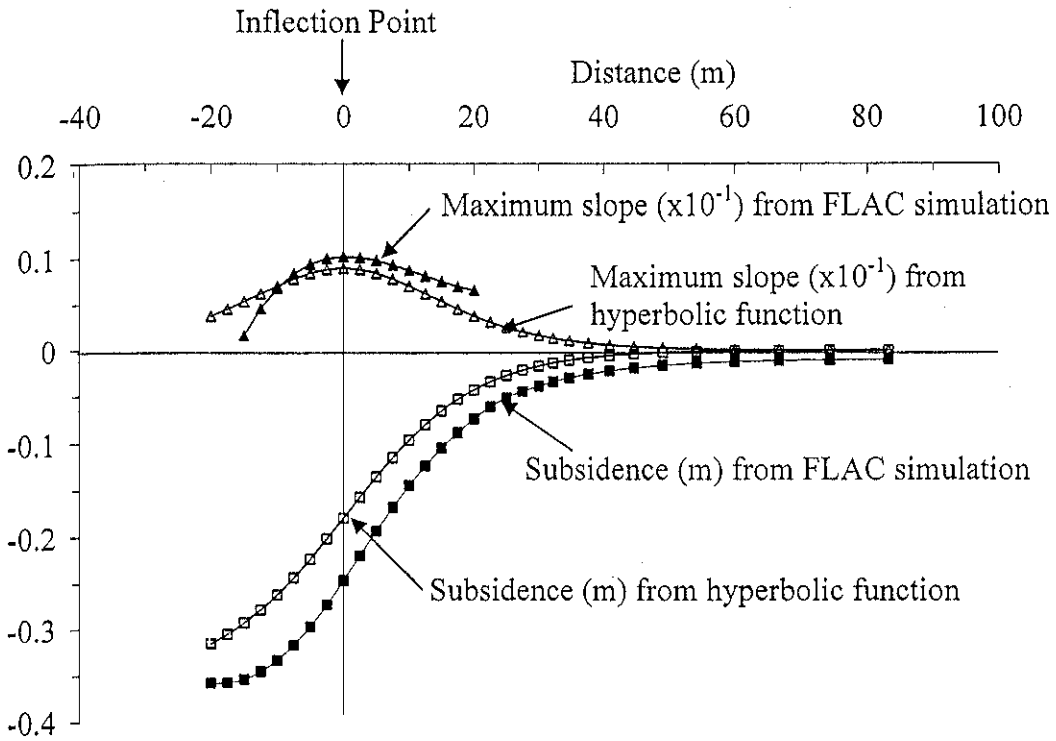
การคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวนอน

$$u(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} \frac{bc}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \quad (4.4)$$

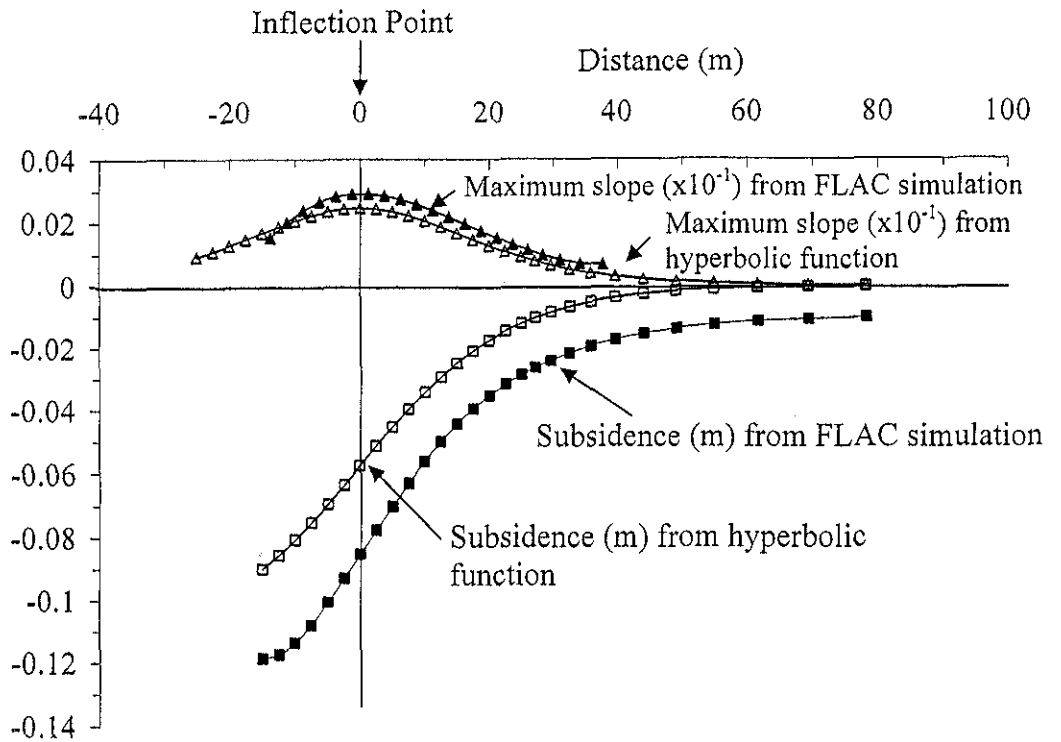
การคำนวณความเครียดในแนวนอน

$$\varepsilon(x) = S_{\max} \frac{bc^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (4.5)$$

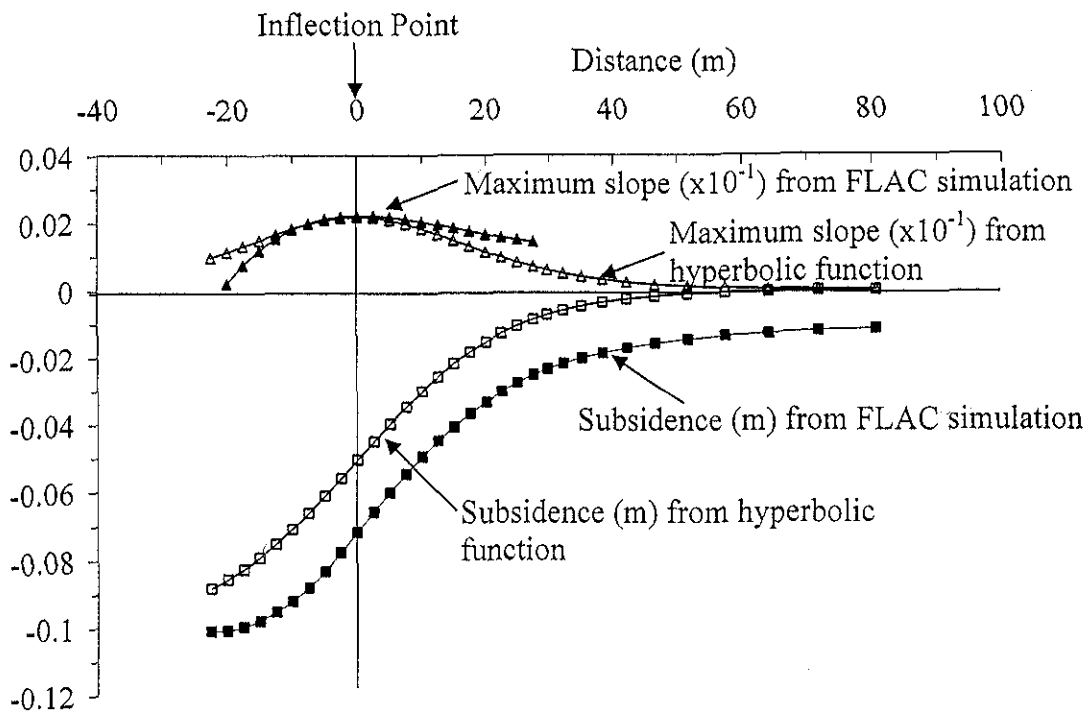
ในงานวิจัยนี้ได้นำผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรมจากบทที่ 3 มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการข้างต้นซึ่งสรุปได้ว่า Profiles ของการทรุดตัวจากทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกันอย่างดี โดยที่ผลจากแบบจำลองจะมีค่าการทรุดตัวสูงกว่าผลที่ได้จาก Profile Function ประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของ hyperbolic equation ที่กำหนดให้ค่าการทรุดตัวเข้าใกล้ศูนย์ในจุดที่ไกลจากโรงบนผิวดิน รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบ Profile ของการทรุดตัวของผิวดินและค่าความชันสูงสุดที่คำนวณได้จากทั้ง 2 วิธี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีความเหมาะสมในการจำลองการทรุดตัวได้อย่างสมจริงและเป็นไปตามหลักการที่ใช้อยู่ในระบบสากล (Singh, 1992)



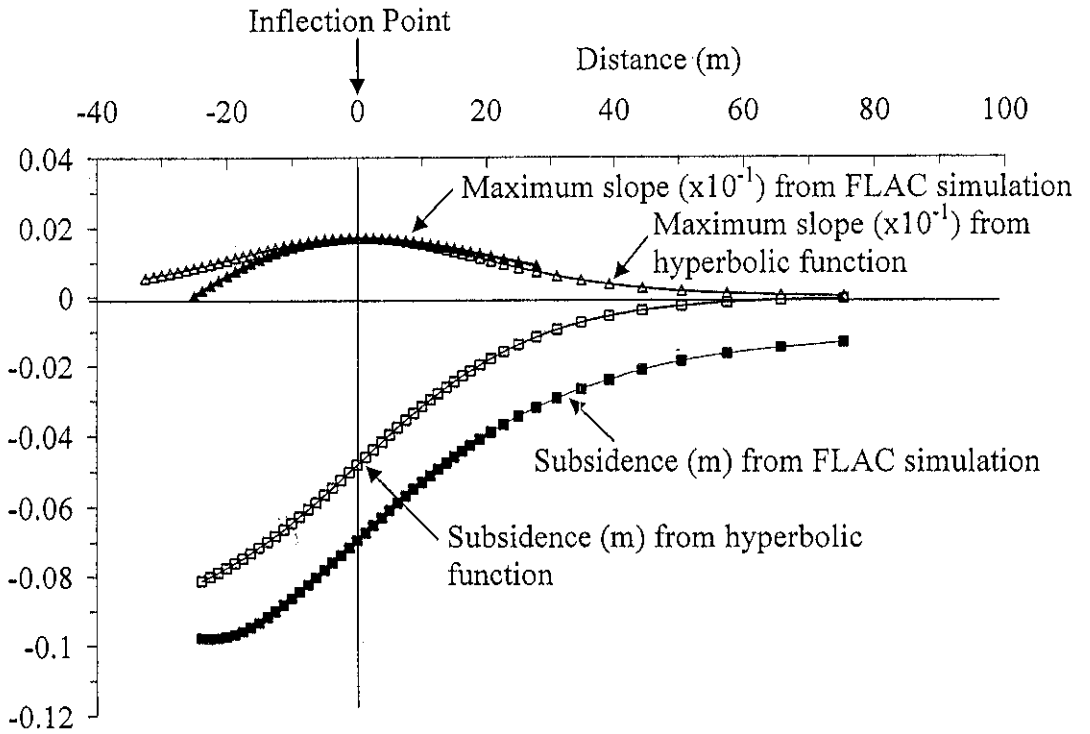
รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 20 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร



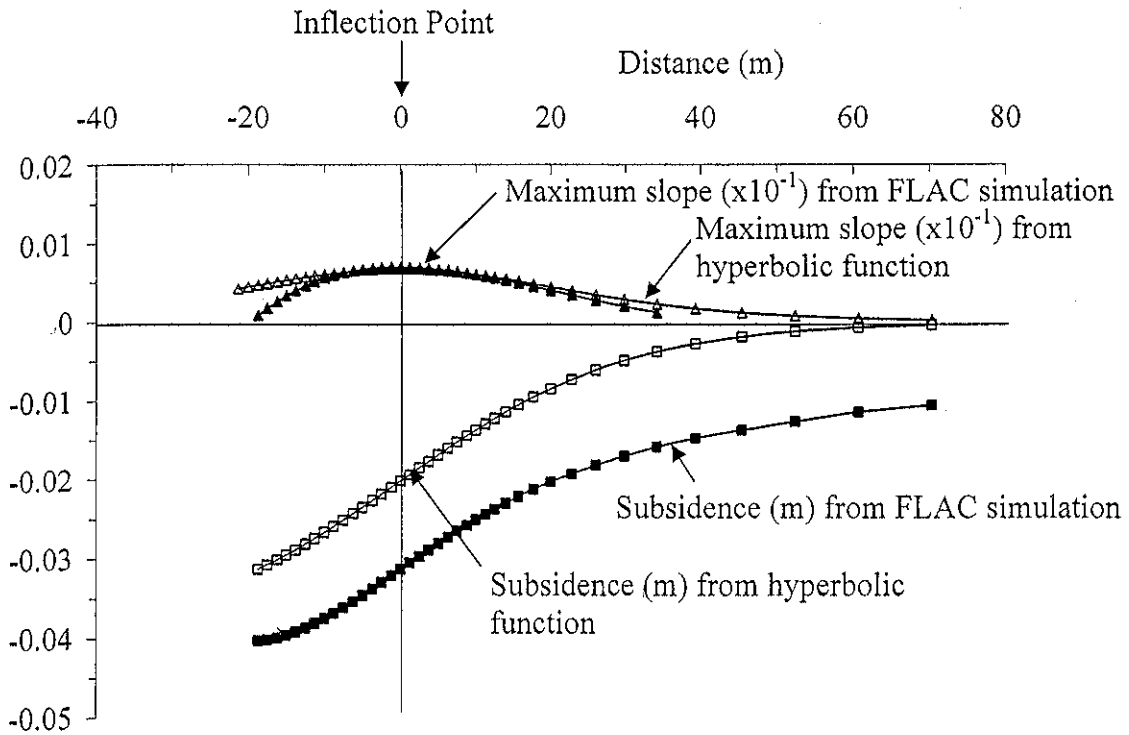
รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับการคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 40 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร



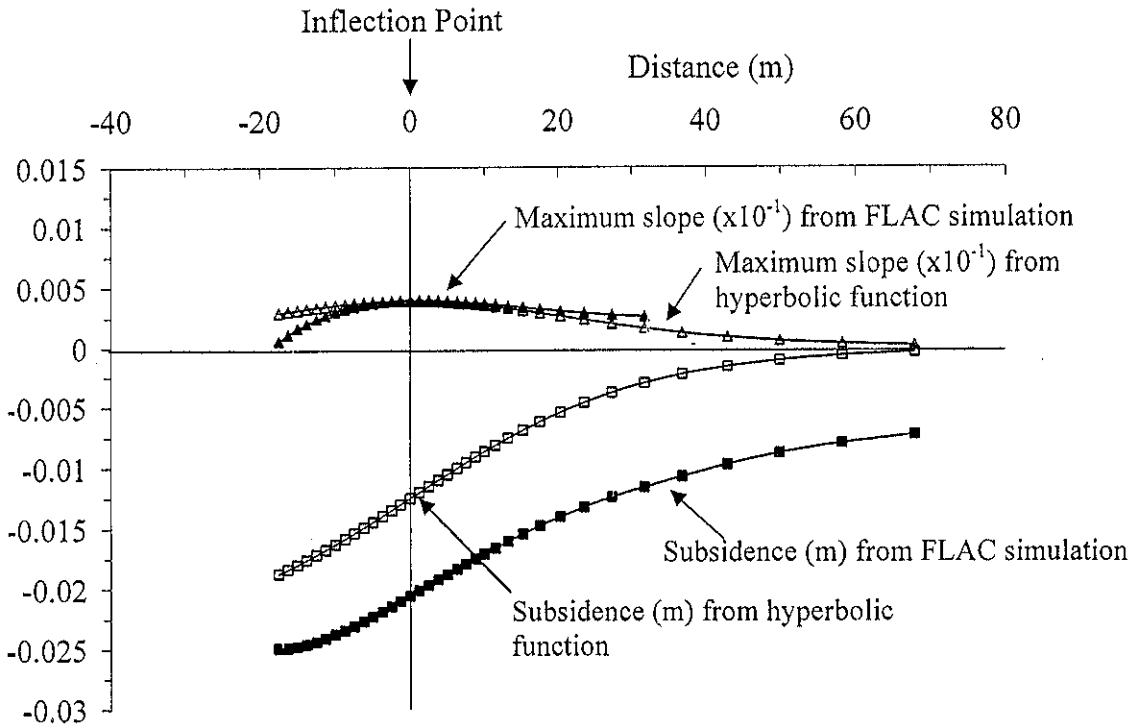
รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับการคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 60 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร



รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับการคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 20 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 60 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร



รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับ การคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 40 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 60 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร



รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วย FLAC กับการคำนวณด้วย hyperbolic function ที่ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินเท่ากับ 60 MPa ความลึกของโพรงเกลือเท่ากับ 60 เมตร และความกว้างของโพรงเกลือเท่ากับ 40 เมตร

บทที่ 5

การคำนวณด้วย SALT_SUBSID

5.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ เพื่อคำนวณการทรุดตัวของผิวดินโดยอาศัยโปรแกรม SALT_SUBSID เพื่อตรวจสอบผลว่ามีความสอดคล้องกับการคำนวณด้วยวิธีอื่นที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 และ 4 หรือไม่

5.2 การคำนวณ SALT_SUBSID

โปรแกรม SALT_SUBSID ถูกพัฒนาโดย บริษัท RE/SPEC Inc. เพื่อมอบให้กับ Solution Mining Institute สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือ โพแทช และถ่านหิน โปรแกรมนี้ยังใช้วิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในเชิงเวลาด้วย ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวกับเวลา แสดงภาพตัดขวางการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว เส้นชั้นการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวสามารถป้อนข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมด้วย

ค่าคงที่ที่ Input ให้กับโปรแกรมสำหรับการคำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β สำหรับเหมืองละลาย และ Y_0 , β และ N สำหรับเหมืองแบบแห้ง โดยตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการทรุดตัวสูงสุดได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการทรุดตัว ซึ่งการทรุดตัวที่ตำแหน่งใด ๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x,y,t)$ มีสมการทั่วไปดังนี้

$$Z(x,y,t) = Z_u(x,y) \cdot G(t) \quad (5.1)$$

$$G(t) = Y_{ss} \cdot t + Y_0 [1 - \exp(-\beta E^N t)] \quad \text{และ} \quad (5.2)$$

$$G(t) = 1 \quad \text{ถ้า} \quad Y_{ss} \cdot t + Y_0 [1 - \exp(-\beta E^N t)] > 1 \quad (5.3)$$

โดยที่ Y_{ss} , Y_0 , β , N คือ Model parameters

t คือ เวลาที่นับตั้งแต่เริ่มขุดเจาะโพรง

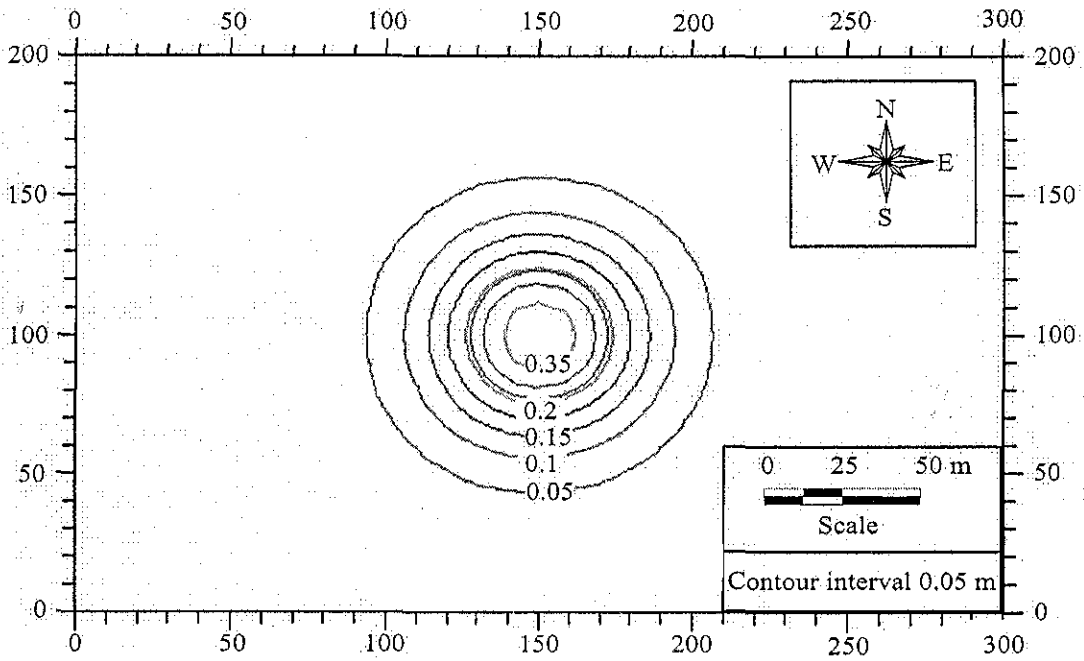
E คือ อัตราส่วนการขุดเจาะของเหมือง (Extraction ratio)

Z_u คือ การเคลื่อนตัวของพื้นผิวสูงสุดที่ตำแหน่งใด ๆ

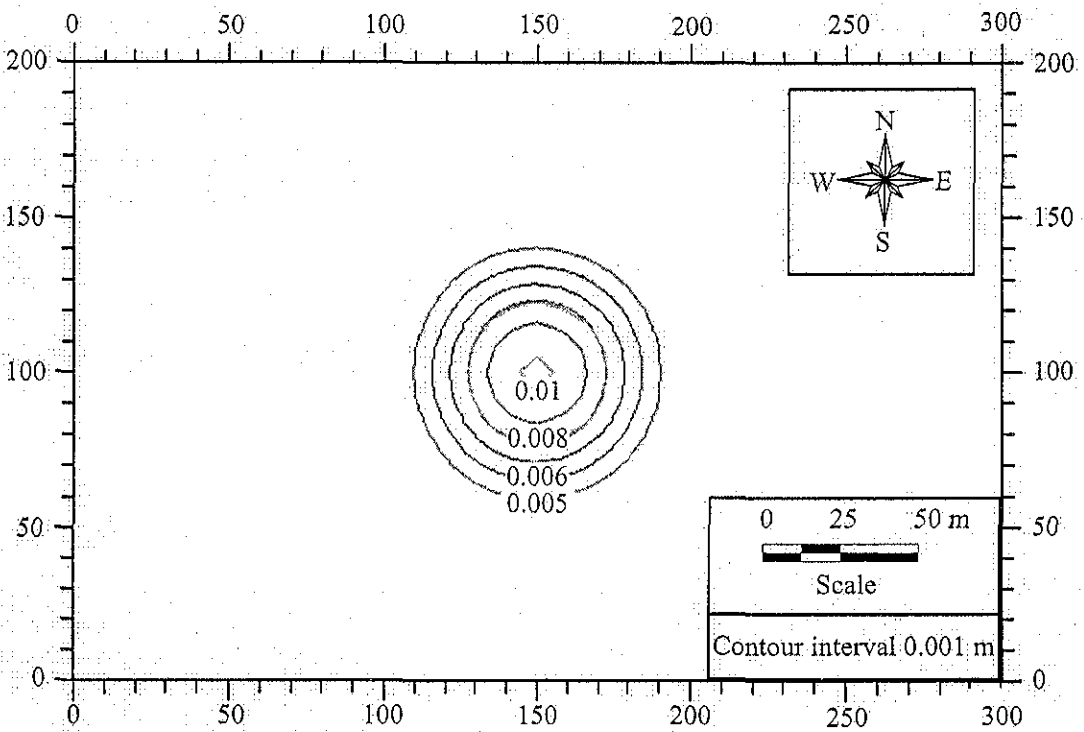
ในเงื่อนไข $G(t) = 1$ จะใช้เมื่อโพรงถูกปิดอย่างสมบูรณ์ โดยที่ตัวแปร Y_{ss} เป็นตัวแทนของ อัตราการปิดตัวคงที่และ Y_0 เป็นตัวแทนของอัตราการปิดตัวไม่คงที่ ส่วนตัวแปร β และ N คือ Empirical constants ที่ใช้กับแบบจำลองที่มีอัตราการปิดตัวไม่คงที่ ในกรณีที่เป็นการเหมืองแห้งตัวแปร Y_{ss} จะกำหนดให้เป็น 0

5.3 ผลการคำนวณ SALT_SUBSID

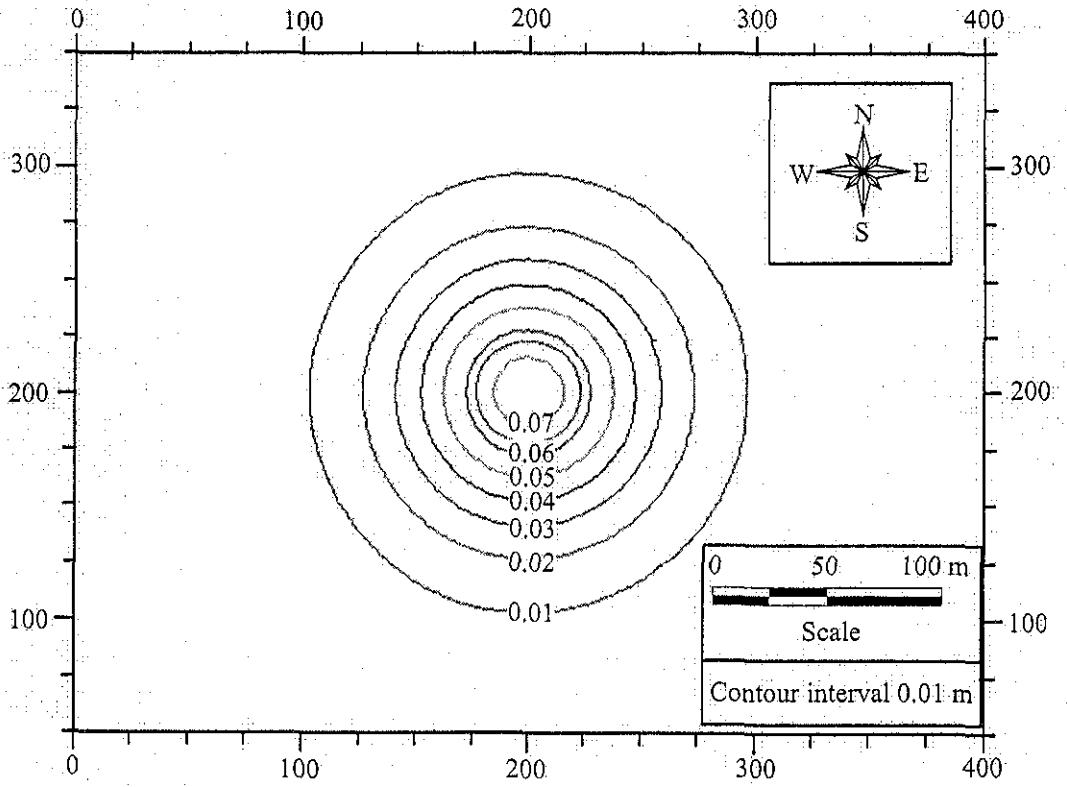
ผลจากการคำนวณด้วย SALT_SUBSID จะแสดงเป็นเส้นชั้นความสูงของการทรุดตัว ในชุดการจำลองรูปแบบต่าง ๆ (รูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.3) ผลการคำนวณสามารถระบุได้ว่า ค่าการทรุดตัว จากการคำนวณด้วย Profile function (บทที่ 4) และจากการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์โดยใช้ โปรแกรม FLAC (บทที่ 3) ให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี



รูปที่ 5.1 ภาพแสดงเส้นชั้นความสูงที่คำนวณได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID ที่มีความลึกของหลังกาโพรง 40 m และความสูงของโพรง 5 m



รูปที่ 5.2 ภาพแสดงเส้นชั้นความสูงที่คำนวณได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID ที่มีความลึกของหลังกาโพรง 60 m และความสูงของโพรง 5 m



รูปที่ 5.3 ภาพแสดงเส้นชั้นความสูงที่คำนวณได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID ที่มีความลึกของหลังกาโพรง 80 m และความสูงของโพรง 5 m

บทที่ 6

การพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรม

6.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของบทนี้คือ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการทรุดตัวในภาคสนามโดยอาศัยวิธีทางสถิติเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวสูงสุด ค่าความชันสูงสุด ส่วนโค้งของผิวดิน ความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เชิงสถิติของข้อมูลการสำรวจพื้นผิวบริเวณที่เกิดการทรุดตัว และการพัฒนาสมการเพื่อใช้ประเมินลักษณะการทรุดตัวในเชิง Hyperbolic function จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในภาคสนาม

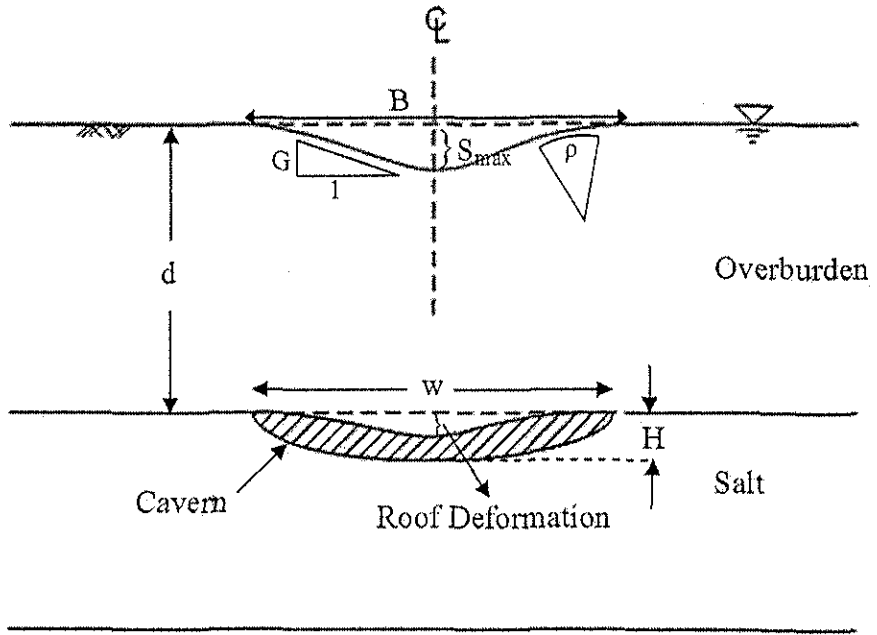
6.2 การวิเคราะห์เชิงสถิติของข้อมูลการสำรวจในภาคสนาม

วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายขนาดของการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ค่าความชันสูงสุด (Maximum Slope) ส่วนโค้งของผิวดิน (Curvature) ความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือ ด้วยการนำวิธีเชิงสถิติ (Regression analysis) มาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการสำรวจพื้นที่ที่มีการทรุดตัว ในการวิเคราะห์เชิงสถิตินี้จะสมมติให้แบบจำลองของโพรงเกลือละลายในลักษณะครึ่งวงรีและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่กว้างที่สุด โดยจะกำหนดให้อยู่ตรงรอยต่อระหว่างชั้นเกลือหินกับชั้นหินปิดทับ โดยที่ผิวดิน ชั้นหินปิดทับ และชั้นเกลือจะวางตัวขนานกันในแนวระนาบ รูปที่ 6.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยนำรัศมีของการทรุดตัว ($B/2$) มาใช้เป็นตัวแทนขอบเขตพื้นที่ที่มีการทรุดตัว ซึ่งมีเกณฑ์ในการพิจารณา คือ บริเวณที่มีการทรุดตัวในแนวตั้งน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เซนติเมตร จะถือว่าเป็นขอบเขตที่ไม่มีการทรุดตัว

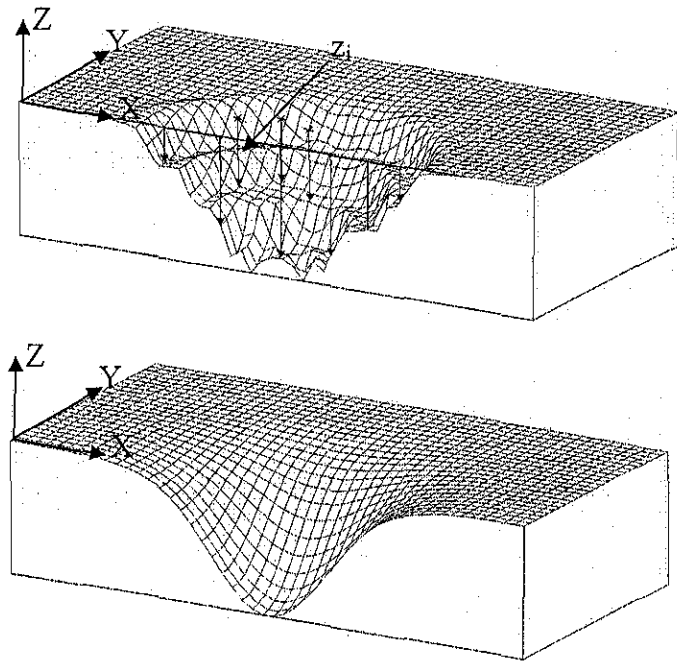
6.3 การพัฒนาสมการควบคุม

ข้อมูลการสำรวจที่กล่าวถึงในที่นี้คือการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของผิวดิน (z) ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยคำนึงถึงพิกัด x - y (รูปที่ 6.2) สมการ hyperbolic function ซึ่งจะใช้เป็นสมการควบคุมลักษณะของ Profile การทรุดตัวบนผิวดิน ซึ่งสมการการทรุดตัวจะมีการคำนวณค่า $S(r_i)$ (ขนาดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง ' i ' โดยที่ ' i ' ผันแปรตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนการตรวจวัดทั้งหมด n) ดังนี้

$$S(r_i) = a_0 \tanh(10a_1r_i - a_2) + a_3 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6.1)$$



รูปที่ 6.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยนี้



รูปที่ 6.2 การ Regression analysis ของข้อมูลการสำรวจพื้นที่การทรุดตัว (รูปบน) ซึ่งถูกแทนด้วย profile hyperbolic function (รูปล่าง) โดยที่มาตราส่วนในแกนตั้งมีขนาดมากเกินจริง

$$\text{โดยที่ } r_i = \sqrt{(x_i - a_4)^2 + (y_i - a_5)^2} \quad (6.2)$$

r_i = ระยะทางจากจุดข้อมูล 'i' ถึงศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล

x_i, y_i = พิกัด x, y ของการตรวจวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 'i'

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 และ a_5 คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบของการทรุดตัวและพิกัดตำแหน่งของการทรุดตัวสูงสุดซึ่งนิยามได้ดังนี้

a_0 = ครึ่งหนึ่งของการทรุดตัวสูงสุด (S_{max})

a_1 = ค่าปรับแก้ขนาด (scaling factor)

a_2 = ค่าปรับแก้การเลื่อนตำแหน่งในแนวระนาบ (planar offset)

a_3 = ค่าปรับแก้การเลื่อนตำแหน่งในแนวตั้ง (vertical offset)

a_4 = ค่าเฉลี่ยของพิกัด x_i ($\Sigma x_i/n$), และ

a_5 = ค่าเฉลี่ยของพิกัด y_i ($\Sigma y_i/n$)

ในทำนองเดียวกันค่าความลาดชันสูงสุด (Maximum Slope, G) ของการทรุดตัวบนผิวดินที่จุด Inflection Point (จุดที่มีค่าความชันของการทรุดตัวสูงสุด) สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (5.3) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสมการ (6.2)

$$G = S'(r_i) = 10a_0 \times a_1 \operatorname{sech}^2(10a_1r_i - a_2) \quad (6.3)$$

ค่าส่วนโค้งสูงสุด (Maximum Curvature, ρ) ของผิวดินสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (5.4) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของสมการ (5.3)

$$\rho = S''(r_i) = -200a_0a_1^2 \operatorname{sech}^2(10a_1r_i - a_2) \times \tanh(10a_1r_i - a_2) \quad (6.4)$$

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Regression analysis ของข้อมูลการสำรวจพื้นผิวในบริเวณที่มีการทรุดตัวจะใช้สมการที่ 6.1 เพื่อให้ได้มาซึ่งองค์ประกอบของการทรุดตัวทั้ง 3 แบบ โดยองค์ประกอบของการทรุดตัวนี้จะนำไปสร้างความสัมพันธ์กับความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือละลาย ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป วิธี Regression analysis นี้ยังสามารถให้ Profile ของการทรุดตัวที่ราบเรียบใน 3 มิติ ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งผลจากการคำนวณจะมีความแม่นยำหรือไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของข้อมูลที่ได้ตรวจวัดในภาคสนาม

เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขึ้นเพื่อมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของโดยเฉพาะ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถคำนวณความลึก และเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงรวมไปถึงการยุบตัวของหลังคาโพรงและ รัศมีการทรุดตัวของผิวดินได้ (การสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณจะกล่าวถึงในบท ต่อไป) โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะเขียนอยู่ในรูปของภาษา C ซึ่ง source code ของโปรแกรมได้ ให้ไว้ในภาคผนวก ก และโปรแกรมสำหรับใช้คำนวณความลึก เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง การยุบตัว ของหลังคาโพรงและรัศมีการทรุดตัวของผิวดินนั้นจะเขียนอยู่ในรูปของ Microsoft excel

Singh (1992) ได้นำเสนอรูปแบบ Profile Function ต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวแทนลักษณะของ การทรุดตัวเหนืออุโมงค์ของเหมืองที่อยู่ใต้ดิน และวิธี Hyperbolic Function ของ Singh ได้ถูก นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการเข้าใจและสามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับ ผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ (ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4) อย่างไรก็ตามยังมีสมการ รูปแบบอื่นอีกมากที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดิน (Nieland, 1991; Shu and Bhattacharyya, 1993; Cui et al., 2000; Asadi et al., 2005) ซึ่งจะไม่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

บทที่ 7

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์

7.1 วัตถุประสงค์

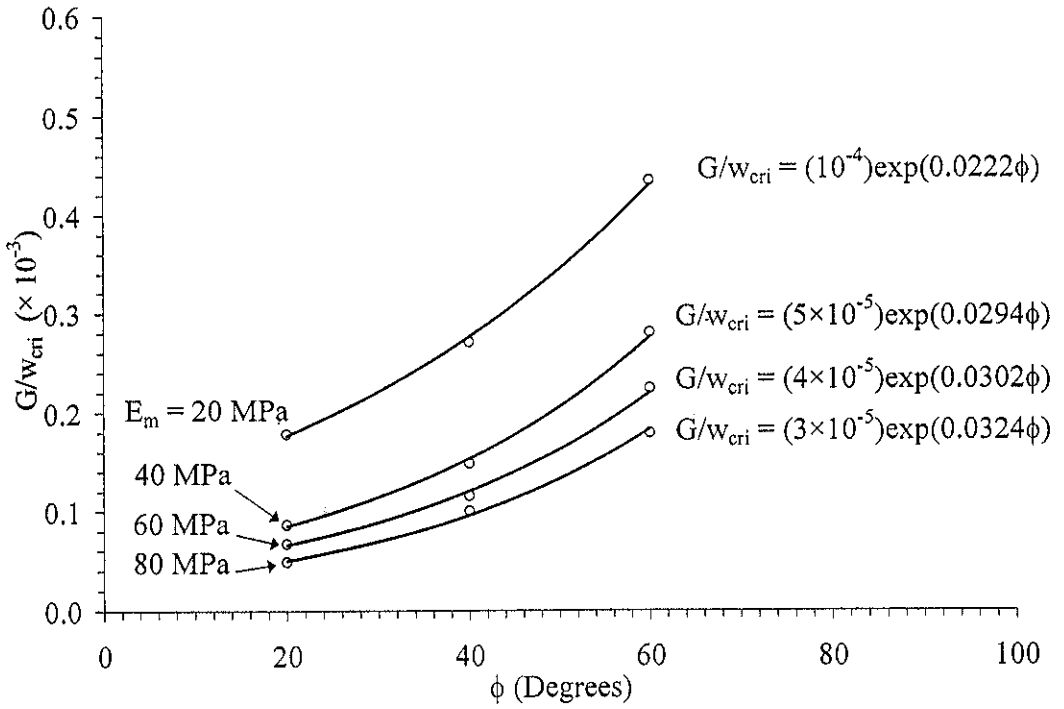
วัตถุประสงค์ของการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์คือ เพื่อที่จะนำมาใช้คาดคะเน ความลึก และเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือที่ถูกละลายบนชั้นเกลือหินรวมไปถึงการยุบตัวของ หลังกาโพรง และรัศมีการทรุดตัวของผิวดิน โดยอาศัยองค์ประกอบของการทรุดตัวที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 และในบทนี้จะอธิบาย การสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้มาซึ่งลักษณะของโพรง เกลือที่ต้องการ รวมไปถึงแสดงตัวอย่างการคำนวณด้วยสมการที่พัฒนาขึ้น

7.2 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

ผลการคำนวณทุกรูปแบบที่เสนอไว้ในบทที่ 3 ทำให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่จุด วิกฤต (เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดก่อนเกิดการพังของชั้นหินปิดทับ) ซึ่งสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ กับความลึกของโพรง (d) ค่าความชันของการทรุดตัวสูงสุด (G) รัศมีการทรุดตัวของผิวดิน ($B/2$) และ คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับ โดยการยุบตัวของหลังกาโพรง (R_u) จะนำมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ซึ่งการทรุดตัวที่อยู่ในสภาวะวิกฤตนี้ได้ถูกนิยามโดย Singh (1992) ความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมาจะใช้วิธีการคาดคะเนลักษณะของโพรงเกลือที่อยู่ใต้ดิน โดย อาศัยการตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินในภาคสนาม

รูปที่ 7.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความชันของการทรุดตัวสูงสุด ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดวิกฤต (G/w_{cri}) กับค่ามุมเสียดทานของชั้นหินปิดทับ (ϕ) โดยจะผันแปรค่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ซึ่งอัตราส่วน G/w_{cri} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ามุมเสียดทานซึ่ง สามารถแทนได้ด้วยสมการ Exponential โดยที่ค่าคงที่ (Empirical Constant) A_0 และ B_0 จะขึ้นกับค่า สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินจะสัมพันธ์กับ A_0 และ B_0 ในรูปแบบของสมการยกกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 7.1 การพัฒนาค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัวของ ผิวดินสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$G/w_{cri} = 0.0012E_m^{-0.849} \exp(0.0103\phi E_m^{0.27}) \quad [m^{-1}] \quad (7.1)$$



$$G/w_{cri} = A_0 \cdot \exp(B_0 \phi), \text{ where; } A_0 = \alpha_{A0} \cdot E_m^{\beta_{A0}}; B_0 = \alpha_{B0} \cdot E_m^{\beta_{B0}}$$

E_m (MPa)	A_0	α_{A0}	β_{A0}	B_0	α_{B0}	β_{B0}
20	10^{-4}	0.0012	-0.849	0.0222	0.0103	0.27
40	5×10^{-5}			0.0294		
60	4×10^{-5}			0.0302		
80	3×10^{-5}			0.0324		

รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัวต่อความกว้างของโพรงเกลือที่จุดวิกฤต (G/w_{cri}) กับค่ามุมเสียดทาน (ϕ) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี $A_0, B_0, \alpha_{A0}, \beta_{A0}, \alpha_{B0}$ และ β_{B0} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)

ความลึกของโพรงที่จุดวิกฤต (d) จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหิน (E_m) ดังแสดงในรูปที่ 7.2 การคำนวณหาความลึกของโพรงจะทำในรูปของอัตราส่วนความลึกของโพรงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางโพรงที่จุดวิกฤต (d/w_{cri}) ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการที่อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่นมวลหินดังสมการ

$$d/w_{cri} = (-0.0213\phi^{-0.636})E_m + 1.55\exp(-0.0163\phi) \quad (7.2)$$

การสร้างความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณการยุบตัวของหลังคาโพรงในแนวตั้ง (R_s) และรัศมีการทรุดตัวของผิวดิน ($B/2$) ซึ่งจะพิจารณาโดยไม่ขึ้นกับสมการข้างต้น สามารถพัฒนาได้เป็นสมการ (7.3) และ (7.4) โดยที่กราฟความสัมพันธ์แสดงไว้ในรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4

$$R_s/S_{max,cri} = (10^{-5}\phi - 0.0058)E_m - 0.0519\phi + 4.393 \quad (7.3)$$

$$B/w_{cri} = 0.109\exp(-0.0576\phi)E_m + 2.844\exp(-0.0094\phi) \quad (7.4)$$

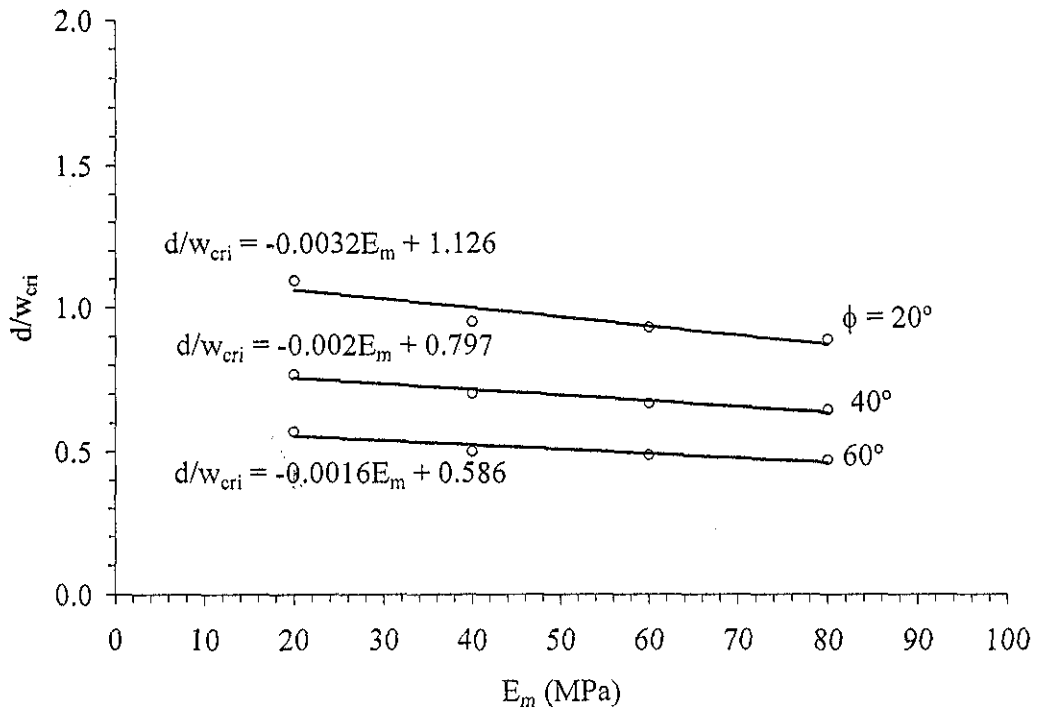
ในทำนองเดียวกันยังสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ที่สถานะ Sub Critical ได้ โดยผลลัพธ์ของความสัมพันธ์นี้ได้แสดงในรูปที่ 7.5 ถึงรูปที่ 7.7 และสามารถพัฒนาเป็นสมการ (7.5) ถึง (7.7) ดังนี้

$$G/w = 0.0012E_m^{-0.412} \cdot (S_{max}^{0.36}E_m^{0.12}) \quad [m^{-1}] \quad (7.5)$$

$$d/w = (-0.0002E_m + 0.132)G^{(-0.7E_m^{-0.1743})} \quad (7.6)$$

$$R_s/w = (0.205E_m^{-0.701}) \cdot S_{max}^{(0.0432E_m^{0.386})} \quad (7.7)$$

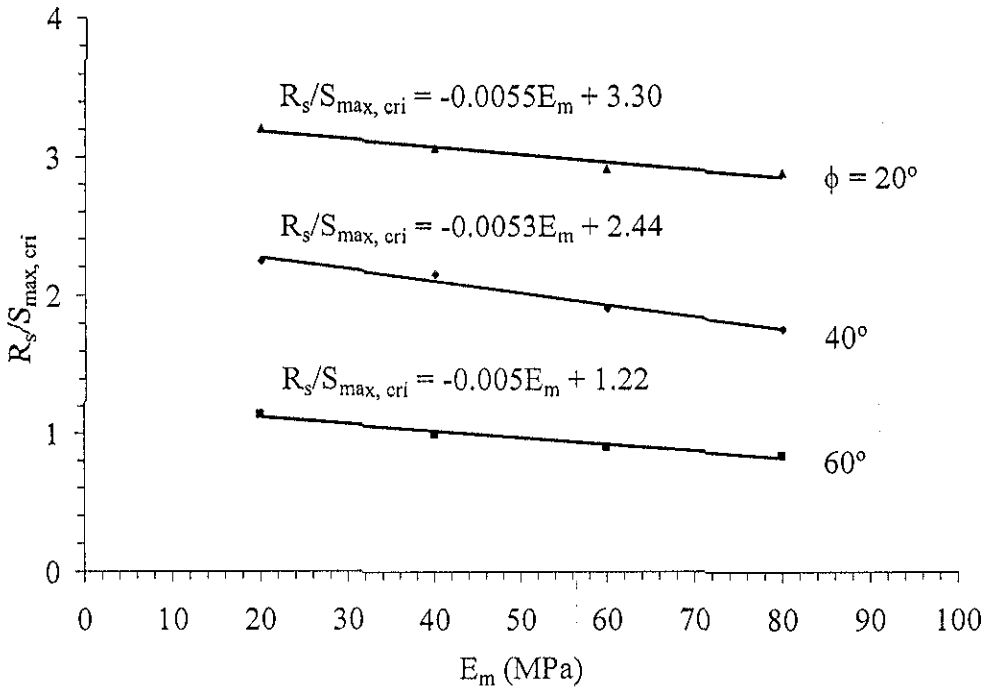
สมการที่ (7.1) ถึง (7.7) เป็นผลลัพธ์สำคัญของงานวิจัยนี้ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเชื่อมโยงระหว่างลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่สามารถตรวจวัดได้จริงกับความลึกของเส้นผ่าศูนย์กลาง และการยุบตัวของหลังคาโพรงที่ถูกคาดคะเนขึ้นจากสมการดังกล่าว



$$d/w_{cri} = -A_1 \cdot E_m + B_1, \text{ where; } A_1 = \alpha_{A1} \cdot \phi^{\beta_{A1}}; B_1 = \alpha_{B1} \cdot \exp(\beta_{B1} \cdot \phi)$$

ϕ (Degrees)	A_1	α_{A1}	β_{A1}	B_1	α_{B1}	β_{B1}
20	0.0032	0.0213	-0.636	1.126	1.55	-0.0163
40	0.0020			0.797		
60	0.0016			0.586		

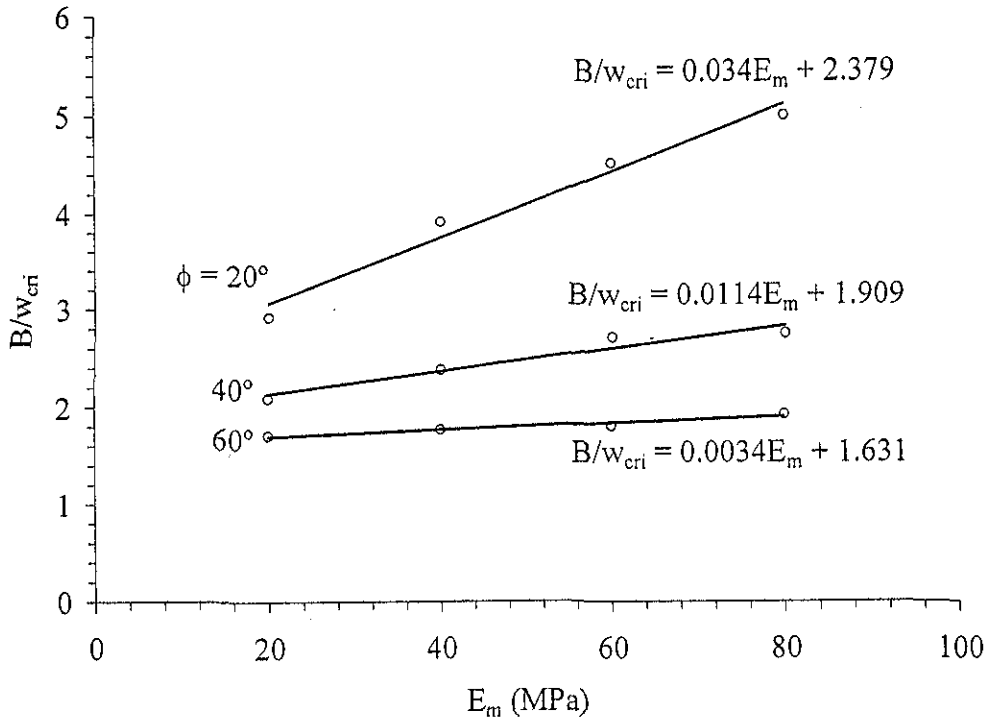
รูปที่ 7.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความลึกของโพรงต่อความกว้างของโพรงเกลื่อที่จุดวิกฤต (d/w_{cri}) กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปร ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) โดยมี A_1 , B_1 , α_{A1} , β_{A1} , α_{B1} และ β_{B1} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)



$$R_s/S_{max, cri} = -A_2 \cdot E_m + B_2, \text{ where; } A_2 = \alpha_{A2} \cdot \phi + \beta_{A2}; B_2 = \alpha_{B2} \cdot \phi + \beta_{B2}$$

ϕ (Degrees)	A_2	α_{A2}	β_{A2}	B_2	α_{B2}	β_{B2}
20	0.0055	-10^{-5}	0.0058	3.30	-0.0519	4.393
40	0.0053			2.44		
60	0.0050			1.22		

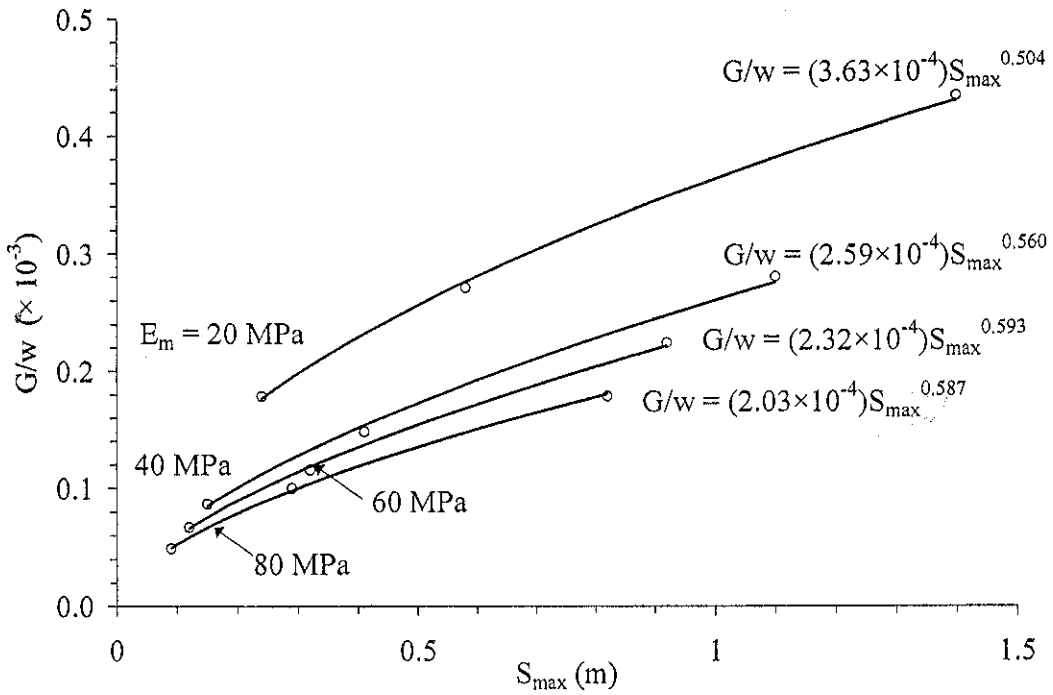
รูปที่ 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโพรงต่อค่าการทรุดตัวสูงสุดที่จุดวิกฤต ($R_s/S_{max, cri}$) กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปร ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) โดยมี A_2 , B_2 , α_{A2} , β_{A2} , α_{B2} และ β_{B2} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)



$$B/w_{cri} = A_3 \cdot E_m + B_3, \text{ where; } A_3 = \alpha_{A3} \cdot \exp(\beta_{A3} \cdot \phi); B_3 = \alpha_{B3} \cdot \exp(\beta_{B3} \cdot \phi)$$

ϕ (Degrees)	A_3	α_{A3}	β_{A3}	B_3	α_{B3}	β_{B3}
20	0.0340	0.11	-0.058	2.379	2.844	-0.0094
40	0.0114			1.909		
60	0.0034			1.631		

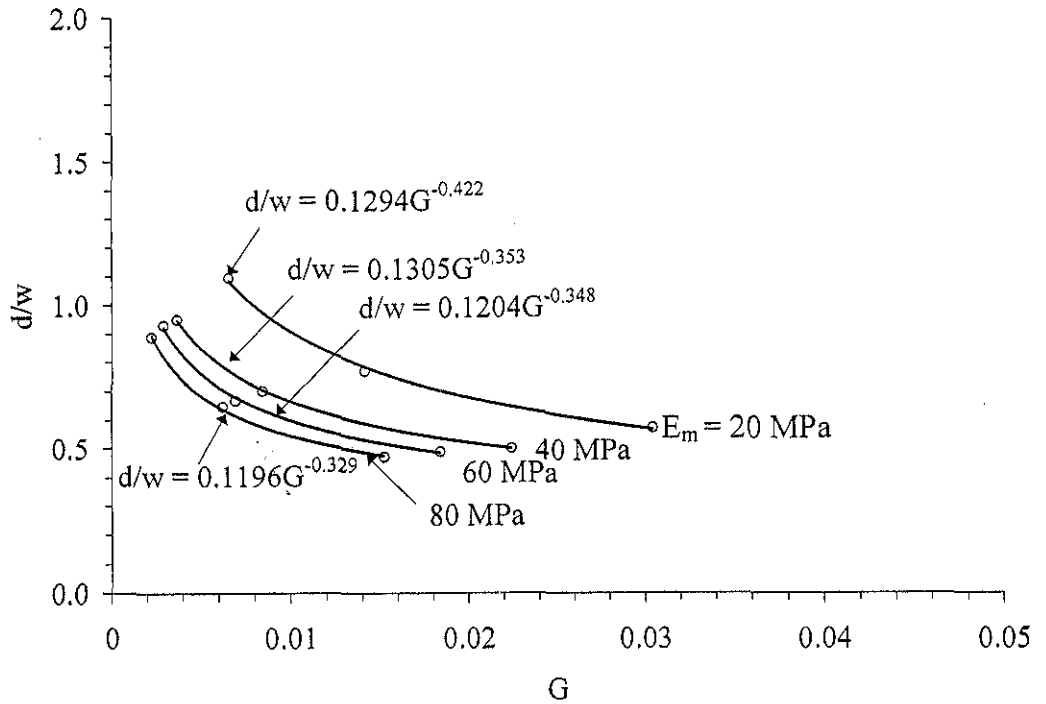
รูปที่ 7.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของขอบเขตการทรุดตัวต่อความกว้างของโพรงเกลือที่จุดวิกฤต (B/w_{cri}) กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) ผันแปร ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) โดยมี A_3 , B_3 , α_{A3} , β_{A3} , α_{B3} และ β_{B3} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)



$$G/w = A_4 \cdot S_{\max}^{B_4}, \text{ where; } A_4 = \alpha_{A4} \cdot E_m^{\beta_{A4}}, B_4 = \alpha_{B4} \cdot E_m^{\beta_{B4}}$$

E_m (MPa)	A_4	α_{A4}	β_{A4}	B_4	α_{B4}	β_{B4}
20	3.63×10^{-4}	0.0012	-0.412	0.504	0.36	0.12
40	2.59×10^{-4}			0.560		
60	2.32×10^{-4}			0.593		
0	2.03×10^{-4}			0.587		

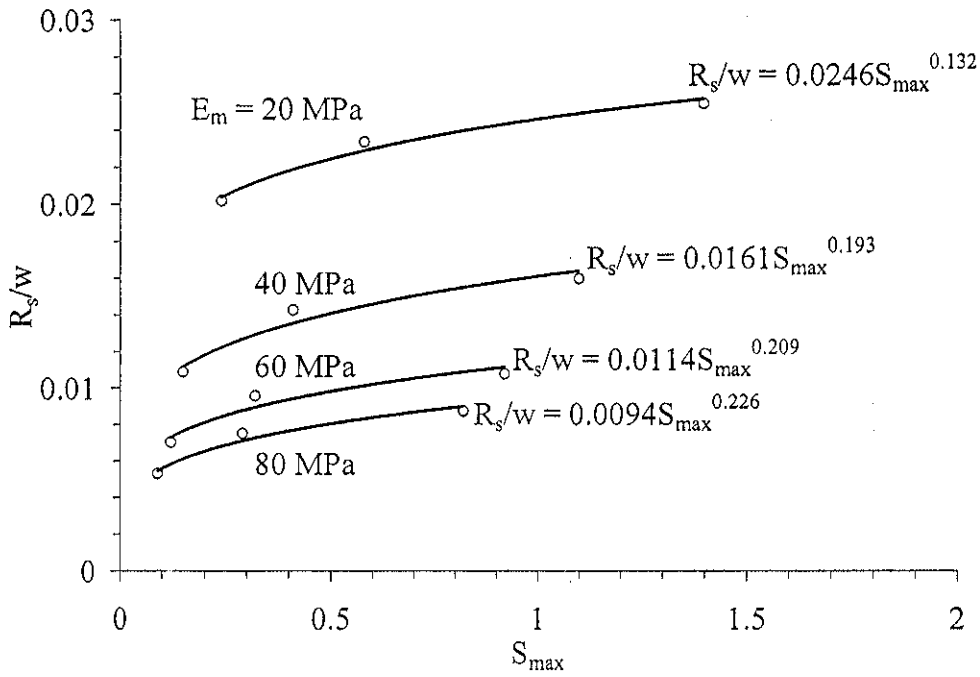
รูปที่ 6.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัวต่อความกว้างของโพรงเกลือ (G/w) กับค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{\max}) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี A_4 , B_4 , α_{A4} , β_{A4} , α_{B4} และ β_{B4} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)



$$d/w = A_5 \cdot G^{-B_5}, \text{ where; } A_5 = \alpha_{A_5} \cdot E_m + \beta_{A_5}; B_5 = \alpha_{B_5} \cdot E_m + \beta_{B_5}$$

E_m (MPa)	A_5	α_{A_5}	β_{A_5}	B_5	α_{B_5}	β_{B_5}
20	0.1294	-0.0002	0.132	0.422	0.7	-1.743
40	0.1305			0.353		
60	0.1204			0.348		
80	0.1196			0.329		

รูปที่ 7.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความลึกของโพรงต่อความกว้างของโพรงเกลือ (d/w) กับค่าความชันสูงสุดของการหลุดตัว (G) ผ่านแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี A_5 , B_5 , α_{A_5} , β_{A_5} , α_{B_5} และ β_{B_5} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)



$$R_s/w = A_6 \cdot S_{\max}^{B_6}, \text{ where; } A_6 = \alpha_{A6} \cdot E_m^{\beta_{A6}}, B_6 = \alpha_{B6} \cdot E_m^{\beta_{B6}}$$

E_m (MPa)	A_6	α_{A6}	β_{A6}	B_6	α_{B6}	β_{B6}
20	0.0246	0.205	-0.701	0.132	0.0432	0.386
40	0.0161			0.193		
60	0.0114			0.209		
80	0.0094			0.226		

รูปที่ 7.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโครงต่อความกว้างของโครงเกลือ (R_s/w) กับค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{\max}) ผันแปรค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหิน (E_m) โดยมี A_6 , B_6 , α_{A6} , β_{A6} , α_{B6} และ β_{B6} เป็นค่าคงที่ (empirical constants)

7.3 ตัวอย่างการคำนวณ

วิธีการคำนวณหาค่าความลึกและเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงจากชุดตัวอย่างข้อมูลการสำรวจพื้นที่การทรุดตัวที่ให้ไว้ในตารางที่ 7.1 ผลของการ Regression analysis ข้อมูลการสำรวจ โดยใช้สมการ (6.1) สามารถคำนวณค่าการทรุดตัวบนผิวดินสูงสุดที่จุดศูนย์กลางโพรงได้เท่ากับ 0.46 เมตร จากสมการ (6.3) สามารถคำนวณค่าความชันสูงสุดของการทรุดตัวบนผิวดินที่จุด Inflection Point ได้ 0.013 ตัวอย่างนี้ถูกสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมวลหินของชั้นหินปิดทับมีค่าเท่ากับ 20 MPa ด้วยมุมเสียดทานเท่ากับ 40 องศา และสมมติให้ระดับน้ำบาดาลอยู่ที่ผิวดิน

ภายใต้สภาวะวิกฤต (Critical) เส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของโพรงสามารถคำนวณได้จากสมการ (7.1) และ (7.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 54.6 เมตรและ 41.9 เมตร ตามลำดับ การยุบตัวของหลังคาโพรงและรัศมีของการทรุดตัวสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (7.3) และ (7.4) เท่ากับ 1.02 เมตรและ 59 เมตร แต่ถ้าคำนวณภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต (Sub Critical) แล้ว เส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของโพรงสามารถคำนวณได้จากสมการ (7.5) และ (7.6) เท่ากับ 55.6 เมตร และ 43.2 เมตร โดยที่การเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโพรงและรัศมีของผลกระทบที่เกิดจากการทรุดตัวสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (7.7) และ (7.4) เท่ากับ 1.25 เมตร และ 60.6 เมตร จากผลการคำนวณจะสังเกตเห็นว่าคำตอบที่ได้จะมีอยู่ 2 ชุดคำตอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับโพรงกลื่อนั้นๆ อยู่ในสภาวะ Sub Critical หรือ Critical อย่างไรก็ตามเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง การเปลี่ยนรูปร่างของหลังคาโพรงและรัศมีการทรุดตัวสามารถคำนวณได้ถ้ารู้ค่าความลึกที่แน่นอน ในพื้นที่ที่มีการสูบน้ำกลื่อนั้นความลึกของหลังคาโพรงหรือความลึกของรอยต่อระหว่างชั้นหินปิดทับกับชั้นเกลือบ่อยครั้งจะสามารถคาดคะเนได้จากหลุมเจาะหรือจากหลุมสูบน้ำเกลือที่บริเวณใกล้เคียง

7.4 การสำรวจในภาคสนาม

การสำรวจภาคสนาม จะใช้พื้นที่บ้านโนนแสวง บ้านหนองกว้าง บ้านบ่อแดง ต.หนองกว้าง อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร พื้นที่ตำบลบ้านดุง และตำบลบ้านชัย อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี และพื้นที่อำเภอโพนพิสัย จังหวัดหนองคาย (วันที่ 2-3 เมษายน 2552) เพื่อทำการสอบเทียบกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ผลลัพธ์จากการออกภาคสนามไม่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ที่จะสามารถใช้สอบเทียบโปรแกรมได้ กล่าวคือ พื้นที่การทรุดตัวและหลุมยุบถูกน้ำท่วม อีกทั้งเจ้าของนาเกลือยังกลัวหลุมยุบที่เกิดขึ้นด้วยดินถมเพื่อความปลอดภัย และชาวบ้านที่ทำงานในอุตสาหกรรมนาเกลือบริเวณนั้นไม่ยินยอมให้เข้าไปในพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัวดังกล่าว รูปที่ 7.8 ถึงรูปที่ 7.10 แสดงหลุมยุบที่เห็นได้อย่างชัดเจนที่พบในระหว่างการสำรวจและยังไม่มีมีการฝังกลบในพื้นที่บ้านโนนแสวง บ้านหนองกว้าง ต.หนองกว้าง อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร

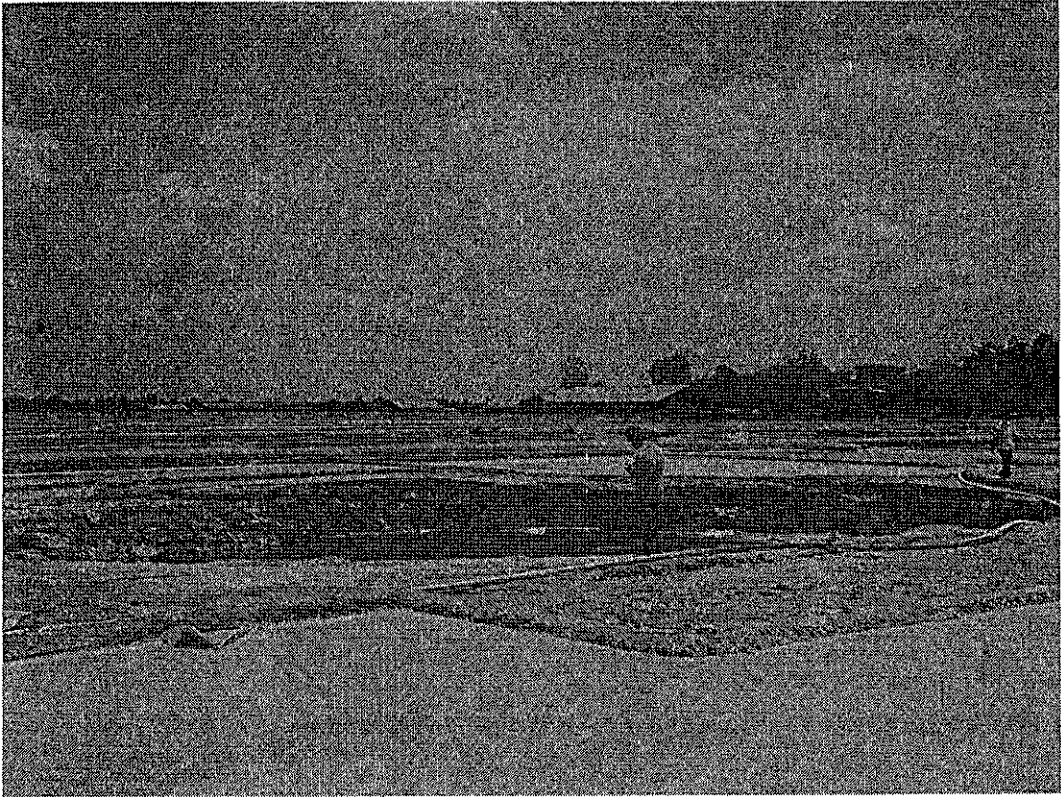
ตารางที่ 7.1 ตัวอย่างข้อมูลการสำรวจพิกัดที่ตรวจวัดในภาคสนามในพื้นที่ที่มีการทรุดตัว

i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)
1	2.5	0.0	-0.400
2	-2.5	2.5	-0.400
3	5.0	0.0	-0.400
4	3.0	4.0	-0.450
5	-5.0	5.0	-0.450
6	10.0	0.0	-0.450
7	6.0	8.0	-0.470
8	-10.0	0.0	-0.470
9	-6.0	8.0	-0.390
10	0.0	10.0	-0.390
11	9.0	12.0	-0.390
12	0.0	15.0	-0.390
13	-12.0	9.0	-0.390
14	20.0	0.0	-0.420
15	12.0	16.0	-0.420
16	-12.0	16.0	-0.270

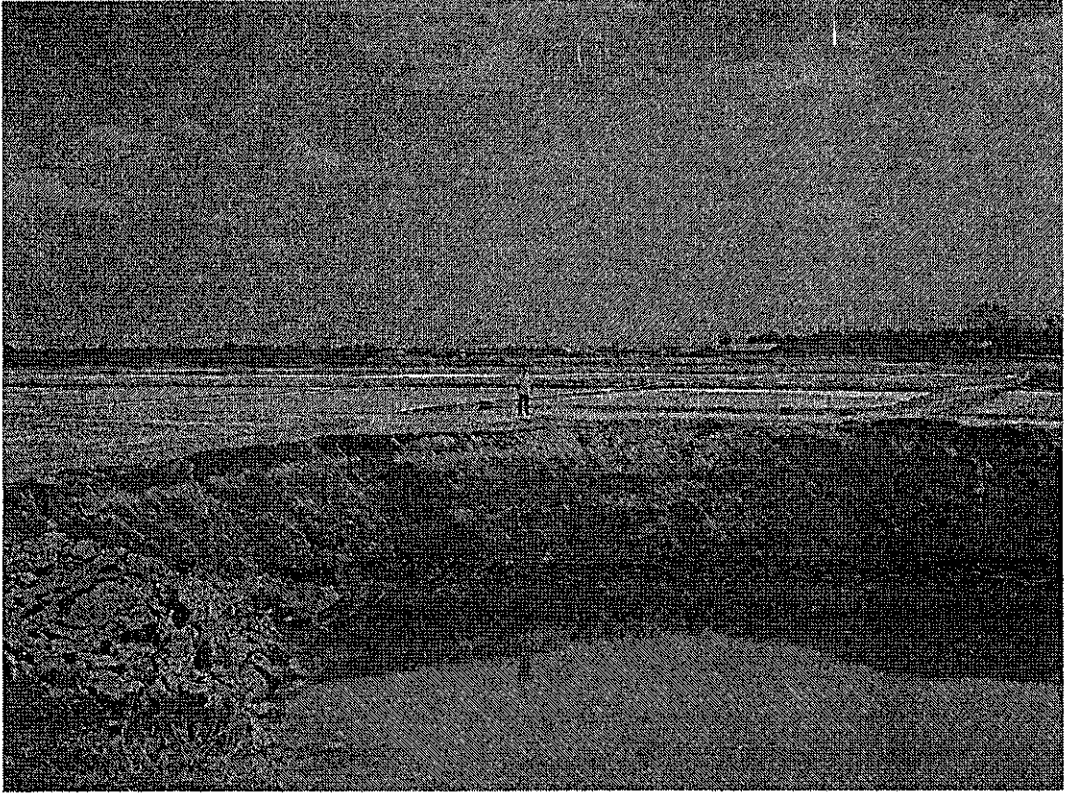
i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)
17	0.0	20.0	-0.270
18	25.0	0.0	-0.270
19	15.0	20.0	-0.270
20	-25.0	0.0	-0.270
21	0.0	30.0	-0.270
22	35.0	0.0	-0.250
23	0.0	35.0	-0.250
24	40.0	0.0	-0.250
25	45.0	0.0	-0.150
26	0.0	45.0	-0.150
27	-30.0	40.0	-0.150
28	-54.7	0.0	-0.050
29	0.0	54.7	-0.050
30	48.0	64.0	-0.015
31	0.0	80.0	-0.015
32	-48.0	64.0	-0.015



รูปที่ 7.8 หลุมขุดบางแห่งที่พบในพื้นที่การสูบน้ำเกลือที่บ้านโนนแสง ตำบลหนองกั้ง
อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร



รูปที่ 7.9 หลุมขุบบางแห่งพบในพื้นที่การสูบน้ำเกลือที่บ้าน โนนแสง ต.หนองกว้าง อำเภอบ้านม่วง
จังหวัดสกลนคร



รูปที่ 7.10 หลุมขุดขนาดใหญ่พบในพื้นที่การสูบน้ำเกลือที่บ้าน โนนแสง ต.หนองกว้าง อำเภอบ้านม่วง
จังหวัดสกลนคร

บทที่ 8

สภาวะการทรุดตัวเกินกว่าจุดวิกฤต

8.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักในการศึกษาการทรุดตัวในสภาวะเกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical condition) คือ เพื่ออธิบายความซับซ้อนในการคาดคะเนลักษณะของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับชั้นหินปิดทับและการพังทลายของหลังคาโพรง รวมไปถึงการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับลักษณะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนผิวดิน ซึ่งในสภาวะเช่นนี้จะไม่สามารถนำวิธี Regression analysis และความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นในบทที่ 7 มาประยุกต์ใช้ได้ เนื่องจากชั้นหินปิดทับเกิดการพังทลาย หรือพุดอีกนัยหนึ่ง คือ มีการยุบตัวเกินจุดความยืดหยุ่นของหินเนื้อประสมที่เป็นองค์ประกอบของชั้นหินปิดทับ

8.2 สภาวะการทรุดตัวที่เกินกว่าจุดวิกฤต

การพังทลายของชั้นหินปิดทับที่เกินกว่าจุดวิกฤต (สภาวะที่เกิดการพังทลายของหลังคาโพรงและชั้นหินปิดทับ) จะมี 2 ลักษณะที่สามารถเกิดขึ้นได้ คือ ในกรณีที่ความสูงของโพรงเกลือ (H) มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าการเปลี่ยนรูปร่างวิกฤตของหลังคาโพรง (R_{cr}) เมื่อกระบวนการทรุดตัวเกิดขึ้นจะทำให้หลังคาโพรงยุบตัวลงไปสัมผัสกับพื้นด้านล่างของโพรง โดยที่การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของผิวดินอาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าชั้นเกลือที่อยู่ด้านล่างถูกละลายออกไปอย่างต่อเนื่องด้วยหรือไม่ ในกรณีนี้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการทรุดตัวเพียงเล็กน้อย บริเวณพื้นที่การทรุดตัวจะค่อนข้างแบนราบและไม่สามารถพัฒนาไปเป็นหลุมยุบได้

ลักษณะที่ 2 คือ ในกรณีที่ความสูงของโพรงมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนรูปร่างวิกฤตของหลังคาโพรงจะทำให้เกิดการพังทลายของหลังคาโพรงซึ่งจะเรียกสภาวะการยุบตัวอันเนื่องมาจากการพังทลายเช่นนี้ว่า สภาวะ Super Critical โดยการพังทลายนั้นจะมีการพังทลายอย่างต่อเนื่องขึ้นไปบนผิวดินและพัฒนาไปสู่การเกิดหลุมยุบ ในกรณีนี้ตำแหน่งของโพรงจะเห็นได้อย่างชัดเจนอย่างไม่มีข้อสงสัย แต่การจะคาดคะเนเส้นผ่าศูนย์กลางและความลึกของโพรงให้ได้ อย่างแม่นยำนั้นเป็นไปได้ยาก

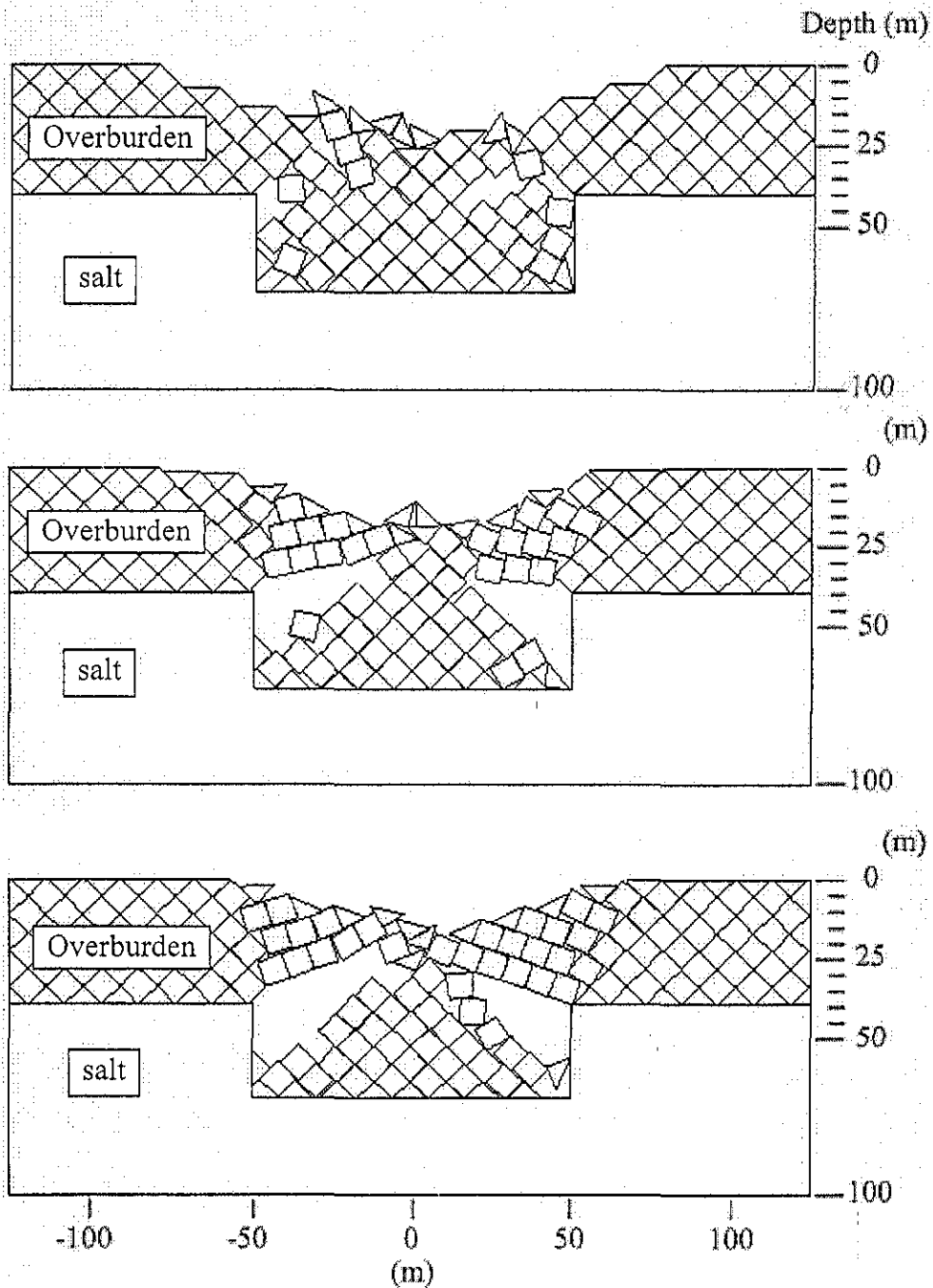
Jenkunawat (2005) และ Wannakao and Walsri (2007) ค่าทำการสำรวจใต้พื้นผิวโดยใช้การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ได้แสดงให้เห็นว่าในบริเวณที่มีการสูบน้ำเกลือบางพื้นที่ การพังทลายของหลังคาโพรงเกลือ ยังคงเหลือช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ในชั้นหินปิดทับที่อยู่เหนือโพรงเกลือ

8.3 การคำนวณด้วย Discrete element method

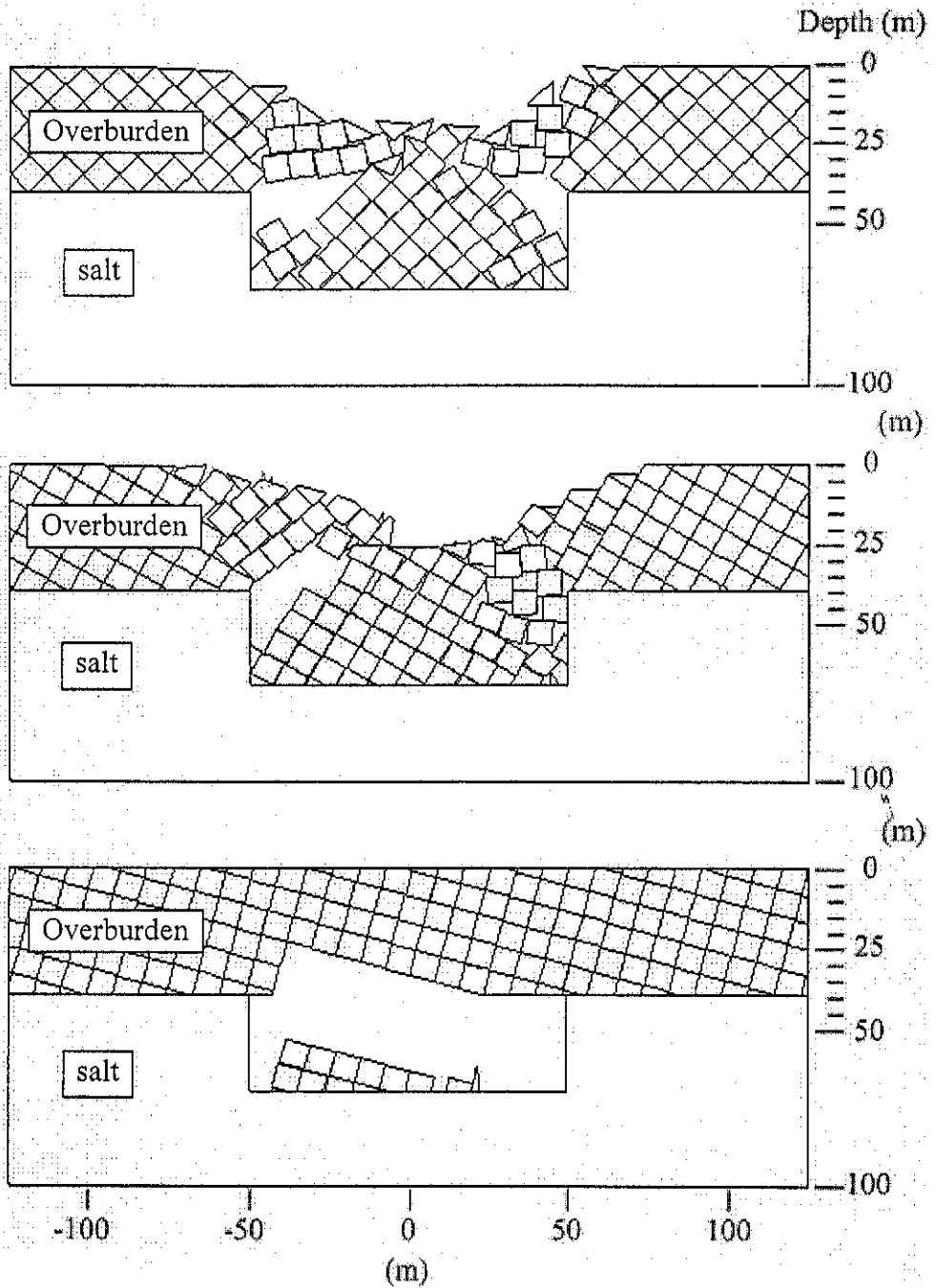
วัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์ด้วย Discrete element คือ เพื่อนำผลการจำลองมาใช้อธิบายความซับซ้อนและความยากที่จะคาดคะเนลักษณะของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับชั้นหินปิดทับและการพังทลายของหลังคาโพรงที่สภาวะเกินกว่าจุดวิกฤต สาเหตุเนื่องมาจากความซับซ้อนของพฤติกรรมพังทลายของมวลหินและการเคลื่อนตัวของระบบรอยแตก (Joint System) ในมวลหิน การจำลองในกรณีนี้จำเป็นต้องใช้วิธี Discrete element analysis โดยใช้โปรแกรม UDEC (Itasca, 2004) เพื่อจำลองการเคลื่อนตัวของมวลหินที่มีรอยแตกอยู่เหนือโพรงเกลือ แบบจำลอง Discrete element ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวแทน โพรงเกลือที่อยู่ระหว่างรอยต่อของชั้นหินปิดทับและชั้นเกลือ ความลึกของเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของโพรงในตัวอย่างนี้จะสมมติให้มีค่าคงที่ที่ 40, 100 และ 30 เมตร ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของสภาวะการทรุดตัวแบบ Super Critical และให้แรงดันเท่ากันทุกทิศทางทั้งสองข้างของแบบจำลอง สำหรับการจำลองชุดแรกนั้นจะมีรอยแตกที่ตั้งฉากกันและเอียง 45 องศา ทุกแบบจำลอง โดยจะผันแปรค่ามุมเสียดทานตั้งแต่ 20, 30 ถึง 40 องศา และเพื่อให้ได้มาซึ่งผลกระทบของทิศทางการวางตัวของรอยแตก ดังนั้นในแบบจำลองชุดที่ 2 จึงกำหนดให้ค่ามุมเสียดทานคงที่เท่ากับ 30 องศา แต่จะผันแปรทิศทางการวางตัวของรอยแตกจาก 15, 30 ถึง 45 องศา โดยทั้งสองชุดการจำลองนี้จะมีระยะห่างระหว่างรอยแตกเท่ากับ 8 เมตร

ผลจากการจำลองในแบบจำลองชุดที่ 1 (ในรูปที่ 8.1) ซึ่งให้เห็นว่าภายใต้รูปร่างของโพรงเกลือและทิศทางการวางตัวของรอยแตกเหมือนกันแต่มีค่ามุมเสียดทานต่างกันเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะการพังทลายของชั้นหินปิดทับแตกต่างกัน สำหรับชั้นหินปิดทับที่มีค่ามุมเสียดทานต่ำ โพรงจะถูกถมได้อย่างสมบูรณ์ด้วยการพังทลายลงมาของก้อนหิน ผลจากการจำลองนี้จะทำให้เกิดหลุมยุบที่มีความลึกมากหรือเกิดพื้นที่ที่มีการทรุดตัวขนาดใหญ่หรือเกิดขึ้นทั้งสองกรณี ในขณะเดียวกันช่องว่างสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ชั้นหินปิดทับมีรอยแตกที่มีค่ามุมเสียดทานสูง ผลการจำลองที่มุมเสียดทานเพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เกิดหลุมยุบที่ตื้นน้อยกว่าและมีพื้นที่การทรุดตัวน้อยกว่าผลการจำลองที่ค่ามุมเสียดทานต่ำ สำหรับผลการจำลองในชุดที่ 2 (ในรูปที่ 8.2) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในชุดที่ 1 จะแตกต่างกันตรงที่การจำลองในชุดที่ 2 จะอยู่ภายใต้ค่ามุมเสียดทานเดียวกันแต่มีทิศทางของรอยแตกที่ต่างกัน ผลจากการจำลองทำให้เกิดรูปแบบการพังทลายที่แตกต่างกัน ซึ่งในรอยแตกที่มีมุมเอียง 30 และ 45 องศา จะมีการทรุดตัวคล้ายคลึงกันกับผลการจำลองในชุดที่ 1 แต่ที่น่าสนใจคือ เมื่อสังเกตการพังทลายของรอยแตกที่มีมุมเอียง 15 องศา ที่หลังคาโพรงมีการพังทลายลงมาของก้อนหินกลุ่มหนึ่งแต่ก้อนหินที่อยู่ด้านบนไม่ได้เคลื่อนตามลงมาทั้งหมด ทำให้ไม่มีผลกระทบใดๆ บนผิวดิน

เพื่อให้เข้าใจผลกระทบของความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงจึงมีการสร้างแบบจำลองในชุดที่ 3 และ 4 โดยแบบจำลองในชุดที่ 3 จะผันแปรเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงที่ 50, 75 และ 100 เมตร มีความสูงของโพรงเกลือเท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงเท่ากับ 40 เมตร และมี



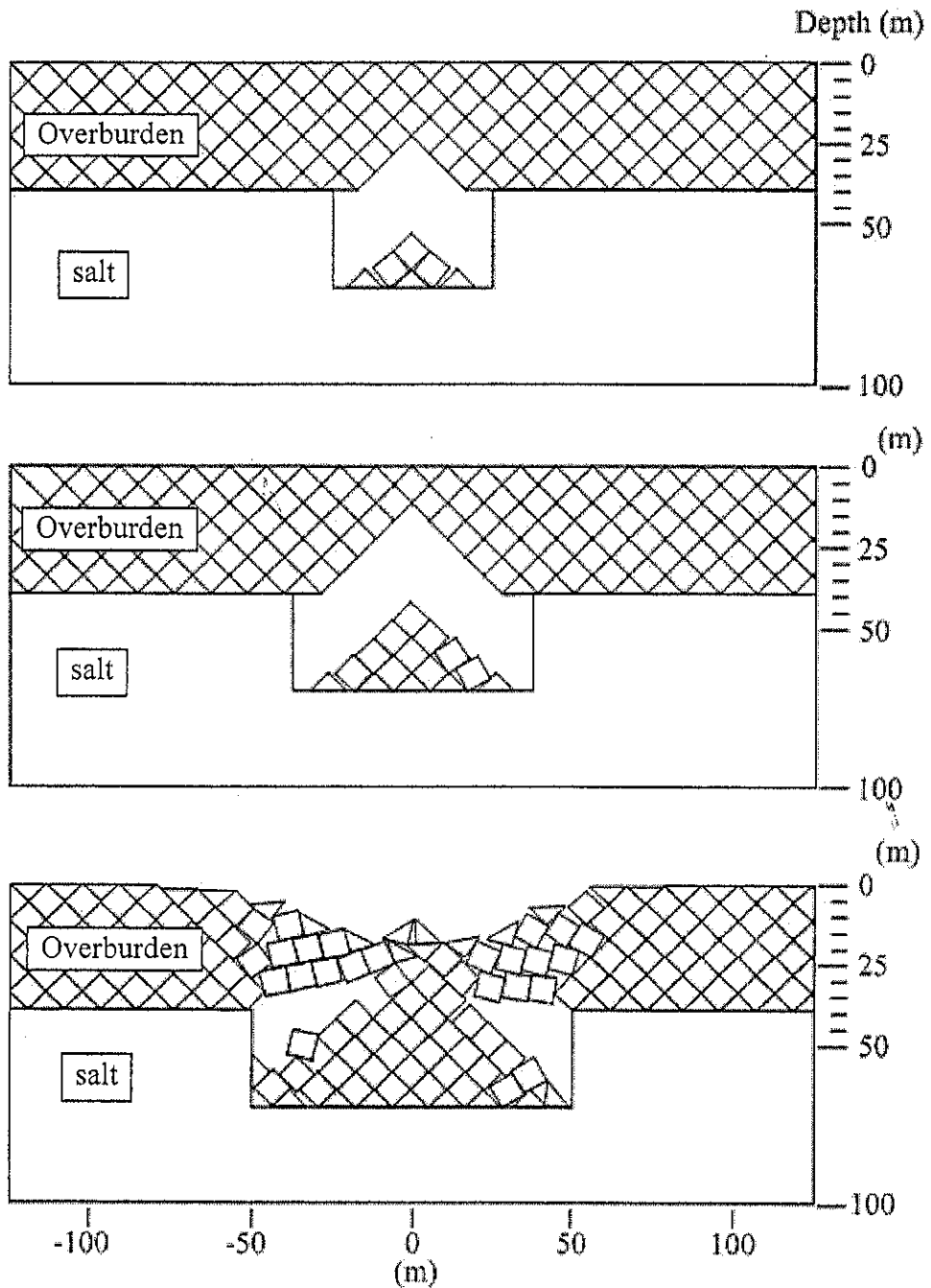
รูปที่ 8.1 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรค่ามุมเสียดทานของรอยแตกที่ 20 องศา (บน) 30 องศา (กลาง) และ 40 องศา (ล่าง) ความสูงของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงคงที่เท่ากับ 100 เมตร



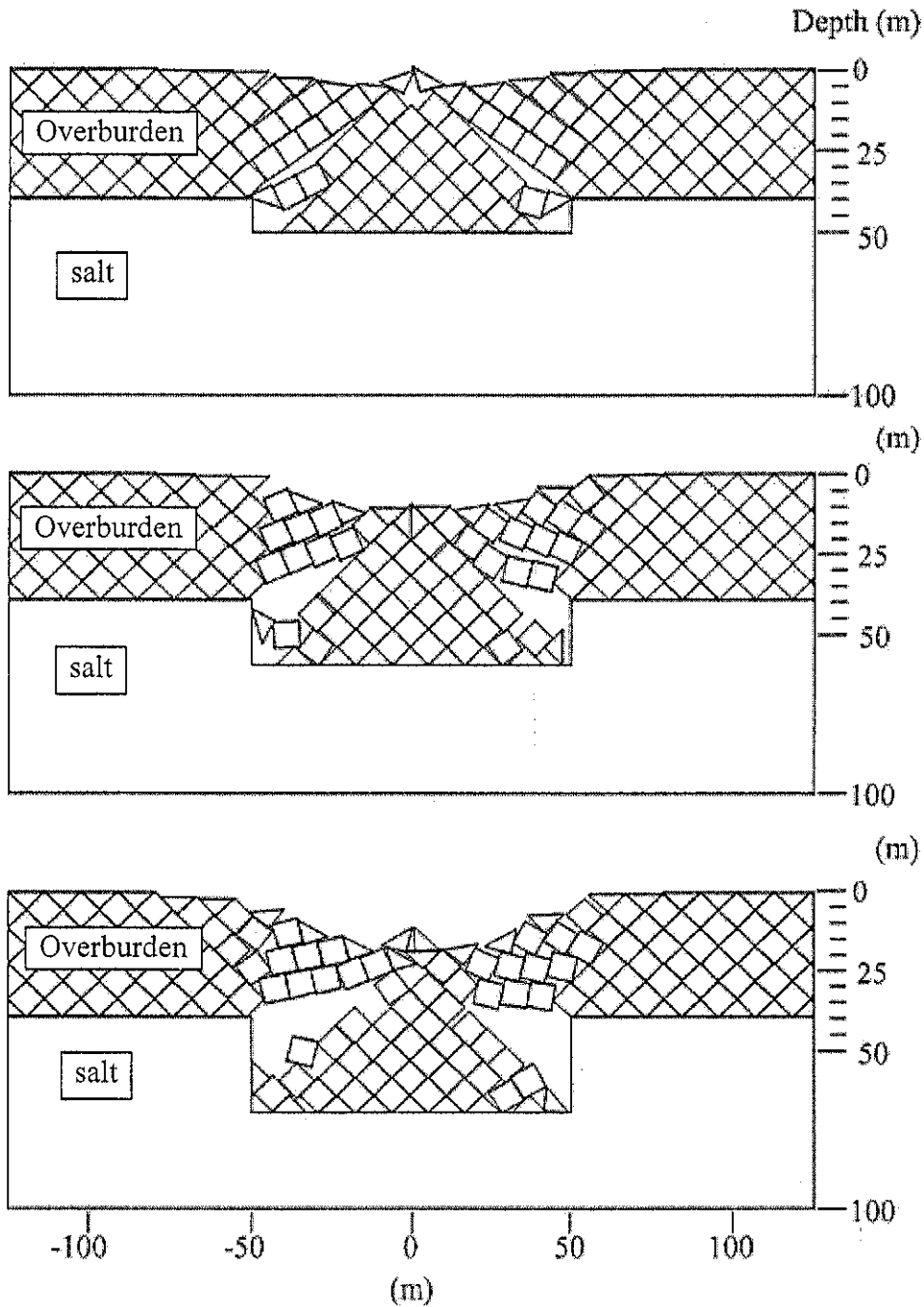
รูปที่ 8.2 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรทิศทางการวางตัวของรอยแตกที่ 45 องศา (บน) 30 องศา (กลาง) และ 15 องศา (ล่าง) ความสูงของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และความกว้างของโพรงคงที่เท่ากับ 100 เมตร

ทิศทางการวางตัวของรอยแตกเท่ากับ 45 องศา ส่วนในแบบจำลองชุดที่ 4 จะผันแปรความสูงของโพรงที่ 10, 20 และ 30 เมตร โดยมีความลึกและทิศทางการวางตัวของรอยแตกเหมือนกันกับแบบจำลองในชุดที่ 3 สำหรับผลการจำลองในชุดที่ 3 และ 4 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.3 และ รูปที่ 8.4 ผลการจำลองระบุว่าเมื่อโพรงมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจะมีโอกาสเกิดการทรุดตัวและพัฒนาไปเป็นหลุมยุบสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อโพรงมีความสูงเพิ่มขึ้นจะเกิดการทรุดตัวมากขึ้น

การจำลองด้วยระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ภายใต้สมมติฐานที่สภาวะรอยแตกต่างๆ รวมไปถึงการผันแปรความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงตามที่กล่าวมาข้างต้นเป็นที่ชัดเจนว่าการพังทลายของชั้นหินปิดทับมีความซับซ้อนและไม่แน่นอนซึ่งยากต่อการอธิบาย โดยวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (บทที่ 7) ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมรายละเอียดในการสำรวจใต้พื้นผิวเพื่อที่จะเข้าใจการพังทลายและการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับ ภายใต้สภาวะ Super Critical ต่อไป



รูปที่ 8.3 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปรเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงที่ 50 เมตร (บน) 75 เมตร (กลาง) และ 100 เมตร (ล่าง) ความสูงของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 30 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และมีทิศทางการวางตัวของรอยแตกคงที่เท่ากับ 45 องศา



รูปที่ 8.4 ผลการจำลองด้วย UDEC เพื่อแสดงการพังทลายของหลังคาโพรงโดยมีการผันแปร ความสูงของโพรงที่ 10 เมตร (บน) 20 เมตร (กลาง) และ 30 เมตร (ล่าง) เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือคงที่เท่ากับ 100 เมตร ความลึกของโพรงคงที่เท่ากับ 40 เมตร และมีทิศทางการวางตัวของรอยแตกคงที่เท่ากับ 45 องศา

บทที่ 9

สรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

การเกิดหลุมยุบอาจสามารถคาดคะเนได้ด้วยการสำรวจหาตำแหน่งของโพรงใต้ดินแล้วทำการอุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัว การสำรวจหาตำแหน่งของโพรงสามารถทำได้โดยอาศัยการสำรวจการหยั่งธรณีฟิสิกส์ วิธีดังกล่าวทำให้ทราบถึงความลึกและรูปร่างของโพรงได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเช่นนี้ต้องอาศัยการสำรวจแบบสุ่มและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าเกี่ยวกับตำแหน่งของโพรงได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสำรวจหาตำแหน่งของโพรง งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับช่วยนักสำรวจในการระบุตำแหน่งของโพรงเบื้องต้นก่อนที่จะมีการสำรวจอย่างละเอียดด้วยวิธีการหยั่งธรณีฟิสิกส์

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้อาศัยข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยา โครงสร้างและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินในแต่ละชั้นมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัว ตำแหน่งและรูปร่างของโพรงใต้ดิน นอกจากนี้ยังมีการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการทรุดตัว เชื่อมโยงความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่มีผลจากการทรุดตัวด้วย โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อสร้างโปรแกรมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหารูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรง กระจายที่อยู่ในชั้นเกลือหรือในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเกลือกับชั้นหินปิดทับ โดยใช้ข้อมูลการทรุดตัวในแนวตั้งของผิวดินที่วัดได้ในภาคสนามเป็นข้อมูลที่ป้อนเข้าไป เพื่อประเมินความเสี่ยงภัยและอัตราการทรุดตัวรวมไปถึงขอบเขตของพื้นที่ที่คาดว่าจะมีการทรุดตัวในบริเวณที่มีโพรงดังกล่าวอยู่ ซึ่งสามารถนำไปสู่การป้องกันและการแก้ไขได้ในระยะยาว งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการจำลองการทรุดตัวด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาลักษณะการทรุดตัวบนผิวดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ ความลึก และเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง โดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งค่าตัวแปรและรูปแบบของโพรงที่ใช้ในการจำลองรวมไปถึงผลการคำนวณด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และผลจากการจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลของการคำนวณด้วย Profile Function เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง (บทที่ 4) ในการวิเคราะห์ลักษณะการทรุดตัวในภาคสนามจะใช้วิธีทางสถิติ (Regression analysis) เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวสูงสุด ค่าความชันสูงสุด ส่วนโค้งของผิวดิน ความลึกและเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติจะอาศัยข้อมูลการสำรวจพื้นผิวบริเวณที่เกิดการทรุดตัว และนำไปพัฒนาสมการเพื่อใช้ประเมินลักษณะการทรุดตัวในเชิง Hyperbolic function จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในภาคสนาม การประเมินลักษณะการทรุดตัวนี้สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คาดคะเนความลึกและเส้นผ่าศูนย์กลางของ

โพรงเกลือ การยุบตัวของหลังคาโพรง และรัศมีการทรุดตัวของผนังดิน นอกจากนี้ยังศึกษาการทรุดตัวที่สถานะเกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical) เพื่อจะอธิบายความซับซ้อนในการคาดคะเนลักษณะของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับชั้นหินปิดทับและการพังทลายของหลังคาโพรง

ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าลักษณะ Profiles ของการทรุดตัวจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และ Profile function มีความสอดคล้องกันอย่างดี โดยผลจากแบบจำลองจะมีค่าการทรุดตัวสูงกว่าผลที่ได้จาก Profile Function ประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น ซึ่งค่าการทรุดตัวของผนังและค่าความชันสูงสุดที่คำนวณจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีความเหมาะสมในการจำลองการทรุดตัวได้อย่างสมจริงและเป็นไปตามหลักการที่ใช้อยู่ในระบบสากล (Singh, 1992) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธี Regression analysis ของข้อมูลการสำรวจพื้นผิวในบริเวณที่มีการทรุดตัวนั้นจะใช้สมการที่ 5.1 เพื่อให้ได้มาซึ่งองค์ประกอบของการทรุดตัวทั้ง 3 แบบ และด้วยวิธี Regression analysis นี้ยังสามารถให้ Profile ของการทรุดตัวที่ราบเรียบใน 3 มิติ ซึ่งผลจากการคำนวณจะมีความแม่นยำหรือไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในภาคสนาม ซึ่งเมื่อได้วิเคราะห์ลักษณะการทรุดตัวแล้วจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ซึ่งทำให้ได้ชุดของสมการทั้งหมด 7 ชุดสมการ (สมการที่ (6.1) ถึง (6.7)) สำหรับใช้คำนวณความลึก และเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงเกลือรวมไปถึงการยุบตัวของหลังคาโพรง และรัศมีการทรุดตัวของผนังดิน โดยสามารถคำนวณได้ทั้งสถานะวิกฤต (Critical) และสถานะต่ำกว่าจุดวิกฤต (Sub critical) ซึ่งแท้จริงแล้วภายใต้สถานะเหล่านี้เราสามารถรู้ความกว้างของโพรงได้อย่างแน่นอน (ถ้ารู้ความลึกที่ถูกต้อง) ซึ่งส่วนใหญ่จะสามารถตรวจวัดความลึกได้จากหลุมสำรวจที่อยู่ใกล้เคียงหรือจากหลุมสูบน้ำเกลือ ความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นระหว่างองค์ประกอบของการทรุดตัวกับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชั้นหินปิดทับและรูปร่างลักษณะของโพรงเกลือจะนำมาใช้ได้กับการทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลเต็มหรือลักษณะโพรงเกลือที่อยู่ในขอบเขตการวิจัยเท่านั้น เช่น โพรงเกลือเป็นรูปครึ่งวงรีที่อยู่ระหว่างรอยต่อของชั้นหินปิดทับกับชั้นเกลือ ชั้นหินวางตัวขนานกันกับชั้นเกลือ เป็นต้น จึงทำให้สมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทรุดตัวในหินชนิดอื่นหรือรูปร่างลักษณะของโพรงแบบอื่น ในการศึกษาการทรุดตัวที่สถานะเกินกว่าจุดวิกฤต (Super-critical) ด้วยวิธี Discrete element analysis พบว่าการทรุดตัวที่สถานะเกินกว่าจุดวิกฤตไม่สามารถนำวิธี Regression analysis และความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ได้ เนื่องจากไม่สามารถคาดคะเนพฤติกรรมพังทลายของชั้นหินปิดทับและความซับซ้อนของระบบรอยแตก ซึ่งผลจากการจำลองด้วยวิธี Discrete element analysis ได้อธิบายไว้ในบทที่ 7

ผลของงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากวิธีการสำรวจด้วยการหยั่งธรณีฟิสิกส์ที่มีอยู่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ในการคาดคะเนรูปร่างลักษณะของโพรงเกลือที่อยู่ใต้ดิน ซึ่งจะเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการค้นหาโพรงเกลือ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีอุตสาหกรรมเกลือเพื่อ

ป้องกันการทรุดตัวหรือหลุมยุบที่อาจเกิดขึ้นและลดความเสียหายจากการพังทลายของผิวดินที่จะเกิดกับพื้นที่เกษตรกรรมรวมไปถึงบ้านเรือนที่อยู่ใกล้เคียงกับพื้นที่อุตสาหกรรมนาเกลือ

9.2 ข้อเสนอแนะ

1) การตรวจวัดใต้ดินด้วยวิธีการหยั่งธรณีฟิสิกส์ยังคงมีความจำเป็น เพื่อที่จะเข้าใจพฤติกรรมการพังทลายและการเคลื่อนตัวของชั้นหินปิดทับที่อยู่เหนือหลังคาโพรงที่สภาวะเกินกว่าจุดวิกฤต อีกทั้งยังสามารถเก็บข้อมูลการสำรวจไว้ใช้เป็นฐานข้อมูลให้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อสามารถนำไปพัฒนาให้โปรแกรมมีศักยภาพและความแม่นยำเพิ่มขึ้น

2) ในขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคาดคะเนความลึกและเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงรวมไปถึงการยุบตัวของหลังคาโพรง และรัศมีการทรุดตัวของผิวดินจำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบการใช้งานจริงด้วยการตรวจวัดในภาคสนาม ทั้งการตรวจวัดค่าการทรุดตัวในแนวตั้งของผิวดินและการทดสอบคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการปรับปรุงและแก้ไขความถูกต้องของโปรแกรมและตรวจสอบตัวแปรที่ใช้ในการจำลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ใหม่ที่สามารถคาดคะเนลักษณะของโพรงเกลือได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- Asadi, A., Shahriar, K., Goshtasbi, K., and Najm, K. (2005). Development of new mathematical model for prediction of surface subsidence due to inclined coal-seam mining. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall.** Vol. 105(11) : 15-20.
- Barton, N.R. (1974). **A review of the shear strength of filled discontinuities in rock.** Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105. Oslo: Norwegian Geotech. Inst.
- Crosby, K. (2007). Integration of rock mechanics and geology when designing the Udon South sylvinitic mine. **Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics,** Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. pp. 3-22.
- Cui, X., Miao, X., Wang, J., Yang, S., Liu, H., Song, Y., Liu, H., and Hu, X. (2000). Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, Vol. 37(4) : 615-627.
- Fuenkajorn, K. (2002). Design guideline for salt solution mining in Thailand, **Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand**, Vol. 13(1) : 1-8.
- Grøneng, G., Nilsen, B., and Sandven, R. (2009). Shear strength estimation for Åknes sliding area in western Norway. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, Vol. 46(3) : 479-488.
- Itasca (1992a). **FLAC—Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0**, User Manual. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA.
- Itasca (1992b). **User manual for FLAC—Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0**, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN.
- Japakasetr, T. (1985). Review on rock salt and potash exploration in Northeast Thailand, **Conference on Geology and Mineral Resources Development of the Northeast, Thailand, 26-29 November 1985**, Thailand: Khon Kaen University, pp. 135-147.
- Japakasetr, T. (1992). Thailand's mineral potential and investment opportunity, **National Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development**, November 1992, DMR, Bangkok, Thailand, pp. 641-652.
- Japakasetr, T. and Suwanich, P. (1982). Potash and Rock Salt in Thailand Appendix A Nonmetallic Minerals Bulletin No. 2, **Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand**, pp. A1-A252.

- Japakasetr, T. and Workman, D. R. (1981). Evaporite deposits of northeast Thailand, Circum-Pacific Conferences, Hawaii, pp. 179-187.
- Jenkunawat, P. (2005). Results of drilling to study occurrence of salt cavities and surface subsidence Ban Non Sabaeng and Ban Nong Kwang, Amphoe Ban Muang, Sakon Nakhon. **International Conference on Geology, Geotechnical and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO 2005)**, Khon Kaen: Khon Kaen University. pp. 259-267.
- Jenkunawat, P. (2007). Results of drilling to study occurrence of salt cavities and surface subsidence Ban Non Sabaeng and Ban Nong Kwang, Sakon Nakhon. **Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics**, Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. pp. 257-274.
- Nieland, J. D. (1991). **SALT_SUBSID: A PC-Based Subsidence Model**. Solution Mining Research Institute, Report No. 1991-2-SMRI, California, USA, 67pp.
- Rattanajarurak, P. (1990). **Formation of The Potash Deposits, Khorat Plateau, Thailand**. M.S. Thesis, School of Mine, Kensington, Australia.
- Sattayarak, N. (1983). Continental Mesozoic stratigraphy of Thailand, **Symposium on Stratigraphy of Thailand**, 18-19 November, Bangkok, pp. 77-80.
- Sattayarak, N. (1983). Review of continental Mesozoic stratigraphy of Thailand: **Proceeding Stratigraphic correlation of Thailand and Malaysia**, Geol. Soc. Thailand, Vol. 1 : 127-148.
- Sattayarak, N. (1985). Review on Geology of Khorat plateau, **Conference on Geology and Mineral Resources Development of the Northeast, Thailand 26-29 November 1985**, Thailand: Khon Kaen University, pp. 23-30.
- Sattayarak, N., Chaisilboon, B., Srikulwong, S., Charusirisawat, R., Mahattanachai, T. and Chantong, W. (1998). Tectonic evolution and basin development of the northeast Thailand, **Seminar on Mesozoic Redbeds in the Northeastern Thailand**, August 28, pp. 1-19.
- Shu, D.M., and Bhattacharyya, A.K. (1993). Prediction of sub-surface subsidence movements due to underground coal mining. **Geotechnical and Geological Engineering**. Springer Netherlands. Vol. 11(4) : 221-234.
- Singh, M. M. (1992). Mine Subsidence. **SME Mining Engineering Handbook**. Hartman, H. L. (ed). (pp.938-971). Society for mining metallurgy and exploration, Inc Colorado.

- Supajanya, T., Vichapan, K. and Sri-israporn, S. (1992). Surface expression of shallow salt dome in Northeast Thailand, **National Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development**, 17-24 November 1992, DMR, Bangkok, Thailand, pp. 89-95.
- Suwanich P. (1986). **Potash and Rock Salt in Thailand : Nonmetallic Minerals Bulletin No.2**, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Suwanich, P. (1978). **Potash in northeastern of Thailand (in Thai)**. **Economic Geology Document No. 22**. Bangkok: Economic Geology, Division, Department of Mineral Resources.
- Suwanich, P. (1982). **Potash and rock salt in Thailand. Nonmetallic Mineral Bulletin No.2**, Bangkok: Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Thiel, K and Zabuski, L. (1993). Rock mass investigations in hydroengineering. **Comprehensive Rock Engineering**. Hudson, J.A. (ed). London: Pergamon Press, Vol. 3 : 839-861.
- Utha-aroon, C. (1993). *Continental origin of the Maha Sarakham evaporites, Northeastern Thailand*, **Journal of Southeast Asian Earth Sciences**, 1993, Great Britain, Vol. 8(1-4) : 193-203.
- Vattanasak, H. (2006). **Salt reserve estimation for solution mining in the Khorat basin**, M.Eng. Thesis, Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology.
- Wannakao, L. and Walsri, C. (2007). Subsidence models in salt production area. **Proceedings of the First Thailand Symposium on Rock Mechanics**, Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. pp. 311-321.
- Wannakao, L., Janyakorn, S., Munjai, D., and Vorarat, A. (2004). **Geological and geotechnical properties analysis of overburden and salt formations in the northeast for surface subsidence model**, final research report, Department of Geotechnology, : Khon Kaen University, 70pp. (in Thai)
- Wannakao, L., Munjai, D., and Janyakorn, S. (2005). Geotechnical investigation of surface subsidence at Ban Non Sabaeng salt production area, Sakon Nakhon, Thailand. **International Conference on Geology, Geotechnical and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO 2005)**. Khon Kaen: Khon Kaen University. p. 282.
- Warren, J. (1999). **Evaporites: Their Evolution and Economics**, Blackwell Science, 438pp.
- Yumuang, S. (1983). **On the origin of evaporite deposits in the maha sarakham formation in Bamnet Narong area, Changwat Chaiyaphum**, M.S. thesis, Chulalongkorn University, Thailand.

ภาคผนวก ก

SOURCE CODE


```

#ifndef HYPERBOLIC_TANGENT_SURFACE_FITTING
#define HYPERBOLIC_TANGENT_SURFACE_FITTING

#include "scattered_data.h"
#include <windows.h>

class ctanh
{
public:
    ctanh ();
    ~ctanh ();
public:
    void    init (Cscattereddata *pdata);
    void    fittanh (void);
    int     isready (void) { return m_isready; }
    void    interp (double mu [2], double mf [3], double mn [3]);
    void    interp (double r, double *s, double *n, double *c);
    void    drawRGBplot (HDC hdc, int scale);
    void    exportcoefficient (const char *lpszpath);

public:
    void    gettanh (double a [6]);

public:
    double  E (double p []);
    double  dE (double p []);

    double  dE0 (double p []);
    double  dE1 (double p []);
    double  dE2 (double p []);
    double  dE3 (double p []);
    double  dE4 (double p []);
    double  dE5 (double p []);

protected:
    double  estimatedtanh (double p [], double r);
    void    locatedatacentroid (void);

public:
    Cscattereddata *m_pdata;

protected:
    double  m_ct [6]; // hyperbolic tangent coefficients
    double  m_cg [2]; // data centroid
    int     m_isready;
};
#endif
#include <stdio.h>
#include <float.h>

```

```

#include <math.h>
#include "tanh.h"
#include "goptimal.h"

static ctanh      *localtanh    = NULL;
double            localE (double p []);
double            localdE (int i, double p []);

// BEGIN of local objective functions
double localE (double p [])
{
    return localtanh->E (p);
}

double localdE (int i, double p [])
{
    double ret = 0.0;

    switch (i)
    {
        case 0 : ret = localtanh->dE0 (p);
                 break;

        case 1 : ret = localtanh->dE1 (p);
                 break;

        case 2 : ret = localtanh->dE2 (p);
                 break;

        case 3 : ret = localtanh->dE3 (p);
                 break;

        case 4 : ret = localtanh->dE4 (p);
                 break;

        case 5 : ret = localtanh->dE5 (p);
                 break;
    }

    return ret;
}

// END of local objective functions

ctanh::ctanh ()
{
    init (NULL);
}

ctanh::~~ctanh ()

```

```
{
}
```

```
inline double ctanh::estimatedtanh (double p [], double r)
```

```
{
    return p [0]*tanh (p [1]*10.0*r - p [2]) + p [3];
}
```

```
double ctanh::E (double p [])
```

```
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, rx, ry, r;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();
    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx    = ui [0] - p [4];
        ry    = ui [1] - p [5];
        r     = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        delta = fi [2] - estimatedtanh (p, r);
        error = error + delta*delta;
    }

    return error;
}
```

```
// derivative wrt. the amplitude
```

```
double ctanh::dE0 (double p [])
```

```
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, r, rx, ry;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();

    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx    = ui [0] - p [4];
        ry    = ui [1] - p [5];
        r     = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        delta = tanh (p [1]*10.0*r - p [2])*(fi [2] - estimatedtanh (p, r));
        error = error - delta;
    }
}
```

```

    }

    return error;
}

// derivative wrt. the radian coefficient
double ctanh::dE1 (double p [])
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, r, rx, ry, sech2;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();

    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i ++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx          = ui [0] - p [4];
        ry          = ui [1] - p [5];
        r           = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        sech2      = 1.0 - pow (tanh (p [1]*10.0*r - p [2]), 2.0);
        delta      = (p [0]*10.0*r*sech2)*(fi [2] - estimatedtanh (p, r));
        error      = error - delta;
    }

    return error;
}

// derivative wrt. the radian offset
double ctanh::dE2 (double p [])
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, r, rx, ry, sech2;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();

    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i ++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx          = ui [0] - p [4];
        ry          = ui [1] - p [5];
        r           = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        sech2      = 1.0 - pow (tanh (p [1]*10.0*r - p [2]), 2.0);
        delta      = (p [0]*(-1.0)*sech2)*(fi [2] - estimatedtanh (p, r));
    }
}

```

```

        error = error - delta;
    }

    return error;
}

// derivative wrt. the function offset
double ctanh::dE3 (double p [])
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, r, rx, ry;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();

    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i ++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx          = ui [0] - p [4];
        ry          = ui [1] - p [5];
        r           = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        delta = (1.0)*(fi [2] - estimatedtanh (p, r));
        error = error - delta;
    }

    return error;
}

// derivative wrt. the x-centriod
double ctanh::dE4 (double p [])
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, r, rx, ry, sech2;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();

    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i ++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx          = ui [0] - p [4];
        ry          = ui [1] - p [5];
        r           = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        if (r > 0.0)
        {

```

```

        sech2 = 1.0 - pow (tanh (p [1]*10.0*r - p [2]), 2.0);
        delta = (p [0]*10.0*p [1]*sech2*(-rx/r))*(fi [2] - estimatedtanh
(p, r));
        error = error - delta;
    }
}

return error;
}

// derivative wrt. the x-centriod
double ctanh::dE5 (double p [])
{
    double    ui [ 2], fi [3];
    double error, delta, r, rx, ry, sech2;
    long    i, ncount;

    ncount = m_pdata->getcount ();

    for (i = 0, error = 0.0; i < ncount; i ++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

        rx          = ui [0] - p [4];
        ry          = ui [1] - p [5];
        r           = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        if (r > 0.0)
        {
            sech2 = 1.0 - pow (tanh (p [1]*10.0*r - p [2]), 2.0);
            delta = (p [0]*10.0*p [1]*sech2*(-ry/r))*(fi [2] - estimatedtanh
(p, r));
            error = error - delta;
        }
    }

    return error;
}

void ctanh::locatedatacentroid (void)
{
    long    i, ncount;
    double ui [2], fi [3];

    ncount = m_pdata->getcount ();
    for (i = 0, m_cg [0] = m_cg [1] = 0.0; i < ncount; i ++)
    {
        m_pdata->getdata (i, ui, fi);

```

```

        m_cg [0] += ui [0];
        m_cg [1] += ui [1];
    }

    m_cg [0] /= (double) ncount;
    m_cg [1] /= (double) ncount;
}

void ctanh::init (Cscattereddata *pdata)
{
    m_pdata = pdata;

    //      initialise the tanh constants to unity
    for (int i = 0; i < 6; i ++)
        m_ct [i] = 1.0;

    //      locate centroid (DC offset) of the data
    if (pdata)
        locatedatacentroid ();

    m_isready    = 0;
}

void ctanh::fittanh (void)
{
    long                i, ncount = m_pdata->getcount ();
    double              maxs, ct [6], scoef;
    CGradientOptimiser thegrad (localE, localdE, 6);

    //      initialise the tanh constants to unity
    for (i = 0; i < 4; i ++)
        ct [i] = 1.0;

    ct [4] = m_cg [0];
    ct [5] = m_cg [1];

    localtanh    = this;
    maxs         = 0.25;

    // run the steepest descent to get the estimate
    thegrad.setminmax (-10.0, 10.0);
    thegrad.init (ct);
    thegrad.setoptparams (maxs, 1.0E-4*maxs, 1.0E-6*maxs);
    thegrad.setmaxit (5000);
    thegrad.runconjugategradient ();
    // thegrad.runsteepestdescent ();
    thegrad.optimum (ct);

    // run the conjugate gradient to get the accurate results

```

```

for (scoef = 1.0; scoef >= 0.125; scoef = 0.5*scoef)
{
    thegrad.init (ct);
    thegrad.setoptparams (scoef * maxs, 1.0E-6*scoef*maxs, 1.0E-
8*scoef*maxs);
    thegrad.setmaxit (1000);
    thegrad.runconjugategradient ();
    thegrad.optimum (ct);
}

for (i = 0; i < 6; i ++)
    m_ct [i] = ct [i];

m_cg [0] = m_ct [4];
m_cg [1] = m_ct [5];

m_isready = 1;
/*
FILE          *fp;
double        rx, ry, r;
double        ui [2], fi [3];

fp = fopen ("c:\\test80.txt", "wt");

fprintf (fp, "%8.4f\t%8.4f\t%8.4f\t%8.4f\t%8.4f\t%8.4f\n", ct [0], ct [1], ct [2],
ct [3], ct [4], ct [5]);
for (i = 0; i < ncount; i ++)
{
    m_pdata->getdata (i, ui, fi);

    rx          = ui [0] - m_cg [0];
    ry          = ui [1] - m_cg [1];
    r           = sqrt (rx*rx + ry*ry);

    fprintf (fp, "%8.4f\t%8.4f\t%8.4f\n", r, fi [2], estimatedtanh (ct, (float)
r));
}
fclose (fp);
*/
}

void ctanh::interp (double r, double *s, double *n, double *c)
{
    double arg, htan, sech2;

    if (m_isready)
    {
        arg          = m_ct [1]*10.0*r - m_ct [2];
        htan        = tanh (arg);
    }
}

```



```

    sech2 = 1.0 - htan*htan;

    *s      = m_ct [0]*htan + m_ct [3];
    *n      = m_ct [0]*m_ct [1]*10.0*sech2;
    *c      = -m_ct [0]*m_ct [1]*m_ct [1]*100.0*htan/cosh (arg);
}
}

void*ctanh::gettanh (double a [6])
{
    for (int i = 0; i < 6; i ++)
        a [i] = m_ct [i];
}

void ctanh::interp (double mu [2], double mf [3], double mn [3])
{
    double va [3], vb [3], rx, ry, r, sech2, delbr;

    if (m_isready)
    {
        mf [0] = mu [0];
        mf [1] = mu [1];

        rx      = mu [0] - m_cg [0];
        ry      = mu [1] - m_cg [1];
        r      = sqrt (rx*rx + ry*ry);

        mf [2] = estimatedtanh (m_ct, (float) r);
        sech2 = 1.0 - pow (tanh (m_ct [1]*10.0*r - m_ct [2]), 2.0);
        delbr = m_ct [0]*m_ct [1]*10.0*sech2;

        va [0] = 1.0;
        va [1] = 0.0;
        va [2] = r > 0.0 ? delbr*rx/r : 0.0;

        vb [0] = 0.0;
        vb [1] = 1.0;
        vb [2] = r > 0.0 ? delbr*ry/r : 0.0;

        mn [0] = va [1] * vb [2] - va [2] * vb [1];
        mn [1] = va [2] * vb [0] - va [0] * vb [2];
        mn [2] = va [0] * vb [1] - va [1] * vb [0];
    }
}
}

```

ประวัตินักวิจัย

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