



## รายงานการวิจัย

การศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งของเสียในหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ  
ของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

**Analytical and Numerical Assessment of the Potential Waste  
Repository in Rock Salt Formations in Northeastern Thailand**

ผู้วิจัย

ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร  
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2542  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2542

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณ 2542 ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจาก นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

ธันวาคม 2542

## บทคัดย่อ

คอมพิวเตอร์โปรแกรม GEO ได้นำมาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการทิ้งของเสียลงไปในโพรงของชั้นหินเกลือที่อำเภอบ้านหนึ่งจรรย์ การคำนวณมีจุดประสงค์ที่จะออกแบบโพรงที่มีเสถียรภาพทางกลศาสตร์และทางชลศาสตร์สูง และสามารถเก็บกักของเสียไว้ได้อย่างน้อย 100 ปี และในขณะเดียวกันก็ต้องมีผลกระทบต่อด้านการทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด จากผลของการศึกษาพบว่าขนาดของโพรงรูปทรงกระบอกที่เหมาะสมที่สุดควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 60 เมตร มีความสูงเท่ากับ 60 เมตร หลังคาของโพรงควรจะมีอยู่สี่ประมาณ 180 เมตร ความหนาของชั้นหินเกลือข้างบนและข้างล่างของโพรงควรมีอย่างน้อย 120 เมตร และ 30 เมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างโพรง (วัดจากจุดศูนย์กลาง) ควรมีอย่างน้อย 180 เมตร ด้วยการออกแบบในลักษณะนี้การทรุดตัวของผิวดินควรมีน้อยกว่า 3 นิ้ว トラบไคที่ความดันในโพรงสามารถคงไว้ที่ระดับน้ำหนักของน้ำเกลือที่ความลึกนั้น ๆ

## Abstract

Computer simulations using time-dependent finite element program GEO have been carried out to perform a feasibility study of the potential waste disposal in rock salt formations in the northeastern Thailand. Available laboratory test data reported elsewhere are used in the analysis. Where applicable, supplementary theories and concepts on salt mechanics, as well as in-house experience and database on rock properties and behavior have been applied in the computer simulation. Conservative assumptions on the cavern shape, arrangement and operation have been assumed. The cavern field is assumed to be an array of identical cylindrical caverns arranged in an infinite square grid. A salt formation at Bamnet Narong District is selected to be a potential host rock for the disposal caverns. The investigation and design are aimed at maintaining the mechanical stability and hydrological integrity of the cavern field through 100 years after waste emplacement, while minimizing the ground surface subsidence and cavern closure. Results of the simulations suggest that the cavern roof should be at depth of 180 meters. The cavern height and diameter should be about 60 meters. Spacing between the adjacent caverns should be 180 meters. With this set of the design parameters, the salt roof and salt floor of the disposal caverns will be 120 meters and 30 meters, respectively. The surface subsidence is expected to be less than 3 inches providing that the cavern internal pressure is maintained to be equivalent to the hydrostatic pressure of brine.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทกัณฑ์ข้อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 1 ชั้นหินเกลือที่นำมาศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา.....	7
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	9
3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลอง.....	9
3.2 การออกแบบ Mesh.....	11
3.3 ความเค้นในหิน (In-situ Stress).....	17
บทที่ 4 ผลของการคำนวณ.....	19
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลของการคำนวณ.....	40
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	41

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณ.....	6
2	ขนาดและรูปร่างและการวางผังของโพรงของแบบจำลอง.....	10
3	การออกแบบ Mesh สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย.....	18
4	ผลการหลุดตัวของพื้นผิวดินข้างบนบริเวณโพรง.....	35
5	ผลการหัดตัวในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง.....	37
6	ผลการหัดตัวในแนวตั้งระหว่างเพดานและพื้นของโพรง.....	38
7	ค่าความซึมผ่านสูงสุดในหินเกลือกั้นระหว่างโพรง.....	39

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของโพรงในชั้นหินเกลือที่อำเภอป่าหน่วจังหวัด...	5
2 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง S1A และ S1B .....	12
3 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง S2A และ S2B .....	13
4 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง S3A และ S3B .....	14
5 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง E1A และ E1B .....	15
6 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง E2A และ E2B .....	16
7 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S1B .....	20
8 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S2B .....	21
9 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S3B .....	22
10 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E1B .....	23
11 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E2B .....	24
12 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S1B .....	25
13 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S2B .....	26
14 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S3B .....	27
15 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E1B .....	28
16 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E2B .....	29
17 ความเค้นในแนวเฉือนในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S1B .....	30
18 ความเค้นในแนวเฉือนในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S2B .....	31
19 ความเค้นในแนวเฉือนในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S3B .....	32
20 ความเค้นในแนวเฉือนในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E1B .....	33
21 ความเค้นในแนวเฉือนในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E2B .....	34

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพิ่มขึ้นของปริมาณของเสียที่มีพิษน้อยถึงร้ายแรงในประเทศไทยนำมาซึ่งปัญหาในระยะยาวที่จะต้องทำการกำจัดและแก้ไขอย่างถาวร เพื่อแยกของเสียที่เป็นอันตรายออกจากสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น ของเสียที่ได้มาจากการใช้เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์จากถ่านหิน (ของเสียพิษร้ายแรง) จากโรงพยาบาลจะต้องใช้ระยะเวลาเป็น 1,000 ปี ในการเก็บจนกระทั่งระดับของถ่านหินจะลดต่ำลงถึงระดับที่สามารถยอมรับได้ (ขึ้นอยู่กับครึ่งชีวิตของธาตุนั้น ๆ) นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญในอนาคต คือ ประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างประเทศไทยอาจจะต้องมีการก่อสร้างโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของพลเมืองเพราะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติที่กำลังจะหมดไปอย่างรวดเร็ว ของเสียที่ได้จากปฏิกรณ์นิวเคลียร์ก็จะต้องมีการกำจัดให้หมดไป

ในระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมาได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวางที่จะใช้คุณสมบัติพิเศษของหินบางชนิดเพื่อเป็นที่เก็บของเสีย มีตัวอย่างเช่นในสหรัฐอเมริกา แคนาดา และเยอรมันนี ได้ทำการพัฒนาสถานที่สำหรับทิ้งของเสียจากการเพิ่มขึ้นของกากของเสียนิวเคลียร์ ชั้นหินเกลือถูกเลือกเพื่อเป็นที่เก็บของเสีย (ในสหรัฐอเมริกา และเยอรมันนี) เนื่องจากชั้นหินเกลือมีความซึมผ่านต่ำ และสามารถคืนสภาพตัวเองได้หลังจากการถูกเปลี่ยนแปลง

ชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่มีการสำรวจพบและถูกนำมาใช้ประโยชน์ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (Suwanich and Ratanajaruraks, 1982) นอกจากนี้ที่ผ่านมาเมื่อเร็ว ๆ นี้การสำรวจทางด้านธรณีวิทยาในส่วนของความเป็นไปได้ในโครงการอาเซียนโพแทส (Yumuang, 1995) และมีหลายบริษัทที่ทำการเอาสารละลายเกลือขึ้นมาใช้ (อาซาฮี, ผาแดง เป็นต้น) ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติอย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาที่เพียงพอทางด้านที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของชั้นหินเกลือที่จะนำโพแทสมาเป็นที่ทิ้งของเสีย

จึงเป็นที่สมควรที่จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเลือกชั้นหินเกลือเป็นที่เก็บของเสีย ผลกระทบในระยะยาวและประสิทธิภาพของชั้นหินเกลือควรที่จะถูกวิเคราะห์และทำการคาดคะเนในเชิงปริมาณ วิธีการเดียวที่จะนำมาใช้ในการวิจัยอย่างเบื้องต้นและราคาถูก คือ การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข



## วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ขั้นต้นของโครงการวิจัย คือ การประเมินด้านกลศาสตร์และด้านอุทกวิทยาของโพรงในชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย วิเคราะห์โดยใช้ non-linear time-dependent finite element ซึ่งถูกแสดงออกมาในรูปของธรณีกลศาสตร์และอุทกธรณีวิทยาในปัจจุบัน และหลังจากโพรงมีการเก็บของเสียอีก 100 ปีข้างหน้า การออกแบบโพรงในหินเกลือจะพิจารณาถึงรูปทรงของโพรง (เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และอัตราส่วนของความสูงกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของชั้นหิน) ระยะห่างระหว่างโพรง ความดันภายใน และความหนาของเพดานชั้นหินเกลือ การวิเคราะห์จะมุ่งไปที่การให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวให้น้อยที่สุด และรวมไปถึงการทรุดตัวของพื้นดินและการเสื่อมสภาพของโพรง

วัตถุประสงค์เฉพาะของโครงการวิจัยประกอบด้วย

- 1) การหาเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของเพดานโพรง ผนังด้านข้าง และพื้นของโพรงภายใต้สภาวะแวดล้อมในระยะยาว
- 2) คาดคะเนการทรุดตัวเทียบกับเวลาของชั้นหินที่ปิดทับและพื้นดิน
- 3) คาดคะเนการหดตัวของโพรงเทียบกับเวลาของโพรงหินเกลือ
- 4) ประเมินศักยภาพการเพิ่มขึ้นของความชื้นผ่านได้ในชั้นหินเกลือรอบ ๆ โพรง
- 5) ประเมินศักยภาพของการรั่วไหลในชั้นบนและชั้นล่างของหินที่ใช้เป็นที่ทิ้งของเสีย
- 6) ประเมินศักยภาพของผลกระทบต่อน้ำบาดาลในพื้นที่

## ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะมุ่งเฉพาะไปที่การประยุกต์ใช้ชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเท่านั้น การวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของชั้นหินเกลือรอบ ๆ โพรงของเสีย การศึกษาถึงเสถียรภาพในระยะยาวของโพรงในชั้นหินเกลือจะถูกคำนวณไปถึง 100 ปีหลังจากที่โพรงได้ขุดขึ้นมา ทุก ๆ โพรงที่อยู่ในบริเวณที่ถูกกำหนดที่จะใช้ทิ้งของเสียจะถูกสมมติว่าได้มีการขุดขึ้นมาพร้อมกัน (Instantaneous excavation) อุณหภูมิของชั้นหินเกลือและของเสียที่ถูกทิ้งลงไปจะถือว่ามีความคงที่จากวันแรกถึง 100 ปี หลังจากทิ้งของเสียลงไปแล้ว เนื่องจากว่าการวิจัยมีจุดมุ่งหวังเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบ (Design) ดังนั้นข้อสมมติฐานปฏิกิริยาที่ดัดขึ้นและใช้ในการคำนวณจะเป็นข้อสมมติฐานแบบ Conservative assumptions เพื่อว่าการออกแบบโดยใช้ผลที่ได้จากการวิจัยนี้

จะมีความปลอดภัยค่อนข้างสูง และเพื่อที่จะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง และป้องกันการสูญเสียชีวิต ข้อสมมติฐานเหล่านี้จะถูกชี้แจงในหัวข้อต่อไป

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในขั้นแรกจะมีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ลักษณะทางธรณีวิทยานี้จะมุ่งไปที่ความหนา ความลึก และความกว้างของชั้นหินเกลือในแต่ละบริเวณ และในที่สุดแล้วบริเวณที่มีคุณลักษณะของชั้นหินเกลือที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกนำมาใช้ในการออกแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในขั้นตอนที่ 2 จะมีการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมชื่อ GEO การคำนวณนี้จะมุ่งไปที่การคาดคะเนลักษณะทางกลศาสตร์และทางอุทกวิทยาของชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงหิ้งของเสีย ขนาด ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ความลึก และระยะห่างระหว่างโพรงในหลายรูปแบบจะนำมาพิจารณาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรเหล่านี้ นอกจากนี้แล้วการคำนวณในการวิจัยนี้ยังจะมุ่งไปที่การป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในรูปของแผ่นดินทรุด (Surface Subsidence) และในขณะที่เดียวกันก็จะคำนึงถึงคุณค่าทางเศรษฐกิจของการทิ้งของเสียในชั้นหินเกลือ กล่าวคือ การออกแบบของโพรงแต่ละโพรงจะทำให้ใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดค่าใช้จ่าย การคาดคะเนผลกระทบและลักษณะทางกลศาสตร์และอุทกวิทยาของชั้นหินเกลือนี้จะทำไปถึง 100 ปีข้างหน้าหลังจากที่ทิ้งของเสียลงไปในโพรงแล้ว ในขั้นตอนต่อไปผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ก็จะนำมาตรวจสอบเทียบกับค่าของจริงถ้าเป็นไปได้ ความถูกต้องของการคำนวณก็จะนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะของโพรงในหินเกลือที่มีขนาดทางเลขาคณิตคล้ายคลึงกัน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากโครงการวิจัยนี้สามารถแบ่งเป็นข้อได้ดังนี้

1. เพื่อทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านการวิจัยและการเลือกสถานที่ (Site-selection) และสมรรถนะของชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับไว้ทิ้งของเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากขบวนการทางนิวเคลียร์
2. เพื่อลดหรือกำจัดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของของเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม
3. เพื่อป้องกันผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทรัพยากรน้ำบาดาล

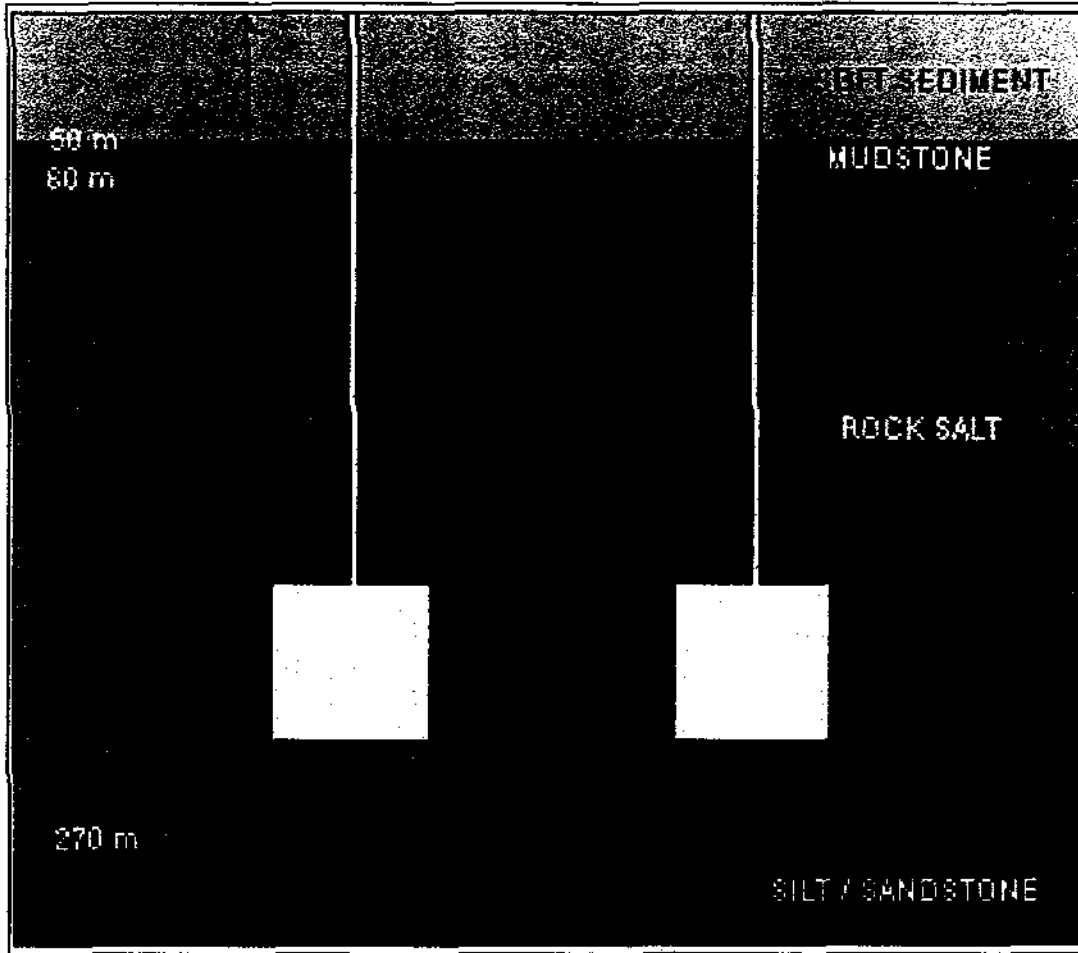
# บทที่ 1

## ชั้นหินเกลือที่นำมาศึกษา

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาข้อมูลทางด้านหินเกลือทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง เช่น Japan International Cooperation Agency (1981) และ Suwanapal (1992) อาจสรุปได้ว่า ชั้นหินเกลือได้มีการกระจายอยู่ทั่วไปในภาคพื้นนี้และมีความหนาและความลึกที่ต่างกันออกไปในแต่ละที่ การศึกษาในอดีตทางด้านธรณีวิทยาส่วนใหญ่จะมุ่งไปที่ชั้นหินเกลือที่อำเภอบ้านหมื่นจตุรพักตรพิมาน เนื่องจากว่าในบริเวณนี้มีโครงการนานาชาติเกิดขึ้น 2 โครงการ คือ ASEAN SODA ASH Project และ ASEAN Potash project ชั้นหินเกลือที่บริเวณนี้ได้มีการสำรวจอย่างละเอียดในเชิงธรณีวิทยาและในเชิงกลศาสตร์ ข้อมูลที่เปิดเผยได้คือข้อมูลทางด้านธรณีวิทยา ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาใช้ ส่วนข้อมูลทางด้านกลศาสตร์ได้ถูกปิดเป็นความลับโดยหน่วยงานและองค์กรที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของหินเกลือที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยนี้คือ คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ (Mechanical Properties) และคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ (Hydrological Properties) คุณสมบัติทั้งสองนี้จะมีผลกระทบอย่างยิ่งต่อการออกแบบของโพรงในชั้นหินเกลือ คุณสมบัติอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงนัก เช่น คุณสมบัติทางเคมี หรืออายุของหินเกลือ เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้จะไม่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยในต่างประเทศได้ค้นพบว่าถ้าหินเกลือมีความบริสุทธิ์มาก (มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า 1%) หินเกลือไม่ว่าที่ใด หรืออายุเท่าใดจะมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์และชลศาสตร์คล้ายคลึงกัน ดังนั้นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินเกลือในต่างประเทศจึงนำมาอ้างอิงเพื่อใช้ในรายงานวิจัยนี้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ชั้นหินเกลือที่อำเภอบ้านหมื่นจตุรพักตรพิมานจึงถูกนำมาใช้ในการวิจัยนี้ ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือและชั้นหินที่เกี่ยวข้องได้นำมาใช้ในแบบจำลอง (รูปที่ 1) ส่วนคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และทางด้านชลศาสตร์ได้อ้างอิงถึงชั้นหินเกลือและชั้นหินที่เกี่ยวข้องที่ Salado Salt Formations ในสหรัฐอเมริกา ตารางที่ 1 ได้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติเหล่านี้ คุณสมบัติที่อยู่ในตารางนี้ได้คัดเลือกขึ้นมาให้มีค่าค่อนข้างต่ำเพื่อให้ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่จะนำไปใช้ในการออกแบบมีความปลอดภัย (Conservative Estimate)



รูปที่ 1 โครงสร้างของโทรงในชั้นหินเกลือที่อำเภอป่าหนือฉรงค์

ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณ

คุณสมบัติ	หน่วย	Sediment	Mudstone	Sandstone	Salt
Shear Modulus	$10^6$ psi	0.005	0.025	1.4	1.5
Retarded Shear Modulus ( $\tau_0 < K_0$ )	$10^6$ psi	0.010	0.050	5.0	0.68
Retarded Shear Modulus ( $\tau_0 > K_0$ )	$10^6$ psi	0.010	0.050	5.0	0.68
Elastoviscosity ( $\tau_0 < K_0$ )	$10^6$ psi.day	0.001	0.005	1.0	0.53
Elastoviscosity ( $\tau_0 > K_0$ )	$10^6$ psi.day	0.001	0.005	1.0	0.53
Plastoviscosity	$10^6$ psi.day	0.002	0.004	0.5	4.00
Ultimate Bulk Modulus	$10^6$ psi	0.010	0.050	3.0	3.5
Retarded Bulk Modulus	$10^6$ psi	0.010	0.050	6.0	3.0
Hydrostatic Elastoviscosity	$10^6$ psi.day	0.0003	0.002	15.0	7.0
Unconfined Octah. Shear Strength	psi	10	50	100	70
Ultimate Octah. Shear Strength	Psi	100	500	1500	611
Yield Surface Coefficient	$10^{-3}$ psi	10	5.0	0.5	1.5
Critical Strain of Failure	-	0.03	0.025	0.01	0.02
Density Gradient	psi/ft	-0.78	-0.95	-1.12	-0.944
Power Coeff. of Plastoviscosity	-	2.6	2.6	2.6	2.6
Deterioration Coeff. of Shear	-	4.0	4.0	4.0	0.2
Transition Pressure	psi	*	*	*	6000
Volume Expansion Coefficient	-	*	*	*	0.05
Shear Expansion Coefficient	-	*	*	*	0.20
Confinement Coefficient	-	*	*	*	10.0
Permeability Constant	microdarcy	*	*	*	$2 \times 10^{14}$
Stress Coefficient	-	*	*	*	3.9
Minimum Stress Coefficient	-	*	*	*	40.0

\* ไม่รวมอยู่ในการวิจัยนี้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์นี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาของหินเกล็ดและการเปลี่ยนความชื้นผ่านตามกาลเวลาของหินเกล็ด ทฤษฎีนี้ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Fucnkajorn & Serata (1992) รายละเอียดของทฤษฎีนี้จะไม่นำมาเสนอ ผู้ที่สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง ในรายงานนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีนี้และคุณลักษณะของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาใช้ อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น

เริ่มต้นคือหลักเกณฑ์ของ von Mises ได้นำมาใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนรูปของหินเกล็ด (Shear Deformation) จากหลักเกณฑ์นี้ อัตราการเปลี่ยนแรงเฉือน (Octahedral shear strength  $K_0$ ) สามารถแสดงได้โดยสมการข้างล่างนี้

$$dK_0/d\sigma_m = \alpha(K^B - K_0) \quad (1)$$

$$\alpha = \text{yield surface coefficient} \quad K^B = \text{ultimate octahedral shear strength}$$

ในการคำนวณ  $K_0$  ผู้เสนอทฤษฎีนี้ได้ใช้การแปรรูปของหินเกล็ดและแรงดันในชั้นหินเป็นเกณฑ์ ดังนั้นค่า  $K_0$  สามารถแสดงได้โดยสมการข้างล่างนี้

$$K_0 = \exp[-C(\gamma_0 - \gamma_c)/\gamma_c] \{ [K^A = (K^B - K^A)(1 - \exp(-\alpha\sigma_m))] - K^B\sigma_m/P \} + K^B\sigma_m/P \quad (2)$$

$\gamma_0, \gamma_c$  คือ ค่า Octahedral shear strain และ Critical Octahedral shear strain ตามลำดับ

$\sigma_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของความกดดันในหินเกล็ดที่จุด ๆ หนึ่ง

$P$  คือ ค่าความกดดันที่หินเกล็ดเปลี่ยนจากคุณสมบัติประเป็นคุณสมบัติแบบเหนียว

$C$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของหินเกล็ด

ในขณะที่หินเกล็ดได้เปลี่ยนรูปเกินขีดจำกัด (Critical Octahedral shear strain) หินเกล็ดนี้จะมีปริมาตรมากขึ้นเนื่องจากเนื้อในของหินเกล็ดจะมีการแตกร้าว การแตกร้าวนี้ตามหลักวิชาการก็เสมือนหนึ่งเป็นความพรุนของเนื้อหินที่เพิ่มขึ้น (Porosity Increase) นั่นเอง การคำนวณปริมาตรที่เพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า Inelastic dilation การคำนวณนี้จะใช้สมการดังแสดงให้เห็นข้างล่างนี้

$$\epsilon_{IN} = F \{ \exp[C(\gamma_o - \gamma_c) / \gamma_c] - 1 \} \exp[-H\sigma_m / (P - \sigma_m)]; \gamma_o > \gamma_c \text{ and } \sigma_m < P \quad (3)$$

$\epsilon_{IN}$  คือ ค่า Inelastic dilation และให้มีค่าเท่ากับความพรุนที่เพิ่มขึ้น

H คือ ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของหินเกลือ

สมการที่ (3) นี้จะแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความพรุนของหินเกลือจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อหินเกลือถูกเปลี่ยนรูปเกินขีดจำกัดอันหนึ่ง ( $\gamma_o > \gamma_c$ ) และต่อเมื่อความกดดันในหินจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่แบ่งระหว่างความเปราะและความเหนียวของหินเกลือ ( $\sigma_m < P$ ) จากความพรุนที่คำนวณได้นี้เราสามารถคำนวณหาความซึมผ่าน (Permeability) ของชั้นหินเกลือที่อยู่ภายใต้แรงกด (Stresses) และการเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่ต่างกัน ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K = A (\sigma_3^*)^\lambda (\epsilon_{IN})^{(1 - \exp(-\eta \sigma_3^* / P))} \quad (4)$$

$\sigma_3^*$  คือ ค่า Minimum Principal Stress ที่ตั้งฉากกับรอยร้าว (Micro-crack)

A,  $\lambda$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของหินเกลือ

สมการหลักทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นได้นำมาใช้ไว้ในคอมพิวเตอร์โปรแกรม GEO เพื่อคำนวณหาพฤติกรรมทางกลศาสตร์และชลศาสตร์ของหินเกลือที่ใดก็ได้ โปรแกรมนี้ได้ถูกเขียนขึ้นมาโดยใช้วิธี Finite Element Method ซึ่งจะสามารถคำนวณพฤติกรรมของวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา (explicit time integrator) รายละเอียดของโปรแกรมนี้และของทฤษฎีเบื้องต้นสามารถศึกษาต่อได้จาก Serata and Fuenkajorn (1991), Fuenkajorn and Serata and Fuenkajorn (1992, 1994) และ Stormont (1994)

ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงในหินเกลือหลายแห่งในสหรัฐอเมริกา และแคนาดา โครงเหล่านี้ได้รวมไปถึงโครงที่ใช้เก็บของเสีย ก๊าซธรรมชาติ อากาศอัด และใช้เก็บผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมอื่น ๆ ทฤษฎีนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่ามีความเชื่อถือได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาคาดคะเนพฤติกรรมทางกลศาสตร์และชลศาสตร์ของหินเกลือในอนาคตอันยาวนาน ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นในสมการข้างบนก็สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องทดลองและในภาคสนาม

## บทที่ 3

### การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

#### 3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลอง

แบบจำลองของโพรงในหินเกลือได้ถูกสร้างขึ้น 5 แบบ แต่ละแบบจะมีขนาด รูปร่าง และระยะห่างของโพรงที่ต่างกัน อีกทั้งในแต่ละแบบจะถูกแบ่งเป็น 2 แบบย่อย ๆ คือ แบบที่มีอากาศเป็นแรงกดดันอยู่ในโพรง และแบบที่มีน้ำเกลือ (Brine) เพิ่มความกดดันอยู่ในโพรง ในตารางที่ 1 นี้ จะสรุปให้เห็นถึงรูปร่างของแต่ละแบบจำลองโดยใน 5 แบบนี้จะมีอักษรย่อว่า S1, S2, S3, E1 และ E2 รูปร่างของโพรงจะถูกกำหนดให้เป็นรูปทรงกระบอกที่ตั้งอยู่ในชั้นของหินเกลือ ในงานวิจัยนี้ เส้นผ่าศูนย์กลาง (D) จะมี 3 ขนาด คือ 60, 120 และ 180 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (H/D) ของแต่ละโพรงในชั้นหินเกลือจะมี 3 ค่า คือ 1:1, 1:2 และ 1:3 ระยะห่างระหว่างโพรง (S) วัดจากจุดกึ่งกลางของแต่ละโพรงจะมีค่าเท่ากับ 120, 240 และ 360 เมตร อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างโพรงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (H/D) จะมีค่าเท่ากับ 2:1, 3:1 และ 4:1

แรงดันที่อยู่ในโพรงจะถูกกำหนดมี 2 ค่า คือ มีค่าเป็น 0 (เมื่อใช้อากาศเป็นแรงดัน) และมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำเกลือ (จากสมมติฐานที่ว่าของเสียที่เก็บอยู่ในโพรงจะมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับน้ำเกลือนี้) ความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือจะมีค่าโดยประมาณที่ 0.42 psi per ft ค่านี้จะนำมาคำนวณหาความดันในโพรงในกรณีที่มีของเสียเก็บอยู่ การศึกษาพฤติกรรมของหินเกลือในกรณีที่ไม่ผลิตก๊าซหรือวัสดุในโพรงก็เพื่อทำการตรวจสอบลักษณะของโพรงในกรณีที่มีการรั่วซึมของ ๆ เสียออกไปจากโพรง และทำให้ความดันในโพรงตกมาอยู่ที่ศูนย์

ตารางที่ 2 จะสรุปลักษณะของแบบจำลอง 5 แบบที่สร้างขึ้น แบบจำลองเหล่านี้ได้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อครอบคลุมรูปร่างของโพรงที่มีผลต่อทางกลศาสตร์ของหินเกลือ ผลที่ได้รับจากการคำนวณจากแบบจำลองนี้จะบ่งบอกถึงขนาดและรูปร่างของโพรงที่เหมาะสมที่สุด คือ มีเสถียรภาพมากที่สุด มีโอกาสรั่วไหลน้อยที่สุด มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องน้อยที่สุด การตัดสินใจว่าโพรงขนาดใดและรูปร่างใดจะเหมาะสมที่สุดนี้จะใช้วิธี Interpolation จากผลลัพธ์ของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์



ตารางที่ 2 : ขนาดและรูปร่างและการวางผังของโพรงของแบบจำลอง

แบบจำลอง (Model No.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง ของโพรง (D) (เมตร)	สัดส่วนความสูง ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (H/D)	ระยะห่าง ระหว่างโพรง (เมตร)	สัดส่วนระยะ ห่างต่อเส้นผ่า ศูนย์กลาง (S/D)	ชนิดของวัสดุใน โพรงที่ทำให้เกิด แรงดัน
S1A	60	1:1	120	2:1	อากาศ
S1B	60	1:1	120	2:1	น้ำเกลือ
S2A	60	1:1	180	3:1	อากาศ
S2B	60	1:1	180	3:1	น้ำเกลือ
S3A	60	1:1	240	4:1	อากาศ
S3B	60	1:1	240	4:1	น้ำเกลือ
E1A	120	1:2	360	3:1	อากาศ
E1B	120	1:2	360	3:1	น้ำเกลือ
E2A	180	1:3	360	3:1	อากาศ
E2B	180	1:3	360	3:1	น้ำเกลือ

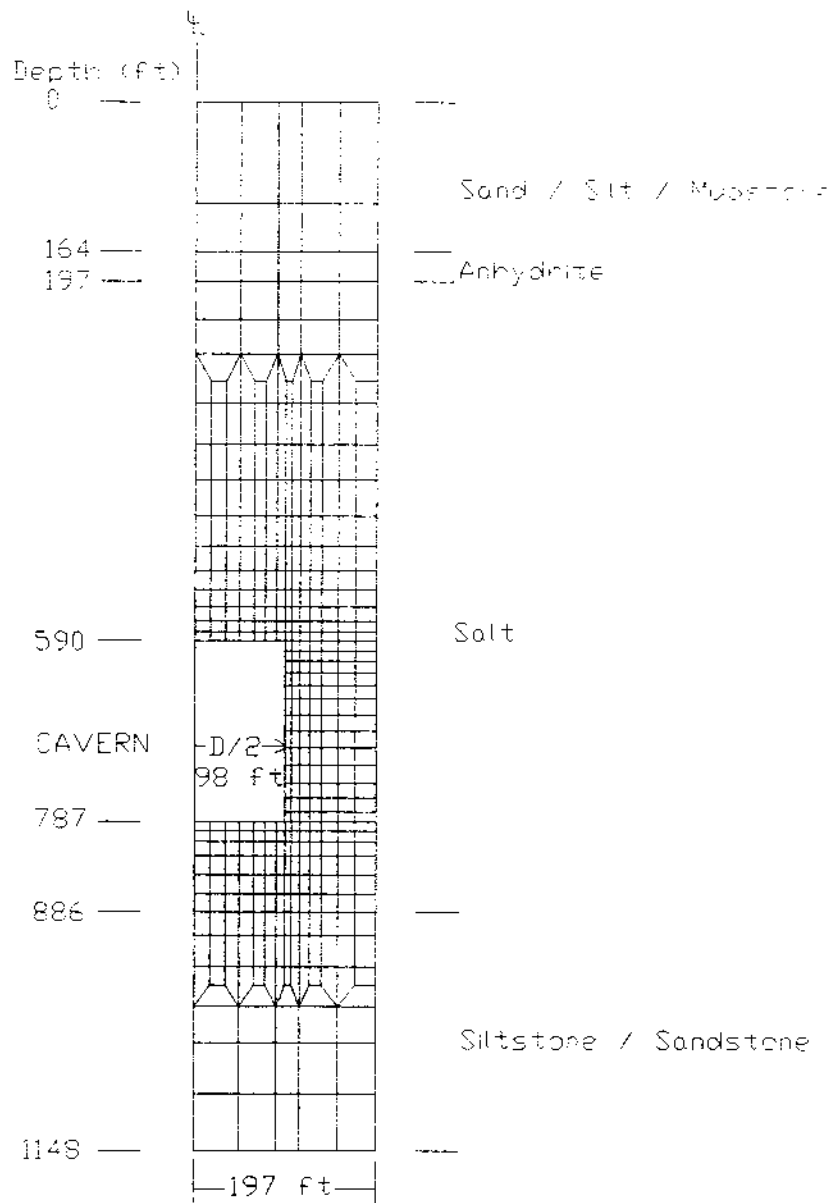
จากลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ ซึ่งได้เลือกขึ้นมาเพื่อศึกษาในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดความลึกของหลังคาของโพรงจากผิวดินไว้ที่ 180 เมตร หรือมีค่าเท่ากับความหนาของหินเกลือบนหลังคาของโพรงเท่ากับ 120 เมตร (รูปที่ 1) ความลึกนี้ได้ถูกเลือกโดยอาศัยประสบการณ์ของผู้วิจัยและโดยมีหลักเกณฑ์ที่ว่า หลังคาของโพรง (Salt roof) จะต้องมีความหนาเพียงพอที่จะค้ำยันตัวโพรงและชั้นหินหรือดินที่อยู่ข้างบนและในขณะที่เดียวกันก็จะไม่สึกเกินไปจนทำให้ปริมาตรของโพรงหรือความจุน้อยเกินไป

เนื่องจากความหนาของชั้นหินเกลือโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 210 เมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดความสูงของโพรงมีค่าเท่ากับ 60 เมตร ดังนั้นพื้นของโพรงในหินเกลือ (Salt floor) จึงมีค่าเท่ากับ 30 เมตร เช่นเดียวกันพื้นของโพรงในหินเกลือจะต้องหนาพอเพื่อป้องกันมิให้ของเสียไหลออกไปและจะต้องไม่หนาเกินไปจนทำให้ความจุของโพรงลดน้อยลงเกินไป พื้นของโพรงที่มีความหนา 30 เมตร ได้ถูกเลือกขึ้นโดยอาศัยประสบการณ์ของผู้วิจัย

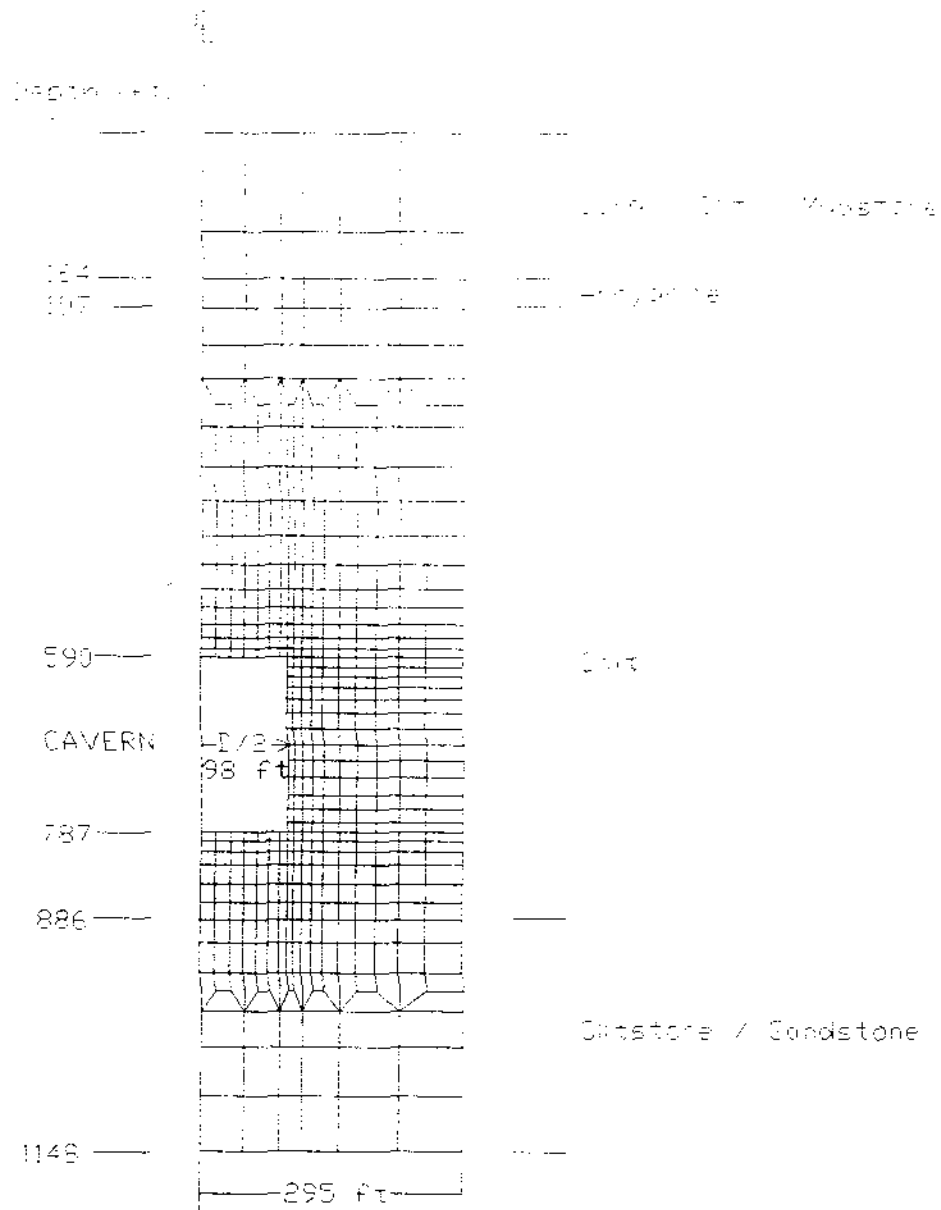
การคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะตั้งสมมติฐานว่า โพรงในหินเกลือที่ถูกออกแบบเพื่อเก็บของเสียจะมีหลายโพรงที่มีความลึกเท่ากัน และมีขนาดเท่ากันของแต่ละแบบจำลอง การเรียงตัวในแนวราบของโพรงจะเป็นแบบ Square grid โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง (Spacing S) เท่ากันหมด Square grid นี้จะเป็นแบบ infinite array อยู่ในบริเวณพื้นที่แนวราบในชั้นหินเกลือ ข้อสมมติฐานที่จะค่อนข้างปลอดภัย (Conservative assumption) ในเชิงของพฤติกรรมทางกลศาสตร์และชลศาสตร์ของหินเกลือและปลอดภัยในเชิงของการทรุดตัวของผิวดิน

### 3.2 การออกแบบ Mesh

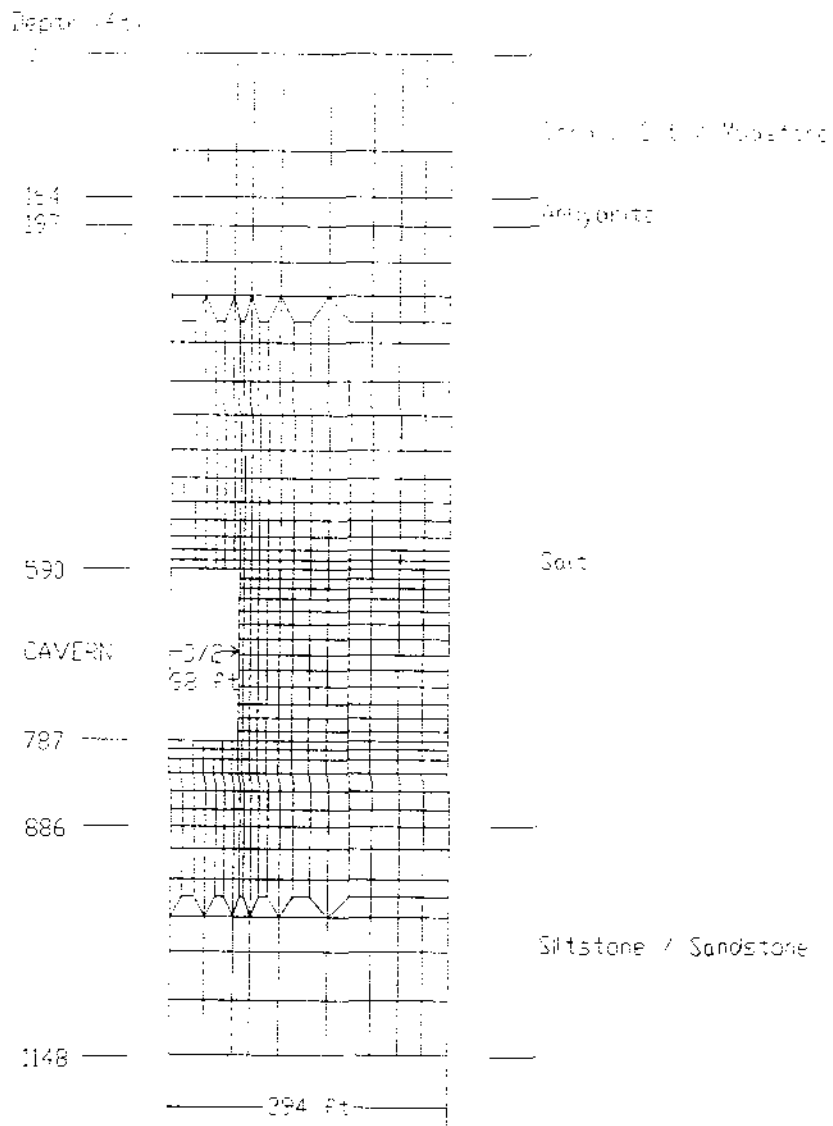
แบบจำลองทั้ง 5 แบบที่กล่าวมาจะสร้างมาจากภาพตัดขวางในแนวตั้ง โดยมีแกนของทรงกระบอกเป็นขอบเขตทางด้านซ้ายมือ และมีระยะห่างครึ่งหนึ่งระหว่างตัวโพรงเป็นขอบเขตทางด้านขวามือ ขอบเขตทั้งสองด้านนี้จะเปรียบเสมือนเป็น Symmetry plane ภาพตัดขวางนี้จะถูกจำลองตั้งแต่ผิวดินลงไปถึงความลึกเท่ากับ 350 เมตร (1148 ฟุต) รูปที่ 2-6 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองทั้ง 5 แบบที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูล ข้อกำหนด และข้อสมมติฐานที่กล่าวมาแล้ว ช่อง (element) ในโพรงจะไม่ได้ถูกเขียนลงเนื่องจากความต้องการที่จะแสดงขอบเขตของโพรงใน Mesh จะเห็นได้ว่าการออกแบบ Mesh จะใช้ช่อง (element) ที่มีขนาดเล็กในบริเวณที่ใกล้กับตัวโพรง เนื่องจากในบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นและความเครียดสูง (high stress and strain gradient) ส่วนในบริเวณที่ไกลจากตัวโพรงจะใช้ช่อง (element) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง stress



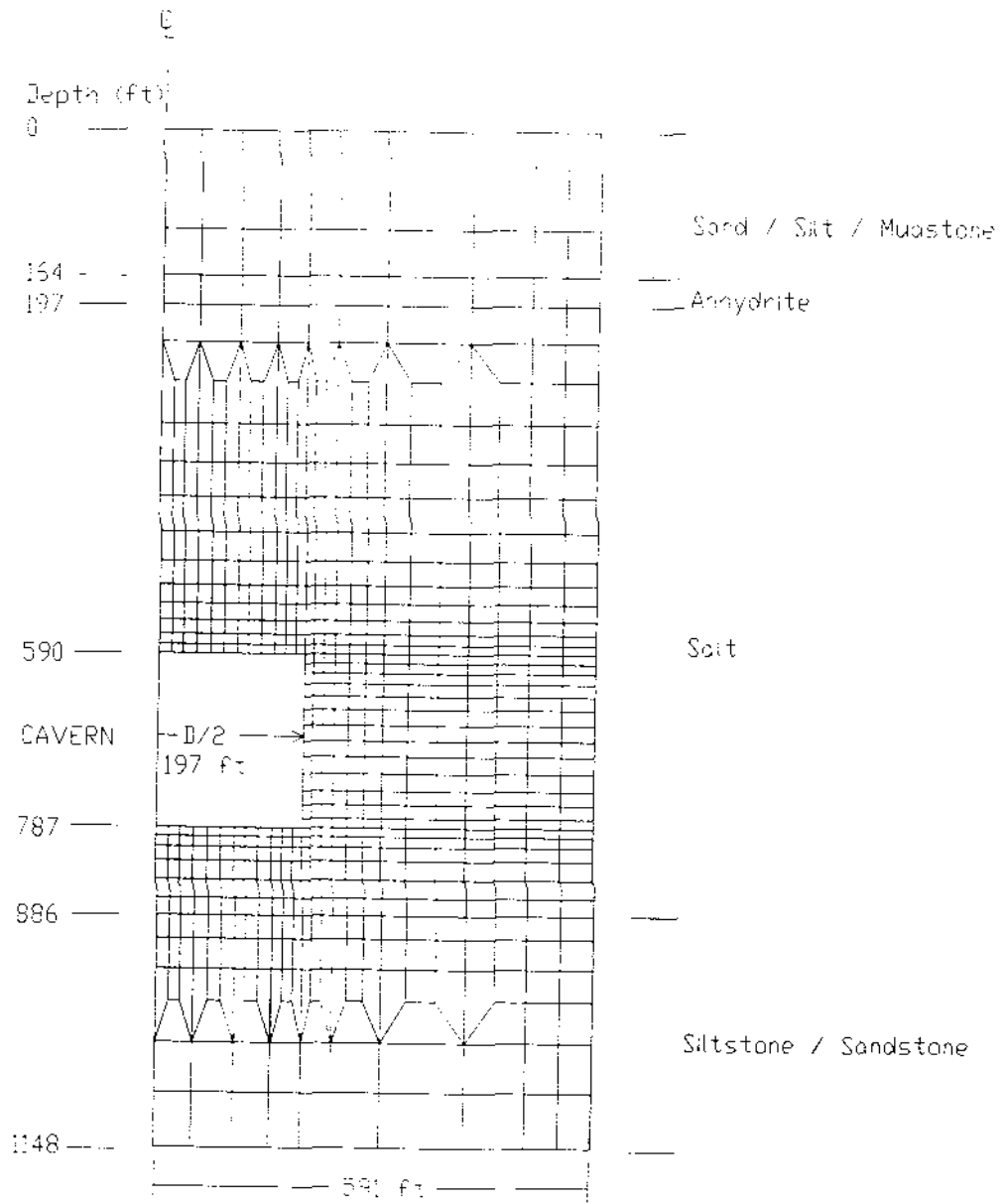
รูปที่ 2 การออกแบบ Mesh ของแนวจำลอง S1A และ S1B



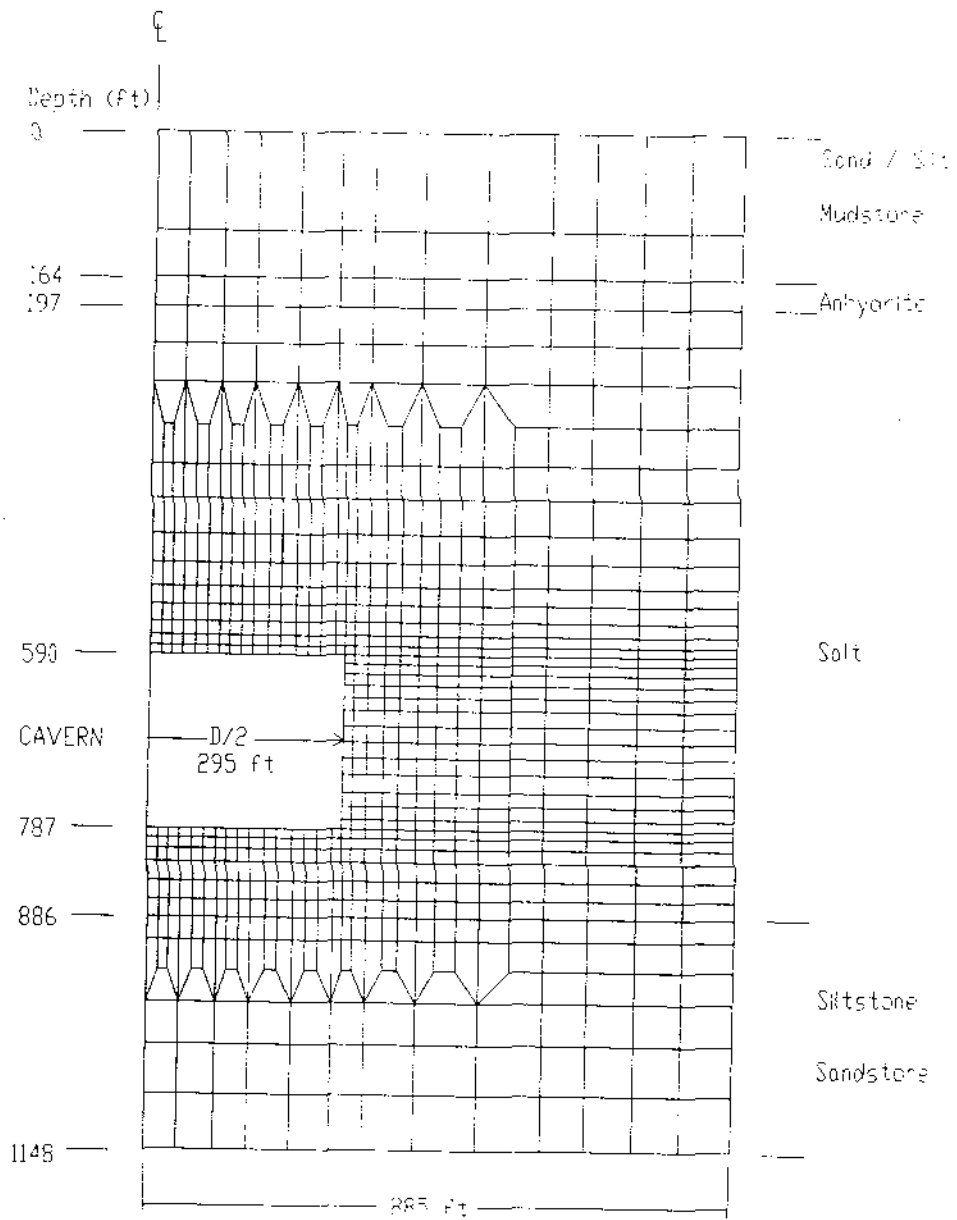
รูปที่ 3 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง S2A และ S2B



รูปที่ 4 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง S3A และ S3B



รูปที่ 5 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง E1A และ E1B



รูปที่ 6 การออกแบบ Mesh ของแบบจำลอง E2A และ E2B

และ strain ต่ำ รูปที่ 2-6 นี้ยังแสดงให้เห็นถึงความหนาของชั้นหินแต่ละชั้นที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ที่นำมาศึกษา ตารางที่ 3 จะสรุปให้เห็นถึงจำนวนและขนาดของ element และ node ของ mesh ที่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับ 5 แบบจำลองนี้

### 3.3 ความเค้นในหิน (In-situ Stress)

ความเค้นในชั้นหินเกลือและชั้นหินที่เกี่ยวข้องจะถูกคำนวณจากสมมติฐานที่ว่า ชั้นหินทั้งหมดอยู่ภายใต้แรงกดแบบ Hydrostatic ดังนั้นการคำนวณความเค้นในหินทั้งในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลึกใด ๆ ก็สามารถทำได้เมื่อเรารู้ค่าความถ่วงจำเพาะของหินแต่ละชั้น ข้อสันนิษฐานนี้ค่อนข้างจะใกล้เคียงความจริงเนื่องจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นลักษณะแอ่งที่อยู่ในที่ราบสูง ถึงแม้จะไม่มี การวัดค่าความเค้นในชั้นหินนี้ (In-situ Stress) แต่ว่าการคำนวณแบบ Hydrostatic จะได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างปลอดภัย โดยเฉพาะในเชิงออกแบบและวิเคราะห์

สำหรับหินเกลือค่าความถ่วงจำเพาะในเชิงความลึกจะสามารถคำนวณได้จากค่า 0.937 psi per ft ส่วนในชั้นหินดินดานและหินตะกอนจะคำนวณได้จาก 1.10 psi per ft ค่านี้ที่นำมาใช้จะมีค่าประมาณ 10% สูงกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของหินนั้น ๆ เนื่องจากว่าจะต้องมีการทดแทนเพราะการวิเคราะห์ในแบบจำลองนี้จะสมมติว่าฝั่งของตัวโพรงทั้งหมดอยู่ใน plane strain assumption



ตารางที่ 3 : การออกแบบ Mesh สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัย

แบบจำลอง (Model No.)	จำนวนจุดตัด (Node)	จำนวนช่อง (Element)	ระยะห่างระหว่างโพรง เมตร (ฟุต)	ความลึก เมตร
S1A	560	512	60 (197)	350
S1B	560	512	60 (197)	350
S2A	670	621	90 (295)	350
S2B	670	621	90 (295)	350
S3A	802	750	120 (394)	350
S3B	802	750	120 (394)	350
E1A	956	905	180 (591)	350
E1B	956	905	180 (591)	350
E2A	1114	1060	270 (885)	350
E2B	1114	1060	270 (885)	350

## บทที่ 4

### ผลของการคำนวณ

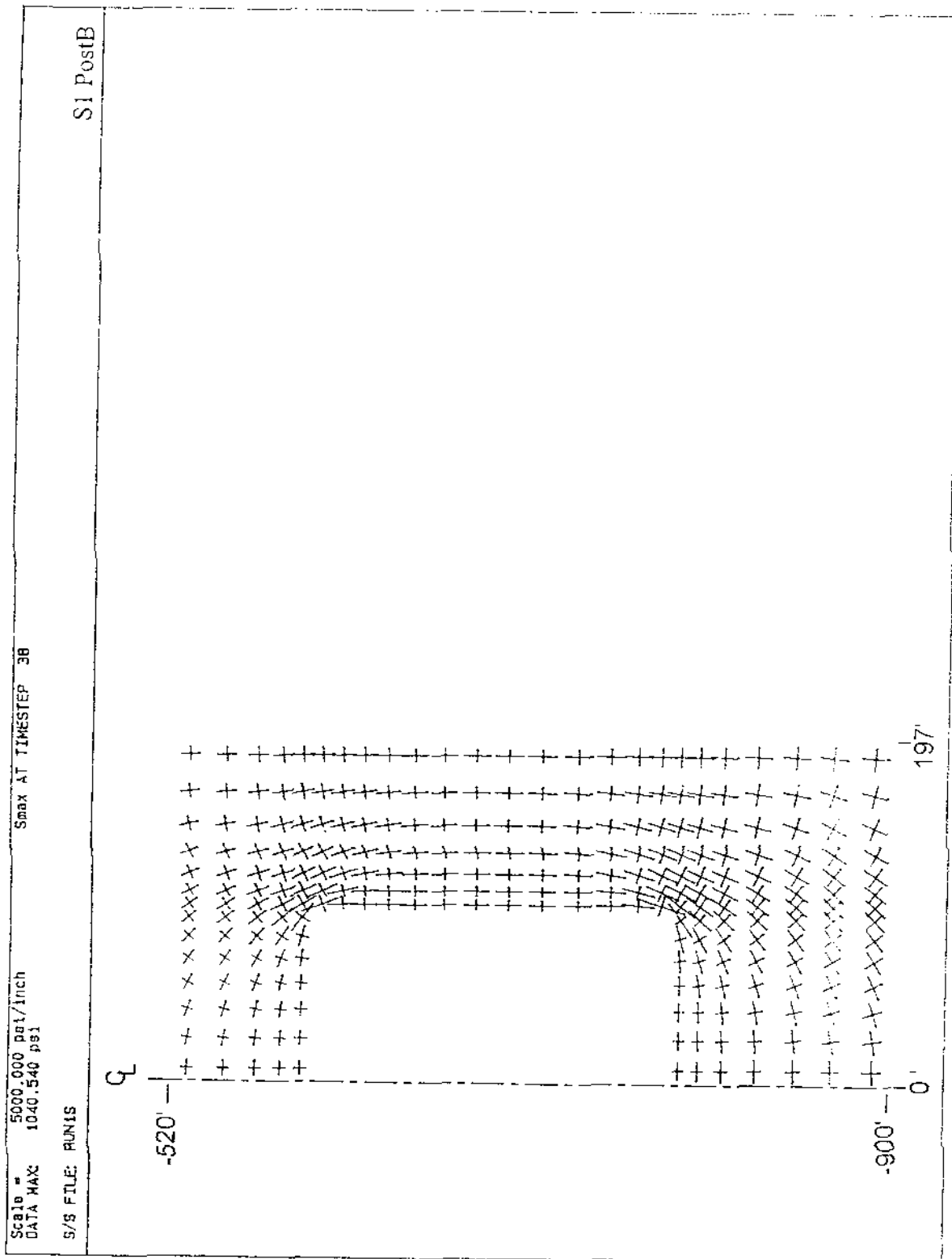
การคำนวณโดยใช้โปรแกรม GEO จะเน้นไปที่การพิจารณาค่าของความเค้น ความเครียด การทรุดตัวของผิวดิน การหดตัวของโพรง และการเพิ่มค่าซึมผ่านในหินเกลือ (Permeability Increase) และเนื่องจากเสถียรภาพอันยาวนานของโพรงจะเป็นเป้าหมายอันสูงสุด ดังนั้นพฤติกรรมของหินเกลือทั้งทางด้านกลศาสตร์และซลศาสตร์หลังจากที่โพรงมีอายุการเก็บของเสีย ที่ 100 ปีขึ้นไปจึงถูกนำมาพิจารณาในขั้นตอนนี้

รูปที่ 7-11 แสดงขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลัก (Principal Stresses) ในหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงที่มีอายุ 100 ปีของแบบจำลอง S1B, S2B, S3B, E1B และ E2B ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นจะมีค่าสูงสุดในบริเวณมุมของโพรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า S/D มีค่าสูงขึ้น เช่น แบบจำลอง E1B และ E2B เป็นต้น (รูปที่ 10 และ 11) ค่าความเค้นนี้จะบ่งบอกให้เห็นถึงเสถียรภาพของโพรง กล่าวคือ ยิ่งความเค้นสูงขึ้นเสถียรภาพจะมีแนวโน้มที่จะต่ำลง

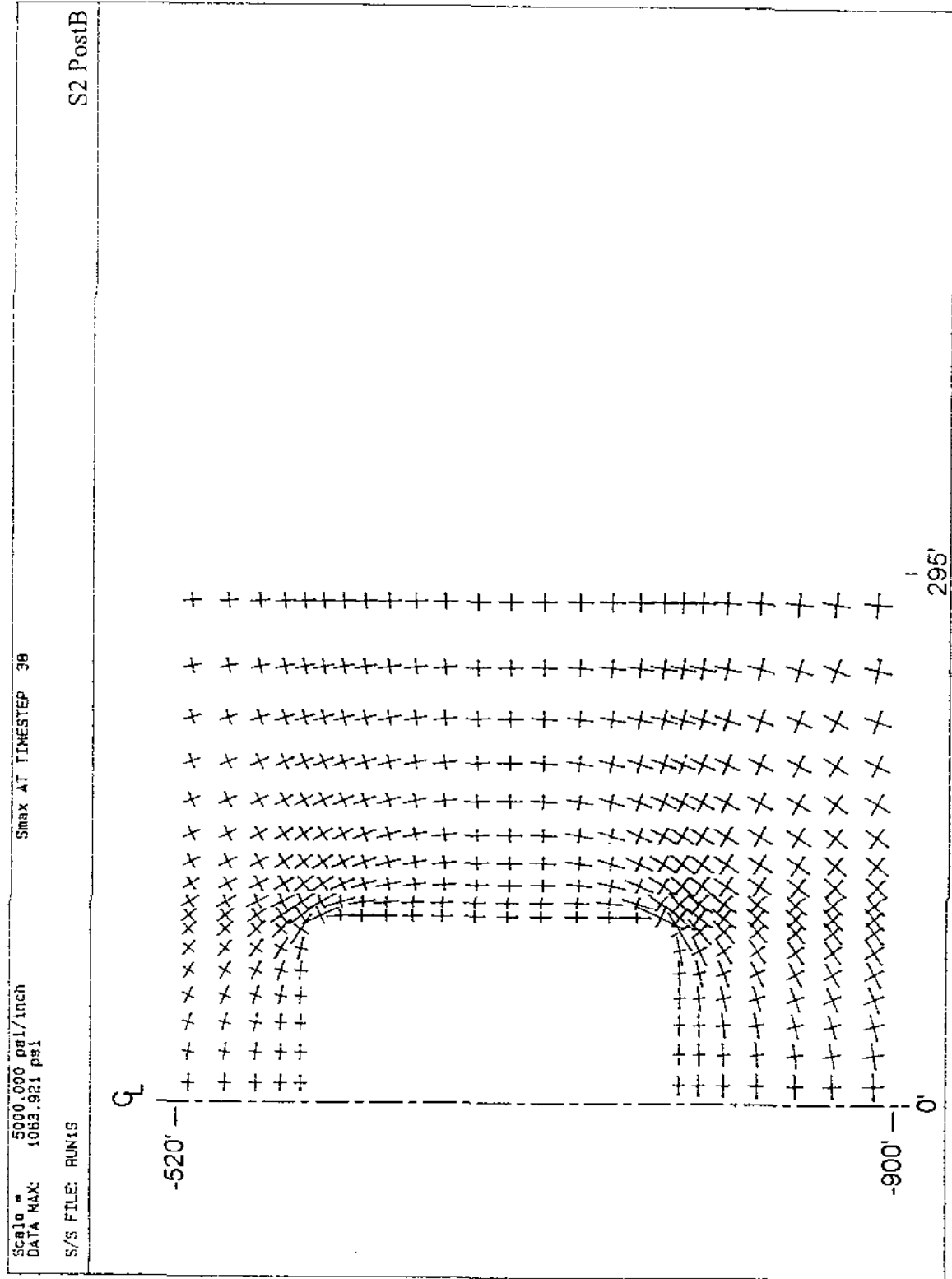
รูปที่ 12-16 แสดงขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลัก (Principal Strains) ในหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงที่มีอายุเก็บของเสียที่ 100 ปี ของแบบจำลอง S1B, S2B, S3B, E1B และ E2B ตามลำดับ ขนาดและทิศทางของความเครียดนี้จะบ่งบอกให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปของหินเกลือรอบ ๆ โพรง ซึ่งในที่สุดก็จะแสดงออกมาในรูปของการหดตัวของโพรงทั้งในแนวตั้งและแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง

ในบริเวณมุมของโพรงจะมีความเค้นมาสะสมอยู่มาก รูปที่ 17-21 แสดงถึงการสะสมตัวของความเค้นในแนวเฉือนตามมุมของโพรงในหินเกลือสำหรับแบบจำลอง S1B, S2B, S3B, E1B และ E2B ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของแรงเฉือน (Octahedral Shear Stresses) ของแต่ละแบบจำลองจะมีค่าไม่ต่างกันมากนักหลังจากที่โพรงได้ถูกเก็บของเสียมา 100 ปี การแพร่กระจายของแรงเฉือนในหินเกลือนี้จะขึ้นอยู่กับค่า S/D และค่า H/D ที่นำมาใช้

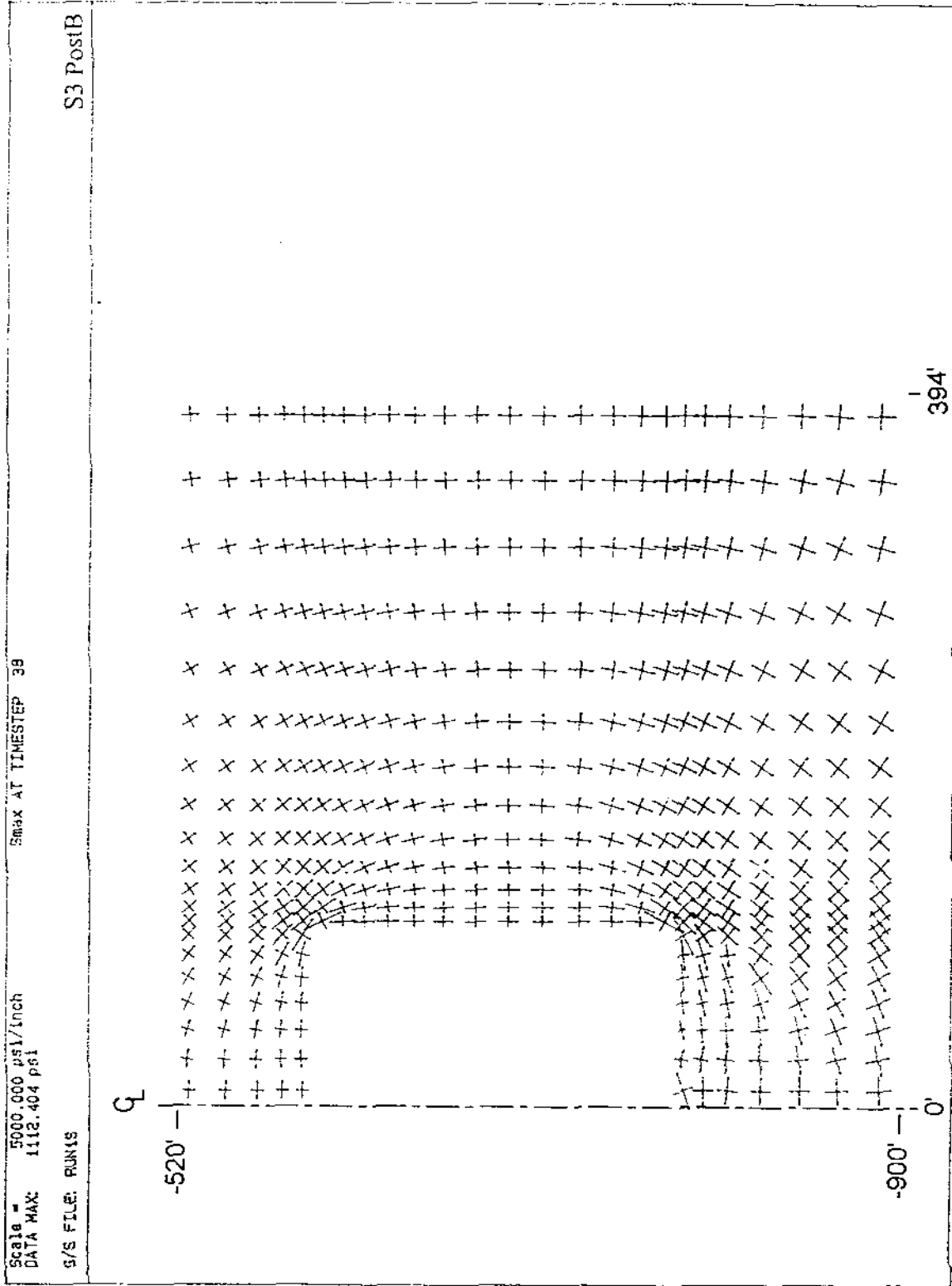
ตารางที่ 4 แสดงผลของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในรูปของการทรุดตัวของผิวดินหลังจากที่โพรงมีอายุได้ 1 ปี, 5 ปี, 10 ปี, 25 ปี, 50 ปี และ 100 ปี ทั้งโพรงที่มีแรงดันภายใน (Internal Pressure) เป็นน้ำเกลือ (Brine) และโพรงที่ไม่มีแรงดัน (มีแรงดันเป็นศูนย์ หรือมีแรงดันเป็น



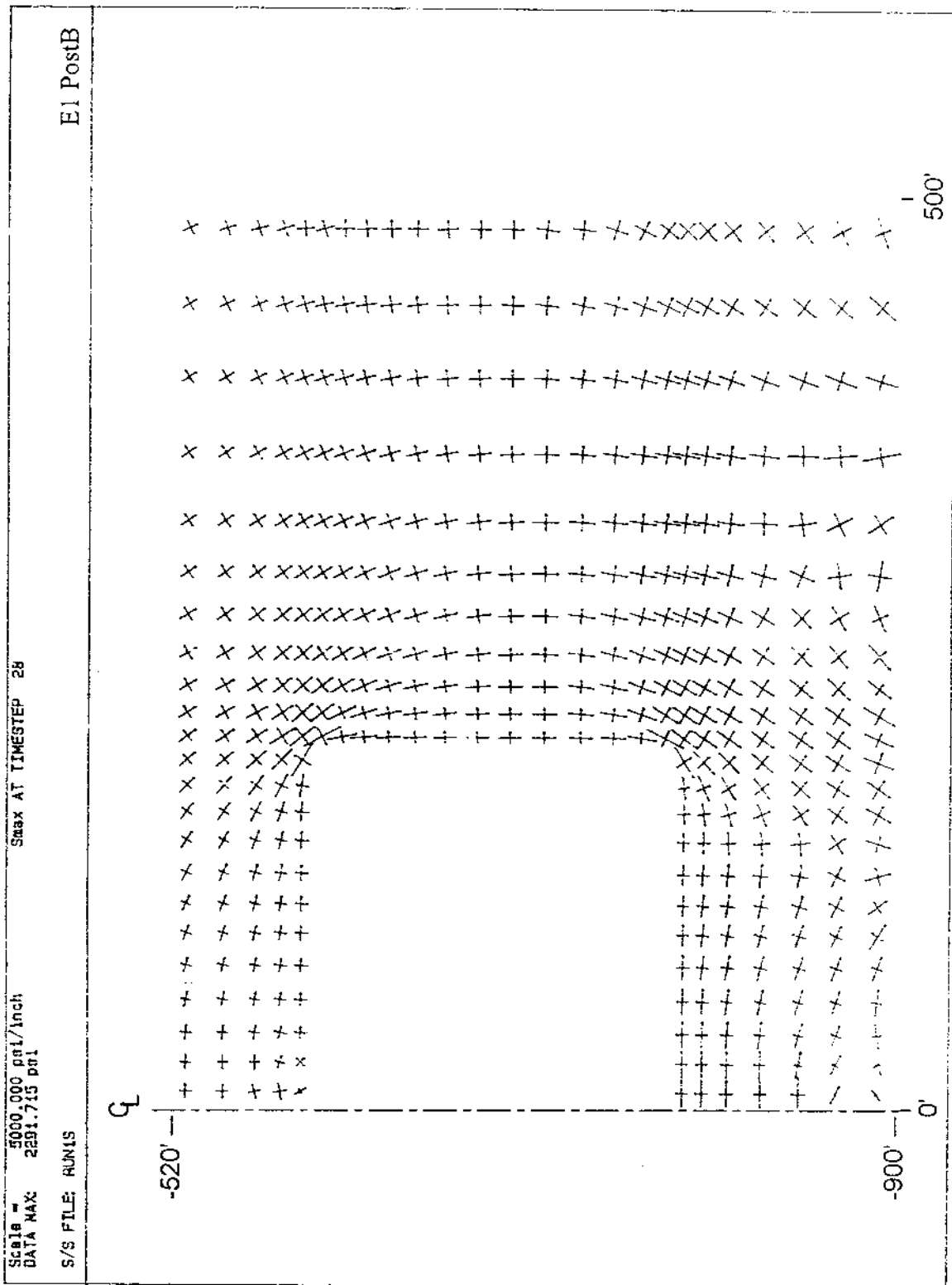
รูปที่ 7 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง SIB



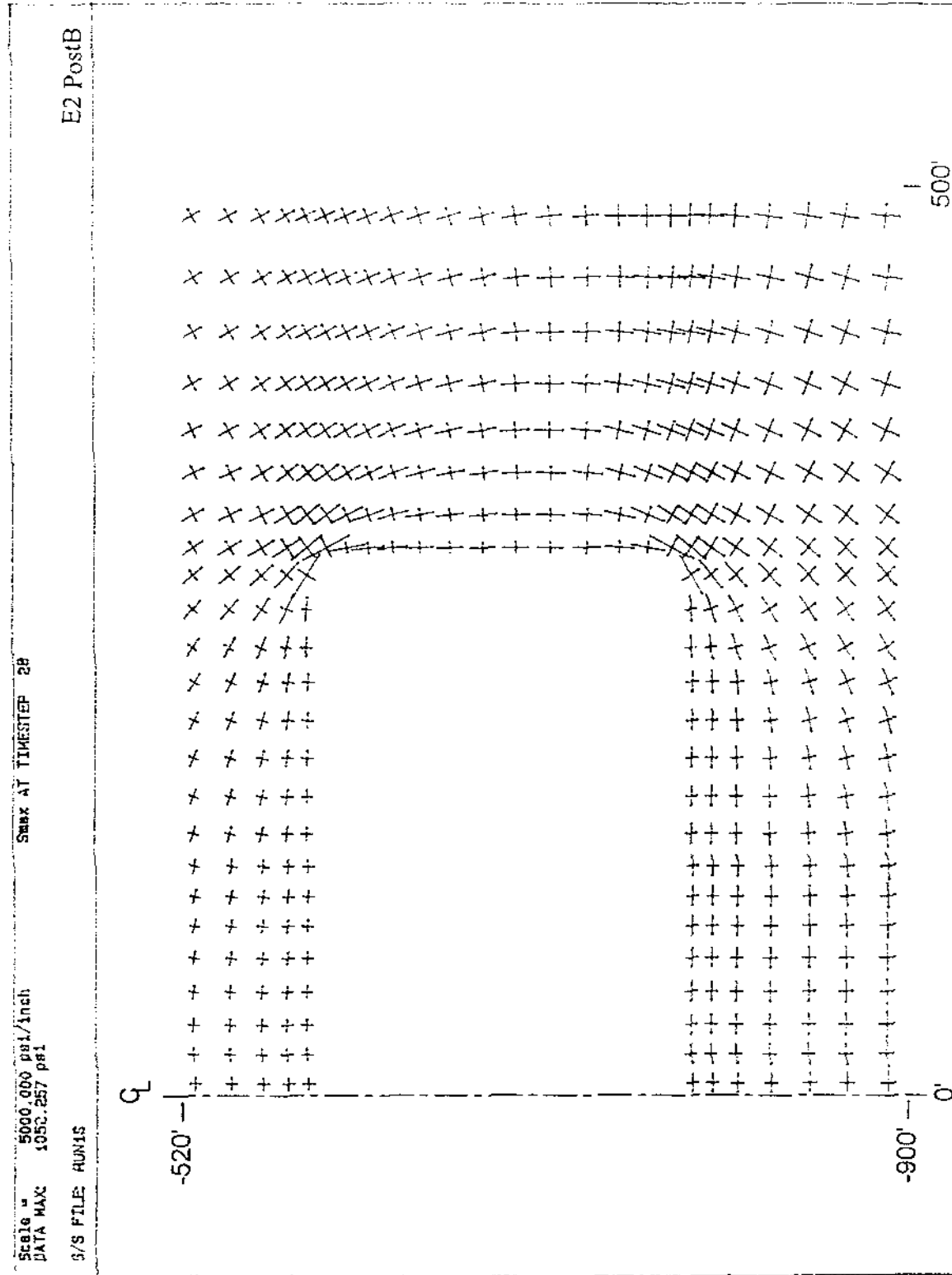
รูปที่ 8 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินกลีรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S2B



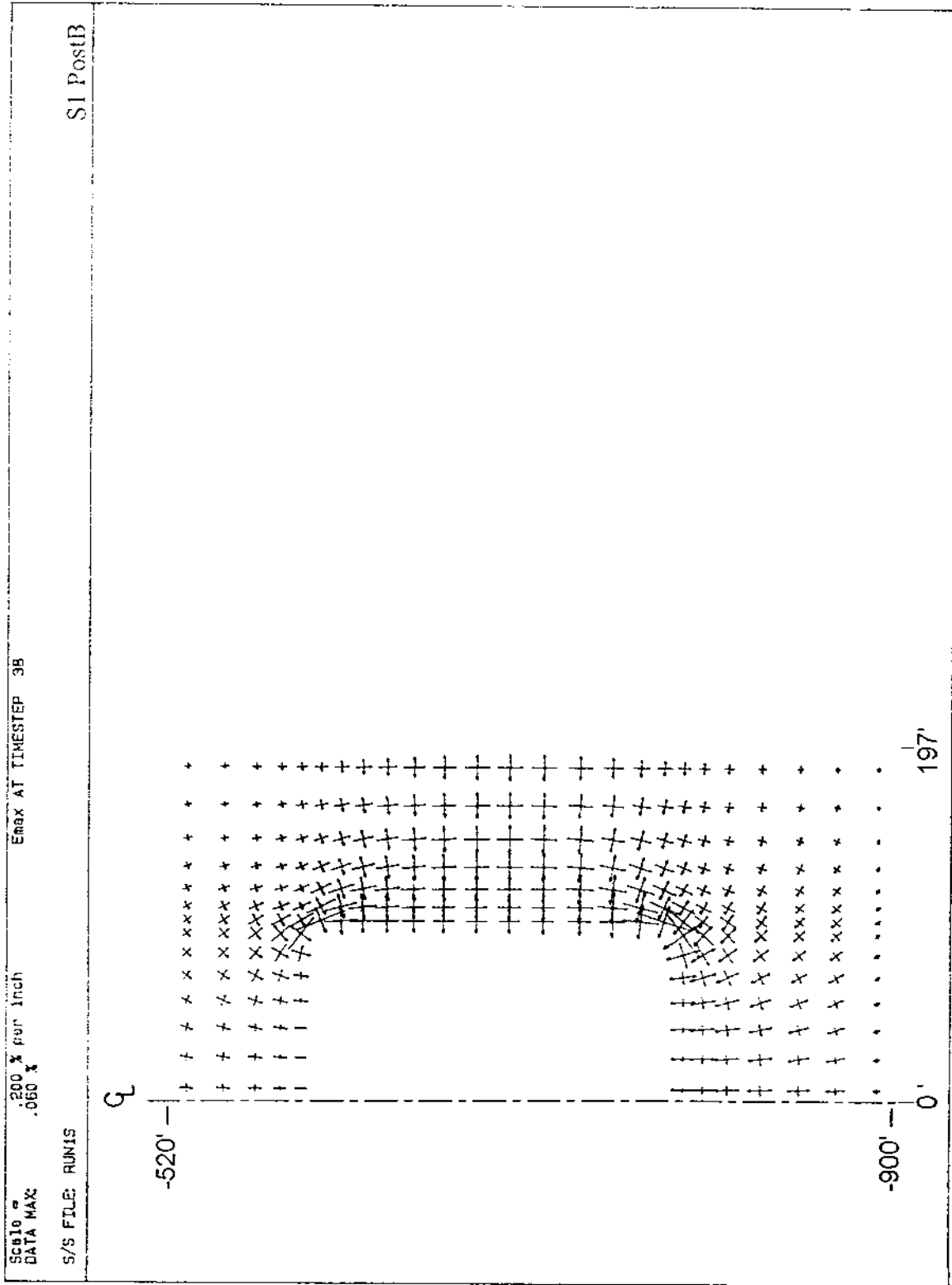
รูปที่ 9 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักในหินกลีรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S3B



รูปที่ 10 ขนาดและทิศทางของความดันในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรจางแบบกึ่งของ E1B

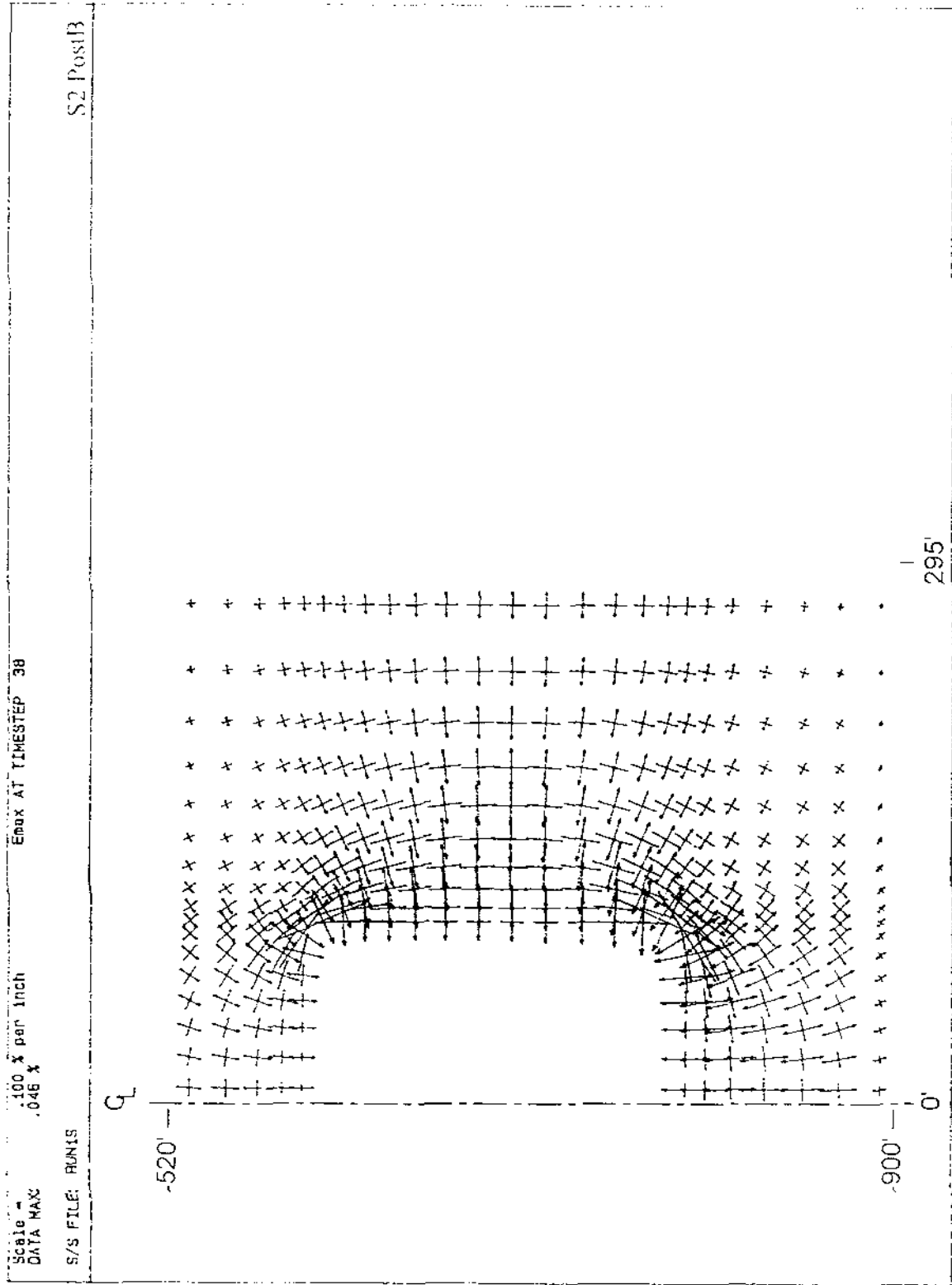


รูปที่ 11 ขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลักทั้งสี่แกนรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E2B

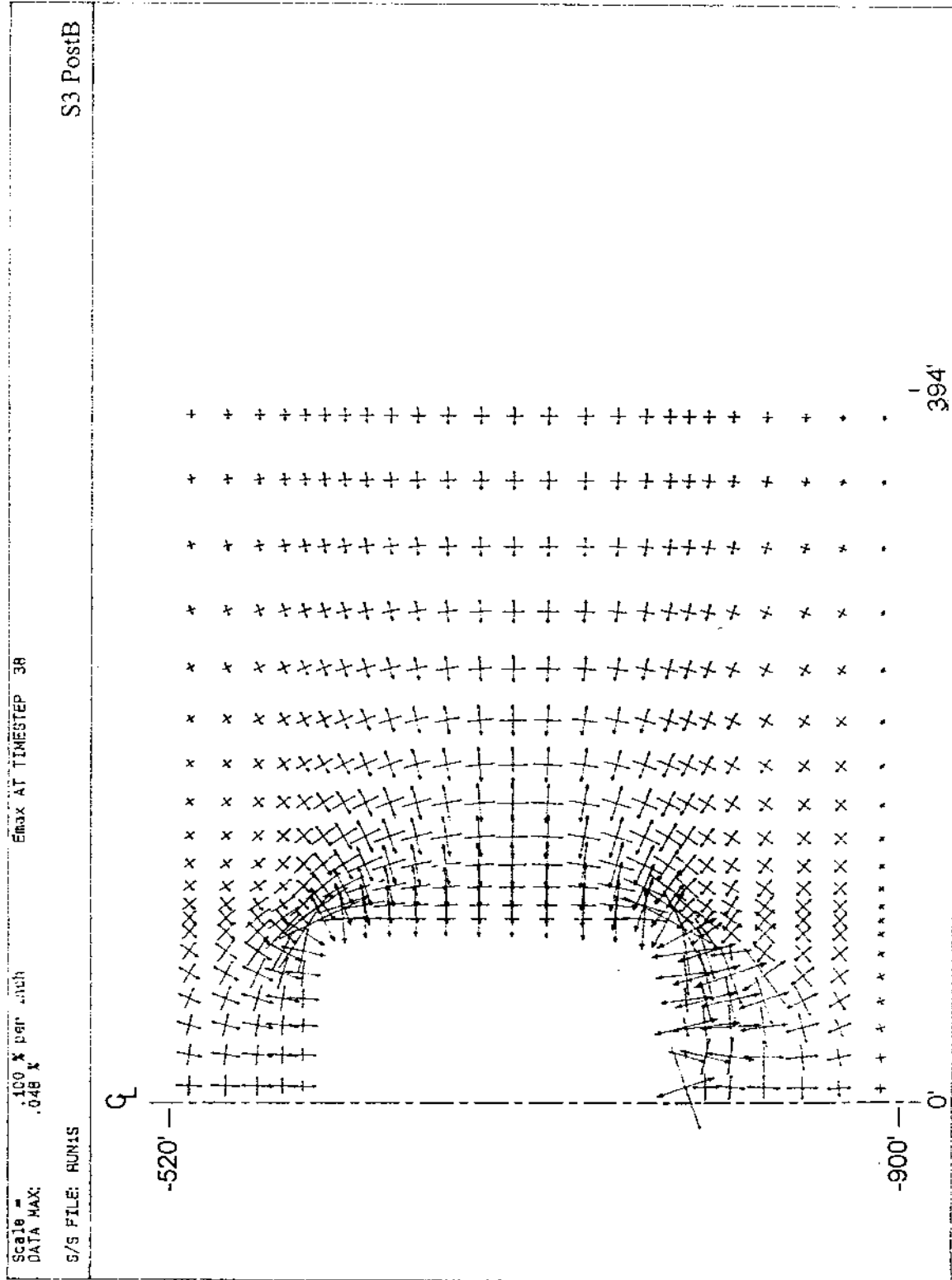


รูปที่ 12 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง SIB

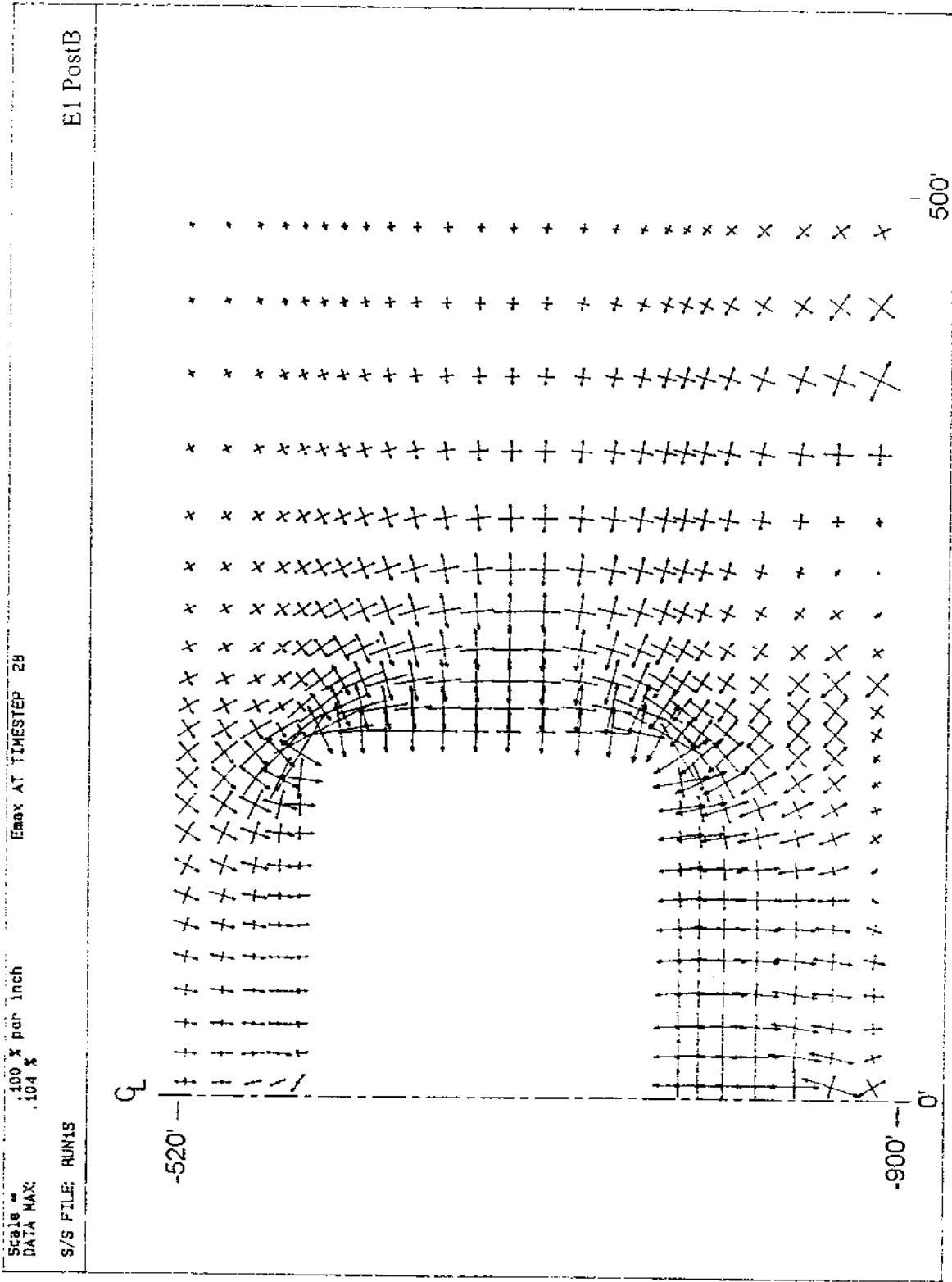




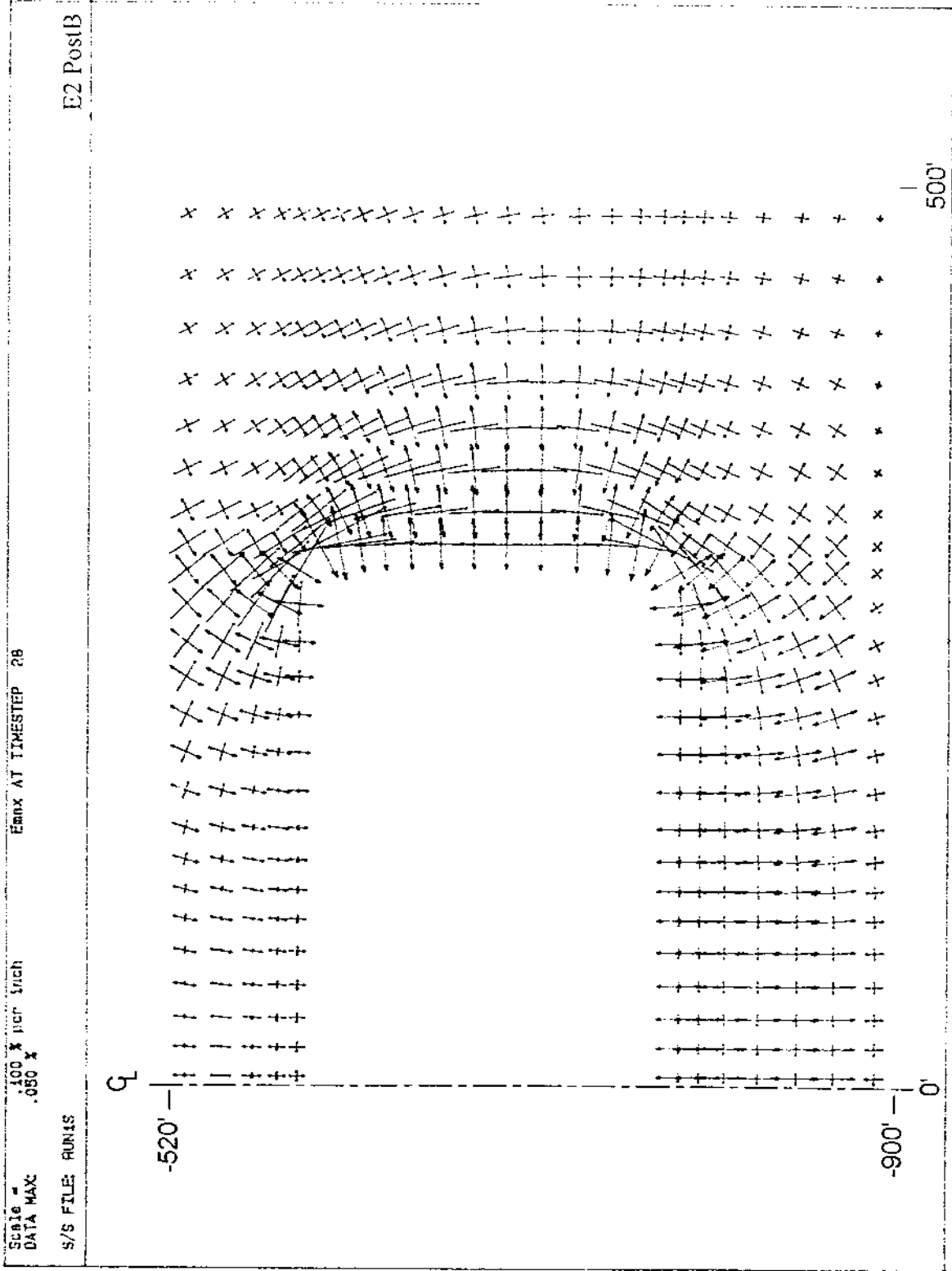
รูปที่ 13 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินกัลีอรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S2B



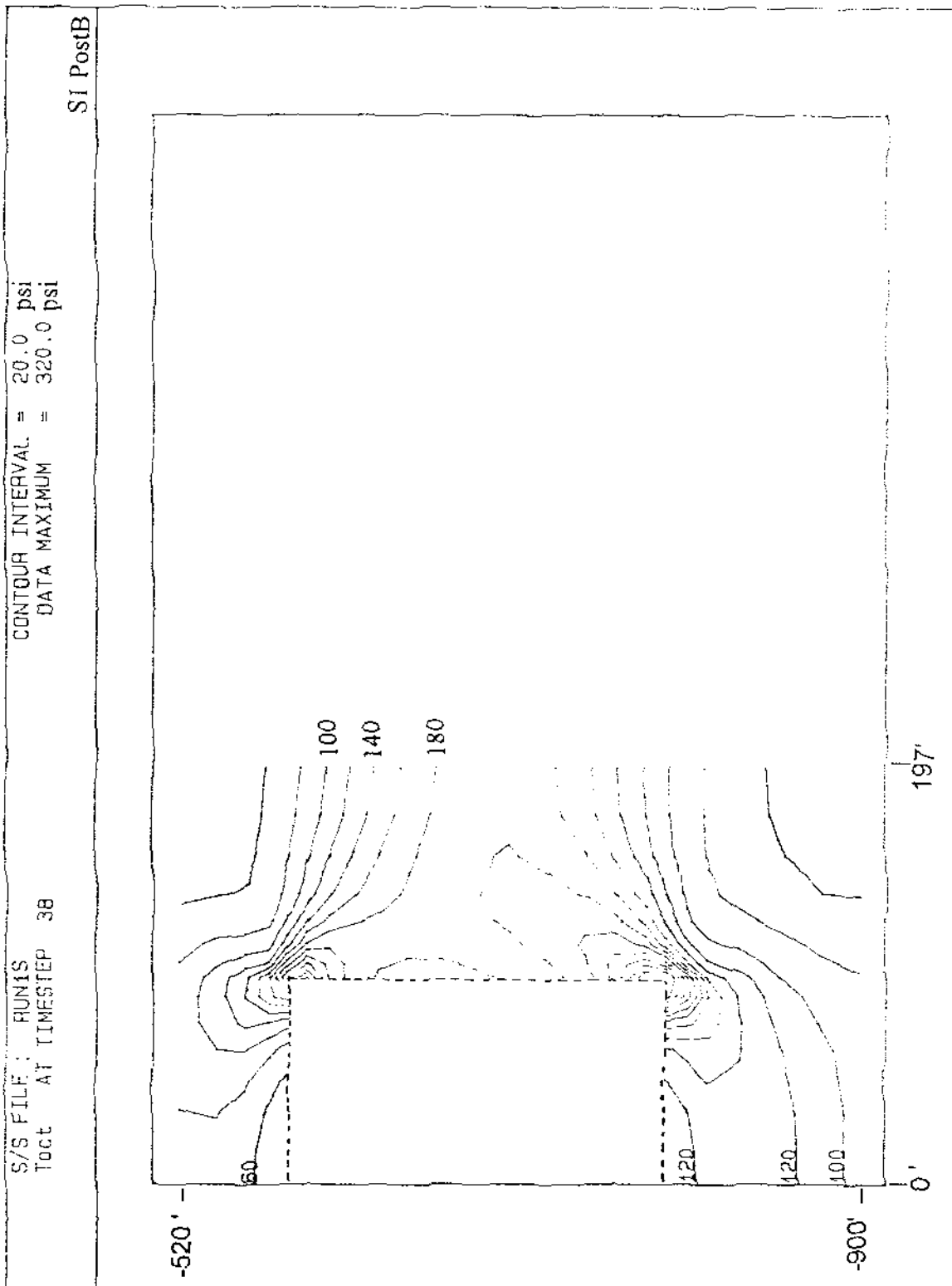
รูปที่ 14 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S3B



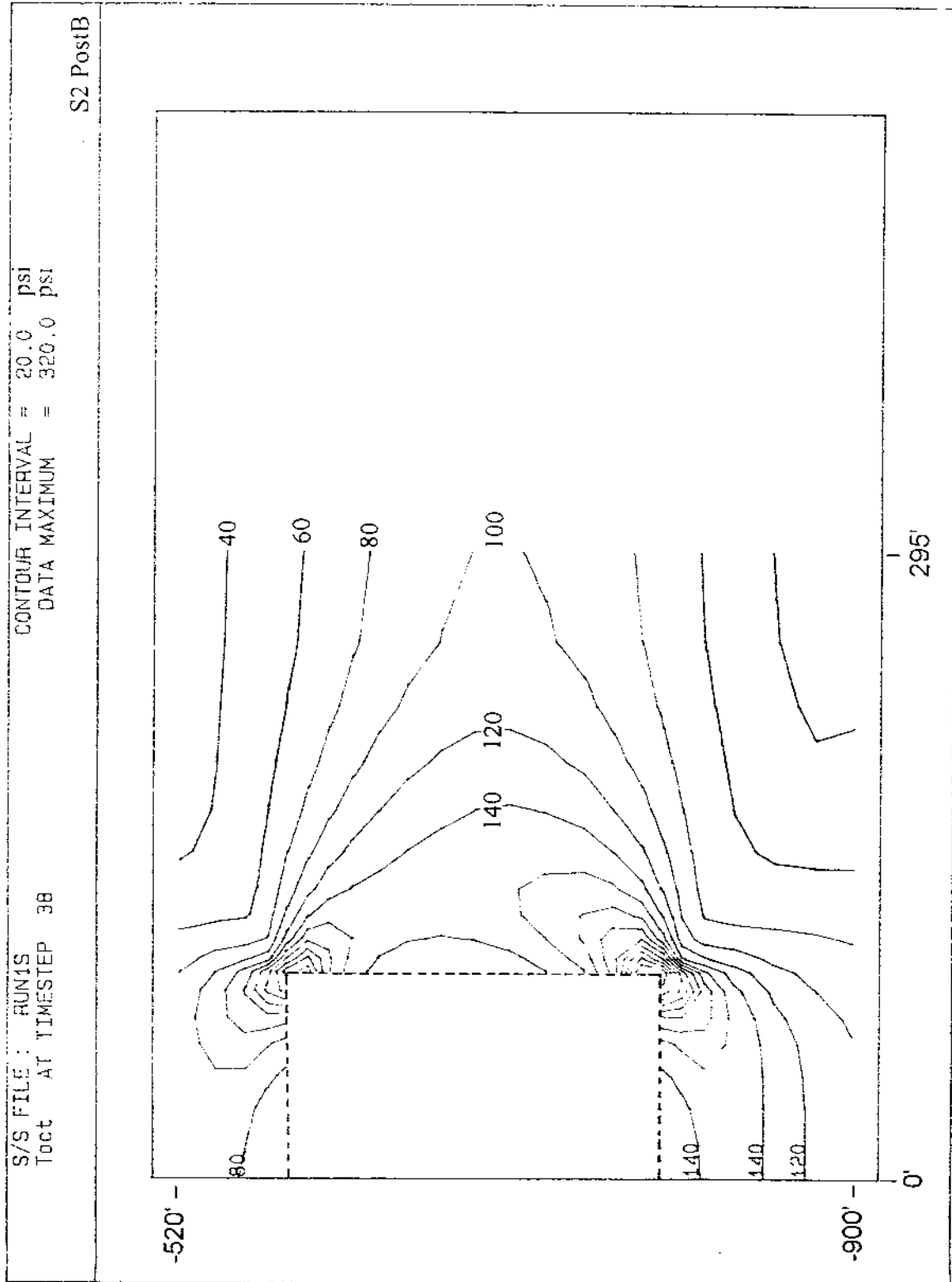
รูปที่ 15 ขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลักในหินเกลือ E1B



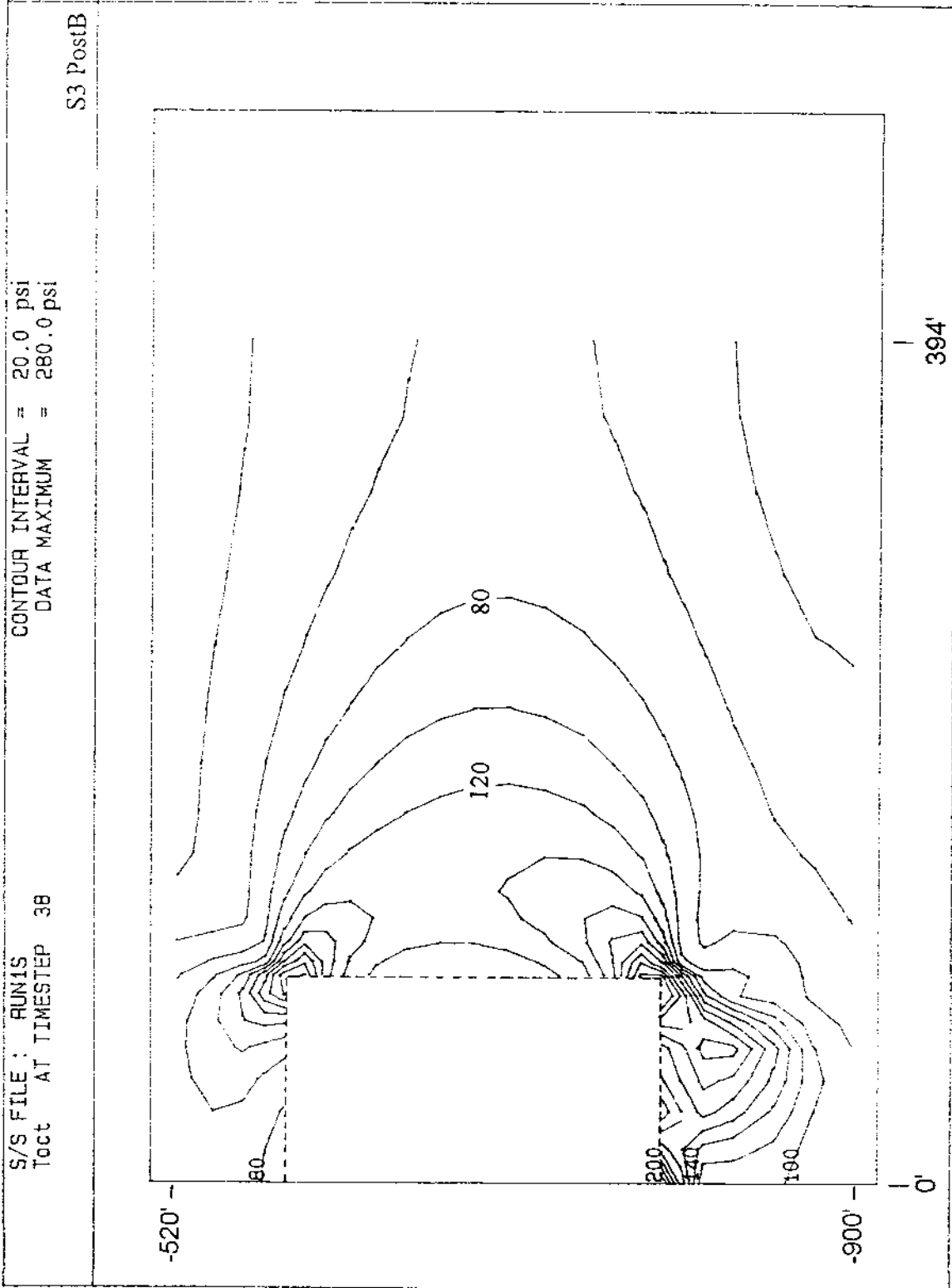
รูปที่ 16 ขนาดและทิศทางของความเร็วที่แทนหลักในหินเคอโรบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E2B



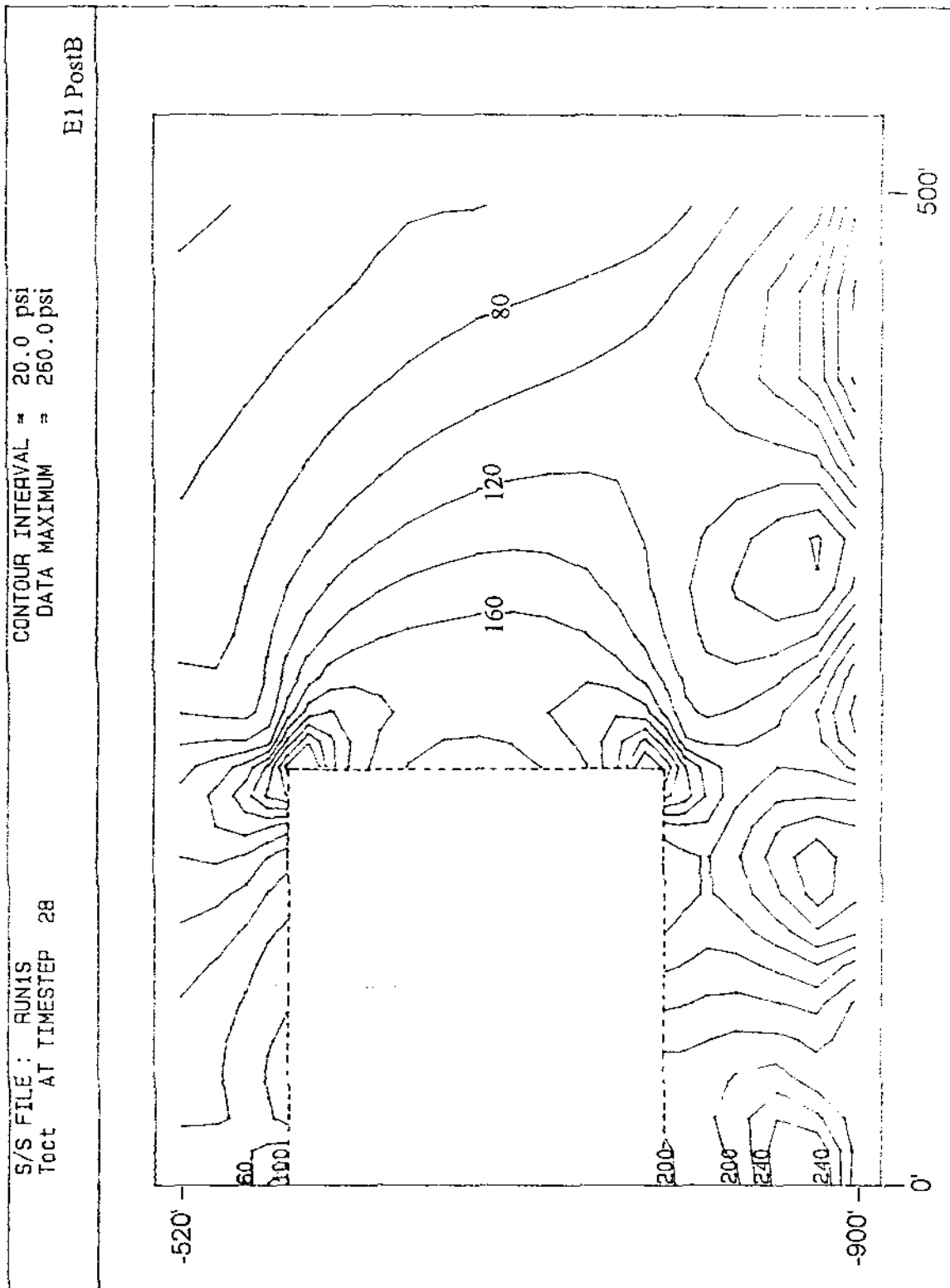
รูปที่ 17 ความดันในแนวเดือนหินที่มาก็คือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง SIB



รูปที่ 18 ความเค้นในแนวตั้งในหินกึ่งลึรอบ ๆ โครงของแบบจำลอง S2B

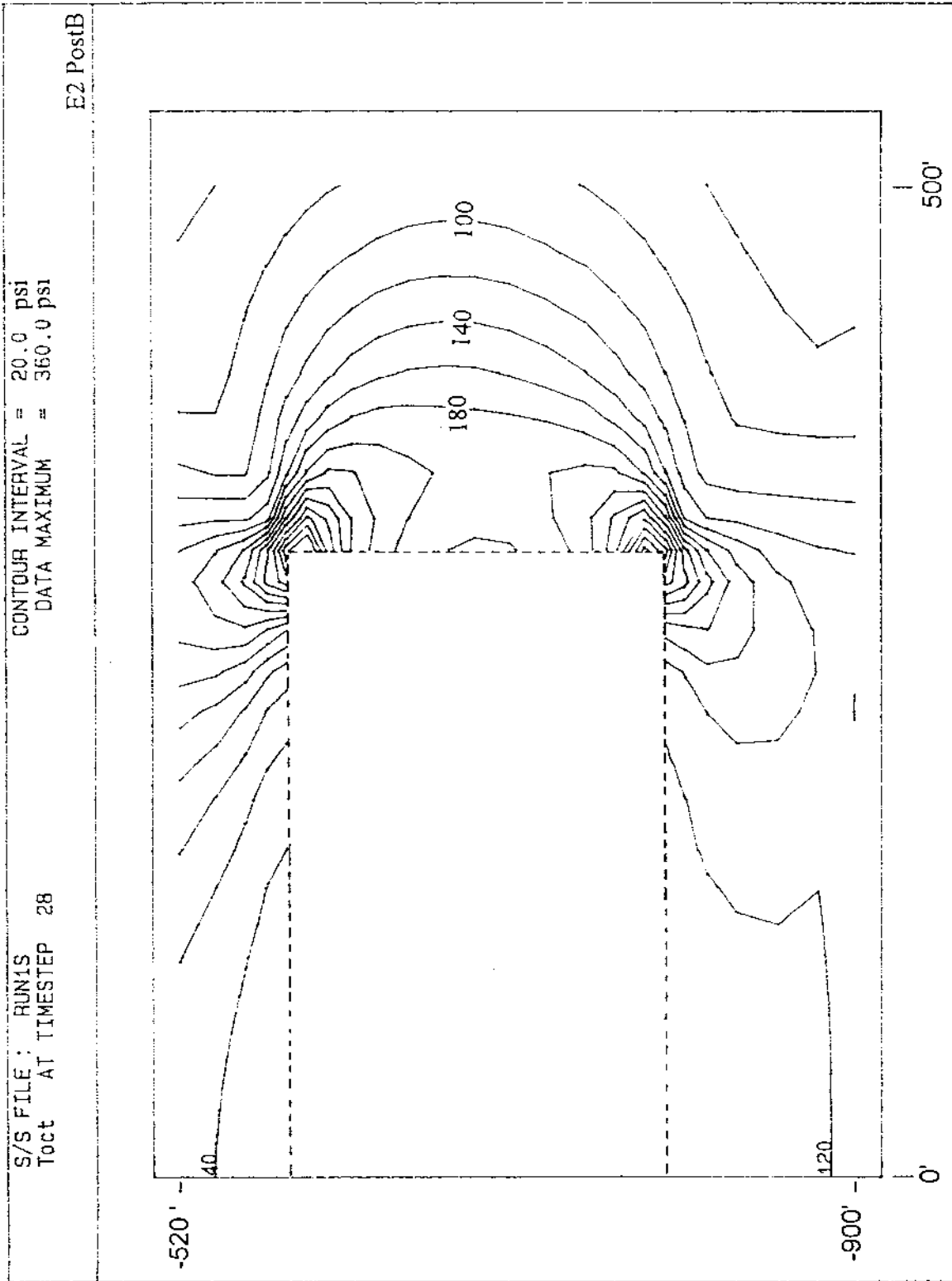


รูปที่ 19 ความเค้นในแนวเดือนในหินกึ่งลึกรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง S3B



รูปที่ 20 ความดันในแนวเค้นในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแบบจำลอง E1B





รูปที่ 21 ความดันในแนวเส้นในหินเกลือรอบ ๆ โพรงของแท่งจำลอง E2B

ตารางที่ 4 : ผลการทรุดตัวของพื้นผิวดินข้างบนบริเวณโพรง

แบบจำลอง	การทรุดตัวของผิวดิน (ft)					
	1 ปี	5 ปี	10 ปี	25 ปี	50 ปี	100 ปี
S1A	1.00	9.00	20.10	51.0	C	C
S1B	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
S2A	0.17	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
S2B	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
S3A	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
S3B	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
E1A	0.5	0.6	0.6	6.2	16.0	C
E1B	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
E2A	1.0	14	30	100	C	C
E2B	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

C = Collapse = การทรุดตัวมากถึงจุดที่คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำให้ Solution ถูก Convert ได้

อากาศ) โพรงในแบบแรกจะมีอักษรย่อเป็น “B” ซึ่งย่อมาจาก Brine และโพรงในแบบที่สองจะมีอักษรย่อเป็น “A” ซึ่งย่อมาจาก Air ในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดการทรุดตัวของผิวดินจะแสดงออกมามีหน่วยเป็นฟุต ส่วนสัญลักษณ์ “C” จะบอกให้รู้ว่าการทรุดตัวได้มีมากถึงจุดเกินขอบเขตข้อสมมติฐานของทฤษฎีที่เสนอ คือ เกิน Limit ของ Infinitesimal Strain จากผลในตารางที่ 4 นี้จะเห็นได้ว่าการทรุดตัวของผิวดินจะน้อยเมื่อมีแรงดันในโพรงหินเท่ากับแรงดันของน้ำเกลือ แต่ถ้าปล่อยให้โพรงอยู่โดยไม่มีแรงดันการทรุดตัวของผิวดินจะมากกว่า ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองแบบใดการทรุดตัวน้อยที่สุดจะได้มาจากการออกแบบโพรงแบบ S2 และ S3

ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงการหดตัวในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงในหินเกลือในแต่ละแบบจำลอง ผลที่ได้นำมาจากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของอายุของโพรงที่ 1 ปี, 5 ปี, 10 ปี, 25 ปี, 50 ปี และ 100 ปี ค่า “C” แสดงให้เห็นว่าผนังของโพรงเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจนเกิดการพังทลาย (Collapse) การพังทลายจะไม่เกิดกับแบบจำลอง S2 และ S3 ไม่ว่าจะมีความดันของน้ำเกลืออยู่ในโพรงหรือเป็นอากาศก็ตาม

การหดตัวของโพรงในหินเกลือในแนวตั้งของแบบจำลองต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 6 ข้อมูลได้นำมาแสดงที่อายุของโพรงเท่ากับ 1 ปี, 5 ปี, 10 ปี, 25 ปี, 50 ปี และ 100 ปี การพังทลายของหลังคาของโพรงเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปร่างตามกาลเวลา (Creep Deformation) จะถูกกำหนดเป็นตัวอักษร “C” แบบจำลอง S2 และ S3 จะไม่มีการพังทลายของหลังคาของโพรง

ตารางที่ 7 แสดงผลค่าความซึมผ่านสูงสุด (Maximum Permeability) ในชั้นหินเกลือรอบ ๆ โพรงของทุกแบบจำลอง ผลที่แสดงจะมีหน่วยเป็น Darcy ซึ่งได้ถูกคำนวณที่อายุของโพรงที่ 1 ปี, 5 ปี, 10 ปี, 25 ปี, 50 ปี และ 100 ปี ตัวอักษร “C” หมายถึง ค่าความซึมผ่านมีค่าสูงเกินกว่าที่การคำนวณจะสามารถให้ผลลัพธ์มีค่าคงตัวได้ (Not Convergence) ค่าความซึมผ่านที่ต่ำสุดจะได้มาจากการใช้แบบจำลอง S2 และ S3

ตารางที่ 5 : ผลการหดตัวในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง .

แบบจำลอง	การหดตัวตามเส้นผ่าศูนย์กลาง (ft)					
	1 ปี	5 ปี	10 ปี	25 ปี	50 ปี	100 ปี
S1A	1	6.5	12.5	23	C	C
S1B	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
S2A	0.18	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20
S2B	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
S3A	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
S3B	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
E1A	0.19	0.20	C	C	C	C
E1B	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
E2A	0.05	3	4	11	C	C
E2B	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

C = Collapse = ผนังของโพรงพังทลายเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของชั้นหินเกลือ

ตารางที่ 6 : ผลการหดตัวในแนวตั้งระหว่างเพดานและพื้นของโพรง

แบบจำลอง	การหดตัวในแนวตั้ง (ft)					
	1 ปี	5 ปี	10 ปี	25 ปี	50 ปี	100 ปี
S1A	3	11	23	51	C	C
S1B	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
S2A	0.34	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36
S2B	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
S3A	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
S3B	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
E1A	1	1	1	5	15	C
E1B	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
E2A	2	13	31	C	C	C
E2B	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

C = Collapse = หลังคาของโพรงพังทลายเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของชั้นหินเกลือ



## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลของการคำนวณ

การวิเคราะห์ผลของการคำนวณจะมุ่งไปที่การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทิ้งของเสียในชั้นหินเกลือ ความเหมาะสมนี้จะรวมไปถึง

1. โพรงจะต้องมีเสถียรภาพทางกลศาสตร์สูงและในระยะยาวกว่า 100 ปี
2. มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด หรือไม่ควรเกิน 1 ฟุตในช่วง 100 ปี
3. ไม่มีการรั่วซึมระหว่างโพรง กล่าวคือ ความซึมผ่านในชั้นหินเกลือจะต้องไม่เพิ่มขึ้นจากค่าที่ค่าที่อยู่ตามธรรมชาติก่อนที่จะสร้างโพรงขึ้น
4. มีการหดตัวของโพรงเนื่องจาก Creep Deformation น้อยที่สุด
5. แต่ละโพรงควรจะอยู่ใกล้กันเท่าที่จะทำได้เพื่อประหยัดเนื้อที่ที่จะทิ้งของเสีย

จากหลักการข้างต้นและจากผลลัพธ์ของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์เราสามารถเลือกขนาดและรูปร่างของโพรงได้ โพรงที่ถูกสร้างขึ้นในแบบจำลอง S2 และ S3 จะมีความเหมาะสมมากในเชิงของการรักษาความซึมผ่านระหว่างโพรง (Permeability) ให้อยู่ในระดับเดิม (In-situ or Undisturbed Permeability) ผลความซึมผ่านที่ได้จากแบบจำลอง S2 และ S3 นี้ยังมีความปลอดภัยสูง ดังแสดงให้เห็นได้จากที่ถึงแม้จะไม่มีแรงดันในโพรงทั้ง 2 แบบจำลอง (S2A และ S3A) ค่าความซึมผ่านในชั้นหินเกลือรอบ ๆ โพรงก็ยังคงอยู่ที่ระดับเดิม คือ  $10^{-10}$  darcy การทรุดตัวของผิวดินข้างบนโพรงที่มีการออกแบบชนิด S2 และ S3 ก็มีค่าน้อย ถึงแม้ว่าแรงดันในโพรงจะลดระดับลงเหลือศูนย์ การทรุดตัวก็ยังค่าน้อยกว่า 0.2 ft หรือ 2.4 นิ้ว แต่ในขณะที่มีการเก็บของเสียหรือแรงดันในโพรงเท่ากับ Hydrostatic Pressure ของน้ำเกลือการทรุดตัวหลังจาก 100 ปีก็จะมีค่าเท่ากับ 0.05 ฟุต และ 0.04 ฟุต สำหรับแบบจำลอง S2B และ S3B ตามลำดับ (ตารางที่ 4) โพรงที่สร้างจากแบบจำลอง S2 และ S3 ก็จะมีการหดตัวน้อยที่สุด (ตารางที่ 5 และตารางที่ 6) นอกจากนั้นแล้วผนังด้านข้างและหลังคาของโพรงของแบบจำลองทั้ง 2 นี้ก็จะมีเสถียรภาพสูง มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยกว่าแบบจำลองอื่น ๆ การพังทลายของหินเกลือรอบ ๆ โพรงก็จะไม่เกิดขึ้นถึงแม้โพรงจะมีอายุกว่า 100 ปีแล้วก็ตาม

จากการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง S2 และ S3 จะเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการออกแบบโพรงเก็บของเสียในหินเกลือเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 แบบจำลองนี้ในเชิงเศรษฐกิจ จะพบว่าแบบจำลอง S2 จะเหมาะสมกว่าเพราะใช้ระยะห่างระหว่างโพรง (Spacing) เพียง 180 เมตร เมื่อเทียบกับแบบจำลอง S3 ซึ่งต้องใช้ระยะห่างระหว่างโพรงถึง 240 เมตร กล่าวคือในการเก็บกักของเสียที่ปริมาณเท่ากันแบบจำลอง S2 จะใช้เนื้อที่ของชั้นหินเกลือน้อยกว่าแบบจำลอง S3 ประมาณ 30%

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้ชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อนำมาเป็นที่เก็บของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Waste) การศึกษาจะมุ่งไปที่การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสม ประเมินเสถียรภาพและคาดคะเนผลกระทบที่อาจจะมีขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง ของเสียจะถูกเก็บอยู่ในโพรงในหินเกลือ รูปร่างและขนาดของโพรงได้มีการออกแบบไว้ 5 แบบ ชั้นหินเกลือที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ได้ถูกเลือกขึ้นมาในงานวิจัยนี้ คอมพิวเตอร์โปรแกรมชื่อ GEO ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณเสถียรภาพทางกลศาสตร์และทางชลศาสตร์ และคำนวณพฤติกรรมของหินเกลือรอบ ๆ โพรงไปจนถึง 100 ปี หลังจากทิ้งของเสียไปแล้ว ผลที่ได้จะสรุปได้ว่าโพรงในหินเกลือที่เหมาะสมที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ควรจะอยู่ลึก 180 เมตร (วัดจากหลังคาของโพรงจนถึงผิวดิน) โพรงควรมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เมตร และความสูง 60 เมตร (เป็นรูปทรงกระบอกตั้งอยู่ในแนวตั้ง) ระยะห่างระหว่างโพรงวัดจากจุดศูนย์กลางควรมีประมาณ 180 เมตร ความดันของวัตถุหรือของเสียในโพรงควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0-40% ของความดันในหินที่ความลึกนั้น ๆ (0-40% Frac Gradient) ด้วยการออกแบบโพรงข้างต้นการทรุดตัวของผิวดินจะมีค่าไม่เกิน 1 ฟุต และการหดตัวของตัวโพรงจะมีค่าน้อยกว่า 5%

การวิจัยนี้ได้อาศัยข้อมูลบางส่วนทางด้าน Creep Properties ของหินเกลือจากต่างประเทศ เนื่องจากว่าการทดสอบเพื่อหาค่า Creep Properties ยังมีได้มีการทำในหินเกลือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยอาจจะเนื่องมาจากจะต้องมีการลงทุนสูง ดังนั้นความแม่นยำของข้อสรุปของโครงการนี้จะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ถ้ามีข้อมูลเพิ่มเติมทางด้าน Creep ของหินเกลือ และเพื่อปรับปรุงผลการวิจัยนี้ให้ถูกต้องและแม่นยำขึ้นควรมีการวัดและตรวจสอบทางภาคสนามเป็นการวัดการทรุดตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงในหินเกลือที่มีขนาดและการวางตัว (Layout) คล้ายคลึงกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้อาจจะขยายไปถึงการออกแบบโพรงในหินเกลือในรูปอื่นนอกเหนือกับรูปทรงกระบอกที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้มีความหลากหลายในการออกแบบ การเปลี่ยนตัวแปรนี้อาจจะรวมไปถึงขนาด (เส้นผ่าศูนย์กลาง) ของโพรง ความลึก แรงดันในโพรงที่สูงกว่า 40% Gradient อุณหภูมิของของเสียที่ต่างกันของชั้นหินเกลือ หรือการเลือกใช้ชั้นหินเกลือที่บริเวณอื่นที่มีความลึกและความหนาต่างไปจากที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้ เป็นต้น



## บรรณานุกรม

- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992, "Finite Element Model to Predict Permeability Increase around Salt Cavern," SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 34 pp.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992. "Geohydrological Integrity of CAES in Rock Salt," *Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the Second International Conference*, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, CA, pp. 4.1-4.21.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1994, "Dilation-Induced Permeability Increase around Caverns in Rock Salt," *Proc. 1st North American Rock Mechanics Symposium*, University of Texas at Austin, June 1-3, pp. 648-656.
- Japan International Cooperation Agency, 1981, "Evaluation Study Report for ASEAN Rock Salt-Soda Ash Project in the Kingdom of Thailand," Tokyo, Japan.
- Serata S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Formulation of A Constitutive Equation for Salt," *Proc. Seventh International Symposium on Salt*, April 6-9, Kyoto, Japan, published by Elsevier Science Publishers, B.V, Amsterdam, Vol. 1, pp. 483-488.
- Serata, S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Finite Element Program 'GEO' for Modeling Brittle-Ductile Deterioration of Aging Earth Structures," SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 24 pp.
- Stormont, J.C. and K. Fuenkajorn, 1994. "Dilation-Induced Permeability Changes in Rock Salt," *Proc. 8th International Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, West Virginia, May 22-28, pp. 1296-1273.
- Suwanapal, A., 1992. "Potash Mine : A Co-operative Project Among ASEAN Countries and Private Sectors," National Conference on Geologic Resources of Thailand : Potential for Future Development," November 17-24, DMR, Bangkok, Thailand.

Suwanich, P. and P. Ratanajaruraks, 1982, *Sequences of Rock Salt and Potash in Thailand*, Nonmetallic Minerals Bulletin No. 1, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok.

Suwanich, P., P. Ratanajaruraks and P. Kunawat, "Core Log Bamnet Narong Area Chaiyaphum Province," Economic Geology Division, DMR, Bangkok, Thailand.

Yumuang, S., 1995, Potash Ore Researve Evaluation of Bamnet Narong Area, Northeast Thailand, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

## ประวัตินักวิจัย

ดร.กิตติเทพ เพ็ญขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในสาขาวิชา Geological Engineering ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ในมลรัฐ Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ และเป็นผู้แต่งตำรา "Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock" ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute และ Amoco Oil Co. และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall และ Elsevier Sciences Publishing Co.