

บทที่ 4

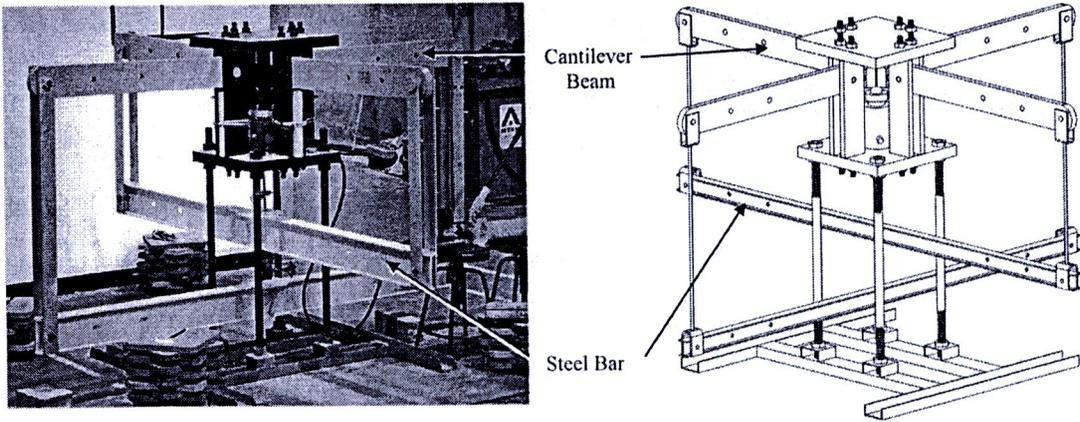
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เนื้อหาในบทนี้ได้บรรยายถึงคุณลักษณะของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง (Polyaxial Load Frame) และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบในเบื้องต้นเพื่อหาค่ากำลังกวดในสามแกนจริง (True triaxial strength) และการทดสอบการคืบในสามแกนจริง (True triaxial creep) โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM Standard

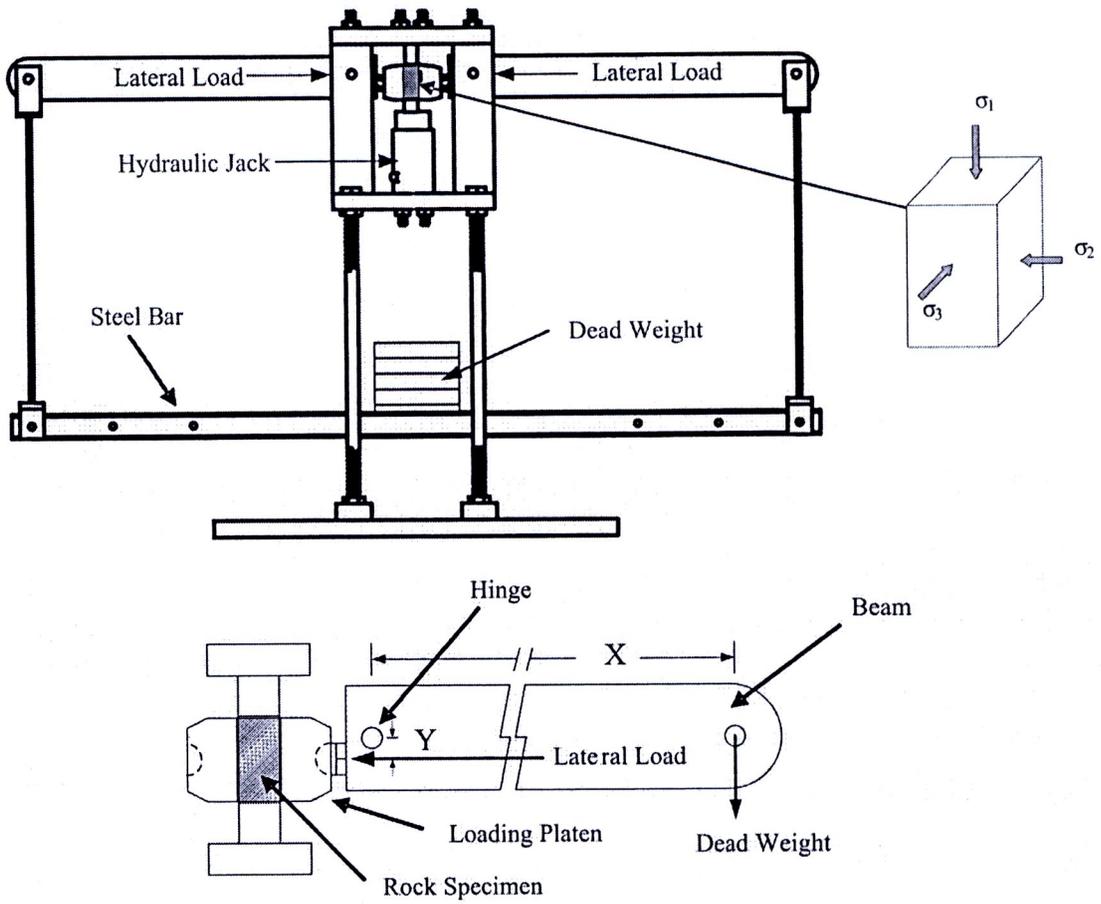
4.1 การเตรียมโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง

โครงกวดทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ให้คงที่ในขณะที่ทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบแรงกวดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง

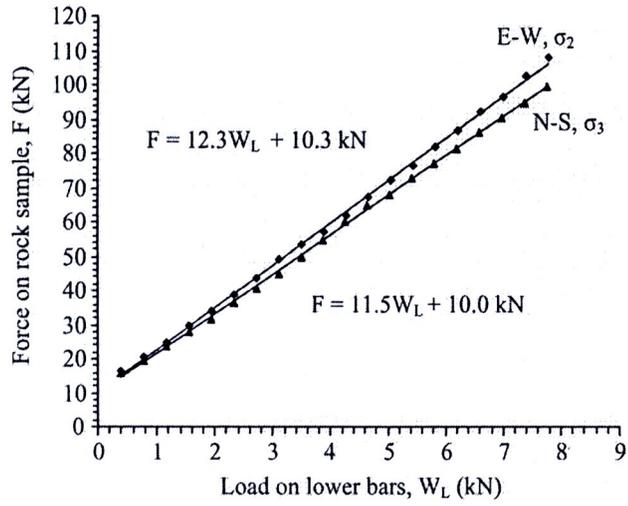
รูปที่ 4.1 แสดงโครงกวดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้วจาก Walsri et al. (2009) ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแกนของคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตุ่มน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตุ่มน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตุ่มน้ำหนัก เพื่อใช้ใส่ตุ่มน้ำหนักในการดึงแกนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรงจะใช้เพลลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกวดทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกวดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกวดทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตุ่มน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตุ่มน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 เท่าในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง (σ_2 และ σ_3) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง (σ_1) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกวดทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ถึง $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกวดทั้งสองข้างให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 โครงกวดทดสอบในสามแกนจริง (Walsri, et al., 2009)



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของโครงกวดทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้นำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง

4.2 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง

4.2.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังกดในสามแกนจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาค่าแรงกดสูงสุด และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกลือหิน ซึ่งทำการทดสอบกับเกลือหินทั้งหมด 35 ตัวอย่าง โดยกำหนดให้ค่าความเค้นหลักรอง (σ_3) และค่าความเค้นหลักกลาง (σ_2) มีค่าคงที่ ในขณะที่ค่าความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดแตก ซึ่ง σ_2 มีค่าผันแปรระหว่าง 0 ถึง 80 MPa และ σ_3 มีค่าผันแปรระหว่าง 0 ถึง 20 MPa

4.2.2 ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.4 แสดงทิศทางของความเค้นและแนวการวางตัวของชั้นหินบนแท่งตัวอย่าง การคำนวณค่าความเครียดจะคำนวณจากค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างหินในแต่ละแนวแกน พร้อมกับการใส่แรงกระทำบนตัวอย่างหิน จากนั้นจะทำการบันทึกค่าความเค้นที่จุดแตกของตัวอย่างหินแล้วนำมาพิจารณาในรูปแบบการแตก ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง รูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงในระดับความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งความเค้นหลักสูงสุด (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า [$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$] ในระดับที่ต่างกัน

4.3 การทดสอบการคืบในสามแกนจริง

4.3.1 วิธีการทดสอบ

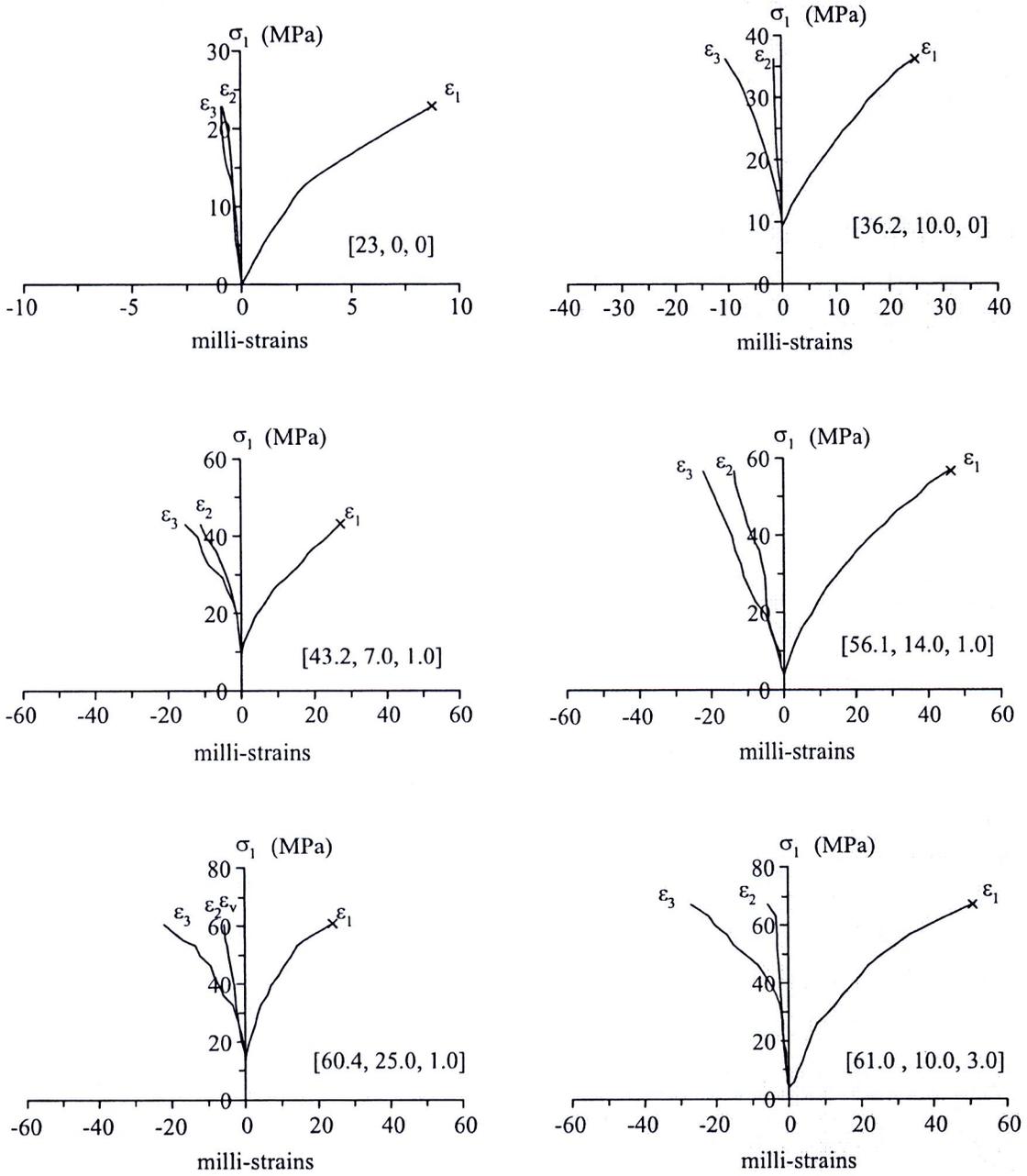
การทดสอบการคืบในสามแกนจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent deformation) การทดสอบการคืบในสามแกนจริงได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การทดสอบการคืบในสามแกนแบบกด (ดั้งเดิม) ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) การทดสอบการคืบในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) และการทดสอบการคืบในสามแกนแบบขยายตัว ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องปกติ ก่อนทำการทดสอบจะต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) ค่าแรงและการเคลื่อนตัวในสามทิศทางของโครงกดทดสอบ (Polyaxial load frame) จากนั้นเริ่มทำการกดทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยการให้แรงในสามทิศทางเท่ากัน (Hydrostatic) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีค่าความเค้นเฉลี่ย (σ_m) กระทำต่อตัวอย่างเกลือหินคงที่เท่ากับ 15 MPa ทั้งสามทิศทาง เพื่อให้ตัวอย่างเกลือหินเข้าสู่สภาวะความเค้นเหมือนกับสภาวะจริงในภาคสนาม โดยให้ความเค้นคงที่ไปจนกว่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเกลือหินจะหยุดลง จากนั้นทำการลดค่าความเค้นด้านข้างด้านหนึ่งเพื่อจำลองสภาวะ σ_3 และเพิ่มความเค้นในแนวแกนเพื่อจำลองสภาวะ σ_1 แล้วทำการบันทึกค่าการยุบตัวทั้ง



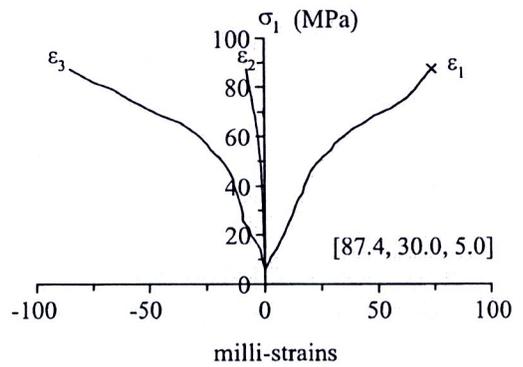
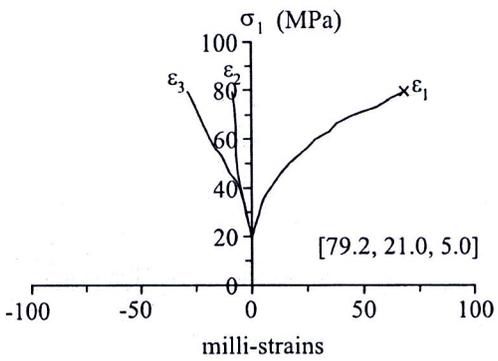
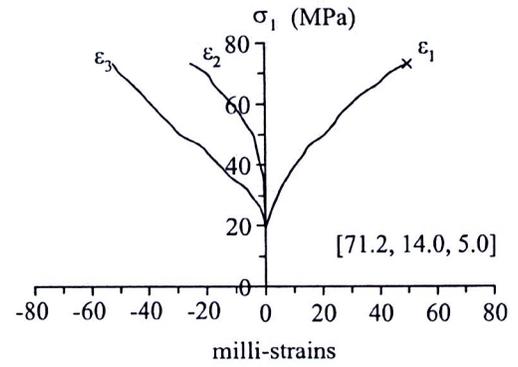
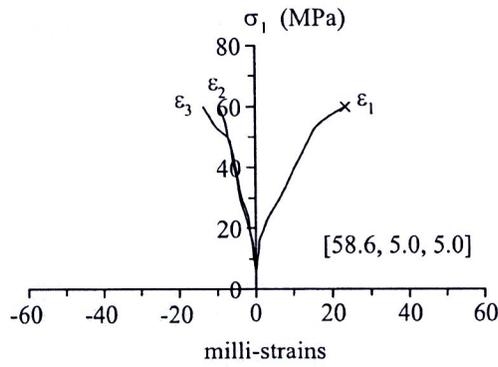
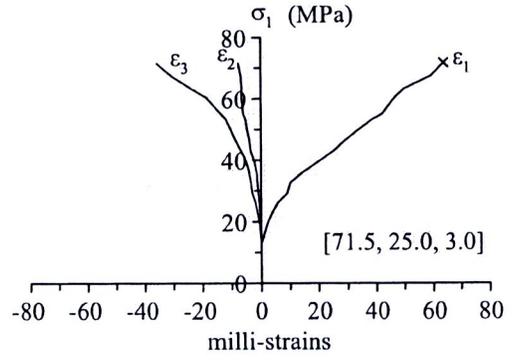
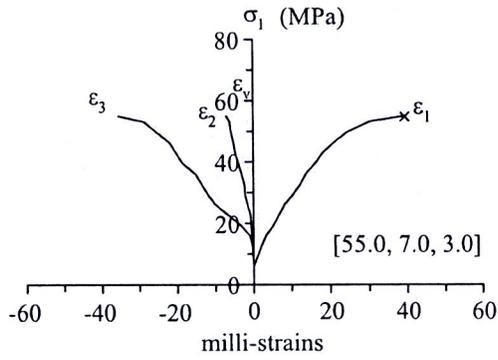
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเกลื่อหินหลังจากการทดสอบในระดับความเค้นที่ต่างกัน ตัวเลขในวงเล็บแสดง $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ที่จุดแตก

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในสามแกนจริง

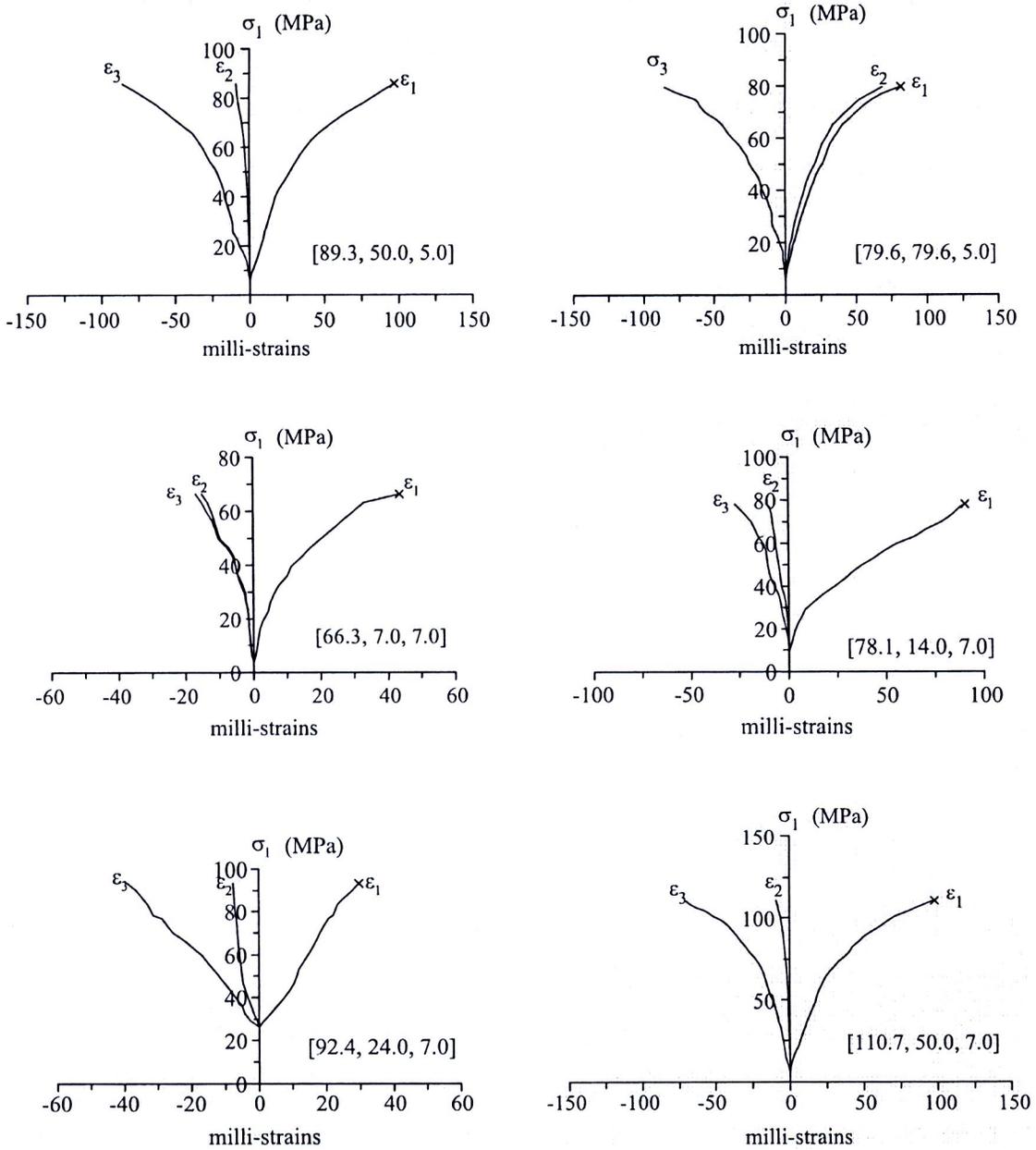
Specimen number	Depth (m)	Failure Stresses			Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
		σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)		
MS-PX-34	253.75-253.85	0	0	23.0	22.4	0.35
MS-PX-08	179.66-179.77		10.0	36.2	20.7	0.36
MS-PX-37	208.40-208.50		25.0	43.1	23.3	0.42
MS-PX-42	211.60-211.70		35.1	35.1	-	-
MS-PX-20	244.47-244.57	1.0	1.0	26.5	25.3	0.46
MS-PX-22	246.21-246.31		7.0	43.2	18.5	0.39
MS-PX-23	245.50-245.60		14.0	56.1	20.6	0.40
MS-PX-36	208.50-208.60		25.0	60.4	19.3	0.40
MS-PX-44	210.05-219.15		35.0	62.5	-	-
MS-PX-38	211.20-211.30		49.3	49.3	-	-
MS-PX-02	178.13-178.23	3.0	3.0	45.1	22.5	0.25
MS-PX-32	208.60-208.70		7.0	55.0	19.8	0.39
MS-PX-33	254.05-254.15		10.0	61.0	23.1	0.40
MS-PX-05	256.43-256.53		14.0	66.0	15.8	0.38
MS-PX-31	201.70-201.80		25.0	71.5	26.9	0.42
MS-PX-35	200.45-200.56		40.0	75.0	24.3	0.36
MS-PX-43	209.95-210.05		50.0	74.9	-	-
MS-PX-40	211.40-211.50		64.9	64.9	-	-
MS-PX-27	264.41-264.51	5.0	5.0	58.6	23.4	0.42
MS-PX-28	263.31-263.41		14.0	71.2	20.8	0.40
MS-PX-29	264.67-264.77		21.0	79.2	18.0	0.35
MS-PX-47	210.35-210.45		30.0	87.4	21.4	0.39
MS-PX-41	211.50-211.60		40.0	91.6	-	-
MS-PX-48	210.45-210.55		50.0	89.3	23.1	0.39
MS-PX-45	210.15-210.25		65.0	85.0	-	-
MS-PX-49	210.55-210.65		79.6	79.6	24.1	0.42
MS-PX-12	201.23-201.33	7.0	7.0	66.3	22.1	0.37
MS-PX-13	201.60-201.70		14.0	78.1	20.0	0.37
MS-PX-19	244.37-244.47		24.0	92.4	16.0	0.43
MS-PX-25	245.10-245.20		40.0	106.4	-	-
MS-PX-50	210.65-210.75		50.0	110.7	20.2	0.43
MS-PX-46	210.25-210.35		65.0	109.5	-	-
MS-PX-10	179.93-180.31	10.0	10.0	79.6	21.7	0.39
MS-PX-18	251.79-250.85	12.0	12.0	81.8	22.7	0.42
MS-PX-52	212.11-212.21	20.0	20.0	106.4	21.9	0.39
Mean \pm Standard Deviation					21.5 \pm 2.6	0.40 \pm 0.04



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน ความเค้นหลัก (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับที่ต่างกัน



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน ความเค้นหลัก (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับที่ต่างกัน



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังกดสูงสุดในสามแกนจริงบางส่วน ความเค้นหลัก (σ_1) แสดงในฟังก์ชันของความเครียด ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) โดยมีค่า $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับที่ต่างกัน

สามแกนต่อเวลาอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.001 mm การบันทึกผลจะทำทุก 1 นาที ในช่วงแรกของการทดสอบ และจะขยายเวลาบันทึกออกไปจนถึงสี่ครั้งต่อหนึ่งวันหลังจากที่ทดสอบไปแล้ว 5 วัน โดยทำการทดสอบกับแท่งตัวอย่างเกลือหินทั้งหมด 12 ตัวอย่างภายใต้ชุดของความเค้น $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ที่ต่างกันและค่าความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) มีค่าเท่ากับ 5.0, 8.0, 11.0 และ 14.0 MPa การทดสอบจะใช้เวลา 21 วันต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งค่าความเค้นเฉลี่ย (σ_m) และค่าความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

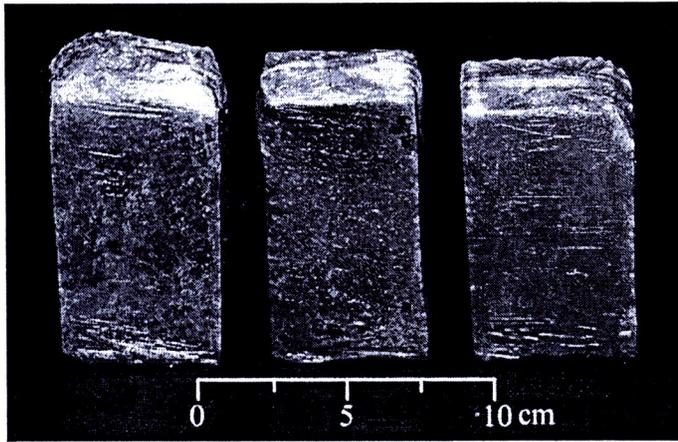
$$\sigma_m = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]/3 \quad (4.1)$$

$$\tau_{oct} = [1/3 \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)]^{1/2} \quad (4.2)$$

โดยที่ σ_m คือ ความเค้นเฉลี่ย
 τ_{oct} คือ ความเค้นในแนวเฉือน
 σ_1 คือ ความเค้นหลักในแนวแกน
 σ_2 คือ ความเค้นหลักกลาง
 σ_3 คือ ความเค้นหลักรอง

4.3.2 ผลการทดสอบ

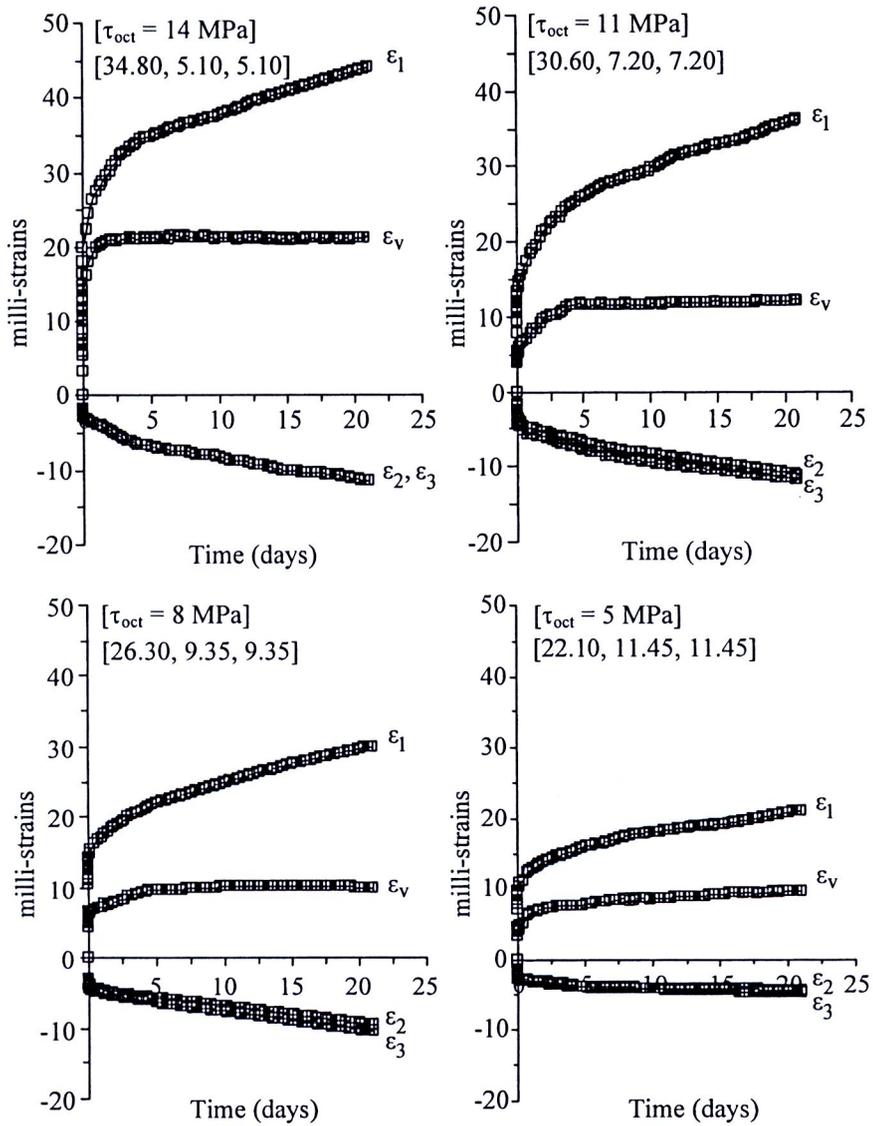
รูปที่ 4.8 แสดงแท่งตัวอย่างเกลือหินบางส่วนหลังจากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง ซึ่งตัวอย่างเกลือหินบางส่วนเกิดการยุบตัวและมีรอยแตกเล็กน้อยตัดผ่านตามแนวของผลึก ปัจจัยการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ผลของความเครียดทั้งสามทิศทางที่ทำการตรวจวัดในเชิงเวลาของการทดสอบการคืบในสามแกนจริงได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) ในฟังก์ชันของเวลา โดยค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ อยู่ในระดับที่ต่างกันดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11 ซึ่งการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของเกลือหินปรากฏเป็น 3 ช่วง คือ 1) เมื่อให้แรงกดในช่วงแรกอย่างทันทีทันใด จะทำให้ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain) 2) ช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และ 3) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent strain) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเครียดนั้นเกิดจากการที่หินมีค่าความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) เพิ่มขึ้น



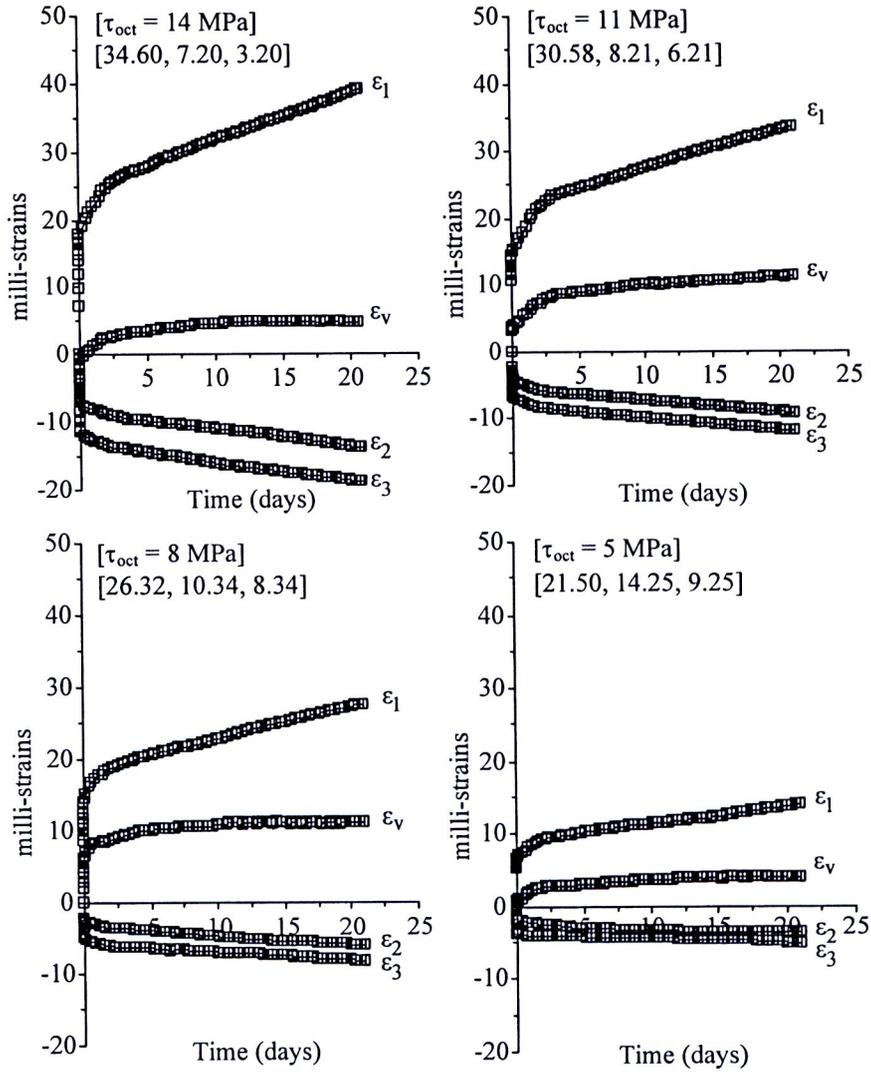
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างเกลื่อหินบางส่วนหลังจากการทดสอบการคืบในสามแกนจริง

ตารางที่ 4.2 ปัจจัยการทดสอบการคืบในสามแกนจริงของเกลือหิน

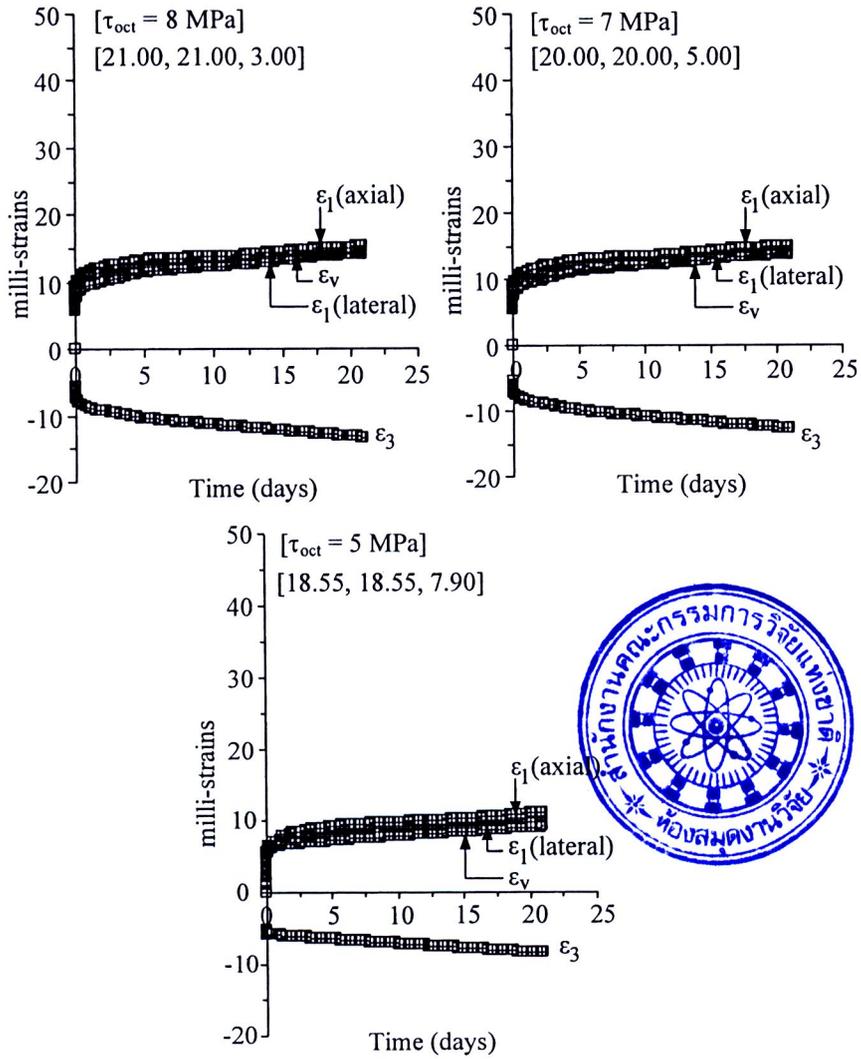
Specimen No.	Test Conditions	Depth (m)	Applied Constant Stresses			τ_{oct} (MPa)	Time (days)
			σ_3 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)		
2	$\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$	209.68–209.08	5.1	5.1	34.8	14.0	21
11		255.67–256.02	7.2	7.2	30.6	11.0	21
13		238.22–238.28	9.4	9.4	26.3	8.0	21
16		162.82–162.88	11.5	11.5	22.1	5.0	21
20	$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$	162.88–162.94	3.2	7.2	34.6	14.0	21
19		204.02–204.06	6.2	8.2	30.6	11.0	21
14		268.32–268.38	8.3	10.3	26.3	8.0	21
17		162.74–162.80	9.3	14.3	21.5	5.0	21
21	$\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$	235.10–235.25	0.0	22.5	22.5	11.0	2 (hours)
4		253.64–253.75	3.0	21.0	21.0	8.0	21
8		208.30–208.40	5.0	20.0	20.0	7.0	21
18		202.14–202.26	7.9	18.6	18.6	5.0	21



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oc} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ความเครียดในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการคืบในสามแกนจริงในสภาวะ $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ ความเค้นเฉือนในแนวแกน (ϵ_1) และในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϵ_2, ϵ_3) แสดงในฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าความเค้น τ_{oct} และ $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$ ในระดับต่างกัน

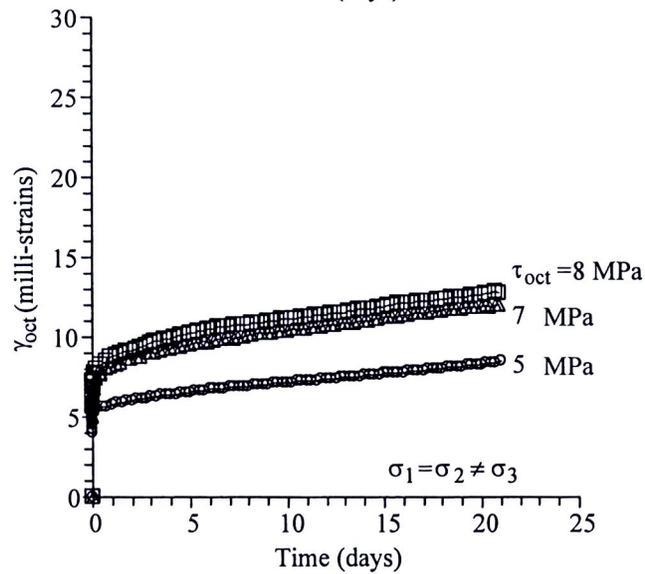
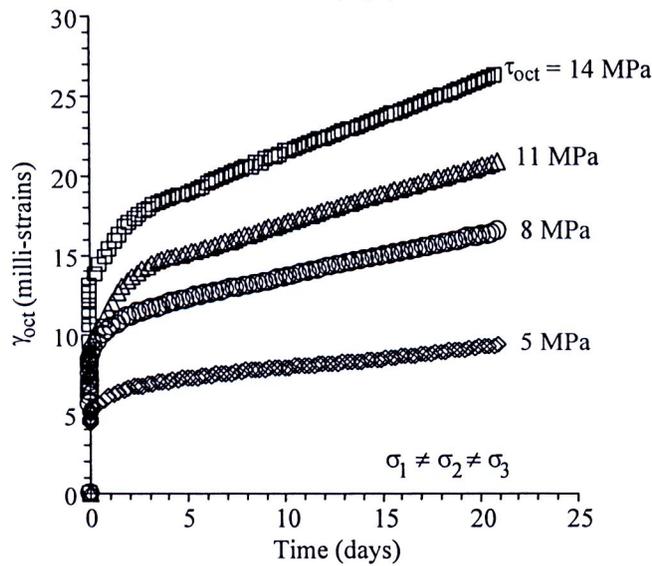
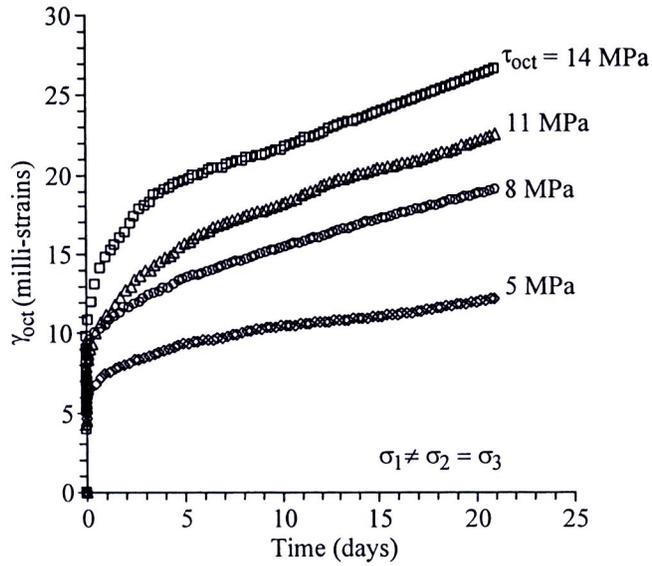
ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติก (Visco-elastic และ Visco-plastic) ของเกลือหิน สมการเชิงคณิตศาสตร์ของ Jaeger & Cook (1979) ได้ถูกนำมาใช้หาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเกลือหินในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลา โดยใช้ความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของความเค้นในแนวเฉือน (τ_{oct}) ดังสมการ

$$\gamma_{oct} = [1/3] \cdot [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$\gamma_{oct} = \tau_{oct} / 2G \quad (4.4)$$

โดยที่ γ_{oct} คือ ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ
 G คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง
 ϵ_1 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักสูงสุด
 ϵ_2 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักกลาง
 ϵ_3 คือ ความเครียดในแนวแกนหลักต่ำสุด

พฤติกรรมของเกลือหินภายใต้การให้ความเค้นในสามแกนจริงที่ขึ้นกับเวลาได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความเครียดในแนวเฉือน (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาในสภาวะความเค้นที่ ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$), ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) และ ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$) ซึ่งการวิเคราะห์ผลจะแสดงอย่างละเอียดในบทต่อไป



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ความเครียดในแนวเฉือนเชิงสามมิติ (γ_{oct}) ในฟังก์ชันของเวลาภายใต้สภาวะความเค้นที่แตกต่างกัน

