

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในต้นบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการเก็บตัวอย่างแบบกล่อง (Block Sample) ซึ่งจะได้ตัวอย่างดินที่เป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) และถูกรบกวนน้อยที่สุด (Undisturbed) แต่อย่างไรก็ดีเมื่อตัดแบ่งดินออกจากตัวอย่างแบบกล่องเป็นตัวอย่างดินในแนวตั้งและตัวอย่างดินในแนวนอน พบว่า ดินทดลองมีชั้นบาง ๆ ของดินตะกอน (Silt Layer) รอยแยกผิวเรียบ (Slickensides) เศษรากไม้และพวกลสารอินทรีย์ (Organic Compound) ปนอยู่บ้าง ถึงแม้จะพยายามตัดแบ่งดินตัวอย่างอย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นเอกพันธ์ที่สุด แต่ก็ยังมีตัวอย่างดินที่แบ่งแล้วบางก้อนไม่เป็นเอกพันธ์นัก เช่นมีเศษรากไม้และสารอินทรีย์ปนอยู่ เป็นต้น จึงอาจทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง

ในบทที่ 4 จะได้กล่าวถึงผลการทดลองในการวิจัยดังต่อไปนี้

- ข้อ 4.1 การทดสอบหาคูสมบัติพื้นฐานของดินทดลอง
- ข้อ 4.2 การทดลองกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอน
- ข้อ 4.3 การทดลองอันเดรอนครีพ
- ข้อ 4.4 การทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial

4.1 การทดสอบหาคูสมบัติพื้นฐานของดินทดลอง

ได้แสดงคูสมบัติพื้นฐานไว้ในตารางที่ 4.1 ถ้าแบ่งดินทดลองตาม Unified Soil Classification ดินทดลองจะเป็นดินเหนียวอนินทรีย์มีพลาสติกซึ่สูง, CH (หรือ CH-MH) (Inorganic Clay and Silt with high Plasticity) มีค่า OCR = 1.6 ถึง 1.8

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง

(ดินเหนียวจังหวัดปทุมธานีจากระดับความลึกที่ 5.00 เมตร)

ปริมาณความชื้น (Water Content), %	53-63
ขีดเหลว (Liquid Limit), %	63±1
ขีดพลาสติก (Plastic Limit), %	27±1
P.I. (Plastic Index), %	36±1
ปริมาณดินเหนียว (Clay fraction) < 5 μ m, * %	70-75
แอกติวิตี (Activity)	1.8
Maximum Past Pressure, ตัน/ม. ²	7-8
OCR (Over Consolidation Ratio)	1.6-1.8
ความหนาแน่นเปียก (Wet Density), ตัน/ม. ³	1.64-1.68
จำแนกดินโดย Unified Soil Classification	CH หรือ MH-CH

* ASTM Standard

4.2 การทดลองกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรน

กำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนมีวิธีการทดลองหาได้หลายวิธี สำหรับการวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 แบบคือ

1. กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกมาก่อนด้วยเครื่อง Triaxial ในสภาพอันเดรนพร้อมวัดค่าความดันน้ำในโพรง (Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test with Pore Pressure Measurement, CIUC)

2. การทดลองกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำมาก่อนในสภาพอันเดรน (Unconsolidated Undrained Compression Test, UU)

3. การทดลองกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบอิสระด้านข้าง (Unconfined Compression Test, UC)

การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนในแนวตั้งโดยใช้ตัวอย่างดินทดลองในแนวตั้ง (ดินหมวด V) ส่วนกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนในแนวนอนได้ใช้ตัวอย่างดินในแนวนอน (ดินหมวด H) สำหรับการทดลองทุกชนิด ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2

ค่าแรงเฉือนเมื่อดินถูกแรงอัดที่ได้จากการทดลองแบบ \overline{CIUC} จะมีค่าใกล้เคียงธรรมชาติที่สุด (เฉพาะในกรณีที่ดินในธรรมชาติถูกแรงอัดแบบเดียวกับในห้องทดลอง) เพราะการทดลองนี้สามารถทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลในดินทดลองที่ใช้ซึ่งเปลี่ยนไปเนื่องจากการเก็บตัวอย่างกลับไปมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงตามธรรมชาติก่อนทดสอบกำลังรับน้ำหนัก การวิจัยจึงใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากผลการทดลองนี้เป็นหลักในการศึกษา ส่วนการทดลอง UU และ UC เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก มักนิยมใช้ในงานโดยทั่ว ๆ ไป จึงได้ทดสอบไว้ด้วยเพื่อเปรียบเทียบและพิจารณาถึงความเหมาะสมของการใช้งาน

ผลการทดลองแบบ \overline{CIUC} ซึ่งทำให้ทราบค่ากำลังรับหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ดินสามารถรับได้นั้น ได้นำมาใช้ในการทดลองอันเดรนครีฟที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ เพื่อที่จะสามารถหาหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ที่จะกระทำต่อดินทดลองที่ค่าระดับหน่วยแรงเฉือนนั้น ๆ ได้ถูกต้อง โดยใช้สมมติฐานว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบโดยใช้การควบคุมอัตราความเครียด (Strain Control) กับที่ได้โดยการควบคุมการเพิ่มของหน่วยแรง (Stress Control) มีค่าต่างกันน้อย (LADD, 1965) ซึ่งผลที่ได้ก็เป็นความจริง คือพบว่าในการทดสอบครีฟที่หน่วยแรงเฉือนต่าง ๆ กันนั้น ก่อนการทดสอบครีฟ ค่า q และ \bar{p} ของการทดสอบแบบควบคุมการเพิ่มของหน่วยแรง (ทดสอบครีฟ) เปรียบจะอยู่บนเส้นทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลที่ได้จากการทดสอบแบบควบคุมอัตราความเครียด (ดูข้อ 4.2.1) นอกจากนี้การทดสอบแบบ \overline{CIUC} ยังได้ค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังประสิทธิผลของดิน (Effective Strength Parameter) และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของดินอีกด้วย จึงสามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ดินได้ถูกต้องทั้งด้านกำลังและการยุบตัวของดินในลักษณะอันเดรน

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างดินสำหรับการทดลองหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอน

ดินหมวด	ตัวอย่างที่	ชนิดของการทดลอง	$\bar{\sigma}_c$ ตัน/ม ²	W_i %	W_f %	S_u ตัน/ม ²	Y_t ตัน/ม ³	อัตราความเครียด %/ซม.*	Δu ที่บีบคั้น ตัน/ม ²	A_f	หมายเหตุ
H	H-1	\overline{CIUC}	2.0	57	57	1.79	1.66	2.5	1.4	0.392	-
	H-2	\overline{CIUC}	4.5 ^{**}	55	54	2.44	1.68	2.5	3.0	0.615	-
	H-3	\overline{CIUC}	4.5 ^{**}	58	56	2.43	1.68	2.5	3.0	0.617	-
	H-4	UU	-	57	57	1.50	1.64	8.3	-	-	$\sigma_c = 8.6$ ตัน/ม ²
	H-5	UC	-	56	55	1.47	1.68	8.4	-	-	-
V	V-1	\overline{CIUC}	2.0	57	56	1.75	1.65	2.5	1.3	0.372	-
	V-2	\overline{CIUC}	3.0	58	57	1.89	1.65	2.5	2.1	0.555	-
	V-3	\overline{CIUC}	4.5 ^{**}	58	57	2.36	1.64	2.5	3.0	0.637	-
	V-4	UU	-	59	59	1.55	1.65	8.4	-	-	$\sigma_c = 8.6$ ตัน/ม ²
	V-5	UC	-	65	65	1.48	1.68	8.3	-	-	-

หมายเหตุ ใช้ความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก (Back Pressure) = 20 ตัน/ม².

* อัตราความเครียดในการทดลอง

** $\bar{\sigma}_c$ ที่หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ
(Effective Overburden Pressure)

ผลการทดลองโดยละเอียดมีดังต่อไปนี้

4.2:1 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Path) และ เอนVELOOPของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติ (Effective Stress Envelop at Failure)

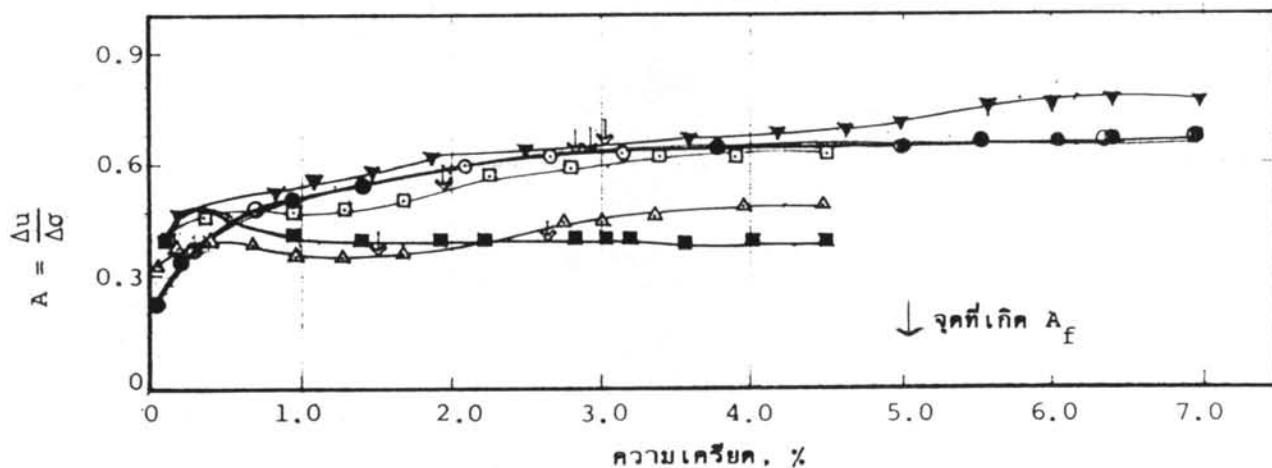
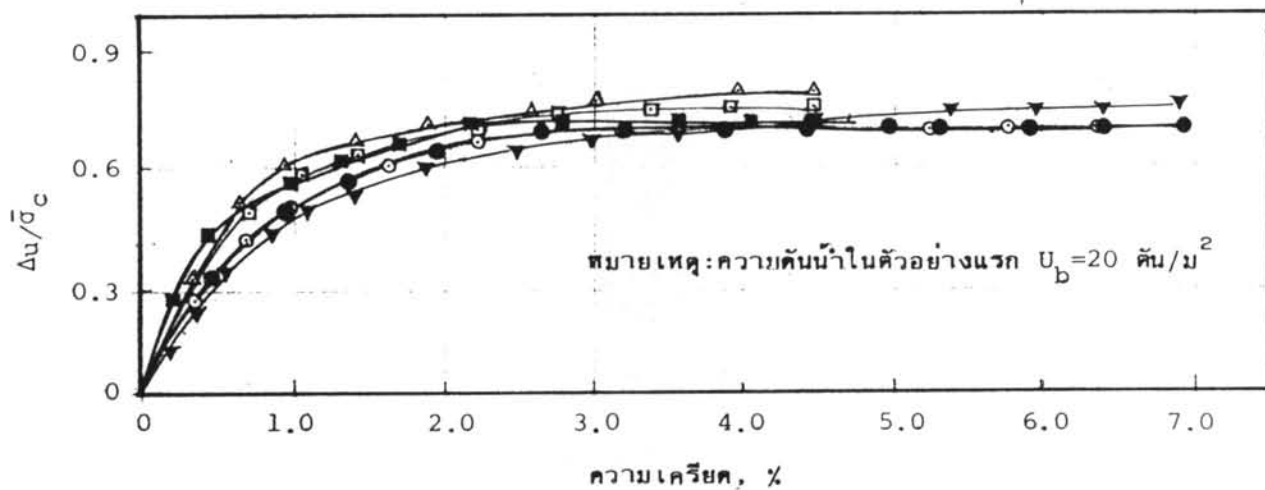
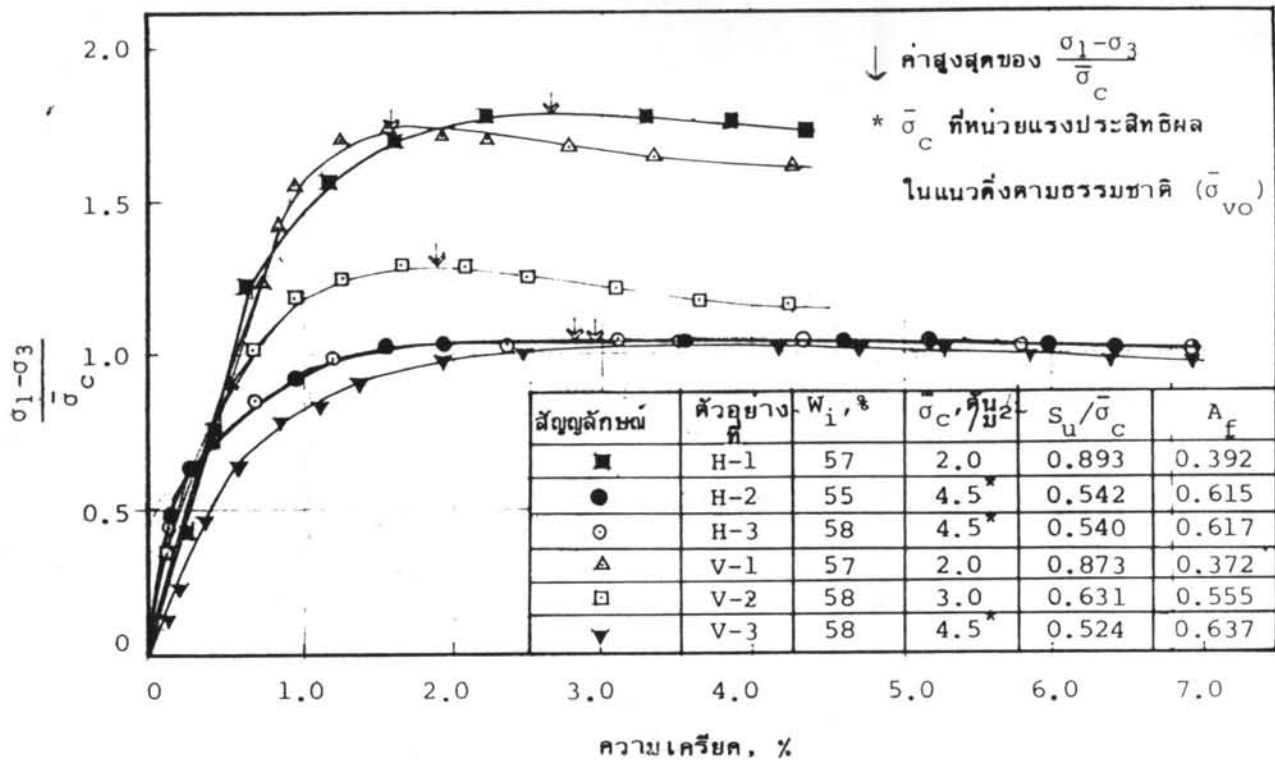
ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลโดยการเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3}{2}$ ต่อ $\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3}{2}$ จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในดินในระหว่างการทดลอง ส่วน เอนVELOOPของหน่วยแรงประสิทธิผลมีไว้เพื่อแสดงการพิบัติของดินโดยแรงเฉือนแบบอันเดรน และการพิบัติอันเกิดจากอันเดรนครึ่งซึ่งทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในขณะที่จะวิ่งเข้าสู่ เอนVELOOPของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติและสภาพหน่วยแรง (State of Stress) ที่จุดเกิดการพิบัติ เนื่องจากอันเดรนครึ่งจะอยู่บนเอนVELOOPของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติ (ข้อมูลในข้อ 4.3 จะแสดงผลที่ได้ดังกล่าว ดูรูป 4.8)

ในการทดลองเมื่อดินรับแรงเฉพาะในแนวนอน ตัวอย่างที่ใช้คือดินหมวด H ตัวอย่างที่ H-1 และ H-2 ทำการทดสอบโดยให้ดินอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกเสียก่อน ด้วยค่าหน่วยแรงประสิทธิผล ($\bar{\sigma}_c$) ก่อนการทดสอบมีค่าเท่ากับ 2.0 และ 4.5 ตัน/ม² นอกจากนั้นได้ตรวจสอบโดยใช้ตัวอย่างที่ H-3 ทำการทดสอบอีกครั้งโดยใช้หน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากับ 4.5 ตัน/ม² ปรากฏว่าได้พฤติกรรมทางด้าน σ - ϵ - u ของตัวอย่าง H-2 และ H-3 ซึ่งมีหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากันก่อนทดสอบจะเหมือนกันทุกประการ (ดูรูปที่ 4.1) ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลเมื่อดินรับแรงในแนวนอน ได้แสดงในรูปที่ 4.2 พร้อมทั้งแสดง เอนVELOOPของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติเมื่อ $\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}$ มีค่าสูงสุด และที่ $(\sigma_1 - \sigma_3)$ สูงสุดซึ่งเป็นอันเดียวกันได้ค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังประสิทธิผลของดินเมื่อดินรับแรงในแนวนอนดังนี้

$$\text{ค่า } \bar{\alpha} = 24^\circ \qquad \bar{a} = 0.75 \text{ ตัน/ม}^2$$

$$\text{หรือ } \bar{\phi} = 26.4^\circ \qquad \bar{c} = 0.67 \text{ ตัน/ม}^2$$

เมื่อดินรับแรงเฉพาะในแนวตั้ง ใช้ตัวอย่างดินหมวด V ตัวอย่างที่ V-1, V-2 และ V-3 โดยทำให้ดินที่ทดลองถูกอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกเสียก่อน ด้วยค่าหน่วยแรงประสิทธิผล ($\bar{\sigma}_c$) เท่ากับ 2.0, 3.0 และ 4.5 ตัน/ม² ตามลำดับ ทางเดินของหน่วยแรง



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c}$, $\frac{\Delta u}{\sigma_c}$, A กับความเครียดเมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง และแรงในแนวนอน จากการทดลองแบบ CIUC

ประสิทธิผลและ เอน เวลล์ของหน่วยแรงประสิทธิผลที่บีบอัดได้แสดงในรูปที่ 4.3 ได้ค่า พารามิเตอร์ด้านกำลังประสิทธิผลของดินที่ $\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}$ มีค่าสูงสุดเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งดังนี้

$$\text{ค่า } \bar{\alpha} = 24^\circ \quad \bar{a} = 0.75 \text{ ดัน/ม}^2$$

$$\text{หรือ } \bar{\phi} = 26.4^\circ \quad \bar{c} = 0.67 \text{ ดัน/ม}^2$$

ส่วน เอน เวลล์ของหน่วยแรงประสิทธิผลที่ $\sigma_1 - \sigma_3$ สูงสุดจะอยู่ต่ำลงมาเล็กน้อย (ดูรูป 4.3)

จากผลการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังประสิทธิผลของดิน ($\bar{\phi}$, \bar{c}) ที่ $\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}$ มีค่าสูงสุด เมื่อดินรับแรงเฉพาะในแนวตั้งกับเมื่อดินรับแรงเฉพาะในแนวนอนมีค่าไม่แตกต่างกันทั้ง ๆ ที่ลักษณะทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเดียวกันของดินทั้งสองหมวดจะแตกต่างกันเนื่องจากเกิดความดันน้ำในโพรงที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure) ไม่เท่ากัน (ดูตารางที่ 4.2) ผลการทดลองนี้แสดงว่าการทดสอบแบบ CIUC ที่มีแรงกระทำในทิศทางที่ต่างกันจะไม่ทำให้เอนเวลล์ของหน่วยแรงประสิทธิผลที่บีบอัดเมื่อ $\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_3}$ มีค่าสูงสุดเปลี่ยนแปลงไป DUNCAN และ SEED (1966), MORGENSTERN และ TCHALENKO (1967b) ก็ได้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน

สำหรับกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.2 ดินทดลองปฐมฐานีจะมีกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนในแนวนอนที่ได้จากการทดลองแบบ CIUC ที่ $\bar{\sigma}_{VO}$ มีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนในแนวตั้งประมาณ 3 % ทั้งนี้เนื่องจากเอนเวลล์ที่ q_F ($\frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3}{2}$ มีค่าสูงสุด) ของตัวอย่างดินรับแรงในแนวนอนมีค่าสูงกว่าพฤติกรรมนี้มักจะได้จากการทดสอบแบบ CIUC แต่เมื่อทดสอบแบบ CAU แรงเฉือนในแนวนอนจะต่ำกว่าและเอนเวลล์จะต่ำกว่าด้วย (เรื่องเคช, 1982)

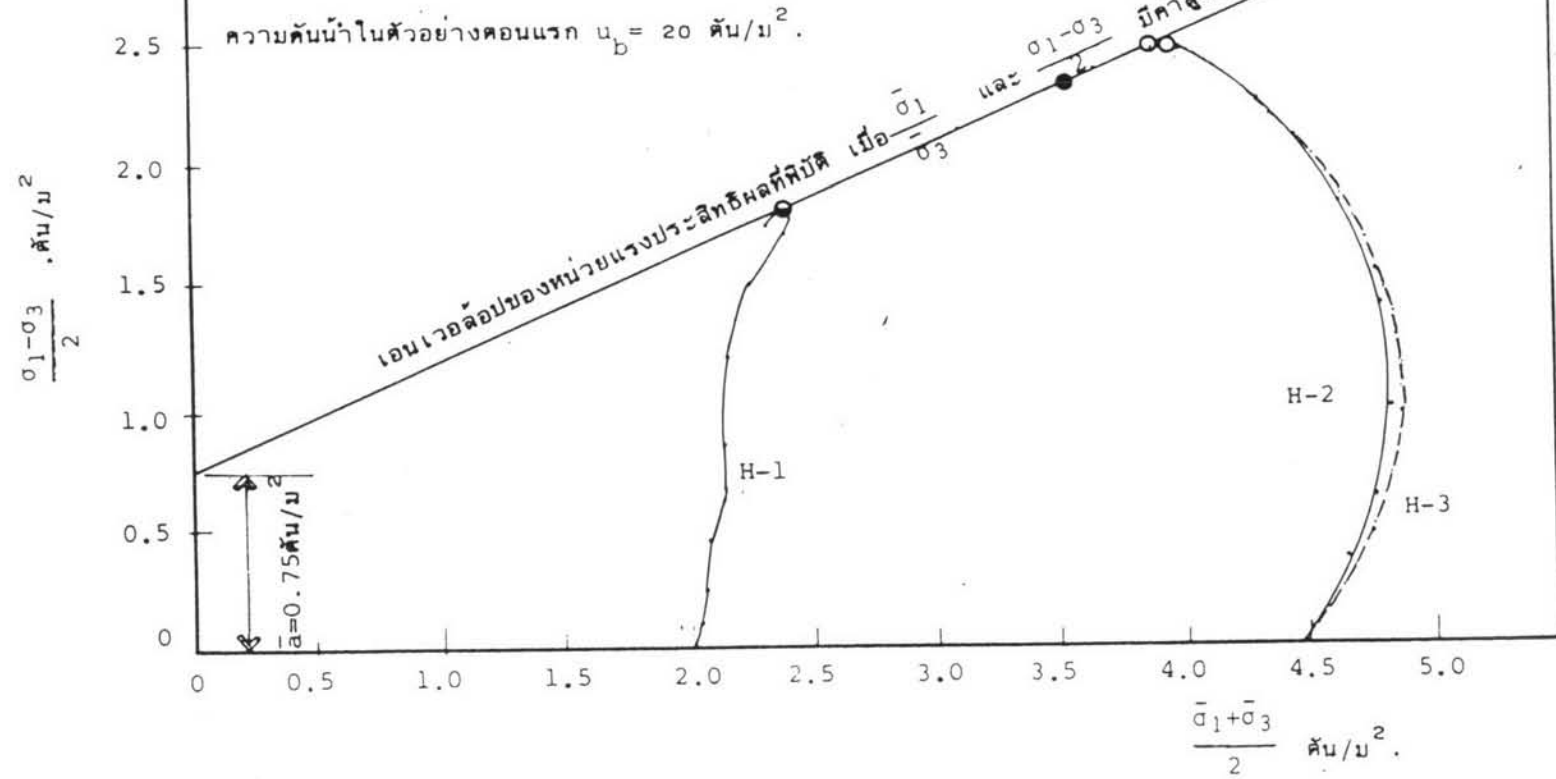
นอกจากนี้กำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนที่ได้จากการทดลองแบบ CIUC จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง UU และ UC ดังนี้

ค่า S_u จากการทดลองแบบ CIUC ที่ $\bar{\sigma}_{VO}$ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ UU ที่ σ_{VO}

ประมาณ 35 % - 40 %

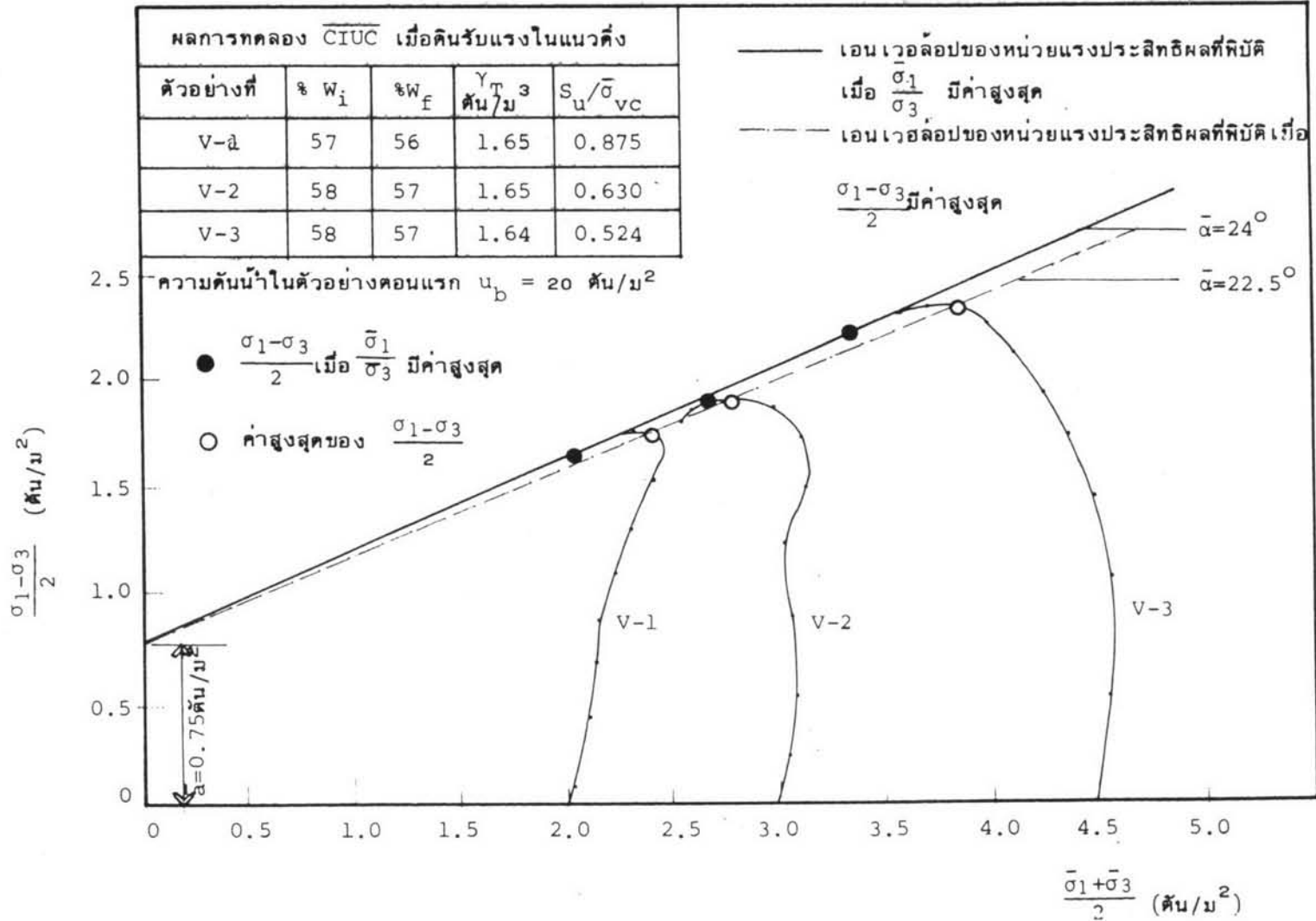
ผลการทดลอง CIUC เมื่อคืนรับแรงในแนวนอน				
ตัวอย่างที่	%W _i	%W _f	Y _{t3} ตัน/ม	S _u /σ _{vc}
H-1	57	57	1.66	0.895
H-2	55	54	1.68	0.542

- $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ เมื่อ $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ มีค่าสูงสุด
 - ค่าสูงสุดของ $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$
 - ค่าสูงสุดของ $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ และ $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ เมื่อ $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ มีค่าสูงสุด (จุดเดียวกัน)
- $\bar{\alpha} = 24^\circ$



รูปที่ 4.2 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลเมื่อคืนรับแรงในแนวนอน

ผลการทดลอง CIUC เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง				
ตัวอย่างที่	% W_i	% W_f	γ_{T3} ตัน/ม ³	$S_u/\bar{\sigma}_{vc}$
V-1	57	56	1.65	0.875
V-2	58	57	1.65	0.630
V-3	58	57	1.64	0.524



รูปที่ 4.3 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล เื่อดินรับแรงในแนวตั้ง

ค่า S_u จากการทดลอง UU ที่ σ_{vo} มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง UC ประมาณ 2%-7%

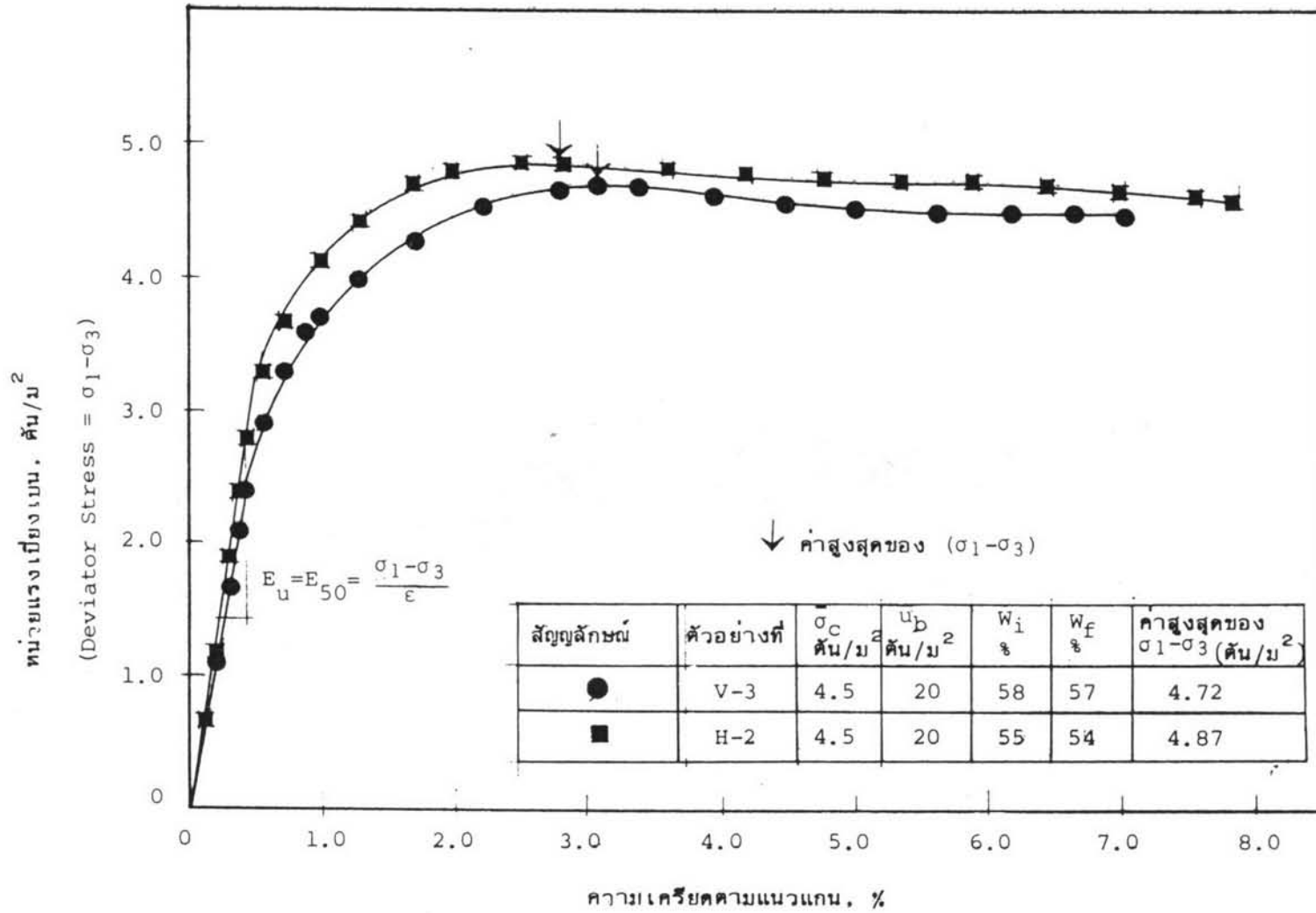
จำนวนรอยฉีกเป็นของ เมื่อดินรับแรงทั้งในลักษณะแรงในแนวตั้งและแรงในแนวนอน ความแตกต่างจะมากกว่านี้ถ้าเก็บตัวอย่างมาไม่ดี

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด

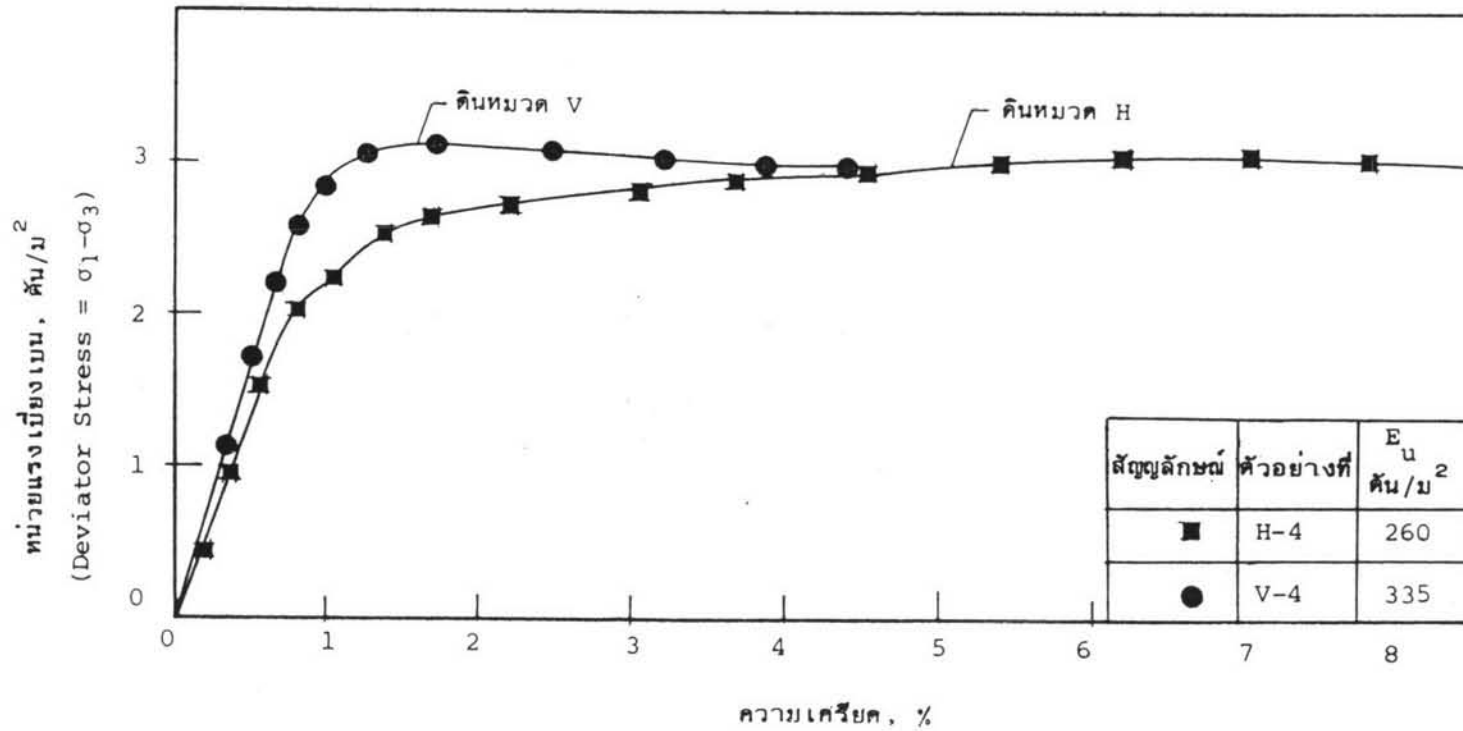
ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะที่ดินถูกแรงกระทำในสภาพไม่ระบายน้ำ ทั้งเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งและในแนวนอนจากการทดลองแบบ CIUC ที่ σ_{vo} , UU และ UC ได้แสดงในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

การทดลองแบบ CIUC ใช้ตัวอย่างดิน H-2 และ V-3 ซึ่งสามารถทำให้ดินมีหน่วยแรงประสิทธิผลในสภาพใกล้เคียงตามธรรมชาติก่อนทำการทดสอบ (แต่ปริมาณน้ำในดินจะน้อยกว่าธรรมชาติเล็กน้อย) ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดมีลักษณะคล้ายกันทั้งเมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง คือจะเป็นกราฟเส้นตรงในช่วงแรกเมื่อหน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Deviator Stress) ที่ดินรับได้ ความลาดของเส้นตรงนี้คือค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพที่ไม่ระบายน้ำ ($E_u = E_{50}$) ของดิน หลังจากนั้นกราฟจะเป็นเส้นโค้งเกิดความเครียดสูงในขณะที่หน่วยแรงเพิ่มเพียงเล็กน้อยทำให้ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำมีค่าลดลง ค่าความเครียดที่เกิดการพังทลายของดินรับแรงในแนวนอนจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียดเมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง เล็กน้อย

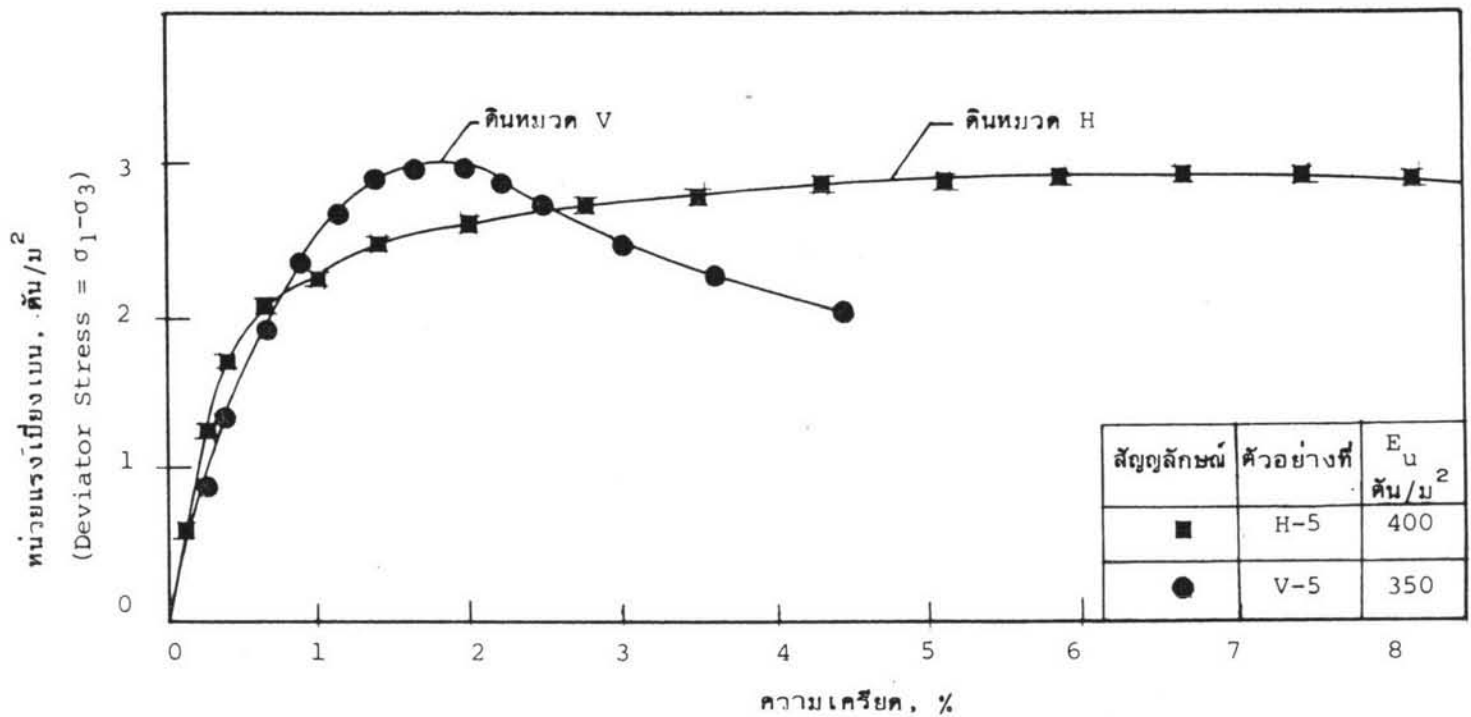
ส่วนการทดลอง UU และ UC จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดคล้ายกัน คือจะเป็นกราฟเส้นตรงในช่วงแรกและหลังจากนั้นเส้นกราฟจะโค้งเกิดความเครียดสูง ถ้าดินรับแรงในแนวนอนจะไม่เกิดยอดกราฟเมื่อถึงค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดที่ดินรับได้ นั่นคือ ค่าความเครียดที่เกิดการพังทลายจะเห็นได้ไม่ชัด ส่วนเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งจะเกิดยอดกราฟเมื่อถึงค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุดหลังจากนั้นหน่วยแรงเบี่ยงเบนจะลดลงเมื่อความเครียดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ที่จุดเกิดการพังทลายความเครียดของดินเมื่อรับแรงในแนวนอนจะมีค่ามากกว่าความเครียดของตัวอย่างดินที่รับแรงในแนวตั้งมาก (ความเครียดที่กล่าวถึงนี้เป็นความเครียดคนละทิศทาง เนื่องจากแรงที่มากกระทำมีทิศทางต่างกัน)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับความเครียด จากการทดลอง CIUC เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้งที่ Insitu Stress



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเบี่ยงเบนกับความเครียดจากการทดลอง UU



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉียงเบนกับความเครียดจากการทดลอง UC

เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บมาเป็นตัวอย่างที่ดีและถูกรบกวนน้อย การเปรียบเทียบผลทางด้าน σ - ϵ ระหว่างการทดลอง UU หรือ UC กับ \overline{CIUC} แสดงว่าการใช้การอัดตัวคายนํ้าแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Consolidation) ทำให้พฤติกรรมทางด้าน σ - ϵ เปลี่ยนแปลงไป เพราะตามทฤษฎีแล้วการเคลื่อนตัวของดินที่จุดพิบัติ เมื่อดินรับแรงในแนวนอนจะมากกว่าในกรณีที่รับแรงในแนวตั้ง

ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดลองต่างวิธีกันจะมีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้ LADD C.C. (1964) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบด้วยกัน ที่สำคัญคือระดับหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อดิน ดังได้กล่าวข้างต้นว่า ที่หน่วยแรงเฉือนเบนค่าสูง ๆ จะได้กราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับความเครียด เป็นเส้นโค้ง ผลของค่าระดับหน่วยแรงเฉือนที่มีต่อค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองแบบ \overline{CIUC} ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 พบว่าที่ระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงและทำให้เกิดความเครียดมากขึ้น ดังนั้น ถ้าใช้พิกัดความปลอดภัยค่า (ระดับหน่วยแรงเฉือนสูง) ดินจะเกิดการยุบตัวแบบอัน เทรนมากด้วย

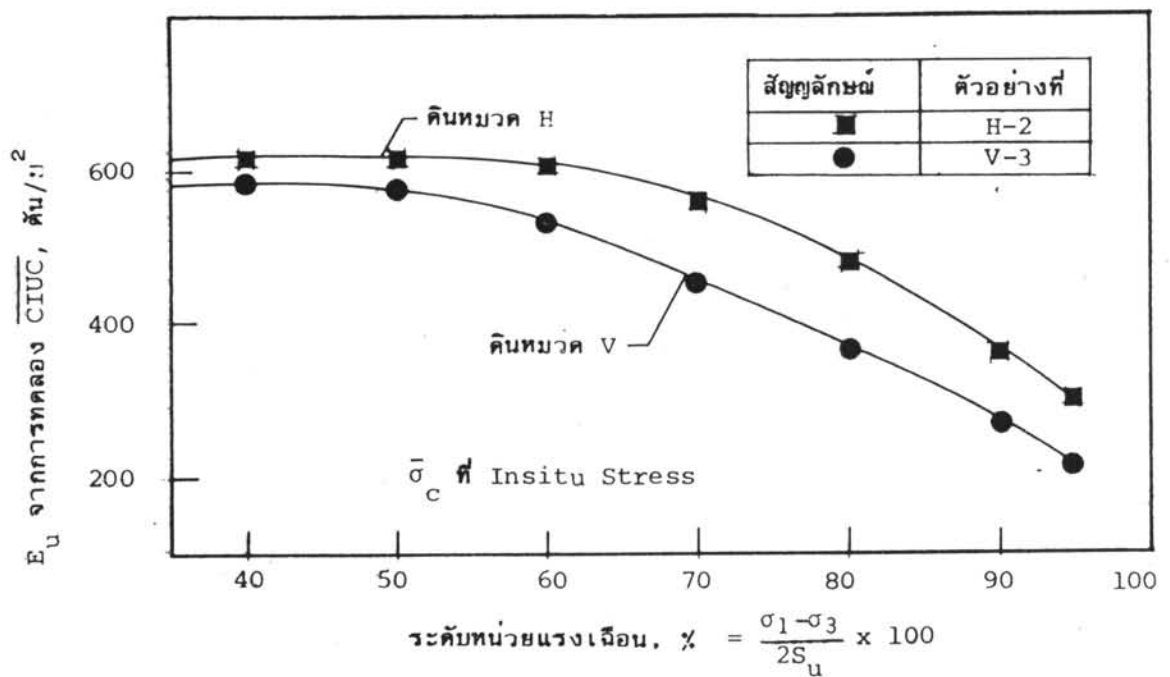
จากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ เมื่อดินรับแรงในทิศทางต่างกันจะมีค่าแตกต่างกัน จากการทดลองแบบ \overline{CIUC} ที่ $\bar{\sigma}_{vo}$ เมื่อดินรับแรงในแนวนอน จะมีค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นสูงกว่า เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง

2. ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ (E_{50}) ที่ได้จากการทดลองแบบ \overline{CIUC} ที่ $\bar{\sigma}_{vo}$ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง UU และ UC ดังอัตราส่วนต่อไปนี้

ก. เมื่อดินรับแรงในแนวนอนในช่วงที่กราฟระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดเป็นเส้นตรง การทดลองแบบ \overline{CIUC} ที่ $\bar{\sigma}_{vo}$ ได้ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นสูงกว่าการทดลองแบบ UU ประมาณ 2.4 เท่าและสูงกว่าการทดลอง UC ประมาณ 1.6 เท่า

ข. เมื่อดินรับแรงในแนวตั้งในช่วงที่กราฟระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดเป็นเส้นตรง การทดลองแบบ \overline{CIUC} ที่ $\bar{\sigma}_{vo}$ ได้ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นสูงกว่าการทดลอง UU ประมาณ 1.7 เท่าและสูงกว่าการทดลอง UC ประมาณ 1.6 เท่า



รูปที่ 4.7 ผลของระดับหน่วยแรงเฉือนต่อค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้งจากการทดลอง CIUC

3. การทดลองแบบ CIUC ที่ $\bar{\sigma}_{VO}$ จะได้ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น มีค่าคงที่เมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่า 50 % เมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงซึ่งทำให้การยุบตัวแบบอันเดรนมีมากขึ้นทั้งเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งและในแนวนอน

4. ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนเดียวกัน จากการทดสอบแบบ CIUC ที่ $\bar{\sigma}_{VO}$ ดินรับแรงในแนวนอนจะมีการเคลื่อนตัวแบบอันเดรนน้อยกว่า เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง ทั้งนี้ เพราะค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นเมื่อดินรับแรงในแนวนอนจากผลการทดลองแบบ CIUC มีค่าสูงกว่าเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งทุกค่าระดับหน่วยแรงเฉือน

4.3 การทดลองอันเดรนครีพ

การทดลองอันเดรนครีพเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งและในแนวนอน โดยทำให้ดินอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอปิกให้มีค่าหน่วยแรงประสิทธิผล $\bar{\sigma}_{VO}$ เสียก่อน แล้วจึงทดลองอันเดรนครีพหลังจากให้หน่วยแรงกับดินที่ระดับหน่วยแรงเฉือน $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 S_u} \times 100\right)$ ต่าง ๆ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.3 และในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ผลการทดลองจะกล่าวถึงพฤติกรรมอันเดรนครีพโดยละเอียด เมื่อดินรับแรงในแนวนอนเปรียบเทียบกับเมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง

4.3.1 การคาดคะเนกำลังครีพ (Creep Strength หรือ Yield Value)

กำลังครีพเป็นค่าสูงสุดของหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ ที่กระทำกับดินแล้วไม่เกิดการพัวพันโดยครีพ (เมื่อเกิดการพัวพัน สภาพของหน่วยแรง (state of stress) ของดินที่จุดสุดท้ายบนทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลจะอยู่บนเอนVELOPEของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พัวพัน) ค่ากำลังครีพจึงเป็นค่ากำลังของดินที่สำคัญ เพราะอาจมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่คิดผลจากครีพซึ่งหาได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดิน (Strength Test) นอกจากนี้กำลังครีพอาจมีค่าแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงที่มากระทำอีกด้วย

จากการทดลองอันเดรนครีพเมื่อดินรับแรงในแนวนอน ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50%, 70%, 80%, 90% และ 95% ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลาในรูปที่ 4.10 พบว่าที่ระดับหน่วยแรงเฉือน

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างดินสำหรับการทดลองอัน เทรนครีฟและการทดลองอัดตัวคายน้ำในเครื่อง Triaxial

ดินหมวด	ตัวอย่างที่	$\bar{\sigma}_c$ ตัน/ม ²	w_i %	w_f %	γ_t ตัน/ม ³	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ ก่อนทดสอบ อัน เทรนครีฟ, ตัน/ม ²	ระดับหน่วย แรงเฉือน, %	ความดันน้ำในโพรงหลัง อัน เทรนครีฟ, ตัน/ม ²	เวลาระหว่างการทดลอง อัน เทรนครีฟ
H	H-6	4.5	57	55	1.66	4.63	95	23.5 ^{**}	13.7 ชม.
	H-7	4.5	59	57	1.64	4.36	90	23.5 ^{**}	21.3 ชม.
	H-8	4.5	59	54	1.64	3.88	80	23.0 [*]	1ส. (168 ชม.)
	H-9	4.5	55	51	1.68	3.40	70	22.6 [*]	4ว. (96 ชม.)
	H-10	4.5	53	51	1.67	2.41	50	21.6 [*]	2ว. (48 ชม.)
V	V-6	4.5	56	53	1.63	4.45	95	23.5 ^{**}	5.0 ชม.
	V-7	4.5	62	55	1.62	4.24	90	23.1 [*]	1ส. (168 ชม.)
	V-8	4.5	63	59	1.62	3.33	70	22.4 [*]	2.9ว. (70 ชม.)
	V-9	4.5	62	59	1.62	2.34	50	21.6 [*]	2ว. (48 ชม.)

หมายเหตุ ใช้ความดันน้ำในตัวอย่างตอนแรก (Back Pressure) = 20 ตัน/ม².

ชม. หมายถึง ชั่วโมง

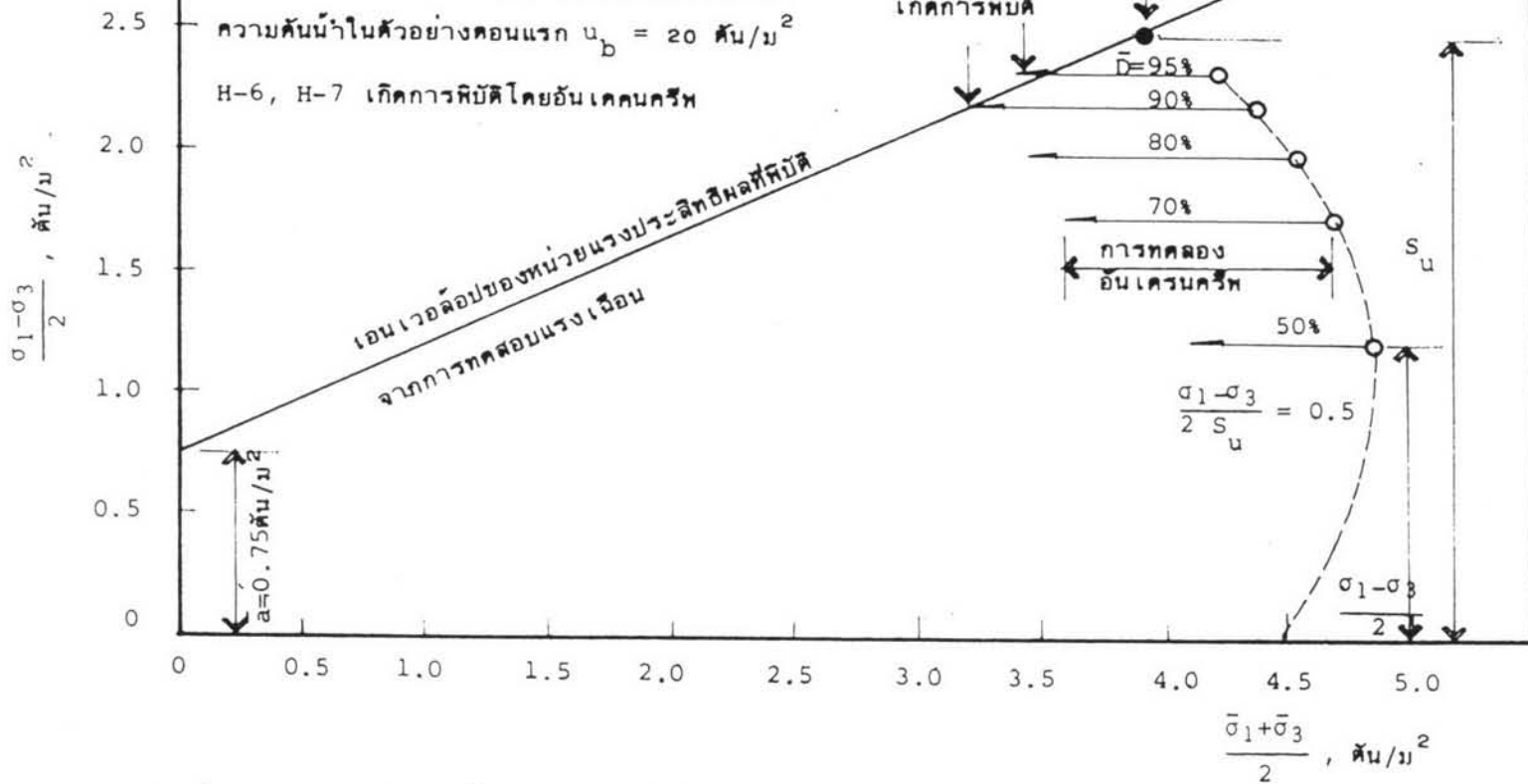
ว. หมายถึง วัน

ส. หมายถึง สัปดาห์

* วัดครั้งสุดท้ายก่อนหยุดการทดลอง

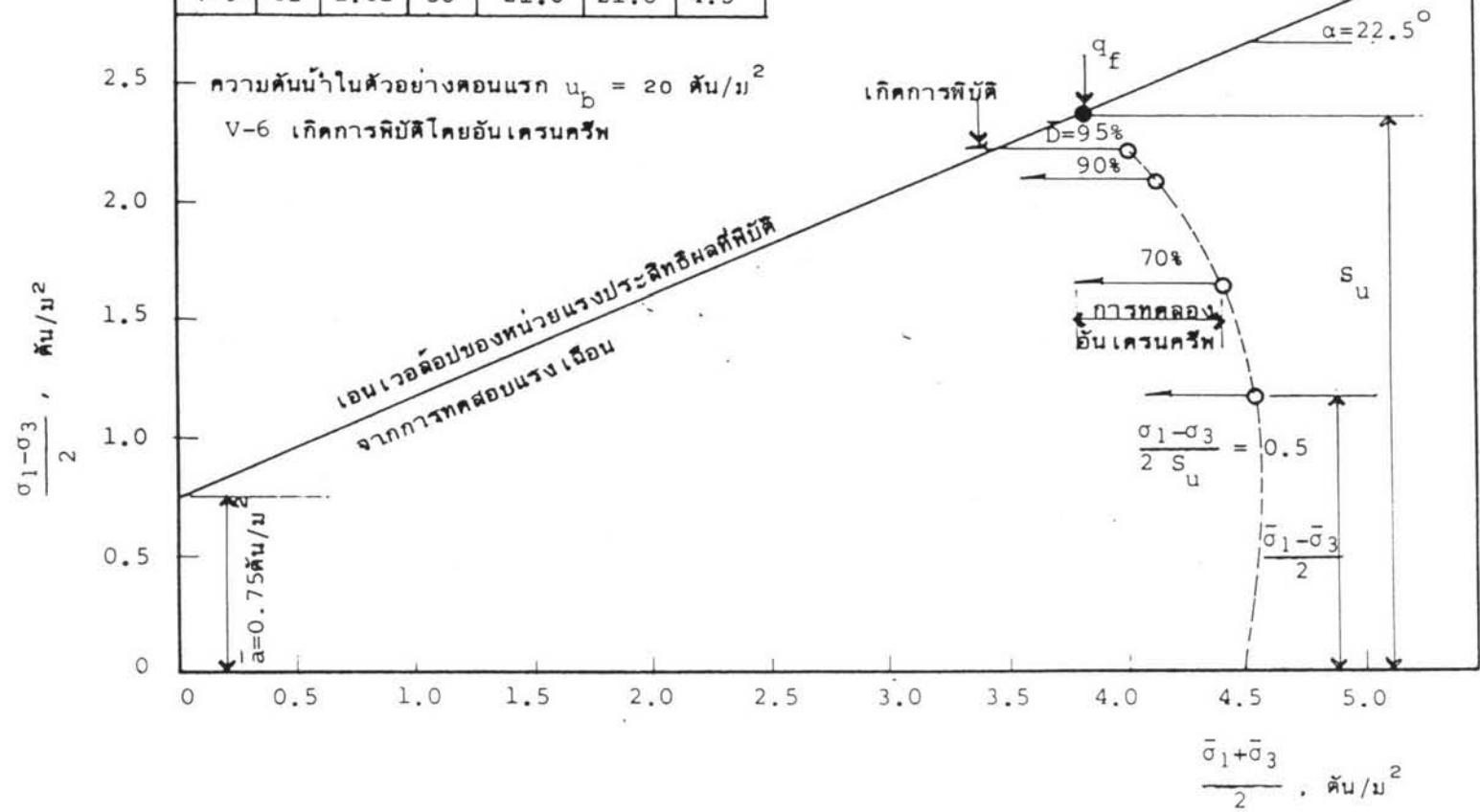
** วัดที่จุด เกิดการพินิติโดยอัน เทรนครีฟ

ตัวอย่างที่	$w_i, \%$	γ_c ตัน/ม ³	\bar{D} %	u ตัน/ม ² ก่อนครีท	u ตัน/ม ² หลังครีท	$\bar{\sigma}_c$ ตัน/ม ²
H-6	57	1.66	95	22.6	23.5	4.5
H-7	59	1.64	90	22.3	23.5	4.5
H-8	59	1.64	80	21.9	23.0	4.5
H-9	55	1.68	70	21.5	22.6	4.5
H-10	53	1.67	50	20.8	21.6	4.5

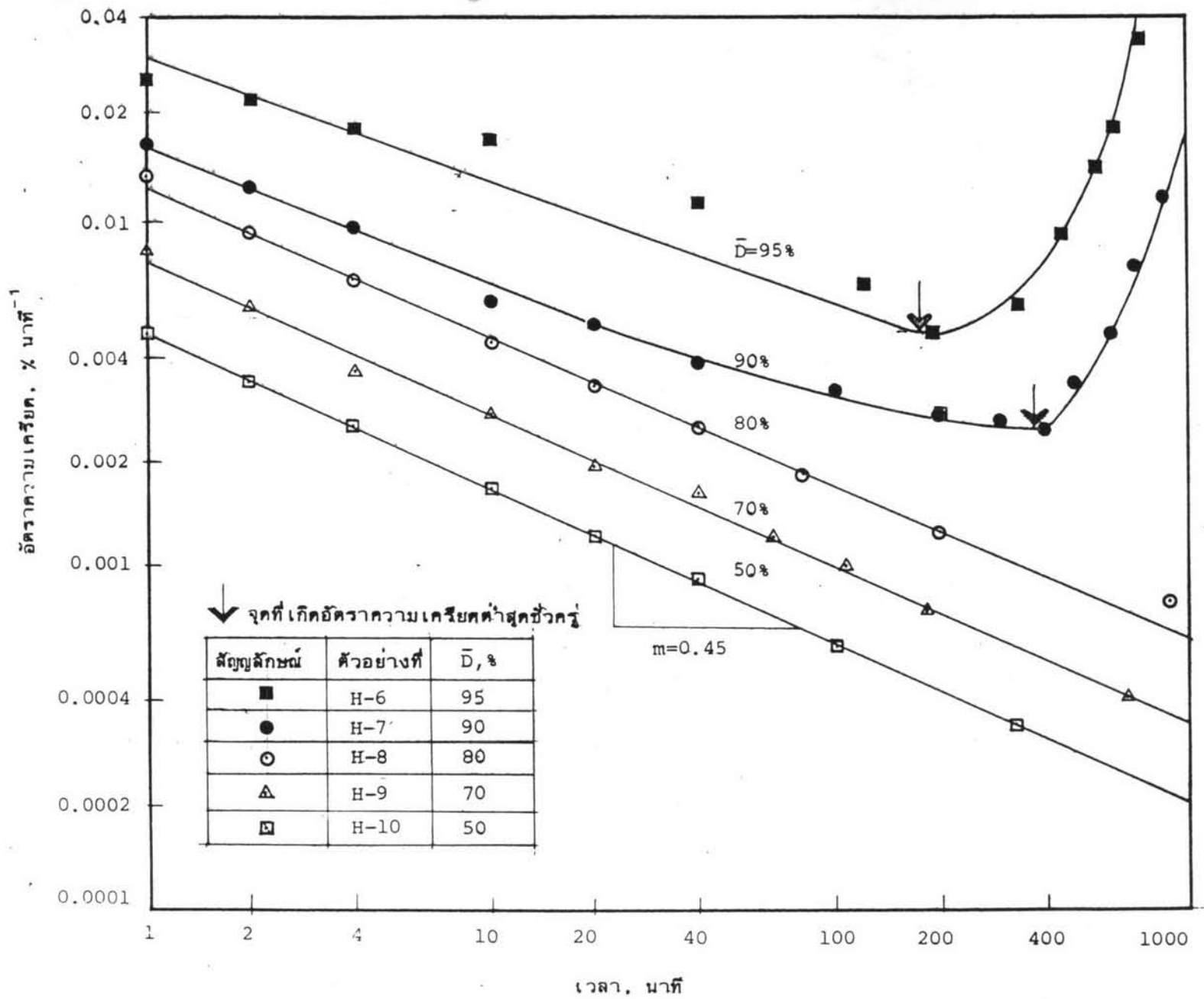


รูปที่ 4.8 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างอันเคนครีทเพื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

ตัวอย่างที่	$w_i, \%$	γ_c ตัน/ม ³	\bar{D} %	u ตัน/ม ² ก่อนครีท	u ตัน/ม ² หลังครีท	$\bar{\sigma}_c$ ตัน/ม ²
V-6	56	1.63	95	22.8	23.5	4.5
V-7	62	1.62	90	22.4	23.1	4.5
V-8	63	1.62	70	21.8	22.4	4.5
V-9	62	1.62	50	21.0	21.6	4.5



รูปที่ 4.9 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างอันเกรนครีทเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



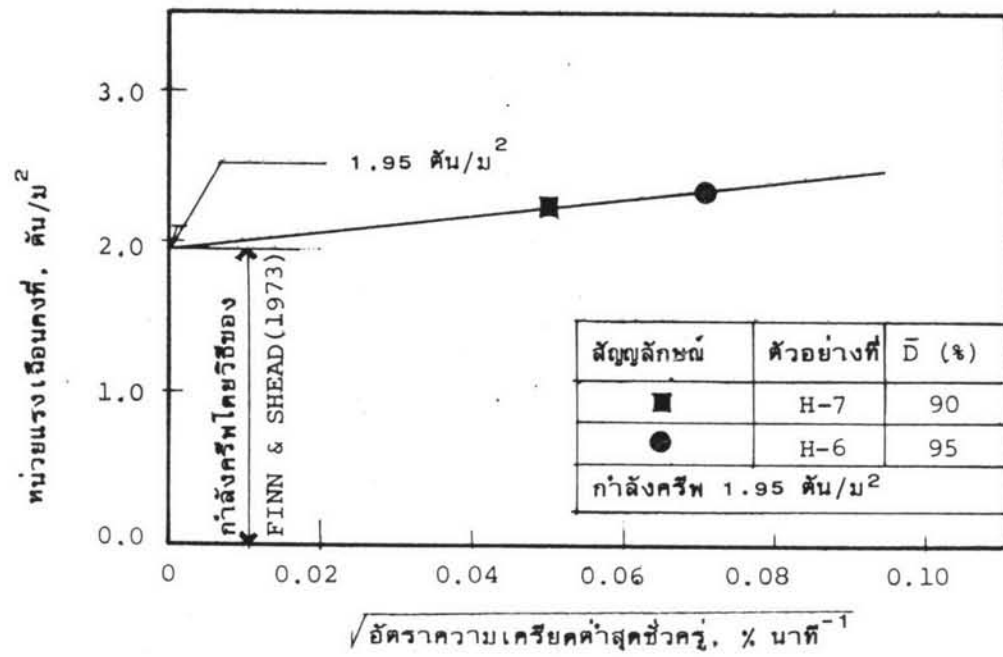
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลา เมื่อคืนรับแรงใน
 แนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

90% และ 95% ดินจะเกิดอัตราความเครียดต่ำสุดชั่วคราว (Transient Minimum Strain Rate) แล้วเกิดการพิบัติโดยอันตรนครีฟในที่สุด (จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลาโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 4.3.3) ส่วนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80% ไม่เกิดการพิบัติโดยอันตรนครีฟ เมื่อดินทดลองรับหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ไว้เป็นเวลานานถึง 1 สัปดาห์ ดังนั้นคาดว่าค่ากำลังครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวนอนจะมีค่าอยู่ระหว่างระดับหน่วยแรงเฉือน 80% กับ 90% (นั่นคือกำลังครีฟจะมีค่าเท่ากับ 0.8 ถึง 0.9 เท่าของค่ากำลังรับแรงเฉือนที่วัดมาจากวิธีวัดกำลังรับแรงเฉือนแบบธรรมดา เมื่อทดสอบแบบ CIUC)

โดยใช้วิธีของ FINN และ SHEAD (1973) ซึ่งได้แนะนำการหาค่ากำลังครีฟ โดยทำการทดลองจนเกิดการพิบัติโดยครีฟอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง เมื่อแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ $\left| \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \right|$ ที่ใช้ในการทดสอบครีฟ | จากการทดลองครีฟกับกราฟที่สองของอัตราความเครียดต่ำสุดชั่วคราว จะสามารถหาค่ากำลังครีฟได้โดยต่อกราฟเส้นตรงตัดแกนของหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ ค่าที่ได้จะเป็นค่ากำลังครีฟ จากผลการทดลองที่เกิดการพิบัติโดยอันตรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90% และ 95% ได้กำลังครีฟมีค่า 1.95 ดัน/ม² (ดังแสดงในรูปที่ 4.11) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า กำลังรับแรงเฉือนแบบอันตรนครีฟในแนวนอนที่ได้จากการทดลองแบบ CIUC ประมาณ 20% สรุปได้ว่า ถ้าใช้พารามิเตอร์ด้านกำลังจากการทดลองแบบ CIUC ในการออกแบบให้ดินรับแรงในแนวนอนจากตัวอย่างในแนวนอน โดยใช้พิสัยความปลอดภัยต่ำกว่า 1.25 จะเกิดการพิบัติโดยอันตรนครีฟขึ้น

สำหรับค่ากำลังครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง (รูปที่ 4.9) ไม่สามารถใช้วิธีการของ FINN และ SHEAD (1973) ได้ เพราะมีเพียงการทดลองเดียวที่ดินเกิดการพิบัติโดยอันตรนครีฟคือที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 95% แต่สามารถประมาณได้ว่าค่ากำลังครีฟจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.12 ถึง 2.24 ดัน/ม² (ระหว่างระดับหน่วยแรงเฉือน 90% และ 95%) ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันตรนครีฟในแนวตั้งที่ได้จากการทดลองแบบ CIUC ประมาณ 10%

ค่ากำลังครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ดินรับแรงในแนวตั้ง ทั้ง ๆ ที่กำลังรับแรงเฉือนแบบอันตรนครีฟจากการทดสอบแบบ CIUC เมื่อดินรับแรงในแนวนอนมีค่าสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามกำลังครีฟยังมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันตรนครีฟ



รูปที่ 4.11 การคาดคะเนค่า "กำลังครีฟ" โดยวิธีของ FINN และ SHEAD (1973)

เมื่อดินรับหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ในแนวนอน

ที่ได้จากการทดลอง UU และ UC จากตัวอย่างดินในแนวดิ่ง

4.3.2 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างเกิดอันเดรนครีฟ

ในขณะที่เกิดอันเดรนครีฟทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลจะอยู่ในแนวนอน ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ทั้งนี้เพราะดินจะรับหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ q ($\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ มีค่าคงที่) ส่วนค่า \bar{p} ($\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$) จะมีค่าลดลงเนื่องจากความดันน้ำในโพรงระหว่างอันเดรนครีฟมีค่าเพิ่มมากขึ้น

เมื่อดินทดลองรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90% และ 95% ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลจะวิ่งเข้าสู่เอนเวอล็อปของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติเกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีฟ ส่วนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80% ค่าความดันน้ำในโพรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มอันเดรนครีฟและจะเพิ่มขึ้นน้อยมากจนเกือบคงที่เมื่อเวลาระหว่างการทดสอบอันเดรนครีฟเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่า \bar{p} จะมีค่าลดลงแล้วคงที่ในที่สุด ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลจึงหยุดก่อนถึงเอนเวอล็อปของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติ ดินทดลองจึงไม่เกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีฟ ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนต่ำกว่า 80% ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลจะมีลักษณะคล้ายกับที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80% แต่ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลจะหยุดห่างจากเอนเวอล็อปของหน่วยแรงประสิทธิผลมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับแรงเฉือนมีค่ายิ่งต่ำดินจะมีปัญหาที่จะเกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีฟลดลงมากด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 4.8)

สำหรับทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลในระหว่างอันเดรนครีฟ เมื่อดินรับแรงในแนวดิ่งก็มีลักษณะเดียวกับเมื่อดินรับแรงในแนวนอน (ดังแสดงในรูปที่ 4.9) ดินจะเกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีฟที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 95% เมื่อทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลวิ่งเข้าสู่เอนเวอล็อปของหน่วยแรงประสิทธิผลที่พิบัติที่ $\sigma_1 - \sigma_3$ มีค่าสูงสุด เมื่อดินรับแรงในแนวดิ่ง

4.3.3 พฤติกรรมของหน่วยแรง-ความเครียดและเวลา (Stress-Strain-Time) ในระหว่างอันเดรนครีฟ

พฤติกรรมการยุบตัวต่อเนื่องกับเวลาของดินทดลองจากปทุมธานี โดยใช้เครื่อง Triaxial ในการทดลองอันเดรนครีฟ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียดและเวลาซึ่งสามารถหาสมการมาแสดงถึงความสัมพันธ์เหล่านี้ โดยใช้พารามิเตอร์ของ

คืนที่ได้จากการทดลอง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับ Logarithm ของเวลา เมื่อคืนรับหน่วยแรงเฉือนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ จะได้ชุดของเส้นตรงเกือบขนานกันทั้งเมื่อคืนรับแรงในแนวนอนดังแสดงในรูป 4.12 และเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งในรูปที่ 4.13 ซึ่งมีลักษณะเดียวกับที่ SEMPLE (1973) ได้อธิบายไว้ (รูปที่ 2) ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงและมีความลาดชันของเส้นตรงนี้มีค่า λ ยกเว้นในกรณีที่ระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงกว่า ระดับหน่วยแรงเฉือนที่มีค่าเท่ากับกำลังครีฟ ในกรณีนี้กราฟความสัมพันธ์จะเป็นเส้นโค้งหักงอขึ้นแสดงว่าคืนเกิดการยุบตัวด้วยอัตราเร่งสูงแล้วเกิดการพินดีโดยอันตรรกครีฟในที่สุด

ในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงมีความลาด λ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาสำหรับที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าหนึ่ง ๆ ดังสมการ

$$\text{Log } \epsilon = \text{Log } \epsilon_1 + \lambda \text{Log } t$$

$$\epsilon = \epsilon_1 t^\lambda \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

เมื่อ ϵ = ความเครียดที่เวลาใด ๆ

ϵ_1 = ความเครียดที่เวลา 1 หน่วย (ให้เท่ากับ 1 นาที)

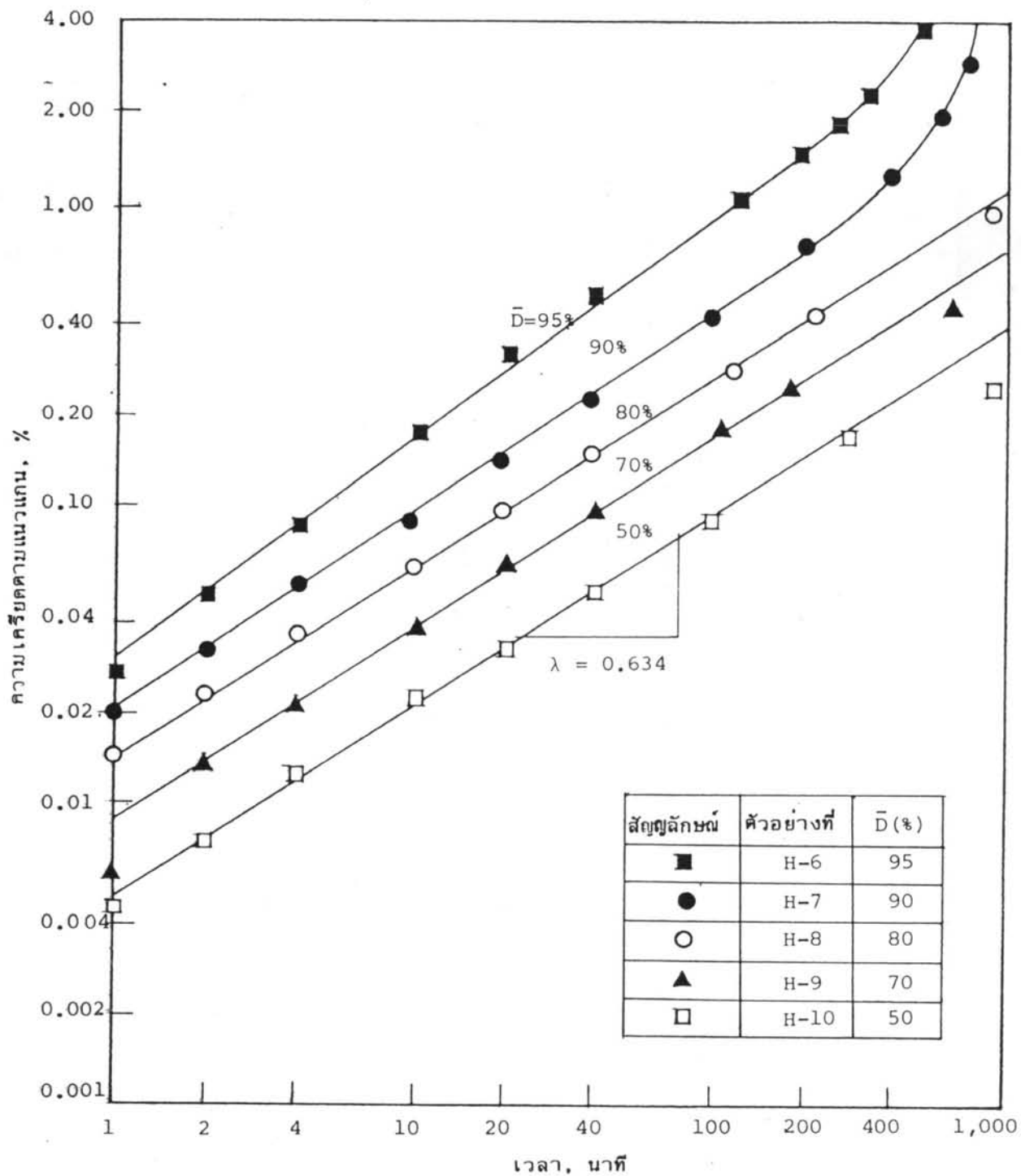
λ = ความลาดของเส้นตรงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับ Logarithm ของเวลา

สำหรับคืนเหนียวจากปทุมธานี

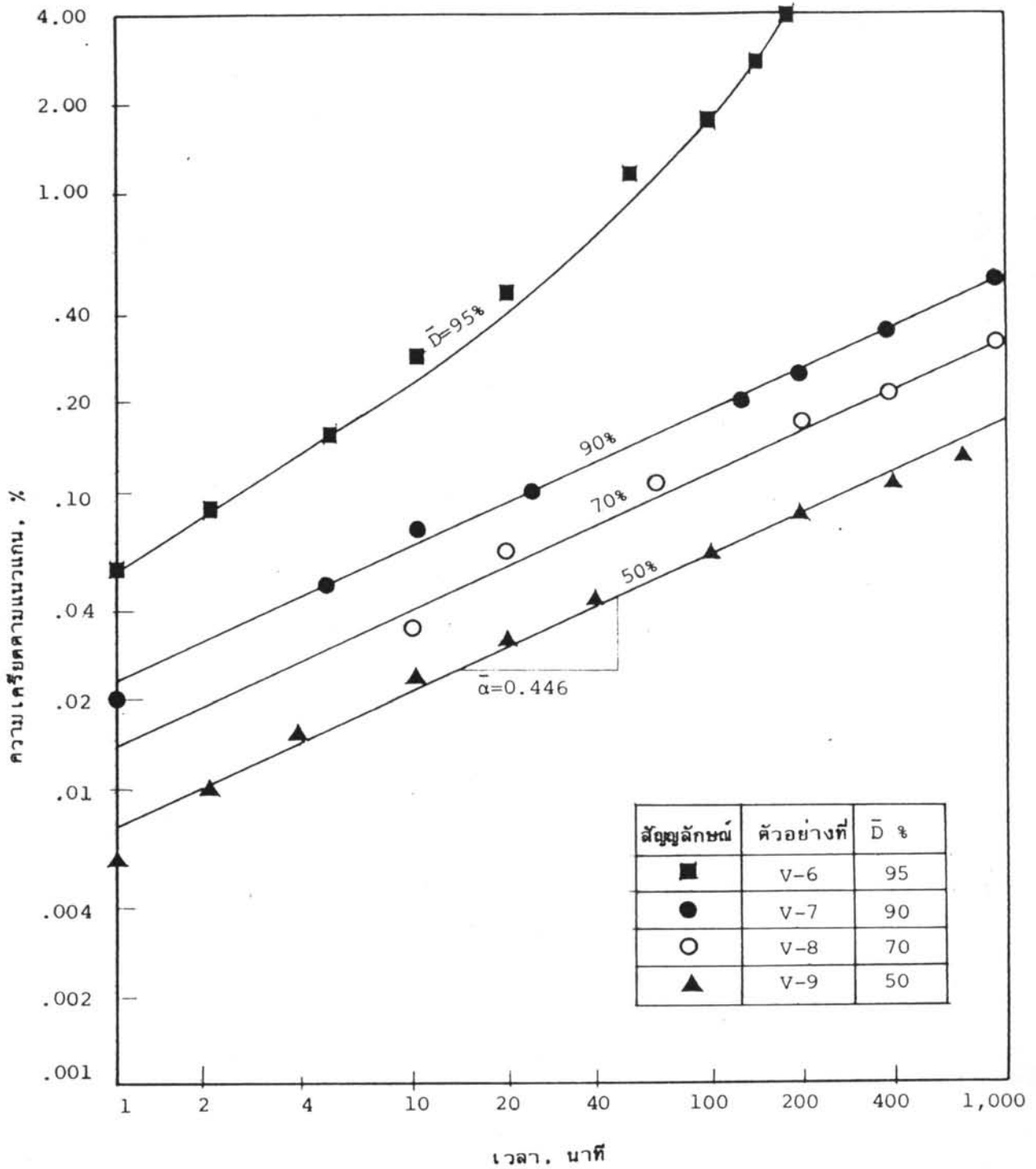
เมื่อคืนรับแรงในแนวนอน ได้ค่า $\lambda = 0.634$ (รูปที่ 4.12)

เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้ง ได้ค่า $\lambda = 0.446$ (รูปที่ 4.13)

ถ้าต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด เวลาและระดับหน่วยแรงเฉือนอาจทำได้โดยหลักเกณฑ์ที่ว่า ค่า ϵ_1 ในสมการ (4.1) สามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log_e ของความเครียดกับค่าระดับหน่วยแรงเฉือนที่เวลา



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับ Logarithm ของเวลา
เมื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Lagarithm ของความเครียดกับ logarithm ของเวลา เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

1 นาทีและที่เวลาที่ผ่านไประหว่างอันเดรนครีฟ (เช่น 4, 16, 64, 256 นาที เป็นต้น) ดังแสดงในรูป 4.14 และ 4.15 จะได้ว่าชุดของเส้นเกือบขนานกันมีความลาดของส่วนที่เป็นเส้นตรงมีค่า β และเส้นกราฟเมื่อเวลา 1 นาทีตัดแกนของความเครียดให้ค่า B เมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์ ความสัมพันธ์อาจเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Log}_e \epsilon_1 &= \text{Log}_e B + \beta \bar{D} \\ \epsilon_1 &= B \exp(\beta \bar{D}) \quad \dots \dots \dots (4.2) \end{aligned}$$

แทน ϵ_1 จากสมการ (4.2) ลงในสมการ (4.1) ได้

$$\epsilon = B \exp(\beta \bar{D}) t^\lambda \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

สมการ (4.3) เป็นสมการแทนการยุบตัวของดินขึ้นอยู่กับเวลาของ SEMPLE สำหรับการทดลองอันเดรนครีฟได้ผลการทดลองดังนี้

เมื่อดินรับแรงในแนวนอนแสดงกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.14

มีความลาด $\beta = 3.02$ และ $B = 0.00115 \%$

เมื่อดินรับแรงในแนวตั้งแสดงกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.15

มีความลาด $\beta = 2.77$ และ $B = 0.002 \%$

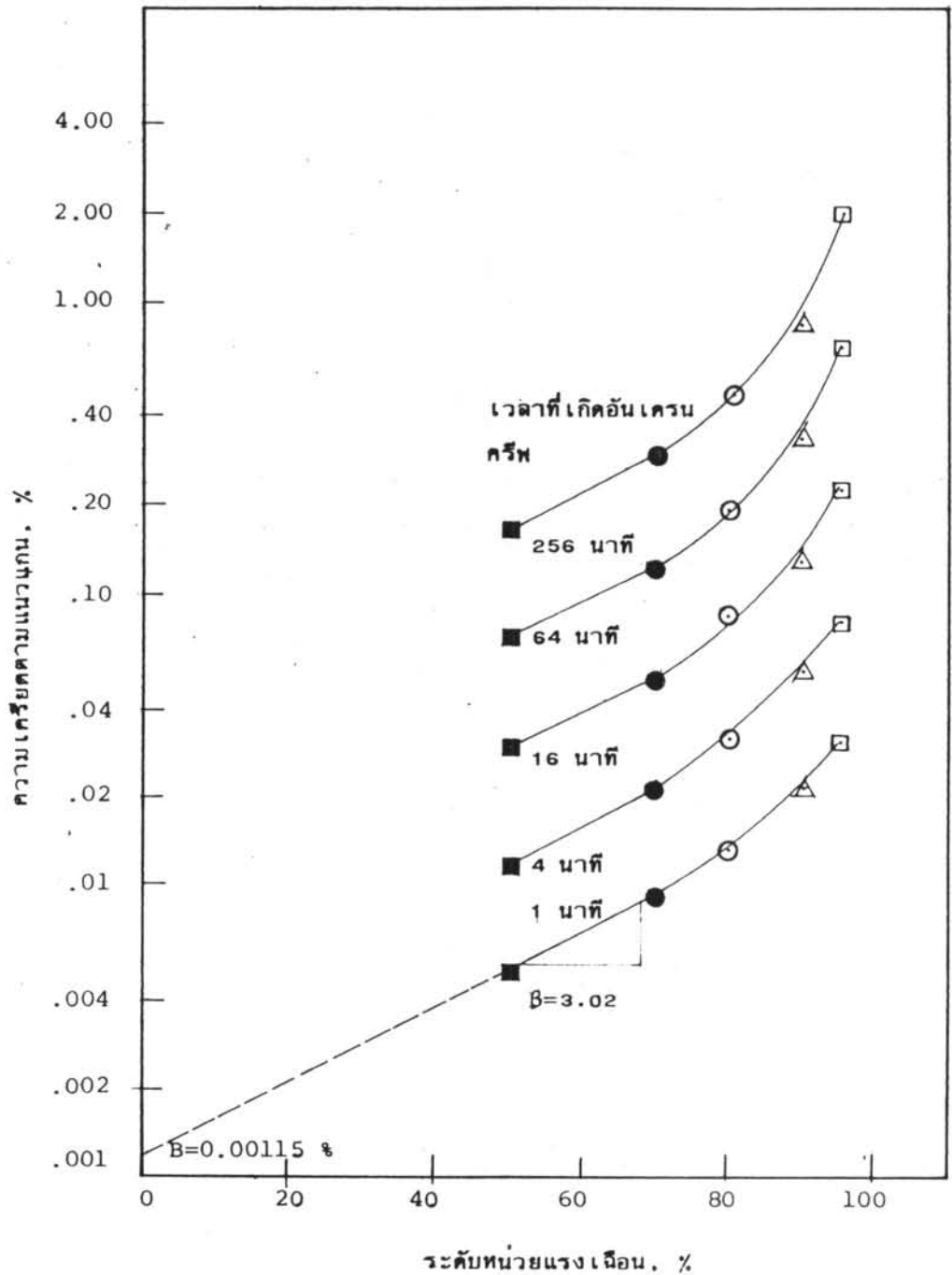
โดยสมการของ SEMPLE นี้จะสามารถหาความเครียดระหว่างอันเดรนครีฟที่ระดับหน่วยแรงเฉือนใด ๆ (\bar{D}) เมื่อเวลา t ของดินทดลองปฐมธานี ในกรณีที่หน่วยแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่ากำลังครีฟตั้งสมการ

$$\text{เมื่อดินรับแรงในแนวนอน } \epsilon \% = 0.00115 \exp(3.02 \bar{D}) t^{0.634} \dots (4.4)$$

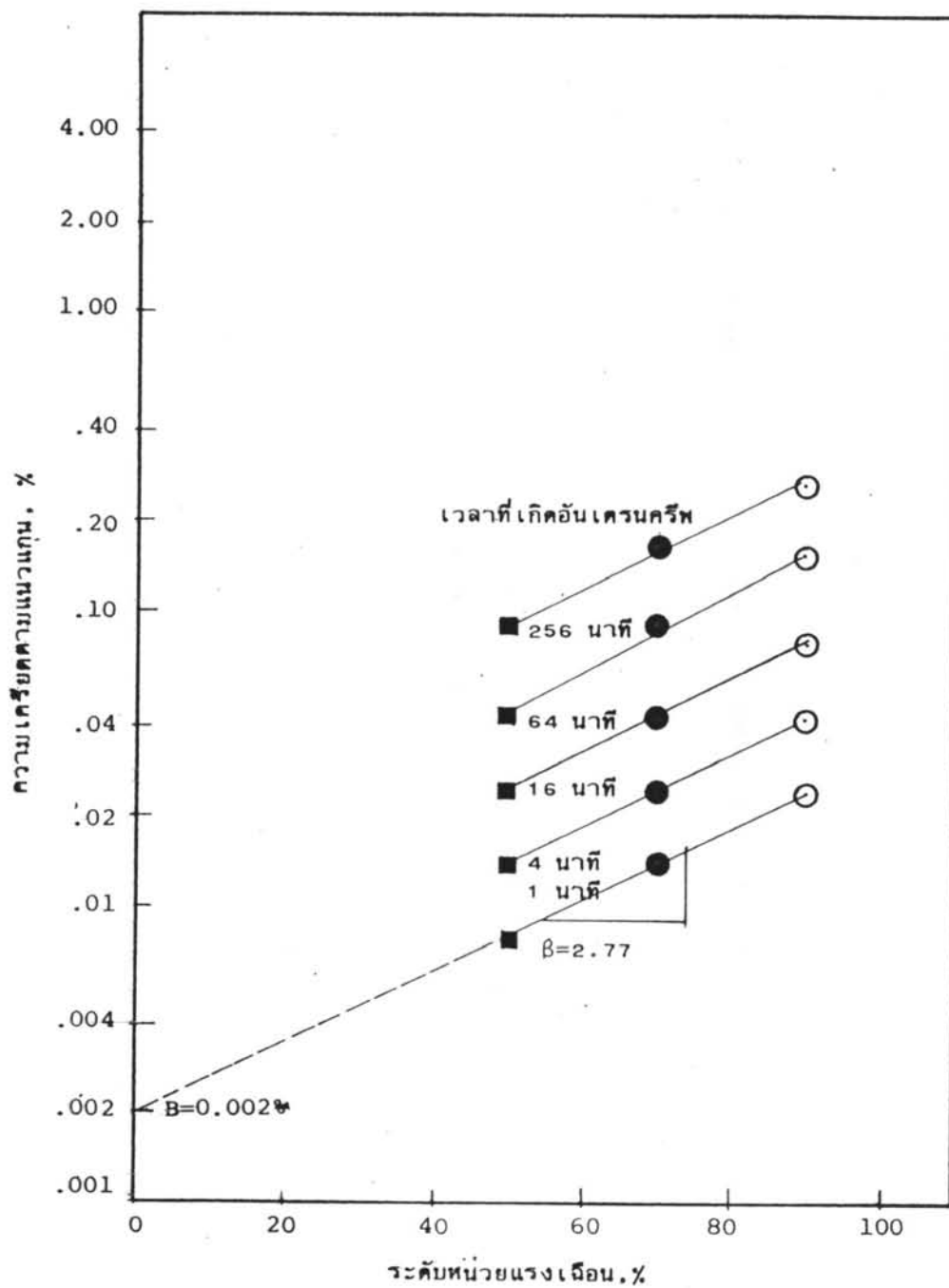
$$\text{เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง } \epsilon \% = 0.002 \exp(2.77 \bar{D}) t^{0.446} \dots (4.5)$$

เมื่อ \bar{D} = ระดับหน่วยแรงเฉือน, %

t = เวลา มีหน่วยเป็น นาที



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือน เมื่อคืนรับแรงในแนวนอน



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือน เมื่อได้รับแรงในแนวตั้ง

สมการ (4.4) และ (4.5) เป็นสมการที่ได้จากผลการทดลองอันเดรียน ครีฟด้วยเครื่อง Triaxial ในห้องทดลอง โดย Consolidate ตัวอย่างแบบไอโซทรอปิก และหาค่าระดับหน่วยแรงเฉือน (\bar{D}) จากกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรียนสูงสุดที่ได้จากการทดลอง แบบ CIUC ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล $\bar{\sigma}_{vo}$ ได้ตรวจสอบสมการ (4.4) และ (4.5) กับผลการทดลองที่ได้จะได้กราฟความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากการทดลอง เมื่อดินรับหน่วยแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่ากำลังครีฟของดิน

นอกจากการหาความเครียดระหว่างเกิดอันเดรียนครีฟโดยใช้สมการของ SEMPLE แล้วยังสามารถใช้วิธีของ SINGH และ MITCHELL (1968) ซึ่งใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลา เมื่อดินรับแรงที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังครีฟของดิน จะได้กราฟความสัมพันธ์เป็นชุดของเส้นตรงเกือบขนานกัน ส่วนค่าหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อดินมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่ากำลังครีฟ เส้นกราฟจะหักโค้งขึ้นหลังจากเกิดอัตราความเครียดค่าสุดชั่วครู่ แล้วเกิดการพิบัติโดยอันเดรียนครีฟ ในที่สุด ความลาดของส่วนที่เป็นชุดของเส้นตรงมีค่า m ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับเวลาที่ระดับหน่วยแรงเฉือนหนึ่ง ๆ ดังสมการ

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 t^{-m} \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

เมื่อ $\dot{\epsilon}$ = อัตราความเครียดเมื่อเวลาใด ๆ

$\dot{\epsilon}_1$ = อัตราความเครียดเมื่อเวลา 1 หน่วย (ให้เท่ากับ 1 นาที)

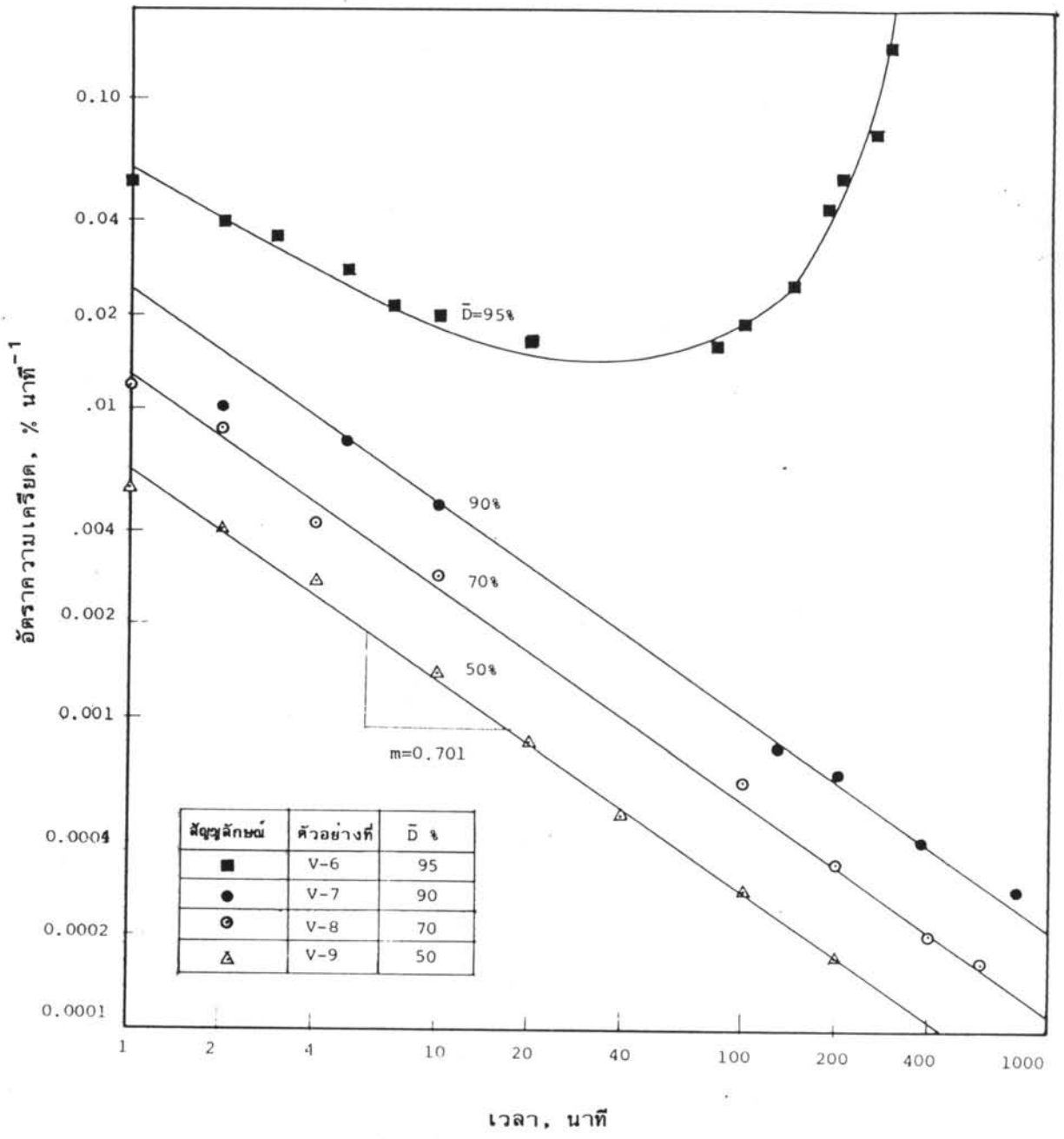
t = เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็นนาที

สำหรับดินทดลองปฐมธานี

เมื่อดินรับแรงในแนวนอนได้ค่า $m = 0.450$ (ดูรูปที่ 4.10)

เมื่อดินรับแรงในแนวตั้งได้ค่า $m = 0.701$ (ดูรูปที่ 4.16)

เช่นเดียวกับของ SEMPLE (1973) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือนอาจหาได้โดยทราบว่า ค่า $\dot{\epsilon}_1$ ในสมการ (4.6) สามารถหาได้โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log_e ของอัตราความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือนที่เวลา 1 นาทีและที่เวลาที่ผ่านไประหว่างอันเดรียนครีฟ (เช่น 4, 16, 64, 256 นาที เป็นต้น) จะได้ชุด



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลา เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

ของเส้นเกือบขนานกันมีความลาดของส่วนที่เป็นเส้นตรงมีค่า $\bar{\alpha}$ และเส้นกราฟเมื่อเวลา 1 นาทีตัดแกนของอัตราความเครียดได้ค่า A เมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์ได้ความสัมพันธ์

$$\dot{\epsilon}_1 = A \exp(\bar{\alpha}\bar{D}) \dots\dots\dots (4.7)$$

แทนค่า $\dot{\epsilon}_1$ จากสมการ (4.7) ลงในสมการ (4.6) ได้

$$\dot{\epsilon} = A \exp(\bar{\alpha}\bar{D}) t^{-m} \dots\dots\dots (4.8)$$

สมการ (4.8) เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียดและเวลาของ SINGH และ MITCHELL เมื่ออินทิเกรต (Integration) สมการ (4.8) จะสามารถหาความเครียดได้ตั้งสมการ

$$\epsilon = a + \frac{A}{1-m} \exp(\bar{\alpha}\bar{D}) t^{1-m} \text{ เมื่อ } m \neq 1 \dots\dots\dots (4.9a)$$

$$\text{และ } \epsilon = \epsilon_1 + A \exp(\bar{\alpha}\bar{D}) \text{ เมื่อ } m = 1 \dots\dots\dots (4.9b)$$

และ $t = 1$

เมื่อ a เป็นค่าคงที่จากการอินทิเกรต

จากผลการทดลองอันเดรนครีฟคินทดลองจากปทุมธานี

เมื่อดินรับแรงในแนวนอนแสดงกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.17

มีความลาด $\bar{\alpha} = 2.65$ และ $A = 0.0012 \%$ ค่อนาที

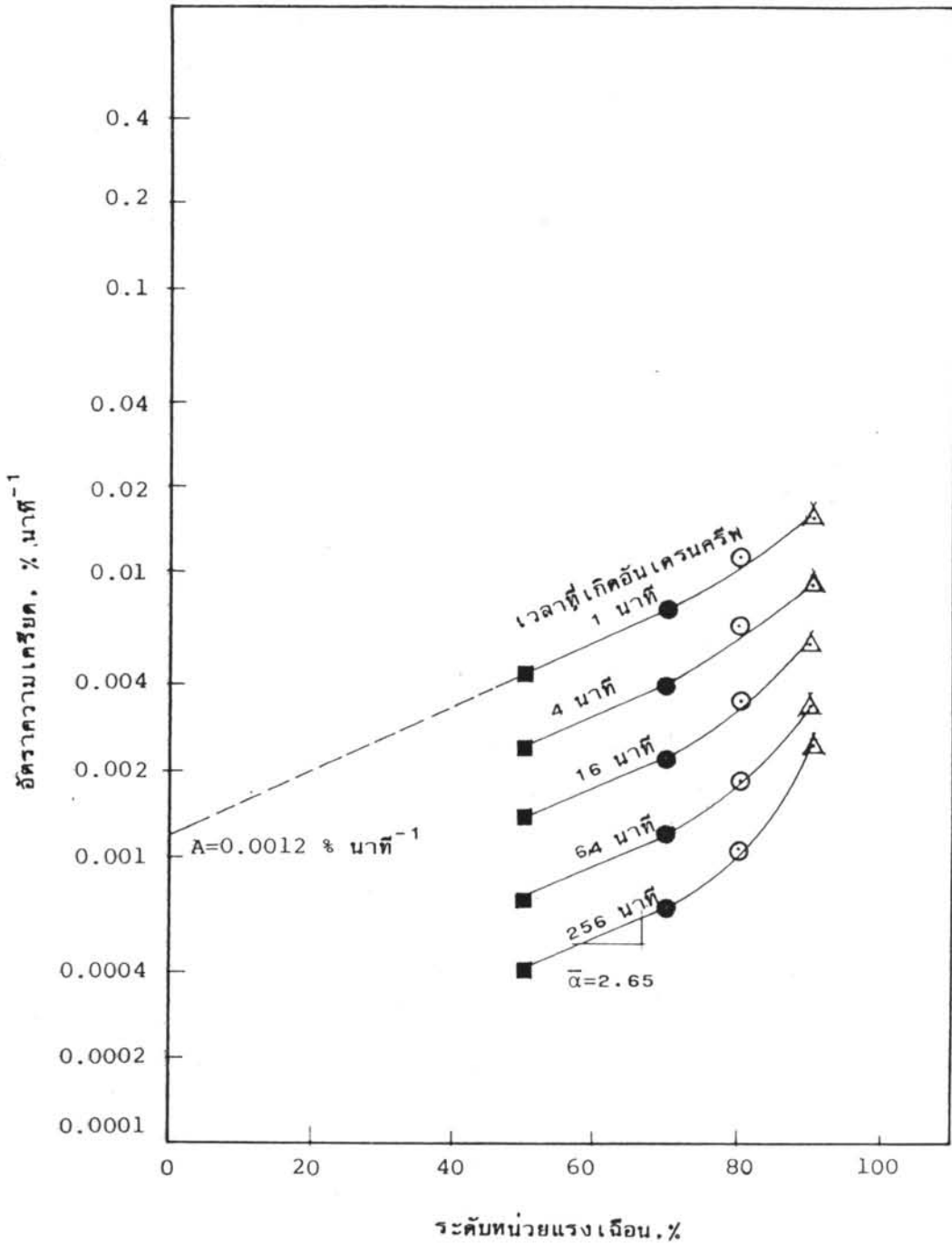
ค่าคงที่จากการอินทิเกรต $a = -0.00098$

เมื่อดินรับแรงในแนวตั้งแสดงกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.18

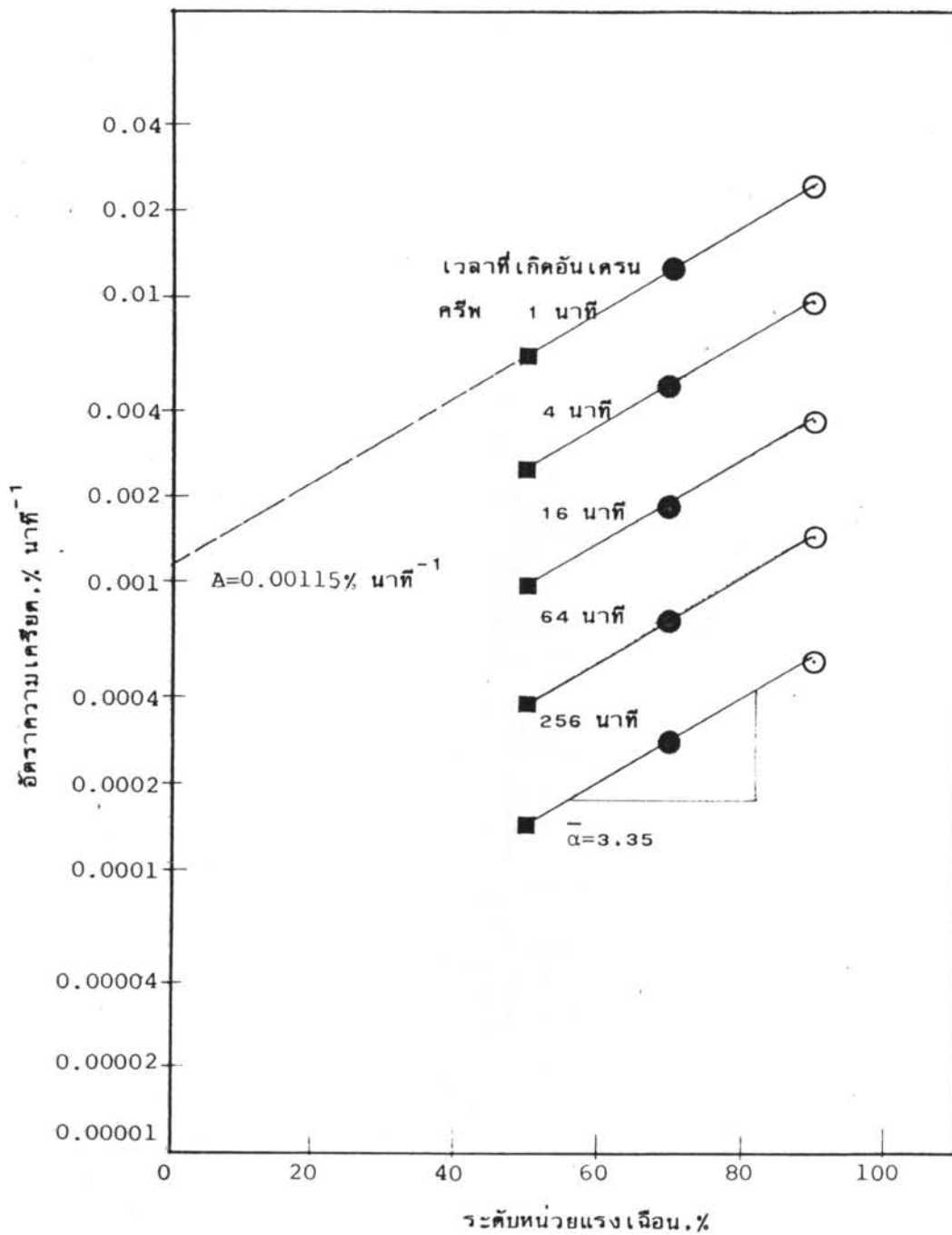
มีความลาด $\bar{\alpha} = 3.35$ และ $A = 0.00115 \%$ ค่อนาที

ค่าคงที่จากการอินทิเกรต $a = -0.0027$

นำหารามีเตอร์ของดินที่ได้จากการทดลองแทนค่าในสมการ (4.9) สามารถหาความเครียดระหว่างอันเดรนครีฟที่ระดับหน่วยแรงเฉือนใด ๆ (\bar{D}) เมื่อเวลา t ของดินทดลอง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับระดับหน่วยแรงเฉือนเมื่อคืนรับแรงโนแนวอน



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเคียดกับระดับหน่วยแรงเจียน เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้ง

ปทุมธานี ส่วนที่หน่วยแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่ากำลังครีฟคังสมการ

$$\text{เมื่อดินรับแรงในแนวนอน } \epsilon\% = -0.00098 + 0.0022 \exp(2.65\bar{D})t^{0.55} \dots\dots (4.10)$$

$$\text{เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง } \epsilon\% = -0.0027 + 0.0038 \exp(3.35\bar{D})t^{0.299} \dots\dots (4.11)$$

เมื่อ \bar{D} = ระดับหน่วยแรงเฉือน, %

t = เวลาที่มีหน่วยเป็น นาที

สมการ (4.10) และ (4.11) เป็นสมการที่ได้จากการทดลองอันเดรนครีฟด้วยเครื่อง Triaxial ในห้องทดลอง โดยหาค่าระดับหน่วยแรงเฉือน (\bar{D}) จากกำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนครีฟสูงสุดที่ได้จากการทดลองแบบ CIUC ที่หน่วยแรงประสิทธิผล $\bar{\sigma}_{VO}$ ค่าความเครียดระหว่างอันเดรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวนอนคังสมการ (4.4) ของ SEMPLE (1973) กับสมการ (4.10) ของ SINGH และ MITCHELL (1968) และเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งคังสมการ (4.5) ของ SEMPLE (1973) กับสมการ (4.11) ของ SINGH และ MITCHELL (1968) มีค่าแตกต่างกันบ้าง เพราะมีรากฐานมาจากทฤษฎีที่แตกต่างกัน ซึ่งสมการของ SEMPLE ให้ค่าใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า

ถ้าหน่วยแรงเฉือนค่าคงที่ที่กระทำต่อดินมีค่าสูงกว่ากำลังครีฟคือดินหมวด H ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90%, 95% และดินหมวด V ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 95% เส้นกราฟจะไม่สอดคล้องกับที่คาดคะเนจากสมการ เพราะดินจะเกิดความเครียดสูงมาก่อนเกิดการพิบัติโดยอันเดรนครีฟ

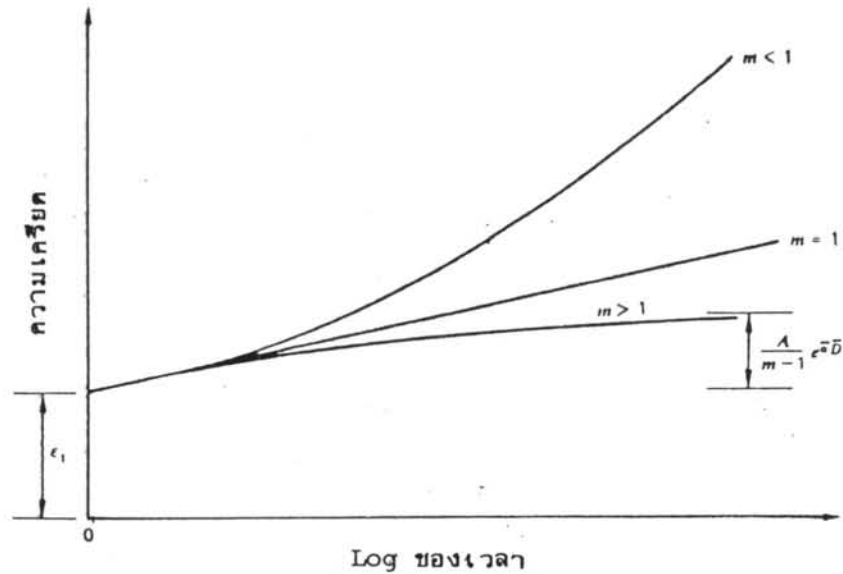
คุณสมบัติของดินที่จะแสดงว่ามีปัญหาทางด้านครีฟหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ m ดังแสดงในรูปที่ 4.19

เมื่อ m มีค่าน้อยกว่า 1 กราฟจะโค้งขึ้นเกิดความเครียดมากขึ้นเมื่อเวลาที่เกิดครีฟมากขึ้น

เมื่อ m มีค่าเท่ากับ 1 จะเป็นกราฟเส้นตรงอยู่ระหว่างเส้นกราฟเมื่อ m มากกว่าและน้อยกว่า 1

เมื่อ m มีค่ามากกว่า 1 จะเป็นกราฟเส้นโค้งขึ้นแล้วค่อย ๆ ราบไม่เกิดการยุบตัวเพิ่มเนื่องจากครีฟ

ดินเหนียวจะมีปัญหาทางด้านครีพเมื่อ m มีค่าน้อยกว่า 1.0 ค่าพารามิเตอร์ m ที่ได้จากการทดลองอันตรนครีพมีค่าน้อยกว่า 1.0 ($m = 0.450$ เมื่อดินรับแรงในแนวนอน และ $m = 0.701$ เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง) ดินเหนียวจากปทุมธานีที่นำมาทดสอบนี้จึงมีปัญหาทางด้านอันตรนครีพ



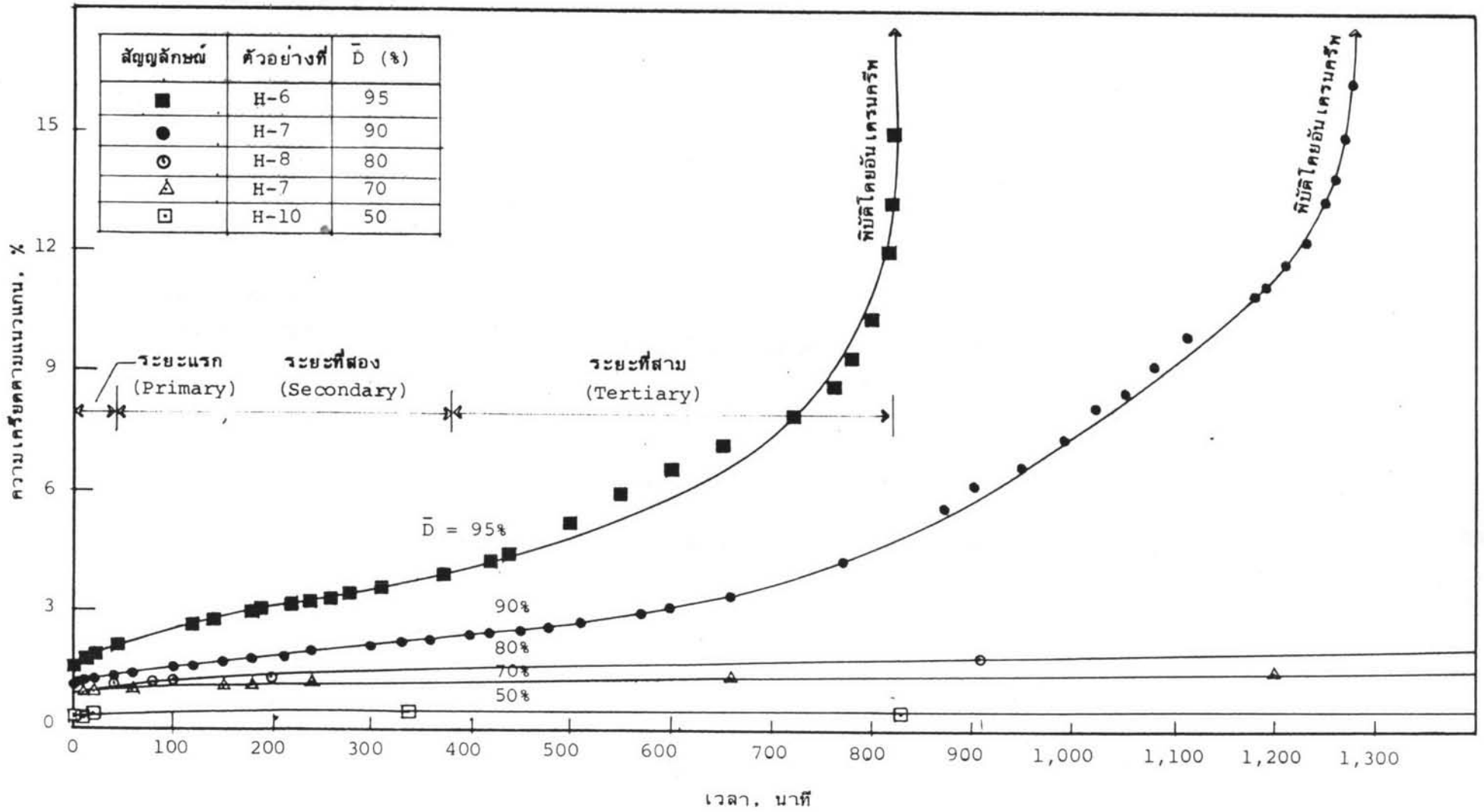
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับ Logarithm ของเวลา จากสมการ (4.9a) และ (4.9b)

4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความดันน้ำในโพรงกับเวลาในระหว่างทดสอบอันตรนครีพ

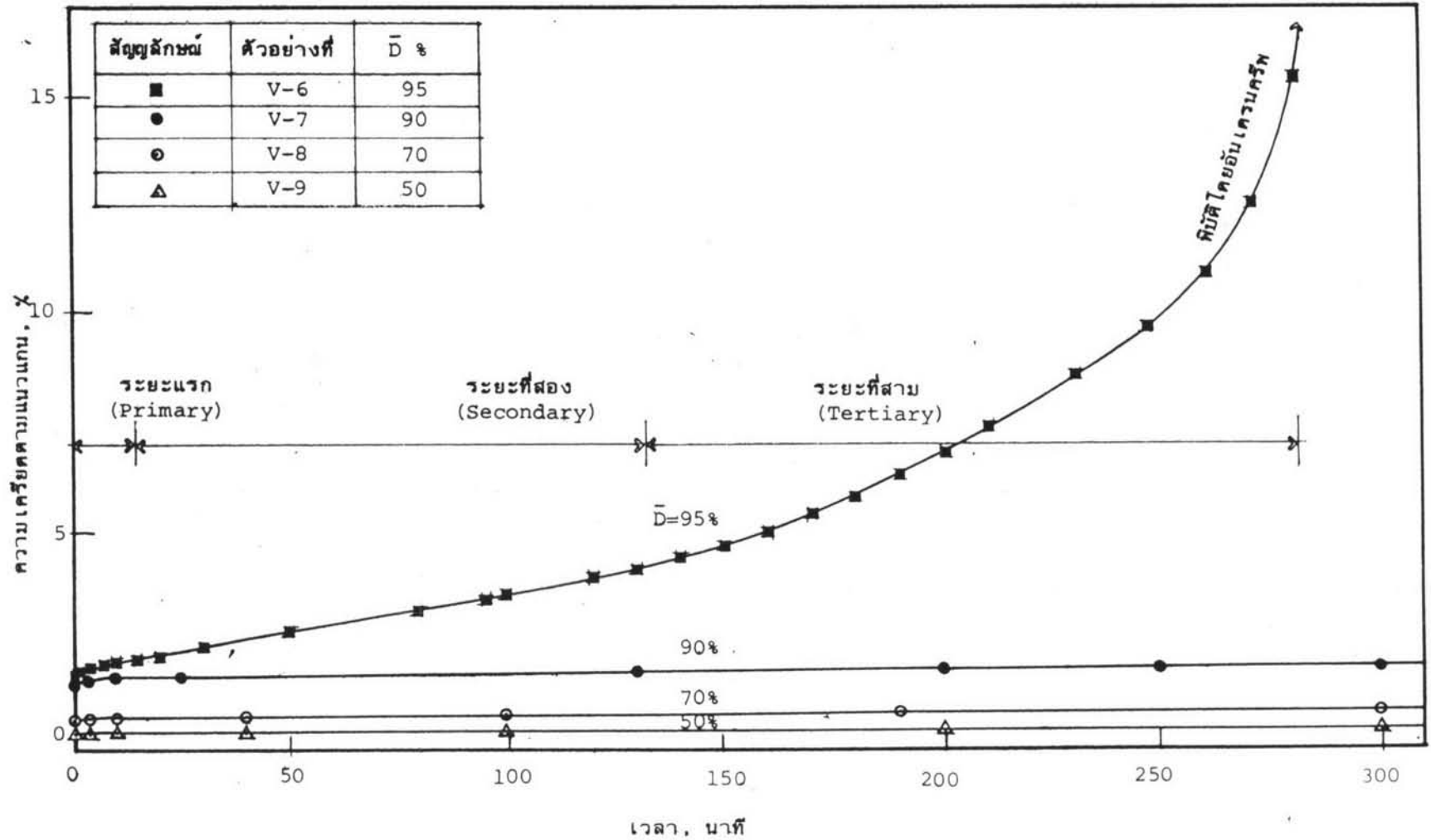
เพื่อแสดงพฤติกรรมของการเพิ่มค่าความดันน้ำในโพรงและค่าความเครียดในระหว่างเกิดอันตรนครีพ จึงได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาหรือ Logarithm ของเวลา (ดูรูปที่ 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23)

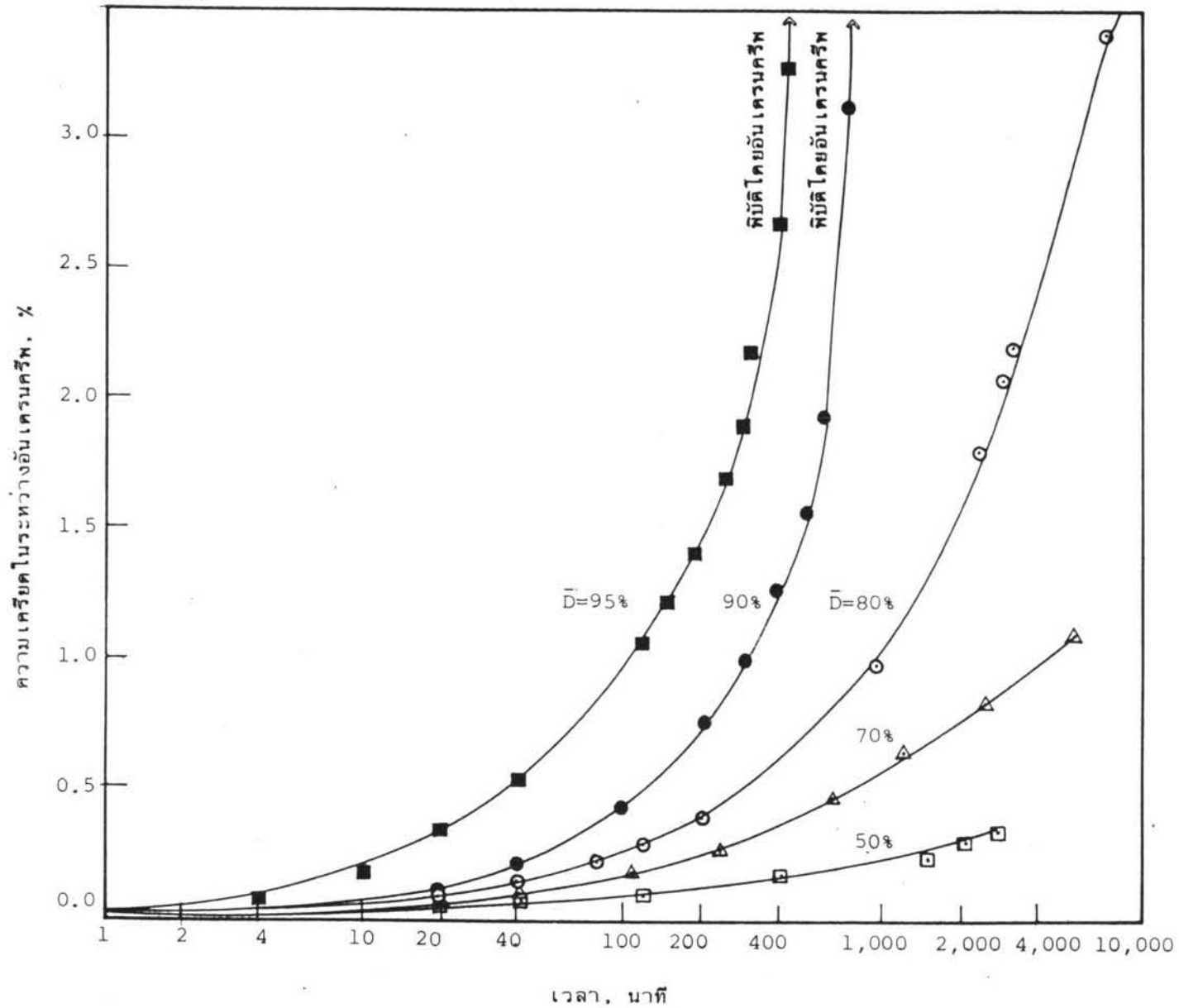
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในโพรงกับ Logarithm ของเวลา (รูปที่ 4.24 และ 4.25)



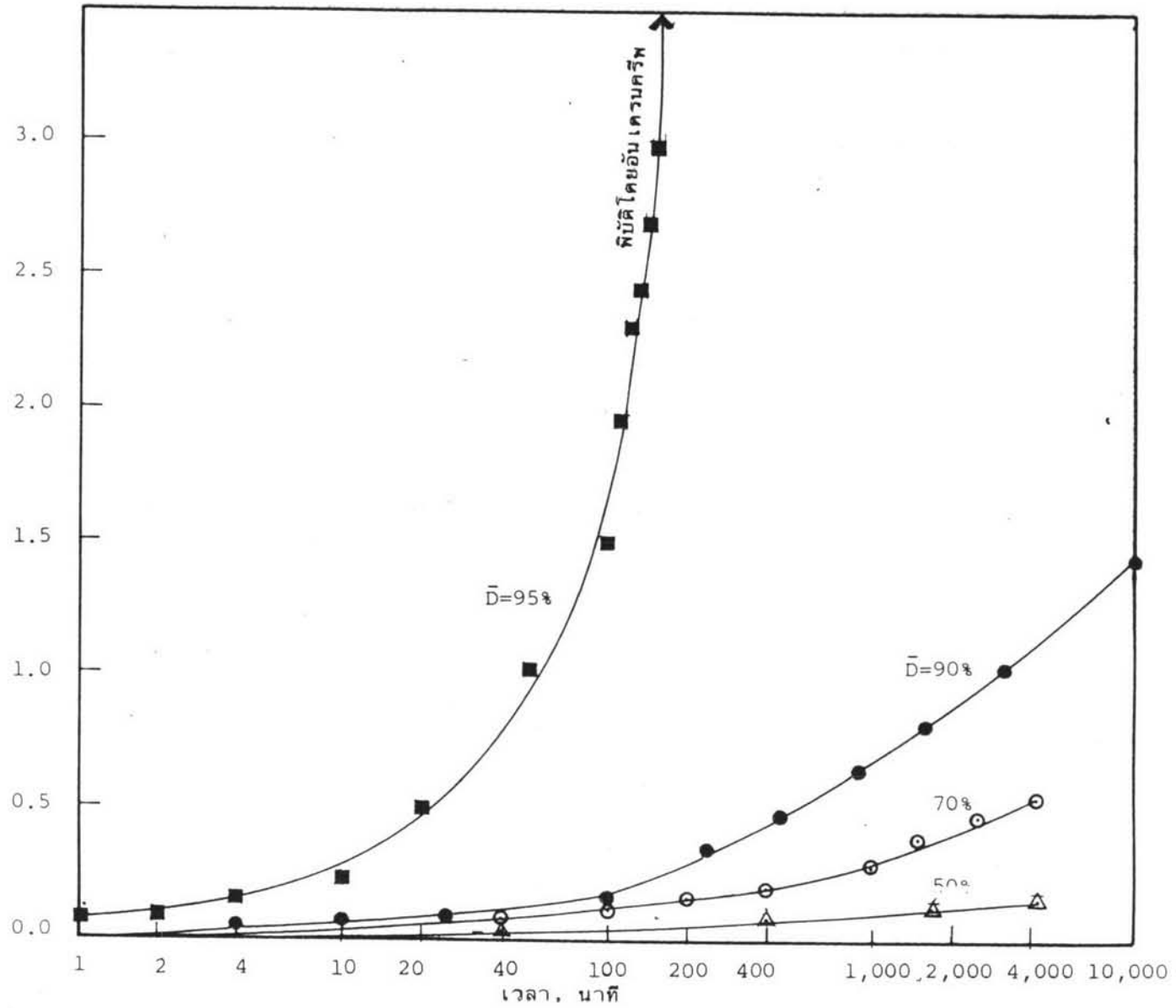
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาในระหว่างอันตรครนกรีฑ เมื่อคืนรับแรงในแวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



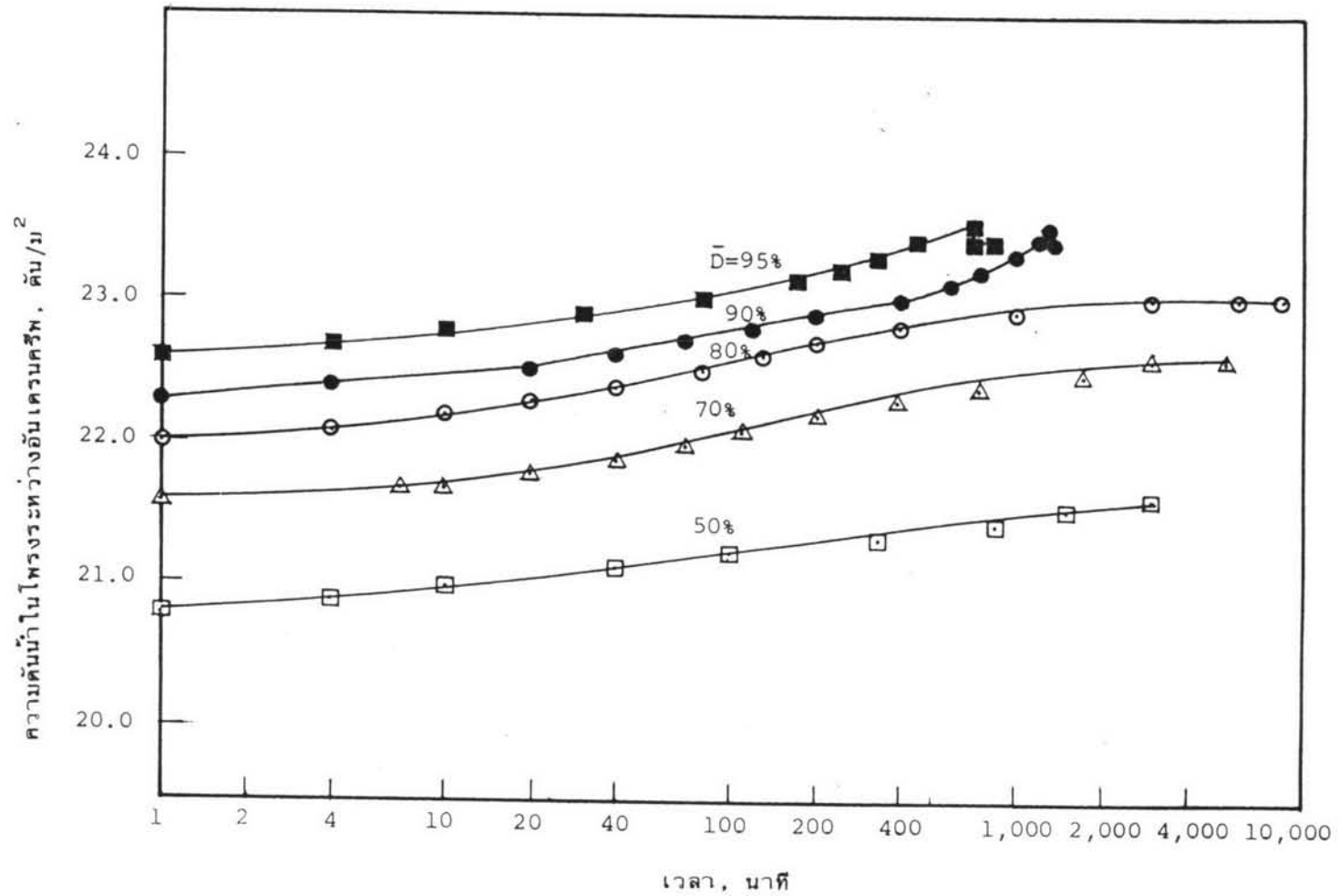
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาในระหว่างอันแทรกครีฟ เมื่อดินรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



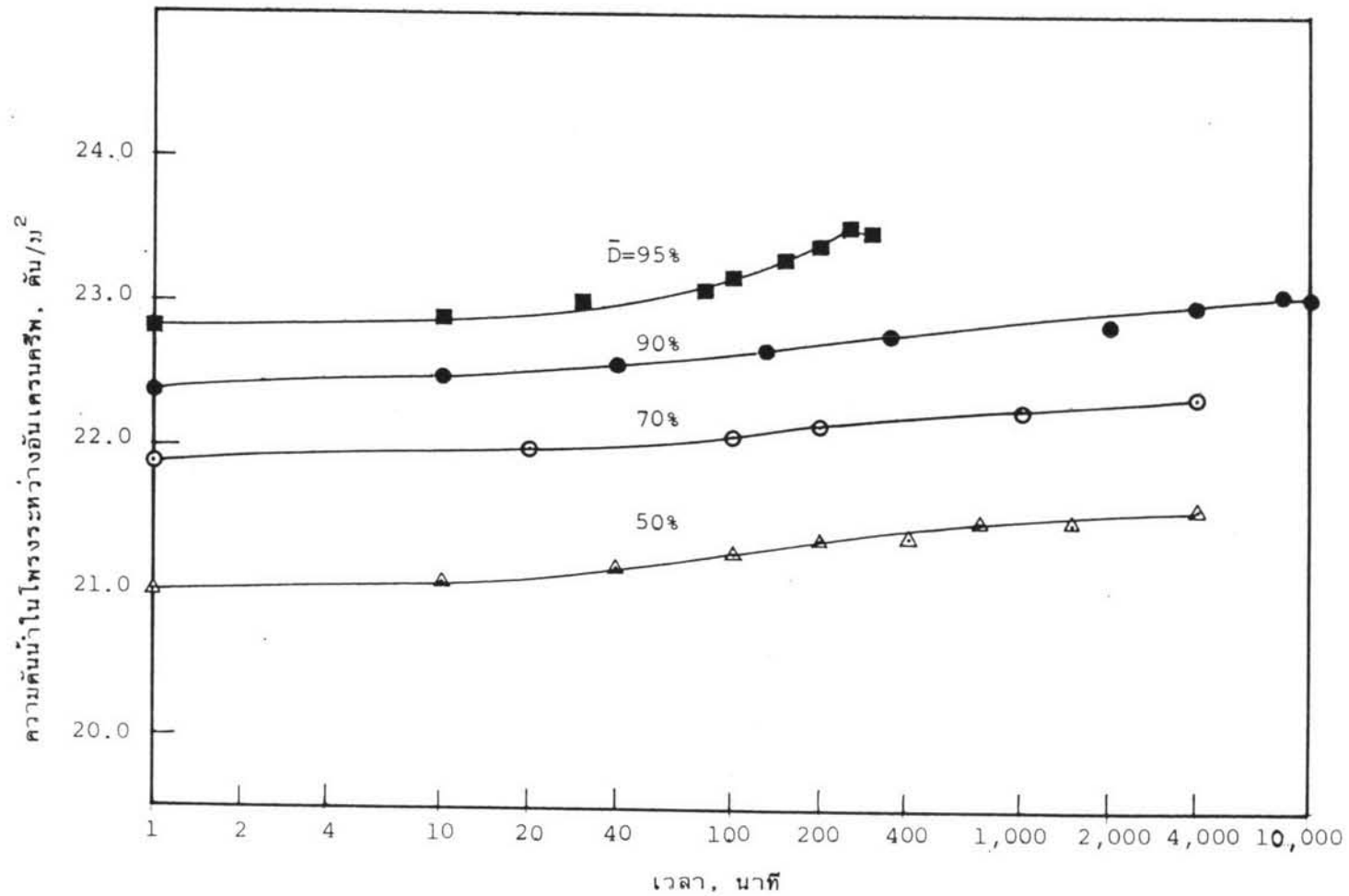
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับ Logarithm ของเวลาในระหว่างอันแทรกคริสท. เมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับ Logarithm ของเวลาในระหว่างอัน เคาบครีฟเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้ง ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในโพรงกับ Logarithm ของเวลาในระหว่างอินทรศรหเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในโพรงกับ Logarithm ของเวลาในระหว่างอันเดรนครีฟเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาของการทดลองอัน เตรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50%, 70%, 80%, 90% และ 95% ในรูปที่ 4.20 พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าน้อย ความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยด้วย ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90% และ 95 % ซึ่งดินเกิดการพิบัติโดยอัน เตรนครีฟสามารถแบ่งออกเป็นสามระยะด้วยกันคือ

- ระยะที่ 1 ดินจะเกิดการยุบตัวเริ่มแรกด้วยอัตราเร็ว เรียกระยะนี้ว่า "ระยะชั่วคราวครีฟ หรือ ระยะแรก" (Transient Creep or Primary)
- ระยะที่ 2 หลังจากระยะแรกดินจะมีอัตราการยุบตัวลดลง จนเกิดการยุบตัวด้วยอัตราเร็วเกือบคงที่เรียกระยะนี้ว่า "ระยะคงที่ครีฟ หรือ ระยะที่สอง" (Steady State Creep or Secondary)
- ระยะที่ 3 หลังจากดินเกิดการยุบตัวจนถึงความเครียดวิกฤติ (Critical Strain) ประมาณ 4% อัตราการยุบตัวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการยุบตัวด้วยอัตราเร่งจนเกิดการพิบัติโดยอัน เตรนครีฟในที่สุด เรียกระยะนี้ว่า "ระยะอัตราเร่งครีฟ หรือ ระยะที่สาม" (Accelerating Creep or Tertiary)

ส่วนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนต่ำกว่า 80% จะไม่เกิดระยะอัตราเร่งครีฟ หรือ ระยะที่สาม จึงไม่เกิดการพิบัติโดยอัน เตรนครีฟเมื่อทดสอบไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์

สำหรับการทดลองอัน เตรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวดิ่ง ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50%, 70%, 90% และ 95% ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาในรูปที่ 4.21 ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 95% ดินเกิดการยุบตัวเป็นสามระยะคือ ระยะชั่วคราวครีฟ ระยะคงที่ครีฟ และ ระยะอัตราเร่งครีฟยังผลให้เกิดการพิบัติโดยครีฟ ส่วนที่ระดับหน่วยแรงเฉือนต่ำกว่า 90% ไม่เกิดการยุบตัวในระยะอัตราเร่งครีฟ เมื่อทดสอบไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ค่าการยุบตัวของดินที่เกิดขึ้นระหว่างอัน เตรนครีฟเมื่อรับแรงในแนวดิ่ง จะมีค่าลดลงเมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการยุบตัวเมื่อดินรับแรงในแนวนอน ดังนั้น ค่าพิคคความปลอดภัยจึงมีผลต่อการยุบตัวของดินเนื่องจากอัน เตรนครีฟด้วย กล่าวคือ ถ้าใช้พิคคความปลอดภัยสูง (ระดับหน่วยแรงเฉือนต่ำ) ดินจะยุบตัวเนื่องจากอัน เตรนครีฟมีค่าน้อยลงด้วย หลังจากแทนค่าความสัมพันธ์ในสมการ (4.10) และสมการ (4.11) ของ SINGH และ MITCHELL (1968) แล้วพบว่า ผลของการคำนวณจากสมการนั้นสอดคล้องกับพฤติกรรมที่วัดได้จากการทดลอง

ส่วนผลการทดสอบสมการของ SEMPLE (1973) และสมการของ SINGH และ MITCHELL (1968) พบว่า สมการของ SEMPLE (1973) ให้ค่าใกล้เคียงผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.3.3

อนึ่งผลการทดลอง (ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ, \bar{D} และ t) ที่ได้นี้มีอาจจะนำมาใช้ในทางปฏิบัติ (Practical) ได้โดยง่ายเพราะระบบของหน่วยแรง (Stress System) ในปัญหาทั่ว ๆ ไปจะแตกต่างไปจากการทดสอบด้วยเครื่อง Triaxial ในห้องทดลองมาก แต่การที่ได้ค่าพารามิเตอร์ m มีค่าน้อยกว่า 1.0 นี้แสดงว่าดินเหนียวจากปทุมธานี จะมีปัญหาทางด้านอัน เทรนครีฟแน่นอนถ้าการออกแบบใช้ค่าพิกัดความปลอดภัยค่า ๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันน้ำในโพรงกับ Logarithm ของเวลา

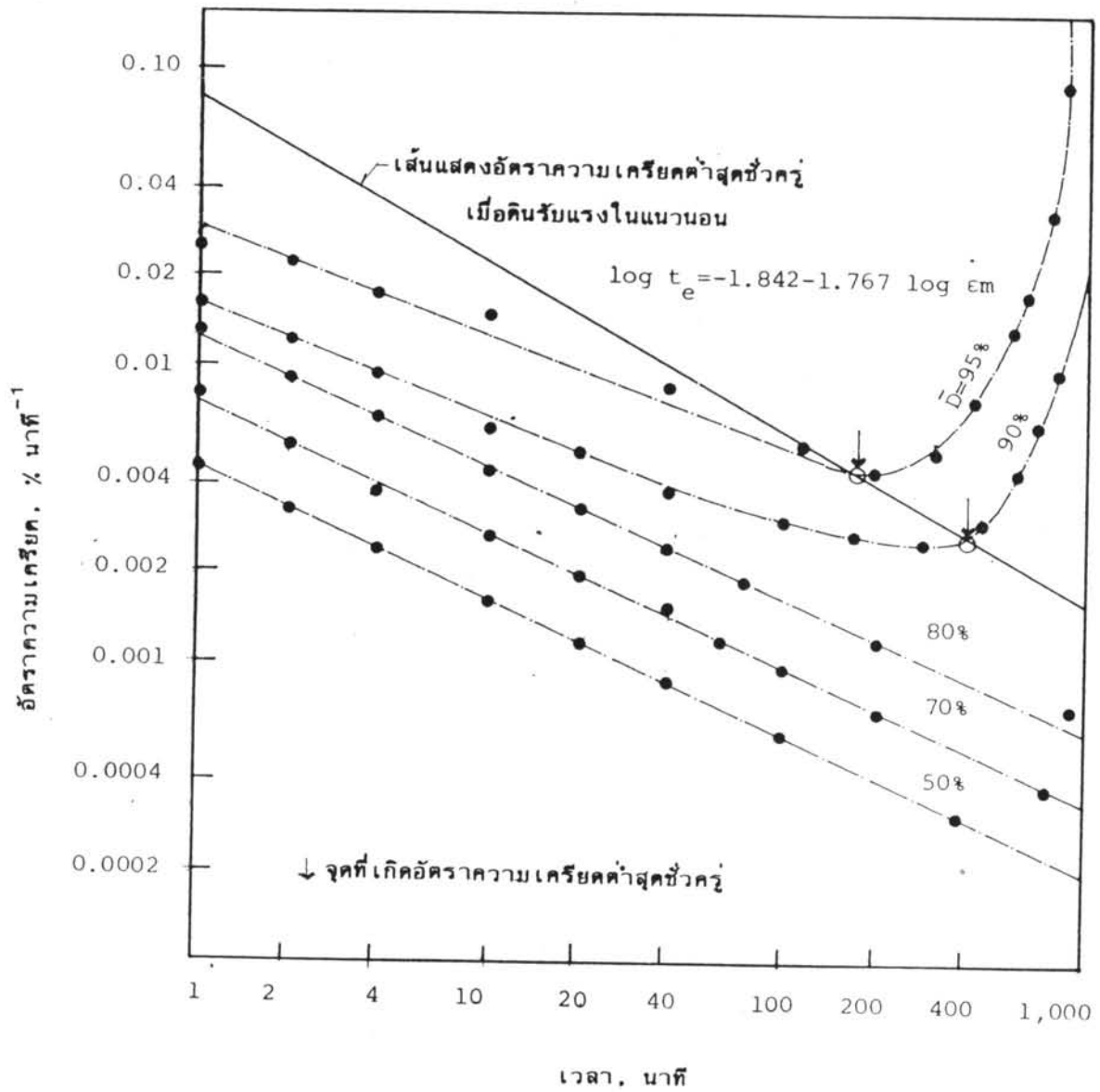
ความดันน้ำในโพรงระหว่างอัน เทรนครีฟทั้ง เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง ได้แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่า ความดันน้ำในโพรงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าระดับหน่วยแรงเฉือนสูงขึ้น

เมื่อดินทดลองเริ่มอัน เทรนครีฟความดันน้ำในโพรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการยุบตัวซึ่งเกิดมากขึ้นในช่วงต้น หลังจากนั้น 2-3 ชั่วโมง ความดันน้ำในโพรงและการยุบตัวจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลง

ในกรณีที่ดินทดลองหมวด H ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90%, 95% และดินหมวด V ที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 95% เกิดการพิบัติขึ้น ดินทดลองเกิดการยุบตัวมากขึ้นตลอดเวลา และความดันน้ำในโพรงก็เพิ่มมากขึ้นจนเกิดการพิบัติโดยอัน เทรนครีฟในที่สุด อนึ่ง สังเกตได้ว่า ความดันน้ำในโพรงหลังการพิบัติโดยอัน เทรนครีฟที่วัดได้จากการทดลองจะมีค่าลดลง เล็กน้อย

4.3.5 การคาดคะเนเวลาถึงพิบัติโดยอัน เทรนครีฟ

ได้ใช้วิธีของ FINN และ SHEAD (1973) หาสมการของเวลาที่ดินจะเกิดอัตราความเครียดค่าสุดชั่วครู่ซึ่งจะเกิดขึ้นก่อนดินจะพิบัติโดยอัน เทรนครีฟเล็กน้อย สมการที่ได้จะเป็นสมการของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่เกิดอัตราความเครียดค่าสุดชั่วครู่ ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Logarithm ของอัตราความเครียดกับ Logarithm ของเวลา



รูปที่ 4.26 เส้นแสดงอัตราความเครียดค่าสุดท้าย ตามวิธีของ FINN และ SHEAD (1973) เมื่อคืนรับแรงในแนวนอน

จากการทดลองอันเดรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวนอน จะได้เส้นแสดงอัตราความเครียดค่าสุดท้ายเมื่อดินรับแรงในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นเส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่เกิดอัตราความเครียดค่าสุดท้าย เมื่อดินรับแรงที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90% และ 95% ได้สมการความสัมพันธ์

$$\text{Log } t_e = -1.842 - 1.767 \text{ Log } \dot{\epsilon}_m \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

เมื่อ t_e คือเวลาที่เกิดอัตราความเครียดค่าสุดท้าย, นาที

$\dot{\epsilon}_m$ คืออัตราความเครียดค่าสุดท้าย, % ต่อนาที

ส่วนการทดลองอันเดรนครีฟเมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง ไม่สามารถหาเส้นแสดงอัตราความเครียดค่าสุดท้ายเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งได้เพราะเกิดอัตราความเครียดค่าสุดท้ายสูงขึ้นเพียงจุดเดียวเมื่อดินรับแรงที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 95%

จากการเปรียบเทียบเวลาถึงพิกัดโดยอันเดรนครีฟที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คาดคะเนโดยใช้สมการของ SINGH และ MITCHELL (1969) (สมการ 2.5) พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้เวลาถึงพิกัดโดยอันเดรนครีฟจากการทดลองยังอยู่ในช่วงของสมการที่ SAITO และ UEZAWA (1961) (สมการ 2.4) ได้ทำการทดลองไว้ด้วย

4.4 การทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial (Triaxial Consolidation Test)

การทดลองชนิดนี้เป็นการทดลองต่อจากการทดลองอันเดรนครีฟ เมื่อพฤติกรรมอันเดรนครีฟสิ้นสุดลง โดยเปิดประตูระบายนํ้าให้นํ้าสามารถไหลออกจากตัวอย่างได้ด้วยขบวนการอัดตัวคายนํ้า (Consolidation Process) เพื่อหาคุณสมบัติทางด้านอัสติคซิติ์เมื่อดินรับแรงที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ ทั้งในลักษณะแนวนอนและในแนวตั้ง ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ของดินเพื่อใช้เป็นแนวทางในการคาดคะเนการยุบตัวของดินในลักษณะสามมิติซึ่งจะแบ่งกล่าวถึงหัวข้อต่อไปนี้เป็น

ค่าพารามิเตอร์สำหรับคาดคะเนการยุบตัวทั้งหมดของดินในสภาพสามมิติ ซึ่งประกอบด้วย การยุบตัวแบบอันเดรนครีฟ การยุบตัวแบบอันเดรนครีฟและการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายนํ้า

ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้คาดคะเนการยุบตัว เนื่องจากขบวนการอัดตัวคายนํ้าในสภาพสามมิติอย่างเดี่ยว (นั่นคือ เริ่มวัดหลังจากการทดสอบอันแทรกเรศได้สิ้นสุดลง)

4.4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้คาดคะเนการยุบตัวทั้งหมดของดินในสภาพสามมิติ

TERZAGHI (1925) ได้กล่าวถึงพฤติกรรมการยุบตัวของดินที่อัดตัวคายนํ้าในลักษณะมิติเดี่ยวเมื่อดินรับแรงกระทำจากภายนอกกว่า เมื่อสมมติให้เม็ดดิน (Soil Particle) และนํ้าในดินไม่สามารถถูกอัดตัวได้ (Incompressible) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในปริมาตรของดินจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนํ้าระบายออกจากดินเท่านั้น เมื่อเป็นเช่นนี้สำหรับดินที่มีค่าความซึมได้ต่ำ (Low Permeability) ความดันนํ้าในโพรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากดินรับแรงกระทำจะพยายามกระจาย (Dissipate) ออกเพื่อปรับความดันนํ้าให้เข้าสู่สภาพสมดุล การกระจายของความดันนํ้าในโพรงที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure) นี้จะทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลในดินมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาตรของดินลดลง ซึ่งพฤติกรรมจะเกิดขึ้นจนกว่าความดันนํ้าในโพรงกลับเข้าสู่สภาพสมดุล (Excess Pore Pressure มีค่าเป็นศูนย์) เรียกพฤติกรรมนี้ว่า ขบวนการอัดตัวคายนํ้า (Consolidation) ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการทรุดตัวในระยะยาว (Long Term Settlement)

อย่างไรก็ตามทฤษฎีมิติเดี่ยวของ TERZAGHI ดินไม่สามารถมีการยุบตัวแบบอันแทรกเรศได้ดังเหตุผลที่กล่าวข้างต้นว่าจะไม่มีการยุบตัวของดินอัดตัวคายนํ้าในระบบมิติเดี่ยว ถ้าไม่มีนํ้าระบายออกจากเม็ดดิน นอกจากนี้การยุบตัวที่ได้จากการคาดคะเนแบบมิติเดี่ยวจะผิดจากความเป็นจริงไปบ้างเมื่อลักษณะการยุบตัวที่เกิดขึ้นจริง ๆ ตามธรรมชาติเป็นลักษณะสามมิติ DAVIS และ POULOS (1963) จึงได้แนะนำวิธีการคาดคะเนการยุบตัวของดินโดยใช้ทฤษฎีสมการเส้นตรงอีลาสติก (Linear Elastic Theory) ในสภาพสามมิติ โดยใช้พารามิเตอร์ของดินคือ ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนปริมาตรของ (ν) ทำให้สามารถคาดคะเนได้ทั้งการยุบตัวแบบอันแทรกเรศ (คือการยุบตัวที่เกิดขึ้นหลังดินรับแรงใหม่ ๆ เมื่อนํ้ายังไม่ได้ออกจากดิน) และการยุบตัวทั้งหมดของดินซึ่งได้รวมถึงการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายนํ้าด้วย

การยุบตัวทั้งหมดของดินเป็นการทรุดตัวตั้งแต่ดินเริ่มรับแรงกระทำจนกระทั่งดินเกิดการอัดตัวคายนํ้าสมบูรณ์ซึ่งจะสามารถคาดคะเนได้โดยใช้สมการของ DAVIS และ POULOS (1963) คือ

$$S_{TF} = \Sigma \frac{1}{E} \left| \Delta \bar{\sigma}_z - \bar{v} (\Delta \bar{\sigma}_x + \Delta \bar{\sigma}_y) \right| \delta h \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

เมื่อ S_{TF} คือการยุบตัวทั้งหมดของดิน

\bar{E}, \bar{v} คือค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของในสภาพระบายน้ำ
ที่สอดคล้องกับสภาพของดินที่จะพิจารณาการยุบตัว

$\Delta \bar{\sigma}_x, \Delta \bar{\sigma}_y, \Delta \bar{\sigma}_z$ เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในดินตามแนวแกน
 x, y และ z จากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเดิมก่อนที่ดินจะถูกแรงกระทำ

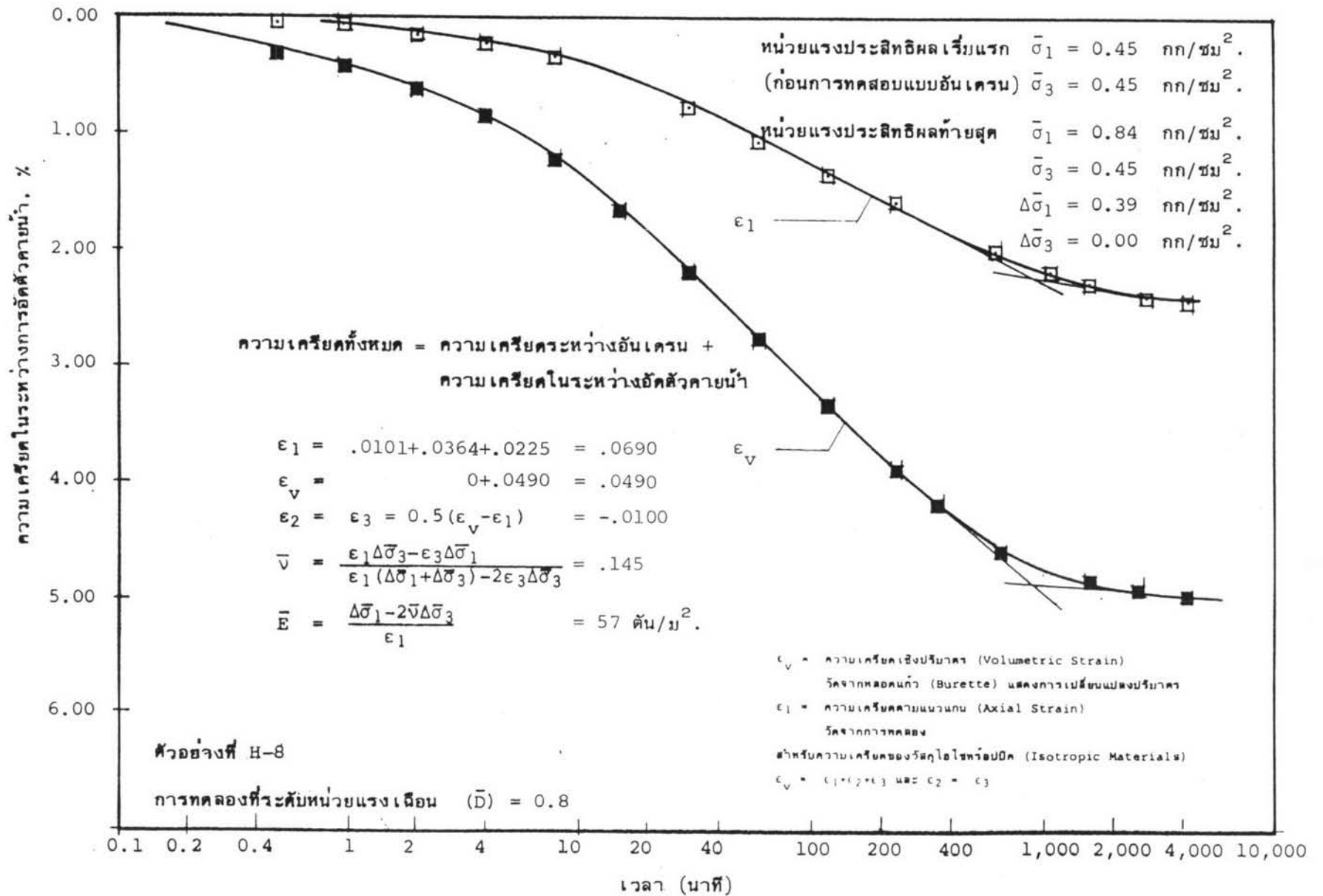
δh คือความหนาของดินส่วนที่จะพิจารณาการยุบตัว

การวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ของดินที่สำคัญเพื่อใช้ในการคาดคะเน
การยุบตัวทั้งหมดคือค่า \bar{E} และ \bar{v} ซึ่งได้รวมผลของการยุบตัวเนื่องจากอันตรรกครีฟด้วย โดย
ทำการทดลองการอัดตัวคายน้ำในเครื่อง Triaxial ต่อจากการทดลองที่ทำให้ดินเกิดการยุบ
ตัวแบบอันตรรกและอันตรรกครีฟ เมื่อดินถูกแรงกระทำที่ระดับหน่วยแรงเฉือนค่าต่าง ๆ ทั้ง
ในลักษณะแนวนอนและในแนวตั้ง ผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 4.27-4.33 พบว่า

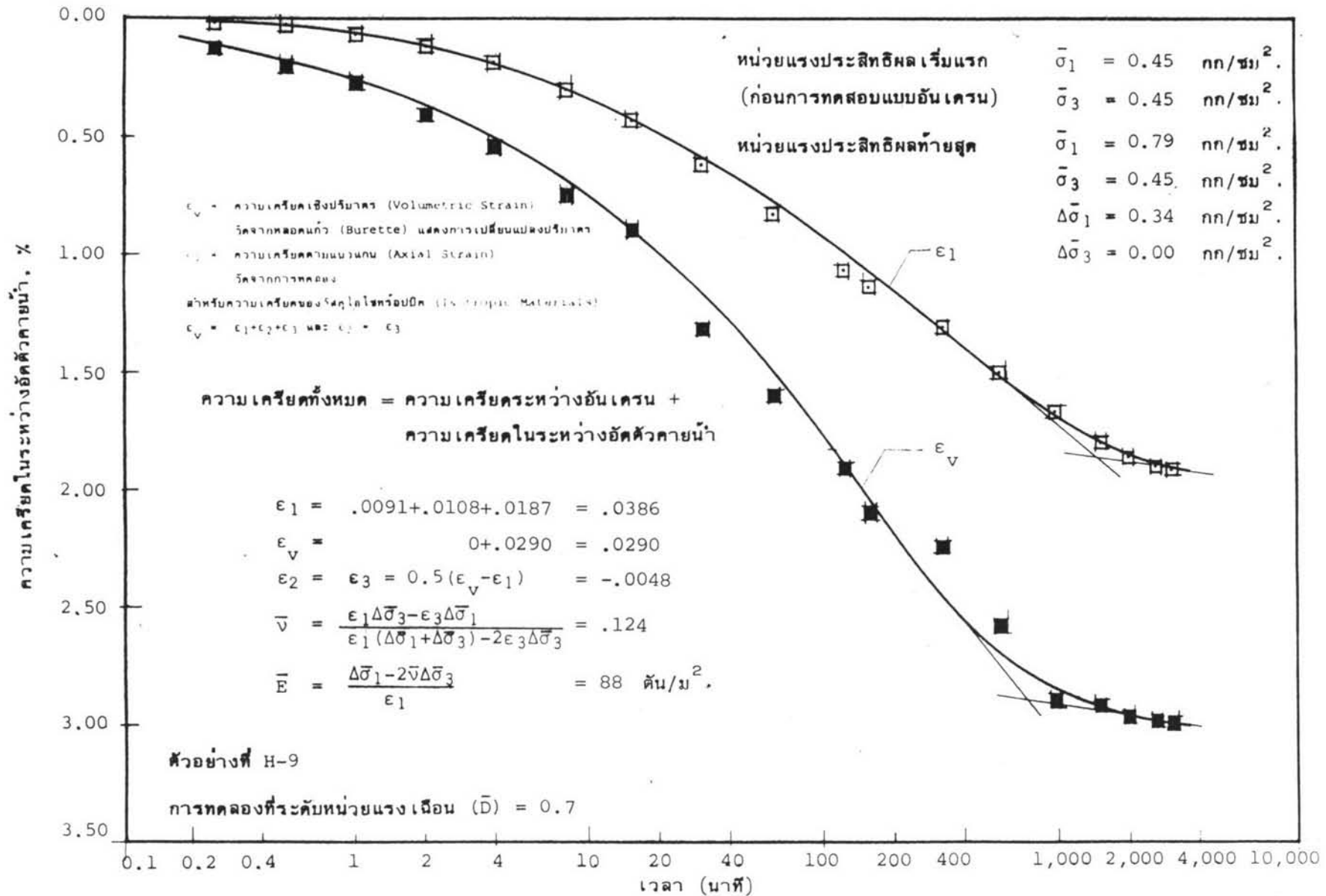
1. ค่า \bar{E} และ \bar{v} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับทิศทางของแรงที่มากกระทำ
2. \bar{E} จะมีค่าลดลงเมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น ส่วน \bar{v} จะไม่มี
การเปลี่ยนแปลงมากนัก

ดินทดลองปฐมฐานมีค่า \bar{E} และ \bar{v} ในแนวนอนต่ำกว่าในแนวตั้ง จึงทำให้
การเคลื่อนตัวทั้งหมดของดินที่เกิดขึ้น เมื่อดินรับแรงในแนวนอนมีค่าสูงกว่า เมื่อดินรับแรงในแนวตั้ง
ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนเดียวกัน นอกจากนี้ถ้าใช้ค่าที่กักความปลดกภัยสูง (ระดับหน่วยแรงเฉือน
ค่า) การยุบตัวทั้งหมดของดินจะเกิดขึ้นน้อยลงด้วย

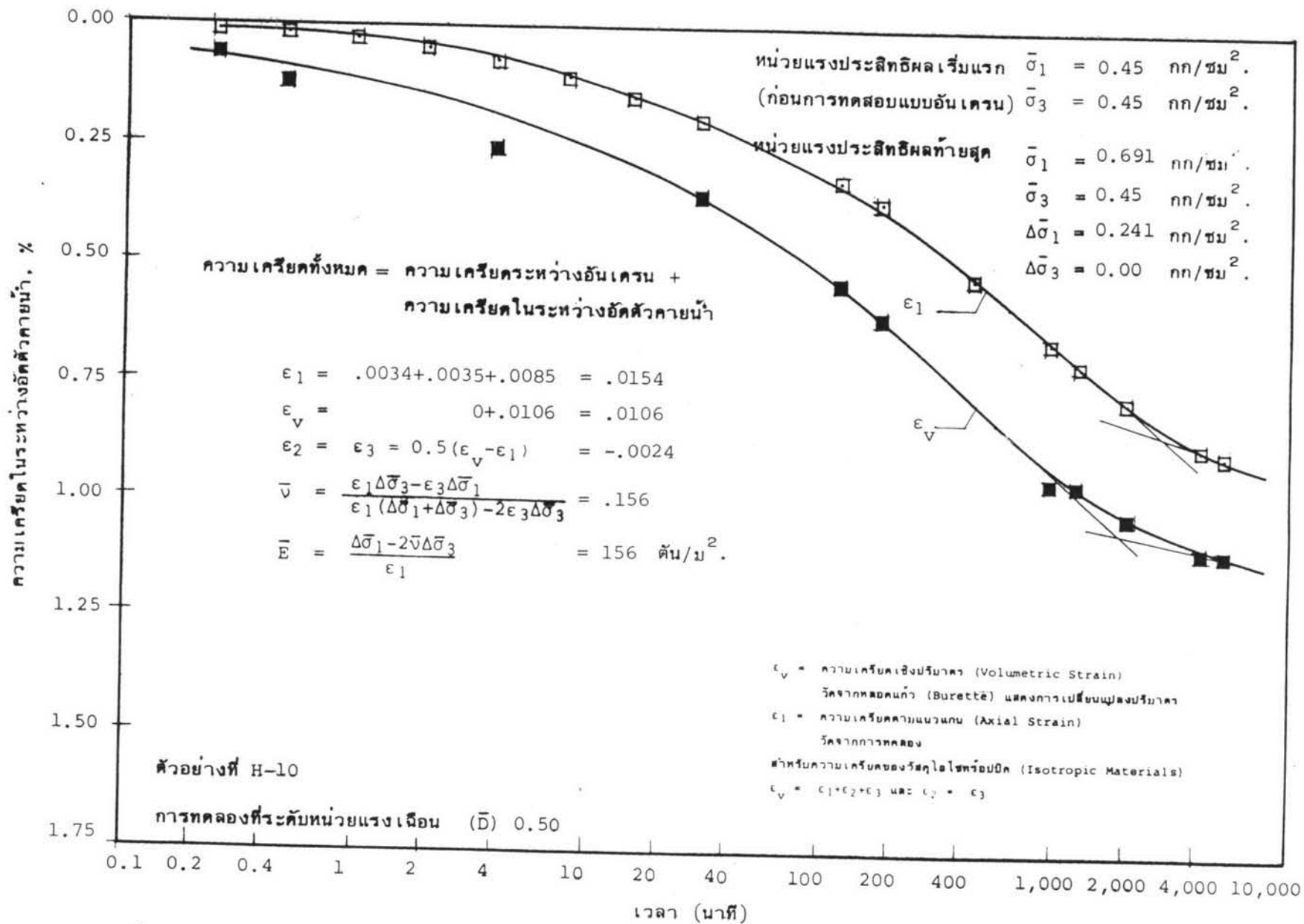
ในการคำนวณความเครียดแสดงในรูป 4.27 ถึง 4.32 ค่าความสูงที่ใช้ใน
การหาความเครียดคือ ค่าความสูงของตัวอย่างคอนแรกก่อนการทดสอบครีฟ ค่าความเครียดที่
ใช้ในการคำนวณค่า \bar{E} และ \bar{v} จะประกอบด้วย ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่แบบ
อันตรรก ความเครียดที่เกิดในระหว่างการทดสอบอันตรรกครีฟและความเครียดที่เกิดจากการ
อัดตัวคายน้ำของดิน



รูปที่ 4.27 ผลการทดลอง อัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80 %

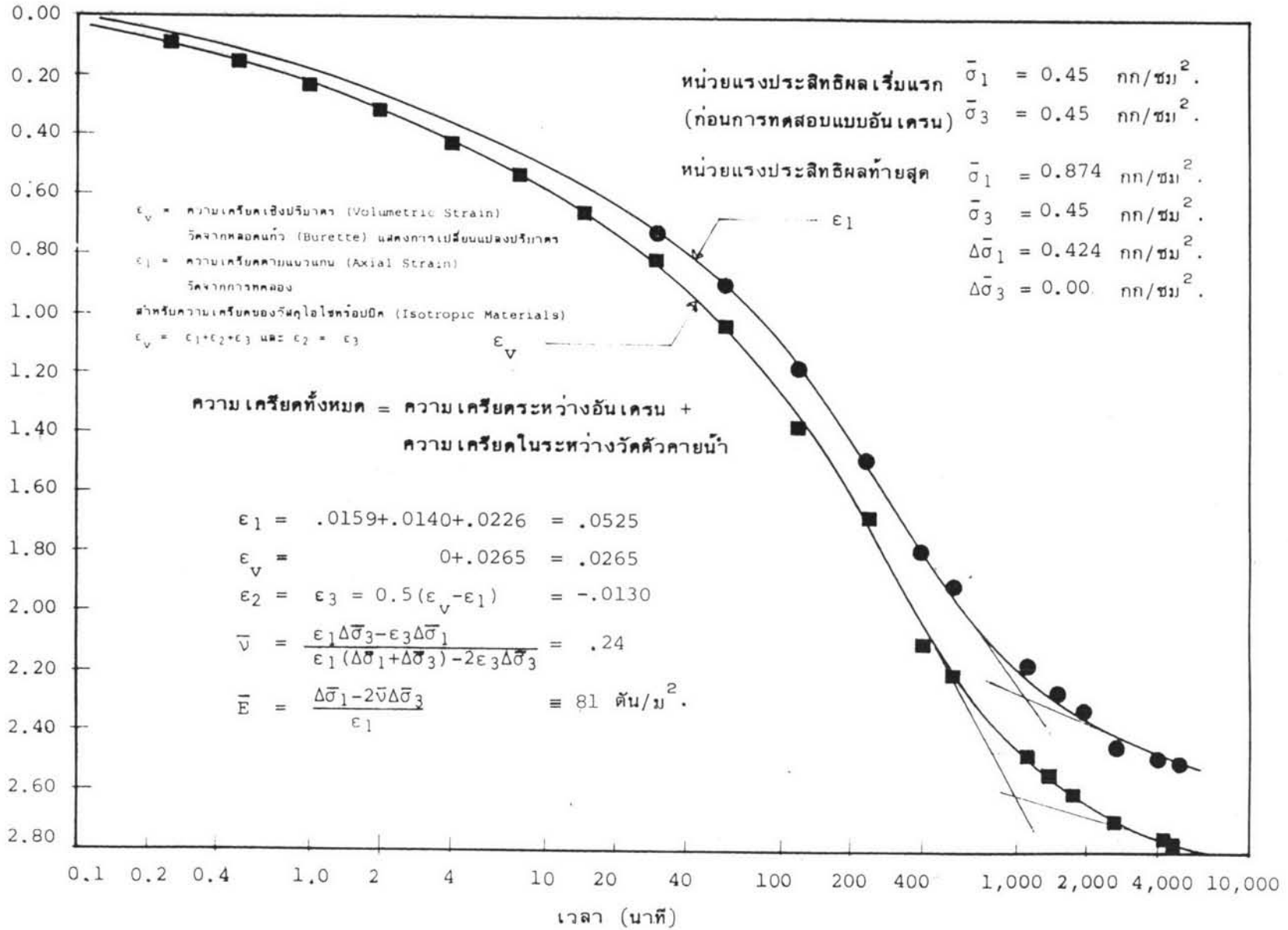


รูปที่ 4.28 ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 %

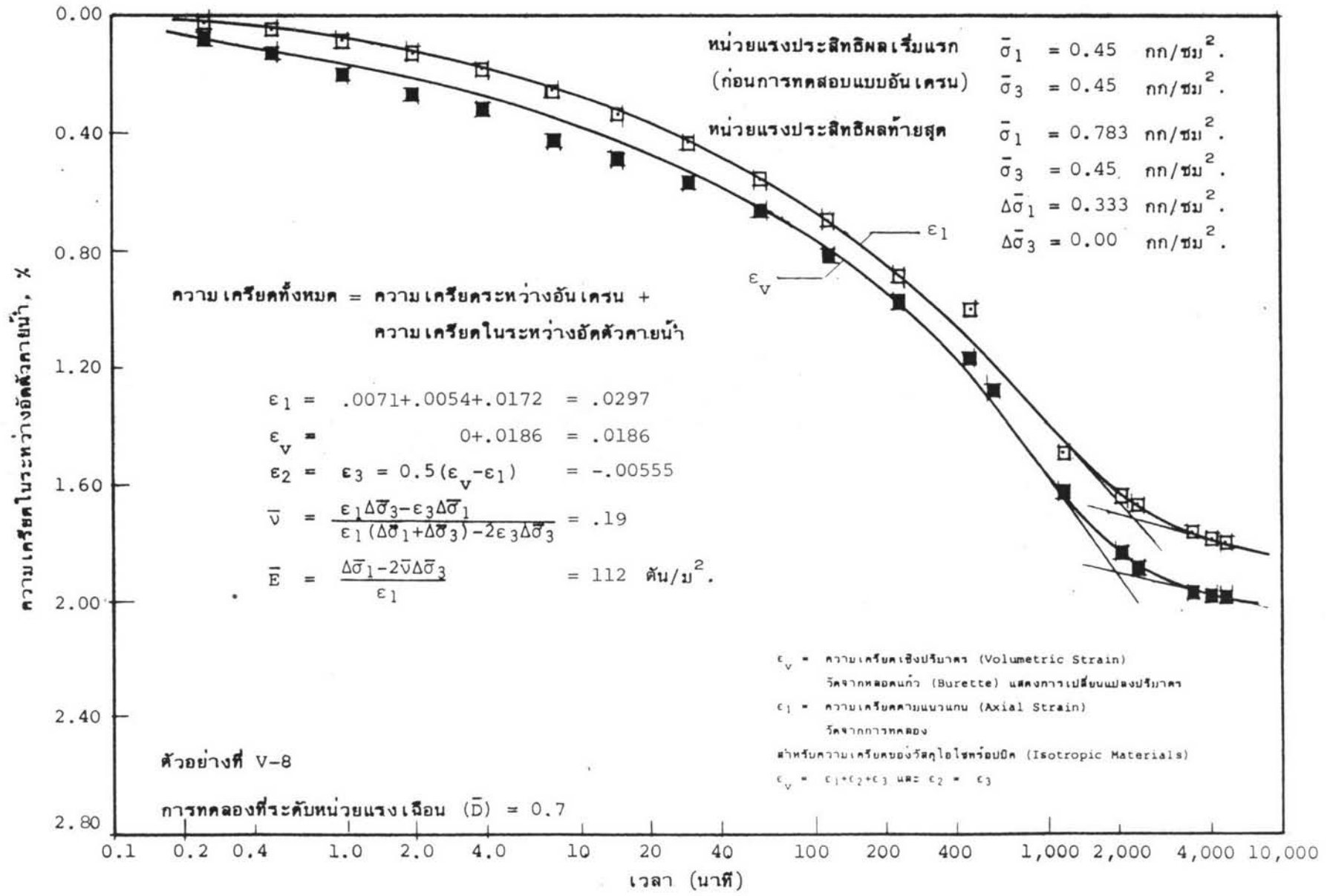


รูปที่ 4.29 ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่อง Triaxial เมื่อคืนรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 %

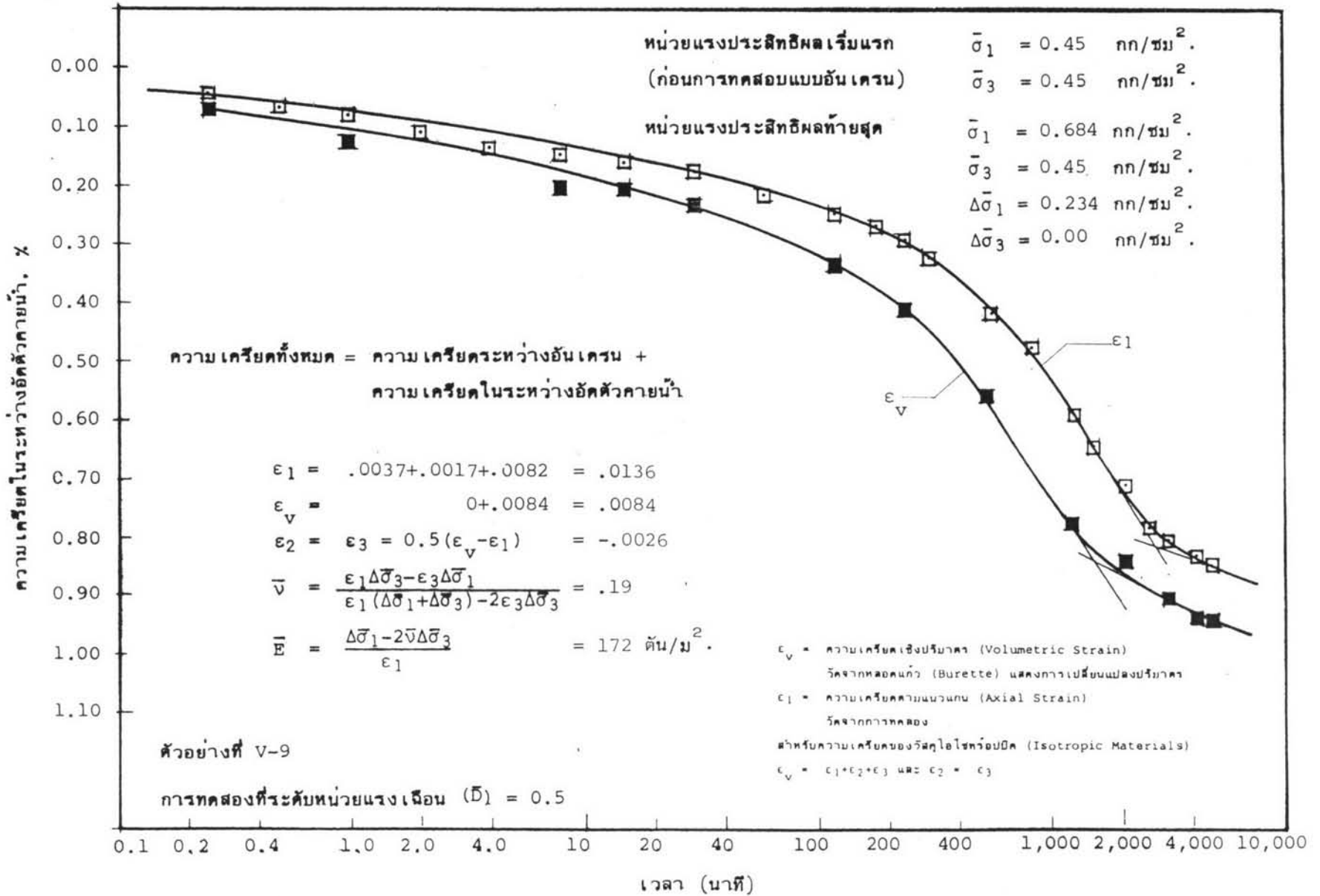
ความเครียดในระหว่างอัดตัวคายนํ้า, %



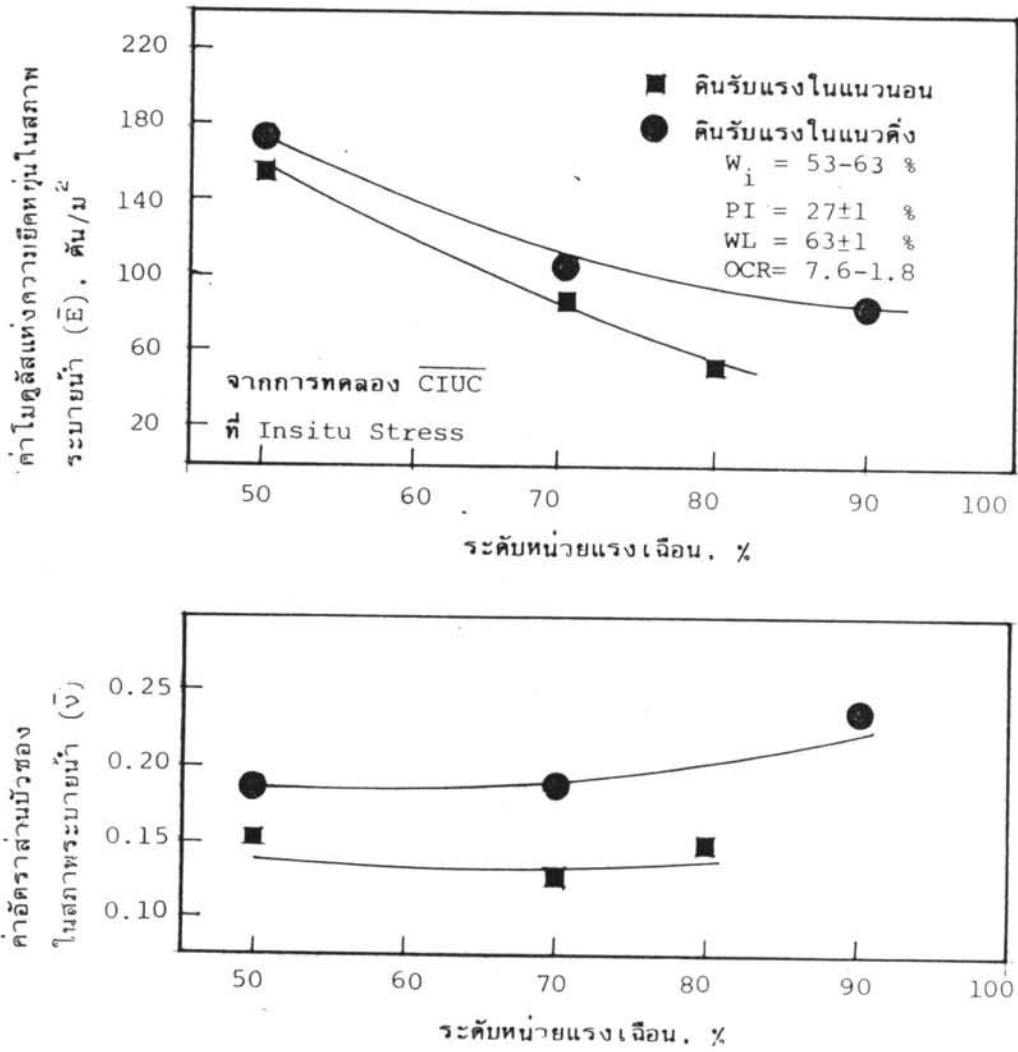
รูปที่ 4.30 ผลการทดลองอัดตัวคายนํ้าในเครื่องTriaxialเมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90 %



รูปที่ 4.31 ผลการทดลองอัตรากายน้ำในเครื่อง Triaxial เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 %



รูปที่ 4.32 ผลการทดลองอัดตัวคายน้ำในเครื่อง Triaxial เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 %



รูปที่ 4.33 ผลของค่าระดับหน่วยแรงเฉือนต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ
คาดคะเนการยุบตัวทั้งหมดของดินโดยทฤษฎีอีลาสติก เมื่อดิน
รับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง

เมื่อเปรียบเทียบค่า \bar{E} กับค่า E_u (รูป 4.33 กับ 4.7) พบว่า

$$\bar{E} \approx E_u/c$$

ค่า c อยู่ระหว่าง 3 กับ 4 ที่ระดับหน่วยแรงเฉือนเท่ากับ 50% ค่า c จะมากขึ้นเมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนสูงขึ้น ค่า c อาจมีค่าเท่ากับ 6 เมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนเท่ากับ 80%

4.4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้คาดคะเนการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำในสภาพสามมิติเพียงอย่างเดียว

ในหัวข้อ 4.4.1 ได้พิจารณาค่า \bar{E} และ \bar{v} เนื่องจากการยุบตัวทั้งหมดของดิน ซึ่งการยุบตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยการยุบตัว 2 ลักษณะคือ

ลักษณะที่ 1 เป็นการยุบตัวแบบอันเดรอน ซึ่งรวมถึงการยุบตัวเนื่องจากอันเดรอนครีพด้วย

ลักษณะที่ 2 เป็นการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ

ดังนั้น สมการการยุบตัวทั้งหมดของดินคือ

$$S_{TF} = S_u + S_{CF} \dots\dots\dots (4.14)$$

เมื่อ S_{TF} คือการยุบตัวทั้งหมดของดิน (Total Final Compression)

S_u คือการยุบตัวแบบอันเดรอนของดิน (ลักษณะที่ 1)

S_{CF} คือการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ (ลักษณะที่ 2)

ลักษณะที่ 1 การคาดคะเนการยุบตัวแบบอันเดรอนซึ่งยังมีได้รวมถึงการยุบตัวแบบอันเดรอนครีพ สามารถคาดคะเนได้โดยใช้สมการของ DAVIS และ POULOS (1963) คือ

$$S'_u = \Sigma \frac{1}{E_u} |\Delta\sigma_z - v_u (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)| \delta h \dots\dots\dots (4.15)$$

เมื่อ	S'_u	คือการยุบตัวแบบอัน เทรนซึ่งยังมีได้รวมถึงการยุบตัวเนื่องจากอัน เทรนครีฟ
	E_u	คือค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ
	v_u	คือค่าอัตราส่วนปริมาตรของในสภาพไม่ระบายน้ำ สำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ v_u ตามทฤษฎีมีค่า 0.5
	$\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\sigma_z$	เป็นค่าการ เปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงตามแนวแกน x, y และ z
	δh	คือความหนาของดินส่วนที่จะพิจารณาการยุบตัว

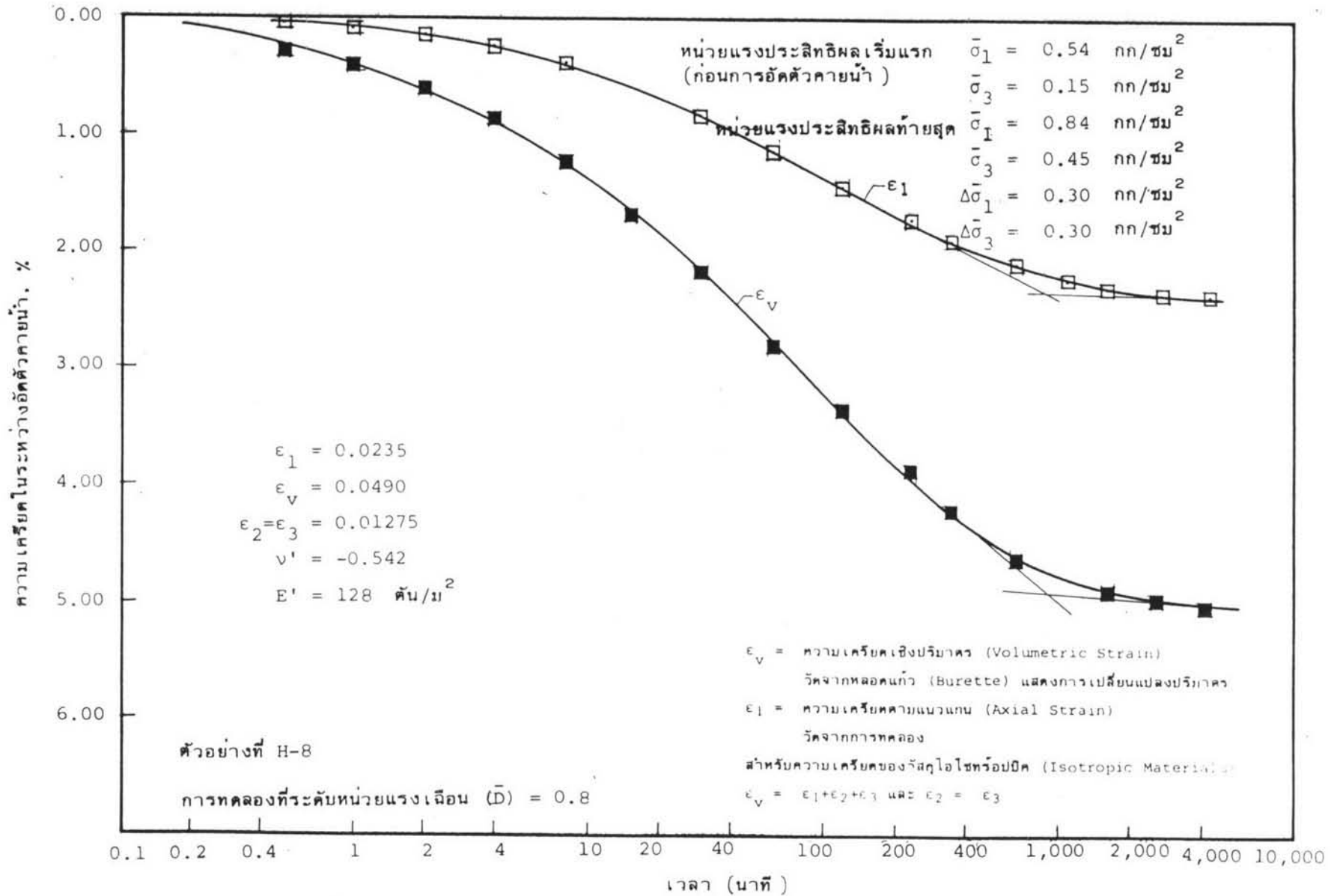
สำหรับการคาดคะเนความเครียดเนื่องจากอัน เทรนครีฟซึ่งขึ้นกับเวลาดัง
ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.3.3 โดยใช้พารามิเตอร์ $m, \bar{\alpha}, A$ หรือ $\bar{\alpha}, \beta, B$ ซึ่งยังไม่แน่ใจว่า
จะใช้กับสภาพในสนามใดถูกต้องขนาดไหน

ลักษณะที่ 2 การคาดคะเนการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ สามารถคาด
คะเนได้โดยใช้สมการ

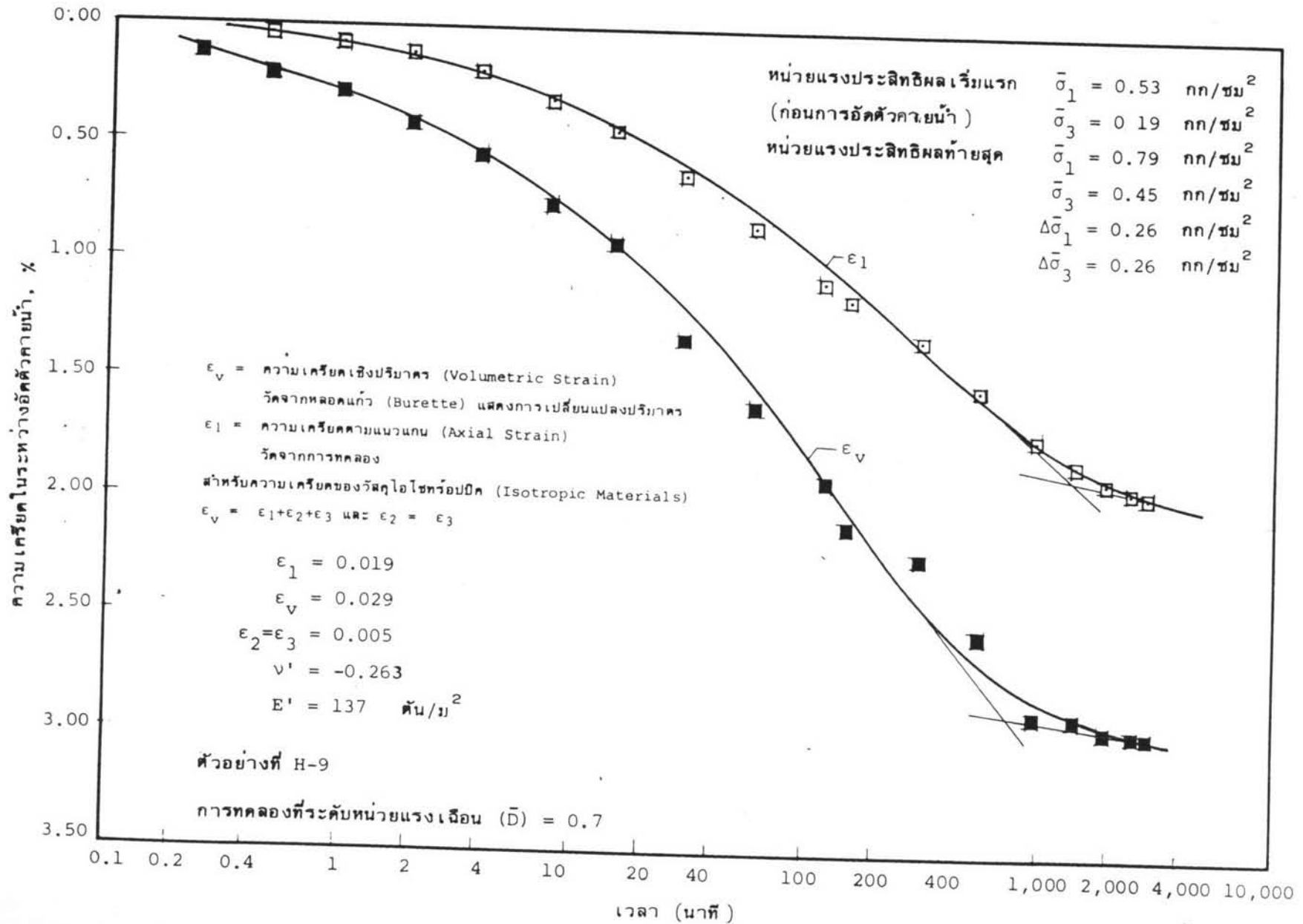
$$S_{CF} = \Sigma \frac{1}{E'} |\Delta\bar{\sigma}_z - v' (\Delta\bar{\sigma}_x + \Delta\bar{\sigma}_y)| \delta h \dots\dots\dots (4.16)$$

เมื่อ	S_{CF}	คือการยุบตัว เนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ
	E', v'	คือค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปริมาตรของในสภาพระบายน้ำ ที่สอดคล้องกับสภาพของดินที่จะพิจารณาการยุบตัว
	$\Delta\bar{\sigma}_x, \Delta\bar{\sigma}_y, \Delta\bar{\sigma}_z$	เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในดินตามแนวแกน x, y และ z จากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเดิมก่อนที่น้ำระบายออก จาก เม็ดดิน
	δh	คือความหนาของดินส่วนที่จะพิจารณาการยุบตัว

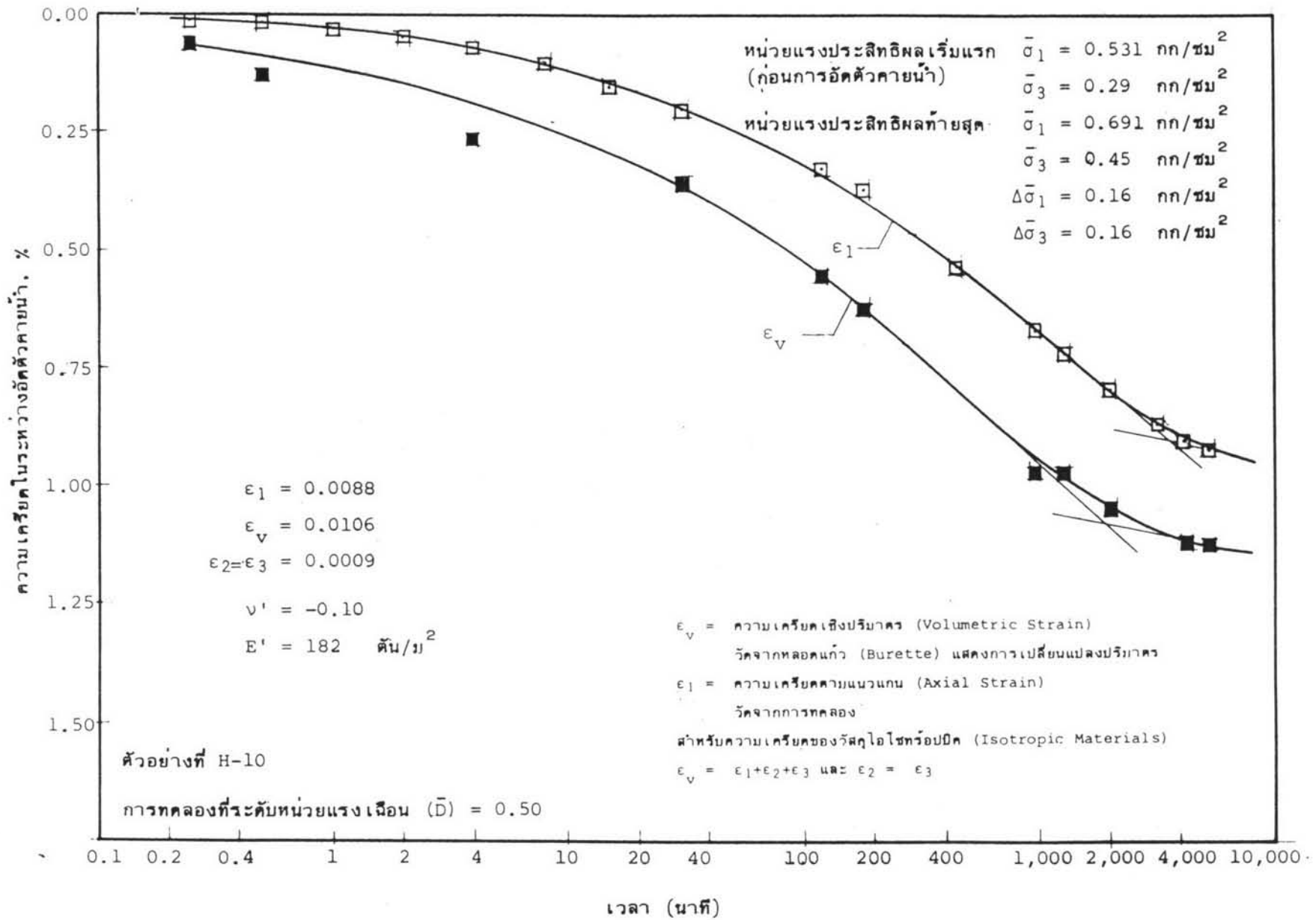
ค่า E' และ v' ซึ่งใช้ในการคาดคะเนการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัด
ตัวคายน้ำในสภาพสามมิตินี้ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ จากผลของการทดลองได้แสดงในรูปที่
4.34-4.40 ได้ผลการทดลองดังนี้



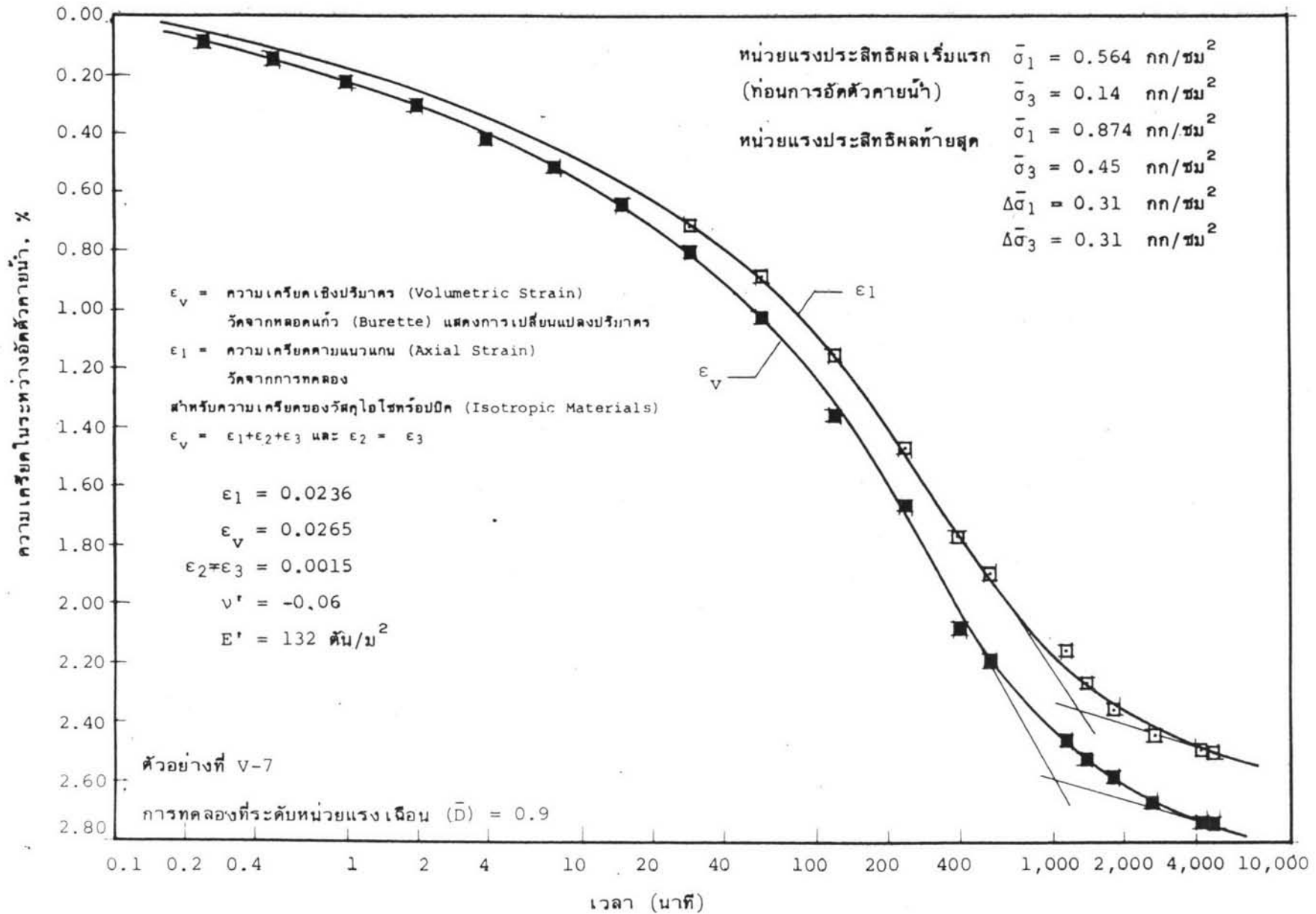
รูปที่ 4-34 แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 80 %



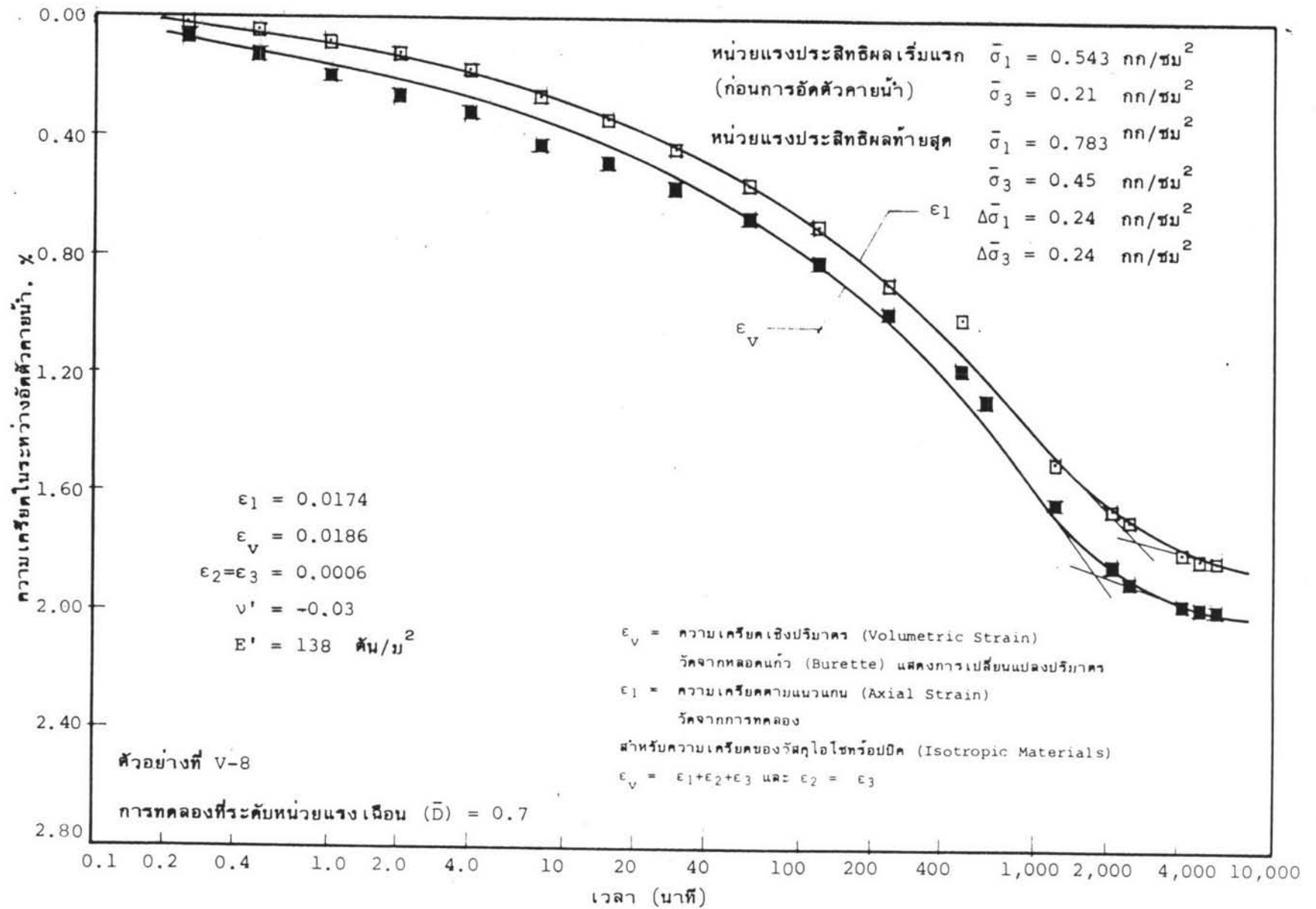
รูปที่ 4.35 แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้าเมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 %



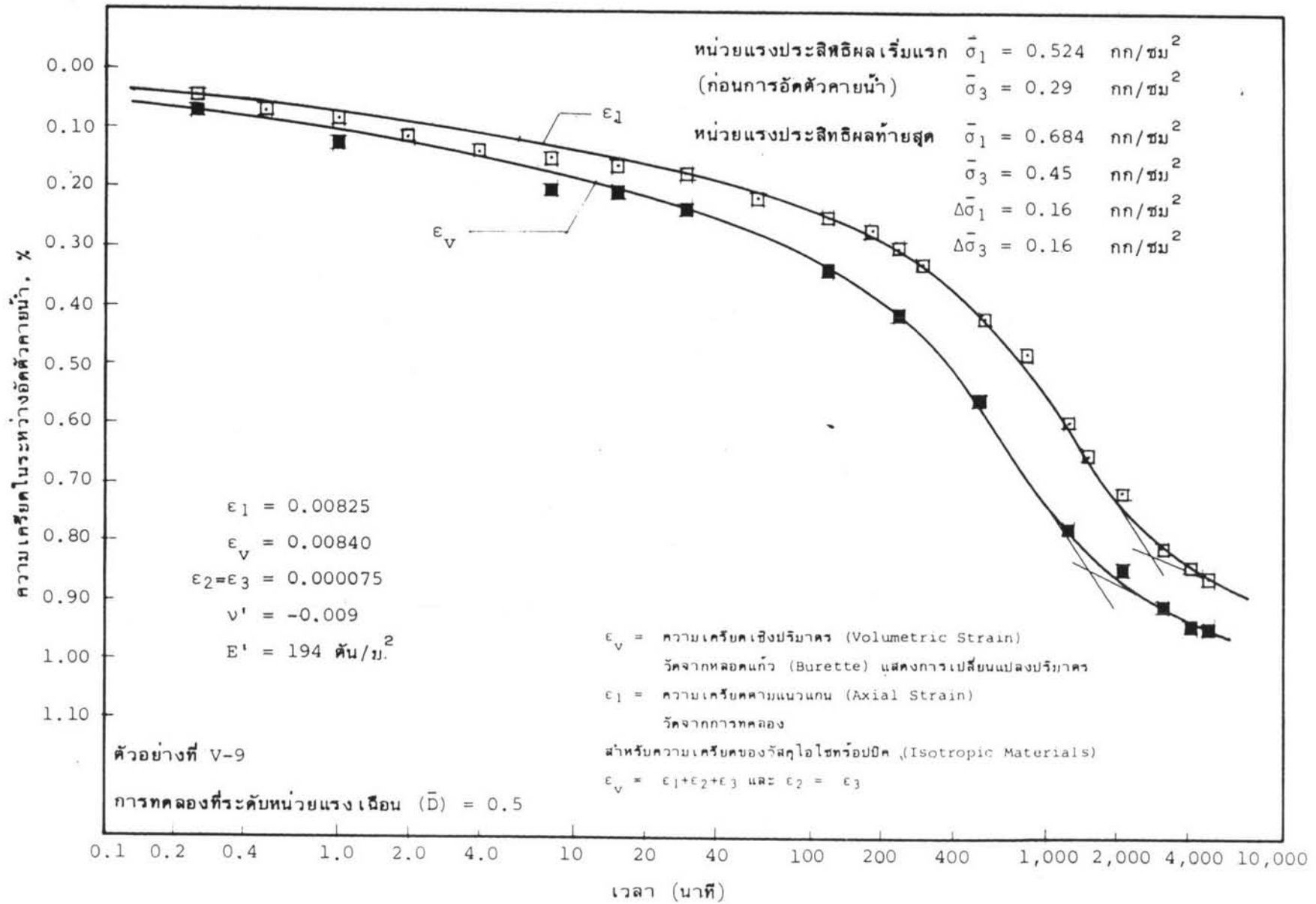
รูปที่ 4.36 แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบสนการอัดตัวคายน้ำ เมื่อดินรับแรงในแนวนอนที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 %



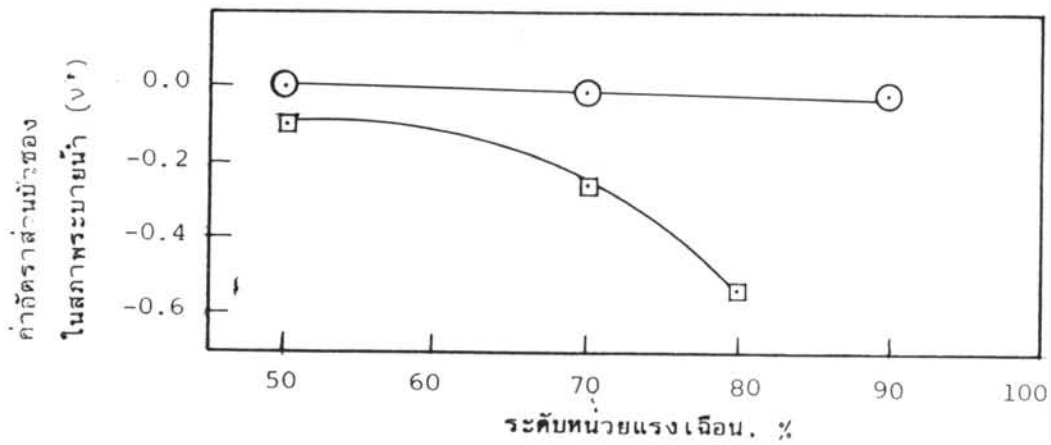
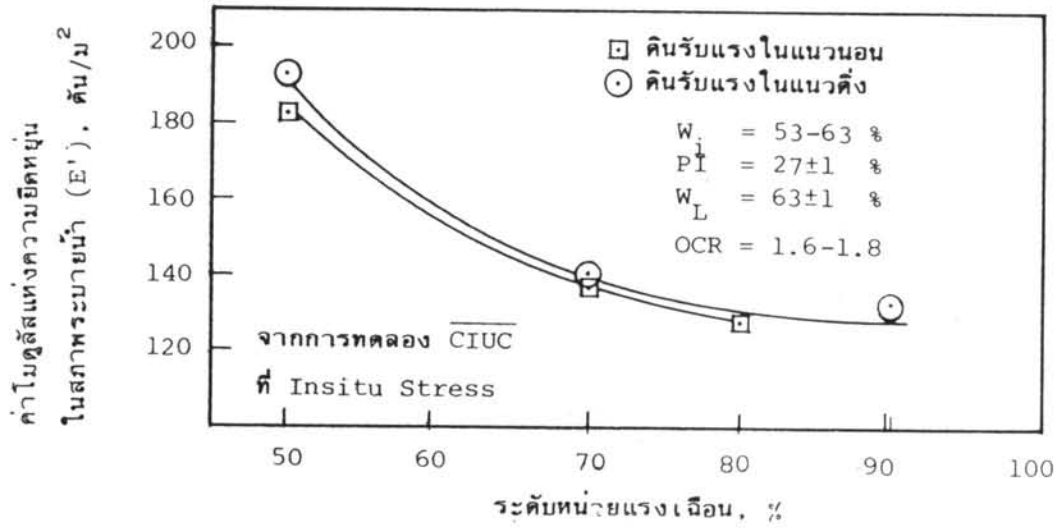
รูปที่ 4.37 แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 90 %



รูปที่ 4.38 แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำเมื่อดินรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 70 %



รูปที่ 4.39 แสดงการยุบตัวของดินในระหว่างขบวนการอัดตัวคายนํ้า เมื่อดินรับแรงในแนวตั้งที่ระดับหน่วยแรงเฉือน 50 %



รูปที่ 4.40 ผลของค่าระดับหน่วยแรงเฉือนต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ
คาดคะเนการยุบตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำในสภาพ
สามมิติโดยทฤษฎีอัสลาคิก เมื่อดินรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง

1. ค่า ν' เมื่อคืนรับแรงในแนวตั้งมีค่าสูงกว่าเมื่อคืนรับแรงในแนวนอน
2. E' และ ν' จะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระดับหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น
3. ค่า E' จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อคืนรับแรงในแนวนอนและในแนวตั้ง

การที่ E' และ ν' มีค่าแตกต่างกันสำหรับคืนรับแรงในแนวนอนและคืนรับแรงในแนวตั้ง เนื่องจากคืนมิใช่วัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเป็นแบบสมการเส้นตรงไอโซทรอปิก (Linear Elastic Isotropic Materials) ความสมมาตรทางทฤษฎี โดยเฉพาะเมื่อ ν' มีค่าติดลบ

การคำนวณค่า E' และ ν' คำนวณโดยใช้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดตัวคายน้ำเท่านั้น และความสูงของตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณหาความเครียดก็คือความสูงของตัวอย่างหลังการทดสอบอันเดรนครีฟแล้ว