บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้

ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินเหนียวอ่อน บริเวณถนนบางนา-ตราด กม.ที่ 29+800 ซึ่งได้ทำการทดสอบทั้งสิ้น 5 การทดสอบ โดยทุกการทดสอบจะทำการอัดตัวอย่างดินด้วยหน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติเป็นลำดับแรก โดยเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำก็จะทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินที่สภาพหน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ (In-situ coefficient of permeability, k_0) จากนั้นในแต่ละการทดสอบก็จะทำการอัดตัวอย่างโดยการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งและแนวราบด้วยสัดส่วนของ $\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$ ที่แตกต่างกันในแต่ละการทดสอบ โดยเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลขึ้นจากหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติอีกทั้งสิ้น 4 ระดับ โดยเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำในแต่ละระดับของหน่วยแรงประสิทธิผลที่กำหนด ก็จะทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินที่แต่ละระดับ (k_1, k_2, k_3และ k_4) ซึ่งทุกการทดสอบจะทำการวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Vertical displacement) และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume change) ตลอดการทดสอบ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ค่าความเครียดเฉือน (Shear strain) และค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับทุกระดับของการทดสอบ และเนื่องจากถึงแม้ว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบจะมาจากบริเวณและความลึกเดียวกัน (7.50-8.50 ม.) แต่สัดส่วนของสารประกอบต่าง ๆ ในแต่ละตัวอย่างดินอาจแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ซึ่งค่อนข้างจะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของตัวอย่างดินที่มีค่าต่ำพอสมควร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้อง Normalized ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ที่ระดับต่าง ๆ (k_1, k_2, k_3และ k_4) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้เริ่มต้นที่สภาพหน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ (k_0) และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ค่าที่เกี่ยวข้องทุกค่าจึงต้องทำการ Normalized ด้วยค่าเริ่มต้นที่สภาพหน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติเช่นกัน

โดยผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ที่ทุกระดับของหน่วยแรงประสิทธิผลที่กำหนด สำหรับการทดสอบที่ 1 - 5 (Test no. 1 - 5) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 - 4.5

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของ การทดสอบที่ 1 (Test no.1)

Test Condition (σ', Unit = kPa)											Test Result					
Stess Level	$\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h$	σ'_v	σ'_h	p'	q	$\Delta p'$	Δq	$\Delta q/\Delta p'$	e	e/e_0	ε_v	ε_q	k (cm/s)	k/k_0
In-situ stress	0	-	0	43.56	31.38	35.44	12.18	0	0	-	3.1129	1.0000	0.0000	0.0000	5.96E-08	1.0000
1	30	1.00	30	73.56	61.38	65.44	12.18	30	0	0.00	2.7574	0.8858	0.0875	0.0295	3.09E-08	0.5191
2	60	0.50	30	103.56	61.38	75.44	42.18	40	30	0.75	2.5436	0.8171	0.1401	0.0808	2.30E-08	0.3862
3	90	0.33	30	133.56	61.38	85.44	72.18	50	60	1.20	2.3689	0.7610	0.1831	0.1349	1.62E-08	0.2717
4	120	0.25	30	163.56	61.38	95.44	102.18	60	90	1.50	2.2214	0.7136	0.2194	0.1849	1.29E-08	0.2166

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของ การทดสอบที่ 2 (Test no.2)

Test Condition (σ', Unit = kPa)											Test Result					
Stess Level	$\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h$	σ'_v	σ'_h	p'	q	$\Delta p'$	Δq	$\Delta q/\Delta p'$	e	e/e_0	ε_v	ε_q	k (cm/s)	k/k_0
In-situ stress	0	-	0	43.56	31.38	35.44	12.18	0	0	-	3.1538	1.0000	0.0000	0.0000	6.28E-08	1.0000
1	30	1.00	30	73.56	61.38	65.44	12.18	30	0	0.00	2.8022	0.8885	0.0853	0.0316	3.36E-08	0.5350
2	60	1.00	60	103.56	91.38	95.44	12.18	60	0	0.00	2.5966	0.8233	0.1353	0.0437	2.36E-08	0.3750
3	90	1.00	90	133.56	121.38	125.44	12.18	90	0	0.00	2.4565	0.7789	0.1693	0.0477	1.80E-08	0.2862
4	120	1.00	120	163.56	151.38	155.44	12.18	120	0	0.00	2.3924	0.7586	0.1848	0.0541	1.60E-08	0.2548

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของ การทดสอบที่ 3 (Test no.3)

Test Condition (σ', Unit = kPa)											Test Result					
Stess Level	$\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h$	σ'_v	σ'_h	p'	q	$\Delta p'$	Δq	$\Delta q/\Delta p'$	e	e/e_0	ε_v	ε_q	k (cm/s)	k/k_0
In-situ stress	0	-	0	43.56	31.38	35.44	12.18	0	0	-	3.0397	1.0000	0.0000	0.0000	6.60E-08	1.0000
1	30	0.75	22.5	73.56	53.88	60.44	19.68	25	7.5	0.30	2.6691	0.8781	0.0917	0.0390	3.57E-08	0.5414
2	60	0.75	45	103.56	76.38	85.44	27.18	50	15	0.30	2.4439	0.8040	0.1475	0.0697	2.50E-08	0.3789
3	90	0.75	67.5	133.56	98.88	110.44	34.68	75	22.5	0.30	2.3056	0.7585	0.1817	0.0917	1.90E-08	0.2884
4	120	0.75	90	163.56	121.38	135.44	42.18	100	30	0.30	2.1972	0.7228	0.2086	0.1102	1.45E-08	0.2192

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของ การทดสอบที่ 4 (Test no.4)

Test Condition (σ', Unit = kPa)											Test Result					
Stess Level	$\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h$	σ'_v	σ'_h	p'	q	$\Delta p'$	Δq	$\Delta q/\Delta p'$	e	e/e_0	ε_v	ε_q	k (cm/s)	k/k_0
In-situ stress	0	-	0	43.56	31.38	35.44	12.18	0	0	-	3.1816	1.0000	0.0000	0.0000	5.75E-08	1.0000
1	30	0.50	15	73.56	46.38	55.44	27.18	20	15	0.75	2.8030	0.8810	0.0905	0.0466	3.212E-08	0.5586
2	60	0.50	30	103.56	61.38	75.44	42.18	40	30	0.75	2.5876	0.8133	0.1420	0.0858	2.30E-08	0.4000
3	90	0.50	45	133.56	76.38	95.44	57.18	60	45	0.75	2.3397	0.7354	0.2013	0.1298	1.591E-08	0.2766
4	120	0.50	60	163.56	91.38	115.44	72.18	80	60	0.75	2.1981	0.6909	0.2352	0.1602	1.244E-08	0.2163

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของ การทดสอบที่ 5 (Test no.5)

Test Condition (σ', Unit = kPa)											Test Result					
Stess Level	$\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$	$\Delta\sigma'_h$	σ'_v	σ'_h	p'	q	$\Delta p'$	Δq	$\Delta q/\Delta p'$	e	e/e_0	ε_v	ε_q	k (cm/s)	k/k_0
In-situ stress	0	-	0	43.56	31.38	35.44	12.18	0	0	-	3.0781	1.0000	0.0000	0.0000	5.623E-08	1.0000
1	30	0.25	7.5	73.56	38.88	50.44	34.68	15	22.5	1.50	2.6496	0.8608	0.1051	0.0500	3.244E-08	0.5769
2	60	0.25	15	103.56	46.38	65.44	57.18	30	45	1.50	2.3770	0.7722	0.1719	0.1137	2.066E-08	0.3675
3	90	0.25	22.5	133.56	53.88	80.44	79.68	45	67.5	1.50	2.2169	0.7202	0.2112	0.1614	1.572E-08	0.2796
4	120	0.25	30	163.56	61.38	95.44	102.18	60	90	1.50	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ p' และ q คำนวณจาก Cambridge stress path Method

Δ คือ ค่าที่เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นที่ In-situ

ε_v, ε_q คือ ความเครียดที่คำนวณเริ่มจาก In-situ

e_0 คือ ค่าอัตราส่วนช่องว่างของดินที่ in-situ stress

k_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินที่ in-situ stress

Test no.5, Stress level 4 ไม่ได้ทำการทดสอบ

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ p' และ q จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (k / k_0) กับ (p' / p'_0) จากทุกการทดสอบ (Test no. 1 - 5) จะพบว่า ที่การทดสอบต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า (p' / p'_0) เท่ากัน จะได้ค่า (k / k_0) ต่างกันในแต่ละการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในแต่ละการทดสอบมีค่า (q / q_0) ไม่เท่ากัน แสดงว่าค่า (q / q_0) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า (k / k_0) โดยที่ เมื่อค่า (q / q_0) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า (k / k_0) ลดลง

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (k / k_0) กับ (q / q_0) จากทุกการทดสอบ (Test no. 1 - 5) จะพบว่า ที่การทดสอบต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า (q / q_0) เท่ากัน จะได้ค่า (k / k_0) ต่างกันในแต่ละการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในแต่ละการทดสอบมีค่า (p' / p'_0) ไม่เท่ากัน แสดงว่าค่า (p' / p'_0) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า (k / k_0) โดยที่ เมื่อค่า (p' / p'_0) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า (k / k_0) ลดลง

จากผลการทดสอบดังกล่าว จะพบว่า ค่า (k / k_0) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า (p' / p'_0) เพียงอย่างเดียว ดังเช่นที่นักวิจัยหลายท่านได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ p' เอาไว้ แต่ค่า (k /k_0) มีความสัมพันธ์ทั้งกับค่า (p' / p'_0) และ (q / q_0) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า (k /k_0) กับ (p' / p'_0) และ (q / q_0) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว (Multiple regression analysis) ซึ่งจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสามอยู่ในรูปของสมการของระนาบ (Plane) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่

$$\ln(k/k_0) = -0.9355\ln(p'/p'_0) - 0.2356\ln(q/q_0) \quad \text{.....(4.1)}$$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.98039$

และ Standard Error of Estimate = 0.0568

จากสมการที่ (4.1) สามารถนำมาขยายและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (k / k_0) กับ (p' / p'_0) และค่า (k / k_0) กับ (q / q_0) ได้ โดยที่

$$\Delta\ln(k/k_0)_p = -0.9355\Delta\ln(p'/p'_0) \quad \text{เมื่อ } q = \text{ค่าคงที่} \text{ .....(4.2)}$$

$$\text{และ } \Delta\ln(k/k_0)_q = -0.2356\Delta\ln(q/q_0) \quad \text{เมื่อ } p' = \text{ค่าคงที่} \text{ .....(4.3)}$$

โดยตัวห้อย p และ q ในสมการที่ (4.2) และ (4.3) หมายความว่า ค่านั้นเกิดจากการที่ p' เปลี่ยนแปลง q คงที่ และ q เปลี่ยนแปลง p' คงที่ ตามลำดับ

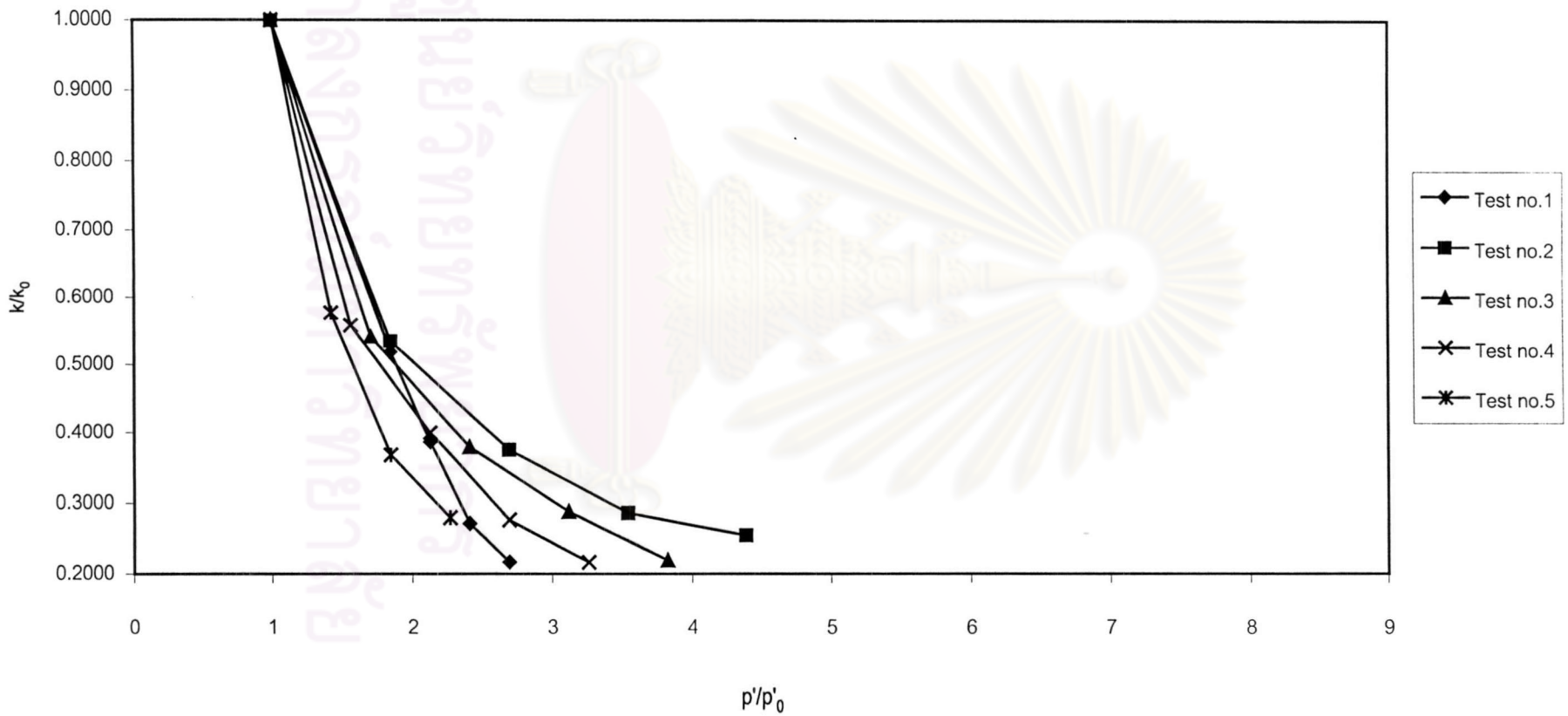
จากสมการที่ (4.2) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า $\ln(p'/p'_0)$ เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย (ค่า p' เพิ่มขึ้น) จะทำให้ค่า $\ln(k/k_0)$ เปลี่ยนแปลงไป –0.9355 หน่วย (ค่า k ลดลง)

และในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (4.3) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า $\ln(q/q_0)$ เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย (ค่า q เพิ่มขึ้น) จะทำให้ค่า $\ln(k/k_0)$ เปลี่ยนแปลงไป –0.2356 หน่วย (ค่า k ลดลง)

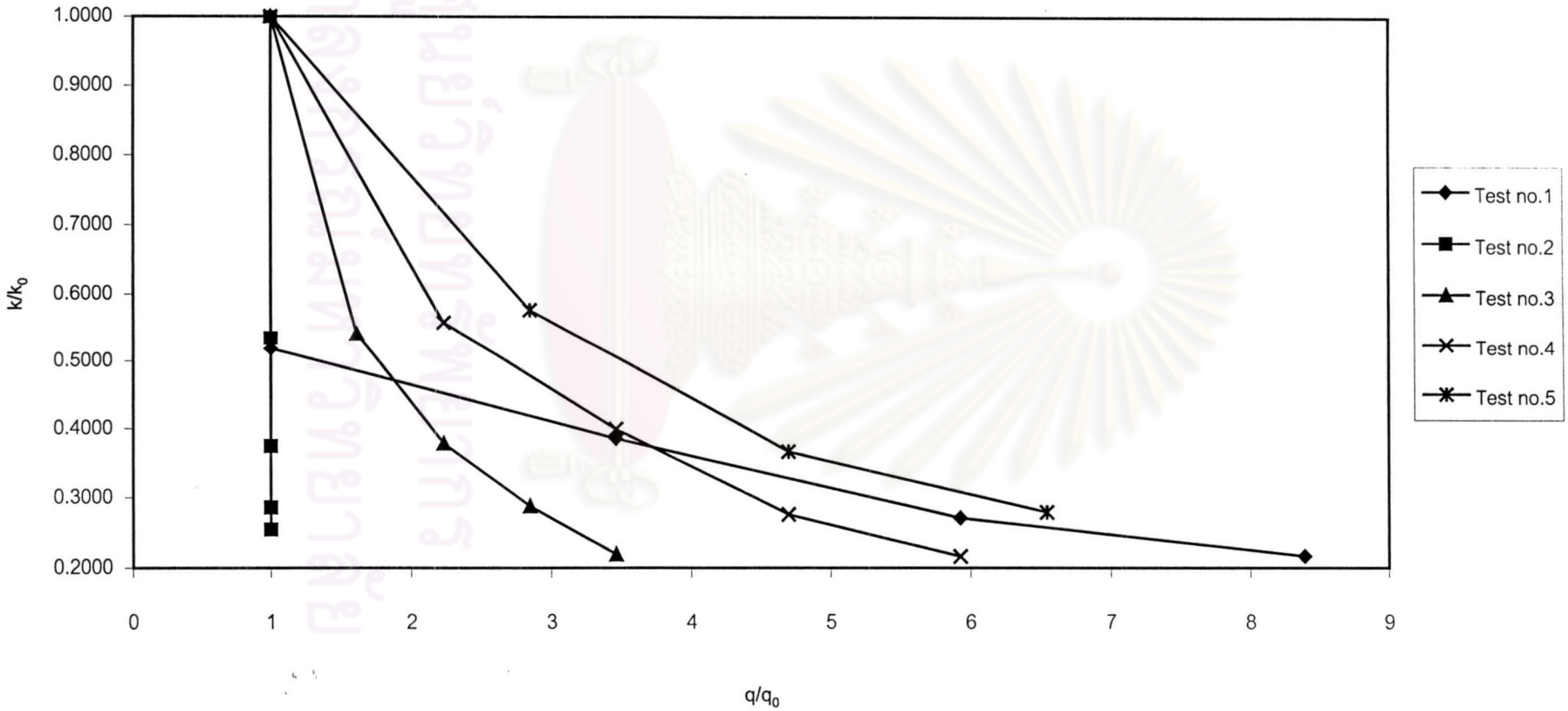
จากการแปลความหมายของสมการที่ (4.2) และ (4.3) จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า p' ทำให้ค่า k ลดลงมากกว่า การเพิ่มขึ้นของค่า q ในปริมาณเท่ากัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่า p' ทำให้ค่า k ลดลงมากกว่าถึงประมาณ 4 เท่า (= -0.9355/-0.2356) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจาก การที่ค่า p' เป็นหน่วยแรงในลักษณะที่บีบอัด (Compress) ตัวอย่างดิน ทำให้ตัวอย่างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและลดปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างดินโดยตรง ในขณะที่ค่า q เป็นหน่วยแรงในลักษณะเฉือน (Shear) ตัวอย่างดิน ซึ่งไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรโดยตรง แต่เป็นการทำให้ตัวอย่างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และมีการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลกระทบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างดินได้ จึงทำให้ต้องเพิ่มค่า q ในปริมาณมากกว่าถึงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างดินเท่ากับการเพิ่มขึ้นของค่า p' ในปริมาณที่น้อยกว่า ซึ่งการจะอธิบายความสัมพันธ์นี้ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จำเป็นจะต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า e กับ p' และ q ดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป

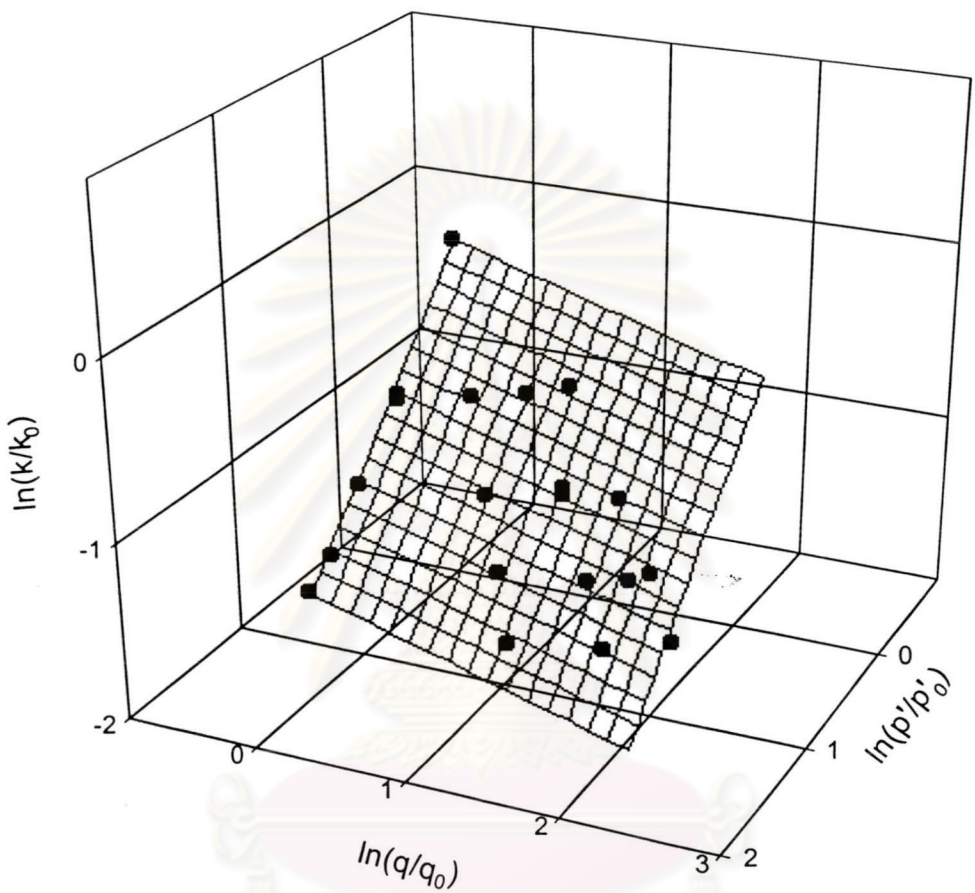
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ที่หน่วยแรงเบี่ยงเบนต่างๆกัน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ หน่วยแรงเบี่ยงเบน
ที่หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยต่างๆกัน





$\ln(k/k_0) = -0.9355\ln(p'/p'_0) - 0.2356\ln(q/q_0)$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.98039$

และ Standard Error of Estimate = 0.0568

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า e กับ p' และ q จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (e / e_0) กับ (p' / p'_0) จากทุกการทดสอบ (Test no. 1 - 5) จะพบว่า ที่การทดสอบต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า (p' / p'_0) เท่ากัน จะได้ค่า (e / e_0) ต่างกันในแต่ละการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในแต่ละการทดสอบมีค่า (q / q_0) ไม่เท่ากัน แสดงว่าค่า (q / q_0) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า (e / e_0) โดยที่ เมื่อค่า (q / q_0) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า (e / e_0) ลดลง

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (e / e_0) กับ (q / q_0) จากทุกการทดสอบ (Test no. 1 - 5) จะพบว่า ที่การทดสอบต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า (q / q_0) เท่ากัน จะได้ค่า (e / e_0) ต่างกันในแต่ละการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในแต่ละการทดสอบมีค่า (p' / p'_0) ไม่เท่ากัน แสดงว่าค่า (p' / p'_0) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า (e / e_0) โดยที่ เมื่อค่า (p' / p'_0) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า (e / e_0) ลดลง

จากผลการทดสอบดังกล่าว จะพบว่า ค่า (e / e_0) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า (p' / p'_0) เพียงอย่างเดียว ดังเช่นที่นักวิจัยหลายท่านได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า e กับ p' เอาไว้ แต่ค่า (e / e_0) มีความสัมพันธ์ทั้งกับค่า (p' / p'_0) และ (q / q_0) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า (e / e_0) กับ (p' / p'_0) และ (q / q_0) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว (Multiple regression analysis) ซึ่งจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสามอยู่ในรูปของสมการของระนาบ (Plane) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยที่

$$e/e_0 = 0.9879 - 0.1558\ln(p'/p'_0) - 0.0594\ln(q/q_0) \quad \text{.....(4.4)}$$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.96307$

และ Standard Error of Estimate = 0.0149

จากสมการที่ (4.4) สามารถนำมาขยายและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง(e / e_0) กับ (p' / p'_0) และค่า (e / e_0) กับ (q / q_0) ได้ โดยที่

$$\Delta(e/e_0)_p = -0.1558\Delta\ln(p'/p'_0) \quad \text{เมื่อ } q = \text{ค่าคงที่} \quad \text{.....(4.5)}$$

$$\text{และ } \Delta(e/e_0)_q = -0.0594\Delta\ln(q/q_0) \quad \text{เมื่อ } p' = \text{ค่าคงที่} \quad \text{.....(4.6)}$$

โดยตัวห้อย p และ q ในสมการที่ (4.5) และ (4.6) หมายความว่า ค่านั้นเกิดจากการที่ p' เปลี่ยนแปลง q คงที่ และ q เปลี่ยนแปลง p' คงที่ ตามลำดับ

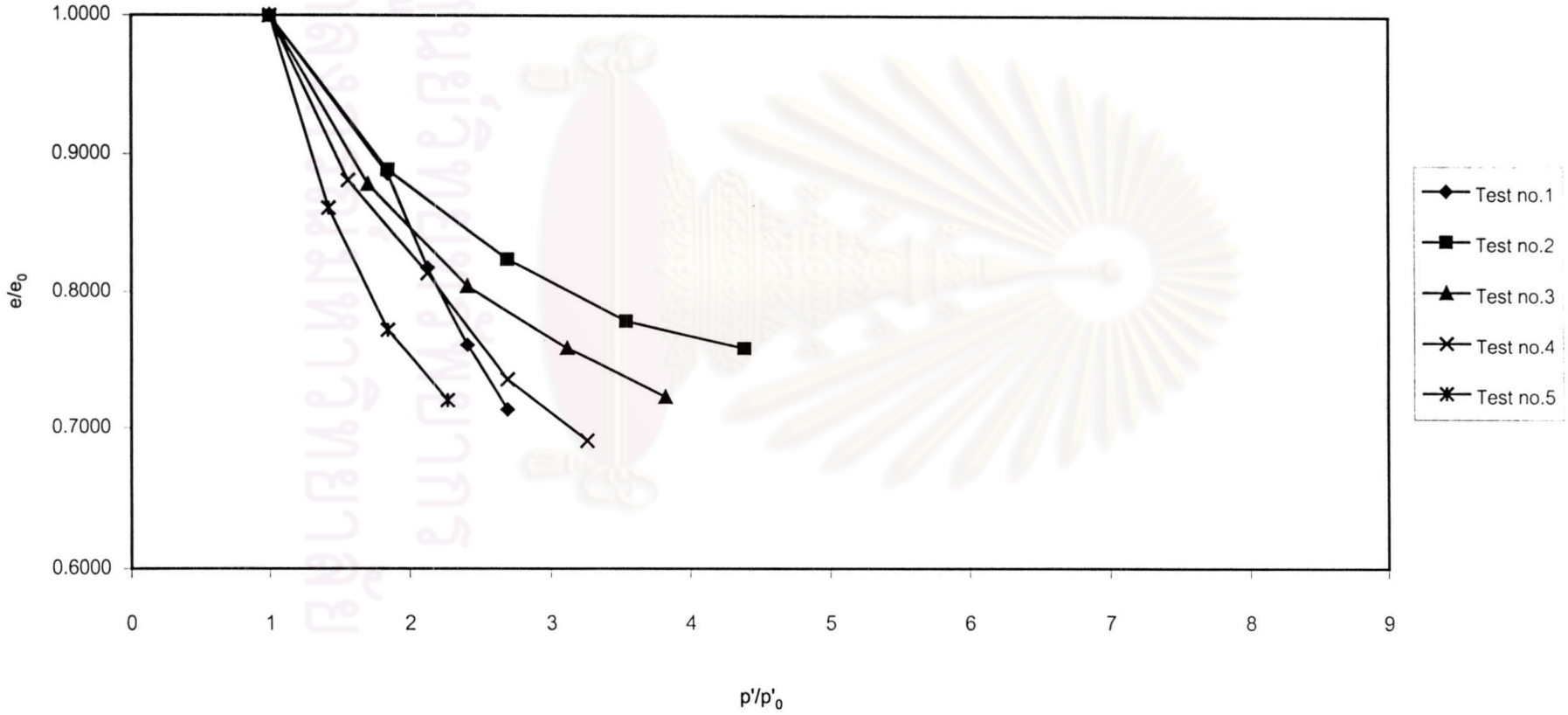
จากสมการที่ (4.5) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า $\ln(p'/p'_0)$ เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย (ค่า p' เพิ่มขึ้น) จะทำให้ค่า (e / e_0) เปลี่ยนแปลงไป –0.1558 หน่วย (ค่า e ลดลง)

และในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (4.6) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า $\ln(q/q_0)$ เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย (ค่า q เพิ่มขึ้น) จะทำให้ค่า (e / e_0) เปลี่ยนแปลงไป –0.0594 หน่วย (ค่า e ลดลง)

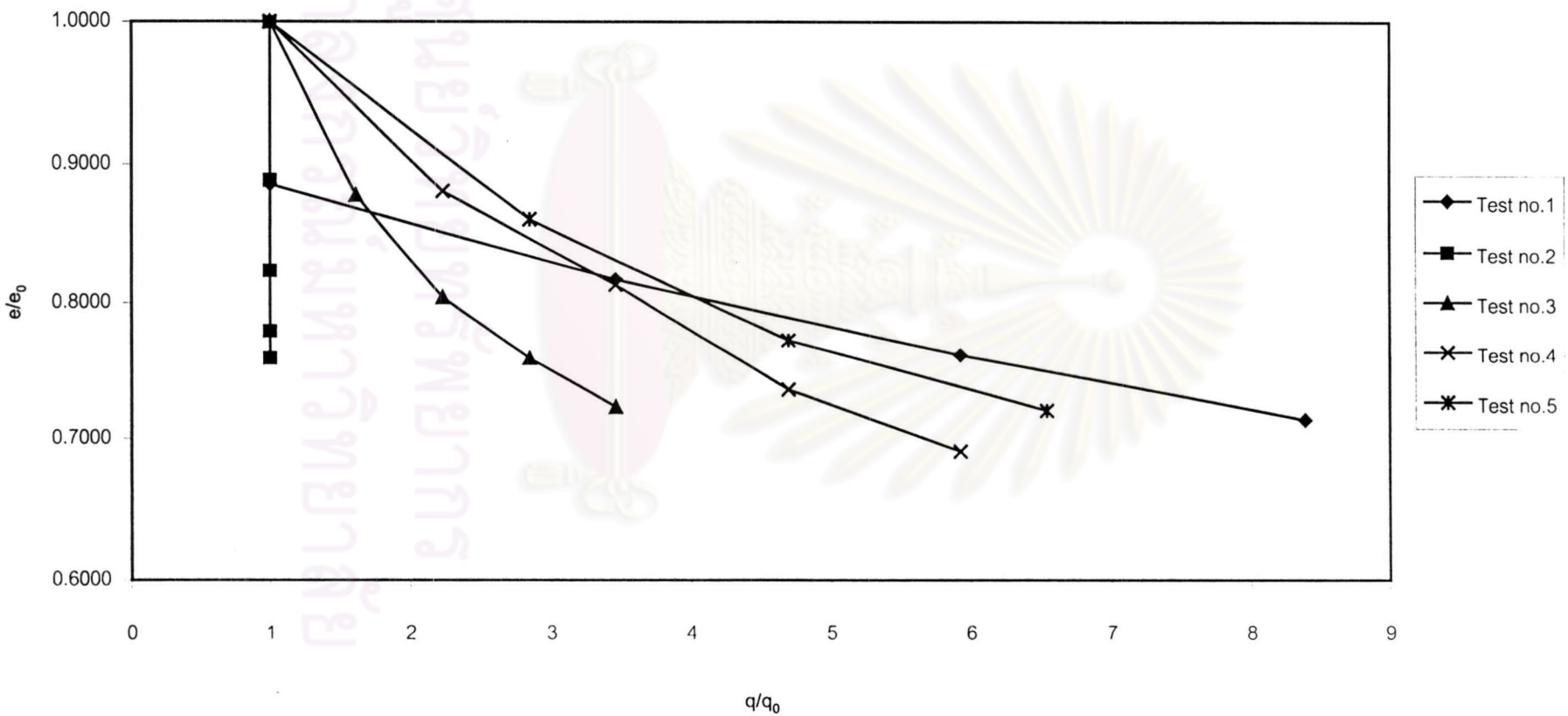
จากการแปลความหมายของสมการที่ (4.5) และ (4.6) จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า p' ทำให้ค่า e ลดลงมากกว่า การเพิ่มขึ้นของค่า q ในปริมาณเท่ากัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่า p' ทำให้ค่า e ลดลงมากกว่าถึงประมาณ 2.6 เท่า (= -0.1558/-0.0594) ซึ่งข้อสรุปนี้สนับสนุนสาเหตุที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ที่กล่าวว่า ต้องเพิ่มค่า q ในปริมาณมากกว่าถึงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างดินเท่ากับการเพิ่มขึ้นของค่า p' ในปริมาณที่น้อยกว่า

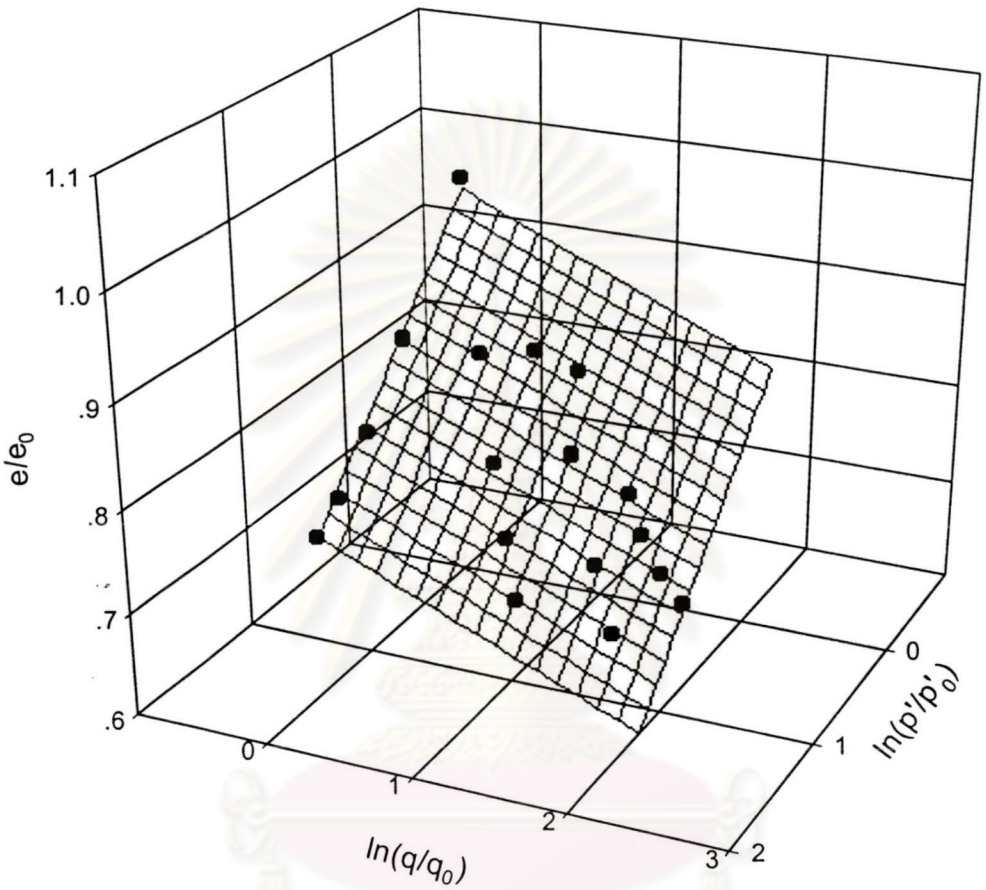
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนช่องว่าง กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย
ที่หน่วยแรงเบี่ยงเบนต่างๆกัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนช่องว่าง กับ หน่วยแรงเบี่ยงเบน
ที่หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยต่างๆกัน





$e/e_0 = 0.9879 - 0.1558\ln(p'/p'_0) - 0.0594\ln(q/q_0)$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.96307$

และ Standard Error of Estimate = 0.0149

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนช่องว่าง กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้

จากงานวิจัยของนักวิจัยหลายท่าน ทำให้ทราบว่าค่า k มีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่า e เมื่อคุณสมบัติของดินและสารที่ไหลซึมผ่าน (Permeant) เหมือนกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เมื่อพล็อตกราฟเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e สำหรับแต่ละการทดสอบ พบว่า ความสัมพันธ์ของทั้งสองค่ามีแนวโน้มเป็นไปตามสมการที่เสนอโดย Taylor (1948) ดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.11 โดยที่

$$\Delta(e/e_0) = C_k\Delta\ln(k/k_0) \text{ หรือ } e/e_0 = C_k\ln(k/k_0) + 1 \quad \text{.....(4.7)}$$

ซึ่งจากรูปจะพบว่า ค่า C_k ที่ได้สำหรับแต่ละการทดสอบจะไม่เท่ากัน และจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า p' และ q ได้ ดังนี้

โดยจากสมการที่ (4.2) และ (4.5) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า p' ได้ โดยที่

$$\Delta(e/e_0)_p = (-0.1558/-0.9355)\Delta\ln(k/k_0)_p$$

$$\text{หรือ } \Delta(e/e_0)_p = 0.1665\Delta\ln(k/k_0)_p \qquad \text{เมื่อ q = ค่าคงที่} \quad \text{.....(4.8)}$$

และจากสมการที่ (4.3) และ (4.6) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า q ได้ โดยที่

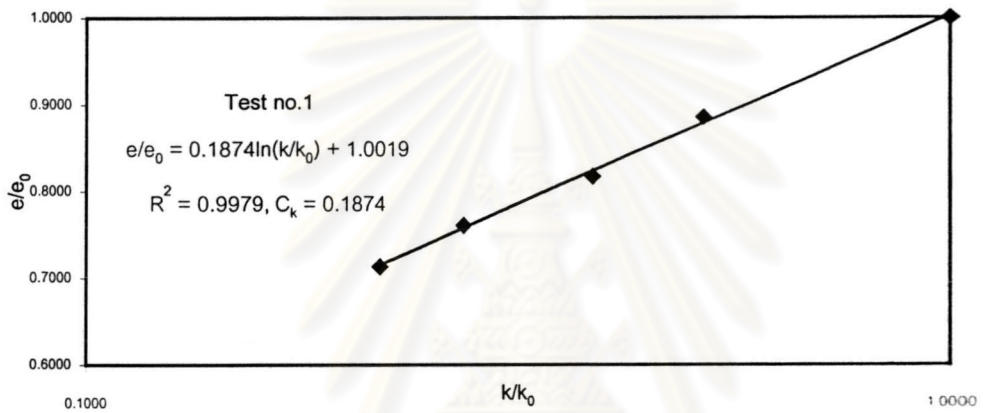
$$\Delta(e/e_0)_q = (-0.0594/-0.2356)\Delta\ln(k/k_0)_q$$

$$\text{หรือ } \Delta(e/e_0)_q = 0.2521\Delta\ln(k/k_0)_q \qquad \text{เมื่อ p' = ค่าคงที่} \quad \text{.....(4.9)}$$

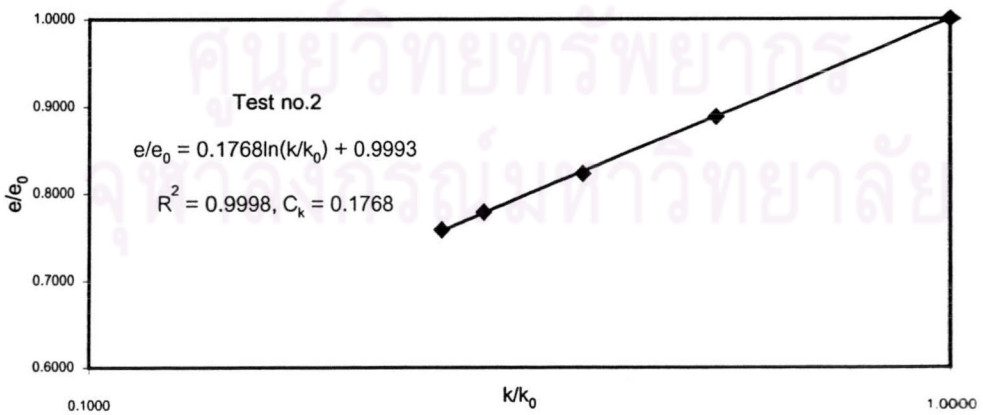
จากสมการที่ (4.8) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า (e / e_0) เปลี่ยนแปลงไป –1 หน่วย (ค่า e ลดลง) จะทำให้ค่า $\ln(k / k_0)$ เปลี่ยนแปลงไป = (-1/0.1665) = –6.0045 หน่วย (ค่า k ลดลง)

และในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (4.9) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า (e / e_0) เปลี่ยนแปลงไป –1 หน่วย (ค่า e ลดลง) จะทำให้ค่า $\ln(k / k_0)$ เปลี่ยนแปลงไป = (-1/O.2521) = –3.9663 หน่วย (ค่า k ลดลง)

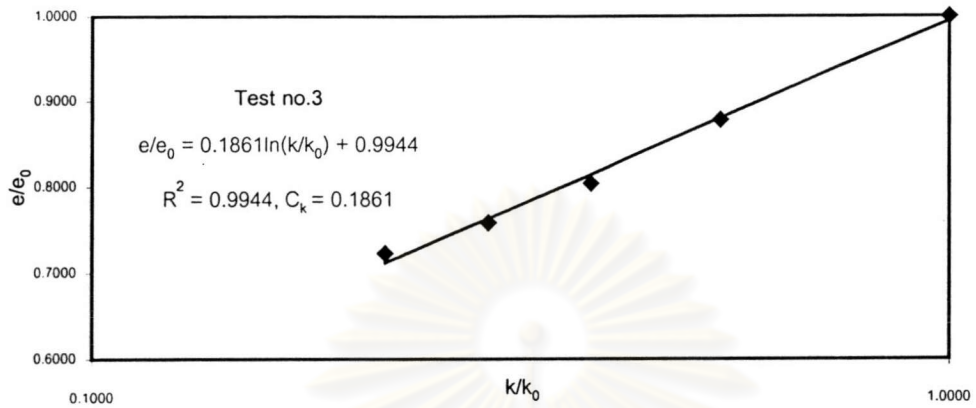
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 1



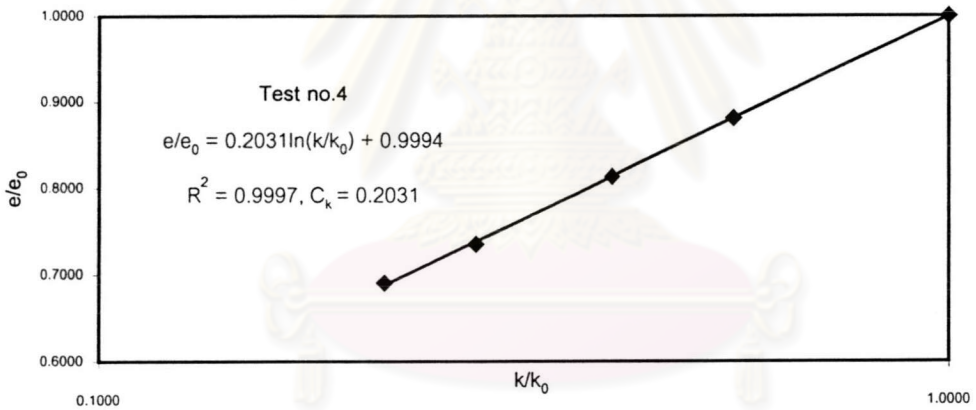
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 2



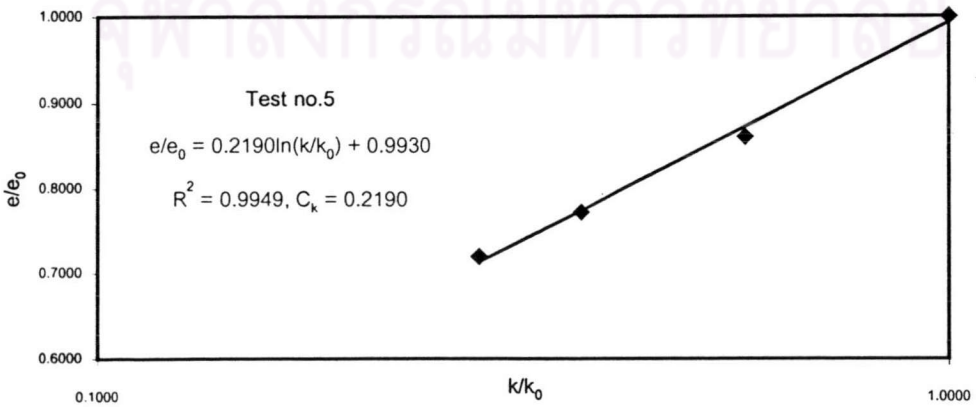
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 3



รูปที่ 4.10ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 4



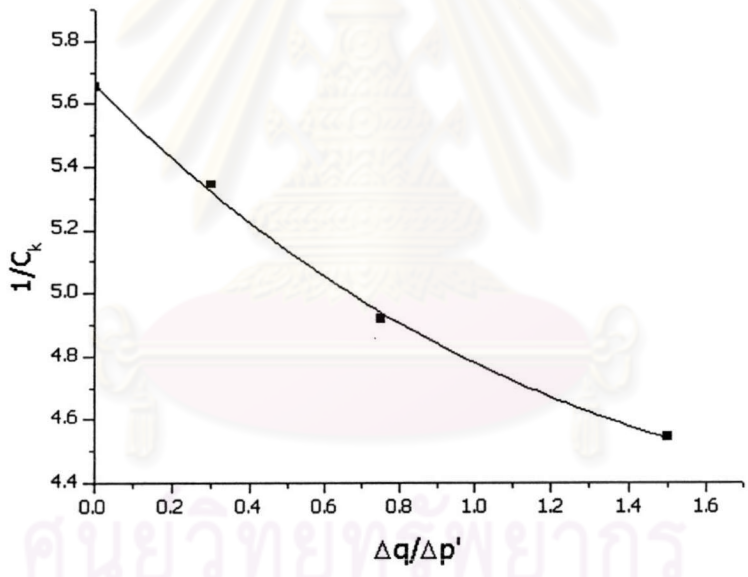
รูปที่ 4.11ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e จากการทดสอบที่ 5



จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ e สำหรับแต่ละการทดสอบ และการแปลความหมายของสมการที่ (4.8) และ (4.9) พบข้อขัดแย้งว่า เมื่อค่า (e/e_0) ลดลงเท่ากัน กลับทำให้ค่า k ที่ลดลงต่างกัน โดยทุกกรณีมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันเพียงอย่างเดียว คือ สถานะของหน่วยแรง (Stress state) ที่กระทำต่อตัวอย่างดิน โดยสำหรับแต่ละการทดสอบจะมีสัดส่วนของ $\Delta q/\Delta p'$ ที่แตกต่างกัน ขณะที่ในสมการที่ (4.8) เป็นกรณีที่ค่า p' เปลี่ยนแปลงและค่า q มีค่าคงที่ ส่วนในสมการที่ (4.9) เป็นกรณีที่มีค่า q เปลี่ยนแปลงและค่า p' มีค่าคงที่ แสดงว่าผลกระทบจากสถานะของหน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า k ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ($1/C_k$) กับค่า ($\Delta q/\Delta p'$) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยที่

$$(1/C_k) = 4.0366 + 1.6260\exp(-0.7841(\Delta q/\Delta p')) \quad \text{.....(4.10)}$$

โดยมี $R^2 = 0.99864$



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ($1/C_k$) กับค่า ($\Delta q/\Delta p'$)

ซึ่งจากรูปที่ 4.12 จะแสดงให้เห็นว่า ค่า C_k ไม่ได้เป็นค่าคงที่ตามสมการที่เสนอโดย Taylor (1948) แต่จะขึ้นอยู่กับสถานะของหน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดิน จึงจำเป็นต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า k เนื่องจากผลกระทบจากสถานะของหน่วยแรง อันได้แก่ ความเครียดต่างๆ ซึ่งจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า k ในเชิงของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่าง, รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในตัวอย่างดิน

โดยผลกระทบจากสถานะของหน่วยแรงนั้น ทำให้เกิดความเครียดต่อตัวอย่างดิน คือ ความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain, ε_v) และความเครียดเฉือน (Shear strain, ε_q) โดยที่

$$\varepsilon_v = 0.1188\ln(p'/p'_0) + 0.0448\ln(q/q_0) \quad \text{.....(4.11)}$$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.96391$

และ Standard Error of Estimate = 0.0112

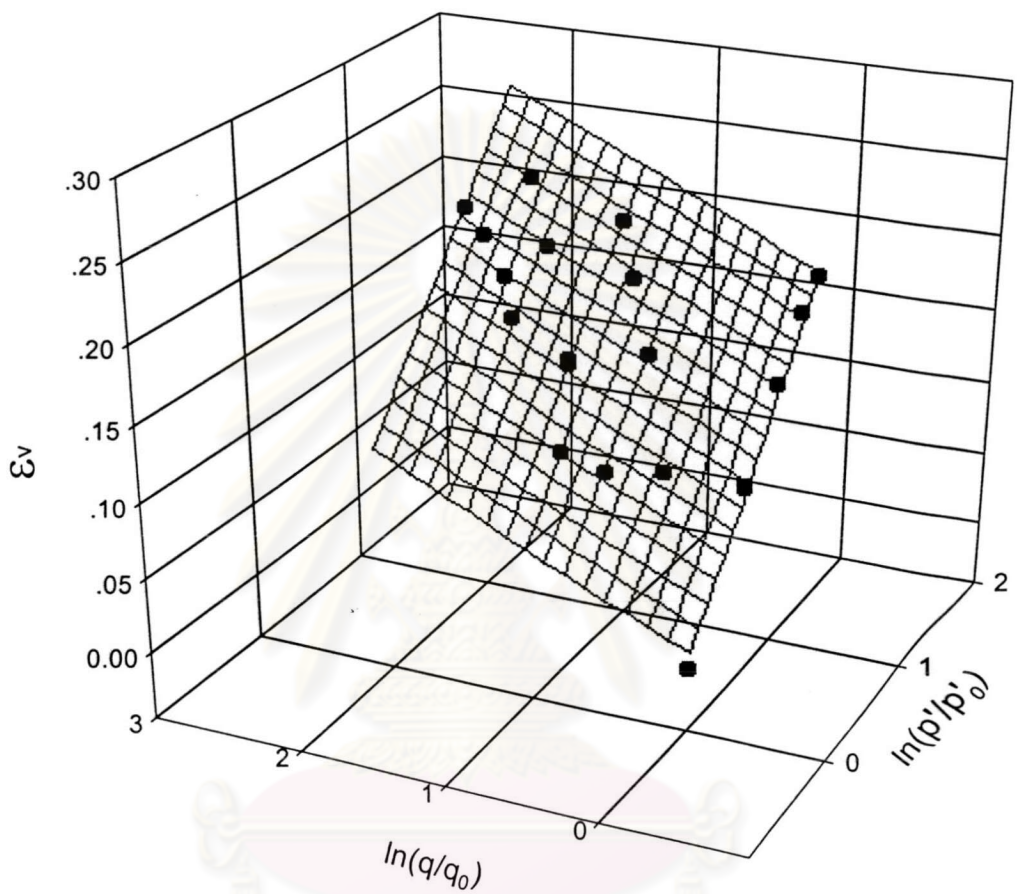
$$\varepsilon_q = 0.0441\ln(p'/p'_0) + 0.0606\ln(q/q_0) \quad \text{.....(4.12)}$$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.93162$

และ Standard Error of Estimate = 0.0134

ซึ่งสมการทั้งสองเป็นสมการของระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ โดยได้จากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว ซึ่งสมการทั้งสองเป็นสมการที่สามารถใช้งานได้ดีในช่วงที่ดินเหนียวอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ และมีความเครียดเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำจากสภาวะหน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติไม่เกิน 20% (ช่วงที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้) ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผล (p', q) เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งแล้ว ค่าความเครียดเชิงปริมาตรจะมีค่าคงที่ไม่ว่าหน่วยแรงประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นอีกหรือไม่ ขณะที่ค่าความเครียดเฉือนจะเกิดขึ้นต่อไปได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุดแม้ว่าหน่วยแรงประสิทธิผลจะมีค่าคงที่แล้ว แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบไปถึงสภาวะนั้น และเป็นการยุ่งยากในการสร้างสมการให้ครอบคลุมถึงสภาวะนั้น สมการที่ (4.11) และ (4.12) จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมเฉพาะในช่วงที่ทำการทดสอบเท่านั้น รูปสมการจึงไม่สอดคล้องกับสภาวะของหน่วยแรงประสิทธิผลที่อยู่ไกลออกไปจากช่วงที่ทำการทดสอบ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เฉพาะระหว่างค่า k กับ e นั้นยังไม่เหมาะสม เนื่องจากยังไม่ครอบคลุมผลกระทบจากสถานะของหน่วยแรงทั้งหมด กล่าวคือ เป็นการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า k เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างดินหรือความเครียดเชิงปริมาตรเท่านั้น โดยยังไม่ได้รวมถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่า k เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไปหรือความเครียดเฉือนเลย เพราะฉะนั้นเพื่อให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวครอบคลุมผลกระทบจากสถานะของหน่วยแรงทั้งหมด จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ ε_v และ ε_q ดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป



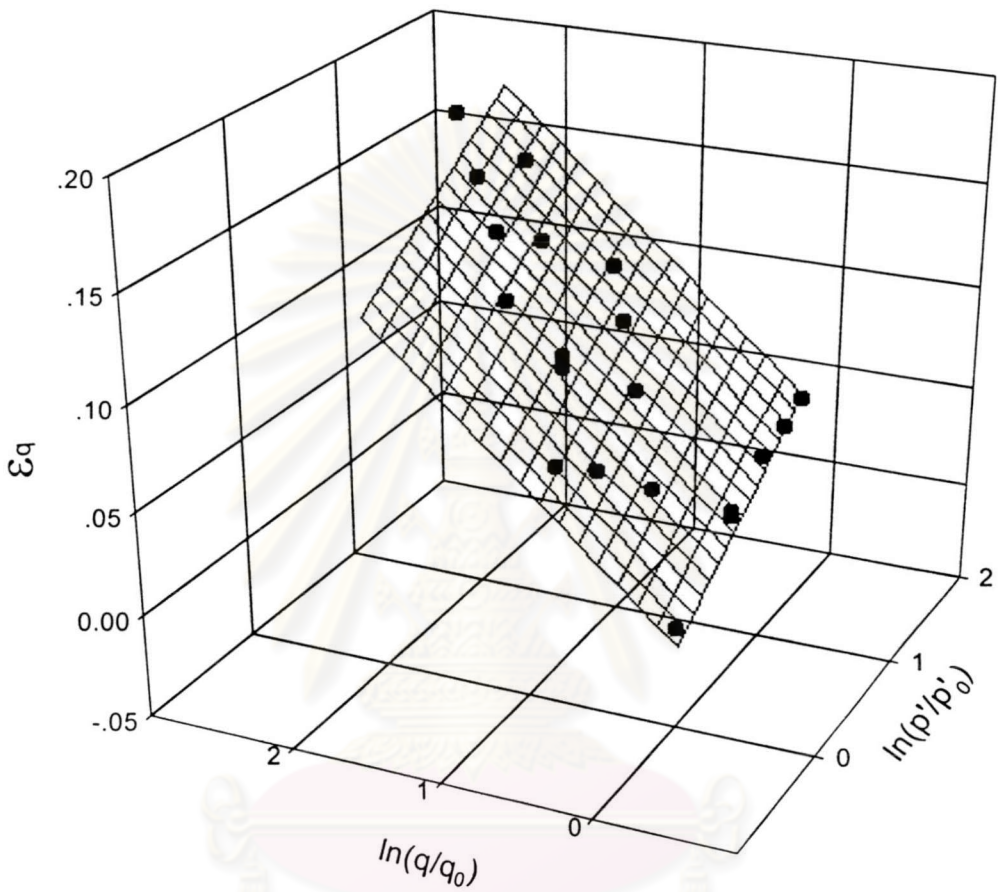
$\varepsilon_v = 0.1188\ln(p'/p'_0) + 0.0448\ln(q/q_0)$

โดยมี Adjust R^2 = 0.96391

และ Standard Error of Estimate = 0.0112

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดเชิงปริมาตร กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$\varepsilon_q = 0.0441\ln(p'/p'_0) + 0.0606\ln(q/q_0)$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.93162$

และ Standard Error of Estimate = 0.0134

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดเฉือน กับ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย และ หน่วยแรงเบี่ยงเบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับ ε_v และ ε_q จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (k / k_0) กับ ε_v และ ε_q โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว ซึ่งจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสามอยู่ในรูปของสมการของระนาบได้ โดยที่

$$\ln(k/k_0) = -7.9786\varepsilon_v + 1.6665\varepsilon_q \quad \text{.....(4.13)}$$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.96196$

และ Standard Error of Estimate = 0.0792

จากสมการที่ (4.13) สามารถแปลความหมายได้ว่า เมื่อค่า ε_v เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย (ปริมาตรลดลง) จะทำให้ค่า $\ln (k / k_0)$ เปลี่ยนแปลงไป –7.9786 หน่วย (ค่า k ลดลง)

และในทำนองเดียวกัน เมื่อค่า ε_q เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้ค่า $\ln (k / k_0)$ เปลี่ยนแปลงไป 1.6665 หน่วย (ค่า k เพิ่มขึ้น)

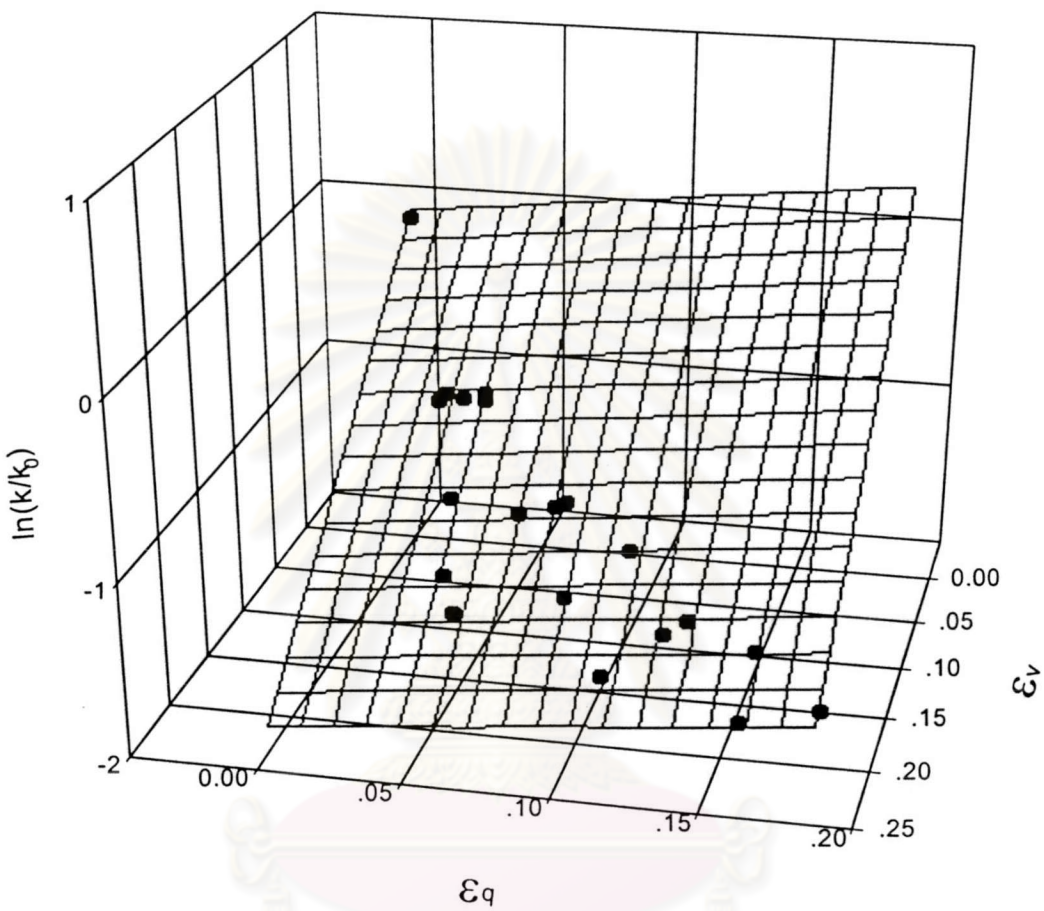
จากการแปลความหมายดังกล่าว จะพบว่าเมื่อค่า ε_v หรือค่า ε_q เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า k เปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้าม โดยที่ เมื่อค่า ε_v เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า k ลดลง แต่เมื่อค่า ε_q เพิ่มขึ้นกลับทำให้ค่า k เพิ่มขึ้นด้วย สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจาก การที่เมื่อค่า ε_v เพิ่มขึ้นหมายถึงการที่ในตัวอย่างดินมีปริมาตรของช่องว่างลดลง ทำให้ช่องการไหลมีขนาดเล็กลงเป็นผลทำให้ค่า k ลดลงด้วย ในขณะที่เมื่อค่า ε_q เพิ่มขึ้นหมายถึงการที่ในตัวอย่างดินมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและมีการจัดเรียงตัวของเม็ดดินเปลี่ยนแปลงไปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งมีข้อสันนิษฐานได้หลายประการ ดังนี้

- ทำให้จำนวนช่องการไหลลดลงแต่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะลดแรงเสียดทานที่ต้านการไหล เป็นผลทำให้ค่า k เพิ่มขึ้น
- เกิดการจัดเรียงตัวของเม็ดดินอย่างเป็นระเบียบตามแนวเฉือน ทำให้ระยะทางการไหลสั้นลงและเป็นในแนวทางเดียวกัน เป็นผลทำให้ค่า k เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่า k จะพบว่า ค่า ε_v มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า k มากกว่าค่า ε_q ถึงประมาณ 4.8 เท่า (= 7.9786 / 1.6665) เนื่องจากการทำให้ตัวอย่างดินมีปริมาตรของช่องว่างลดลงซึ่งทำให้ค่า k ลดลงอย่างมีนัยสำคัญนั้นง่ายกว่าการทำให้ตัวอย่างดินเกิดการจัดเรียงตัวของเม็ดดินใหม่ซึ่งทำให้ค่า k เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

สมการที่ (4.13) จะสามารถใช้งานได้ดีในช่วงที่ดินเหนียวอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ และมีความเครียดเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำจากสภาวะหน่วยแรงเดียวกับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติไม่เกิน 20% (ช่วงที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้) ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว ค่า ε_v จะเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วจะมีค่าคงที่ เป็นผลให้ค่า k น่าจะลดลงถึงค่าหนึ่งแล้วมีค่าคงที่เช่นกัน ขณะที่ค่า ε_q ที่สามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุด จะทำให้จำนวนช่องการไหลลดลงแต่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่การจัดเรียงตัวของเม็ดดินนั้นน่าจะทำให้ช่องการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นได้มากที่สุดขนาดหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นค่า k จึงน่าจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เกินขีดจำกัดบนค่าหนึ่ง แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบไปถึงสภาวะนั้น และเป็นการยุ่งยากในการสร้างสมการให้ครอบคลุมถึงสภาวะนั้น สมการที่ (4.13) จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมเฉพาะในช่วงที่ทำการทดสอบเท่านั้น รูปสมการจึงไม่สอดคล้องกับสภาวะของความเครียดที่อยู่ไกลออกไปจากช่วงที่ทำการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$\ln(k/k_0) = - 7.9786\varepsilon_v + 1.6665\varepsilon_q$

โดยมี Adjust $R^2 = 0.96196$

และ Standard Error of Estimate = 0.0792

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ กับ ความเครียดเชิงปริมาตร และ ความเครียดเฉือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย