บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิเคราะห์

4.1 ขนาดคละและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายที่ใช้ในวัสดุผสม

เพื่อให้ได้วัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่เหมือนกันทุก ๆ ตัวอย่างผสม จำเป็นต้องจำกัดขนาดของทรายที่ใช้เพื่อให้มีขนาดเดียวกันทุก ๆ ตัวอย่าง ทรายที่ใช้ในวัสดุผสมเป็นทรายจากจังหวัดนครปฐม ก่อนทำการผสมเข้ากับเบนโทไนต์ต้องนำมาแช่น้ำเพื่อเอาสิ่งสกปรกออก อบแห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 ก่อน ผลการทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับดินเม็ดหยาบอย่างทราย โดยนำทรายตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8, 16, 40, 50, 100, และ 200 โดยให้ขนาดใหญ่สุดอยู่บนสุดแล้วเขย่า เมื่อร่อนและนำมาชั่งแล้วสามารถหาส่วนที่ค้างบนตะแกรง คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์กับน้ำหนักทั้งหมด ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของทรายตัวอย่าง

เบอร์ตะแกรง	ขนาดช่องของตะแกรง (มม.)	น้ำหนักของดินที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ดินที่ค้างบนตะแกรง (%)	เปอร์เซ็นต์ดินที่เล็กกว่าตะแกรง (%)
#8	2.380	0.0	0.0	100.00
#16	1.180	56.0	10.23	89.77
40	0.420	272.0	59.92	40.08
50	0.297	68.0	72.34	27.66
100	0.149	100.0	90.61	9.39
200	0.075	35.0	97.00	3.00
Pan	-	9.0	100.00	0.00

หลังจากทำการทดสอบ 5 ครั้งแล้ว นำผลที่ได้มาเฉลี่ยแล้วเขียนเป็นกราฟรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของดินที่มีขนาดเล็กกว่าโดยน้ำหนักกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดิน

ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ลักษณะของเส้นกราฟแผ่กว้างราบเรียบ หาค่า Coefficient of Uniformity, Cu ได้เท่ากับ 6.0 และหาค่าCoefficient of Curvature, Cc = 1.7 ซึ่งเข้าเกณฑ์ของดินทรายที่มีขนาดคละที่ดี (Cu > 6, และ 1 < Cc > 3) หรือ Well graded sand, WS นั่นเอง

ผลการทดสอบหาความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยใช้เครื่องมือ Relative Density Test ของทรายเปล่าที่ใช้ในการผสมกับวัสดุผสมเบนโทไนต์ แสดงในรูปของความหนาแน่นสูงสุด (ρ_{max}) และความหนาแน่นต่ำสุด (ρ_{min}) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

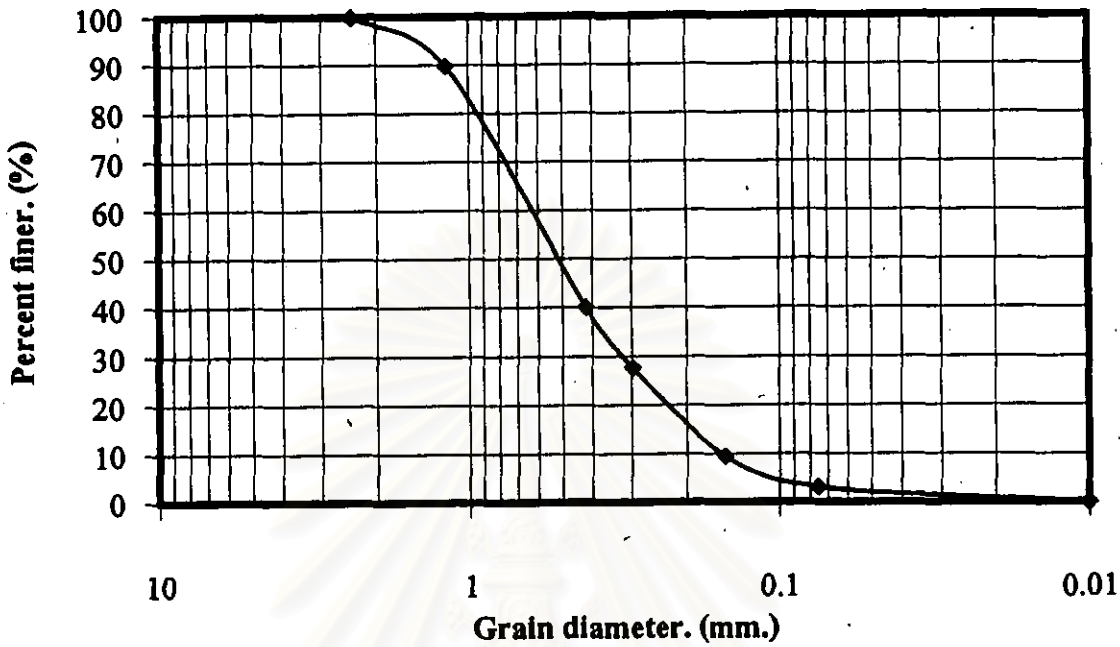
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาความหนาแน่นสัมพัทธ์

	ผลการทดสอบทรายที่ใช้ในวัสดุผสม
ρ_{max} (kN/m^3)	19.9
ρ_{min} (kN/m^3)	14.8
D_r (%)	50.0

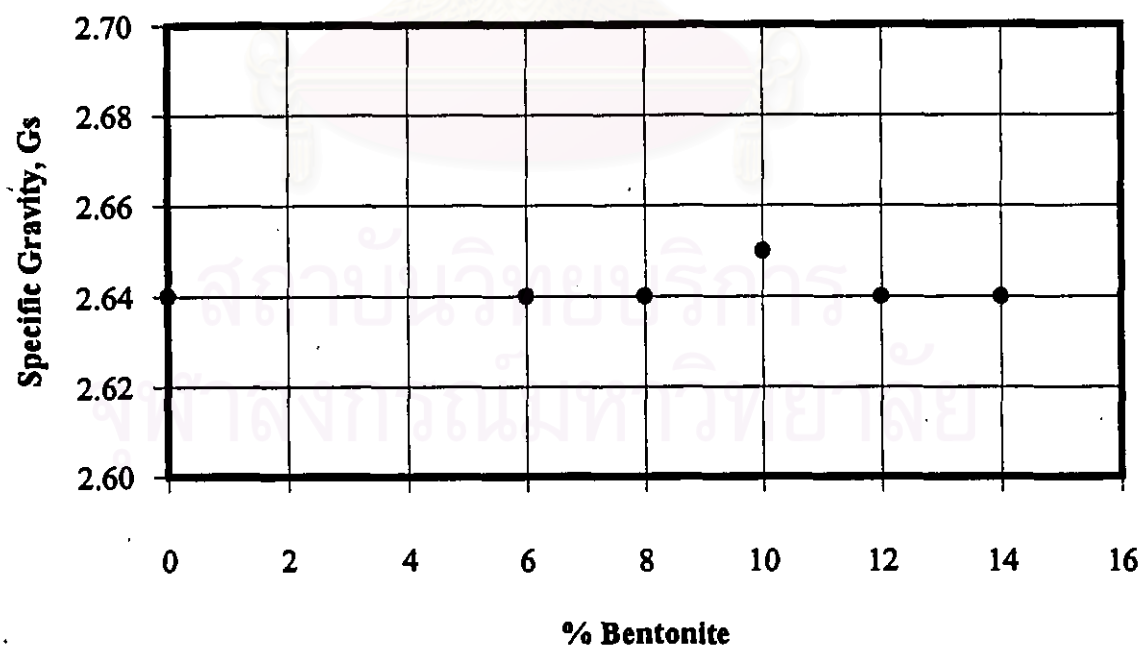
4.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ (Specific Gravity, Gs)

ค่าของความถ่วงจำเพาะใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาตรให้อยู่ในรูปของหน่วยมวลตามที่ต้องการในมาตรฐาน ASTM ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินตัวอย่าง ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM Standard D70 ตารางที่ 4.3 แสดงผลของค่าความถ่วงจำเพาะที่ทดสอบได้ และรูปที่ 4.2 แสดงแนวโน้มของค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน

จากความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและปริมาณเบนโทไนต์ในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์อยู่ในช่วงที่แคบมีค่าใกล้เคียงกันไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเบนโทไนต์ในวัสดุผสมที่ปริมาณ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าที่หาได้จึงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากของทรายเปล่า



รูปที่ 4.1 แสดงขนาดคละของทราย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและปริมาณเบนโทไนต์

ตารางที่ 4.3 ผลของการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

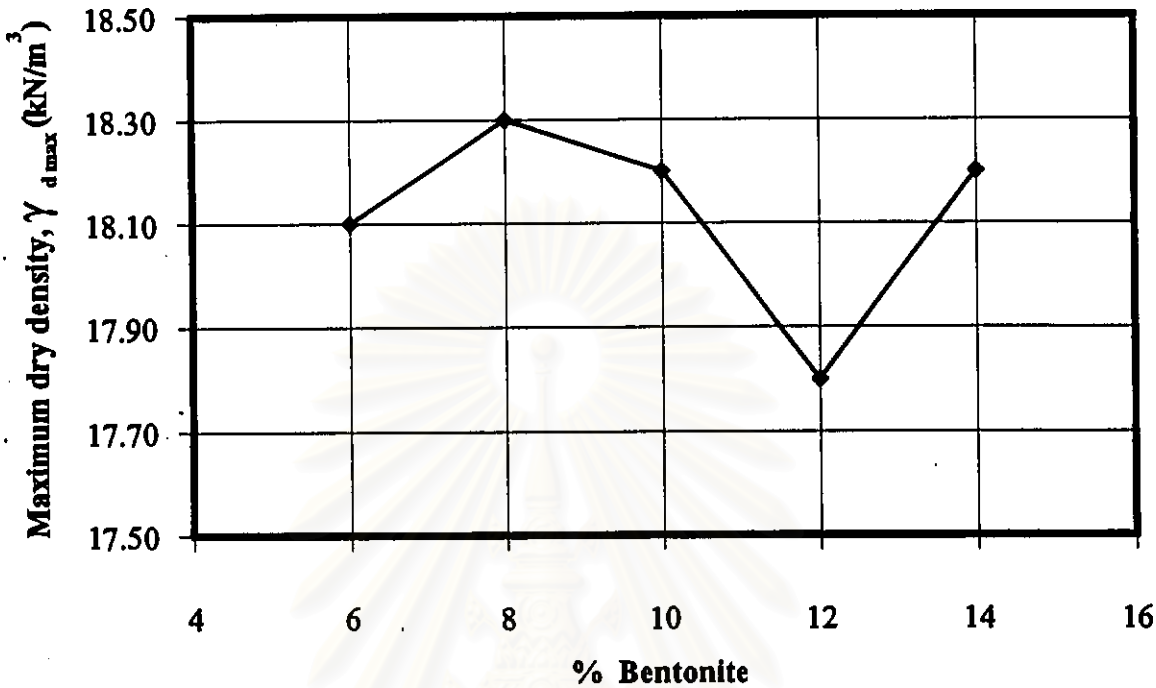
ลักษณะของตัวอย่าง	ค่าความถ่วงจำเพาะ
ทรายเปล่าที่ใช้ในวัสดุผสม	2.64
6 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	2.64
8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	2.64
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	2.65
12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	2.64
14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	2.64
เบนโทไนต์ที่ใช้ในวัสดุผสม	2.28

4.3 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Max Dry Density and Optimum moisture content)

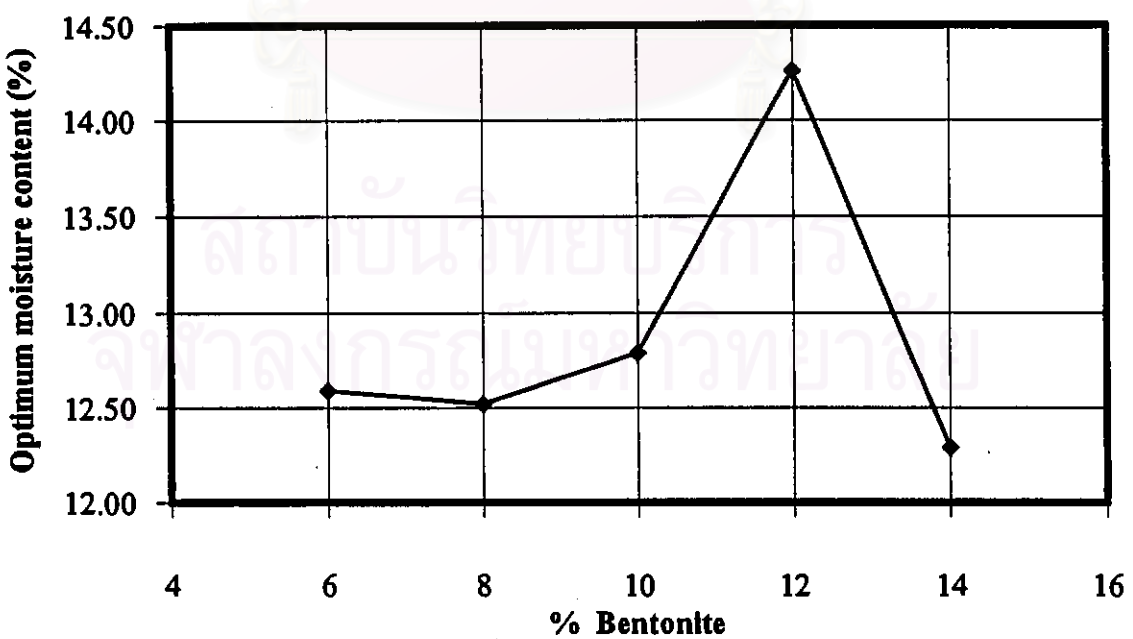
ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมทดสอบโดยใช้ Compaction Test แบบ Standard Procter Test ตามมาตรฐาน โดยทำการทดสอบ 2 ครั้งเพื่อตรวจสอบผล ตารางที่ 4.4 สรุปค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสม ค่าที่ทดสอบได้ในตารางที่ 4.4 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณเบนโทไนต์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ลักษณะของตัวอย่าง	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ความชื้นที่เหมาะสม (%)
ทรายเปล่าที่ใช้ในวัสดุผสม	17.0	14.98
6 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	18.1	12.59
8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	18.3	12.52
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	18.2	12.79
12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	17.8	14.26
14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	18.2	12.29



รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเบนโทไนต์



รูปที่ 4.4 ค่าความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณเบนโทไนต์

เนื่องจากปริมาณเบนโทไนต์ที่ใช้ในการผสมมีอัตราส่วนแตกต่างกันไม่มากนัก ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่หาได้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าช่วงของกราฟอยู่ในช่วง 17.0 –18.3 kN/m^3 ซึ่งแตกต่างกันไม่มาก ค่าความชื้นที่เหมาะสมในรูปที่ 4.4 ก็อยู่ในช่วง 12.29 – 14.98 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนัก จากผลการทดสอบแสดงว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์ในช่วง 8 – 14 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลเพียงพอที่จะทำให้ความหนาแน่นแห้งเปลี่ยนแปลงจนเห็นได้ชัดเจน ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่หาได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

4.4 ผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์, ปริมาณความชื้น, และความหนาแน่นแห้ง (Bentonite Content, Water Content, and Dry Density)

เพื่อควบคุมคุณภาพของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ การตรวจวัดหาปริมาณเบนโทไนต์ ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของวัสดุผสมตัวอย่างจึงต้องทำตลอดการทดสอบ โดยในการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์จะมีการทดสอบทั้งก่อนทำการบดอัดตัวอย่างและหลังจากที่การทดลองสิ้นสุดแล้วซึ่งแบ่งตรวจวัดทั้งส่วนบน, ส่วนกลาง, และส่วนล่างของตัวอย่าง (วัดตามความลึกส่วนละ 10 ซม.) ผลการทดสอบโดยเฉลี่ยของตัวอย่างที่ปริมาณเบนโทไนต์เท่ากันแสดงผลในตารางที่ 4.5 ส่วนผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์

ลักษณะของตัวอย่าง	ปริมาณเบนโทไนต์ที่วัดได้			
	ก่อนบดอัด	ส่วนบน	ส่วนกลาง	ส่วนล่าง
8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	8.15	7.18	7.71	7.67
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	10.17	9.88	9.92	9.90
12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	12.45	12.43	12.22	11.74
14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	14.40	14.41	13.96	14.14

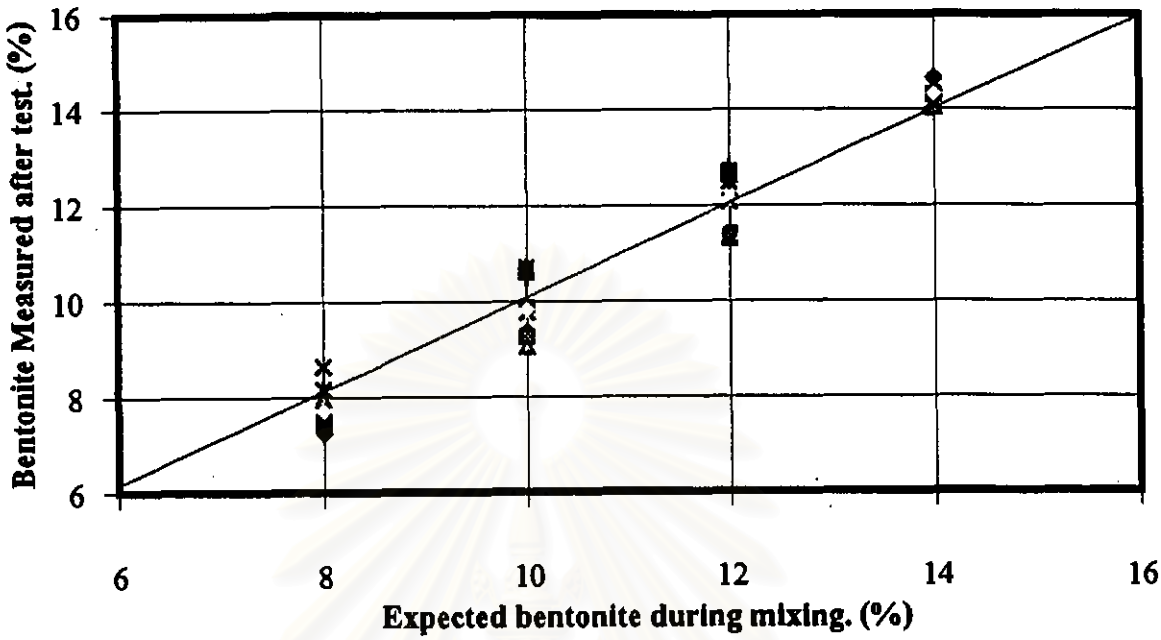
ผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์ทั้งหมดเขียนเป็นกราฟรวมกันในรูปที่ 4.5 และจากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณเบนโทไนต์ที่วัดได้ทุกครั้งใกล้เคียงกันกับปริมาณเบนโทไนต์ที่ต้องการมาก เป็นการยืนยันว่าวิธีการที่ใช้ในการผสมตัวอย่าง และลักษณะของตัวอย่างถูกต้อง คือมีความเป็นเนื้อเดียวกันตามที่ต้องการ ถึงแม้ว่าผลการทดสอบปริมาณเบนโทไนต์หลังจากที่การทดลองเสร็จสิ้นจะไม่สามารถแสดงได้ว่าปริมาณเบนโทไนต์ในส่วนกลางของตัวอย่างลดลง เพราะในการทดลองการเกิดรอยร้าวในบางตัวอย่างจะมีเบนโทไนต์ไหลออกมาด้วย อาจเป็นเพราะว่าปริมาณของเบนโทไนต์ที่ไหลออกมาขณะทำการทดสอบมีน้อยมาก จึงไม่สามารถตรวจวัดปริมาณที่สูญเสียได้ ทั้งนี้บริเวณที่เกิดรอยร้าวและมีโอกาสที่เบนโทไนต์จะถูกพัดพาออกมาได้เป็นบริเวณที่แคบมาก การเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจวัดจึงเป็นไปได้ยาก

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบหาปริมาณความชื้น

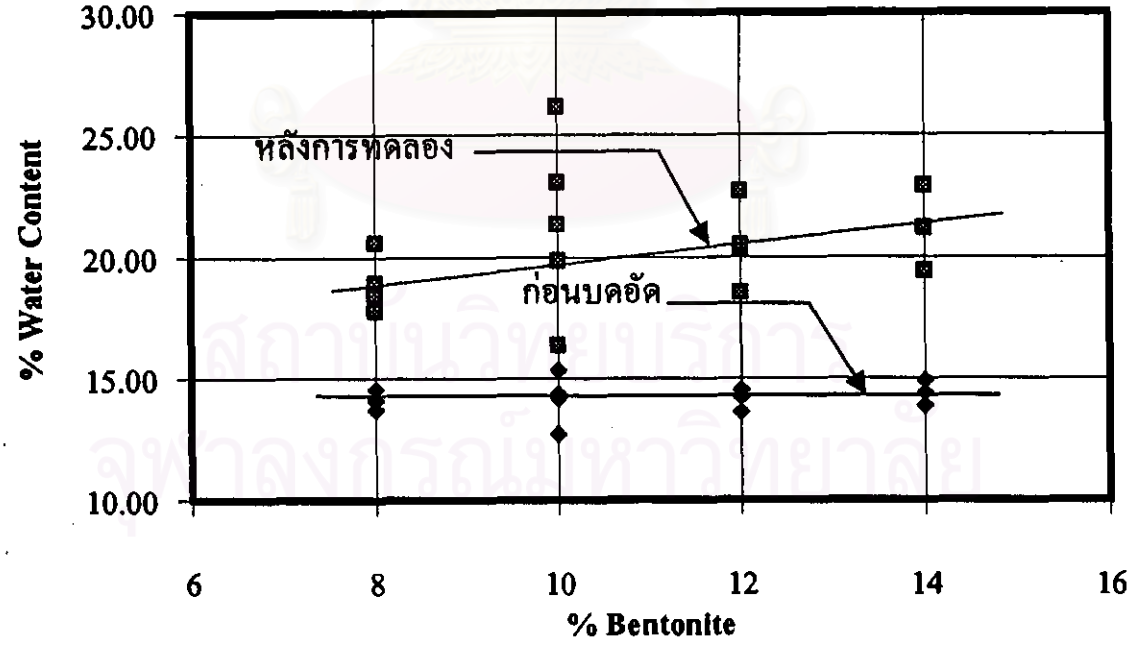
ลักษณะของตัวอย่าง	ปริมาณความชื้นที่วัดได้	
	ก่อนทำการบดอัด	สิ้นสุดการทดลอง
8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	14.11	18.93
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	14.17	21.36
12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	14.20	20.49
14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	14.38	21.16

จากตารางแสดงปริมาณความชื้น ค่าปริมาณความชื้นก่อนทำการบดอัดตัวอย่างลงกระบอกเซลล์ มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้คือ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งซึ่งได้จากการชั่งตัวอย่างก่อนทำการบดอัดเป็นไปตามที่ต้องการ ส่วนค่าปริมาณความชื้นหลังจากที่การทดลองสิ้นสุดแล้วก็มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นจากค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 6 เปอร์เซนต์ ค่าปริมาณความชื้นที่หาได้ทั้งหมดถูกนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบกับปริมาณเบนโทไนต์ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณความชื้นก่อนทำการบดอัดถูกควบคุมอย่างดีแนวโน้มของกราฟจึงออกมาเป็นเส้นตรง ส่วนปริมาณความชื้นที่ตรวจวัดหลังการทดลองเสร็จสิ้นที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าที่กระจายมากพอควรแต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ส่วนแนวโน้วของปริมาณความชื้นหลังทำการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเบนโทไนต์มีมากขึ้น ทั้งนี้น่าจะมาจากปริมาณเบนโทไนต์ที่มากกว่าสามารถเก็บน้ำ (ความสามารถในการยอมให้น้ำไหลซึมผ่านน้อยกว่า) ได้มากกว่านั่นเอง

0, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์ของทุกตัวอย่าง



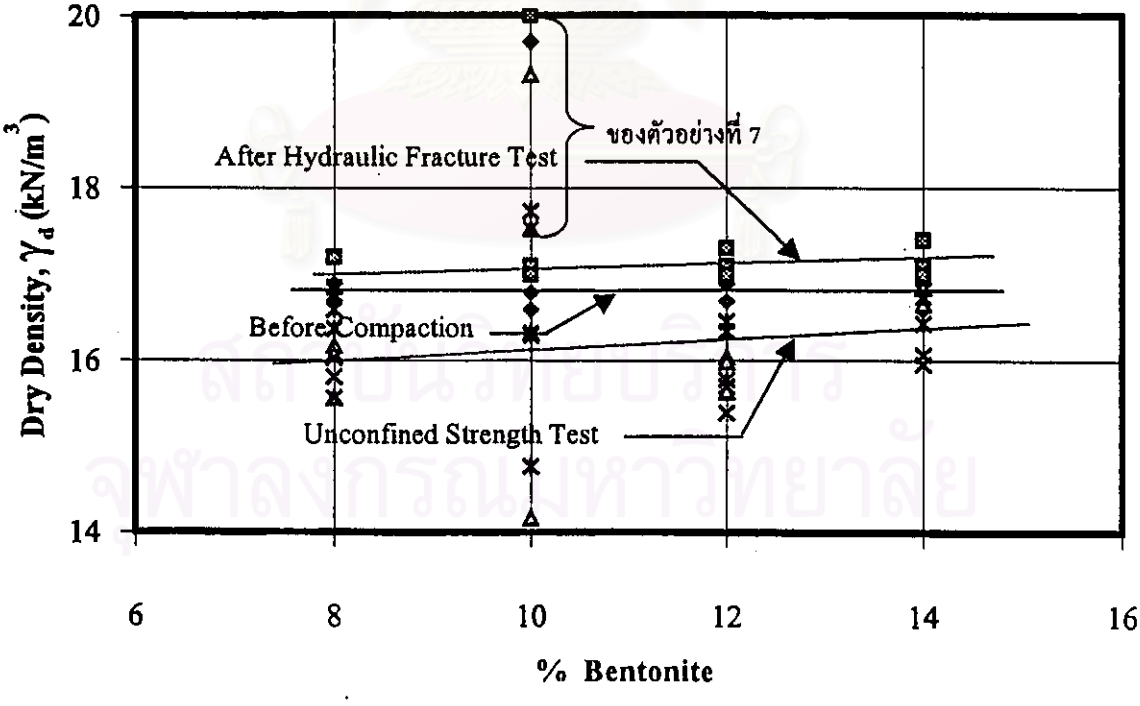
รูปที่ 4.6 ปริมาณความชื้นที่วัดได้ทั้งหมดกับปริมาณเบนโทไนต์

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบหาความหนาแน่นแห้ง

ลักษณะของตัวอย่าง	ความหนาแน่นแห้งที่วัดได้	
	ก่อนทำการบดอัด	สิ้นสุดการทดลอง
8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	16.8	17.2
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	16.7	17.0
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์(TN7)	19.7	20.0
12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	16.8	17.1
14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	16.7	17.2

(TN 7) มีค่าความหนาแน่นแห้ง = 20.0 kN/m^3

จากผลการทดสอบหาความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างที่ทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเป็นไปตามที่ต้องการและมีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น และน้ำหนักกดทับน้อยมาก ค่าความหนาแน่นแห้งที่ออกแบบไว้คือ 17.0, และ 20.0 kN/m^3 จึงเป็นค่าความหนาแน่นแห้งที่แท้จริงของตัวอย่างตลอดการทดลอง และเช่นเดียวกันผลการทดสอบที่ได้มาทั้งหมดถูกเขียนลงกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณเบนโทไนต์และแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นแห้งที่วัดได้ทั้งหมดกับปริมาณเบนโทไนต์

จากรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่วัดได้กับปริมาณเบนโทไนต์ จะเห็นว่าค่าที่นำมาเขียนลงกราฟแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือค่าที่หาได้หลังจากทำการบดอัด ค่าที่หาได้หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น และค่าที่หาได้จากการนำตัวอย่างไปทดสอบหาความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน (หัวข้อที่ 4.6) ซึ่งค่าความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบอันหลังสุดนี้ได้มาจากการวัดขนาดของตัวอย่างก่อนทำการกดตัวอย่างหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง ระหว่างทำการทดสอบปริมาณน้ำในตัวอย่างจึงมีโอกาสสูญหาย ค่าความหนาแน่นแห้งที่หามาได้จึงต่ำกว่าค่าจริงที่ควรจะเป็น แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้สามารถบอกแนวโน้มได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่เริ่มต้นบดอัดให้ค่าเท่ากัน (จากลักษณะกราฟที่เป็นเส้นตรง) ที่ปริมาณเบนโทไนต์มากขึ้นมีค่าความหนาแน่นแห้งมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าที่ได้มานี้น่าจะมาจากการสูญเสียความชื้นที่ปริมาณเบนโทไนต์มากเป็นไปได้ยากกว่า ส่วนค่าความหนาแน่นแห้งที่ตรวจวัดหลังจากที่การทดลองเสร็จสิ้นให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงกว่าค่าเริ่มต้นน่าจะมีผลมาจากน้ำหนักกดทับที่ให้ขณะทำการทดสอบ และที่สำคัญก็คือการเกิดรอยร้าวภายในตัวอย่างที่ทำให้ตัวอย่างทรุดตัวอย่างรวดเร็ว และที่ปริมาณเบนโทไนต์ที่มากกว่านี้การพัดพาตะกอนเบนโทไนต์เนื่องจากการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่าด้วย ตัวอย่างจึงทรุดตัวได้มากขึ้น เมื่อปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในคณะที่น้ำหนักคงที่ค่าความหนาแน่นแห้งจึงเพิ่มขึ้นด้วย

<u>หมายเหตุ</u> ผลการทดสอบหาปริมาณเบนโทไนต์ ปริมาณความชื้น ค่าความหนาแน่นแห้ง รวมทั้งพลังงานที่ใช้ในการบดอัดของแต่ละตัวอย่างโดยละเอียด แสดงในภาคผนวก

4.5 ความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำ (Hydraulic Conductivity)

ความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำทำการทดสอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวในวัสดุผสมเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยวิธีการทดสอบเป็นแบบความดันเปลี่ยนแปลง และทดสอบในแนวดิ่งดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ผลการทดสอบที่ได้มาจากการทดสอบหลาย ๆ ตัวอย่างนำไปสู่การวิเคราะห์ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นจึงได้อธิบายวิธีการเก็บข้อมูล การตรวจสอบค่าข้อมูลที่ได้ และส่วนของข้อมูลที่นำไปใช้ไว้ก่อนในส่วนต้น เพราะค่าข้อมูลแสดงความสามารถในการไหลซึมผ่านที่นำเสนอไม่ใช่ค่าเฉลี่ยแต่เป็นค่าที่เลือกมาโดยดูจากพฤติกรรมของวัสดุผสมตัวอย่างที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบที่น่าสนใจ

จากการวัดปริมาณน้ำโดยวัดค่า H1, H2 และ H3 ที่ค่าเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 4.8 ค่าของ H1 จะมากกว่าค่า H2H3 ค่าสัมประสิทธิของการไหลซึมหรือค่า k ในเวลาถัดไปจึงต่ำกว่าค่าแรก ทั้ง

ๆ ที่ค่าความอิ่มตัว (Degree of Saturation, S) ที่มากขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำในตัวอย่างที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่า k เพิ่มมากขึ้นด้วย และมากที่สุดที่ค่าความอิ่มตัวเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพราะก่อนทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแรงดันน้ำจะถูกอัดเข้าไปเพื่อทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว (หัวข้อที่ 3.4) แรงดันน้ำนี้จะถูกคลายออกก่อนทำการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน เพื่อไม่ให้แรงดันที่ค้างอยู่ภายในตัวอย่างมีผลกระทบต่อค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (โดยเฉพาะที่แรงดันทดสอบต่ำกว่าแรงดันที่ใช้ในการอิ่มตัว) ปริมาณน้ำที่สามารถเข้าไปในตัวอย่างในตอนต้นจึงมีปริมาณมาก เพราะแรงดันในตัวอย่างยังมีน้อย จนกระทั่งแรงดันในตัวอย่างเริ่มคงที่ (มีค่าเท่ากับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ) ปริมาณน้ำที่สามารถไหลเข้าไปได้จึงเริ่มคงที่ ค่าความแตกต่างของระดับน้ำที่วัดได้จึงเริ่มคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าสัมประสิทธิในการไหลซึมผ่านของตัวอย่างที่ 1 (8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์, 100 kPa) แสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่า k เริ่มลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดสอบมากขึ้นจนกระทั่งค่า k คงที่ ค่า k ที่คงที่นี้ไม่มีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นบ่งบอกได้ว่าวัสดุผสมตัวอย่างอิ่มตัวแล้ว ค่า k นี้จึงเป็นค่าที่ถูกต้องจริงตามทฤษฎีของตัวอย่าง ในตารางที่ 4.8 แสดงค่า k ของวัสดุผสมตัวอย่างตามปริมาณเบนโทไนต์

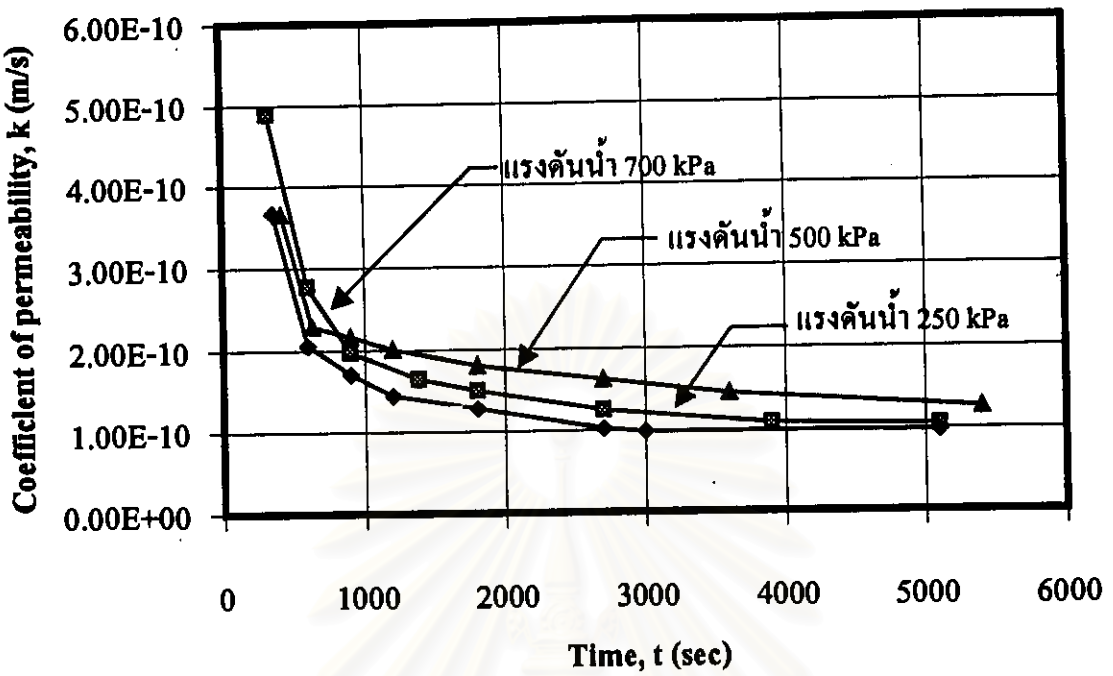
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการบันทึกระดับน้ำขณะทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน

VARIABLE HEAD TEST

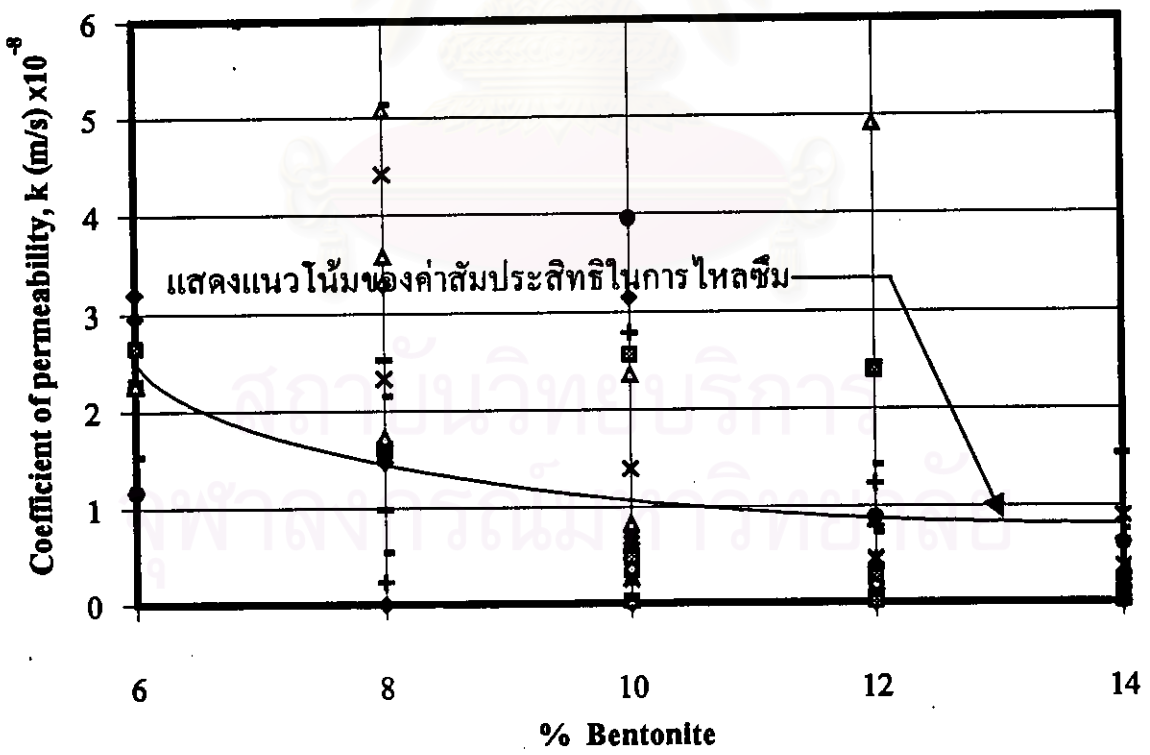
TEST No. Date

Description Test by

Hydraulic Pressure (kPa)	Time (min)	H Symbol	Water Level (cm)	Remark
500	10	H1	2	H1 = 2
	10	H2	2	H2H3 = 2
	10	H3	2	H'1 = H'2H'3 = 2



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิในการไหลซึมผ่านกับเวลา



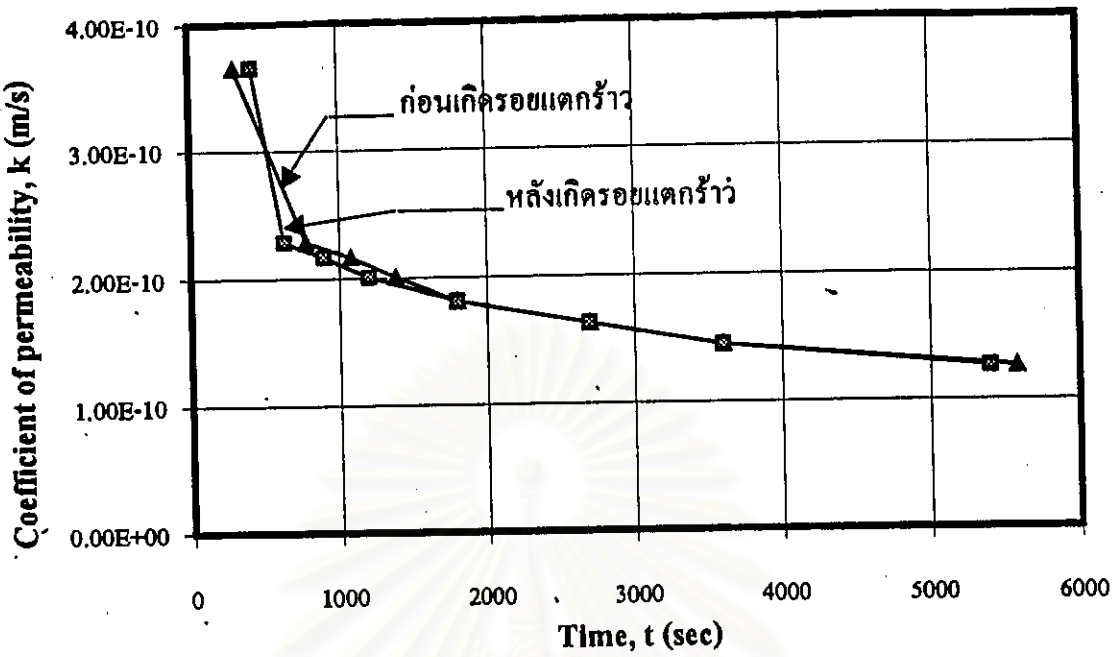
รูปที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิในการไหลซึมผ่านกับปริมาณเบนโทไนต์

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึมกับปริมาณเบนโทไนต์

ลักษณะของตัวอย่าง	ค่าสัมประสิทธิ์ในการไหลซึม(m/s)
ทรายเปล่าที่ใช้ในวัสดุผสม	10^{-5} - 10^{-6}
6 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	10^{-7} - 10^{-8}
8 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	10^{-7} - 10^{-8}
10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	10^{-7} - 10^{-8}
12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	10^{-7} - 10^{-9}
14 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์	10^{-8} - 10^{-10}

ผลการทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำทั้งหมดนำมาเขียนกราฟรวมกันแสดงในรูปที่ 4.9 แนวโน้มของกราฟมีค่าลดลงที่ปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มมากขึ้น แสดงว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เพราะเบนโทไนต์มีคุณสมบัติในการต้านการไหลซึมผ่านของน้ำ (Impervious Material) ปริมาณของเบนโทไนต์ในวัสดุผสมที่มากขึ้นย่อมทำให้วัสดุผสมนั้นสามารถต้านการไหลซึมผ่านของน้ำได้มากขึ้นด้วย

จากที่กล่าวมาแล้ว มีการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านหลังจากเกิดรอยแตกร้าวในวัสดุผสม เพื่อทำการเปรียบเทียบศึกษาความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการเกิดรอยแตกร้าว แต่ผลที่ทดสอบได้ไม่ปรากฏความแตกต่างมากนัก รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำที่แรงดันน้ำเดียวกัน (ของตัวอย่างที่ 1) จะเห็นว่ากราฟที่ได้ไม่แตกต่างกันมากพอที่จะสรุปได้ว่าหลังจากเกิดรอยแตกร้าวแล้วความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำจะมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำให้เกิดรอยแตกร้าว อัดแรงดันน้ำเข้าวัสดุผสมตัวอย่างในแนวราบ รอยร้าวที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จึงน่าจะเกิดขึ้นในแนวราบและไม่ได้ส่งผลให้ตัวอย่างร้าวต่อเนื่องกันทั้งหมด การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำกระทำในแนวดิ่งดังนั้นผลของการเกิดรอยร้าวจึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลซึมผ่านนี้ได้ ของตัวอย่างอื่น ๆ ก็ให้ผลการทดสอบในแนวทางเดียวกัน ค่าผลการทดสอบที่หาได้เขียนรวมกันในรูปที่ 4.9 แล้ว



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมของน้ำก่อนและหลังการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำ

4.6 การเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำในวัสดุผสม

การทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กโดยอาศัยแรงดันน้ำเป็นตัวก่อ แรงดันน้ำที่ใช้เพื่อก่อให้เกิดรอยแตกร้าวได้นั้นต้องมีค่ามากกว่าความสามารถในการต้านทานแรงดันด้านข้าง (Resistance to Lateral Pressure) ของวัสดุผสม และความสามารถในการต้านทานการพัดพาตะกอนขนาดเล็ก (เบนโทไนต์) ในวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์ โดยมีหลักการตามที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นน้ำหนักกดทับและปริมาณเบนโทไนต์ในตัวอย่างจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทดสอบการก่อรอยร้าว ที่ปริมาณเบนโทไนต์หนึ่งจึงใช้น้ำหนักกดทบ 3 ค่า คือ 100 kPa, 250, kPa และ 400 kPa เพื่อศึกษาผลการทดลองที่เปลี่ยนไปเมื่อน้ำหนักกดทับเพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวถึงวิธีการทำการทดสอบการก่อรอยแตกร้าวไว้แล้วในบทที่ 3 จากการทำการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อแรงดันน้ำถูกเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง อัตราการไหลของน้ำจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นแบบทันทีทันใด ซึ่งตรงจุดนี้น่าจะบ่งได้ว่าเป็นจุดที่แรงดันน้ำสามารถชนะการต้านทานแรงดันด้านข้างของวัสดุผสมตัวอย่าง ตารางที่ 4.10 เป็นตารางสรุปผลการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กของตัวอย่าง

ทั้งหมดพร้อมกับน้ำหนักกดทับจริง ส่วนผลการทดสอบของแต่ละตัวอย่างแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณเบนโทไนต์กับอัตราการไหลของน้ำ

ที่แรงดันน้ำทดสอบเดียวกันอัตราการไหลของน้ำแสดงพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน ดังนั้นการทดสอบในแต่ละความดันจึงต้องใช้เวลาเพื่อรอให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ การทดสอบสิ้นสุดลงเมื่ออัตราการไหลเร็วมากจนจับเวลาไม่ทันคือค่าเวลาที่จับได้มีค่าใกล้เคียงกันมากกับค่าที่ได้จากแรงดันเดิม ดังนั้นผลที่แสดงออกมาส่วนใหญ่ค่าที่ได้หลังจากเกิดรอยแตกร้าวแล้วจะมีค่าคงที่ หรือบางตัวอย่างอาจลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการจับเวลาที่คลาดเคลื่อนไม่ใช่ผลที่ควรจะเป็นจริงตามการทดลอง อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของน้ำน่าจะคงที่ในที่สุด นอกจากที่แรงดันน้ำสูงมาก ๆ อาจเพิ่มปริมาณรอยร้าวหรือกัดเซาะตะกอนของเบนโทไนต์ได้มากขึ้นทำให้อัตราการไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้นซึ่งยังเป็นข้อสมมุติฐานอยู่ จนกว่าจะสามารถพัฒนาเครื่องมือให้สามารถวัดค่าที่คาดหวังนั้นได้

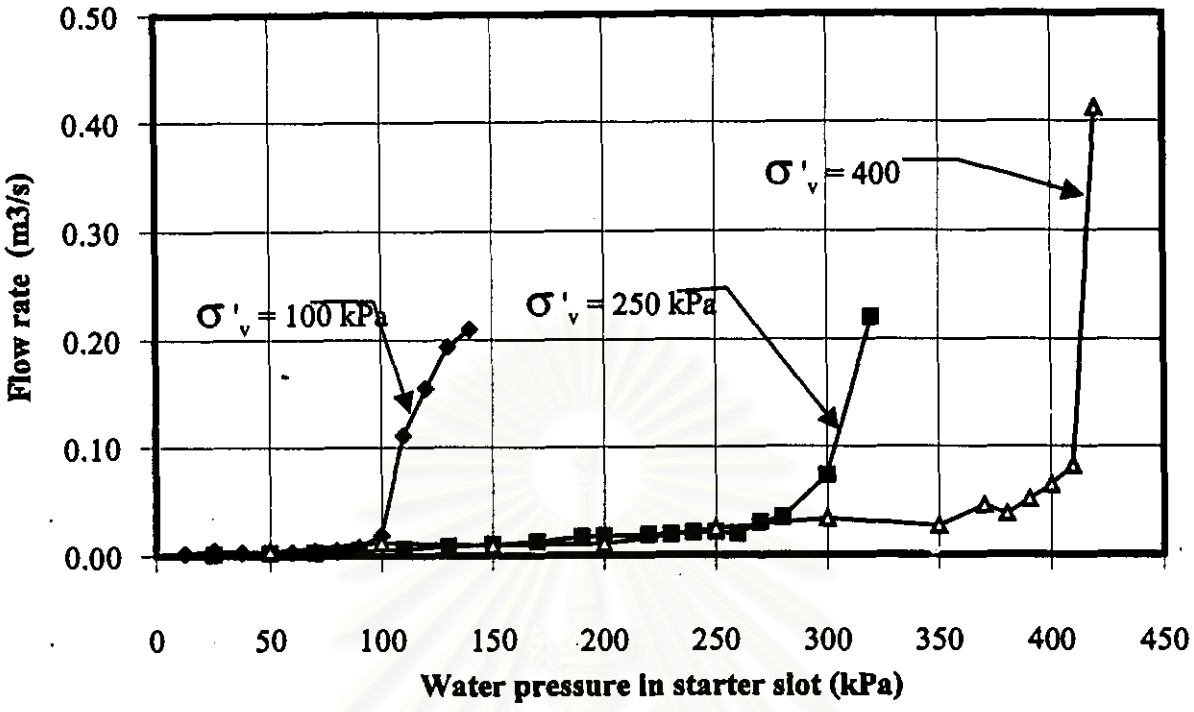
การทดสอบเพื่อศึกษาผลการต้านทานแรงดันน้ำของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์หลังจากการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กกระทำที่ความดันค่อนข้างต่ำ ผลที่ได้ออกมาจึงยังไม่ชัดเจนมากนัก แต่ก็พอจะสรุปความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ในบางตัวอย่าง ผลของการทดสอบนำเสนอรวมกันกับผลการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก

ผลการทดสอบที่แสดงในตาราง 4.10 แสดงทั้งปริมาณเบนโทไนต์ ค่าความหนาแน่นแห้งและน้ำหนักกดทับที่มีผลต่อค่าแรงดันน้ำที่ก่อให้เกิดรอยแตกร้าวในวัสดุผสม เริ่มจากที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นแห้ง 17.0 kN/m^3 เท่ากัน แต่มีค่าน้ำหนักกดทับต่างกันคือ 100, 250, และ 400 kPa ในตัวอย่างที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ค่าของผลการทดสอบที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 เปอร์เซ็นต์แสดงรวมกันในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ทดสอบได้กับค่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดสอบ ค่าแรงดันน้ำที่สามารถก่อรอยร้าวที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นค่าที่แสดงไว้แล้วในตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์เดียวกันอิทธิพลของการเกิดรอยแตกร้าวคือน้ำหนักกดทับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำที่ก่อรอยร้าวกับน้ำหนักกดทับให้ค่าใกล้เคียง 1.0 เช่นเดียวกันกับผลการทดสอบของวัสดุผสมตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12

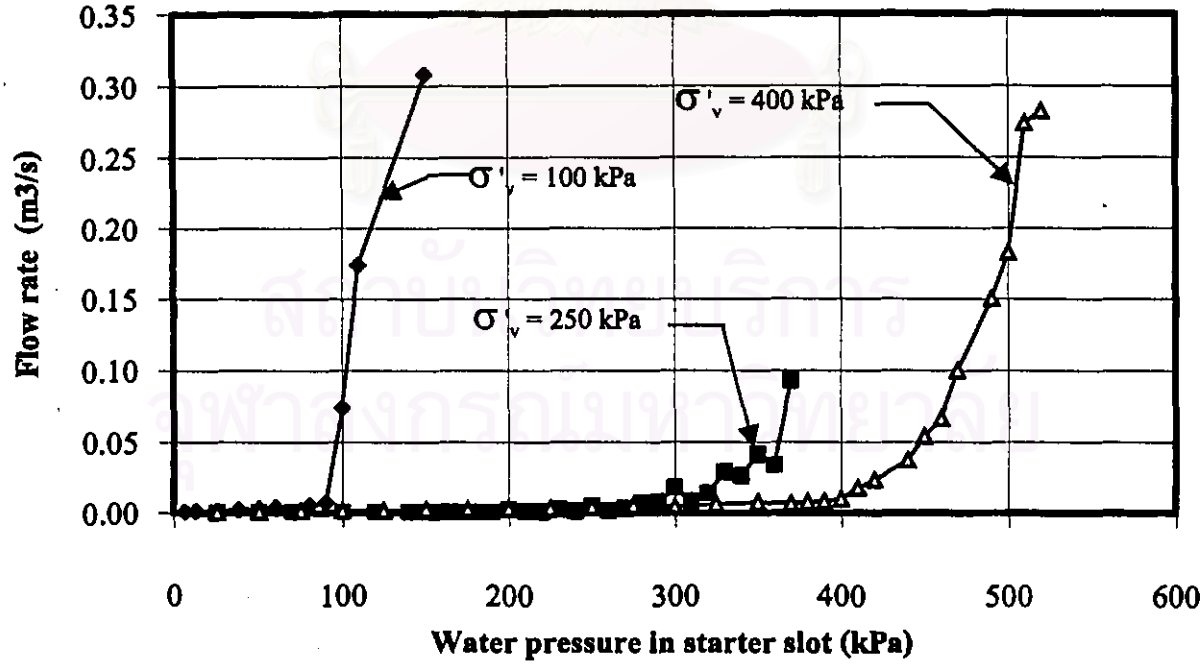
ตารางที่ 4.10 สรุปผลการทดสอบการก่อให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก

ตัวอย่างที่	ปริมาณเบนโทไนต์ (%)	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m^3)	น้ำหนักกดทับ (kPA)	แรงดันน้ำที่ก่อรอยร้าว (kPA)	อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำกับน้ำหนักกดทับ
TN1	8	17.0	100	100	1.00
TN2	8	17.0	250	270	1.08
TN3	8	17.0	400	410	1.02
TN4	10	17.0	100	95	0.95
TN5	10	17.0	250	280	1.12
TN6	10	17.0	400	415	1.04
TN7	10	20.0	250	400	1.60
TN8	12	17.0	100	190	1.90
TN9	12	17.0	250	410	1.64
TN10	12	17.0	400	640	1.60
TN11	14	17.0	100	305	3.05
TN12	14	17.0	100	270	2.70
TN13	14	17.0	250	295	1.18
TN14	14	17.0	250	350	1.40
TN15	14	17.0	250	270	1.08

ระหว่างการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่น สังเกตุเห็นได้ว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีลักษณะเป็นระนาบในแนวราบเกือบเป็นเส้นตรง โดยที่รอยร้าวดังกล่าวแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองส่วน แม้จะไม่ชัดเจนในบางตัวอย่างแต่ก็พอสรุปลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ว่าคล้ายกัน เพราะแรงดันน้ำที่อัดเข้าในตัวอย่างก็อัดออกไปในแนวราบและเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด รอยร้าวแรกที่ก่อเกิดจึงควรเป็นรอยร้าวในแนวราบแล้วกระจายต่อเนื่องออกไปอย่างรวดเร็ว โอกาสที่จะเกิดในระนาบอื่นก็น่าจะมีบ้างถ้าความแข็งแรง ณ จุดนั้นมีน้อย เป็นที่น่าเสียดายว่าไม่สามารถตรวจวัดปริมาณเบนโทไนต์ที่สูญเสียในบริเวณนั้นได้ แต่การสูญเสียเบนโทไนต์จากการกัดกร่อนของแรงดันน้ำที่อัดเข้าไปในตัวอย่างย่อมเกิดขึ้นแน่นอน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa



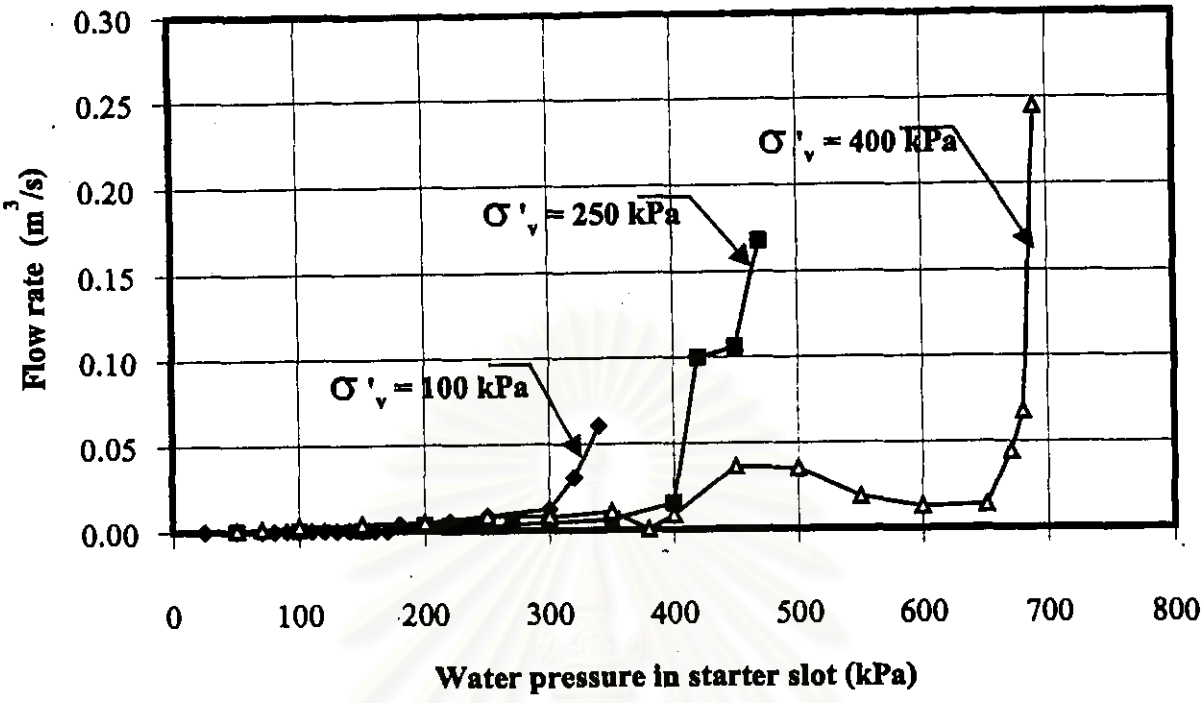
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa

เห็นได้ว่าทั้งสองสัดส่วนผสม คือ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์ให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำที่ก่อรอยร้าวและน้ำหนักกดทับใกล้เคียงกัน การทดสอบที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์นี้ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำและน้ำหนักกดทับใกล้เคียง 1.7 ซึ่งมากกว่าของปริมาณเบนโทไนต์ที่ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณเบนโทไนต์เป็นปัจจัยอีกตัวหนึ่งนอกเหนือจากน้ำหนักกดทับ กล่าวได้ว่าปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดันด้านข้างของตัวอย่าง ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นความสามารถในการต้านการไหลซึมที่เพิ่มขึ้น และต้านการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นด้วย ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์เบนโทไนต์สามารถเชื่อมวัสดุผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนเมื่อน้ำหนักกดทับเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นด้วย

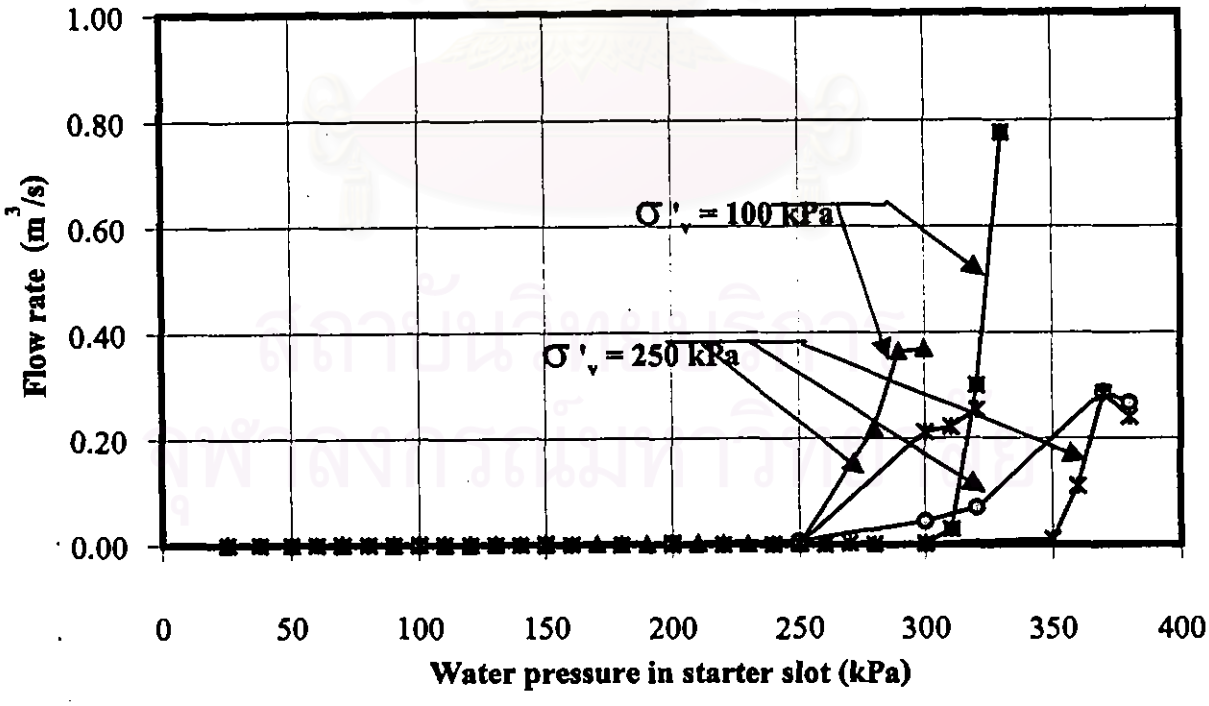
ผลการทดสอบวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์แสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำและน้ำหนักกดทับในการทดสอบนี้ไม่ใกล้เคียงกัน แต่กลับให้แรงดันน้ำที่สามารถก่อรอยแตกร้าวในวัสดุผสมใกล้เคียงแทน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ก่อน สามารถแยกวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

1. ที่น้ำหนักกดทับ 100 kPa แรงดันน้ำที่สามารถก่อรอยร้าวในวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์สูงที่สุด คือประมาณ 300 kPa มากกว่าของ 12 เปอร์เซ็นต์คือ 180 kPa และของ 10 กับ 8 เปอร์เซ็นต์คือ 100 kPa แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100 kPa ความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนต์
2. ที่น้ำหนักกดทับ 250 kPa แรงดันน้ำที่สามารถก่อรอยร้าวในวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์อยู่ที่ประมาณ 320 kPa เพิ่มขึ้นไม่มากนัก ในขณะที่ของ 12 เปอร์เซ็นต์คือ 400 kPa และของ 10 กับ 8 เปอร์เซ็นต์คือ 250 kPa เห็นได้ว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 250 kPa สามารถต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างได้สูงสุด

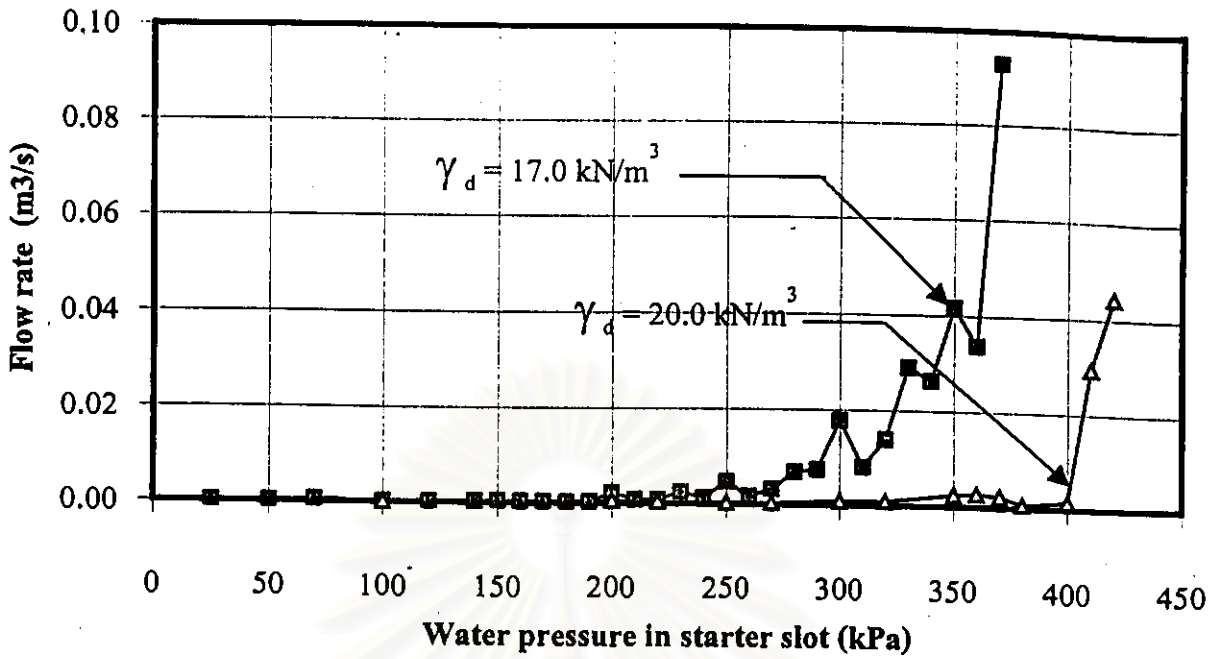
จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 ข้อพอจะสรุปได้ว่า วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์สามารถต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างได้สูงสุดประมาณ 300 kPa ผลของความหนาแน่นแห้งก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกร้าวในวัสดุผสม รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบผลการเกิด



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa



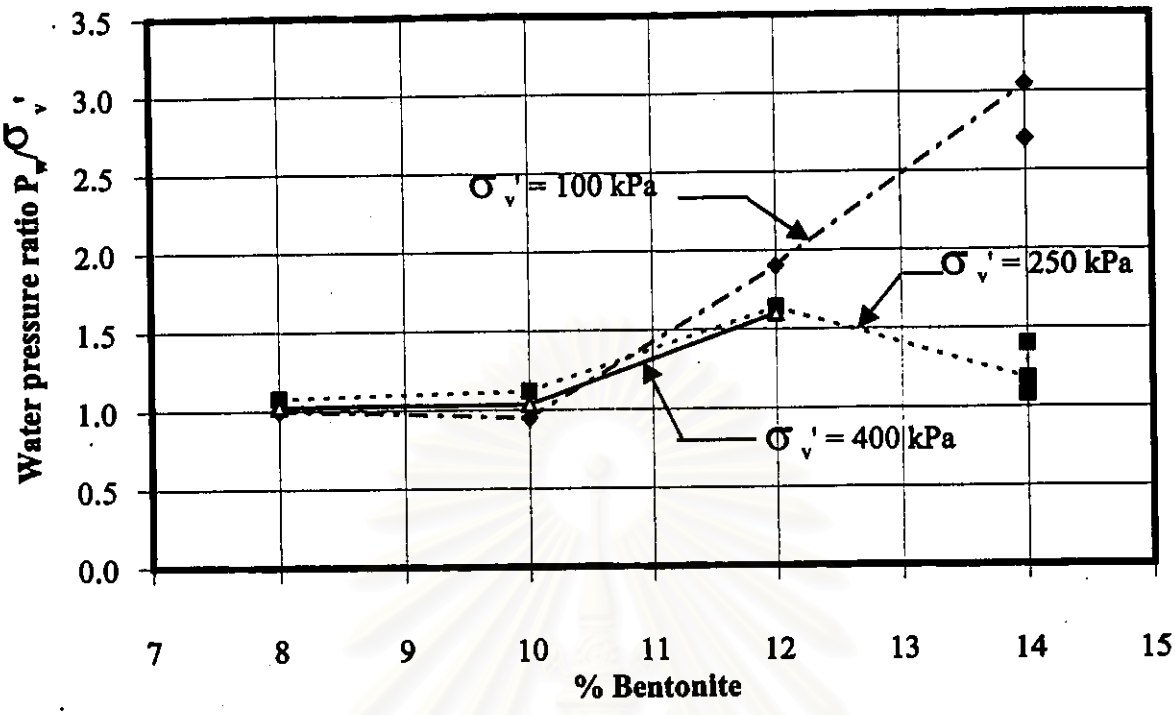
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250, และ 400 kPa



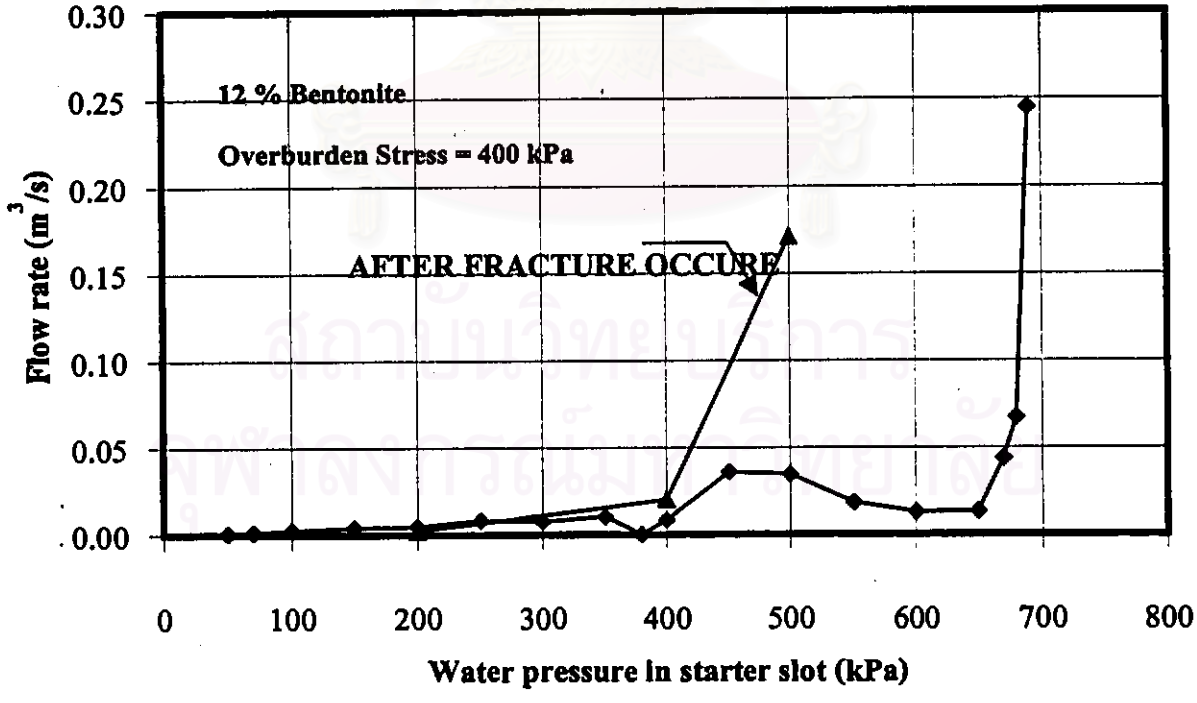
<u>รูปที่ 4.15</u> ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าแรงดันน้ำ ของตัวอย่างที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 250 kPa ความหนาแน่นแห้ง 17.0 และ 20.0 kN/m^3

รอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับเดียวกันคือ 250 kPa เป็นไปตามความคาดหมาย ที่ความหนาแน่นแห้งสูงกว่าคือ 20.0 kN/m^3 สามารถต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างได้มากกว่าที่ความหนาแน่น 17.0 kN/m^3 ค่าแรงดันน้ำด้านข้างที่สามารถก่อให้เกิดรอยร้าวที่ความหนาแน่นแห้ง 20.0 kN/m^3 ภายใต้น้ำหนักกดทับ 250 kPa นี้มีค่าเท่ากันกับของน้ำหนักกดทับ 400 kPa ที่ปริมาณเบนโทไนต์เดียวกัน

ผลของอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ก่อรอยแตกร้าวกับน้ำหนักกดทับกับปริมาณเบนโทไนต์เขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ากราฟในช่วงแรก (8-10 เปอร์เซ็นต์) จะให้ค่าอัตราส่วนใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ และกระจัดกระจายที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลอีกครั้งหลังจากที่ตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าวแล้ว ส่วนใหญ่อัตราการไหลของน้ำที่แรงดันน้ำเดียวกันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นอยู่ก่อนแล้ว อย่างไรก็



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ก่อรอยแตกร้าว กับน้ำหนักกดทับกับปริมาณเบนโทไนต์



รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบหาความสามารถในการไหลหลังจากเกิดรอยแตกร้าวในตัวอย่าง

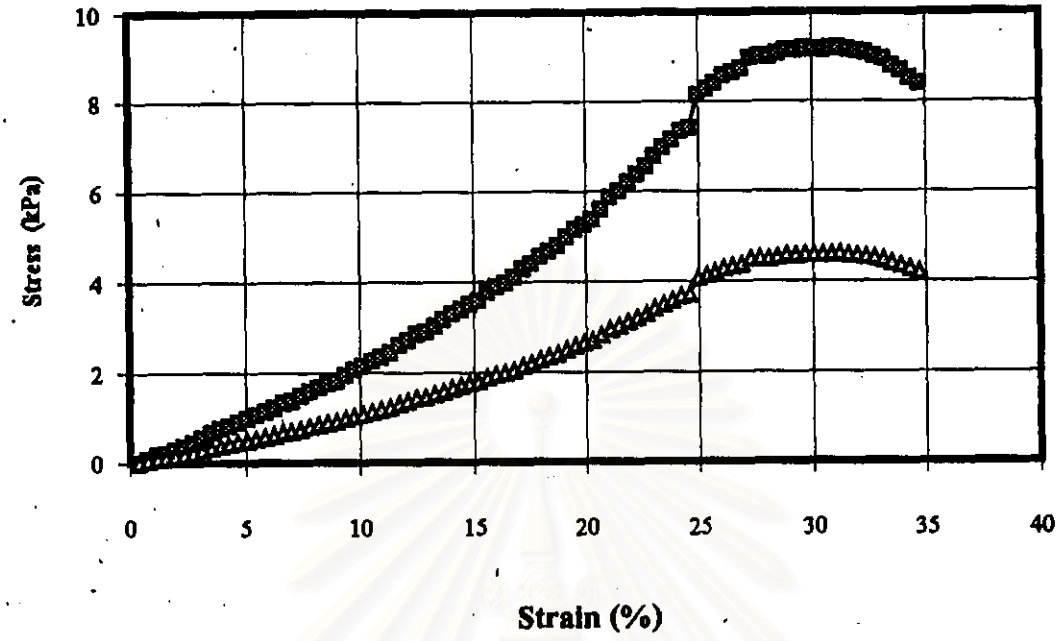
ตามในบางตัวอย่างผลที่ได้ไม่ชัดเจนนักอาจเป็นเพราะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก น้ำหนักกดทับอาจทำให้รอยแตกร้าวดังกล่าวปิดทับกันสนิทแรงดันน้ำที่ใช้ในการทดสอบถ้าไม่มากพอที่จะเปิดรอยร้าวใหม่ได้อัตราการไหลของน้ำก็ไม่มีโอกาสที่จะเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบในบางตัวอย่างจึงแสดงว่าที่แรงดันน้ำสูงขึ้นค่าหนึ่งจึงสามารถทำให้อัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าแรงดันที่ก่อรอยแตกร้าว ทั้งนี้เป็นเพราะตัวอย่างสูญเสียความแข็งแรงจากการแตกร้าวในครั้งแรกไปแล้วนั่นเอง

4.6 ผลการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงเฉือน (Shear Strength Property)

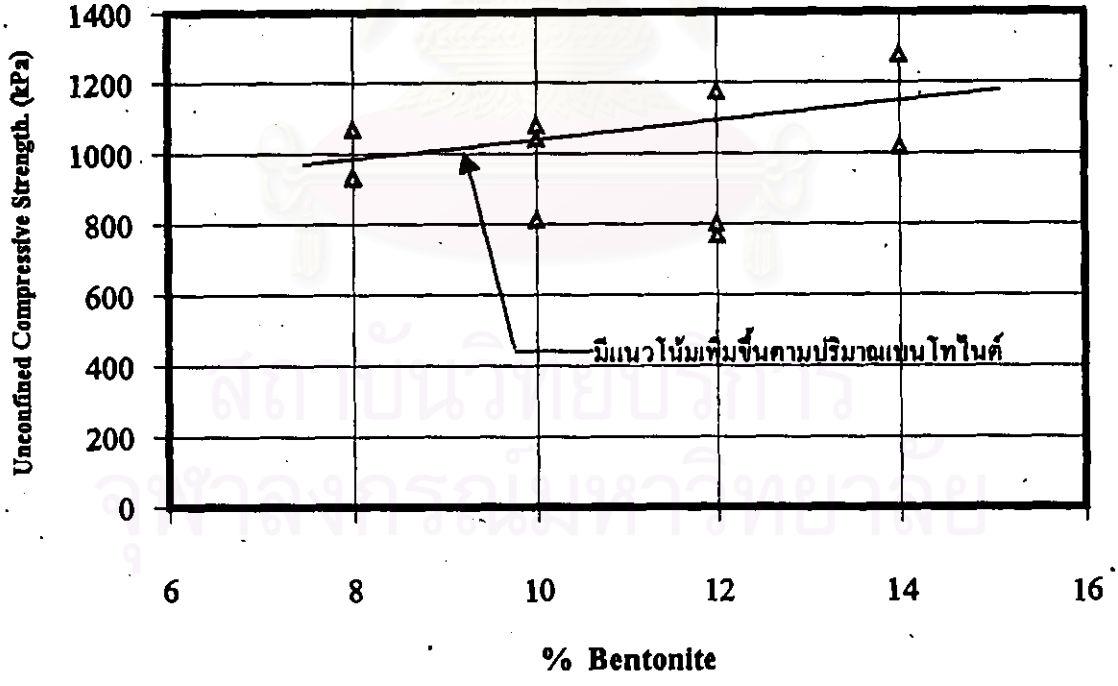
การทดสอบหาความสามารถในการรับแรงเฉือนของวัสดุผสมตัวอย่าง ทดสอบโดยวิธี Unconfined Strength Test วัสดุผสมตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือส่วนบน, ส่วนกลาง ซึ่งเป็นส่วนที่มีรอยแตกร้าว, และส่วนล่าง ตามความลึก โดยความลึกในแต่ละช่วงแบ่งช่วงละ 10 ซม. ผลที่ทดสอบได้จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.18 ส่วนค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงเฉือนของวัสดุผสมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	ปริมาณเบนโทไนต์ (%)	น้ำหนักกดทับ (kN/m^3)	Shear Stress (kPa)		
			ส่วนบน	ส่วนกลาง	ส่วนล่าง
TN1	8	17.0	24.40	28.16	42.19
TN2	8	17.0	40.56	34.36	42.06
TN3	8	17.0	31.73	33.32	48.35
TN4	10	17.0	13.49	14.67	36.71
TN5	10	17.0	30.24	39.88	48.80
TN6	10	17.0	28.52	29.83	47.08
TN7	10	20.0	56.36	58.08	89.41
TN8	12	17.0	16.07	18.52	34.72
TN9	12	17.0	40.38	39.93	36.22
TN10	12	17.0	43.41	45.31	53.15
TN11	14	17.0	38.43	27.75	57.81
TN12	14	17.0	34.13	47.80	46.04



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุผสมตัวอย่างที่ 1



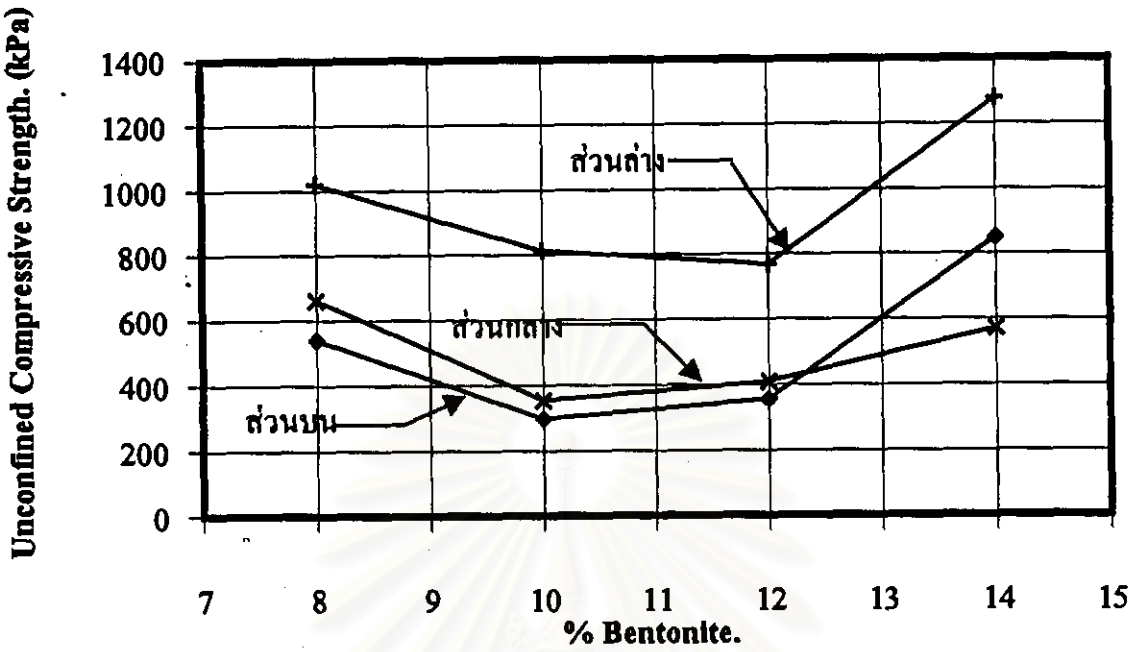
รูปที่ 4.19 ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่ส่วนต่างของทุกตัวอย่าง

จากผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมดส่วนใหญ่แล้วค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามความลึก คือที่ส่วนล่างจะให้ค่าสูงสุด ทั้งนี้น่าจะเป็นผลมาจากน้ำหนักกดทับที่ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นในส่วนล่างเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.19 แสดงค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่หาได้ที่ส่วนล่างของทุกตัวอย่างจะเห็นว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มมากขึ้น ส่วนรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนกับปริมาณเบนโทไนต์ที่น้ำหนักกดทับเดียวกันคือ 100 kPa จะเห็นได้ว่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่ส่วนล่างให้ค่าสูงสุด ส่วนบนและส่วนกลางให้ค่าใกล้เคียงกัน โดยถ้าพิจารณาตามปริมาณเบนโทไนต์จะเห็นว่าลักษณะของกราฟไปในทางเดียวกันทั้ง 3 เส้นคือมีค่าลดลงที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10 เปอร์เซ็นต์แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณเบนโทไนต์มากขึ้น

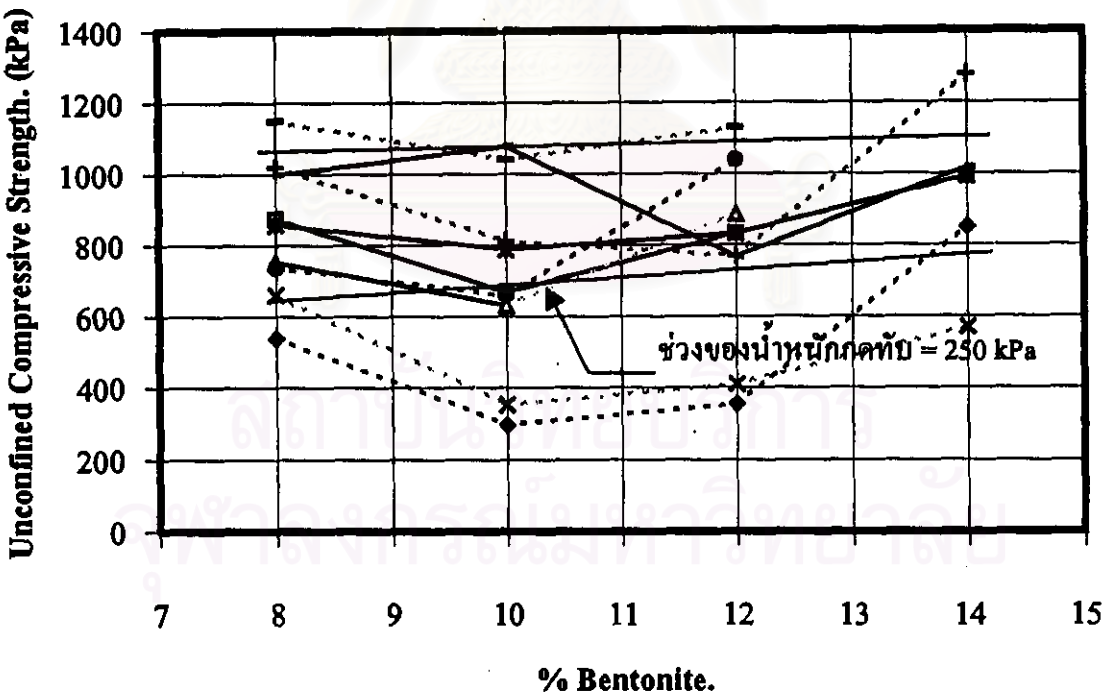
เป็นที่น่าสังเกตุตามตัวอย่างแต่ละตัวอย่างถึงพฤติกรรมในการต้านทานแรงเฉือน จากรูปที่ 4.20 ผลการทดสอบที่ส่วนกลางของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้ต่ำลงตามที่คาดหมายว่าเมื่อเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้นในวัสดุผสมตัวอย่างแล้วค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนน่าจะลดลง แต่กลับมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่หาได้ในส่วนต้น ทั้งนี้น่าจะมาจากผลของการเกิดรอยร้าวของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ดังกล่าว มีลักษณะการเกิดเป็นระนาบในแนวนอน รอยแตกร้าวที่เกิดมีขนาดเล็กมาก และรอยแตกร้าวอาจโดนปิดทับโดยน้ำหนักกดทับตัวอย่าง จึงไม่ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนลดลง

นอกจากนั้นรูปที่ 4.20 ยังแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของส่วนกลางกลับน้อยกว่าส่วนบนอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้น่าจะเนื่องมาจากปริมาณเบนโทไนต์มีการสูญเสียขณะเกิดรอยแตกร้าวมากกว่าของวัสดุผสมตัวอย่างอื่น (สังเกตุด้วยตา) เมื่อวัสดุผสมขาดเบนโทไนต์ซึ่งช่วยการเชื่อมแน่นลดลงความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนย่อมลดลงด้วย อย่างไรก็ตามที่น้ำหนักกดทับ 250 kPa ไม่ปรากฏพฤติกรรมดังกล่าว ค่าของทั้ง 3 ส่วนให้ผลใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่น้ำหนักกดทับ 100 kPa



รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบของตัวอย่างทั้งหมด และช่วงของน้ำหนักกดทับ 250 kPa

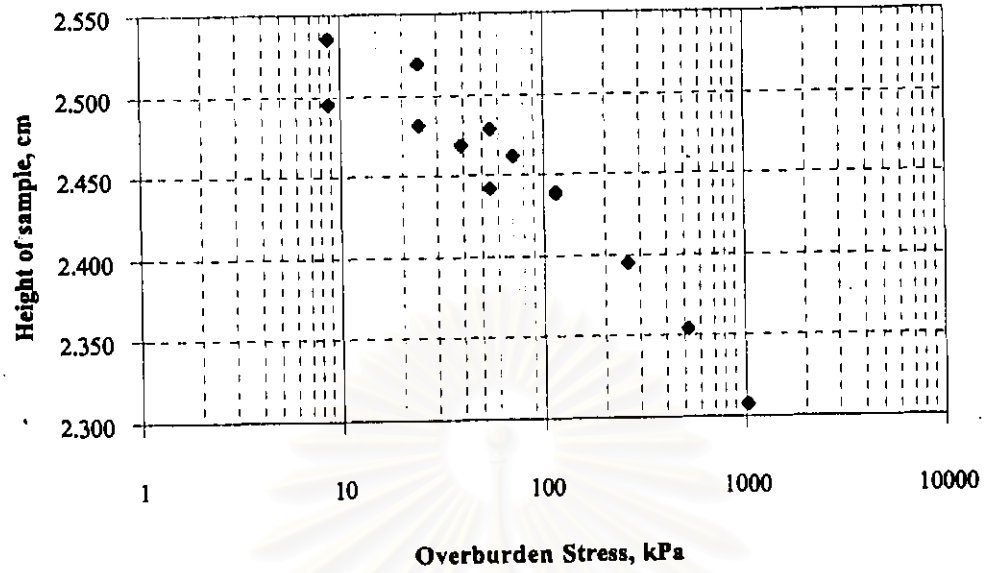
4.7 ผลการทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัว (Deformation Characteristic Property)

เมื่อต้องการคาดคะเนการทรุดตัวของสิ่งก่อสร้างที่ใช้วัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์เป็นวัสดุก่อสร้าง ผลในการทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัวของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์นำเสนออยู่ในหัวข้อนี้ จากการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัวโดยแบ่งเก็บทั้งส่วนบน ส่วนกลางที่มีรอยแตกร้าว และส่วนล่าง ผลการทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัวโดยใช้เครื่องมือ Odeometer Test น้ำหนักและแรงดันที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.13 ค่าสุดท้ายเป็นค่าสูงสุดที่เครื่องมือทดสอบสามารถทำได้

การทรุดตัวขณะทำการทดลองถูกบันทึกตลอดเวลา เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างทรุดตัวจนหยุดนิ่งแล้วภายใต้น้ำหนักกดทับที่ให้กับตัวอย่าง และจากผลการบันทุกค่าทรุดตัวของตัวอย่างกับเวลาในการทำ Odeometer Test สามารถนำค่าการทรุดตัวที่ได้เขียนรวมกันแสดงความสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักที่ใช้ในสเกลเซมิล็อกดังแสดงในรูปที่ 4.22 น้ำหนักกดทับสูงสุดที่เคยรับในอดีตสามารถหาได้จากจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด โดยใช้วิธีการหาแบบทั่วไป และค่าความชันของกราฟก็สามารถนำมาเปรียบเทียบอัตราการยุบอัดตัวของแต่ละปริมาณเบนโทไนต์ที่ผสม ผลของน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีตและค่าความชันแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 แสดงน้ำหนักและเวลาที่ใช้ในการทดสอบหาความสามารถในการยุบตัว

น้ำหนัก	แรงดัน	เวลาที่ใช้
16.8	24.2	120
37.7	54.4	120
79.5	114.6	120
100.4	144.8	120
181.5	261.7	120
363.6	524.2	120
713	1028.0	120
1406	2027.1	120
2112	3045.0	120



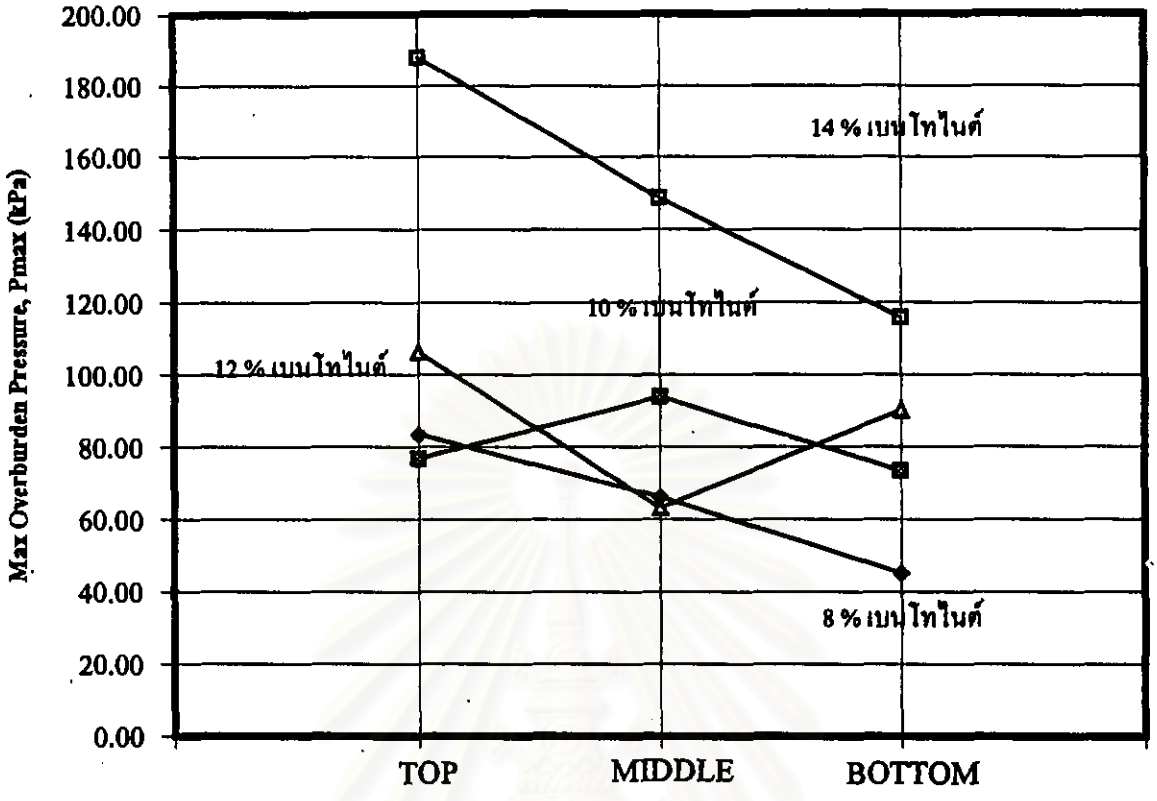
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักกดทับและความสูงของตัวอย่าง

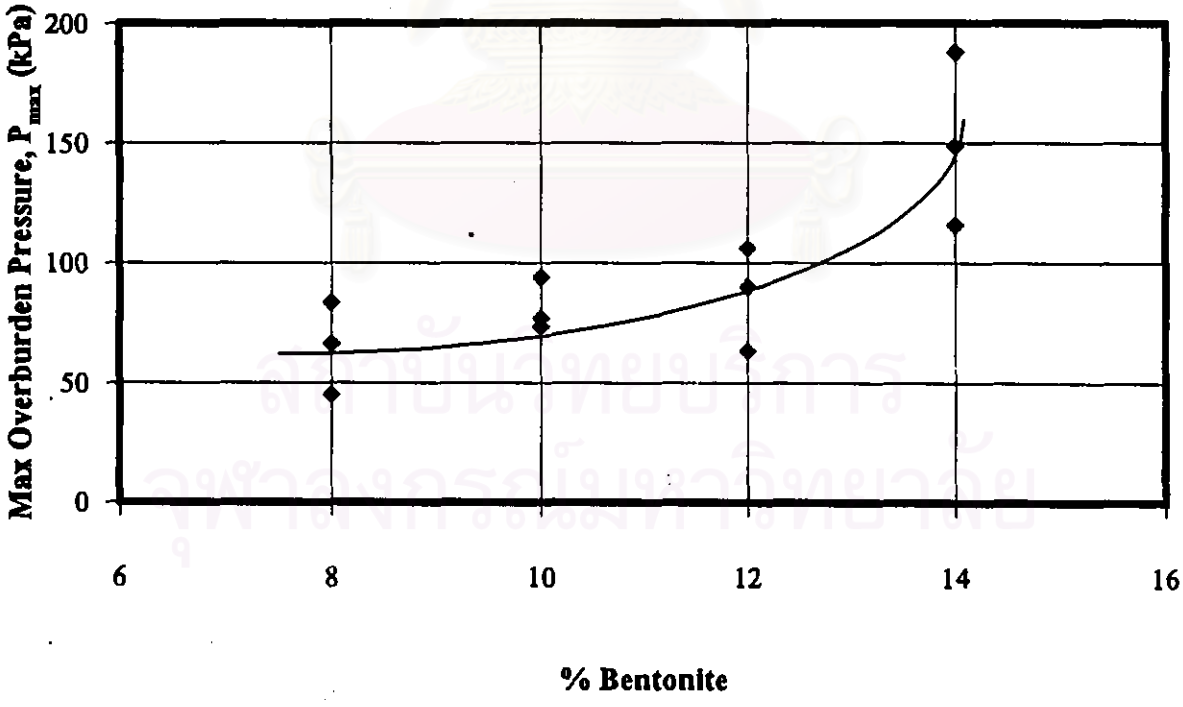
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบหาค่าน้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีตและค่าความชัน

ปริมาณเบนโทไนต์ (%)	ความลึก (cm)	น้ำหนักกดทับสูงสุดในอดีต (kPa)	ค่าความชัน
8	1-10	83.31	0.0997
	11-20	66.15	0.1327
	21-30	45.07	0.0930
10	1-10	76.67	0.2192
	11-20	93.67	0.1531
	21-30	73.40	0.1298
12	1-10	106.08	0.1326
	11-20	63.13	0.1229
	21-30	90.00	0.1289
14	1-10	187.88	0.1119
	11-20	148.66	0.2093
	21-30	115.82	0.1236

รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดในอดีตกับความลึกและปริมาณเบนโทไนต์ และค่าความชันกับความลึกและปริมาณเบนโทไนต์ตามลำดับ จากรูปทั้งสองจะเห็นว่า ค่าของแรงดันสูงสุดที่หาได้ของตัวอย่างทั้งหมดไม่สามารถหาแนวโน้มจากกราฟได้ ไม่สามารถบอกได้ว่าผลของการเกิดรอยแตกร้าวในตัวอย่างส่งผลต่อค่าแรงดันที่สูงสุดในอดีตอย่างไร แต่ค่าที่หาได้ทั้งหมดใกล้เคียงกันกับค่าน้ำหนักที่ใช้ในการกดทับตัวอย่าง คือมีค่าใกล้เคียงกับ 100 kPa และดูเหมือนว่ามีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มมากขึ้น และค่าความชันที่หาได้ก็อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันคือ 0.100 ถึง 0.200 ซึ่งพอจะบ่งบอกได้ว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณเบนโทไนต์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักและให้ลักษณะของอัตราการทรุดตัวใกล้เคียงกัน

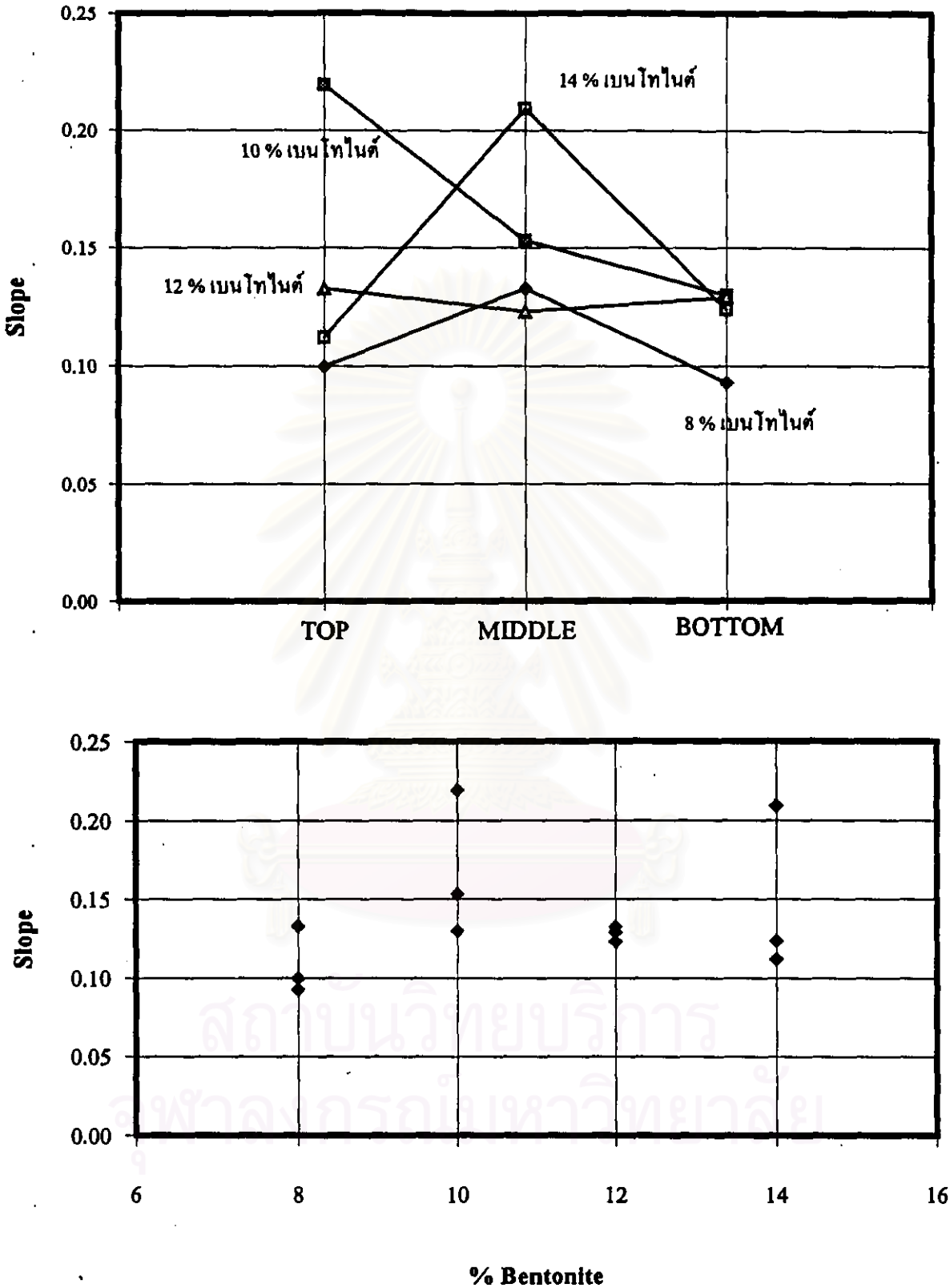
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดในอดีตกับความลึกและปริมาณเบนโทไนต์



<u>รูปที่ 4.24</u> แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันกับความลึกและปริมาณเบนโทไนต์