

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

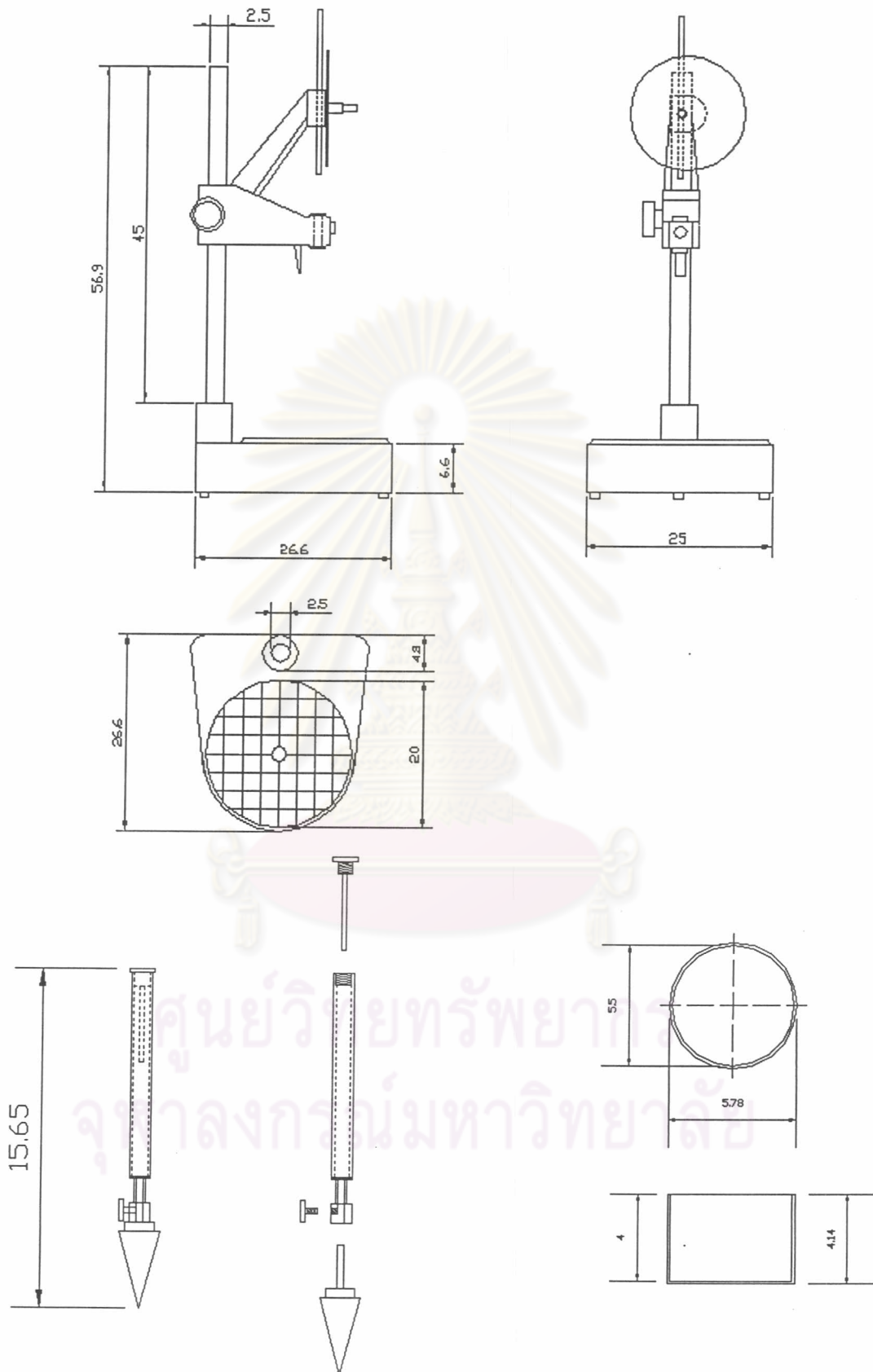
2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength of Soil)

วิธีทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการมีหลายวิธีการด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาพที่เป็นโคลน ซึ่งจะใช้เครื่องมือการทดสอบหลักในห้องปฏิบัติการคือวิธีการทดสอบแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด (Laboratory Vane Shear Test) และวิธี กรวยตก (Fall Cone Test) โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1.1 การทดสอบแบบกรวยตก (Fall Cone Test)

Skempton & Northey (1953) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ Sensitive Clay และเสนอผลการศึกษาการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวด้วยวิธี Casagrande Cup ต้องใช้ความละเอียดในการทดสอบอย่างสูง โดยมีปัญหาที่เกิดจากการทดสอบซ้ำหลายครั้งทำให้ค่าพิกัดเหลวที่ได้มีความถูกต้องน้อย จึงทำการเสนอวิธีการหาค่าพิกัดเหลวแบบใหม่ โดยสมมติว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่พิกัดเหลวนั้นมีเพียงค่าเดียว จะได้ว่าการใช้เครื่องมือหาค่ากำลังรับแรงเฉือนเพื่อหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) จะได้ค่าพิกัดเหลวที่แม่นยำกว่า ซึ่งเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงเฉือนคือเครื่องมือแบบกรวยตก (Fall Cone Apparatus) ซึ่งมีการใช้เครื่องมือแบบกรวยตกมาหลายปีแล้วในแถบประเทศแคนดิเนเวีย โดยรู้จักกันดีว่าเป็นวิธีทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว เครื่องมือทดสอบแบบกรวยตกจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนและพิกัดเหลวโดยทั่วไป

Hansbo (1957) ใช้เครื่องมือทดสอบกรวยตกแบบ Scandinavian ดังแสดงในรูป 2.1 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมของกรวยที่แตกต่างกัน 4 แบบ (กรวยที่มีมุม 60° หนัก 10 กรัม และ 60 กรัม และกรวยที่มีมุม 30° หนัก 100 กรัม และ 400 กรัม) กับกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบการเฉือนด้วยใบพัดในสนาม (Field Vane Shear Test) ของตัวอย่างดินเหนียวแบบคงสภาพและแบบแปรสภาพในแถบสแกนดิเนเวียจำนวนหนึ่ง จากการทดสอบได้ความสัมพันธ์ ดังได้ตามสมการ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องมือทดสอบแบบกรวยตก (Fall Cone Test) จาก BS 1377

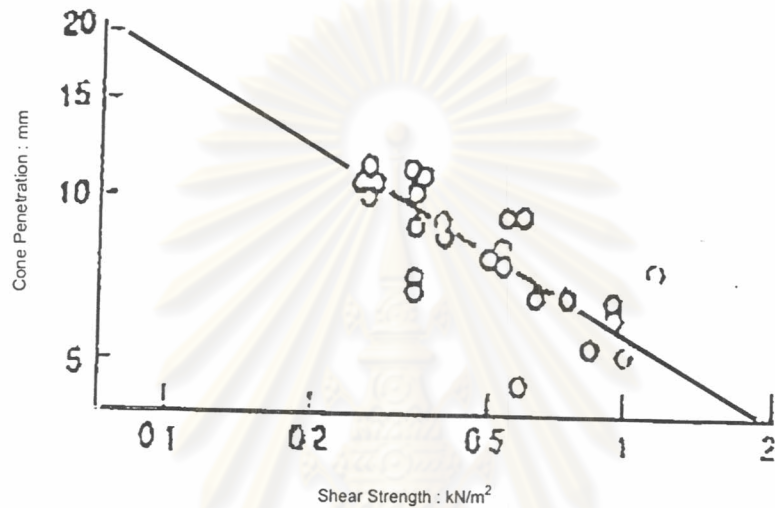
$$S_u = \frac{KW}{d^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ	S_u	คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน
	W	คือ น้ำหนักกรวย
	d	คือ ค่าระยะจมของกรวย
	K	คือ ค่าคงที่ของกรวย

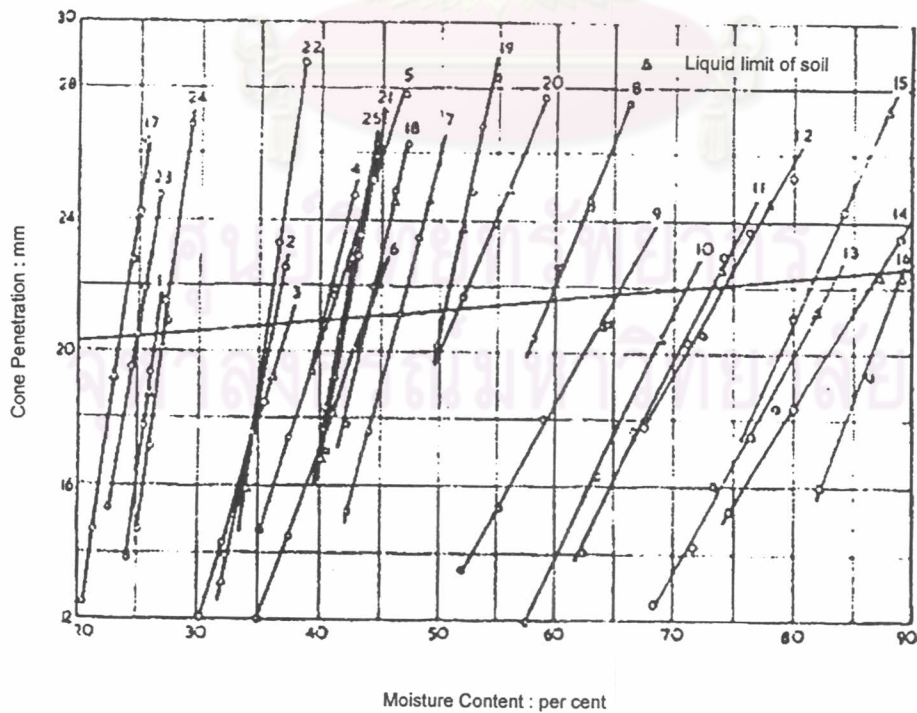
ผลการศึกษาของ Hansbo (1957) แสดงว่า พารามิเตอร์ K มีค่าไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับมุมของกรวยและวิธีการเก็บตัวอย่างในสนาม จากผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ พบว่าค่า K ของกรวยที่มีมุม 30° มีค่าเป็น 4 เท่าของค่า K ของกรวยที่มีมุม 60° Hansbo (1957) ยังได้หาค่า K ของตัวอย่างดินแปรสภาพอีกด้วย แต่ข้อมูลมีค่อนข้างจำกัด โดยที่ Hansbo (1957) ได้เสนอค่า $K \cong 0.3$ สำหรับกรวยที่มีมุม 60° และจากสมมุติฐานที่ใช้กับกำลังของตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ Hansbo(1957) ได้เสนอค่า $K \cong 1.2$ สำหรับกรวยที่มีมุม 30° ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าระยะจมของกรวยที่มีมุม 30° หนัก 80 กรัม ตามมาตรฐาน BS1377 แปลงไปเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ ซึ่งต่อมานักวิจัยหลายท่านได้ทำการทดสอบแล้วพบว่า ค่า K จากสมการ 2.1 อยู่ในช่วง 0.8-1.2 สำหรับกรวยที่มี 30° ซึ่งต่อมา Wood(1982) ได้เสนอค่า K ควรมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าที่สมเหตุสมผลที่สุด จากสมการข้างต้นของ Hansbo (1957) สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินได้ต่ำสุดถึง 0.075 kPa. จากนั้นต่อมา Norsk Geoteknisk Forening (1974) สามารถทำการทดสอบหาค่า Upper Limit ได้ถึง 0.5 kPa.

Youssef et al. (1965) ได้แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินชนิดต่างๆกัน (ทดสอบโดยใช้ใบพัดขนาด 20 mm x 20 mm) กับความสัมพันธ์ค่าปริมาณความชื้นในดิน จากตัวอย่างดิน 26 แห่งในสาธารณรัฐอาหรับ ได้ความสัมพันธ์ดังรูป 2.2 จากรูปสังเกตว่า เมื่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น ระยะจมของกรวยจะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้นั้นยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ เพราะใช้ตัวอย่างดินในการทดสอบเพียง 26 ชนิดเท่านั้น ต่อมา Sherwood & Ryley (1970) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าระยะจมต่างๆของกรวยที่มีมุม 30° หนัก 80 กรัม กับค่าปริมาณความชื้น(Water Content) ของดินต่างๆกัน จำนวน 25 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจาก UK และได้แสดงพิกัดเหลวของ Casagrande ไว้ด้วย ดังแสดงในรูป 2.3 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อค่าพิกัดเหลวเพิ่มขึ้น ระยะจมของกรวยจะมากขึ้น อย่างไรก็ตามต่อมา Wood (1982) ได้วิจารณ์

ความสัมพันธ์เหล่านี้ว่า มีความผิดพลาดเนื่องมาจากผลการทดสอบมีค่าที่กระจุกกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ผลสรุปที่ได้จากการทดลองแสดงว่า มีแนวโน้มที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะลดลงหรือระยะจมนของกรวยจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพิกัดเหลวของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดเหลวเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณของดินเหนียวและแร่ธาตุที่ปนอยู่ในดินเหนียว ซึ่งข้อมูลจากการทดสอบของ Sherwood & Ryley (1970) เหล่านี้ยังเป็นข้อมูลที่ไม่เพียงพอในการวิเคราะห์



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมนกับกำลังรับแรงเฉือน จาก Youssef et al. (1965)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมนกับปริมาณความชื้น จาก Youssef et al. (1965)

Gameau & LeBihan (1977) ได้นำการทดสอบแบบกรวยตกมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่พิกัดเหลวของดินจากทะเล Champlain ในหุบเขา St.Lawrence จากการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ของ Hansbo(1957) เมื่อนำค่ามาเปรียบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบไพบัตินสนาม (Strain-Controller Field Vane Shear Tester) พบว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 5-10% โดยได้ให้เหตุผลว่าดินเหนียวที่ใช้มีคุณสมบัติแบบ Anisotropic และรูปแบบการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของทั้งสองวิธีนั้นแตกต่างกันค่อนข้างมาก อีกทั้งไม่สามารถหลีกเลี่ยงการรบกวนระหว่างเก็บตัวอย่างดินได้ แม้ว่าจะใช้กระบอกเก็บตัวอย่างแบบบาง (Thin-Wall Piston Sampler) แล้วก็ตาม Gameau & Lebihan (1977) ยังได้แนะนำอีกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแปรสภาพที่คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Hansbo (1957) นั้น สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบใช้ไพบัตินในห้องทดลอง (Laboratory Vane Shear Test)

Wroth & Wood(1978) เสนอค่าประมาณของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่พิกัดเหลว(Liquid Limit) จะมีค่าเท่ากับ 1.7 kPa และ ที่ค่าพิกัดพลาสติก(Plastic Limit)มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินมีค่าประมาณ 100 เท่าของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่พิกัดเหลว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Skempton & Northley (1953) โดยใช้ข้อมูลดินที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ซึ่งได้ผลการทดสอบออกมาเป็น ดังรูปที่ 2.4 ต่อมา Whyte(1982) ได้เสนอค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่พิกัดเหลวที่ทดสอบได้จากเครื่องมือกรวยตก ตามมาตรฐาน BS1377 ว่าเท่ากับ 1.6 kPa และสรุปว่าผลที่ได้นั้นสอดคล้องเป็นอย่างดีกับเครื่องมือแบบถ่วงเคาะของ Casagrande ชนิดฐานอ่อน

Wood(1982) ได้ให้ความเห็นเกี่ยวกับทฤษฎีที่ใช้ในการหาค่าพิกัดเหลวว่า ค่าที่ถูกทดสอบโดยใช้วิธีการเก่า (วิธีทดสอบแบบ Casagrande) และแบบใหม่ (วิธีกรวยตก) โดยได้ให้แนวคิดเกี่ยวกับหลักการที่ต่างกันระหว่างเครื่องมือทั้งสองชนิด กล่าวคือ เครื่องมือทดสอบตามแบบ Casagrande นั้นใช้วิธีสังเกตพฤติกรรมของดินที่จุดเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นพลาสติก เพื่อนิยามค่าปริมาณความชื้นของดินในขณะนั้นว่าเป็นพิกัดเหลว ส่วนวิธีการทดสอบแบบกรวยตกจะทำได้เที่ยงตรงกว่า โดยพิจารณาค่าปริมาณความชื้นจากค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ซึ่งดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่แน่นอนเพียงค่าเดียวสำหรับที่พิกัดเหลว ซึ่งเช่นเดียวกันกับการทดสอบคุณสมบัติ Pseudo-plasticity ต่อมา Wood (1982) ยังได้รวบรวมข้อมูลที่ศึกษาโดย Youssef et al. (1965) และ Sherwood & Ryley (1953) มาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่พิกัดเหลวกับค่าระยะจมของกรวยมุม 30° หนัก 80 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะจมของ

กรวยที่ $d = 20$ มม.เมื่อใช้สมการที่ (2.1) คำนวณได้ค่า $S_u = 1.7$ kPa ซึ่งตรงกับค่ากำลังรับแรงเฉือนที่พิกัดเหลวของ Wroth & Wood (1978)

Houlsby (1982) ได้ทำการค้นคว้าหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ Fall Cone เพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrained Shear Strength) ที่พิกัดเหลวของดิน (Liquid Limit) โดยใช้ทฤษฎี Lower Bound Plasticity จากการทดสอบพบว่าค่าของกำลังรับแรงเฉือนของดิน ที่พิกัดเหลวอยู่ในช่วง 0.7-2.65 kPa (ก่อนหน้านั้น Wroth & Wood (1978) แนะนำให้ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่พิกัดเหลว $c_u = 1.7$ kPa) จากการทดลอง Houlsby ได้สร้างความสัมพันธ์ของหัวกรวยและ แรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical Force, P) ว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P/c_u h^2 = f(\gamma h/C_u, a_u/c_u, \alpha) \quad (2.2)$$

h = depth of cone penetration (static analysis)

γ = equivalent body force

a_u = wall adhesion

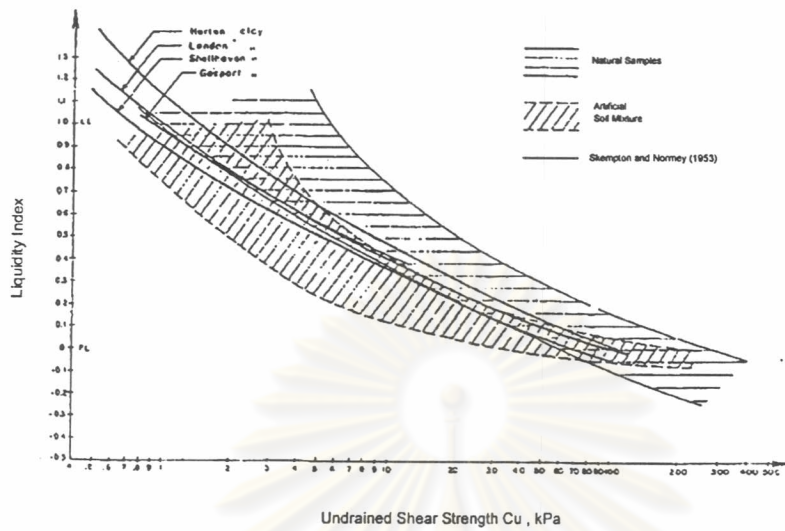
α = cone apex angle

จากการทดสอบของ Houlsby (1982) พบว่ามีตัวแปรต่างๆมากมายที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของการทดสอบ Fall Cone Test เช่น การเปลี่ยนแปลงของ มุมหัวกรวย $\pm 0.1^\circ$ เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า แรงที่ในแนวตั้ง (P) ประมาณ $\pm 6\%$, ผลกระทบเนื่องจากความแหลมของปลายหัวโคน (Bluntness) ซึ่งสามารถทำให้ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 9.5%, ผลกระทบเนื่องจาก Heave หรือ ผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักของดินเองเมื่อมีการไหล จะมีผลน้อยมาก และ ผลกระทบที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมากที่สุดคือ ผลกระทบเนื่องจากความขรุขระของกรวย (Roughness) ซึ่งการทดสอบแบบปกติและแบบใส่น้ำมัน ซึ่งแสดงค่าออกมาเป็น a_u/c_u ช่วงระหว่าง 0.0-1.0 (Smooth – Rough) พบว่าหัวกรวยที่มีความขรุขระมากจะทำให้ค่าแรงที่ในแนวตั้ง (P) เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งได้แสดงใน ตารางที่ 2.1 จากนั้น Houlsby(1982) ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ทาง Dynamic ดังสมการที่ 2.3

$$\begin{aligned} P'' &= F_c h^2 \\ v^2 &= 2g(z-z^3/3h^2) \end{aligned} \quad (2.3)$$

v = velocity of cone

z = penetration



รูปที่ 2.4 ขอบเขตของค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าดัชนีความเหลวของดินเหนียว โดย Skempton Northley (1953)

ตารางที่ 2.1 ค่าของแรงในแนวตั้ง (P) สำหรับหัวกรวย: Hansbo(1957)

a_u / c_u	$\alpha = 29^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 31^\circ$
0.0	0.962	1.030	1.100
0.2	1.156	1.232	1.311
0.4	1.343	1.427	1.515
0.6	1.542	1.615	1.710
0.8	1.697	1.795	1.898
1.0	1.852	1.962	2.065

Zreik (1995) ได้นำเอาทฤษฎีทาง Dynamic ของ Houlsby(1982) มาประยุกต์ใช้โดย แสดงออกมาในรูปของ สมการที่ 2.4 และ 2.5 และหาสมการความสัมพันธ์ของ Cone Factor ได้ออกมาตาม รูปที่ 2.5

$$v = \left\{ 2gz \left[1 - \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right] \right\}^{0.5} \quad (2.4)$$

$$t = \int_0^z \frac{dz}{\left\{ 2gz \left[1 - \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right] \right\}^{0.5}} \quad (2.5)$$

t = Time of penetration

t_p = Time for penetration to the maximum depth

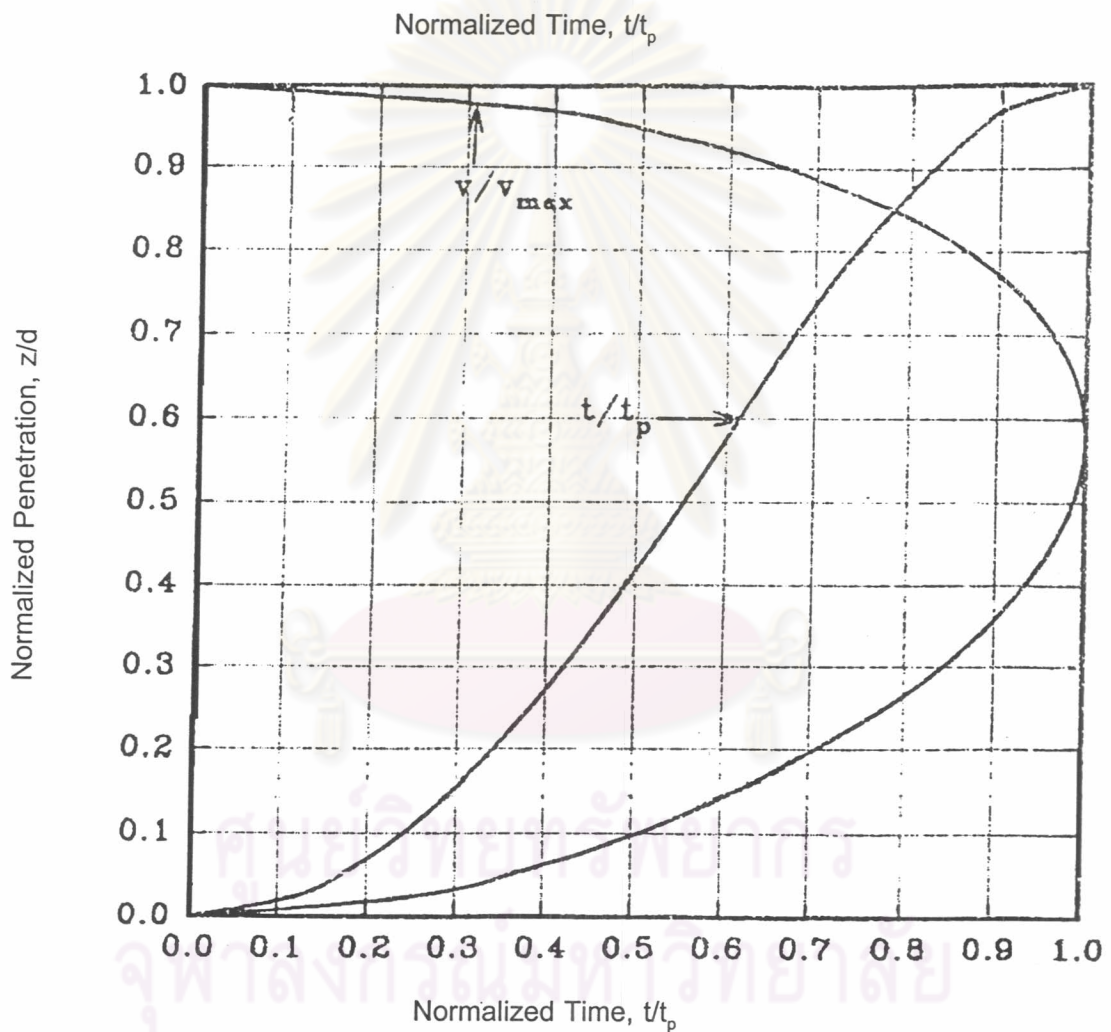
v = cone velocity

z = Instantaneous cone penetration

d = final penetration Value

จากนั้นได้ออกแบบ Fall Cone ในรูปแบบใหม่ ดังรูป 2.6 ซึ่งใช้วิธีการถ่วงน้ำหนัก (Counterweight) เพื่อให้น้ำหนักของกรวยลดลง ซึ่งทำให้ลดลงต่ำสุดถึง 0.005 N ทำให้สามารถวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ต่ำกว่าเดิมที่ Hansbo (1957) ได้เคยทำไว้ วิธีการใหม่นี้สามารถวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนออกมาอยู่ในช่วง 0.1 – 1.0 N การทดสอบของ Zreik(1995) ได้ใช้ดิน Boston Blue Clay ในการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้แสดง ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน เปรียบเทียบกับเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหัวกรวยและมุมของหัวกรวยในแบบต่างๆกัน โดยใช้ช่วงในการทดสอบของปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0.75 - 5.6 เท่าของค่า Liquidity Index และยังสามารถบันทึกค่าระยะจมของกรวยในทุกๆรอบ 0.1 วินาทีได้อีกด้วย ทำให้สามารถบันทึกค่าระยะจมเป็นกราฟต่อเนื่องได้ตลอดการตกของหัวกรวยใน 5 วินาที ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและระยะหัวกรวยที่จมนี้ Zreik(1995) ได้ใช้ทฤษฎีทางพลศาสตร์ (Dynamic) มาช่วยในการหาความสัมพันธ์ โดยอัตราเร็วในการตกของกรวยแบบใหม่มีความจำเป็นต้องทำการปรับแก้ค่าความถูกต้อง เพื่อให้ถูกต้องตามหลักทฤษฎีทางพลศาสตร์ (Dynamic) โดยใช้ค่าตัวแปรความเฉื่อย(β) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของ Pulley และน้ำหนักของชุดหัวกรวยทั้งหมด มีค่า

อยู่ในช่วงระหว่าง 1.1–10 จากผลการทดสอบกรวยตกแบบใหม่นี้ ใช้งานได้ดีตามทฤษฎีของ Honsbo (1957) และเป็นไปตามสมการที่ 2.1 และให้ผลการทดสอบได้เป็นอย่างดี ตามทฤษฎีทางพลศาสตร์ ดังแสดงตาม ตารางที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนจะไม่ขึ้นอยู่กั Effective Cone Weight และจากรูปที่ 2.7 พบเมื่อค่าปริมาณความชื้นของดิน (Water Content) อยู่ในช่วง 38% - 135% จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนอยู่ในช่วงประมาณ 0.013 – 4.7 kPa



รูปที่ 2.5 ทฤษฎีการเคลื่อนตัวของ Fall Cone: Normalized Penetration versus Normalized Time And Normalized velocity โดย Zreik (1995)

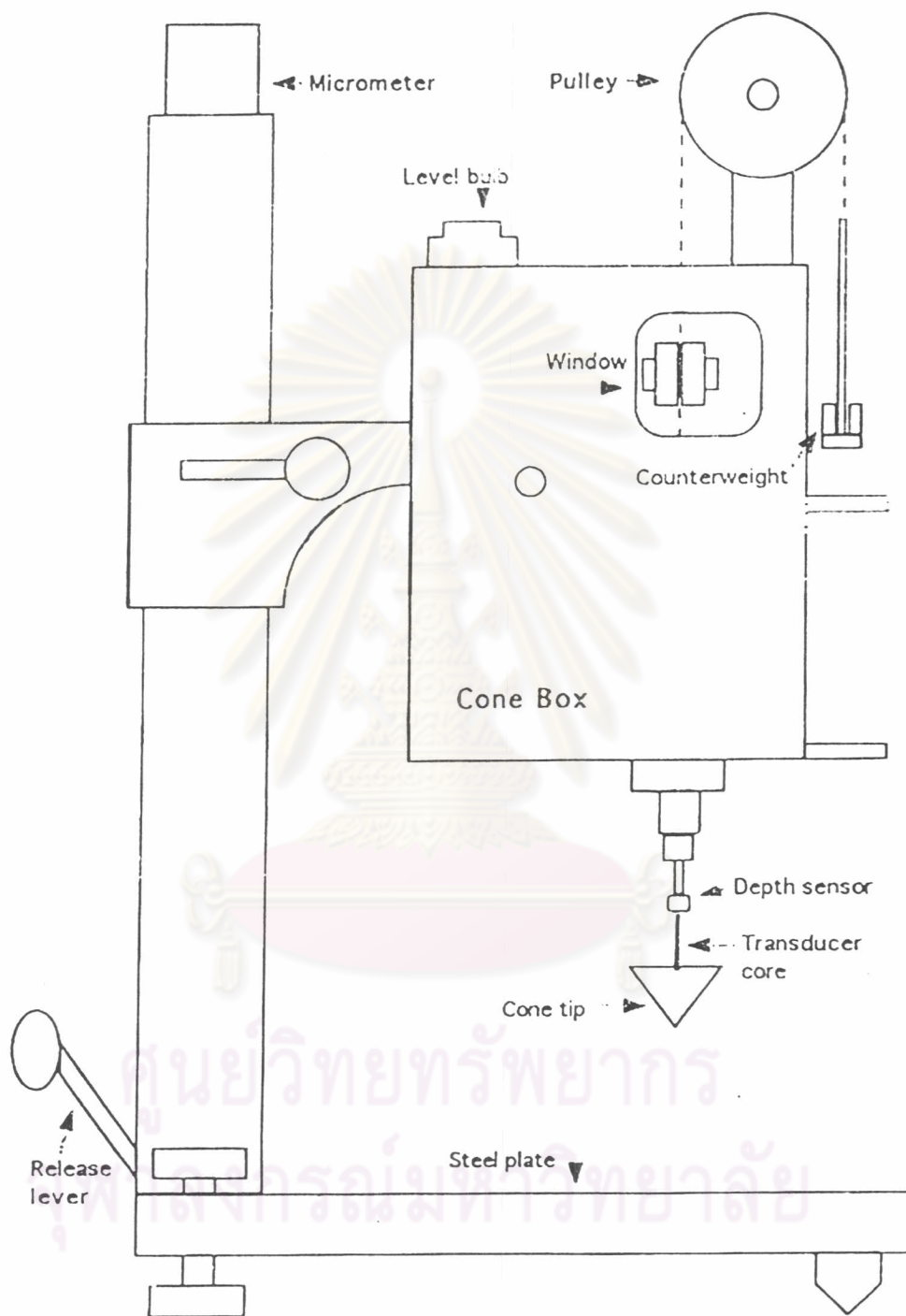


FIG. 3—Schematic of the MIF fall cone apparatus.

รูปที่ 2.6 เครื่องมือ Fall Cone แบบใหม่ ที่ใช้ระบบ Counterweight โดย Zreik (1995)

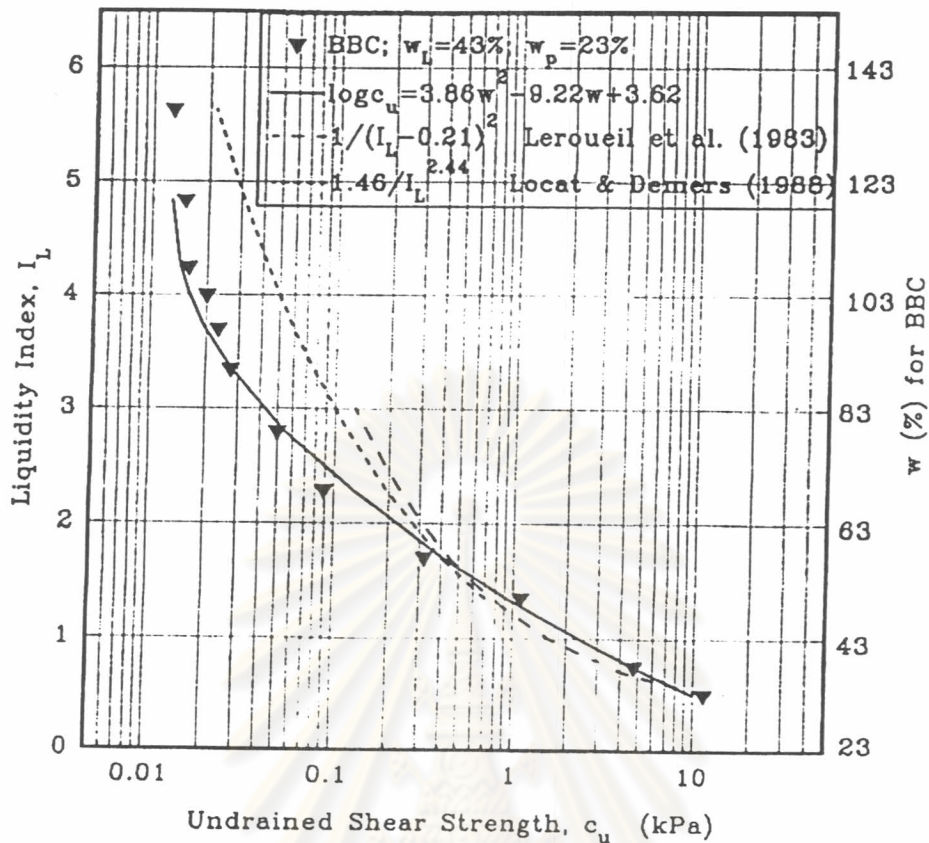
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่า K โดย Zreik (1995)

Reference	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	Basis for K Values
Houlsby(1982)	2.89	1.25	0.645	0.36	0.205	Theoretical values for smooth cones
Karlsson(1961)	0.79 ± 0.05	...	0.29 ± 0.04	Six remold soils of widely varying Atterberg limits ($w_L = 30$ to 320); lab vane c_u at $d\theta/dt \approx 2^\circ/s$ with $H/D = 2$ and $D = 15, 30, \text{ or } 45 \text{ mm}$; $c_u = 0.2$ to 10 kPa
Wood(1985)	0.85 ± 0.05	0.49 ± 0.08	0.29 ± 0.05	0.19 ± 0.04	...	Three remolded soils (Drammen clay $I_p = 14$; Kaolin, $I_p = 26$, Gault clay, $I_p = 41$); special lab vane; $c_u = 1$ to 20 kPa
Selected By Authors	0.83	0.49	0.29	0.19	0.12	See Text
Values of K_{ex}/K_{th}						Remark
	0.29	0.39	0.45	0.53	0.60	Value for $\alpha = 90^\circ$ based on extrapolation

Note: w_L = liquid limit; I_p = Plasticity index; H/D = height/diameter of lab vane; θ = angular rotation

ตาราง 2.3 ข้อมูลแสดงเวลาในการตกจาก Automated fall cone โดย Zreik (1995)

Cone Weight and Angle	β	W, %	$\sqrt{t_m / (t_m / \beta)}$, $\sqrt{\text{mm/s}}$	β_m / β
1 g, 90°	7.1	79.2	55.6	1.10
1 g, 60°	6.3	110.5	54.6	1.13
1 g, 60°	6.3	91	54.9	1.11
2 g, 90°	5.0	91	51.3	1.20
2 g, 90°	5.0	79.2	50.2	1.22
2 g, 60°	4.4	110.5	59.6	1.02
2 g, 60°	4.4	80	52.3	1.14
5 g, 90°	3.0	91	55.6	1.10
5 g, 60°	2.7	110.5	50.6	1.07
5 g, 60°	2.7	70.6	50.2	1.15
5 g, 60°	2.7	51.7	54.1	1.19
10 g, 60°	2.0	60.3	51.2	1.15
10 g, 60°	1.8	80	50.7	1.11
10 g, 60°	1.8	70.6	56.6	1.08
Mean \pm 1 SD			53.4 ± 2.9	1.125 ± 0.05

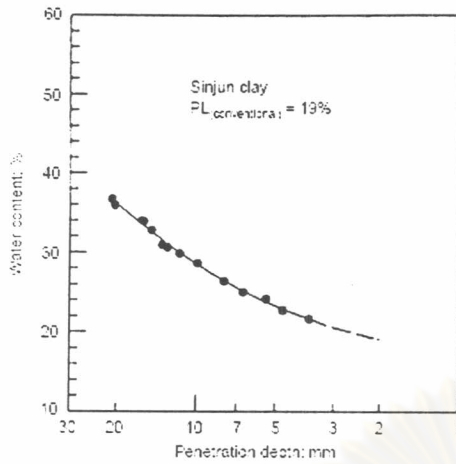


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับค่า Liquidity Index โดย Zreik (1995)

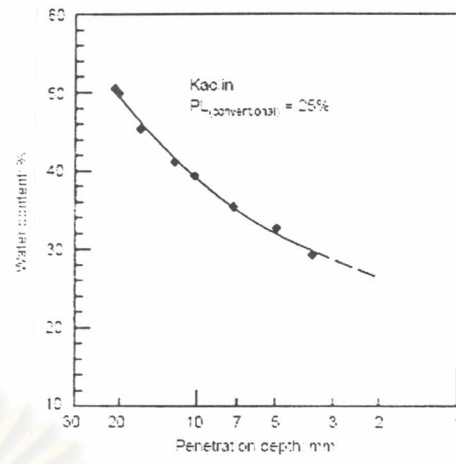
TAO-WEI FENG (2000) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะจมของ Fall Cone กับ Water Content เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการหาค่า Plastic Limit และ Liquid Limit โดยทำการทดสอบดินเหนียว Kaolin, Bentonite และ ดินธรรมชาติอีก 3 ชนิดแล้วเสน่อออกมาในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะจมของหัวกรวย กับ Water Content ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจากรูปความสัมพันธ์ที่ได้ของระยะจมกับ Water Content เป็นไปในลักษณะ Non-Linear แต่เมื่อนำมา Plot ใน Scale Log-log จะได้รูปภาพและสมการที่เป็นเส้นตรงตามสมการที่ 2.6

$$\log w = \log c + m \log d \quad (2.6)$$

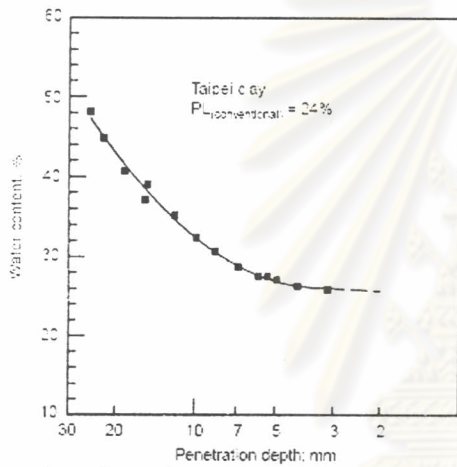
- w = Water Content
- c = Water Content ที่ $d = 1$ mm.
- m = Slope of the linear
- d = depth of cone penetration



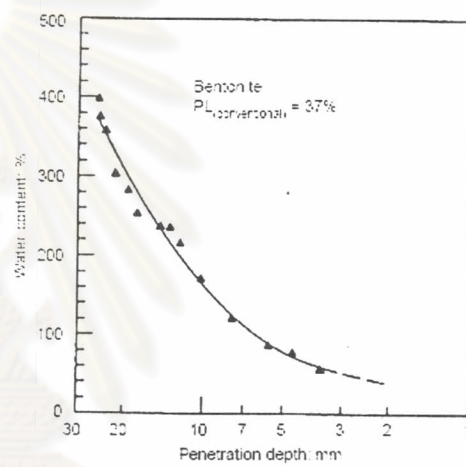
Logarithm of penetration depth against water content Relationship for Sinjaun clay



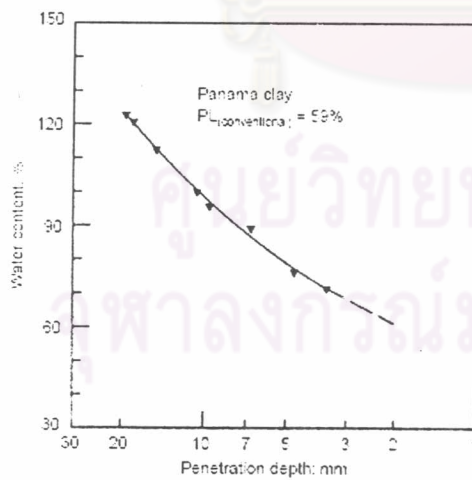
Logarithm of penetration depth against water content Relationship for Kaoline clay



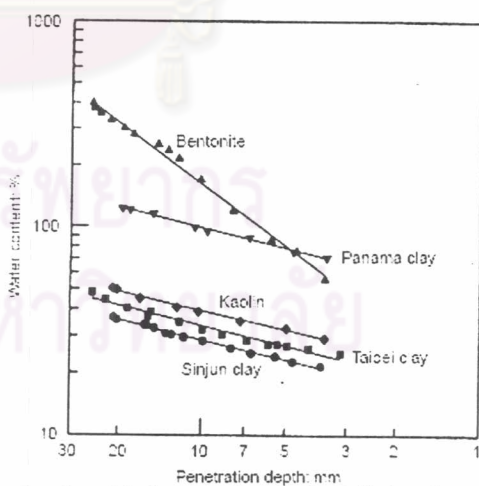
Logarithm of penetration depth against water content Relationship for Taipei clay



Logarithm of penetration depth against water content Relationship for Bentonite clay



Logarithm of penetration depth against water content Relationship for Panama clay



Log-log plot of penetration depth plotted against water content Relationship for the five soil tested

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของระยะกรวยที่จมกับ Water Content โดย Feng, T.W. (2000)

และสามารถหาความสัมพันธ์ของ ค่า c ได้จากตารางที่ 2.4 ซึ่งต่อมา Feng, T.W. (2000) ได้ทำการแปลงค่าจากกราฟเพื่อหาค่า Plastic Limit ได้มาเป็นสมการที่ 2.7 โดยกำหนดว่าระยะจมของกรวยตกไม่ควรเกิน 3-20 mm.

$$PL = c(2)^m \quad (2.7)$$

ตาราง 2.4 ค่า c และ m ของดินเหนียวจากค่า strength ratio 50, 100 และ 2000 โดย Feng, T.W. (2000)

Soil	LL _{casagrande} %	c: %	m	w ₁ : %	w ₂ : %	w ₂ : %	w ₁ /w ₂	w ₂ /w ₂	Reference
Stunjun clay	36	14	0.322	16	18	20	0.89	1:11	Present investigation
Taipen clay	43	17	0.322	19	21	24	0.90	1:14	Present investigation
Panama clay	125	47	0.321	52	59	66	0.88	1:12	Present investigation
Kaolin	50	20	0.301	22	25	27	0.88	1:08	Present investigation
Bentonite	423	17	1	24	34	48	0.71	1:41	Present investigation
Shellhaven clay	97	26	0.436	30	35	41	0.86	1:17	Skempton & Northey (1953)
London clay	73	21	0.410	24	28	32	0.86	1:14	Skempton & Northey (1953)
Horten clay	30	13	0.266	14	16	17	0.88	1:06	Skempton & Northey (1953)
Gosport clay	80	28	0.352	32	36	40	0.89	1:11	Skempton & Northey (1953)
Swedish clay	83	26	0.425	30	35	40	0.86	1:14	Karlsson (1961)
Swedish clay	70	25	0.360	28	32	36	0.88	1:13	Karlsson (1961)
Swedish clay	63	22	0.360	25	28	32	0.89	1:14	Karlsson (1961)
Swedish clay	54	21	0.308	23	26	29	0.88	1:12	Karlsson (1961)
Drammen clay	35	12	0.350	14	15	17	0.93	1:13	Wood (1985)
Kaolin	59	21	0.343	24	27	30	0.89	1:11	Wood (1985)
Gault clay	65	23	0.345	26	29	33	0.90	1:14	Wood (1985)
Bentonite	526	16	1	22	32	45	0.69	1:41	Wasti & Bezirci (1986)
Turkey soil	110	20	0.569	24	30	36	0.80	1:20	Wasti & Bezirci (1986)
Turkey soil	52	21	0.335	24	26	30	0.92	1:15	Wasti & Bezirci (1986)
Bandung clay	100	39	0.312	43	48	54	0.90	1:13	Harrison (1988)
Bandung clay	86	31	0.341	35	39	44	0.90	1:13	Harrison (1988)
Bandung clay	78	30	0.318	33	37	42	0.89	1:14	Harrison (1988)
Bandung clay	72	30	0.292	33	37	41	0.89	1:11	Harrison (1988)
Bandung clay	65	32	0.237	35	38	41	0.92	1:08	Harrison (1988)
Bandung clay	63	30	0.239	33	35	38	0.94	1:09	Harrison (1988)
Bandung clay	59	31	0.216	33	36	39	0.92	1:08	Harrison (1988)

T. Koumoto & G.T. Houlsby (2001) ได้ทำการศึกษาและขยายผลของการศึกษาของ ทฤษฎีทาง Dynamic ของ Houlsby (1982) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง T. Koumoto ได้เสนอ ทฤษฎีทาง Static ของพฤติกรรมการจมลงของ Fall Cone เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ที่มากที่สุด ของ กำลัง (load) ที่ทำให้กรวยจมลงที่มีความลึกใดๆ ซึ่งแสดงออกมาดังรูปที่ 2.9 และแสดง ความสัมพันธ์จากรูปออกมาเป็นสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$\frac{Q}{s_u h_s^2} = f(\beta, \alpha) + \frac{\pi \tan^2(\beta/2) \gamma h_s}{3 s_u} \quad (2.8)$$

$$f(\beta, \alpha) = F = \pi N_c \tan^2(\beta/2) \quad (2.9)$$

- Q = แรงกระทำแนวตั้งที่ Cone กระทำกับดิน
 β = มุมของหัวกรวย
 h_s = ระยะจมของ Cone
 N_c = Cone Bearing Capacity Factor

α = ratio of adhesion to undrained shear strength, a_u/s_u

ซึ่งความสัมพันธ์ทางด้าน Static จะขึ้นอยู่กับตัวแปรของ N_c , β และ α โดยค่า N_c ที่ได้เป็นค่า N_c ที่ไม่คำนึงถึงค่า Heave แต่ทาง Koumoto ได้กล่าวผลกระทบจากการเกิด heave ทำให้ค่า N_c ที่ได้ไม่เป็นไปตามความจริงจึงเสนอให้ใช้ค่า N_{ch} ซึ่งเป็นค่า Bearing Capacity Factor ที่รวมผลกระทบของ Heave เข้าไปด้วยและกำหนดค่า $\lambda = N_{ch}/N_c$ ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ , β , δ , N_{ch} , N_c ออกมาตามตารางที่ 2.5 จากนั้น Koumoto ได้เสนอสมการทาง Dynamic ที่ได้ดัดแปลงสมการที่ 2.4 Housby(1982) ว่าควรคิดผลกระทบของค่า Undrained Strength ภายใต้สภาวะทาง Dynamic ทำให้ความสัมพันธ์ทาง Dynamic ของ Koumoto ออกมาเป็นสมการที่ 2.10

$$v = \sqrt{2gz \left(1 - \frac{S_{ud} z^2}{3S_u h_s^2} \right)} \quad (2.10)$$

S_{ud} = Undrained Shear Strength under Dynamic condition

ซึ่งเมื่อรวมสมการต่างๆเข้าด้วยกันแล้ว Koumoto ได้เสนอสมการที่สามารถหาค่า S_u ที่ได้ประยุกต์เพื่อค่า K ของสมการที่ 2.1 Hansbo (1957) ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12

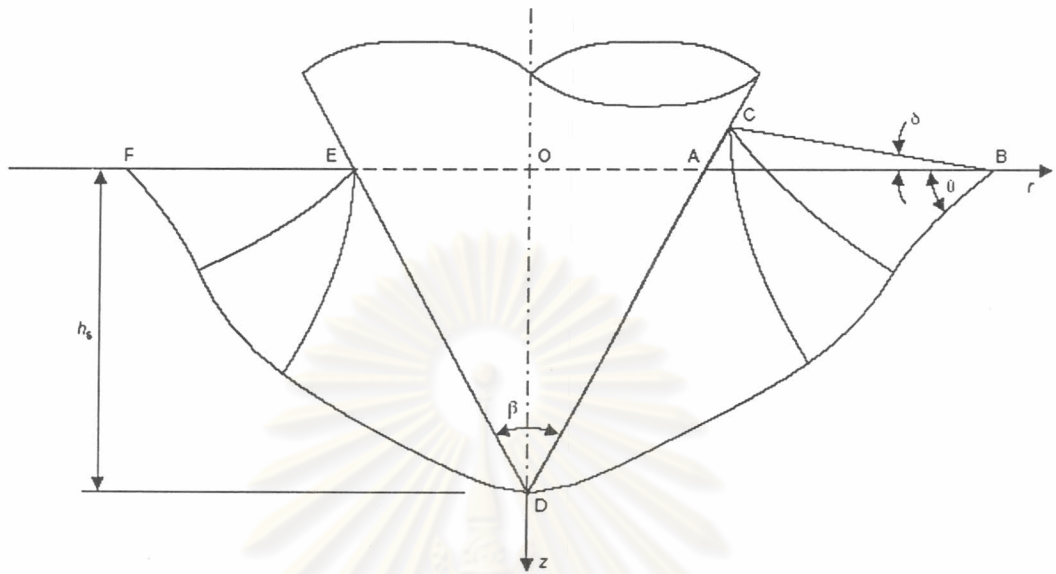
$$S_u = \frac{3Q\xi}{Fh^2} = \frac{3Q\xi}{\pi N_{ch} \tan^2(\beta/2)} = \frac{KQ}{h^2} \quad (2.11)$$

$$K = \frac{3\xi}{\pi N_{ch} \tan^2(\beta/2)} \quad (2.12)$$

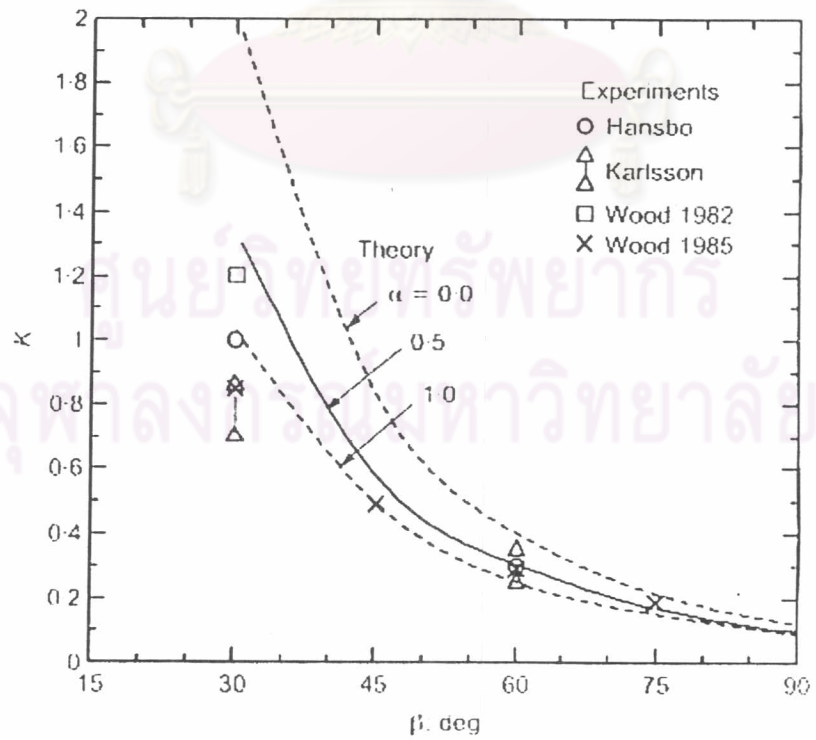
$$\xi = \frac{1.19}{1.60} \approx 0.74 \text{ for the } 30^\circ \text{ cone}$$

$$\xi = \frac{1.19}{1.64} \approx 0.73 \text{ for the } 60^\circ \text{ cone}$$

ซึ่งค่า K มีความสัมพันธ์กับตามมุมของกรวย (β) ดังในรูปที่ 2.10 แสดงค่า K ที่แปรผกผันกับค่ามุมของกรวยที่ทำการทดสอบโดย Hansbo, Karlsson, Wood เปรียบเทียบกัน แต่ค่า K จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่า Smooth - Rough ดังตารางที่ 2.6 ซึ่ง Koumoto กล่าวว่ค่า K ที่ได้มีค่าจากการทดสอบ จะมีค่าไม่แน่นอนต่างจากค่าทางด้านทฤษฎีค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากผลกระทบเนื่องมาจาก Heave ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนในแต่ละครั้งในการทดสอบทำให้ค่า K ที่วัดได้มีค่าลดลงกว่า 10% และค่า K ที่ได้จากการทดสอบด้วยกรวยมุม 60° (มีค่า $K=0.31$) จะมีค่าที่แน่นอนกว่าค่า K ที่ได้จากการทดสอบด้วยกรวยมุม 30° เพราะกรวยมุม 60° เกิดค่า Cone Roughness น้อยกว่ากรวย 30°



รูปที่ 2.9 Schematic Diagram ของการทดสอบกรวดตก โดย Koumoto(2001)



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงค่า K ของการทดสอบ Fall Cone โดย Koumoto(2001)

ตาราง 2.5 คำนวณค่า N_{ch} , δ และ λ สำหรับช่วงของ β และ α โดย Koumoto(2001)

α	$\beta = 30^\circ$			$\beta = 60^\circ$			$\beta = 90^\circ$			$\beta = 120^\circ$			$\beta = 150^\circ$		
	N_{ch}	$\delta: deg$	λ	N_{ch}	$\delta: deg$	λ	N_{ch}	$\delta: deg$	λ	N_{ch}	$\delta: deg$	λ	N_{ch}	$\delta: deg$	λ
0.0	4.992	7.87	1.083	5.266	12.16	1.186	6.019	12.11	1.297	6.943	9.41	1.398	7.92	5.09	1.488
0.2	6.030	6.84	1.098	5.933	10.61	1.195	6.515	10.55	1.298	7.350	7.80	1.400	8.05	4.50	1.450
0.4	6.992	6.16	1.098	6.529	9.40	1.198	6.940	9.49	1.294	7.550	7.10	1.370	8.08	3.90	1.430
0.5	7.457	5.77	1.098	6.812	8.98	1.200	7.127	8.98	1.291	7.650	6.60	1.340	8.10	3.50	1.400
0.6	7.927	5.52	1.100	7.082	8.54	1.200	7.313	8.67	1.290	7.800	6.20	1.339	8.18	3.20	1.390
0.8	8.805	5.01	1.099	7.551	7.66	1.195	7.627	7.88	1.283	7.930	5.80	1.338	8.23	2.90	1.380
1.0	9.616	4.49	1.096	7.977	7.06	1.192	7.885	7.28	1.278	8.102	5.42	1.338	8.28	2.51	1.369

ตาราง 2.6 ค่า K สำหรับการเปลี่ยนแปลง β โดย Koumoto(2001)

β	30°	45°	60°	75°	90°
Smooth $\alpha = 0.0$	2.00	0.835	0.40	0.216	0.120
Semi-rough $\alpha = 0.5$	1.33	0.580	0.305	0.171	0.097
Rough $\alpha = 1.0$	1.03	0.495	0.250	0.152	0.090

2.1.2 การทดสอบ Laboratory Vane Shear Test

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการทดสอบแรงเฉือนในห้องทดลองด้วยใบพัด (Laboratory Vane Shear Test) ตามรูปที่ 2.11 ตามมาตรฐาน ASTM D4648-94 โดยใช้ใบพัดกาทขนาดเล็ก (Miniature Vane Blade) ขนาดประมาณ 12 มม. X 12 มม. หรืออัตราส่วน 1:1, 2:1 กดลงบนตัวอย่าง จากนั้นหมุนใบพัดด้วยมือหรือมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 60-90°/นาที ทำการวัดแรงบิดที่วัดการต้านการวิบัติจากหมุนของใบพัด ซึ่งทำให้สามารถคำนวณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสนาม (Field Vane Shear Test)

ค่ากำลังรับแรงเฉือนสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3 ดังนี้

$$S_u = \frac{T}{\pi \left(\frac{hb^2}{2} + \frac{b^2}{6} \right)} \times 98.07 \text{ kPa} \quad (2.3)$$

โดยที่สมมติให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ปลายบนและล่างมีค่าคงที่เท่ากันตลอดแนวรัศมีของใบพัด

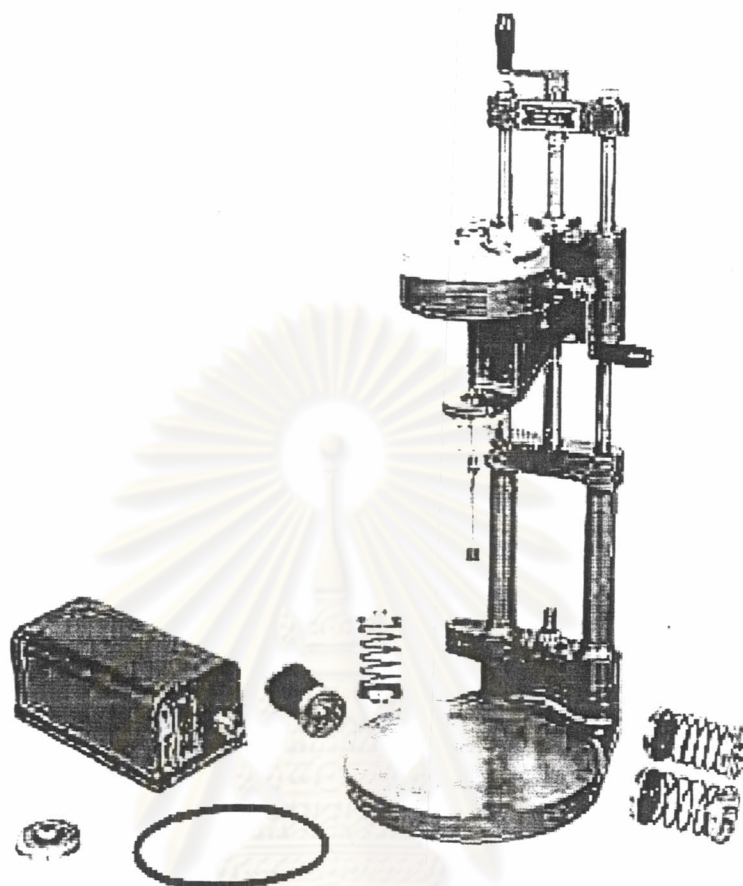
เมื่อ T = ค่าแรงบิด (Torque) ที่ดินวิบัติ, kg-cm.
 h = ความสูงของใบพัด, cm.
 b = ความกว้างของใบพัด, cm.

ค่าแรงบิด (Torque, T) จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสปริง (K) ซึ่งจะสามารถวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนได้ในช่วงที่กว้างมากขึ้นเมื่อใช้ค่าคงที่ของสปริงที่เปลี่ยนแปลงไป

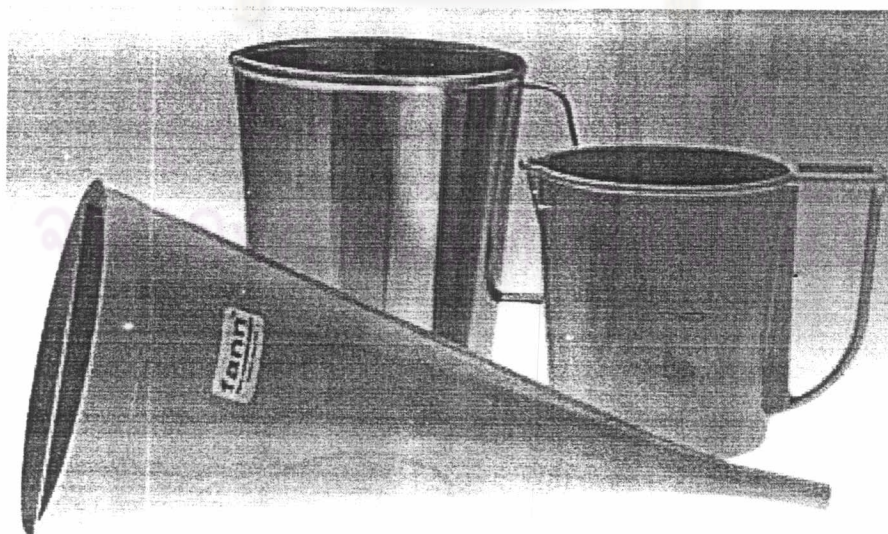
2.2 การทดสอบ ความหนืด (Viscosity) ของดินเหนียว

การทดสอบความหนืด (Viscosity) คือการทดสอบการไหลของไหลของเหลวเปรียบเทียบกับเวลา โดยทั่วไปแล้วการทดสอบหาความหนืดของดินมีหลากหลายวิธีด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดหาวิธีการทดสอบหาความหนืด 2 วิธี คือ

1. Marsh Funnel Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B Section 2 ดังรูปที่ 2.12 เป็นการวัดอัตราการไหลของไหลของเหลวเปรียบเทียบกับเวลา โดยกรวยมีความจุ 946 cm³ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 21 ± 3 °C ทดสอบโดยการเทของไหลลงในกรวยให้ได้ปริมาตรตามต้องการแล้วทำการจับเวลาการไหลของไหลของเหลวที่ไหลนั้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงออกมาในหน่วย Second



รูปที่ 2.11 เครื่องมือ Laboratory Vane Shear Test



รูปที่ 2.12 เครื่องมือ Marsh Funnel ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B
Section 2

2. Baroid Rheometer หรือ Hand-Crank Viscometer ตามมาตรฐาน API RP 13 B , I , Section เครื่องมือดังแสดงในรูป 2.13 เป็นการทดสอบหา Plastic Viscosity และ Yield Point ของขี้ไหล ทำการทดสอบโดยการนำตัวอย่างของไหลใส่ถ้วยเตรียมตัวอย่างแล้วนำมาประกอบกับเครื่องมือ ทำการหมุนแกนของเครื่องมือด้วยอัตราเร็ว 600 และ 300 รอบ/วินาที ที่อุณหภูมิ 24 ± 3 °C อ่านค่าความหนืดที่ 600 และ 300 รอบ/วินาที จากนั้นคำนวณหาค่าความหนืดตามสมการ

$$\text{ความหนืดพลาสติก (เซนติพอยส์)} = \left(\frac{\text{ค่าที่อ่านที่อัตราเร็ว}}{600 \text{ รอบ/นาที่}} \right) - \left(\frac{\text{ค่าที่อ่านที่อัตราเร็ว}}{300 \text{ รอบ/นาที่}} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{Yield Point (Pa)} = 1.44 \times \left(\frac{\text{ค่าที่อ่านที่อัตราเร็ว}}{300 \text{ รอบ/นาที่}} - \text{ความหนืดพลาสติก} \right) \quad (2.5)$$

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ กำลังรับแรงเฉือนกับความหนืดมีดังนี้

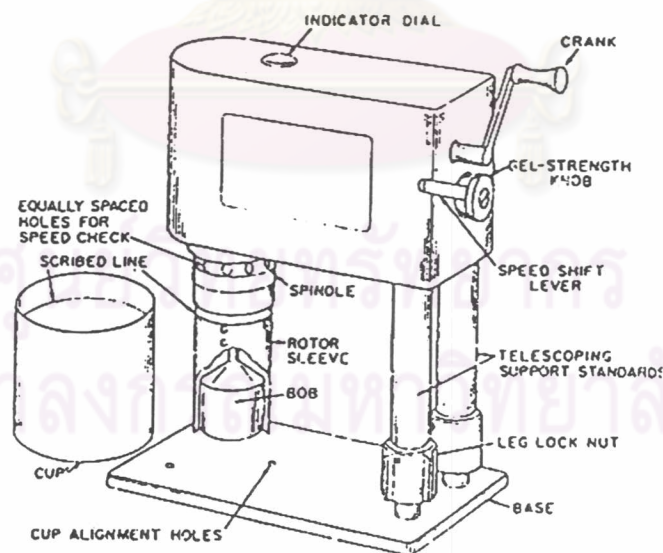
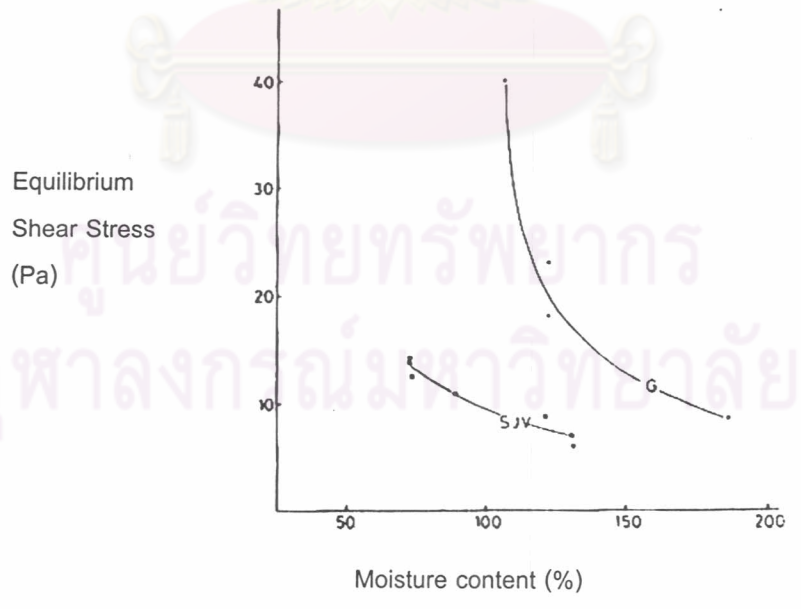


Fig. 7 - Diagram of Baroid Rheometer.

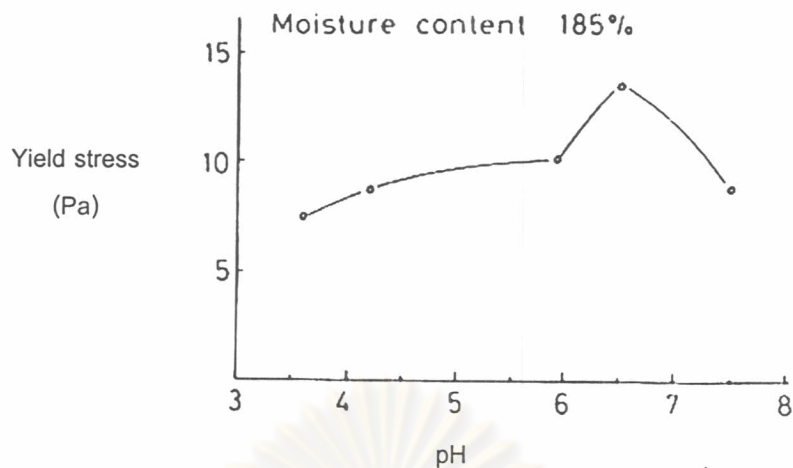
รูปที่ 2.13 เครื่องมือ Hand-Crank Viscometer ทดสอบความหนืดตามมาตรฐาน API RP 13B, I , Section 3

Bentley(1979) ได้ใช้ตัวอย่างดินเหนียว 2 ชนิดคือ St. Jean Vianney clay (SJV) มีค่าความไวตัว(Sensitivity, S_v) ประมาณ 200 ขึ้นไป และดินเหนียว Gloucester ค่าความไวตัวประมาณ 20 ทำการทดสอบหาค่าความหนืด(viscosity) ด้วย Viscometer กับดินเหนียวตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินเหนียว Gloucester มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามเวลา และตัวอย่างดินเหนียว SJV ค่าความหนืดกลับลดลงตามเวลาพฤติกรรมตรงกันข้ามกันนี้สามารถอธิบายได้จากความคละกันของอนุภาคในมวลของดิน และส่วนผสมทางแร่ธาตุต่างๆในดินแตกต่างกัน จากนั้น Bentley(1979) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือน (Shear Stress) ของดินกับปริมาณความชื้น (Water Content) ตามรูปที่ 2.14 พบว่าเมื่อปริมาณค่าชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงและดินที่มีค่าความไวตัวมากจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่าดินที่มีค่าความไวตัวน้อย ที่

ปริมาณความชื้นเดียวกัน นอกจากนั้น Bentley(1979) ยังทดสอบอีกว่าเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Yield Stress มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.15 จากรูปพบว่าค่า Yield Stress มีค่ามากที่สุดที่ $pH \approx 6.5$ Yong et al. (1979) ได้เคยอธิบายเหตุผลนี้ว่าเนื่องจาก ดินเป็นสารประกอบของ Cementitious Material เมื่ออยู่ที่สภาวะที่เหมาะสม (เช่นที่ pH ที่เหมาะสม) จึงทำให้ดินมีการยึดเกาะตัวได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้ค่า Yield Stress เพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของ ค่าความชื้นกับค่ากำลังรับแรงเฉือน โดย Bentley (1979)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของ pH กับ Yield Stress สำหรับดิน Gloucester โดย Bentley (1979)

Torrance(1987) ได้ศึกษาความสัมพันธ์เกี่ยวกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนที่ถูกรบกวนด้วยวิธีการรบกวนกับค่า Yield Stress ซึ่งหาค่าได้จากวิธีการทดสอบหาค่าความเหนียว จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธีการรบกวนและ Viscometer ค่าอัตราเร็วในการเฉือนของดิน(Shear Rate) มีผลอย่างมากต่อค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Resistance) ตามรูปที่ 2.16 จากรูปพบว่าเมื่อค่าอัตราเร็วในการเฉือนของดิน(Shear Rate) เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Resistance) จะเพิ่มมากขึ้นด้วยและพบว่าเมื่อค่าความเค็มของดิน (Salinity) เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Resistance) ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย หลังจากนั้น Torrance(1987) ได้นำตัวอย่างดินเหนียวซึ่งเปลี่ยนแปลงทางเคมีในแบบต่างๆตาม ตารางที่ 2.7 และตารางที่ 2.8 ซึ่งพบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติของดินเป็นอย่างมากตามตาราง จากนั้นเมื่อนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบกรวยตก และหาค่า Yield Stress จากการทดสอบหาค่าความเหนียว โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มและค่าทางเคมีต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 2.17 Torrance(1987) ได้อธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นว่า จากรูป(a)ถึง(d)การหาความสัมพันธ์จะกระทำได้อย่างยากอย่างไรก็ตามพบความสัมพันธ์ในแต่ละรูปได้ว่าเมื่อค่าความชัน(Slope) ของตัวอย่างดินเดี่ยวจะลดลงเมื่อค่าความเค็มของดินลดลงซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ทางด้าน Plasticity

Locat(1988) ได้เสนอว่า การศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการไหลของดินเหนียวที่มีความไวตัวสูง มีความสัมพันธ์กับค่าความเหนียวพลาสติก(Plastic Viscosity), Yield Stress, กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกรบกวน(Remolded Shear Strength), และ Liquidity Index โดยทั่วไปแล้วสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนได้กล่าวถึงดินที่มีค่า Liquidity Index สูงกว่า 6 สำหรับดินที่มีค่า

Liquidity Index ที่อยู่ระหว่าง 2-5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกรบกวนมีค่าระหว่าง 5-90 Pa. และค่า ความหนืดพลาสติกมีค่าอยู่ในช่วง 7-200 mPa.s. พฤติกรรมการไหลของดินมีค่าขึ้นตรงกับ ชนิดของดิน, ความเค็มของดิน (Pore-water Salinity), แร่ธาตุต่างๆในดิน และค่าปริมาณความชื้น (Water Content) ชนิดของการไหลของดินในรูปแบบต่างๆได้แสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งค่าความหนืดก็มีลักษณะเดียวกันกับความชัน (Slope) ของส่วนโค้งในรูป จากรูปพบว่า Curve 2 คือ Thickening liquids แสดงว่าค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Shear Rate มีค่าเพิ่มขึ้น, Curve 3 แสดงพฤติกรรมที่ตรงกันข้ามคือเมื่อค่าความหนืดจะลดลงเมื่อค่า Shear Rate มีค่าลดลง, Curve4 เป็นการไหลแบบ Plastic หรือการไหลแบบ Casson แสดงรูปแบบการไหลโดยใช้ค่า Yield Stress (หรือ Yield Point) และค่าความหนืดลดลงแบบช้าๆ ที่อัตราความเร็วในการเฉือนสูงๆ, Curve 5 แสดงว่าค่าความหนืดมีค่าคงที่ ที่ค่าค่าหนึ่งจะมีลักษณะเหมือนการไหลของวัสดุทั่วไป ซึ่งเรียกว่า Bingham Fluids จากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield Stress กับค่าความหนืด ดังรูปที่ 2.19, ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield Stress กับค่า Liquidity Index ดังรูปที่ 2.20, ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับค่า Liquidity Index ดังรูปที่ 2.21 และความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินถูกรบกวนกับค่า Yield Stress ดังรูปที่ 2.22 จากรูปที่ 2.21 Locat(1988) ได้หาความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่เกิดขึ้นได้ตามสมการที่ (2.4)

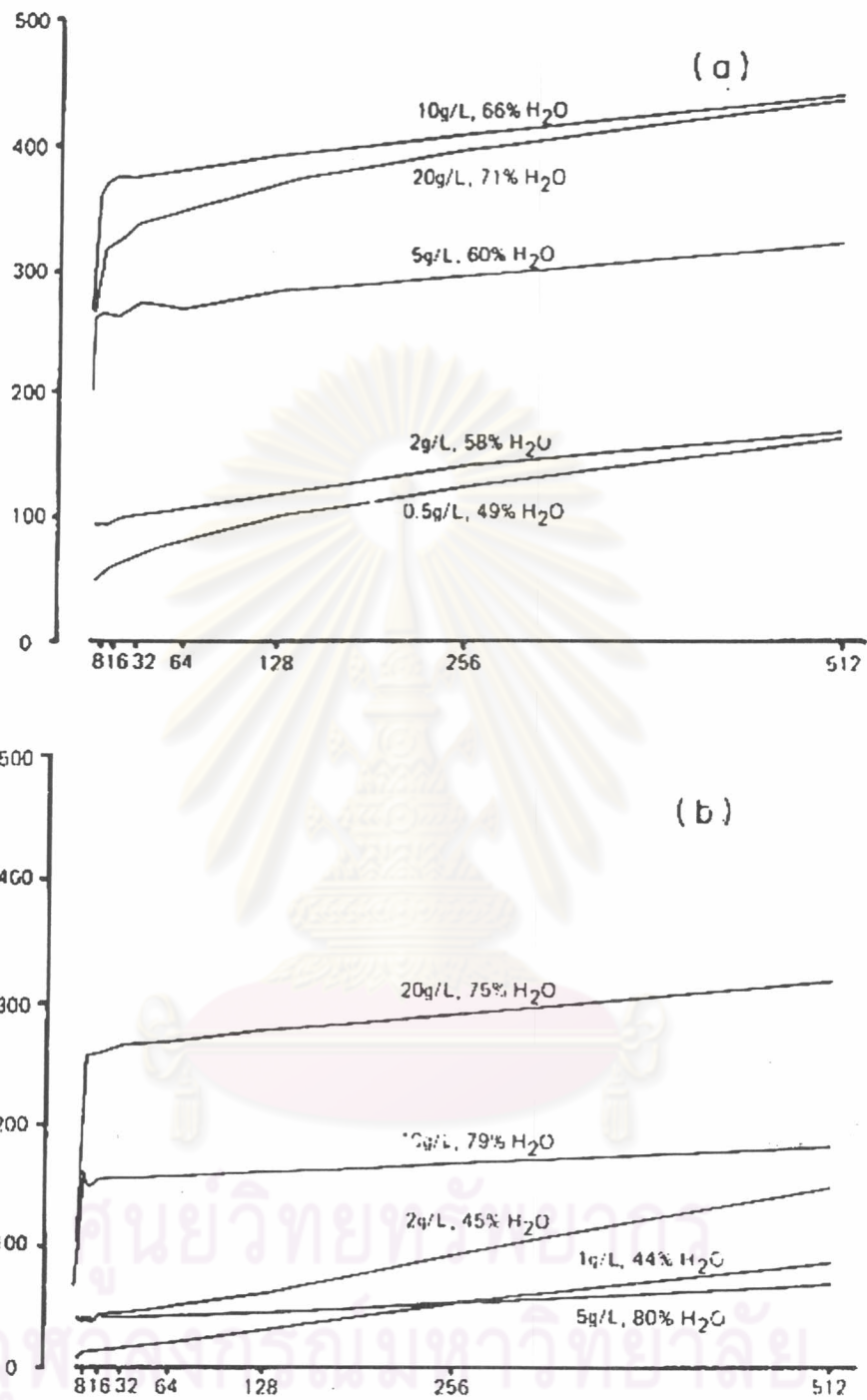
$$\eta = (9.27/l_L)^{3.33} \quad (2.6)$$

โดยที่ η = ค่าความหนืด (mPa.s)

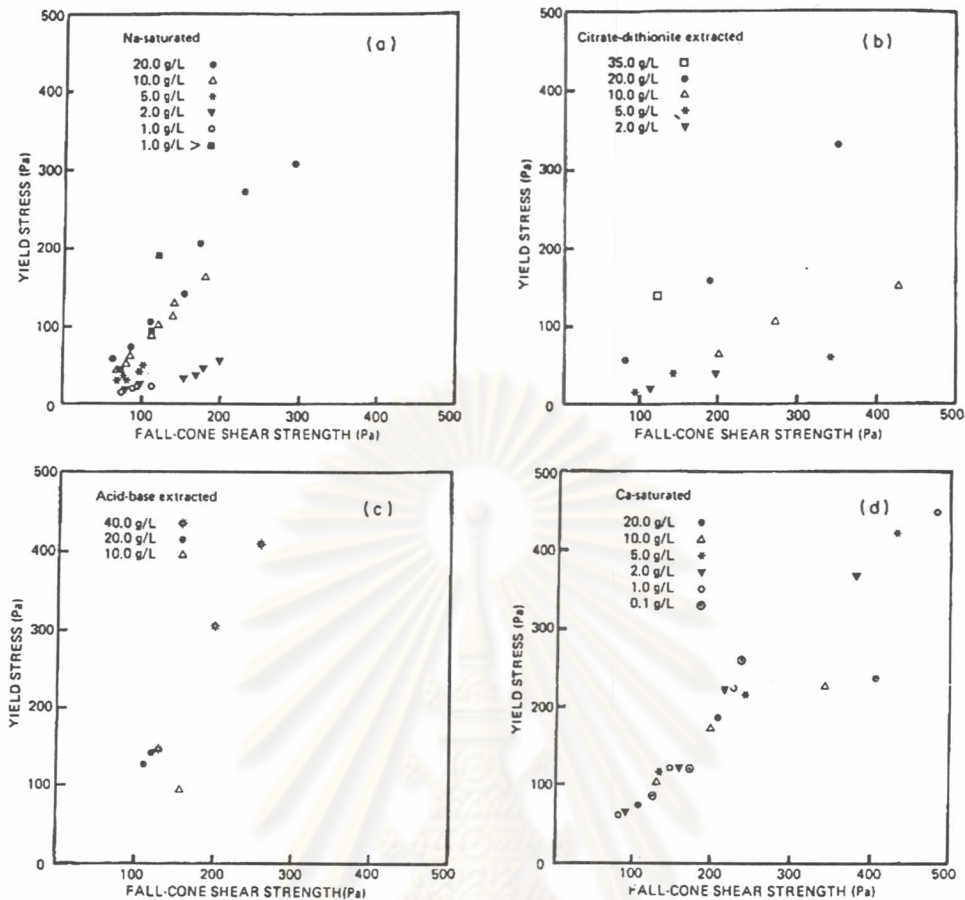
l_L = ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)

อีกทั้งได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวถูกรบกวน (c_u) กับค่า Liquidity Index จากรูป Locat(1988) ได้ใช้ Curve A หาสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ตามสมการที่ (2.5)

$$c_u = (19.8/l_L)^{2.44} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.16 (a) ดินเหนียว South Nation และ (b) ดินเหนียว St. Leon le Ground ใน sodium-saturated state โดยเปลี่ยนแปลง ค่าความเค็มและค่าความชื้น โดย Torrance (1987)



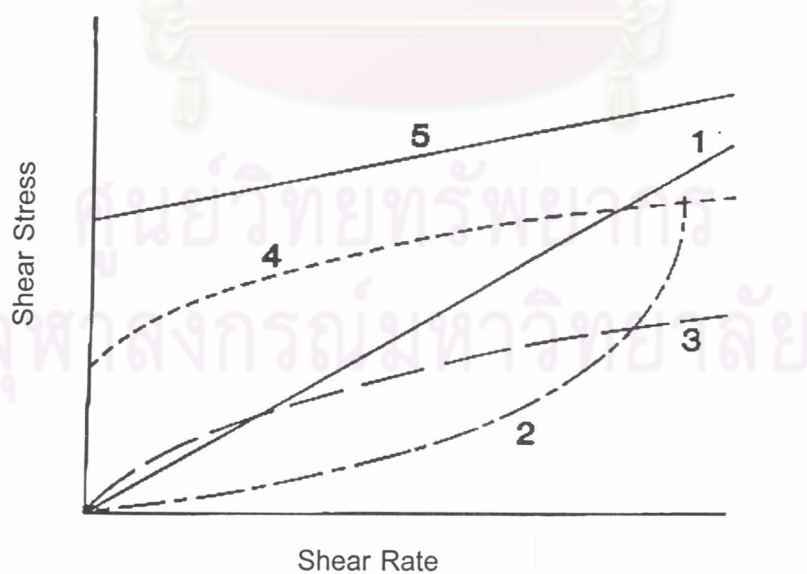
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield Stress ซึ่งหาค่าโดยใช้วิธีทดสอบค่าความหนืด และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งใช้วิธีการรูดกในการทดสอบ (a) Na-saturated, (b) citrate-dithionite extracted และ Na-saturate (c) acid-base extracted และ Na-saturated, (d) Ca-saturated โดย Torrance (1987)

ตาราง 2.7 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ใช้ทดสอบ โดย Torrance (1987)

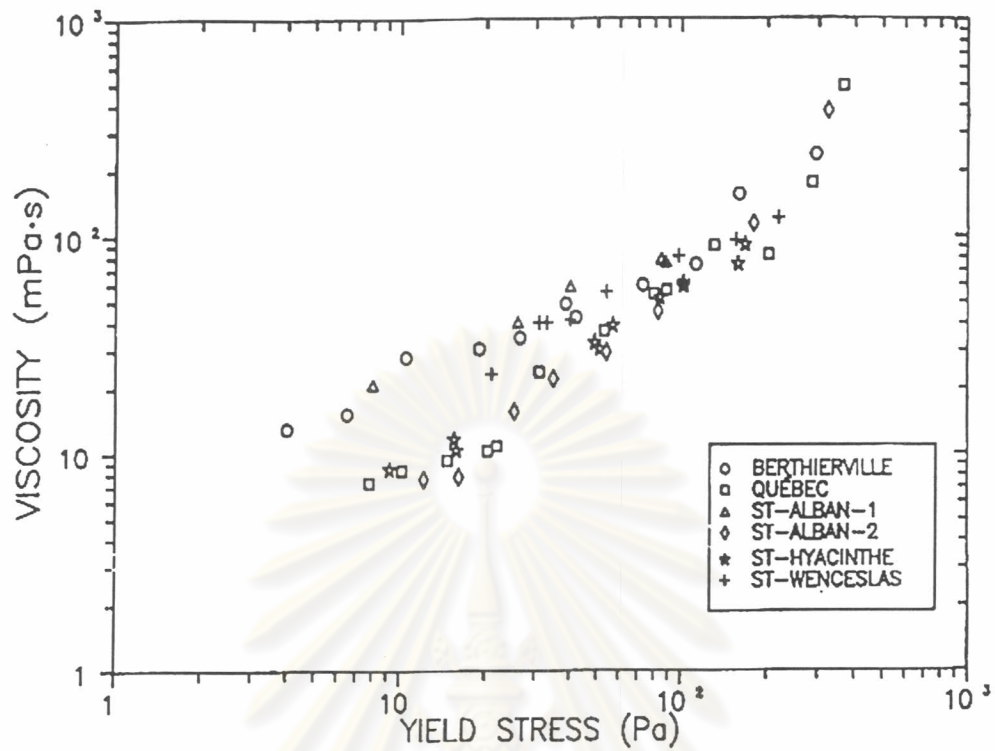
Soil	Salinity (g / L)	Pretreatment	Water Content	ω_L	ω_P	I_P
St. Leon le Grand	23.4	50	50	47.2	23.1	24.1
South Nation	1.1	65	45	36	20	16
Grand Baleine	0.8	67	51	35.7	25.9	9.8

ตาราง 2.8 ข้อมูล Atterberg Limits ของดินเหนียวที่มี sodium-saturated, ค่าความเค็มสูง โดย Torrance (1987)

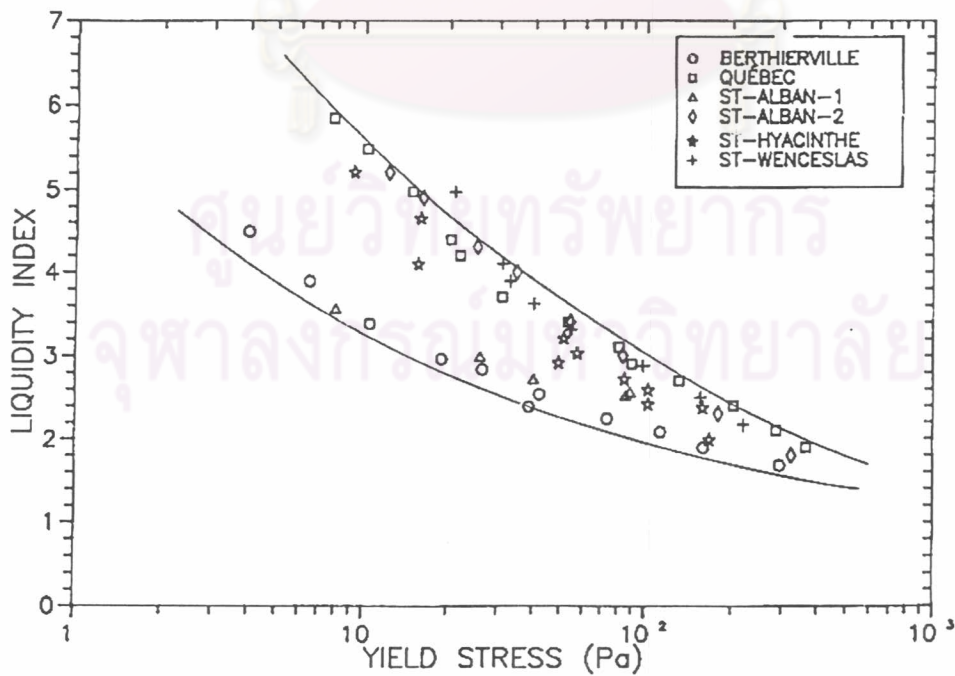
Soil	Salinity		ω_L	ω_p	I_p
	(g / L)	Pretreatment			
St. Leon le Grand	20	Na-saturated	46.8	23.0	23.8
		Citrate-dithionite	32.7	20.3	12.4
		Acid-base	24.3	16.4	7.9
South Nation	20	Na-saturated	48.4	20.7	27.7
		Citrate-dithionite	47.8	21.1	26.7
		Acid-base	32.6	17.9	14.7
Grand Baleine	20	Na-saturated	37.1	23.6	13.5
		Citrate-dithionite	35.5	21.0	12.5
		Acid-base	27.6	21.4	6.2



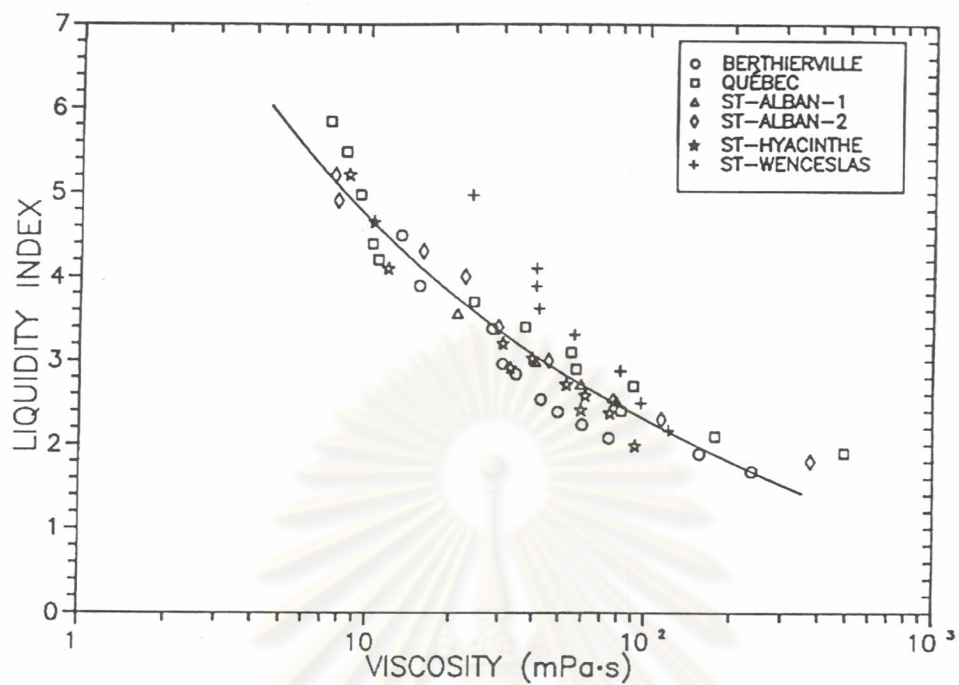
รูปที่ 2.18 ชนิดของการไหลแบบต่างๆ (1) Newtonian (2) thickening (3) fluidizing (4) Casson (5) Bingham โดย Locat (1988)



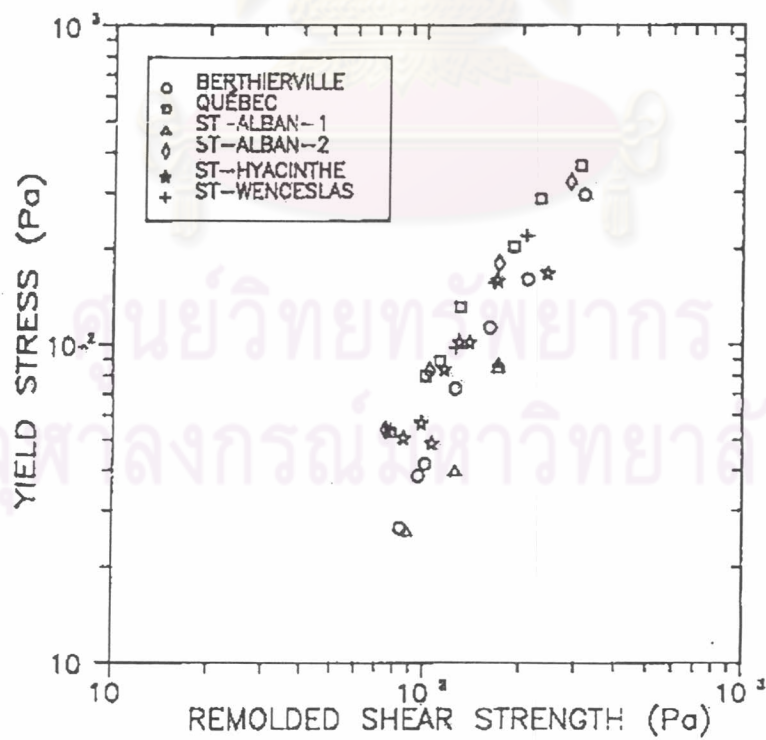
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity และ yield Stress โดย Locat (1988)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ yield Stress โดย Locat (1988)



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Liquidity Index และ Viscosity โดย Locat (1988)



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของ Yield Stress และ Remolded Shear Strength โดย Locat (1988)