

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มประกอบด้วยแรงเสียดผิวและแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม โดยในดินเหนียวแข็งนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มคอกส่วนใหญ่มาจากแรงเสียดทานผิวระหว่างเสาเข็มกับดินโดยรอบ ซึ่งแรงเสียดทานผิวระหว่างเสาเข็มกับดินโดยรอบสามารถอธิบายโดยทฤษฎีของ Coulomb (Poulos, 1980) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนระหว่างดินกับเสาเข็ม ดังสมการที่ 2.1

$$\tau_s = c_s + \sigma_n \tan \phi_a \quad (2.1)$$

โดยที่ τ_s = หน่วยแรงเฉือนระหว่างดิน กับ เสาเข็ม

c_s = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดิน กับ เสาเข็ม

σ_n = หน่วยแรงตั้งฉากกระทำที่เสาเข็ม

ϕ_a = มุมของแรงเสียดทานระหว่างดิน กับ เสาเข็ม

โดยที่ $\sigma_h = K_s \sigma_v$

K_s = สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน

ดังนั้นได้ $\tau_s = c_s + K_s \sigma_v \tan \phi_a$ เป็นสมการ การหาหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มแบ่งเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 สถานะไม่มีการระบายน้ำ (Undrained Load Capacity)

ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ ($\phi_a = 0$) ดังนั้นสมการที่ (1) จะได้

$$\tau_s = c_s \quad (2.2)$$

กรณีที่ 2 สถานะมีการระบายน้ำ (Drained Load Capacity)

$$\tau_s = c'_s + K'_s \sigma'_v \tan \phi'_a \quad (2.3)$$

โดยที่ ϕ'_a = มุมของแรงเสียดทานในสถานะระบายน้ำระหว่างดิน กับ เสาเข็ม

2.1.1 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงรวม

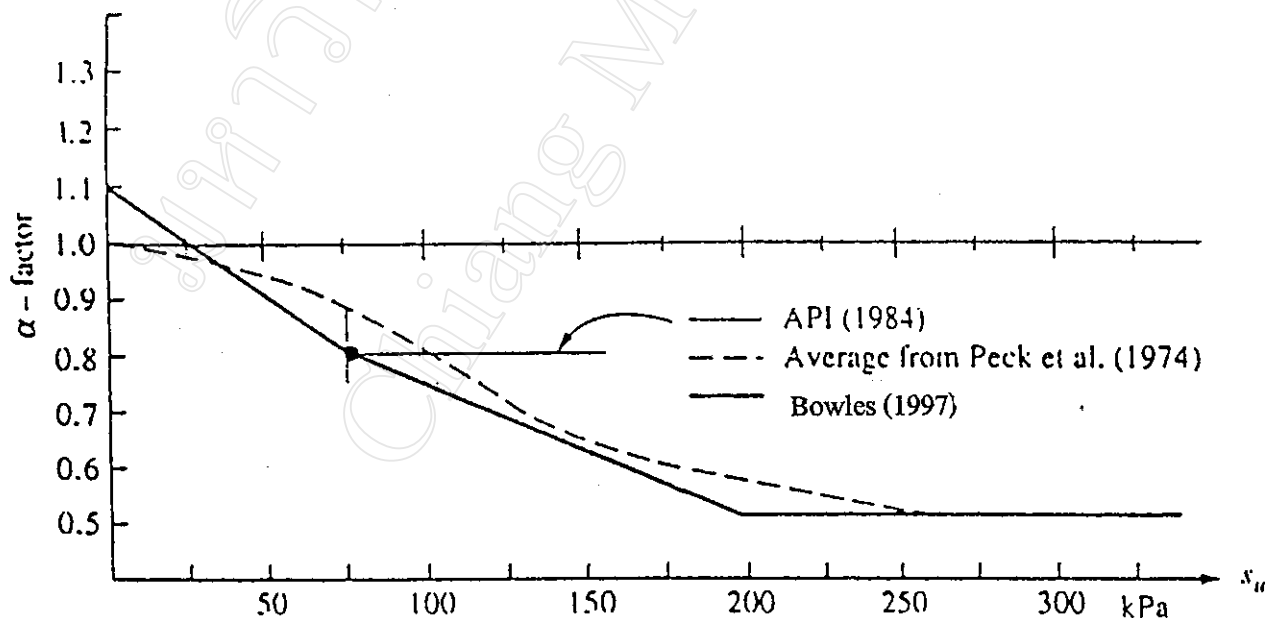
สำหรับดินเหนียวแข็งนั้นมีอัตราการซึมน้ำค่อนข้างช้ามาก การวิบัติของดินส่วนใหญ่จึงเกิดในลักษณะของการไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) มุมเสียดทาน (ϕ) ของดินเหนียวจึงมีค่าน้อยมากและในการวิเคราะห์จะประมาณให้เท่ากับศูนย์ (บุญเทพ นานะกรังสรรค์, 2539) ดังนั้นหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกจึงประมาณได้จากสมการ

$$f_s = \alpha S_u \quad (2.4)$$

โดยที่ S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

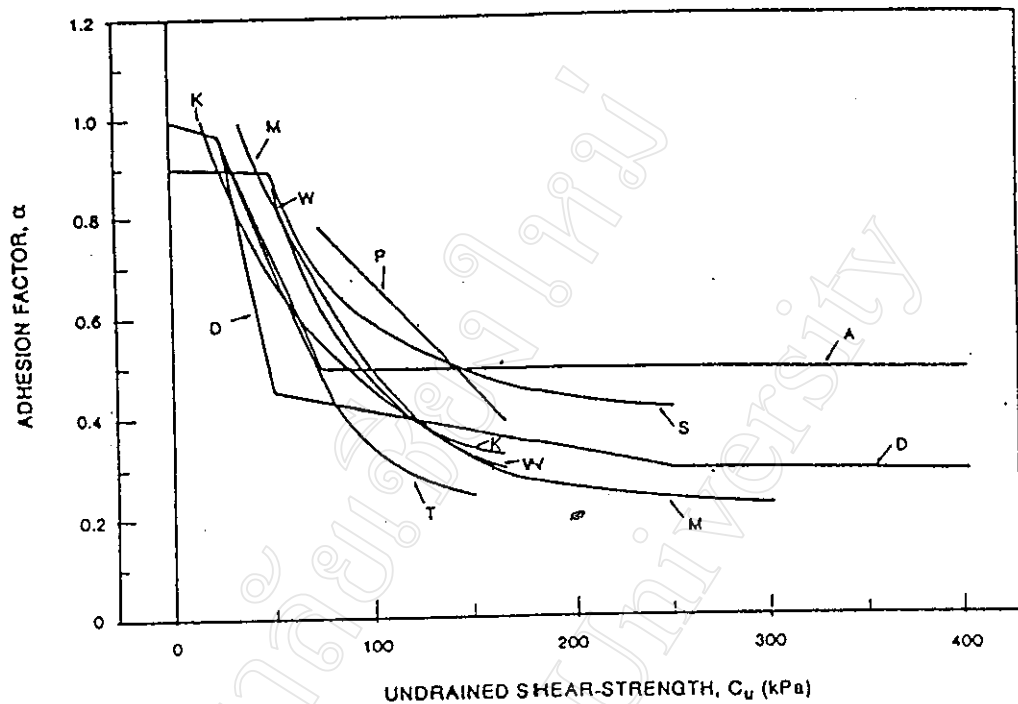
α = สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor) หรือ อัตราส่วนระหว่าง หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดิน กับ เสาเข็มที่วัดได้จากในสนาม ต่อ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของดิน

มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 เพื่อใช้ในการประเมินหาหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกในดินเหนียว



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ที่มา : Bowles (1997)



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยนักวิจัยต่างๆ : Kerisel (1965), Tomlinson (1957), Woodward and Boitano (1961), Peck (1958), Dennis and Olson (1983), American Petroleum Institute (1974), Sowers and Sowers (1970), McCarthy (1977).

ที่มา : Sladen (1992)

2.1.2 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงประสิทธิภาพผล

วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงประสิทธิภาพผลมีแนวคิดว่าการวิบัติที่เกิดขึ้นของดินรอบๆ เสาเข็ม หรือ การวิบัติที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็ม กับดินนั้น อยู่ในสถานะที่มีการระบายน้ำ (Drain Condition) ดังนั้นจึงใช้ตัวแปรกำลังแบบหน่วยแรงประสิทธิภาพ (Effective Strength Parameter) ในการประเมินหาหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม โดยได้มีผู้ที่ทำการศึกษาดังนี้

Bowles (1997) ได้สรุปผลการศึกษาของ Burland (1973) ที่มีข้อสมมุติฐานว่า

ก. ในระหว่างการติดตั้งเสาเข็ม สภาพของดินรอบเสาเข็มเป็นสภาพถูกกระทบกระเทือน (Remould State) ซึ่งเป็นสภาพของดินที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดิน เท่ากับ ศูนย์

ข. ในระหว่างการติดตั้งเสาเข็มและการให้น้ำหนักบรรทุก ที่เสาเข็มจะเกิดการระบายน้ำออกจากดิน

ค. ในระหว่างการติดตั้งเสาเข็มคำนวณแรงประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นที่ผิวของเสาเข็มจะน้อยกว่าหน่วยแรงประสิทธิภาพ ที่ผิวของเสาเข็มก่อนการติดตั้งเสาเข็ม

โดย Burland (1973) ได้ให้สมการ หน่วยแรงเสียดทานผิวดังนี้

$$f_s = \beta \sigma_v' (av) \quad (2.5)$$

โดยที่ $\beta = K_s \tan \phi'$

K_s = สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน ให้เท่ากับ $1 - \sin \phi'$

ϕ' = มุมของแรงเสียดทานประสิทธิภาพของดินในสภาวะถูก
กระทบกระเทือน

โดยที่ Burland (1973) แนะนำให้ใช้ $\phi' = \phi'_s$; มุมของแรงเสียดทานประสิทธิภาพ
ของดิน ณ จุดวิกฤติ

$$\sigma_v' (avg.) = \text{หน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวตั้งเฉลี่ย}$$

Meyerhof (1976) สนับสนุนสมการของ Burland (1973) และพบว่าจากข้อมูลการทดสอบ
เสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน ถึง ดินเหนียวแข็งปานกลาง ค่า สัมประสิทธิ์เบต้า (Beta factor, β) จะมี
ค่าลดลงเมื่อความยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ซึ่ง Meyerhof ได้แนะนำค่าสัมประสิทธิ์เบต้า สำหรับเสา
เข็มสั้น (ความยาวน้อยกว่า 25 เมตร) มีค่าระหว่าง 0.25-0.50 และค่าสัมประสิทธิ์เบต้า สำหรับเสา
เข็มยาวมีค่าระหว่าง 0.10-0.25 สำหรับในดินเหนียวแข็ง London ค่า K_s มีค่ามากที่บริเวณดินชั้นบน
(ประมาณ 3) และมีค่าลดลงเมื่อความลึกมากขึ้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เบต้ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.5
(เสาเข็มยาว) ถึง 2.5 (เสาเข็มสั้น) สมการการประมาณค่าหาสัมประสิทธิ์เบต้า

$$\beta = 1.5(1 - \sin \phi') \sqrt{OCR} \tan \phi' \quad (2.6)$$

โดยที่

ϕ' = มุมแรงเสียดทานประสิทธิภาพของดิน ณ จุดวิกฤติ

OCR = อัตราส่วนของหน่วยแรงดันของดินในแนวตั้งในอดีต ต่อ หน่วยแรง

ดันดินในแนวตั้งปัจจุบัน

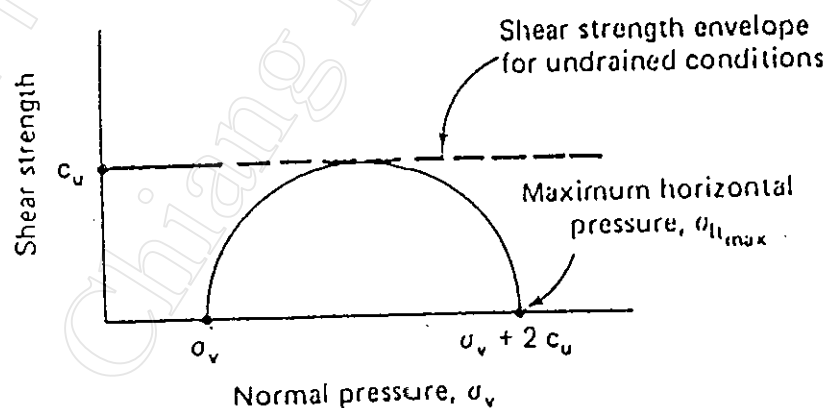
2.1.3 วิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงรวม และหน่วยแรงประสิทธิผลร่วมกัน

Bowles (1997) ได้เสนอสมการจากผลการศึกษาของ Vijakverjiya and Focht ที่ได้เสนอสมการการหาหน่วยแรงเสียทานผิวที่มีทั้งการใช้ทั้งหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล โดยมีสมมุติฐานว่าการแทนที่ของเสาเข็มในดินทำให้เกิดแรงดันดินในสภาพะที่ดินถูกผลัก (Passive Lateral Pressure) ที่ดินรอบๆเสาเข็ม ดังแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยสมการนี้ใช้ผลการทดสอบเสาเข็มยาวในการก่อสร้างโครงการเกี่ยวกับการก่อสร้างฐานขุดเจาะน้ำมัน ความสัมพันธ์ที่ได้ดังสมการ

$$f_s = \lambda(\sigma'_{v(avg)} + 2c_{u(avg)}) \quad (2.7)$$

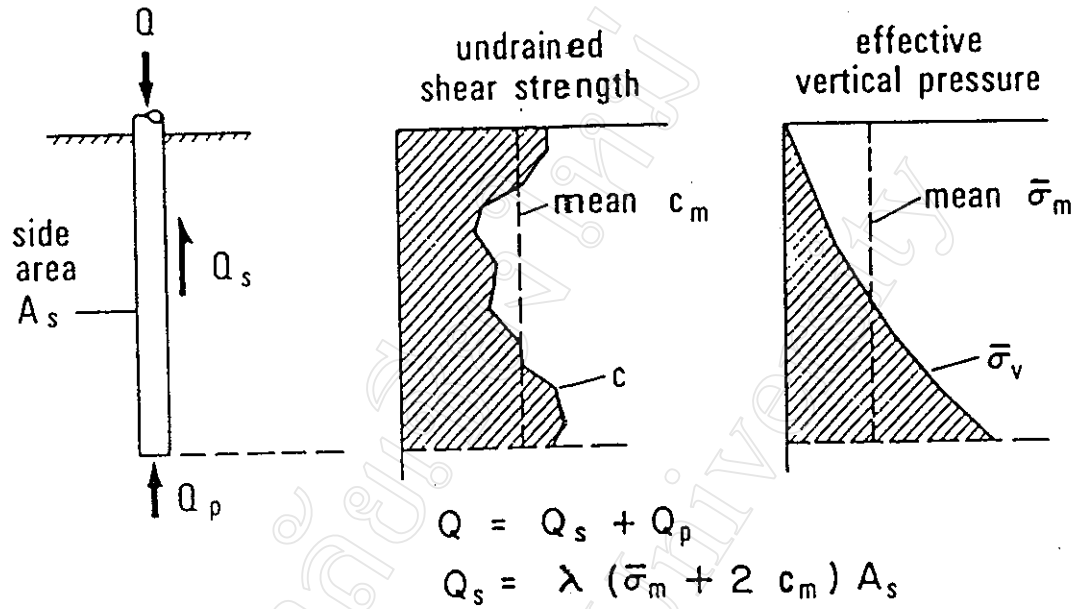
โดยที่ $\sigma'_{v(avg)}$ = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งเฉลี่ยตลอดความยาวของเสาเข็ม

λ = สัมประสิทธิ์ของความยาวเสาเข็มที่ฝังในดิน แสดงในรูปที่ 2.5

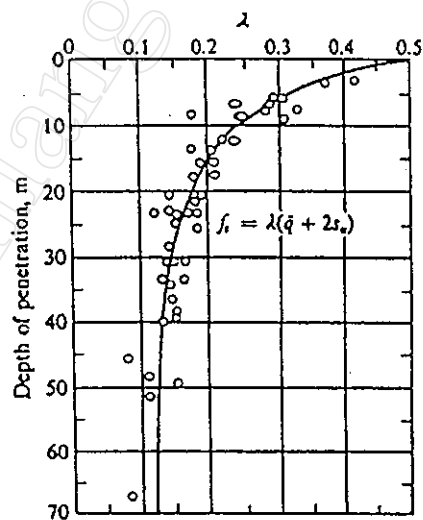


รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงในแนวตั้ง กับ หน่วยแรงสูงสุดในแนวนอนโดย วงกลมของมอร์

ที่มา : McCarthy (1988)



รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการประเมินหาแรงเสียดทานผิวโดยวิธี Vijakverjiya and Focht
ที่มา : McClelland (1974)



รูปที่ 2.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ กับ ความยาวเสาเข็มที่ฝังในดิน
ที่มา : Bowles (1997)

Flaate and Selnes (1977) ได้พัฒนาสมการในการหาหน่วยแรงเสียดทานผิวโดยวิธีหน่วยแรงประสิทธิภาพและนำผลการทดสอบเสาเข็มจริงใน สนามบีคระห้กลับ เพื่อหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการประเมินหาหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาตอก (สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ และสัมประสิทธิ์เบต้า) รวมทั้งทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานผิวจากผลการทดสอบเสาเข็มในสนามกับสมการต่างๆที่มีหลายนักวิจัยได้พัฒนาขึ้นมา โดยในการพัฒนาสมการในการหาหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอก Flaate and Selnes (1977) ใช้สมการ การหาหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกของ Bjerrum ที่ได้อาศัยความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร Hvorslev กับ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index, I_p) และได้สรุปความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$f_s = \mu_L ((0.3 - 0.001 I_p) \sqrt{OCR} \sigma_v' + 0.008 I_p S_u) \quad (2.8)$$

หรืออาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นอีกเช่นเดิม จัดสมการให้อยู่ในรูปง่ายได้ คือ

$$f_s = \mu_L 0.4 \sqrt{OCR} \sigma_v' \quad (2.9)$$

โดยที่ μ_L = สัมประสิทธิ์ความยาวเสาเข็มที่ฝังในดินสำหรับลดค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว

$$= (L + 65.6) / (2L + 65.6) ; (L \text{ in ft.})$$

I_p = ดัชนีความเหนียว

S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

OCR = อัตราส่วนของหน่วยแรงดันของดินในแนวดิ่งในอดีต ต่อ หน่วยแรงดันดินในแนวดิ่งปัจจุบัน

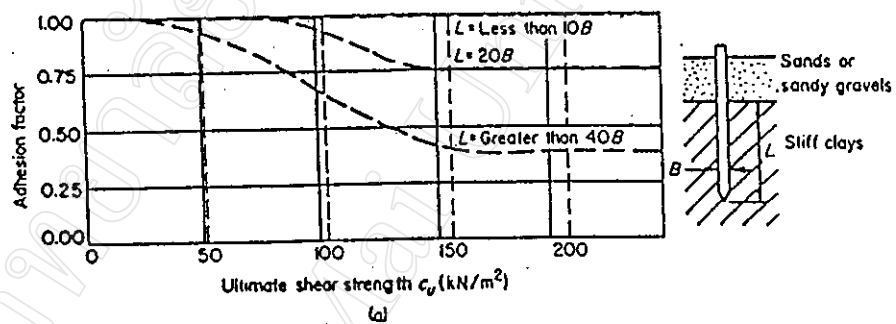
σ_v' = หน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวดิ่ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงเสียดทานผิว

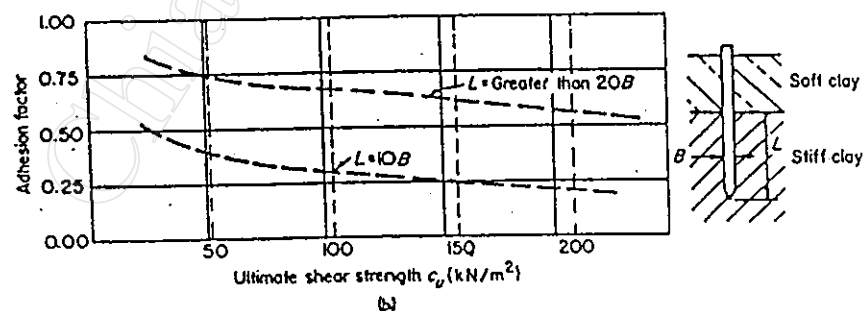
2.2.1 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงรวม

Tomlinson (1971) ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งจากผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 93 ต้น ในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม ประมาณน้ำหนักที่กระทำเสาเข็มเมื่อเสาเข็มเคลื่อนที่ไปเป็นระยะ 1 ใน 10 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสา แรงต้านทานปลายเสาเข็มใช้ N_c เท่ากับ 9 ซึ่ง Tomlinson (1971) พบว่าชั้นดินที่วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งและค่าอัตราส่วนระหว่างระยะฝังของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวแข็ง กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม จะมีผลต่อค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวของชั้นดินเหนียวแข็งกับเสา

เพิ่มเติม ดังนั้นจึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ (a) กรณีชั้นดินทรายวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง (b) กรณีชั้นดินเหนียวอ่อนวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง และ (c) เป็นชั้นดินเหนียวแข็งตลอด ทั้ง 3 กรณีแสดงดังรูปที่ 2.6 (a) รูปที่ 2.6 (b) และ รูปที่ 2.6 (c) ตามลำดับและTomlinson (1994) ได้เปรียบเทียบแรงเสียดทานเสาเข็มที่คาดคะเนได้ระหว่างการใช้กราฟในรูปที่ 2.6 (a) รูปที่ 2.6 (b) และรูปที่ 2.6 (c) กับผลการทดสอบเสาเข็มจริงจำนวน 78 ต้น ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 2.7 พบว่ามีเพียง 2 ต้นที่ให้ค่าจากการประมาณด้วยกราฟในรูปที่ 2.6 (a) รูปที่ 2.6 (b) และรูปที่ 2.6 (c) มากกว่าค่าที่วัดได้จริงเกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นกราฟในรูปที่ 2.6 (a) ถึง รูปที่ 2.6 (c) สามารถใช้ประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานได้โดยให้ค่าค่อนข้างปลอดภัย



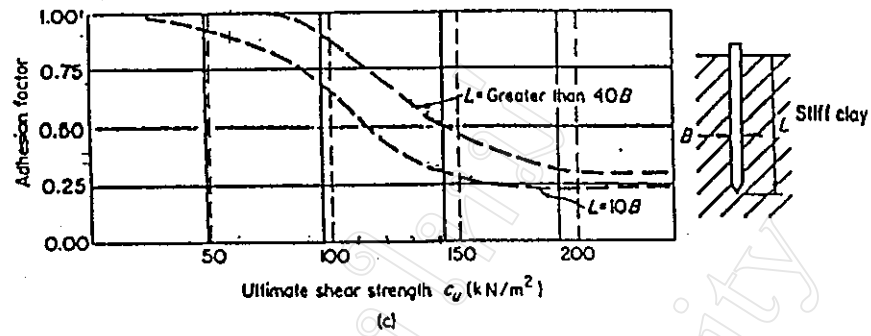
(a) กรณี มีชั้นทราย หรือ ชั้นกรวด วางตัวอยู่ด้านบน



(b) กรณี มีชั้นดินเหนียวอ่อนอยู่ด้านบน

รูปที่ 2.6 (a), (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแข็ง

ที่มา : Tomlinson (1994)

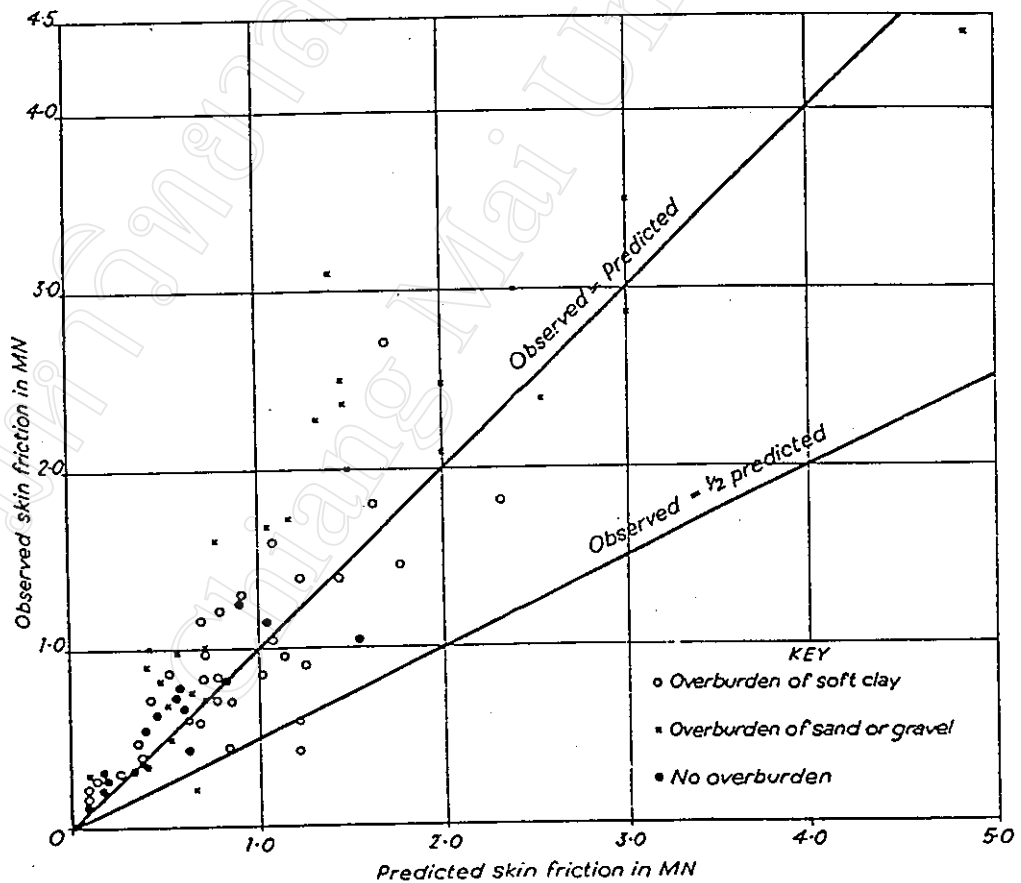


(c) กรณี เป็นชั้นดินเหนียวแข็งตลอด

รูปที่ 2.6 (c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ

ไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแข็ง

ที่มา : Tomlinson (1994)



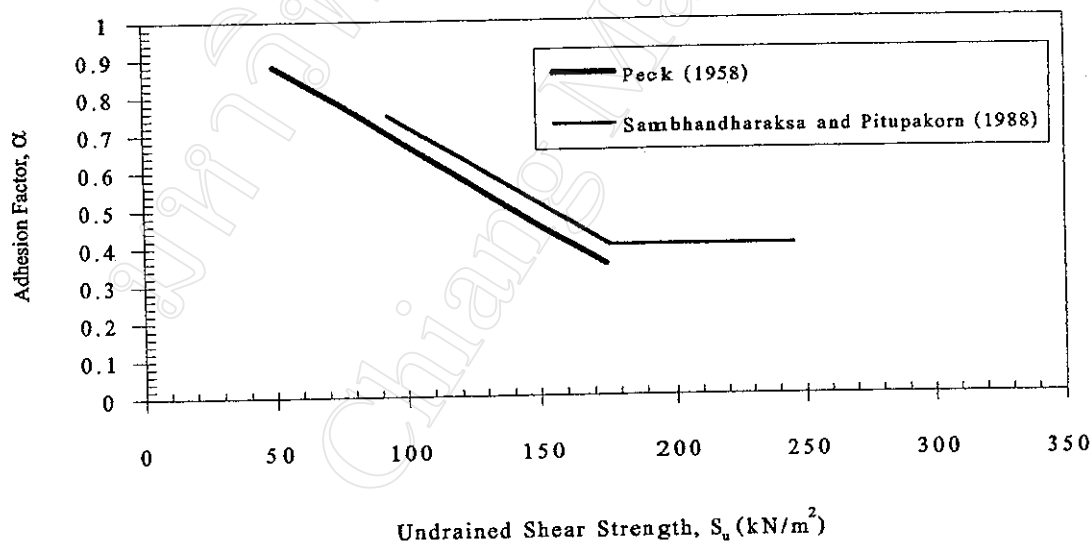
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบการทำนายน้ำหนักบรรทุกทุกประลักับน้ำหนักที่ทำการวัดได้จริงใน

สนามจากผลการทดสอบเสาเข็ม

ที่มา : Tomlinson (1994)

Sambhandharaksa and Pitupakorn (1988) ทำการศึกษาหาวิธีการในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกคอนกรีตอัดแรงสำหรับดินกรุงเทพฯ ที่ปลายเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทรายปนดินเหนียว โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 43 ต้น การหาแรงเสียดทานผิวของดินเหนียวอ่อนใช้สมการของ Tomlinson (1957) และการหาแรงต้านที่ปลายใช้สมการ $Q_p = 9S_u A_p$; S_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (จากการทดลองแรงอัดของดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (Unconfined Compressive Test))

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (จากการทดสอบการทดลองแรงอัดของดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด) ที่ประเมินได้แสดงดังรูปที่ 2.8 พบว่ามีลักษณะของกราฟที่ได้ใกล้เคียงกับ Peck (1958) และจากการใช้กราฟที่ได้นี้ประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม เทียบกับผลจากการทดสอบเสาเข็ม (ข้อมูลเดิมที่ใช้ในตอนต้นจำนวน 43 ต้น) พบว่า ให้ค่าผิดพลาด ± 15 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) การประเมินหาแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มใช้สมการของ Meyerhof (1976)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับค่า Undrained Shear Strength

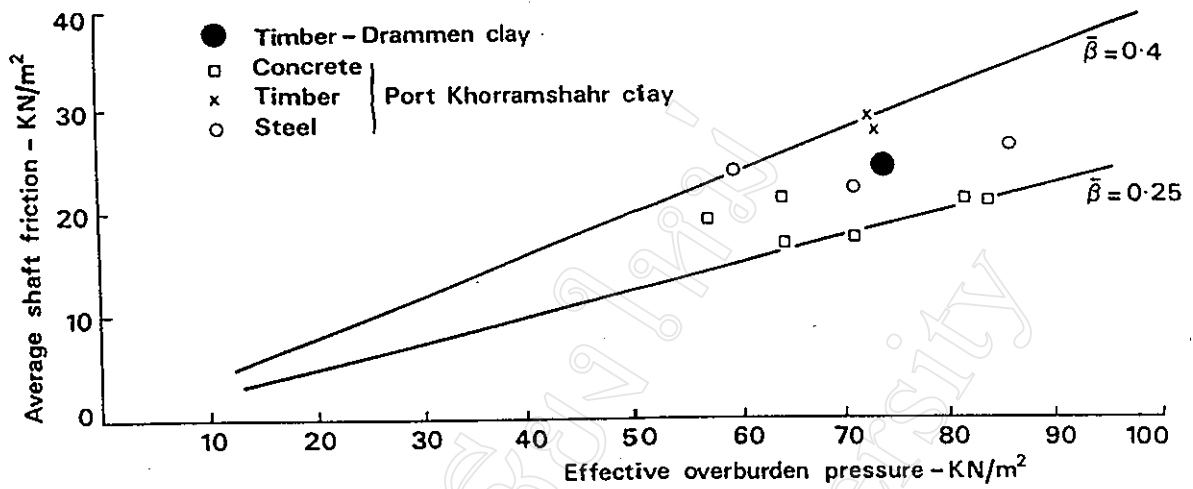
จากการใช้สมการข้างต้นในการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนัก เทียบกับผลการทดสอบเสาเข็ม (ข้อมูลเดิมที่ใช้ในตอนต้นจำนวน 43 ต้น) พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้มีค่าผิดพลาด ± 25 เปอร์เซ็นต์

Potyondy (1961) ได้ทำการศึกษาหาหน่วยแรงเสียดทานของดินเหนียวกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบ โดยใช้การทดลองกำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรง (Direct Shear Test) โดยตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบที่เตรียมจากการใช้แบบเหล็ก ขนาดของวัสดุรวมรวมไม่เกิน 2.5 มิลลิเมตร พบว่าค่า c_u/c เท่ากับ 0.40 และค่า δ/ϕ เท่ากับ 0.68 และพบว่าหน่วยแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดิน กับ ตัวอย่างคอนกรีตจะไม่เกิน หน่วยแรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดิน กับ ตัวอย่างดิน นอกจากนี้ที่หน่วยแรงตั้งฉากสูงๆจะมีค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวใกล้เคียงกันสำหรับตัวอย่างดินเหนียว ส่วนในตัวอย่างดินเหนียวปนทรายเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) มีแนวโน้มขนานกัน โดยที่ค่ากำลังระหว่างตัวอย่างดินกับ ตัวอย่างดินมีค่าสูงกว่ากำลังระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบ

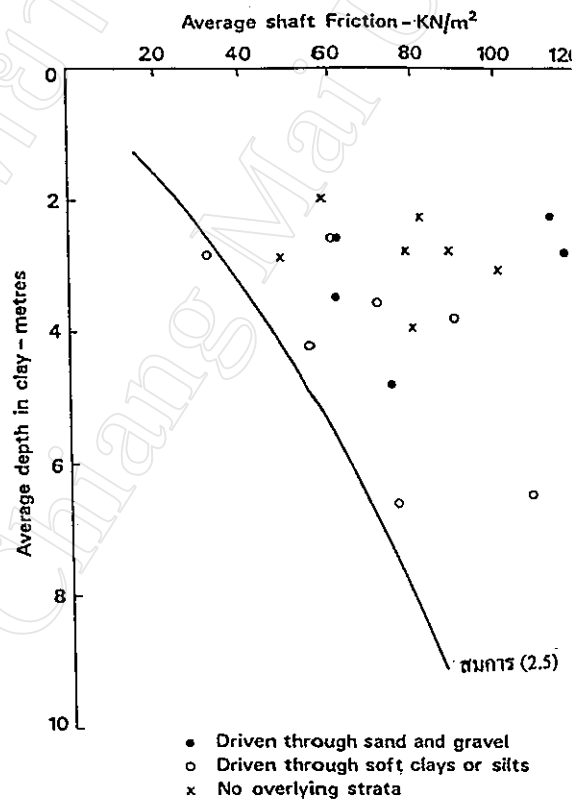
2.2.2 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงประสิทธิผล

Burland (1973) พบว่าในดินเหนียวอ่อน ค่าสัมประสิทธิ์เบต้ามีค่าระหว่าง 0.29-0.40 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 พบว่าสามารถใช้ประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวได้ดี โดยไม่ขึ้นกับชนิดของดินเหนียว แต่สำหรับในดินเหนียวแข็ง มีความซับซ้อนในเรื่องของพฤติกรรมระหว่างดินกับเสาเข็ม โดยพบว่าขึ้นอยู่กับค่า Coefficient of earth pressure at rest (K_0) ที่มีการเปลี่ยนไปตามความลึกหลังจากที่ดินถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม กรณีที่ใช้ Coefficient of earth pressure at rest ในสมการดังกล่าวข้างต้นประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว พบว่าจะได้ค่าการประมาณที่ต่ำกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมากและค่าที่ประมาณ ได้มีการกระจายของข้อมูลมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.10

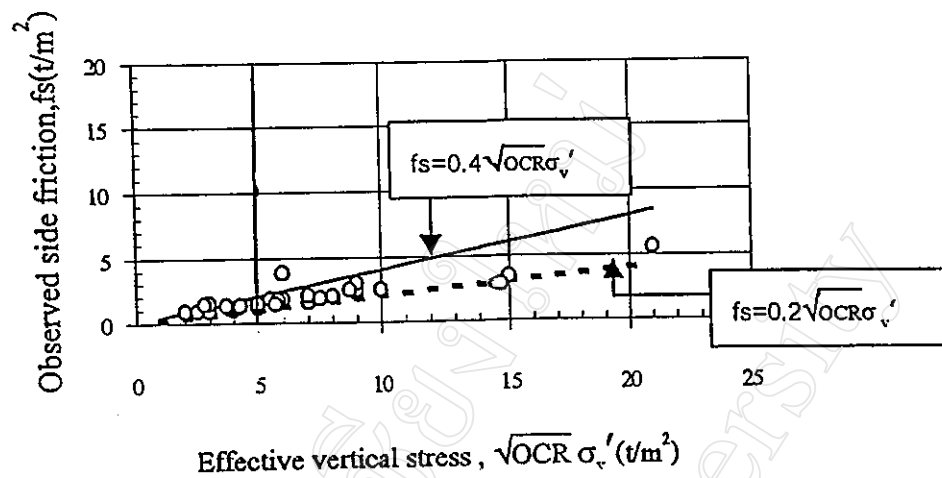
Flaate and Selnes (1977) ได้นำผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 44 ต้นในดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางมาศึกษา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งและหน่วยแรงรวม (กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ) มีการกระจายข้อมูลมากน้อยต่างกัน โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง มีการกระจายข้อมูลน้อยกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับหน่วยแรงรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12



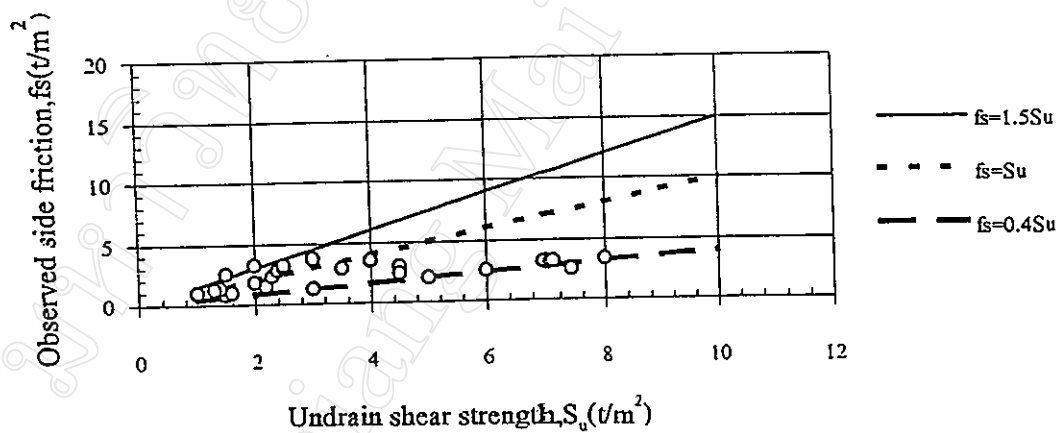
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนว
ตั้ง
ที่มา : Burland (1973)



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ ระยะที่เสาเข็มอยู่ในดินเหนียว
แข็ง
ที่มา : Burland (1973)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง
ที่มา : Flaate and Selnes (1977)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่
ระบายน้ำ
ที่มา : Flaate and Selnes (1977)

และพบว่าที่ความยาวเสาเข็มน้อยกว่า 25 เมตรให้ค่า สัมประสิทธิ์เบต้า อยู่ระหว่าง 0.2 – 0.4 ทั้งดินเหนียวที่อัดตัวปกติและดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งสอดคล้องกับ Meyerhof (1976) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของดินเหนียวที่เคยถูกกดด้วยน้ำหนักสูงกว่าปัจจุบัน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 จากการทำการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวจากผลการทดสอบเสาเข็มกับวิธีการ

คำนวณโดยใช้สมการหลายสมการ เช่น α -Method, Burland (1973), Vijakverjiya and Focht (1972), Flaate and Selnes (1977) ซึ่งสมการที่ใช้วิธีห น่วยแรงประสิทธิผลในการหาหน่วยแรงเสียดทานผิว ให้ค่าการประมาณ ได้ดีกว่าสมการที่ใช้ตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

2.2.3 วิวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงรวม และหน่วยแรงประสิทธิผลร่วมกัน

Bond and Jardine (1995) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในดินเหนียวลอนคอนที่มีค่า OCR สูง โดยเสาเข็มทดสอบเป็นเสาเข็มเหล็กปลายปิด 7 คั่น พบว่ามีความแตกต่างกันของพฤติกรรมของเสาเข็มจากการทดสอบโดยการดึงและการกด โดยการทดสอบเสาเข็มรับแรงดึงจะแสดงค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวที่สูงกว่าการทดสอบเสาเข็มรับแรงกด โดยแรงเสียดทานผิวจากการทดสอบเสาเข็มรับแรงดึงจะมากกว่าการทดสอบเสาเข็มรับแรงกดประมาณ 12-28 เปอร์เซ็นต์

Balasubramaniam (1981) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทำนายกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในเขตกรุงเทพ โดยวิธีห น่วยแรงรวม วิธีห น่วยแรงประสิทธิผล โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มมากกว่า 40 คั่น โดยในการศึกษาได้ทำการแบ่งเสาเข็มออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเสาเข็มสั้นที่มีความยาวเสาเข็มที่ฝังในดิน 6-12 เมตร โดยปลายเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน ถึง ปานกลาง และกลุ่มเสาเข็มยาวที่มีความยาวในดิน 21-31 เมตร โดยที่ปลายจะอยู่ที่ชั้นดินเหนียวแข็ง หรือ ชั้นทราย พบว่าทั้งวิธีห น่วยแรงรวม และหน่วยแรงประสิทธิผลใช้ได้กับเสาเข็มยาว

สำหรับวิธีการแยกค่ากำลังต้านทานส่วนปลายเข็มได้ใช้ค่า N_c เท่ากับ 10 และค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของ Holmberg ในการศึกษา พบว่าวิธีห น่วยแรงรวมจะให้ค่าการประมาณที่มากกว่าความเป็นจริง (Over Estimate) โดยเสาเข็มสั้น Q_u (จากการวัดได้) = $0.67Q_u$ (จากการทำนาย) และเสาเข็มยาว Q_u (จากการวัดได้) = $0.90Q_u$ (จากการทำนาย) ส่วนวิธีห น่วยแรงประสิทธิผลพบว่าสัมประสิทธิ์เบต้า มีค่าระหว่าง 0.17-0.48 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.33 และเมื่อลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์เบต้าเท่ากับ 0.33 ประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก พบว่าเสาเข็มสั้นที่น้ำหนักบรรทุกมากกว่า 10 ตัน มีการกระจายค่ามาก ส่วนเสาเข็มยาวให้การทำนายได้ดี ดังนั้นการใช้สัมประสิทธิ์เบต้าเท่ากับ 0.33 เหมาะกับเสาเข็มยาวในดินเหนียวอ่อน สำหรับในดินเหนียวแข็งการประมาณค่าโดยวิธีใช้สัมประสิทธิ์เบต้า ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้

McClelland (1974) ได้ใช้ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเหล็กชนิดท่อ (Steel Pipe Piles) จำนวน 47 คั่น มีความยาวอยู่ในดินเหนียว 2.4-101.6 เมตร เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการ

ประมาณค่าแรงเสียดทานผิว พบว่าวิธีการประมาณโดยสมการของ Vijakverjiya and Focht (1972) แรงเสียดทานผิวที่ประมาณได้มีการกระจายน้อยซึ่งใช้ได้ดีกว่าวิธีหน่วยแรงรวม

2.3 คุณสมบัติของชั้นดินเชียงใหม่ในทางวิศวกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จังหวัดเชียงใหม่ตั้งอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ $18^{\circ} 47'$ เหนือ และเส้นแวง $98^{\circ} 59'$ ตะวันออกมีพื้นที่ 22,800 ตารางกิโลเมตร (จิตชัย อนันตเศรษฐ์, 2534) ลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นที่แบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่เป็นลานตะพักระดับสูง (High Terrace) ลานตะพักระดับต่ำ (Low Terrace) และบริเวณที่ลุ่มน้ำ (Flood Plain) คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินบนลานตะพัก ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ถาวร สุทธิพันธ์ (2535) ได้ทำการทดลองหาความเร็วที่เหมาะสมของการเลื่อนดินตัวอย่างทดสอบ สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตรง โดยทำการทดสอบดินเหนียวแข็งบริเวณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จัดเป็นดินเหนียวประเภท CH มีความชื้นในมวลดินเท่ากับ 26.2 ± 0.8 พิกัดพลาสติกเท่ากับ 27.5 ± 1.4 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของดินเม็ดละเอียด 75-77.8 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง ความเร็วที่ใช้ในการเลื่อนดินตัวอย่าง ได้แก่ 0.0072 มม./นาที่ 0.012 มม./นาที่ 0.036 มม./นาที่ 0.06 มม./นาที่ และ 0.60 มม./นาที่ พบว่าความแตกต่างระหว่างค่าแรงเฉือนสูงสุดกับค่าแรงเฉือนต่ำสุดเท่ากับ 10.25 กน./ตร.ม หรือ ประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้การจดบันทึกและควบคุมการเลื่อนดินตัวอย่างทำได้สะดวก จึงได้เลือกอัตราความเร็วในการเลื่อนดินตัวอย่างเท่ากับ 0.60 มม./นาที่ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2.2

อาทิตย์ สนิทสกุล (2542) ได้ทำการศึกษาเรื่องความไวตัวของดินต่อการเสื่อมกำลังของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ โดยทำการทดลอง Unconfined Compressive Test บริเวณสนามข้างประตูคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลการทดลองพบว่า บริเวณสนามข้างประตูวิศวกรรมศาสตร์ดินเหนียวบริเวณนี้มีควมไวตัวต่ำ โดยดินที่ระดับความลึก 2.5-2.9 เมตร ค่าความไวตัวเฉลี่ยที่ 15 เปอร์เซ็นต์ความเครียด เท่ากับ 1.07 และที่ระดับความลึก 2.5-2.9 เมตร ค่าความไวตัวเฉลี่ยที่ 15 เปอร์เซ็นต์ความเครียด เท่ากับ 1.15

เอราวัณ รักษากุล (2542) ได้ทำการศึกษาเรื่องความคั่นน้ำในดิน ในบริเวณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งได้ทำการศึกษาบริเวณที่ว่างตรงประตูคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินชั้นใหม่

ที่มา : รัชชัย อนันตเศรษฐ์ (2534)

ชั้นดิน	W _n (%)	W _L (%)	I _p	GS	Unit wt. (/m ³)	% Fine (35-45)	สัญลักษณ์	SPT	Compressibility		Shear Strength		
									C _c	C _v (cm ² /sec)	USC (Kpa)	C (Kpa)	φ (degree)
ดินชั้นบน	17 (15-20)	30 (28-33)	13 (10-17)	2.69	2.00	40 (35-45)	SM	-	-	-	-	-	-
ดินเหนียวสีเทาอ่อน	20 (18-22)	32 (28-36)	18 (18-20)	2.69	2.00	50 (40-70)	CL (สลับด้วย SM, SC)	8-20	0.11-0.17	5x10 ⁻⁴ -10x10 ⁻⁴	70-200	15	20 ^{0**}
ทรายปนซิลิกา เหลือง	18 (16-20)	-	-	2.69	2.00	32 (30-35)	SM, SC	30-50	-	-	-	0	49 ^{0***}
ทรายนูนมากสีเทา น้ำตาล	11 (10-13)	-	-	2.63	2.00	12 (5-15)	SW, SM	>50	-	-	-	-	-
ดินเหนียวปนทรายสีเทา อ่อนปนน้ำตาล	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350-400	-	-
ดินเหนียว	24 (19-37)	40 (31-34)	18	2.71	2.06	90	CL, CH	-	-	-	-	-	-
ดินเหนียวปนทราย	23 (20-31)	36 (27-47)	18	2.66	2.08	90	CL	-	-	-	-	-	-

* ค่าในวงเล็บเป็นช่วงซึ่งค่าเปลี่ยนแปลง ** เป็นผลจากการทดสอบ Triaxial (CIU) เป็นค่า Effective *** ผลจาก Direct Shear Test

โดยในการศึกษาได้ใช้ Piezometer ชนิด Open Standpipe ที่ทำการผลิตขึ้นมาเองประกอบไปด้วย ท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว ยาว 25 เซนติเมตร เจาะรูรอบให้สม่ำเสมอขนาด 3/8 นิ้ว ทราวยละเอียดที่ผ่าน ตะแกรงเบอร์ 30 ค้างบนเบอร์ 40 และ Epoxy พบว่าคุณภาพใช้งานจะต่ำกว่า Piezometer ของ Vaugan ไม่มากสามารถใช้งานได้ จากการศึกษาพบว่าบริเวณที่วางตรงประตูคณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่สามารถสังเกตุดเห็นการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในดินตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงการหาความเร็วในการเคลื่อนดินตัวอย่าง

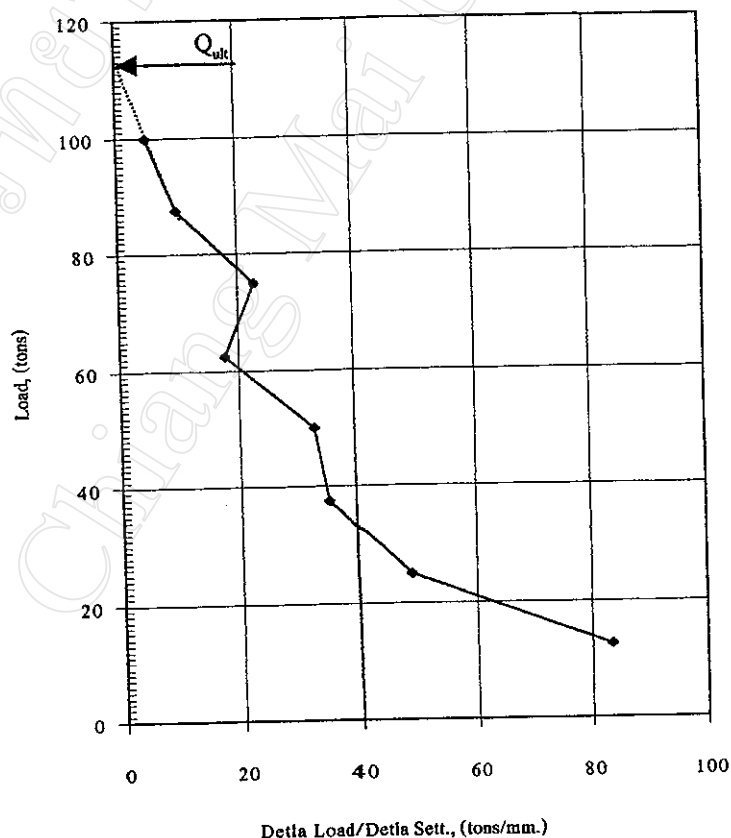
ที่มา : ถาวร สุทธิพันธ์ (2535)

หมายเลข ตัวอย่าง	σ'_{vo} (กน./ม ²)	ความเร็วใน การเคลื่อน ดินตัวอย่าง (มม./นาท)	w (%)	แรงเฉือนในแนวราบสูงสุด		
				ϵ (%)	σ'_{vo} (กน./ม ²)	τ_h/σ'_{vo}
R-1	62.7	0.60	27.80	5.33	83.02	1.32
R-2	62.7	0.06	27.17	4.33	82.91	1.32
R-3	62.7	0.036	27.17	4.67	82.76	1.31
R-4	62.7	0.012	24.90	4.33	80.91	1.29
R-5	62.7	0.0072	25.53	4.33	72.77	1.16

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเสาเข็มในสนาม

ธนาคาร กรุงสมบูรณ์ (2541) ทำการรวบรวมผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม จำนวน 93 ต้น ซึ่งเป็นเสาเข็มตอกจำนวน 43 ต้น เสาเข็มเจาะระบบเปียก 44 ต้น เสาเข็มเจาะระบบแห้ง 8 ต้น ความยาวตั้งแต่ 13-66 เมตร และได้ทำศึกษาพฤติกรรมของการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ตามวิธีของ Davisson, Chin, Brinch, Hansen, Mazurkiewicz, Vander Veen, Fuller and Hoy, Butler and Hoy และ DeBeer โดยได้ทำการปรับปรุงวิธีการบางวิธีเหล่านี้ให้สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยระบบ คอมพิวเตอร์ วิธีที่เหมาะสมนั้นจะทำการพิจารณา การวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด พฤติกรรม การทรุดตัวเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนัก การแปลผลแรงต้านทานปลายเข็ม ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้แปลผลได้จากวิธีต่างๆ จาก 9 วิธีได้ทำการปรับเปลี่ยนใหม่ 3 วิธี แต่ยังคงมีหลักการเหมือน ของเดิมเพียงแต่เปลี่ยนวิธีการหาค่า คือ Modified Brinch Hansen 90 %, Modified Brinch Hansen 80 % และ Modified Mazurkiewicz การศึกษาครั้งนี้สรุปเป็นผลการประเมิน เปรียบเทียบข้อดี ข้อ

เสีย ในแต่ละวิธีสรุปได้ว่า วิธี Modified Mazurkiewicz มีความเหมาะสมในการนำไปใช้หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มมากที่สุด ซึ่งวิธีนี้สามารถนำไปใช้หาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยกับเสาเข็มได้อย่างกว้างขวางและมีวิธีการแปลผลที่ไม่ยุ่งยากมากนัก การอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกได้ชัดเจน ตลอดจนถึงการแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มได้อย่างชัดเจน และยังสามารถใช้กับผลการทดสอบเสาเข็มที่ไม่ถึงน้ำหนักประลัย วิธี Modified Mazurkiewicz มีวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกดังนี้ โดยให้แกน x คือ ผลต่างของน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ในช่วงที่ติดกันหารด้วยผลต่างค่าการทรุดตัวนั้น (Delta Load/Delta Settlement) และให้แกน y คือ น้ำหนักบรรทุก ซึ่งทำให้การอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกบนแกน y เมื่อค่าในแกน x มีแนวโน้ม เข้าสู่ศูนย์ทำได้สะดวก และรวดเร็ว ขึ้นด้วยการใช้ คอมพิวเตอร์ช่วยในการเขียนกราฟ Modified Mazurkiewicz ขึ้นมาใหม่ ตัวอย่างการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบของกราฟวิธี Modified Mazurkiewicz

Fellenius (1975) ได้ทำการศึกษาวิธีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม 4 วิธี ได้แก่ วิธี Slow Maintained, Constant Rate of Penetration, Swedish Cyclic และ Quick Maintained Load Test พบว่า การทดสอบโดยวิธี Quick Maintained Load Test กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับวิธี Constant Rate of Penetration กล่าวคือ จะแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกได้ชัดเจนนอกจากนี้ การทดสอบแบบ Quick Maintained Load Test จะมีวิธีการทดสอบที่ง่ายกว่า ใช้เวลาไม่นาน ประหยัดค่าใช้จ่าย เหมาะกับเสาเข็มประเภทเสาเข็มรับแรงเสียดทาน (Friction Piles) นั้น

Fellenius (1980) แนะนำเวลาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธี Quick Maintained Load Test คือ 5 นาที และทำการบันทึกที่เวลา 0, 2.5, 4 นาที ในช่วง 5 นาที

Phamvan (1989) ได้ทำการทดสอบเสาเข็ม Hollow prestressed จำนวน 2 ต้น ความยาว 20 เมตร โดยการดึง แบ่งเป็น 4 ระดับการทดสอบ เสาเข็มมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางข้างนอก และข้างในเท่ากับ 0.40 ม. และ 0.25 ม. ตามลำดับ การทดสอบจะใช้วิธี Quick Maintained Load Test โดยให้น้ำหนักกระทำที่ละ 5 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ประมาณไว้ก่อนแล้ว จนกระทั่งไม่สามารถควบคุมน้ำหนักที่กระทำเสาเข็มให้คงที่ได้ให้ถือว่าน้ำหนักนั้นคือน้ำหนักบรรทุกประลัย และได้ทำการ Normalized ผลการทดสอบทั้ง 4 ระดับทั้ง 2 ต้น โดย Normalized น้ำหนักบรรทุก (Q_u) ด้วยน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) และ Normalized การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (δ) ด้วยการเคลื่อนตัว ณ จุดพิบัติ (δ_{max}) พบว่าพฤติกรรมเสาเข็มรับแรงดึงจากการทดสอบทั้ง 4 ระดับไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังทำการทดสอบการเนือตรงระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบ พบว่า ในดินเหนียวแข็ง ที่มีหน่วยแรงตั้งฉากกระทำสูง กำลังรับแรงเนือนของตัวอย่างดินเทียบกับกำลังรับแรงเนือนตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตจะมีค่าใกล้เคียงกัน