บทที่ 4
การทดสอบเสาเข็มฐานราก

4.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเสาเข็มฐานราก ขั้นตอนการทำเสาเข็มเจาะในการก่อสร้างสะพานนเรศวร , วิธีการทดสอบ Pile Load Test , การทดสอบความสมบูรณ์ของเข็มและการหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Test โดยในส่วนของท้ายบทนี้จะแสดงการประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มด้วยวิธีต่าง ๆ

4.2 กรณีศึกษา "การก่อสร้างฐานรากของสะพานนเรศวร"

4.2.1 รายละเอียดการก่อสร้าง

ขั้นตอนในการดำเนินการก่อสร้างปรับปรุงสะพานนเรศวร จ. พิษณุโลก

ขั้นตอนการสำรวจรายละเอียดต่างๆ

- ศึกษาแบบก่อสร้าง รายการ สัญญา รายละเอียดต่อท้ายสัญญา
- ทำ Plan และ Profile ของถนนและลำน้ำตามความเป็นจริงจากคอสะพานไปข้างละ 300 เมตร ในกรณีคอสะพานมีถนนเชื่อมหรือยาวจนสุดเขตก่อสร้าง
- ตรวจสอบแนวสะพานและศูนย์กลางตอม่อ ว่าถูกหรือมีปัญหาใดๆ หรือไม่
- ตรวจสอบระดับน้ำ สูงสุด- ต่ำสุด และทิศทางการไหลว่าไปทางใด
- การก่อสร้างสะพานดังกล่าว ไม่สามารถใช้เข็มตอกได้ เนื่องจากใกล้โบราณสถานเป็นจำนวนมาก เช่น วัดพระศรีรัตนมหาธาตุ(วัดใหญ่) ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องทำเข็มเจาะ

ขั้นตอนการดำเนินงานเกี่ยวกับเสาเข็ม

- ในการทำการก่อสร้างสะพานไม่ว่าใช้เข็มตอกหรือเข็มเจาะ ต้องมีการสำรวจชั้นดินเพื่อกำหนดความยาวของเสาเข็ม โดยการทำ Boring Log
- หลังจากรู้ว่าชั้นดินสภาพเป็นอย่างไรแล้ว ก็จะกำหนดความยาวของเสาเข็มและกำหนดศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ
- กรรมวิธีในการทำเสาเข็มเจาะ จะกล่าวในลำดับต่อไป
- เมื่อทำการเจาะเสาเข็มเสร็จแล้ว ทำการตรวจสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มและตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มกระทำ โดยวิธี Dynamic Load Test ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

4.2.2 กรรมวิธีในการทำเสาเข็มเจาะในการก่อสร้างสะพานนเรศวร

การก่อสร้างสะพานนเรศวรนี้ใช้เสาเข็มเจาะระบบเปียก (WET PROCESS) และก่อนที่จะทำการเจาะเสาเข็มต้องทำการศึกษาข้อกำหนดรายละเอียด โดยศึกษาจากแบบเช่น ระดับ แนว ตำแหน่ง รูปแบบของเสาเข็ม สภาพดินแต่ละชั้น ระดับน้ำ ปลอกเหล็กชั่วคราว ท่อเท เหล็กเสริมรับแรง คอนกรีตที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะ สารละลายเบนโทไนท์

ขั้นตอนการเจาะ

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อได้ตำแหน่งเข็มแล้ว ทำการกดปลอกเหล็กโดยใช้ VIBRO HAMMER เป็นตัวกด ผ่านชั้นดินอ่อน จนกระทั่งถึงชั้นดินแข็ง เพื่อเป็นการป้องกันการเคลื่อนพังของผนังหลุมเจาะในชั้นดินอ่อน ในขั้นตอนนี้ต้องทำการควบคุมตำแหน่งและแนวดิ่ง ตั้งแต่เริ่มกดปลอกเหล็กจนกระทั่งแล้วเสร็จ เพื่อเป็นการป้องกันการคลาดเคลื่อนหรือเอียง

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากติดตั้งปลอกเหล็กเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะทำการขุดเจาะดิน โดยเริ่มใช้หัวเจาะสว่าน (AUGER) ในการเก็บดินส่วนที่อยู่ในปลอกเหล็กออก โดยให้มีดินที่ยังไม่ถูกเจาะค้างอยู่สูงจากระดับปลายปลอกเหล็กอย่างน้อย 0.50 – 1.00 ม. แล้วทำการใส่สารละลายเบนโทไนท์ลงไปในหลุมเจาะจนเต็ม แล้วจึงเปลี่ยนหัวเจาะมาใช้ แบบถัง (BUCKET) แทน ซึ่งในระหว่างการขุดเจาะจะต้องคอยเติม

สารละลายเบนโทไนท์ให้เต็มหลุมเจาะอยู่เสมอ ซึ่งสารละลายเบนโทไนท์ ที่ใช้จะต้องมีการควบคุมคุณภาพให้เหมาะสมด้วย เมื่อทำการขุดเจาะจนได้ความลึกที่ต้องการแล้วให้ทำความสะอาดก้นหลุม เพื่อตรวจสอบชนิดของดิน

ขั้นตอนที่ 3 ทำการใส่เหล็กเสริม โดยใช้รถเครนยกและหย่อนเหล็กให้อยู่ตรงกลางของหลุมเจาะจนได้ระดับที่ต้องการ และทำการยึดให้แน่น เพื่อที่ขณะที่ทำการเทคอนกรีตโครงเหล็กจะไม่ขยับเขยื้อน ให้มีระยะระหว่างผิวคอนกรีตกับเหล็กเสริม 10 ซม.

ขั้นตอนที่ 4 ทำการใส่ท่อ (TREMIE PIPE) เพื่อเทคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 – 25 ซม. แต่ละท่อนจะยาว 3 – 6 ม. ต่อด้วยเกลียว โดยมีความยาวตลอดความลึกของหลุมเจาะ และให้ปลายท่ออยู่สูงจากก้นหลุมเล็กน้อย ใช้เม็ดโฟมใส่ไว้ในท่อเพื่อเป็นวัสดุไล่น้ำและสารละลายเบนโทไนท์ออกจากท่อ ซึ่งขณะเทคอนกรีตลงไปในท่อ คอนกรีตจะดันโฟมออกจากท่อที่ปลายล่างสุด

ขั้นตอนที่ 5 เทคอนกรีตลงในท่อ TREMIE อย่างต่อเนื่อง โดยจะต้องให้ปลายของท่อจมอยู่ในชั้นของคอนกรีตไม่น้อยกว่า 2.00 ม.ตลอดเวลา คอนกรีตที่เทลงไปจะเข้าแทนที่น้ำ แล้วไปไล่น้ำออกจากก้นหลุมขึ้นมาเต็มหลุมเจาะจนได้ระดับที่ต้องการ (ควรสูงกว่าระดับใช้งานจริง 1.00 ม.) ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เทควรมีคุณสมบัติเบื้องต้นคือ คอนกรีตมีเวลาการก่อตัวชั้นแรกไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง และมีค่าความยุบตัวอยู่ที่ประมาณ 17.5 – 22.5 ซม. มีกำลังอัดประลัยเป็น 240 ksc. เพื่อให้คอนกรีตมี WORKABILITY สูงและสามารถอัดแน่นด้วยตัวเอง เมื่อเทลงหลุมแล้ว

ขั้นตอนที่ 6 ทำการถอนปลอกเหล็กขึ้นทันที ก่อนที่คอนกรีตในหลุมเจาะจะเริ่มก่อตัว ซึ่งจะต้องทำการตรวจสอบแนวเสาเข็มในแนวดิ่ง

4.3 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Pile Load Test

เป็นการทดสอบที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการก่อสร้างมาก โดยที่การทดสอบเสาเข็มควรกระทำก่อนหรือกระทำในระหว่างที่กำลังออกแบบฐานอยู่ ทั้งนี้เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบฐานรากได้มีโอกาสนำค่ากำลังรับบรรทุกน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณจาก Static Pile Formula มาตรวจสอบกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนาม ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงและแก้ไขการออกแบบฐานรากให้ถูกต้อง ประหยัด และเหมาะสมที่สุด รวมทั้งมีความมั่นใจการตัดสินใจประเมินค่า Factor of Safety ของฐานรากด้วย

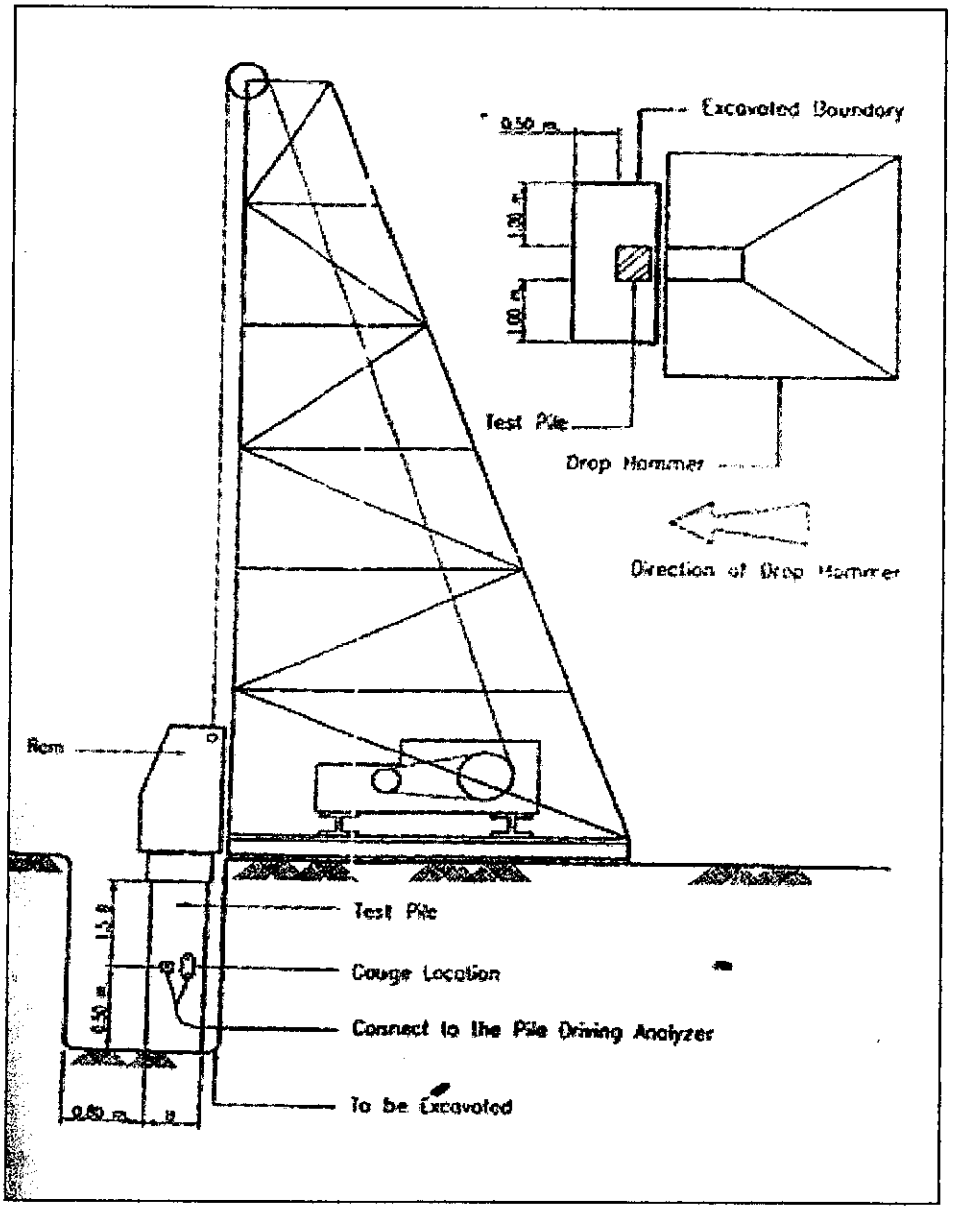
อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ ของการทดสอบจะต้องอยู่ในข้อใดข้อหนึ่งหรือทั้งหมดของหัวข้อต่อไปนี้

- เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เสาเข็มรับได้ หรือ ultimate pile (load) capacity
- เพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว (load–settlement relationship)
- เพื่อ แยกหาแรงต้านทานส่วนปลายและแรงเสียดทานรอบผิวของเสาเข็ม

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจนถึง 2 เท่าหรือ 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย วิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 1143 ซึ่งกำหนดให้ทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยครั้งแรกให้ทดสอบน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยหรือน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ การทดสอบจะใส่น้ำหนักบรรทุกที่ละชั้น ชั้นละ 25% ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ และจะแช่น้ำหนักบรรทุกไว้ 1 ชั่วโมง เมื่อทดสอบถึงน้ำหนักบรรทุกออกแบบจะแช่น้ำหนักบรรทุกไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจะปลดน้ำหนักบรรทุกออกจนหมดจากนั้นจึงจะทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกครั้งที่ 2 ในขณะทำการทดสอบจะบันทึกค่าการทรุดตัวควบคู่กับน้ำหนัก แล้วนำไปเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

4.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Dynamic Load Test

Dynamic load test สามารถใช้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าหน่วยแรงในเสาเข็มระหว่างการตอก (Driving Stresses) ค่าความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (pile inegity) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่จะใช้ตอกเสาเข็ม (Hammer Performance) และค่าของน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Mobilized Capacity) รวมทั้งค่าการทรุดตัว (Settlement) โดยการใช้ Pile Driving Analyzer TM (PDA) ซึ่งจะทำการคำนวณค่าต่าง ๆ โดยใช้วิธีที่เรียกว่า Case Method ซึ่งวิธีนี้เป็นมาตรฐานของ ASTM D 4945 และ ASSHTO T 298

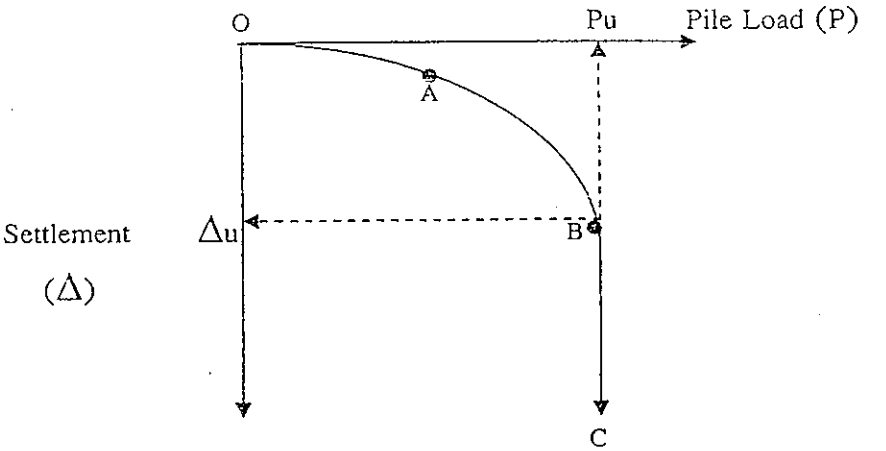


รูปที่ 4.1 แสดงการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธี Dynamic Load Test โดยใช้ปั้นจั่น

4.5 การประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Interpretaton of Failure Load)

โดย Fellenius (1980) ได้สรุปการประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ที่ได้จากการทดสอบบรรทุกน้ำหนักบนหัวเสาเข็ม

- สำหรับเสาเข็มที่มีความแข็งแรงกว่าชั้นดิน ค่า pile failure load จะเกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มเริ่มมีการทรุดตัวอย่างรวดเร็วภายใต้น้ำหนักกดที่คงที่ตลอดเวลาหรือมีการเพิ่มน้ำหนักขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งเรียกว่า " เสาเข็มทรุดตัวลงไป " (Pile Plunge)
- ในอดีตคำจำกัดความของ failure load จะเป็นค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้หัวเสาเข็มทรุดตัวลงไปได้มากกว่า 10 % ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งยังไม่ได้รวมถึงค่า Elastic Deformation ของเสาเข็ม ซึ่งมีค่ามากในกรณีของเสาเข็มยาวและไม่นำมาคิดในกรณีของเสาเข็มสั้น
- pile failure load อาจมีความหมายได้อีกอย่างคือ ค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดตัดกันของเส้นตรง 2 เส้น คือ เส้น Elastic Compession ที่สัมผัสกับส่วน elastic portion และเส้นตรงสัมผัสกับส่วน plastic portion ของ Load – Settlement Curve การประเมินค่า failure load ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ประเมินและสเกลที่ใช้ของกราฟ



รูปที่ 4.2 Pile Load Settlement Curve (มนูญ อารยะศิริ , 2545)

OA - elastic range (linear)

AB - elasto – plastic range (non – linear)

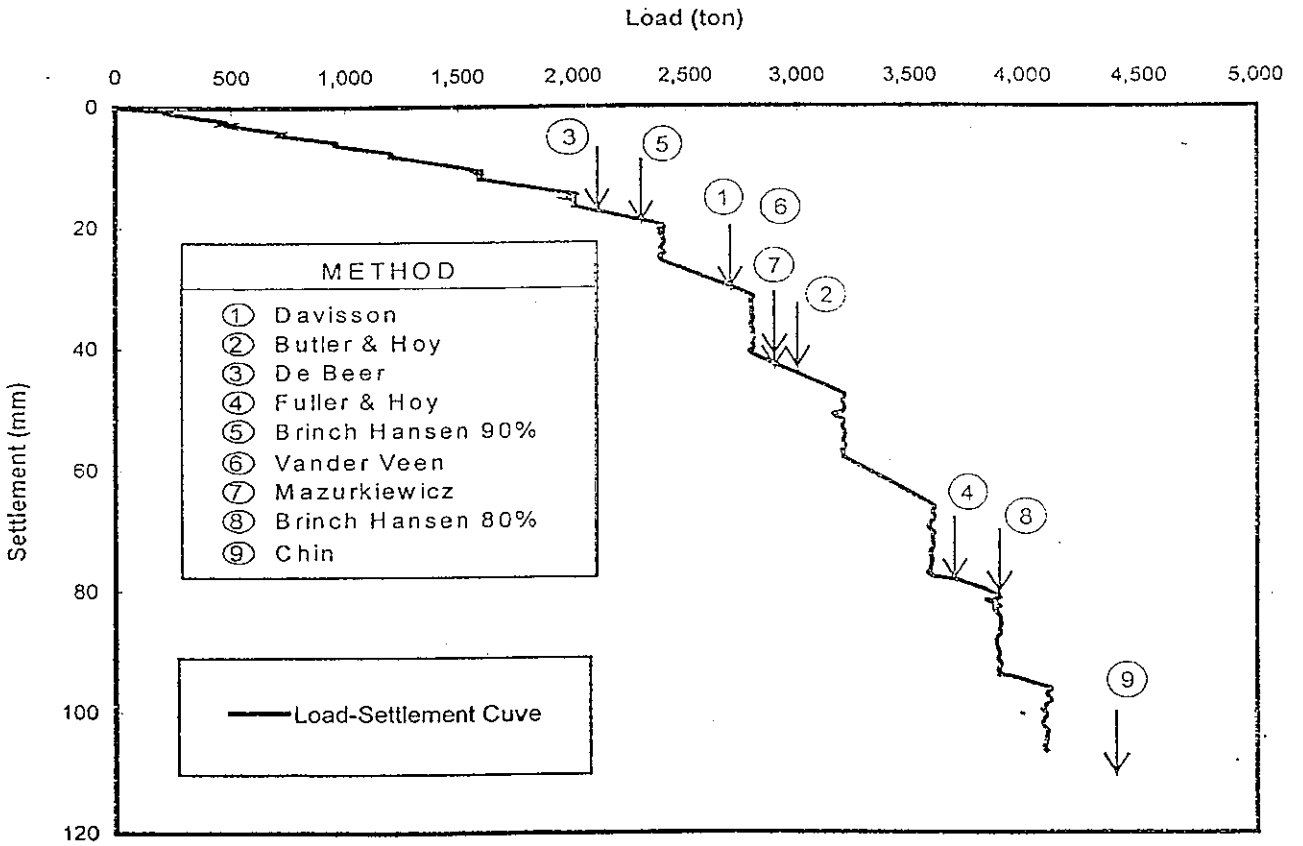
BC - plastic range

B - เป็นจุด plunging failure

P - เป็นค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่จุด B

Δu - เป็นค่าการทรุดตัวที่จุด B

Load – Settlement Curve ที่ได้จากการทดสอบบรรทุกน้ำหนักบนหัวเสาเข็ม สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาในการออกแบบฐานรากเสาเข็ม ซึ่งสามารถทำให้หาค่าประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Pile Load) เพื่อใช้คำนวณหาค่าส่วนที่ปลอดภัย (Factor of Safety) ซึ่งจาก 9 วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกประลัย (รูปที่ 4.3) Fellenius ชี้ว่าเป็นวิธีที่ให้ค่าใกล้เคียงที่สุด คือ วิธีการของ Chin (1970) และวิธีการของ Brinch Hansen (1963) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หลักคณิตศาสตร์คำนวณ ในที่นี้จะเปรียบเทียบ 3 วิธีในการหาน้ำหนักบรรทุกประลัย



รูปที่ 4.3 คำนวณหาค่าส่วนที่ปลอดภัย (Factor of Safety) จาก 9 วิธี (ภาคผนวก ค)

4.5.1 วิธีของ Chin (1970)

เป็นวิธีที่สมมุติให้ช่วงของ Load – Settlement Curve เป็นรูปไฮเพอร์โบล่า โดยการ plot ค่าการทรุดตัวต่อค่าน้ำหนักบรรทุก กับ ค่าการทรุดตัว จะได้กราฟเป็นเส้นตรงและค่าส่วนกลับของ Slope ของกราฟจะเป็นค่า Chin ' s failure load

4.5.2 วิธีของ Brinch Hansen (1963)

เป็นวิธีที่ได้กำหนดให้ failure เกิดขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ค่าการทรุดตัวเท่ากับ 4 เท่าของค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 80% ของ failure load และช่วงสุดท้ายของ Load – Settlement Curve เป็นรูปพาราโบล่า

4.5.3วิธี Settlement – Logarithmic ratio method

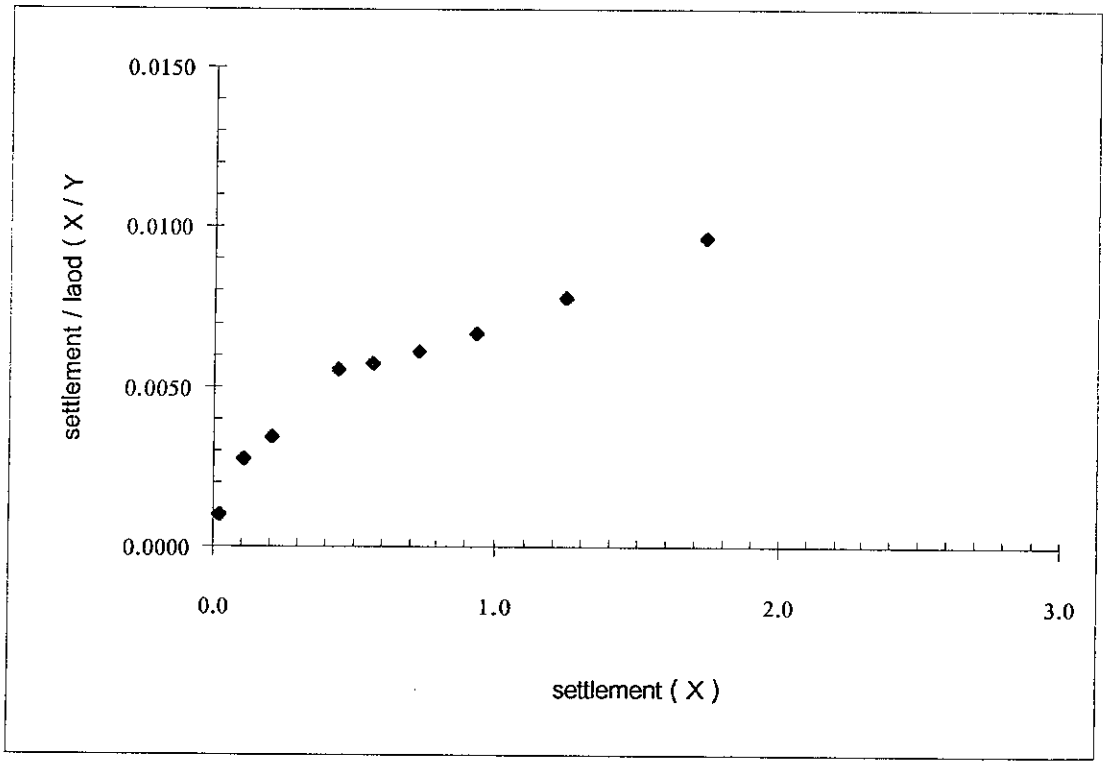
เป็นวิธีที่เสนอโดย Manoon (2002) จากข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม ทั้งแบบตอกและหล่อในที่ จำนวน 57 การทดสอบ พบว่าสามารถประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ได้อย่างแม่นยำ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เส้นตรง (r) มากกว่า 0.999 และสามารถประมาณน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มในกรณีทดสอบไม่ถึงประลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเสาเข็มของเสาเข็มหมายเลข ST - 10 - 1

Load (Kg)	Date	Time		Elapsed Time		Dial Reading		Settlement (mm)	Remark
		hr	min	hr	min	Gauge 1	Gauge 2		
0.0	26/8/32					756	350	0.000	
20.0		09	40.0		00.0	754	349	-0.015	
			42.5		02.5	753	349	-0.020	
40.0			42.5		00.0	741	346	-0.095	
			45.0		02.5	738	346	-0.110	
60.0			45.0		00.0	725	341	-0.200	
			47.5		02.5	725	340	-0.205	
80.0			47.5		00.0	667	353	-0.430	
			50.0		02.5	664	353	-0.445	
100.0			50.0		00.0	653	345	-0.540	
			52.5		02.5	650	342	-0.570	
120.0			52.5		00.0	637	329	-0.700	
			55.0		02.5	633	327	-0.730	
140.0			55.0		00.0	616	314	-0.880	
			57.0		02.5	610	309	-0.935	
160.0			57.5		00.0	585	291	-1.150	
			57.5		02.5	576	281	-1.245	
180.0		10	00.0		00.0	544	252	-1.740	
			00.0		02.5	525	233	-0.015	
200.0			02.5		00.0	405	80	-3.105	
			02.5		02.5	0	0	-5.530	Fail

วิธีของ Chin

X (mm.)	Y (kg)	X/Y
0.020	20.000	0.0010
0.110	40.000	0.0028
0.205	60.000	0.0034
0.445	80.000	0.0056
0.570	100.000	0.0057
0.730	120.000	0.0061
0.935	140.000	0.0067
1.245	160.000	0.0078
1.740	180.000	0.0097
3.105	200.000	0.0155



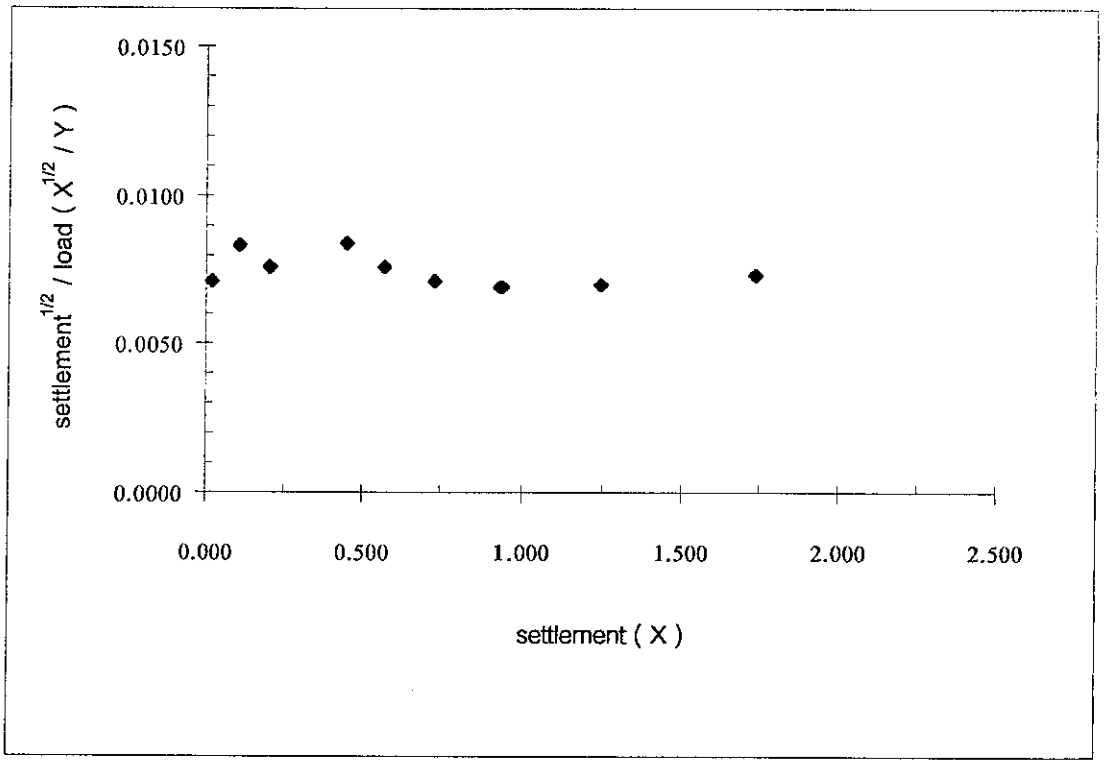
จากความสัมพันธ์ของ load - settlement โดยวิธีของ Chin

จะได้ ค่า a = 0.00264 b = 0.0043

ดังนั้น ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด Qu = 1/b = 1/0.0043 = 232 Kg

วิธีของ Brinch Hansen

X (mm.)	$X^{1/2}$	Y (kg)	$X^{1/2} / Y$
0.020	0.141	20.000	0.0071
0.110	0.332	40.000	0.0083
0.205	0.453	60.000	0.0075
0.445	0.667	80.000	0.0083
0.570	0.755	100.000	0.0075
0.730	0.854	120.000	0.0071
0.935	0.967	140.000	0.0069
1.245	1.116	160.000	0.0070
1.740	1.319	180.000	0.0073
3.105	1.762	200.000	0.0088



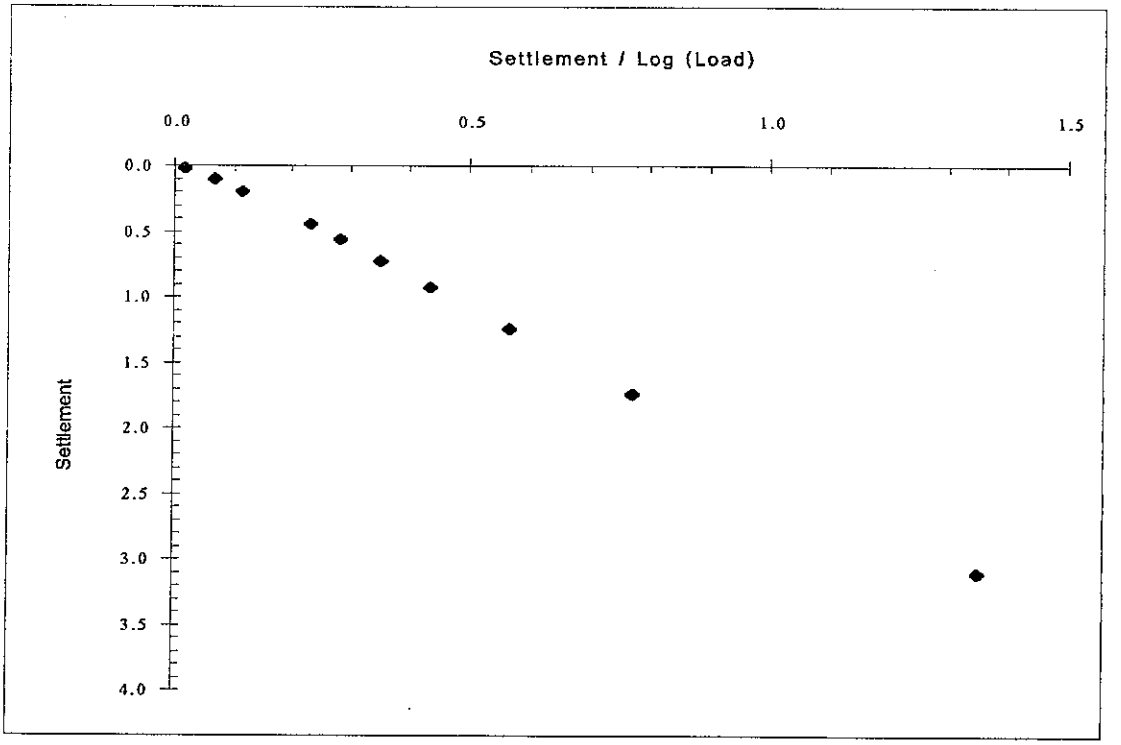
จากความสัมพันธ์ของ load - settlement โดยวิธีของ Brinch Hansen

จะได้ ค่า a = 0.00579 b = 0.000968

ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด $Qu = 1/(2\sqrt{ab}) = 1/(2\sqrt{0.00579 \times 0.000968}) = 211$ Kg

วิธีของ Settlement – Logarithmic ratio method

X (mm.)	Y (kg)	Log Y (kg)	X /Log y
0.020	20.000	1.301	0.0154
0.110	40.000	1.602	0.0687
0.205	60.000	1.778	0.1153
0.445	80.000	1.903	0.2338
0.570	100.000	2.000	0.2850
0.730	120.000	2.079	0.3511
0.935	140.000	2.146	0.4357
1.245	160.000	2.204	0.5649
1.740	180.000	2.255	0.7715
3.105	200.000	2.301	1.3494



จาก Linear Regression ได้ค่า a = 0.076 b = 0.4377

ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด $Qu = 10^{1/b} = 10^{1/0.4377} = 192$ Kg

(หมายเหตุ ได้ทำการตัด 4 จุดในการทำ Linear Regression จุดเนื่องจากความผิดของเครื่องมือที่ทำการทดสอบซึ่งอาจทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการคำนวณ)