หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีบท

2.1 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

2.1.1 วัตถุประสงค์ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

ก. Proof Load Test เพื่อตรวจสอบว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่เรากำหนดไว้หรือไม่ การทดสอบแบบนี้มักจะทำในกรณีที่มีประสพการณ์ในการออกแบบในบริเวณที่ตอกเสาเข็มและทำการทดสอบนี้มาแล้ว และสามารถกำหนดขนาด ความยาว และระดับปลายเสาเข็มที่จะตอกนี้ได้ก่อน การทดสอบแบบนี้มักจะทำการทดสอบน้ำหนักจนถึงประมาณ 1.5 - 2 เท่าของน้ำหนักที่เราออกแบบให้เสาเข็มรับ เนื่องจากเราไม่สามารถทำการทดสอบเสาเข็มทุกต้นได้ อาจจะมีบางต้นที่รับน้ำหนักที่เราออกแบบแล้วมีการทรุดตัวมากเกินขีดที่กำหนดไว้

ข. Ultimate load Test เพื่อหาน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่สามารถรับได้จริง และดูพฤติกรรมของเสาเข็มในขณะที่รับน้ำหนักต่างๆกันในบริเวณที่ก่อสร้าง เพื่อใช้ผลและข้อมูลเหล่านี้ในการออกแบบครั้งต่อไป การทดสอบแบบนี้มักจะทำในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบเสาเข็มในบริเวณที่ตอกเสาเข็มนี้มาก่อน

เสาเข็มที่จะนำมาทดสอบทั้ง 2 วิธีนี้ จะต้องเป็นเสาเข็มที่มี ชนิด ขนาด ความยาว และใช้เครื่องมือในการตอกเสาเข็มเหมือนกันกับเสาเข็มที่จะใช้ในการก่อสร้างจริงๆ และการทดสอบเสาเข็มจะต้องทดสอบในบริเวณที่ก่อสร้าง หรือใกล้เคียง ที่มีผลจากการเจาะสำรวจดินแล้วว่ามีชั้นดินเหมือนกับบริเวณที่ก่อสร้าง

การทดสอบเสาเข็มโดยทั่วไป มักจะทำการทดสอบเสาเข็มแบบแรก คือ กำหนดน้ำหนักที่จะให้เสาเข็มรับก่อน แล้วจึงทำการทดสอบดูว่า เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักนั้นได้จริงหรือไม่ โดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นเป็น 2 ถึง 3 เท่าของน้ำหนักที่กำหนดให้เสาเข็มรับ แล้วดูค่าการทรุดตัวของเสาเข็มว่าอยู่ในข้อกำหนดหรือไม่ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ค่อยประหยัดในการออกแบบ เพราะเสาเข็มอาจรับน้ำหนักปลอยภัยได้มากกว่าที่เรากำหนดไว้ก็ได้

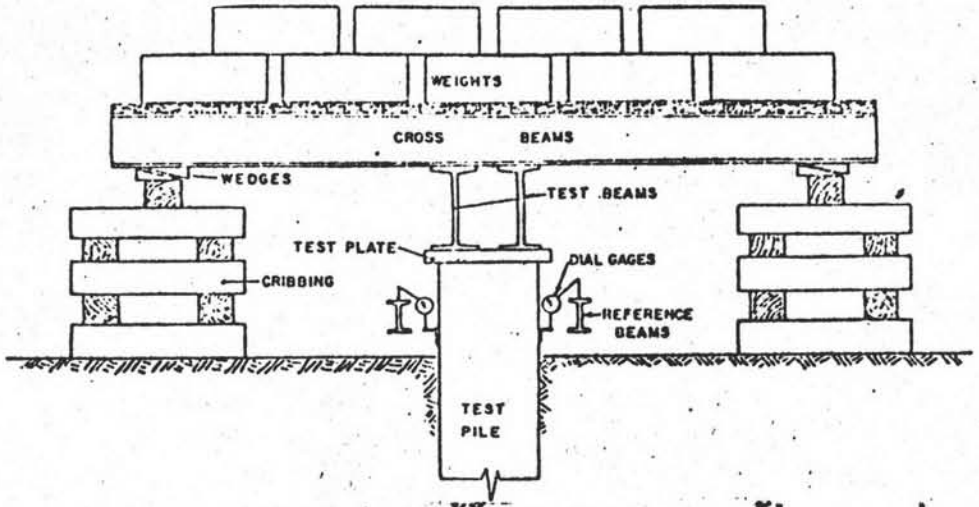
2.1.2 <u>การเลือกสถานที่ที่จะใช้ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม</u>

สถานที่ที่จะทำการทดสอบเสาเข็ม ควรจะอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณที่จะก่อสร้าง หรือถ้ากำหนดให้ทดสอบเสาเข็มหลายต้นในบริเวณเดียวกัน ก็ควรเลือกเสาเข็มที่จะทดสอบ สามารถเป็นตัวแทนของเสาเข็มทั้งหมดได้ โดยกำหนดตามจุดต่าง ๆ ที่เห็นว่าสำคัญ เช่น จุดที่เสาเข็มต้องรับน้ำหนักมากที่สุด หรือจุดที่ไม่แน่ใจว่าเสาเข็มจะสามารถรับน้ำหนักที่เรากำหนดไว้ได้ ถ้าในบริเวณที่ก่อสร้างมีข้อมูลเกี่ยวกับการเจาะสำรวจดินอยู่ด้วย ก็ควรเลือกทดสอบเสาเข็มให้ใกล้เคียงกับจุดที่เราทราบข้อมูลเกี่ยวกับสภาพดินนี้ เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน ซึ่งจะทำให้การออกแบบเสาเข็มมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

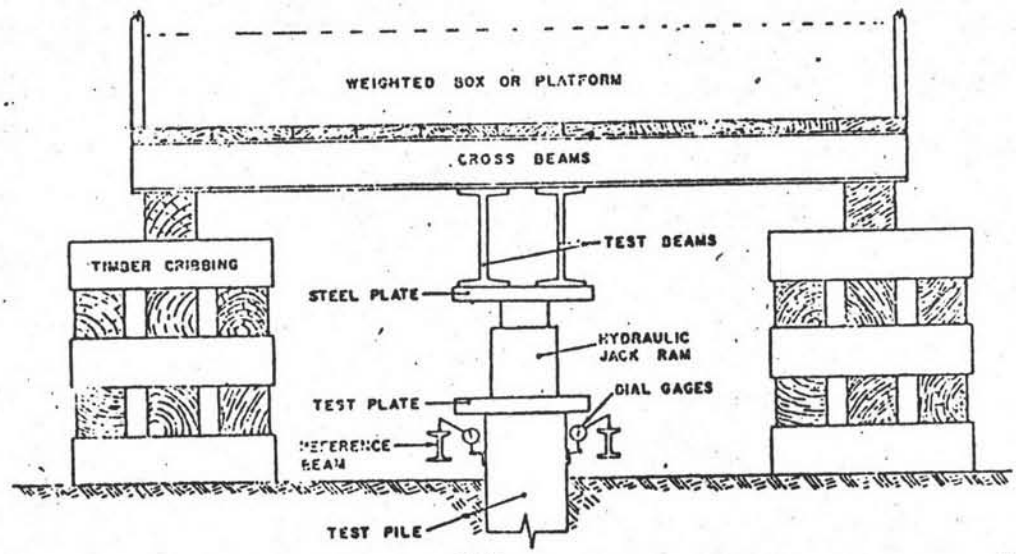
การเลือกจุดที่จะทดสอบเสาเข็มนี้ อาจเลือกเสาเข็มที่ใช้งานจริง ๆ ในฐานรากได้ เพราะเสาเข็มที่ทำการทดสอบจนถึงน้ำหนักพิบัติแล้ว (โดยที่โครงสร้างของเสาเข็มยังไม่มีการเสียหาย) ถ้าทิ้งไว้สักระยะหนึ่งให้กำลังของดินกลับคืนมา จะสามารถรับน้ำหนักได้อีกเหมือนกับเสาเข็มต้นอื่น ๆ

2.1.3 <u>การเลือกวิธีการที่จะใช้น้ำหนักกดหัวเสาเข็ม</u>

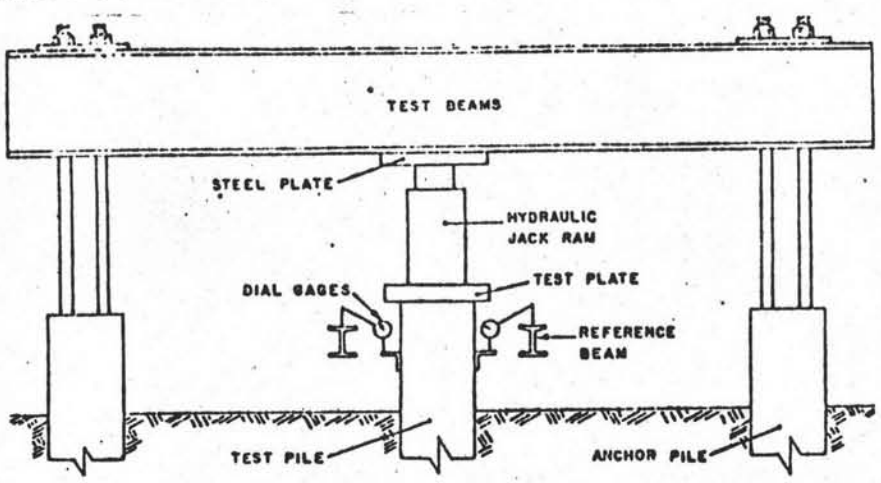
ก. ใช้น้ำหนักกดหัวเสาเข็มโดยผ่านกระบะที่บรรทุกน้ำหนักไว้ข้างบนโดยตรง (ดังรูปที่ 2.1) น้ำหนักที่บรรทุกข้างบนนี้ต้องเป็นวัสดุที่เราทราบน้ำหนักที่แน่นอน และน้ำหนักของมันไม่เพิ่มขึ้นเมื่อโดนน้ำ เช่น เศษเหล็ก แท่งคอนกรีต ถังใส่น้ำ วิธีนี้จะใช้ในกรณีที่หาแม่แรงที่จะนำมาใช้ทดสอบเสาเข็มไม่ได้ และกรณีที่น้ำหนักในการทดสอบเสาเข็มไม่มากเกินไป ข้อเสียสำหรับวิธีนี้ก็คือ ในการลดหรือเพิ่มน้ำหนักทำไม่สะดวก อาจทำให้เกิด แรงดันด้านข้าง หรือ Impact Load ได้ ทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดไปได้



รูปที่ 2.1 การทำ Pile load test โดยใช้น้ำหนักกดหัวเสาเข็มให้ผ่านกระบะที่บรรทุกน้ำหนักโดยตรง



รูปที่ 2.2 การทำ Pile load test โดยใช้ Hydraulic Jack ดันกับกระบะที่บรรทุกน้ำหนักไว้ข้างบน



รูปที่ 2.3 การทำ Pile load test โดยใช้ Hydraulic Jack ดันกับAnchor Piles

ข. ใช้แม่แรงดันบนหัวเสาเข็มที่จะทำการทดสอบ โดยอาจใช้แม่แรงดันกับกระบะที่บรรทุกน้ำหนักแบบวิธีแรก ซึ่งกระบะที่บรรทุกน้ำหนักนี้ควรจะใส่น้ำหนักลงไปให้มากกว่าที่คิดว่าจะใช้แม่แรงดัน (ดังรูปที่ 2.2) หรืออีกวิธีหนึ่ง อาจใช้แม่แรงดันกับคานเหล็กที่ยึดติดกับหัวเข็มสมอ (Anchor Piles) (ดังรูปที่ 2.3) ที่คำนวณแล้วว่าสามารถรับแรงที่จะใช้ในการทดสอบได้ โดยไม่มีการเคลื่อนตัวของเข็มสมอนี้มากเกินไป เข็มสมอนี้ต้องตอกให้ห่างออกมาจากเสาเข็มต้นที่ทดสอบพอสมควร ที่กำหนดไว้ให้ห่างออกมาอย่างน้อย 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มต้นที่ทดสอบ และต้องตอกก่อนทำการทดสอบเสาเข็มอย่างน้อย 14 วัน เพื่อให้ดินรอบ ๆ เสาเข็มที่ถูกรบกวนกลับคืนสู่สภาพเดิมเสียก่อน การทดสอบเสาเข็มโดยใช้แม่แรงดันนี้ สะดวกกว่าแบบแรก ในตอนที่เพิ่มหรือลดน้ำหนัก เพราะสามารถอ่านน้ำหนักบรรทุกได้จาก Gauge ที่ติดไว้กับแม่แรงได้เลย และการลดหรือเพิ่มน้ำหนักทำได้รวดเร็วกว่าแบบแรก

ก่อนที่จะทำการทดสอบเสาเข็มทั้ง 2 วิธีนี้ หัวเสาเข็มที่ใช้น้ำหนักกดต้องทำให้เรียบเสียก่อน โดยอาจจะเทคอนกรีตหุ้มหัวเสาเข็มอีกชั้นหนึ่งหรือใช้ปลอกสวมลงไปกับหัวเสาเข็ม เพื่อให้น้ำหนักถ่ายลงยังตัวเสาเข็มสม่ำเสมอ

2.2 วิธีการทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

วิธีการทดสอบเสาเข็มที่จะกล่าวต่อไปนี้ เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวให้รับแรงสถิตย์กดลงในแนวดิ่งเท่านั้น ไม่รวมไปถึงการทดสอบเสาเข็มให้รับแรงด้านข้าง หรือแรงสั่นสะเทือน วิธีการทดสอบที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่ 4 วิธีคือ

2.2.1 วิธีทดสอบเสาเข็มแบบ Slow Maintained Load Test

การทดสอบเสาเข็มแบบนี้ เราจะเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็มขึ้นเป็นชั้น ๆ ตาม ASTM Designation D 1143-74 (1974) ให้เพิ่มแรงทดสอบขึ้นทีละ 25 % ของน้ำหนักที่กำหนดให้เสาเข็มรับ และเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึง 200 % แรงทดสอบที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกคงไว้ และจะต้องอ่านค่าทรุดตัวของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นจากเดิมทุก ๆ 2, 4, 8, 15, 30, 60 นาที และทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งจะเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็มขั้นใหม่ น้ำหนักที่ใช้กดหัวเสาเข็มจะต้องไม่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มน้อยกว่า Limiting Rate ซึ่งมีผู้กำหนดไว้แตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Limiting Rate สำหรับการทดสอบเสาเข็มแบบ Slow Maintained Load Test

	Limiting Rate	
	มม./ชม.	นิ้ว/ชม.
1. Cooling, L.F. & Packshaw, S (1950)	0.084	0.0033
2. Civil Engineering Code of Practice Joint Committee (1954)	0.305	0.012
3. Indian Standard, I.S. 2911, Part 1 (1964)	0.02	0.0008
4. ASTM Designation D 1143-74 (1974)	0.254	0.01

ถ้าคงแรงทดสอบไว้เกิน 2 ชม. และ ค่าอัตราการทรุดตัว น้อยกว่า Limiting Rate ก็ให้เพิ่มน้ำหนักขึ้นต่อไปได้

เมื่อเราทดสอบเสาเข็มถึงน้ำหนักที่เราต้องการแล้ว มักจะลดน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มลงทีละขั้นจนหมด พร้อมทั้งจดค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็ม ก่อนและหลัง การลดน้ำหนัก

ตาม ASTM Designation D 1143-74 (1974) แนะนำว่า ถ้าเพิ่มน้ำหนักจนถึง 200 % ของน้ำหนักที่คาดว่าจะให้เสาเข็มรับแล้ว เสาเข็มยังไม่พิบัติ ให้คงแรงทดสอบเสาเข็มนี้ไว้ 24 ชั่วโมง หรือนานกว่าถ้าจำเป็นขึ้นกับอัตราการทรุดตัวของเสาเข็ม และจะต้องอ่านระยะทรุดตัวของเสาเข็มทุก ๆ 6 ชั่วโมง และในตอนสุดท้ายของการคงน้ำหนักนี้ไว้ การลดน้ำหนักทดสอบเสาเข็มให้ลดน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มลงเป็น 75, 50, 25, 10 และ 0 % ของน้ำหนักที่ใช้ทดสอบเสาเข็ม และการลดน้ำหนักนี้ ต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที การวัดระยะคืนตัวของเสาเข็มต้องวัดทันทีก่อนและหลังการลดน้ำหนักทุกครั้ง การวัดระยะคืนตัวครั้งสุดท้าย ต้องวัดหลังจากเอาน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มออกหมดแล้วปล่อยให้มันคืนตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.2 <u>วิธีทดสอบเสาเข็มแบบ Constant Rate of Penetration Test (CRP Test)</u>

Whitaker, T (1957) ได้คิดวิธีทดสอบเสาเข็มแบบนี้ขึ้น และได้พิสูจน์ว่าสามารถใช้ทดสอบเสาเข็มในสนามได้ดี เนื่องจากการทดสอบแบบ CRP test นี้ ทำได้รวดเร็ว จึงเป็นที่นิยมใช้แพร่หลายขึ้นในงานวิศวกรรม

ในการทดสอบเสาเข็มแบบ CRP Test นี้ เสาเข็มจะถูกกดลงไปในดินด้วยอัตราการทรุดตัวคงที่ พร้อมทั้งจดน้ำหนักที่ใช้ทดสอบเสาเข็มไว้ตลอดเวลา Garneau, R และ Samson, L (1974) แนะนำให้บันทึกข้อมูลดังกล่าวทุก ๆ ช่วงประมาณ 1 - 2 นาที จนเสาเข็มพิบัติ และต่อจากนั้นให้บันทึกทุก ๆ 5 นาที หรือนานกว่า การควบคุมอัตราการทรุดของหัวเสาเข็มสามารถควบคุมได้โดยการปรับน้ำหนักทดสอบเสาเข็ม ให้เสาเข็มทรุดลงทีละน้อยในเวลาที่จำกัดไว้ Garneau, R และ Samson, L (1974) ใช้เครื่องเข้าควบคุมอัตราการทรุดของเสาเข็ม โดยการติดปั๊มซึ่งทำงานด้วยกระแสไฟฟ้า และใช้เครื่องควบคุมอัตราการปั๊มน้ำมัน (Flow Regulator) เข้าไปในแม่แรงไฮดรอลิกซ์ทั่ว ๆ ไป สำหรับข้อกำหนดต่าง ๆ ในการทดสอบเสาเข็มแบบ CRP มีแตกต่างกันไปบ้าง แล้วแต่ความเหมาะสม เช่น

ก. Commission on File Research (1970) ในสวีเดน กำหนดให้ทดสอบเสาเข็มอย่างน้อยถึง 3 เท่าของน้ำหนักที่กำหนดให้เสาเข็มรับ หรือจนเสาเข็มทรุดลงไปอีก 60 มม.

ข. Whitaker, T (1963) แนะนำให้ทดสอบเสาเข็มโดยให้อัตราการทรุดตัวของหัวเสาเข็มเท่ากับ 0.75 มม./นาที (0.03 นิ้ว/นาที) สำหรับ Friction Pile ที่อยู่ในดินเหนียว และให้อัตราการทรุดเท่ากับ 1.5 มม./นาที (0.06 นิ้ว/นาที) หรือมากกว่าสำหรับ End Bearing Pile ที่อยู่ในดินทรายหรือดินกรวด

ค. Garneau, R และ Samson, L (1974) แนะนำให้ทดสอบเสาเข็มสั้นที่ฝังอยู่ใน Sensitive Clay โดยให้อัตราการทรุดของเสาเข็มไว้เท่ากับ 0.25 - 0.50 มม./นาที (0.01 - 0.02 นิ้ว/นาที) เพื่อจะได้มีเวลาอ่านข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นได้ทัน

ง. ASTM Designation 1143 - 74 กำหนดให้อัตราการทรุดตัวของเสาเข็มไว้เท่ากับ 0.25 - 1.25 มม./นาที (0.01 - 0.05 นิ้ว/นาที) สำหรับเสาเข็มที่ตอกในดินเหนียว และกำหนดอัตราการทรุด เท่ากับ 0.75 - 2.5 มม./นาที (0.03 - 0.10 นิ้ว/นาที) สำหรับดินกรวด

2.2.3 <u>วิธีทดสอบเสาเข็มแบบ Cyclic Load Test</u>

วิธีการทดสอบเสาเข็มแบบนี้ เราจะเพิ่มน้ำหนักทดสอบเสาเข็มขึ้นทีละขั้น Brom, B.B (1972) กำหนดให้เพิ่มแรงทดสอบเป็น 25, 50, 70, 80, 85, 90, 95, 100 % ของน้ำหนักที่คาดว่าเป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม และก่อนการเพิ่มน้ำหนักในขั้นต่อไป เราต้องลดน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มลงทีละขั้นจนหมดเสียก่อน

ASTM Designation 1143 - 74 (1974) กำหนดให้ทดสอบเสาเข็มจนถึง 200 % ของน้ำหนักที่ออกแบบให้เสาเข็มรับ การเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็มในแต่ละขั้นให้เพิ่มขึ้นทีละ 25 % และต้องคงแรงทดสอบไว้จนอัตราการทรุดของเสาเข็มน้อยกว่า 0.01 นิ้ว/ชม. (0.25 มม./ชม.) หรือทุก ๆ 2 ชั่วโมงแล้วแต่ว่าอย่างไหนเกิดขึ้นก่อน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มเป็น 50, 100, และ 150 % ให้ลดแรงทดสอบเสาเข็มลงครั้งละเท่า ๆ กัน ตอนเพิ่มน้ำหนักจนหมด โดยกำหนดให้ใช้เวลาในการลดน้ำหนักลงในแต่ละขั้นเท่ากับ 20 นาที

2.2.4 <u>วิธีทดสอบเสาเข็มแบบ Quick Load Test</u>

วิธีทดสอบแบบนี้จะใช้ทดสอบเสาเข็มเมื่อเราต้องการทราบ กำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มสามารถรับได้ เพราะเป็นวิธีที่สามารถทราบผลได้รวดเร็ว ในการทดสอบทั่วไปอาจทำการทดสอบเสาเข็มแบบใดแบบหนึ่งใน 3 แบบ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ถึง 2 - 2.5 เท่าของน้ำหนักที่กำหนดให้เสาเข็มรับเสร็จแล้วอาจทดสอบแบบ Quick Load Test จนเสาเข็มพิบัติ เพื่อดูว่าเรามี Factor of Safety เท่าไร และอาจนำผลไปเปรียบเทียบกับวิธีออกแบบเสาเข็มแบบ Static Load ได้

วิธีทดสอบเสาเข็มแบบ Quick Load Test นี้ คล้ายกับวิธีทดสอบแบบ CRP Test โดย Texas Highway Department ได้ดัดแปลงมาจากวิธีทดสอบแบบ CRP Test วิธีทดสอบแบบนี้ เริ่มจากการเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็มขึ้นทีละ 5 ตัน หรือ 10 ตัน แล้วบันทึกระยะทรุดตัวของหัวเสาเข็ม แรงทดสอบเสาเข็ม และข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นทันทีก่อนและหลังเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็ม แรงทดสอบเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นแต่ละครั้งจะถูกคงไว้นาน 2.5 นาที แล้วจึงเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็มขึ้นใหม่

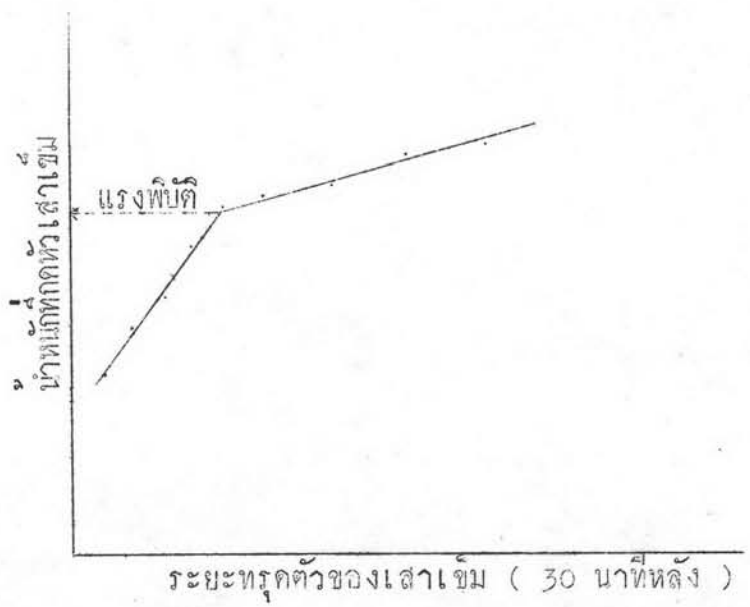
2.3 <u>การหาแรงพิบัติของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกดในแนวดิ่ง</u>

แรงพิบัติของเสาเข็ม คือ น้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มสามารถรับได้โดยไม่ทำให้ดินที่รองรับเสาเข็มพิบัติด้วยแรงเฉือน และ/หรือ ทำให้เสาเข็มทรุดลงไปมากโดยที่น้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มไม่เพิ่มขึ้น หรือเพิ่มขึ้นน้อยมาก การหาแรงพิบัติของเสาเข็มมักอาศัยดูจากลักษณะของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็ม กับระยะทรุดตัวของเสาเข็ม

การหาแรงพิบัติของเสาเข็มนี้ มีผู้กำหนดไว้หลายคน คือ

1. Terzaghi, K (1942) ได้กำหนดโดยอาศัยระยะทรุดตัวของเสาเข็มเป็นเกณฑ์ในการหาแรงพิบัติของเสาเข็มโดยถือว่า แรงพิบัติของเสาเข็มเป็นแรงทดสอบเสาเข็มที่ทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มเป็น 1/10 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางตรงปลายเสาเข็ม

2. Housel, W.S. (1956) ได้แนะนำให้หาแรงพิบัติของเสาเข็มแบบ Maintained Load Test โดยเพิ่มแรงทดสอบเสาเข็มขึ้นครั้งละเท่า ๆ กันทุกชั่วโมง House, W.S. พบว่ากราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงทดสอบเสาเข็ม และระยะทรุดตัวของเสาเข็ม ภายในช่วงเวลา 30 นาทีหลัง สามารถเขียนแทนได้ด้วยเส้นตรง 2 เส้นโดยประมาณ และถือเอาจุดตัดของเส้นตรงทั้งสอง (จุด Yield Point) เป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การหาแรงพิบัติของเสาเข็มโดยวิธีของ Housel, W.S. (1956)

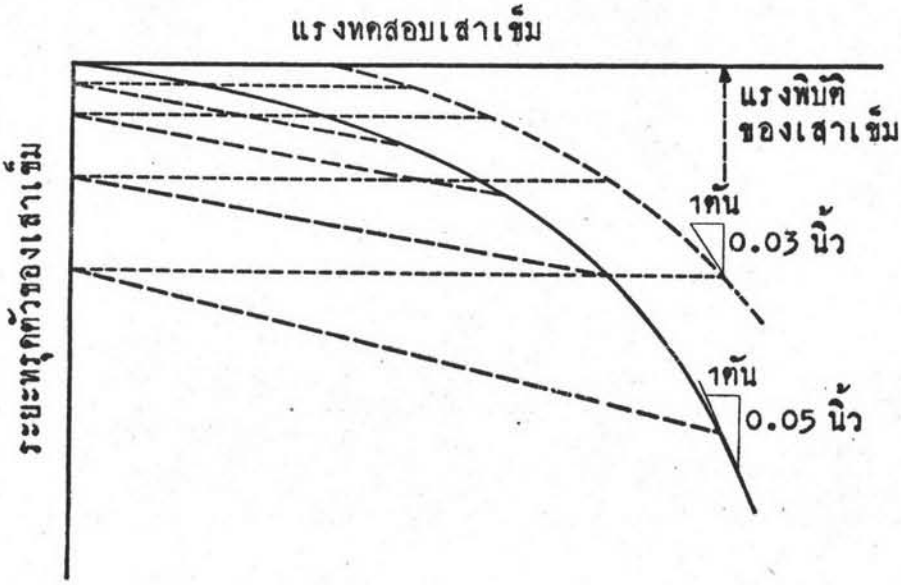
3. Chellis, R.D. (1961) กำหนดให้แรงพิบัติของเสาเข็ม เป็นแรงที่ทำให้เสาเข็มทรุดลงไปในดินอย่างรวดเร็ว หรือความหมายทางคณิตศาสตร์ คือ แรงทดสอบเสาเข็มที่ทำให้ความชัน (Slope) ของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็ม และระยะทรุดตัวของเสาเข็ม มีค่าเข้าใกล้อนันต์ (Infinity) ในทางปฏิบัติ จะถือว่า แรงพิบัติของเสาเข็มเป็นแรงทดสอบเสาเข็มที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงระยะทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับแรงทดสอบเสาเข็ม

4. ตามรายงานของ Chellis, R.D.(1961) Nordlund, R.L. ถือแรงพิบัติของเสาเข็มเป็นแรงทดสอบเสาเข็ม ขณะที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็ม และระยะทรุดตัวของเสาเข็ม มีความชัน (Slope) 0.05 นิ้ว/ตัน ของแรงทดสอบเสาเข็ม หรือเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงทดสอบเสาเข็มกับระยะทรุดตัวถาวรของเสาเข็ม (Plastic Settlement) มีความชัน (Slope) 0.03 นิ้ว/ตัน ของแรงทดสอบเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.5

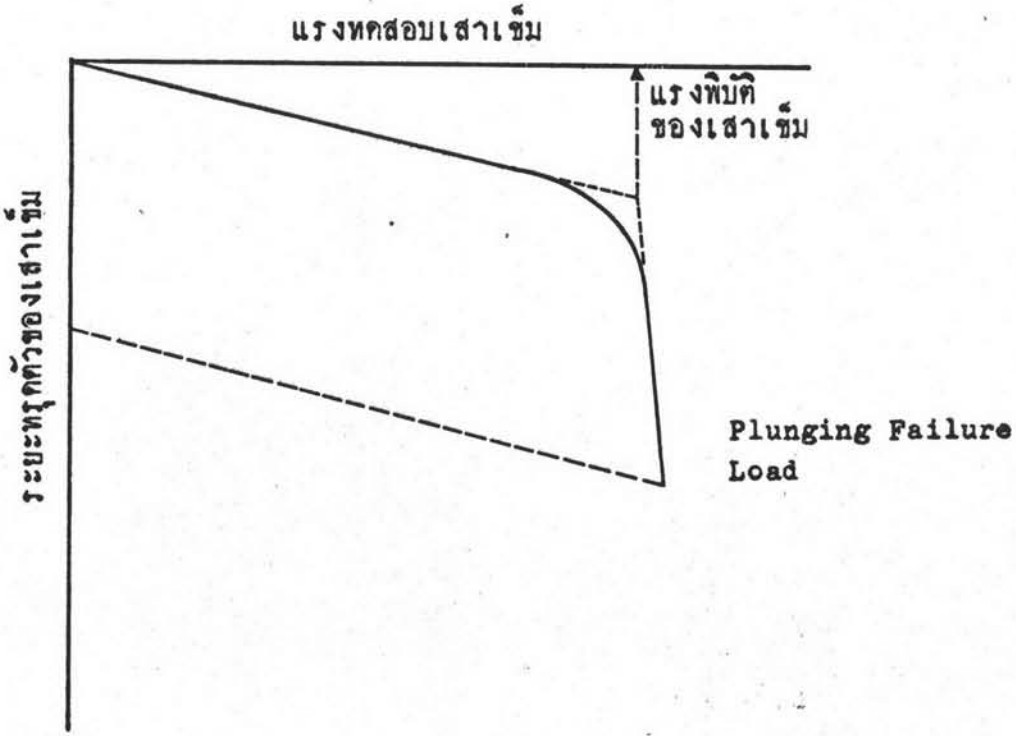
5. ตามรายงานของ Chellis, R.D.(1961) Rabe, W.H.ถือแรงพิบัติของเสาเข็มเป็นแรงทดสอบเมื่อกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็มและระยะทรุดตัวของเสาเข็ม มีความชัน (Slope) เท่ากับ 0.03 นิ้ว/ตัน ของแรงทดสอบเสาเข็ม

6. Fuller, F.M. และ Hoy, H.E. (1970) กำหนดแรงพิบัติของเสาเข็มที่ทดสอบด้วยวิธี Quick Load Test ว่า คือแรงที่ทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่น้ำหนักที่กระทำบนหัวเสาเข็มไม่เพิ่มขึ้นเลย (คือ เมื่อน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มสามารถคงที่อยู่ได้ด้วยการโยกแม่แรงไฮโดรลิกแต่เพียงอย่างเดียว นั่นคือ เสาเข็มจะถูกกดลงดินเรื่อย ๆ) ค่าแรงพิบัติของเสาเข็มจะหาได้จากการลากเส้นตรงสัมผัสกับส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงไปพบกัน แรงพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากวิธีนี้เรียกว่า Plunging Failure Load ดังแสดงในรูปที่ 2.6

7. International Conference of Building Officialsจาก The Design of Foundation for Building โดย Johnson M. Sidney และ Kavanagh C. Thomas กำหนดแรงพิบัติของเสาเข็มเป็นแรงที่ทำให้ระยะทรุดตัวรวม (Total Settlement) รวมทั้งระยะหดตัว (Elastic Deformation) ของเสาเข็ม เท่ากับ 0.01 นิ้ว/ตัน ของน้ำหนักที่ใช้ทดสอบเสาเข็ม และเมื่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จะต้องไม่มีการทรุดตัวต่อไปอีก

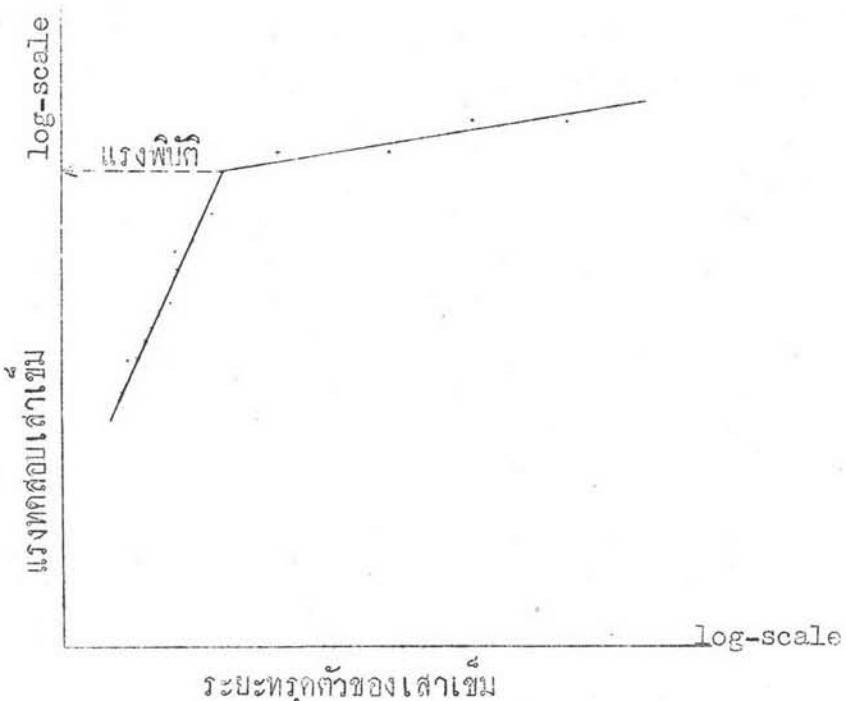


รูปที่2.5การหาแรงพิบัติของเสาเข็มโดยถือจากความชัน(Slope)ของกราฟ



รูปที่2.6การหาแรงพิบัติของเสาเข็มที่ทดสอบด้วยวิธี Quick Load Test

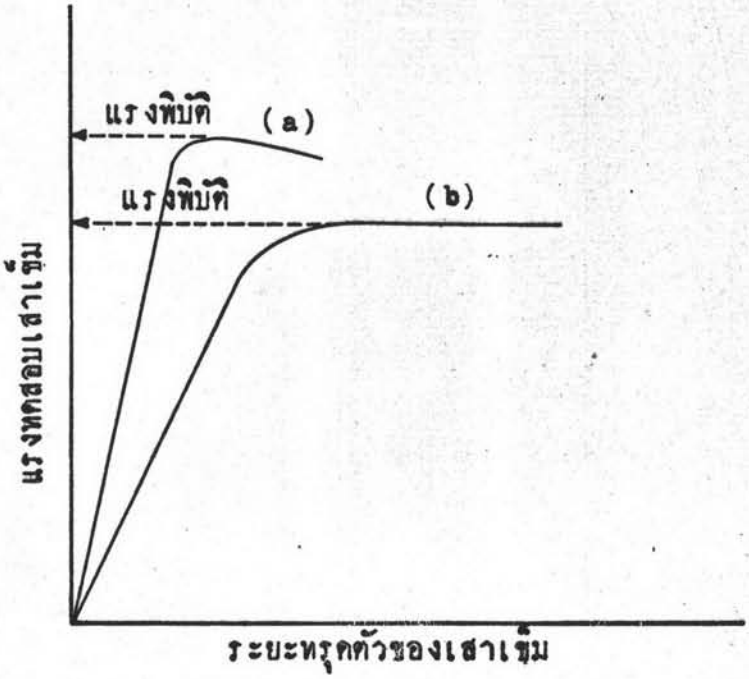
8. ตามรายงานของ Fellinius, B.H. (1975) De Beer, E.E.หาแรงพิบัติของเสาเข็มที่ถูกทดสอบด้วยวิธี Slow Maintained Load Test โดยอาศัยดูจากลักษณะกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็ม และระยะทรุดตัวของเสาเข็ม De Beer, E.E. พบว่า กราฟที่เขียนด้วยสเกลล็อก (Logarithmic Scale) ทั้ง 2 แกน จะสามารถลากเป็นเส้นตรงได้ 2 เส้น และถือว่าแรงทดสอบเสาเข็มที่จุดตัดนี้ เป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.7



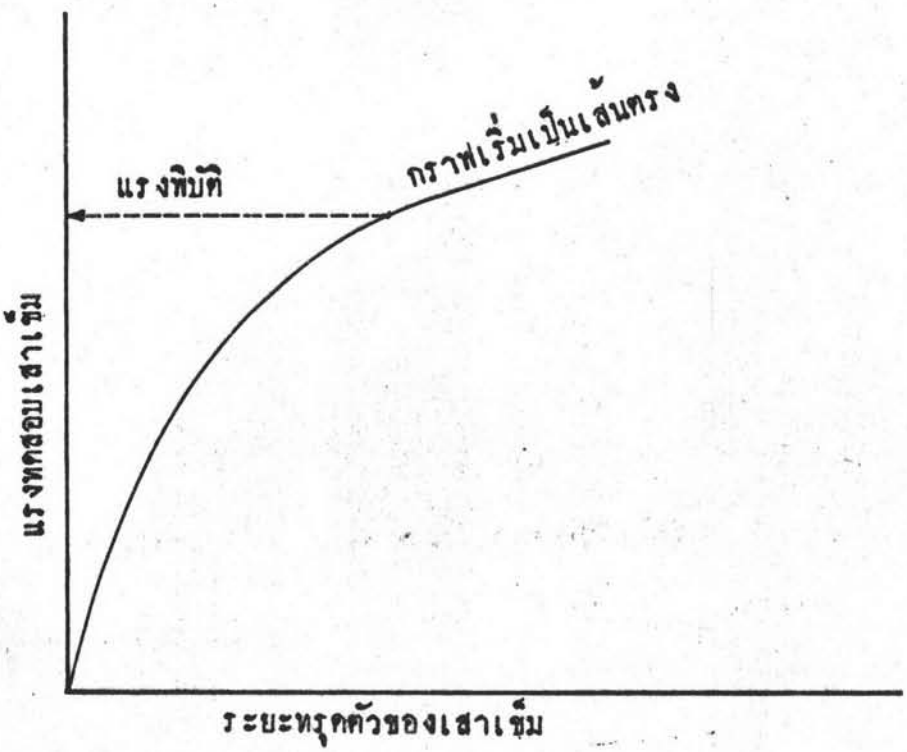
รูปที่ 2.7 การหาแรงพิบัติของเสาเข็มโดยวิธีของ Fellinius, B.H. (1975). De Beer, E.E

9. Whitaker, T (1970) ได้ให้นิยามแรงพิบัติของเสาเข็มที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบเสาเข็มแบบ CRP Test ไว้ว่าเป็นแรงทดสอบเสาเข็ม ขณะที่แรงต้านทานของดินเกิดขึ้นเต็มที่

ในกรณีที่เป็น Friction Pile กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็มและระยะทรุดตัวของเสาเข็ม จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 แรงทดสอบเสาเข็มอาจจะถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง แล้วลดลงเมื่อเสาเข็มทรุดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.8(a) หรือแรงทดสอบเสาเข็มอาจจะถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งแล้วคงที่ เมื่อเสาเข็มทรุดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.8 (b) ค่าแรงทดสอบเสาเข็มสูงสุดถือเป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม



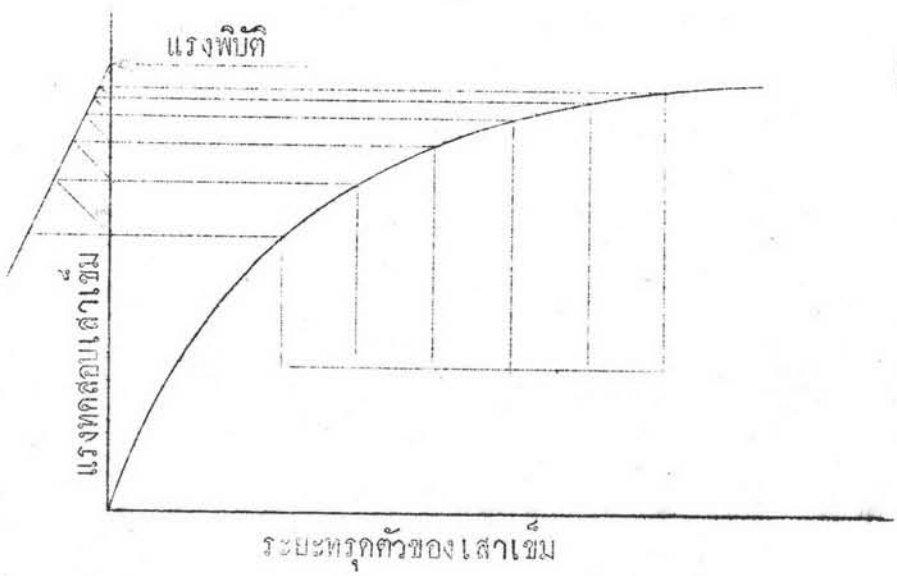
รูปที่2.8การหาแรงพิบัติของ friction pile โดยวิธีของ Whitaker,T



รูปที่2.9การหาแรงพิบัติของ end bearing pile โดยวิธีของ Whitaker,T

ในกรณีที่เป็น End Bearing Pile กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็ม และระยะทรุดตัวของเสาเข็ม จะมีลักษณะดังรูปที่2.9คือ แรงทดสอบเสาเข็มจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเสาเข็มทรุดมากขึ้น จนถึงจุดหนึ่งกราฟจะเริ่มเป็นเส้นตรง ค่าแรงทดสอบเสาเข็มตรงจุดที่กราฟเริ่มเป็นเส้นตรงนี้ จะถือเป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม ในทางปฏิบัติจุดที่ว่านี้ จะหาได้ยาก จึงมักใช้ค่าแรงทดสอบเสาเข็มที่ทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็ม เป็น 1/10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางตรงปลายเข็ม เป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม

10. Mazurkiewicz, B.K. (1972) ได้เสนอวิธีหาแรงพิบัติของเสาเข็มขึ้น แม้ว่าจะทดสอบเสาเข็มไม่ถึงแรงพิบัติของเสาเข็มก็ตาม โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่า ลักษณะกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็มและระยะทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นรูป พาราโบลา (Parabola) เมื่อเสาเข็มพิบัติ การหาแรงพิบัติของเสาเข็มเริ่มด้วยการเลือกระยะทรุดของหัวเสาเข็มขึ้นมาหลาย ๆ ค่า โดยให้ระยะทรุดของหัวเสาเข็มที่เลือกขึ้นมานี้ อยู่ในอนุกรมก้าวหน้าเลขคณิต หากแรงทดสอบเสาเข็มที่ระยะทรุดของหัวเสาเข็มที่เลือกขึ้นมาทุกค่าจากกราฟ จากจุดที่แกนแรงทดสอบเสาเข็มแต่ละค่าที่หามาได้ ลากเส้นตรงทำมุม 45° กับแกนที่แสดงแรงทดสอบเสาเข็ม ไปตัดกับเส้นตรงที่ลากขนานแกน แสดงระยะทรุดของหัวเสาเข็ม และผ่านจุดแกนแรงทดสอบเสาเข็มค่าถัดไป ซึ่งมีค่ามากกว่า Mazurkiewicz, B.K. พบว่า จุดตัดเหล่านี้อยู่ในแนวเส้นตรงโดยประมาณ ลากเส้นตรงเชื่อมจุดตัดเหล่านี้ให้ไปตัดกับแกนแรงทดสอบเสาเข็ม และถือจุดที่เส้นตรงนี้ตัดกับแกนแรงทดสอบเสาเข็ม เป็นแรงพิบัติของเสาเข็ม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10



005121

รูปที่ 2.10 การหาแรงพิบัติของเสาเข็มโดยวิธีของ Mazurkiewicz, B.K.

i 17603146

2.4 การหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย จากผลการทดสอบเสาเข็ม

การหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม ก็เพื่อเอาค่านี้ไปใช้ในการคำนวณออกแบบฐานราก ซึ่งมีผู้กำหนดการหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มไว้มากมาย การจะใช้วิธีไหนก็ขึ้นกับ ประสบการณ์และการตัดสินใจของวิศวกรผู้ออกแบบฐานรากเอง

การหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม สามารถพิจารณาได้จากกฎเกณฑ์ดังต่อไปนี้

1. Boston Building Code

กำหนดให้น้ำหนักที่กดหัวเสาเข็มในการทดสอบเป็น 2 เท่าของน้ำหนักที่คาดว่าจะให้เสาเข็มรับในการออกแบบ และทิ้งไว้บนหัวเสาเข็มไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จนกระทั่งการทรุดตัวหรือการคืนตัวของเสาเข็มไม่เกิน 0.22 นิ้วใน 24 ชั่วโมง และรูปร่างของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็ม และ ระยะทรุดตัวของเสาเข็มยังไม่ชี้ชัดว่าจะถึงจุดพีบัติ ให้กำหนดน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบเป็นครึ่งหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกมากที่สุดที่เสาเข็มรับได้ในระหว่างการทดสอบที่มีการทรุดตัวถาวร (Permanent Set) ของเสาเข็มไม่เกิน 0.5 นิ้ว เมื่อเอาน้ำหนักลงหมดแล้วหลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบ

2. Rabe, WH, Design Engineer, Bureau of Bridges, State of Ohio

กำหนดให้ดูจุดที่ระยะทรุดตัวของเสาเข็มเริ่มเกินจาก 0.03 นิ้ว/ตันของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และหารโดยอัตราส่วนความปลอดภัย 2 สำหรับ Static Loads และหารด้วย 3 สำหรับ Vibratory Loads

3. Pacific Coast Uniform Building Code

ให้สังเกตจุดที่ระยะทรุดตัวของเสาเข็มไม่เกิน 0.01 นิ้ว/ตันของแรงทดสอบเสาเข็มหลังจากทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย 2

4. ASSHO

กำหนดน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มเท่ากับครึ่งหนึ่งของน้ำหนักที่ทำให้ระยะทรุดตัวถาวรของเสาเข็ม ไม่เกิน 1/4 นิ้ว หลังจากที่ได้ทดสอบติดต่อกันมาแล้ว 48 ชั่วโมง และการทรุดตัวถาวรนี้จะไม่เพิ่มขึ้นอีก เมื่อกดน้ำหนักบรรทุกนี้ไว้ต่อไปอีก 60 ชั่วโมง หรือนานกว่า

5. Los Angeles Building Code

กำหนดให้อ่านน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของเสาเข็มไม่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มน้ำหนักบนเสาเข็ม แล้วหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2

6. Raymond Concrete Pile Co.

หาน้ำหนักบรรทุกที่จุดซึ่งให้ความชัน (Slope) ของกราฟแสดงการทรุดตัวรวมเกิน 0.05 นิ้วต่อตัน หรือจุดที่ให้ความชันของกราฟแสดงการทรุดตัวถาวรเริ่มเกิน 0.03 นิ้วต่อตัน แล้วหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2 เป็นน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย เมื่อรับแรงสถิตย์ (Static Load) หรือ หารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3 เป็นน้ำหนักบรรทุก เมื่อรับแรงสั่นสะเทือน (Vibratory Load)

7. กำหนดน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม โดยการลากเส้นสัมผัสกับส่วนบนและล่างของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงทดสอบเสาเข็ม และระยะทรุดตัวของเสาเข็ม อ่านน้ำหนักบรรทุกที่เส้นสัมผัสสองเส้นตัดกันแล้วหารด้วยอัตราส่วนของความปลอดภัยเท่ากับ 1.5 หรือ 2

8. United State Steel Co.

กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม เท่า 2/3 ของน้ำหนักบรรทุกที่มากที่สุดเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงทดสอบเสาเข็มและระยะทรุดตัวของเสาเข็ม เป็นเส้นตรง

2.5 สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formula)

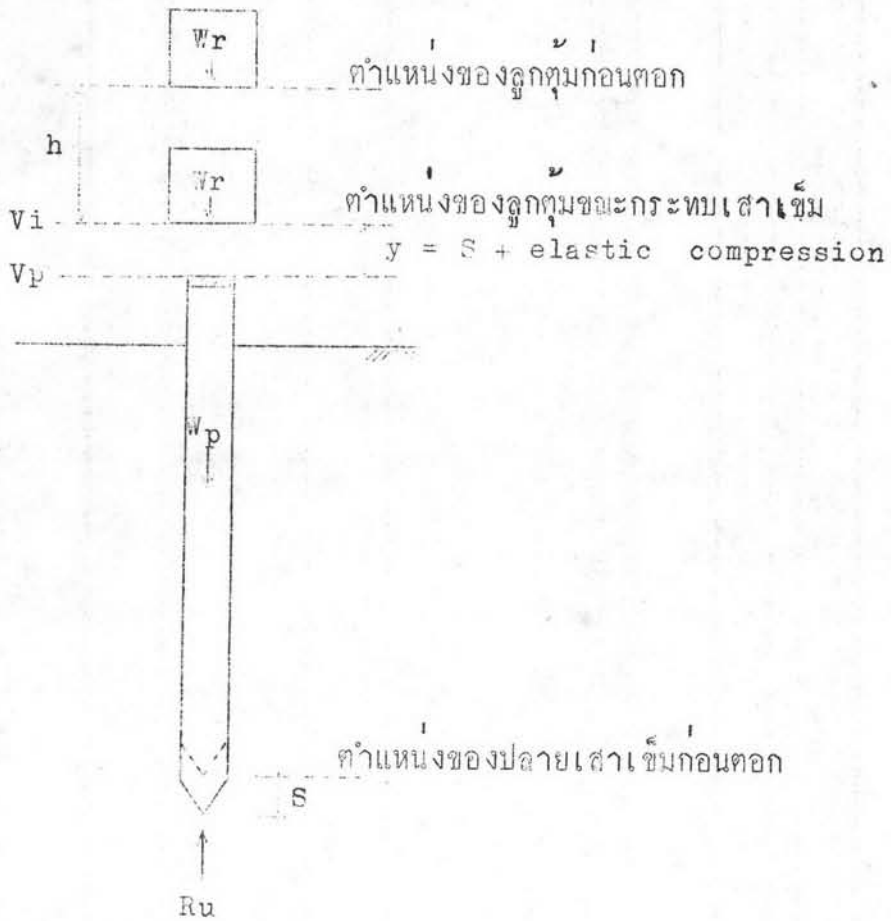
สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formula) เป็นสูตรที่ใช้สำหรับหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยอาศัยข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในระหว่างที่มีการตอกเสาเข็ม เช่น น้ำหนักของลูกตุ้มตอก น้ำหนักของเสาเข็ม ระยะยกของลูกตุ้ม ชนิด ขนาด และความยาวของเสาเข็ม ไปแทนค่าลงในสูตร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ลึกลงไปเลย ดังนั้นการหาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มในวิธีนี้ จึงสามารถทำได้สะดวกดีกว่าวิธีอื่น ๆ

2.5.1 ที่มาของสูตรการตอกเสาเข็ม (Derivation of Pile Driving Formula)

ก. โดยใช้หลักของ Impulse - Momentum

กำหนดให้

g	=	ความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก
h	=	ระยะยกของลูกตุ้ม
I	=	Impluse ที่ทำให้เกิด Compression (การเปลี่ยนแปลง Momentum)
m	=	มวลวัตถุ = W/g
Mr	=	Momentum ของลูกตุ้ม = $m_r V$
Mp	=	Momentum ของเสาเข็ม = $m_p V$
n	=	สัมประสิทธิ์ของการคืนตัว (Coefficient of Restitution)
nI	=	Impluse ที่ทำให้เกิดการคืนตัว
Ru	=	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม
S	=	ระยะจมของเสาเข็ม
Vco	=	ความเร็วของลูกตุ้มและเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการเกิด Compression
Vi	=	ความเร็วของลูกตุ้มในขณะที่กระทบกับเสาเข็ม
Vp	=	ความเร็วของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว
Vr	=	ความเร็วของลูกตุ้มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว
Wr	=	น้ำหนักของลูกตุ้ม
Wp	=	น้ำหนักของเสาเข็ม รวมทั้งน้ำหนักของที่รองหัวเสาเข็ม



รูปที่2.11แสดงการเคลื่อนที่ของเสาเข็มขณะที่ทำการตอก

ในขณะที่ลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็ม Momentum ของลูกตุ้ม คือ

$$Mr = m_r Vi = \frac{Wr\,Vi}{g} \qquad \text{.....(2.1)}$$

ในช่วงสุดท้ายของการเกิด Compression Momentum ของลูกตุ้มจะเปลี่ยนเป็น

$$Mr = \frac{Wr\,Vi}{g} - I = \frac{Wr\,Vce}{g} \qquad \text{.....(2.2)}$$

เพราะฉะนั้น $$Vce = \left[\frac{WrVi}{g} - I \right] \frac{g}{Wr} \qquad \text{.....(2.3)}$$

Momentum ของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการเกิด Compression จะมีค่าเท่ากับ I ด้วย

เพราะฉะนั้น $$Mp = I = Vce \frac{Wp}{g} \qquad \text{.....(2.4)}$$

$$Vce = \frac{Ig}{Wp} \qquad \text{.....(2.5)}$$

สมมุติว่า เสาเข็มและลูกตุ้มไม่มีการแยกกันในช่วงสุดท้ายของการเกิด Compression ความเร็วของเสาเข็มและลูกตุ้มในขณะนี้จะมีค่าเท่ากัน

เพราะฉะนั้น จากสมการ(2.3) และ (2.5) จะได้ว่า

$$I = Vi \frac{Wr\ Wp}{g(Wr + Wp)} \qquad \text{.....(2.6)}$$

ในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว Momentum ของเสาเข็มจะเท่ากับ

$$I + nI = \frac{Wp\ Vp}{g} \qquad \text{.....(2.7)}$$

และของลูกตุ้มตอกจะเท่ากับ

$$\frac{WrVi}{g} - I - nI = \frac{WrVr}{g} \qquad \text{.....(2.8)}$$

แทนค่า I ใน(2.6) ลงใน(2.7)และ(2.9) จะได้

$$Vp = \frac{(Wr + nWr)}{(Wr + Wp)} Vi \qquad \text{.....(2.9)}$$

$$Vr = \frac{(Wr - nWp)}{(Wr + Wp)} Vi \qquad \text{.....(2.10)}$$

พลังงานของเสาเข็มและลูกตุ้มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{Wr}{2g} Vr^2 + \frac{Wp}{2g} Vp^2 = \frac{Wr}{2g} \frac{(Wr - nWp)^2}{(Wr + Wp)^2} Vi^2 + \frac{Wp}{2g} \frac{(Wr + nWr)^2}{(Wr + Wp)^2} Vi^2$$

$$= \frac{Wr\ Vi^2}{2g} \frac{(Wr + n^2Wp)}{(Wr + Wp)}$$

$$= Wrh \frac{(Wr + n^2Wp)}{(Wr + Wp)} \qquad \text{.....(2.11)}$$

จากหลักของพลังงาน ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงาน เราจะได้

$$RuS = Wrh$$

ถ้าเรากำหนดให้ Eh = ประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม

$$RuS = E\,h\ Wrh$$

แทนค่า Wrh ด้วยค่า Equivalent จากสมการที่ (2.11) เราจะได้ว่า

$$Ru = \frac{Eh\ Wrh}{S} \frac{(Wr + n^2 Wp)}{(Wr + Wp)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.12)$$

ในขณะที่ตอกเสาเข็ม ระยะเคลื่อนที่ของปลายเสาเข็ม และหัวเสาเข็มจะไม่เท่ากัน เนื่องจาก Elastic Compression คือ เมื่อปลายเสาเข็มเคลื่อนที่ไปได้ระยะ = S หัวเสาเข็มจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะ $S + C_1 + C_2 + C_3$

เมื่อ C_1 = Elastic Compression ของที่รองหัวเสาเข็ม $= \frac{Rut}{AEt}$

C_2 = Elastic Compression ของเสาเข็ม $= \frac{RuL}{AE_L}$

C_3 = Elastic Compression ของดิน

t = ความหนาของที่รองหัวเสาเข็ม

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

L = ความยาวของเสาเข็ม

Et = พิกัดยืด (Modulus of Elasticity) ของที่รองหัวเสาเข็ม

E_L = พิกัดยืด (Modulus of Elasticity) ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

ค่า Elastic Compression ของที่รองหัวเสาเข็ม เสาเข็ม และดินนี้ เราสมมุติว่ามีค่าแปรเปลี่ยนไปขึ้นกับน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็ม ดังนั้น งานที่หา ได้จากพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของการตอกเสาเข็ม จะเท่ากับ

$$Ru\left[S + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{2}\right] = Ru\ (S + C/2) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.13)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (12) จะได้ว่า

$$Ru = \frac{Eh\ Wrh}{(S + C/2)} \frac{(Wr + n^2 Wp)}{(Wr + Wp)} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.14)$$

สมการ (2.14) นี้ เป็นสมการที่สามารถใช้หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มได้

ข. <u>โดยใช้หลักของพลังงาน</u> (Conservation of Energy)

โดยใช้หลักที่ว่า

งานที่ได้รับ = งานที่ทำ - งานที่สูญเสียไป $\qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.15)$

งานที่ได้รับ คือ งานที่เสาเข็มใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินลงไป = Ru S

งานที่ทำ คือ งานที่ได้จากเครื่องตอกเสาเข็ม = Eh Wrh

(โดยที่ Eh คือ ประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม)

งานที่สูญเสียไป ได้แก่

1. งานที่สูญเสียไปเนื่องจาก Impact ของลูกตุ้มและเสาเข็ม

กำหนดให้

Ei = พลังงานของลูกตุ้มก่อนกระทบหัวเสาเข็ม = Wrh = $\frac{Wr\ V^2_i}{2g}$

Ef = พลังงานของลูกตุ้มและเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว

= $\frac{Wr\ V^2_r}{2g} + \frac{Wp\ V^2_p}{2g}$

เพราะฉะนั้น พลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการ impact El = Ei - Ef

$$El = \frac{Wr\ V^2_i}{2g} - \left[\frac{Wr\ V^2_r}{2g} + \frac{Wp\ V^2_p}{2g}\right] \qquad \text{..... (2.16)}$$

แทนค่า Vp และ Vr จากสมการ(2.9)และ(2.10) ลงใน (2.16)จะได้ว่า

$$E_l = \frac{Wr\ Vi^2}{2g} - \frac{Wr\ Vi^2}{2g}\ \frac{(Wr + n^2 Wp)}{(Wr + Wp)}$$

$$= \frac{Wr\ Vi^2}{2g} - \frac{Wr\ Vi^2}{2g}\left[1 - \frac{Wp\ (1 - n^2)}{(Wr + Wp)}\right]$$

$$= \frac{Wr\ Vi^2\ Wp(1 - n^2)}{2g\ (Wr + Wp)}$$

$$= \frac{Wrh\ Wp(1 - n^2)}{(Wr + Wp)} \qquad \text{.....(2.17)}$$

2. งานที่สูญเสียไปเนื่องจาก Elastic Compression ของที่รองหัวเสาเข็ม เสาเข็ม และดินจากสมการ (2.13)

$$Ru\ \frac{(C_1 + C_2 + C_3)}{2} = Ru\ C/2$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (15) จะได้ว่า

$$RuS = EhWrh - Eh\ \frac{Wrh\ Wp(1 - n^2)}{(Wr + Wp)} - Ru\ C/2 \qquad \text{.....(2.18)}$$

สมการที่(2.14)นี้ ถ้าจัดรูปใหม่ก็จะได้เช่นเดียวกับสมการที่(2.14)คือ

$$Ru = \frac{Eh\ Wrh}{(S + C/2)} \frac{(Wr + n^2 Wp)}{(Wr + Wp)}$$

สูตรการตอกเสาเข็ม ส่วนใหญ่ก็ดัดแปลงมาจากสมการที่(2.14)นี้ เพียงแต่เปลี่ยนแปลงค่าคงที่บางตัวให้เหมาะสมขึ้น คือ

Hiley Formula มาจากสมการที่ (2.14)

$$Ru = \frac{Eh\ Wrh}{(S + C/2)} \frac{(Wr + n^2 Wp)}{(Wr + Wp)} \qquad \text{.....(2.19)}$$

Redtenbacher Formula สมมุติว่า ในการตอกเสาเข็มประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม = 100 % และในการ Impact ให้ค่า n = 0 และไม่มี Elastic Compression ในที่รองหัวเสาเข็มและดิน

จากสมการ(2.14) จะได้ว่า

$$Ru = \frac{Wrh}{S + \frac{RuL}{2AE_L}} \cdot \frac{Wr}{Wr + Wp}$$

หรือ

$$Ru = \frac{AE_L}{L} \left[- S + \sqrt{S^2 + \frac{Wrh^2}{(Wr+Wp)} \cdot \frac{2L}{AE_L}} \right] \qquad \text{.....(2.20)}$$

Pacific Coast Uniform Building Code Formula จากสมการ(2.14) สมมุติประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม = 100 % และไม่มี Elastic Compression ในที่รองหัวเสาเข็มและดิน จะได้ว่า

$$Ru = \frac{Wrh \ \frac{Wr + n^2 Wp}{Wr + Wp}}{S + \frac{RuL}{AE_L}} \qquad \text{.....(2.21)}$$

Dutch Formula จากสมการ (2.14) สมมุติว่า ประสิทธิภาพของเครื่องตอก = 100 % และในการ Impact ไม่มีการยืดหยุ่น (n = 0) และไม่มี Elastic Compression ในที่รองหัวเสาเข็ม เสาเข็ม หรือดินรอบ ๆ เสาเข็มเลย จะได้ว่า

$$Ru = \frac{Wrh}{S} \cdot \frac{Wr}{Wr + Wp} \qquad \text{.....(2.22)}$$

Eytelwein Formula จาก Dutch Formula

$$Ru = \frac{Wrh}{S(1 + \frac{Wp}{Wr})} \qquad \text{.....(2.23)}$$

Navy Mckay Formula จาก Dutch Formula โดยใช้ Factor 0.3 S คูณเข้าไปจะได้ว่า

$$Ru = \frac{Wrh}{S(1 + 0.3\frac{Wp}{Wr})} \qquad \text{.....(2.24)}$$

Engineering News Formula จากสมการที่ (2.14) สมมุติประสิทธิภาพของเครื่องตอก = 100 %, (En = 1.0) การสูญเสียของพลังงานเนื่องจาก Impact ไม่มี ($\frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp} = 0$) และค่า Elastic Compression ของที่รองหัวเสาเข็ม เสาเข็ม และดินรอบ ๆ เสาเข็มกำหนดให้เท่ากับ 1.0 สำหรับ Drop hammer, 0.10 สำหรับ Single Acting, Double Acting และ Differential Acting Steam Hammers

$$Ru = \frac{Wrh}{S + C} \qquad \text{.....(2.25)}$$

C = 1.0 - Drophammer, C = 0.1 - Single - acting

- Double - acting

- Differential - acting

Modified Engineering News Formula จาก Engineering News Formula ได้คิดการสูญเสียของพลังงานเนื่องจาก Impact เข้ามาด้วย

$$Ru = \frac{Wrh}{S + C} \cdot \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp} \qquad \text{.....(2.26)}$$

ค. การหาสูตรการตอกเสาเข็ม โดยการรวบรวมข้อมูล

สูตรการตอกเสาเข็มที่ได้จากการรวบรวมข้อมูล ตามรายงานของ Marvin Gates, J.M. ได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (Pile load Test) มากกว่า 100 ต้น แล้วนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบเสาเข็มกับสูตรของเขา โดยที่เขาพบว่า กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม มีความสัมพันธ์กับรากที่สองของพลังงานที่ใช้ตอกเสาเข็ม นั่นคือ

$$Ru \sim \sqrt{En} \qquad \text{.....(2.27)}$$

ต่อจากนั้นเขาได้ทดลอง Plot กราฟ ระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบ (Rt) ในสเกลธรรมดา กับระยะจมของเสาเข็มในการตอกครั้งท้าย ๆ (S) ในสเกลlog ปรากฏว่า กราฟที่ Plot ได้ สามารถลากเป็นเส้นตรงได้อย่างคร่าว ๆ แสดงว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม มีความสัมพันธ์กับ log ของระยะจม (S) ของเสาเข็ม จะได้ว่า

$$Ru \sim \log S \qquad \text{.....(2.28)}$$

รวมสมการ (27) และ (28) จะได้ว่า

$$Ru \sim \sqrt{En} \log S$$

หรือ

$$Ru = a\sqrt{En} \log S \qquad \text{.....(2.29)}$$

เมื่อ a = ค่าคงที่

แต่เนื่องจากค่าของ log S อาจมีค่าเป็นลบ เมื่อ S มีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งจะทำให้ Ru มีค่าเป็นลบด้วย จึงต้องใช้ค่าคงที่อีกตัวหนึ่ง คือ b เพิ่มเข้าในสมการ(2.29) เพื่อให้ Ru มีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจะได้ว่า

$$Ru = a\sqrt{En} \log S + b \qquad \text{.....(2.30)}$$

จากกราฟที่ Plot ระหว่าง $Ru/\sqrt{En}$ และ log S เราสามารถหาค่าคงที่ a และ b ได้ เมื่อใช้อัตราส่วนความปลอดภัย = 3.0 เราสามารถหาน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (Ra) ได้ ตามสมการ (2.31)

$$Ra = \frac{1}{7}\sqrt{En}\ (1 - \log S) \qquad \text{.....(2.31)}$$

เมื่อ Ra = น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม,

En = พลังงานจากเครื่องตอกเสาเข็ม

= Wrh

S = ระยะจมของเสาเข็ม

2.6 Factor ต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานการทรุดตัวของเสาเข็ม

เนื่องจากระยะทรุดตัวของเสาเข็ม (S) ในระหว่างที่ทำการตอกเสาเข็ม มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formula) การที่ค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่างกันมากอาจไม่ใช่เนื่องมาจาก ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มต้นนั้นต่างกัน แต่อาจมาจากสาเหตุหลายประการด้วยกัน คือ

2.6.1 น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม และน้ำหนักของเสาเข็ม

ในการตอกเสาเข็ม โดยใช้ลูกตุ้มตอกแบบ Drop Hammer มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับน้ำหนักของลูกตุ้ม เพราะถ้าใช้น้ำหนักของลูกตุ้มตอกไม่เหมาะสมจะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่างกันไปมาก และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเสาเข็มได้ คือ ถ้าน้ำหนักของลูกตุ้มตอกมากเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม อาจทำให้เสาเข็มในช่วงกลางเสา และปลายล่างเสา เกิดความเสียหายได้ และค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็ม(S) จะมีค่ามาก ทำให้การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจากสูตรการตอกเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติ แต่ในทางตรงข้าม ถ้าใช้ลูกตุ้มตอกเสาเข็มเบาเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม จะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มจะมากกว่าที่เป็นจริง และถ้าใช้ลูกตุ้มตอกเสาเข็มเบาเกินไปแล้ว พยายามยกลูกตุ้มให้สูงเพื่อให้เสาเข็มจมลงไปถึงระดับที่ต้องการ อาจทำให้หัวเสาเข็มที่ลูกตุ้มกระทบเกิดความเสียหายได้

ดังนั้น การเลือกใช้น้ำหนักของลูกตุ้มที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม ที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มมาก

การหาน้ำหนักสูงสุดของลูกตุ้ม

จากข้อกำหนดของ Milligan ได้แนะนำให้ใช้น้ำหนักสูงสุดของลูกตุ้มตอกไว้ดังนี้

$$Wr\ max = \frac{0.0764\ A\ \sqrt{B}}{h}$$

กำหนดให้

Wr max = น้ำหนักสูงสุดของลูกตุ้ม, (ตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, ($ซม.^2$)

B = ความกว้างของหน้าตัดเสาเข็ม, (ซม.)

h = ระยะยกของลูกตุ้ม, (ซม.)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าน้ำหนักต่ำสุดของลูกตุ้มแนะนำโดย Humes

ความยาวของเสาเข็ม, (เมตร)	Wr min
< 15	Wp
15 - 18	3/4 Wp
> 18	2/3 Wp

กำหนดให้

Wr min = น้ำหนักต่ำสุดของลูกตุ้ม, (มีหน่วยเหมือน Wp)

Wp = น้ำหนักของเสาเข็ม

2.6.2 <u>อัตราเร็วของลูกตุ้มตอก</u>

พลังงานของลูกตุ้มตอกเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่ใช้ในการตอก โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ถ้าใช้อัตราเร็วในการตอกเสาเข็มมากจะทำให้พลังงานที่ถ่ายไปสู่เสาเข็มมาก และจะทำให้ระยะทรุดของเสาเข็มมีค่ามากตามไปด้วย อันอาจจะทำให้น้ำหนักบันทุกสูงสุดจากสูตรการตอกเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติได้

2.6.3 <u>มีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม</u>

สำหรับเสาเข็มที่ตอกใน Cohesive Soil ถ้ามีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม ทำให้การตอกเสาเข็มไม่ต่อเนื่องมีการหยุดพัก ทั้ง ๆ ที่ การตอกเสาเข็มลงไปยังไม่ถึงระดับที่ต้องการ เช่น ขณะที่ทำการตอกเสาเข็มแล้วเครื่องมือที่ใช้เกิดชัดข้อง การหยุดพักไปชั่วขณะนี้จะทำให้แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบ ๆ เสาเข็มเพิ่มขึ้น เมื่อเริ่มตอกเสาเข็มใหม่ จะทำให้ระยะทรุดของเสาเข็ม (s) ลดลงจากเดิมก่อนการหยุดตอกมาก ในกรณีนี้จะต้องทำการตอกเสาเข็มให้ลึกลงไปในดินสักระยะหนึ่งก่อน เพื่อทำลายแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบ ๆ เสาเข็มที่เกิดขึ้นในระหว่างหยุดการตอกเสาเข็มให้หมดไปเสียก่อน จึงจะเริ่มจดระยะทรุดตัวของเสาเข็ม (s) ใหม่ได้ ระยะที่ต้องตอกเสาเข็มลงไปใหม่นี้อาจอยู่ระหว่าง 2 - 3 นิ้ว จนถึงหลาย ๆ เมตร แต่โดยทั่วไปแล้วเราจะกำหนดให้ตอกเสาเข็มต่อลงไปอีกประมาณ 1.50 เมตร แล้วจึงทำการจดระยะทรุดตัวของเสาเข็มใหม่ได้

2.6.4 ที่รองหัวเสาเข็ม

ในระหว่างการตอกเสาเข็ม ลูกตุ้มที่ใช้ตอกจะต้อง กระทบกับที่รองหัวเสาเข็มก่อนทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญหายไปก่อนถึงตัวเสาเข็ม ดังนั้น ในระหว่างตอกเสาเข็มที่รองหัวเสาเข็มต้องอยู่ในสภาพดี และการจดค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็มไม่ควรทำทันทีหลังจากเปลี่ยนที่รองหัวเสาเข็มใหม่ ควรจะรอจนกระทั่งวัสดุที่ใช้รองหัวเสาเข็มอยู่ในสภาพเหมือนก่อนเปลี่ยนที่รองหัวเสาเข็มเสียก่อน

2.6.5 เสาส่ง

เสาส่ง คือ เสาที่ใช้สำหรับสวมหัวเสาเข็มแล้วตอกให้เสาเข็มจมลึกลงไปในดิน ในกรณีที่ต้องการให้ระดับหัวเสาเข็มอยู่ลึกลงไปจากระดับผิวดิน เสาส่งจะมีผลต่อระยะทรุดตัวของเสาเข็มคือ

1. จะทำให้น้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ทำให้เสาเข็มตอกลงไปได้ยากกว่าเดิม ระยะทรุดตัวของเสาเข็มจะลดน้อยลงไปจากเดิม

2. ถ้าเสาส่งสวมไม่พอดีกับหัวเสาเข็มจะทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไป และทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มลดน้อยลง

ดังนั้น เสาส่งที่ใช้ควรเป็นเสาท่อนเดียว และมีความแข็งแรงพอ การสวมเสาส่งกับหัวเสาเข็มต้องทำอย่างแน่นหนา เสาส่งควรทำด้วยเหล็ก ไม้เนื้อแข็ง หรือวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ทำให้พลังงานสูญเสียไปขณะตอก

2.7 หลักสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็ม

2.7.1 เส้นถดถอยแบบธรรมดา (Simple Linear Regression)

หลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิตินั้น ใช้หลักการของ เส้นถดถอยแบบธรรมดา (Simple Linear Regression) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัว ว่ามีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กันอย่างไร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตัวแบบ (Model) ของสมการ

$$Y = \beta X \qquad \text{.....(2.32)}$$

เมื่อ β = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ X

การหาค่า β ต้องอาศัยข้อมูล ของ Xi และ Yi เราจะได้ว่า

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i^2} \qquad \text{.....(2.33)}$$

2.7.2 การหาคุณภาพของเส้นถดถอยแบบธรรมดา (Simple Linear Regression)

เส้นถดถอยแบบธรรมดาจะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ของสมการ $Y = \beta X$ ได้ดีก็ต่อเมื่อ $\sum_{i=1}^{n} Y_i$ และ $\sum_{i=1}^{n} X_i$ มีค่าเท่ากัน เมื่อยกกำลังสองทั้งสองข้างจะได้ว่า $\sum_{i=1}^{n} Y_i^2$ และ $\sum_{i=1}^{n} X_i^2$ มีค่าเท่ากัน หรือ $\beta^2 \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{\sum_{i=1}^{n} Y_i^2}$ มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งค่า $\beta^2 \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{Y_i^2}$ นี้เราเรียกว่า Coefficient of Determination (R^2) จะได้ว่า

$$R^2 = \frac{\beta^2 \sum_{i=1}^{n} X_i^2}{\sum_{i=1}^{n} Y_i^2} \qquad \text{.....(2.34)}$$

เมื่อแทนค่า β ในสมการที่ (2) ลงไปจะได้ว่า

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} X_i^2 \sum_{i=1}^{n} Y_i^2} \qquad \text{.....(2.35)}$$

ค่าของ R^2 นี้ จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y คือ ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า X และ Y ตามสมการ $Y = \beta X$ มีความสัมพันธ์กันดี และค่าสูงสุดของ R^2 คือ 1