

1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

ฐานรากเสาเข็มเป็นโครงสร้างที่ใช้ถ่ายน้ำหนักจากอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ ลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่าเบื้องล่าง ทั้งยังทำให้การทรุดตัวลดลงจนไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างเมื่อเสาเข็มเริ่มบรรทุกน้ำหนักก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลง

ตามทิศทางของแรงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดินและเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นดินตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่นี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นดินไม่สามารถจะต้านทานได้ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง(ShearPlane)เปรียบได้เช่นเดียวกับวัสดุทางวิศวกรรมเมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำไปที่วัสดุวัสดุ นั้นก็จะเกิดความเครียดขึ้นในเนื้อวัสดุ

ซึ่งความเครียดนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงที่มากขึ้นจนกระทั่งวัสดุนั้นไม่สามารถต้านทานได้ ก็จะเกิดการบีบอัดเสาเข็มนั้นจะเกิดการบีบอัดในชั้นดินบริเวณโดยรอบผิวเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม การที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเมื่อได้รับแรงกระทำนั้น

มีรูปแบบของพฤติกรรมคล้ายกับความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุทางวิศวกรรมอื่น ๆ

1.1 พฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดิน

เสาเข็มเมื่อตอกหรือติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใดๆแล้วก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดิน เนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้วชั้นดินและเสาเข็มก็จะยังไม่มี การเคลื่อนที่

ต่อเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนเสาเข็มเสาเข็มก็จะเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรง ในขณะที่เดียวกันดินที่เกาะอยู่ข้าง ๆ ผิวเสาเข็มก็พยายามต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน

ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนที่ตามเสาเข็มลงไปด้วยการเคลื่อนที่นี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น

และในช่วงหลังจะเกิดการต้านทานที่ปลายเสาเข็มมาร่วมด้วยในลักษณะเดียวกับฐานแผ่ที่มีพื้นที่เท่าปลายเสาเข็มจนในที่สุด เมื่อชั้นดินไม่สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้

ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพังโดยรอบเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็มดังแสดงในภาพที่ 1

ทำให้มีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า “ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด ” (Ultimate Pile Capacity)

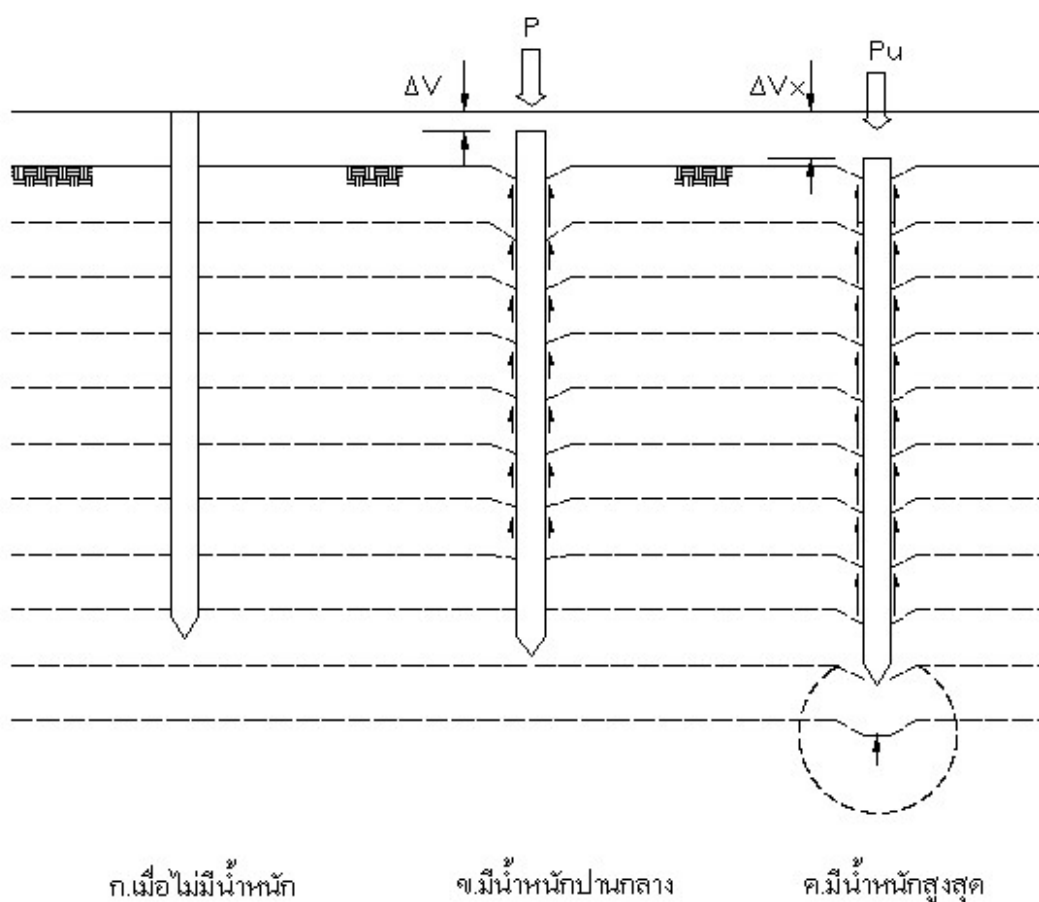
โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ที่มีสาเหตุจากคุณสมบัติทางด้านอีลาสติก มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการพัฒนากำลังของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ส่วนแรงต้านทานที่ปลาย (End Bearing) จะถูกพิจารณาเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ลงมากกว่า 10 % ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตอกและอาจถึง 30 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ

เนื่องจากเสาเข็มตอก สภาพดินที่ปลายเข็มจะถูกอัดตัวให้แน่นในกระบวนการตอกมากกว่ากระบวนการเจาะเสาเข็ม เพราะฉะนั้นเสาเข็มตอกจะเคลื่อนตัวน้อยกว่าเสาเข็มเจาะในการเคลื่อนตัวจนถึงจุดพิบัติ การที่เสาเข็มมี Skin Friction จนเต็มกำลัง จำเป็นที่จะต้องเกิดการเคลื่อนที่ลงระยะหนึ่ง

ซึ่งมีค่าน้อยเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ลงที่จะต้องใช้เพื่อพัฒนาจนถึงแรงต้านทานสูงสุดของ End Bearing หรือกล่าวได้ว่า Skin Friction จะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของ End Bearing และกำลังต้านทานของ Skin Friction เมื่อพัฒนาถึงค่าสูงสุดแล้วจะมีค่าค่อนข้างคงที่

แม้ว่าจะยังมีการเคลื่อนที่ลงของเสาเข็มอยู่อีก ยกเว้นในชั้น Stiff Clay อาจเกิดค่า Skin Friction ลดลงหลังจากที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลังไปจนถึงจุดสูงสุดแล้ว

เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานการถ่วงน้ำหนักจากเสาเข็มได้แล้วก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) โดยรอบผิวเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม โดยมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 1 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม

1.2 พฤติกรรมของแรงดูดลงของเสาเข็มในชั้นดินอ่อน (Negative Skin Friction)

เสาเข็มที่ติดตั้งผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนและปลายยังอยู่ในชั้นดินแข็ง

เมื่อมีการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนมากกว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มก็จะเกิดแรงดูดลงที่ถ่ายจากดินอ่อนมาบรรทุกเพิ่มบนเสาเข็มอีกส่วนหนึ่งด้วย ซึ่งเรียกว่า “ Negative Skin Friction ”

การทรุดตัวของชั้นดินอ่อนที่มากกว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มนี้ จะไม่เกิดขึ้นทันทีทันใด แต่จะเกิดขึ้นตามเวลานั่นคือเป็นการทรุดตัวแบบบีบตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement) และเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การถมดิน การลดลงของระดับน้ำใต้ดิน การตอกเสาเข็มผ่านดินอ่อนในบริเวณข้างเคียง เป็นต้น

ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนี้ เราจะทดสอบในช่วงระยะเวลาล้น ๆ

ภายหลังการตอกหรือติดตั้งแล้วไม่เกิน 30 วัน ดังนั้นการทรุดตัวของเสาเข็มจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ

กันและมากกว่าการทรุดตัวของชั้นดินรอบ ๆ เสาเข็ม จึงไม่มี Negative Skin Friction

มาเกี่ยวข้องขณะทดสอบเสาเข็ม แต่ในการใช้งานจริงเสาเข็มจะต้องถูกใช้งานในระยะเวลาานาน

ชั้นดินอ่อนอาจจะถูกแรงดูดลงเนื่องจากปัจจัยที่เป็นสาเหตุดังกล่าวข้างต้น

จึงอาจทำให้ชั้นดินอ่อนมีการเคลื่อนตัวที่มากกว่าเสาเข็มเกิดเป็นแรงดูดลงของเสาเข็ม

และต้องนำเอามาคิดเป็นน้ำหนักบรรทุกเพิ่มในเสาเข็มที่ออกแบบ

2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ฐานรากเสาเข็มเป็นโครงสร้างสำคัญที่จะต้องรับน้ำหนักจำนวนมาก

ดังนั้นจะต้องมีวิธีที่เหมาะสมในการคำนวณหาและตรวจสอบยืนยันค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ซึ่งได้แสดงวิธีต่าง ๆ ไว้ดังในภาพที่ 2 โดยสามารถจำแนกได้เป็น 3 วิธีหลัก ๆ ซึ่งแตกต่างกัน คือ

1. Static Method เป็นการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

โดยอาศัยคุณสมบัติทางด้านกำลังของชั้นดินที่อยู่โดยรอบ และที่ปลายของเสาเข็ม

เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบโดยเฉพาะเมื่อทราบลักษณะชั้นดินจากการเจาะสำรวจและทดสอบ

คุณสมบัติในบริเวณที่จะทำการตอกหรือติดตั้งเสาเข็ม

2. Dynamic Method การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากข้อมูลการตอกเสาเข็มนี้

นอกจากจะคำนวณแรงต้านทานการตอกเสาเข็มได้แล้ว

ในทางปฏิบัติยังเป็นการตรวจสอบว่าปลายของเสาเข็มยังลงถึงชั้นดินที่มีความแข็งแรงเพียงพอหรือไม่

โดยใช้กฎการตกกระทบของ Newton มาประยุกต์เพื่อหาแรงต้านทานของเสาเข็ม

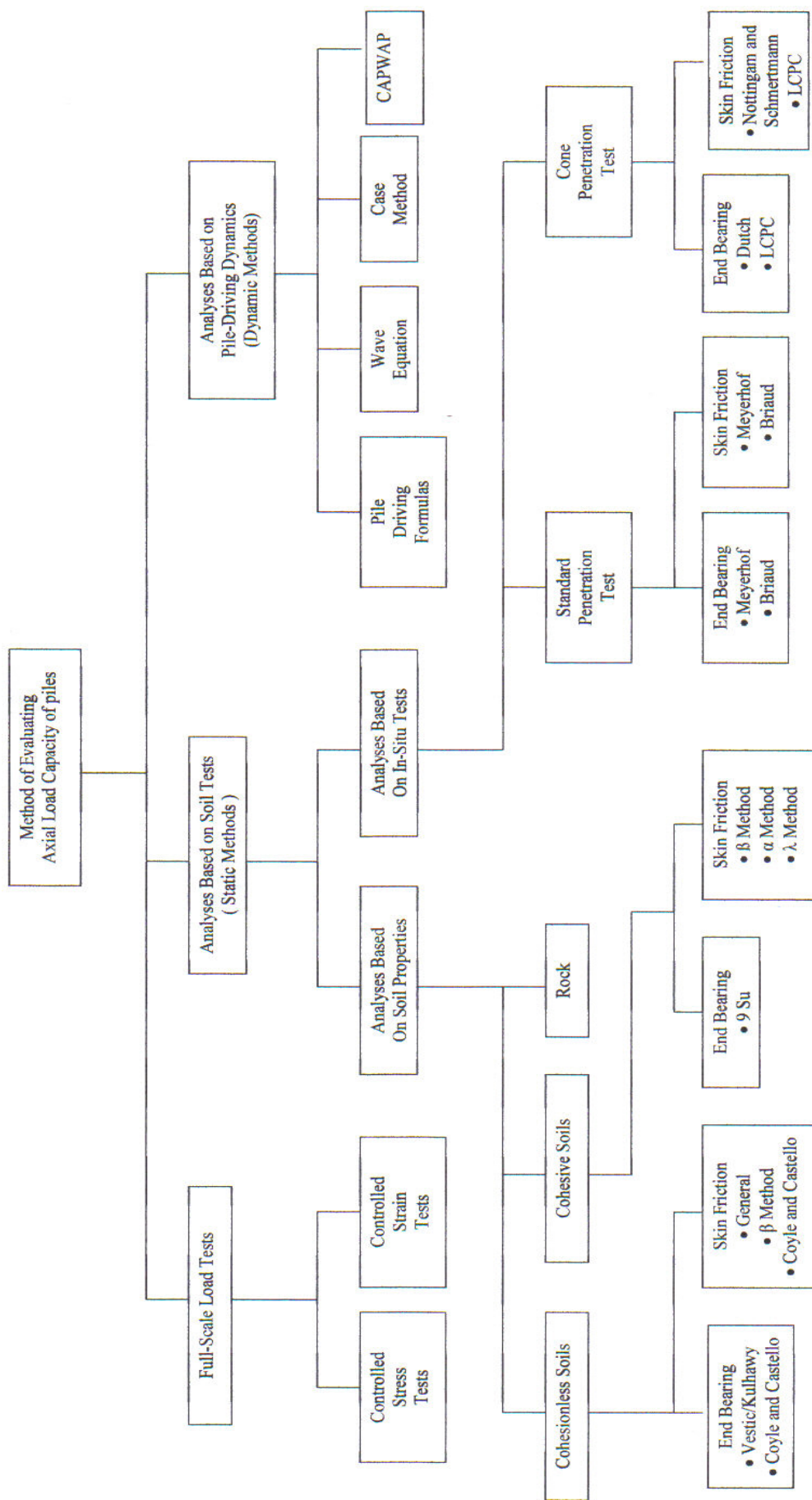
จากการปล่อยลูกตุ้มลงกระทบบนหัวเสาเข็ม จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานลงสู่เสาเข็ม

ทำให้เสาเข็มเคลื่อนที่ลงในชั้นดิน ซึ่งในทางปฏิบัติ

เป็นการยากที่จะทราบค่าที่แท้จริงของพลังงานที่สูญเสียไปขณะตอกเสาเข็ม

จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่วิธีนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

แต่ก็ยังมีความประโยชน์ในการตรวจสอบการตอกเสาเข็มร่วมไปกับการคำนวณโดยวิธีอื่น ๆ



แผนภูมิวิธีการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Donald P. Coduto, 1994)

3. การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงในสนามของเสาเข็ม

เป็นวิธีการหาลำดับรับน้ำหนักของเสาเข็มในสถานที่ก่อสร้างจริง โดยใช้น้ำหนักบรรทุกจริงลงบนเสาเข็ม และทำการวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ

เพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มแล้วทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เหมาะสมต่อไป

3 กรณีศึกษา การประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

โครงการก่อสร้างระบบถนนชุมชนเมืองใหม่แหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี มีงานก่อสร้างสะพาน คสล.

โดยใช้เสาเข็มคอนกรีต (Concrete Pile) จำนวน 80 ต้น

ซึ่งตามข้อกำหนดได้กำหนดให้เข็มแต่ละต้นสามารถรับน้ำหนัก (ULTIMATE BEARING CAPACITY OF PILE) ไม่น้อยกว่า 120 ตัน ดังนั้นในสนามจึงจำเป็นต้องทำการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้น ซึ่งวิธีการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มอาจทำได้หลายวิธีตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ดังเช่น.-

1. วิธี STATIC FORMULA ซึ่งอาศัยข้อมูลการสำรวจดินและใช้หลักการทฤษฎีของกลศาสตร์ดิน (Soil Mechanic)
วิธีนี้จะมีความยุ่งยากในการเจาะสำรวจชั้นดินและเสียค่าใช้จ่ายสูงในการเจาะสำรวจ เพื่อหาค่าความหนาแน่นของดินและค่า Shear Strength Parameters (γ , C , ϕ) ซึ่งมีการวิเคราะห์โดยใช้ทั้ง Total (undrain) และ Effective Parameter แต่จะใช้ Effective Parameters มากกว่าเพราะควบคุมทั้งความแข็งแรงของดินและการทรุดตัว
2. วิธี DYNAMIC FORMULA โดยประเมินน้ำหนักบรรทุกประลัยจากพลังงานหรือ Momentum ที่เครื่องมือตอกได้ถ่ายทอดให้แก่เสาเข็มเพื่อส่งลงสู่ดิน
3. วิธี PILE LOAD TEST เป็นการทดสอบน้ำหนักของเสาเข็มสภาพจริงในสนาม วิธีนี้เหมาะสำหรับเสาเข็มขนาดใหญ่ เช่น เสาเข็มเจาะและมีขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยาก ใช้เวลามากทั้งในการติดตั้งเครื่องมือและในขั้นตอนดำเนินการทดสอบ
4. วิธี PILE DRIVING ANALYSER (PDA) เป็นวิธีการที่ได้ติดตั้งเครื่องมือเพื่อใช้วัดหา PILE CAPACITY ซึ่งอาศัย Stress Wave Analysis เป็นพื้นฐาน โดยได้มีการติดตั้ง Strain Transducer (Strain Gauge) เพื่อวัดหาแรงและ Accelerometer วัดหาความเร็วที่บริเวณหัวเสาเข็ม ขณะที่มีการตอกเสาเข็มจะสามารถสังเกตคลื่นผ่านเสาเข็มโดย Oscilloscope และจะวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัย Computer Program เพื่อคำนวณค่า Pile Capacity วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นทั้งจากการติดตั้งเครื่องมือและการจัดหาอุปกรณ์ประกอบการทำงาน

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการประเมินการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกด้วยวิธี Dynamic Formula เป็นการใช้สูตรสำเร็จในการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการปฏิบัติ ไม่ยุ่งยากและใช้เวลาสั้น การใช้สูตรสำเร็จหาสภาพการรับน้ำหนักจากการตอกเสาเข็มนั้น มีสูตรที่ใช้กันแพร่หลายอยู่หลายสูตร ดังเช่นสูตรของ Hiley (1930), Modifier Engineering New Record (1965), Gates (1957), Danish Formula, Janbu (1953) แต่จากการทดสอบการใช้สูตรสำเร็จต่าง ๆ โดย Michigan Pile Test Program (88 piles) พบว่าสูตรสำเร็จของ Modified ENR ให้ผลที่เชื่อถือได้สำหรับน้ำหนักบรรทุกทั่วไป ส่วนของ Hiley, Janbu และ Gates ให้ความเบี่ยงเบนน้อยที่สุด (Poulos and Davis, 1980) นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้สูตร Modified ENR, Danish, Janbu และ Gates พบว่าผลจากการใช้สูตรสำเร็จของ Modified ENR จะมีความเชื่อถือได้สูงกว่าสูตรอื่น ซึ่งแสดงในภาพที่ 4 ดังนั้นโครงการนี้จึงใช้สูตรของ Modified ENR เป็นเกณฑ์ในการประเมินสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม การตอกเสาเข็มสามารถปฏิบัติการได้หลายวิธี อาทิเช่น Drop Hammer, Diesel Hammer, Steam Hammer, Vibratory Hammer และ Hydraulic Hammer ในที่นี้ได้เลือกวิธี Drop Hammer (Rope and Friction Winch) ในการตอกเสาเข็มหน้างาน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปเพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยและบำรุงรักษาง่าย เหมาะกับงานตอกเสาเข็มที่มีปริมาณไม่มาก การตอกเข็มนั้นน้ำหนักของตุ้มจะต้องสอดคล้องกับเสาเข็มและสภาพพื้นที่ กล่าวคือจะต้องใช้พลังงานของการส่งเข็มลงไปในดินอย่างมีประสิทธิภาพ อันไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเข็มและให้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเบี่ยงเบนจากความเป็นจริงน้อยที่สุด จึงได้กำหนดขนาดของลูกตุ้มและระยะยกของลูกตุ้มสูงจากหัวเข็มเพื่อให้ผู้รับจ้างถือปฏิบัติในการตอก โดยใช้เกณฑ์กำหนดดังนี้

$$W_{max} = 0.0764 * (A\sqrt{B}) / H$$

W_{max} = น.น. สูงสุดของลูกตุ้ม, ตัน H = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเข็ม, ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, ตร.ซม. B = ความกว้างของหน้าตัดเสาเข็ม, ซม.

ระยะตกกระทบของลูกตุ้ม

เสาเข็มขนาดเล็ก จะใช้ระยะยก = 30 - 50 ซม.

เสาเข็มขนาดกลาง จะใช้ระยะยก = 50 - 80 ซม.

เสาเข็มขนาดใหญ่ จะใช้ระยะยก = 80 - 120 ซม.

และได้กำหนดน้ำหนักต่ำสุดของลูกตุ้มที่จะนำมาใช้งานดังนี้

เสาเข็มยาวไม่เกิน 15 เมตร

ใช้ลูกตุ้มหนักเท่ากับน้ำหนักของเสาเข็ม

เสาเข็มยาวตั้งแต่ 15 เมตร ถึง 18 เมตร

ใช้ลูกตุ้มหนัก 0.75 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม

เสาเข็มยาวกว่า 18 เมตร

ใช้ลูกตุ้มหนัก 0.67 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม

ในการพิจารณาประเมินสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มว่าจะใช้วิธีใดนั้น

ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ควบคุมงานที่จะต้องพิจารณาให้รอบคอบด้วยความระมัดระวังและคำนึงถึงสภาพดินด้วย เมื่อได้ตรวจสอบสภาพดิน ณ สถานที่ก่อสร้างสะพานโครงการฯ แล้วพบว่าเป็นดินประเภท Coarse-Grained Soil ดังนั้นการใช้สูตรสำเร็จโดยวิธี Dynamic Formula

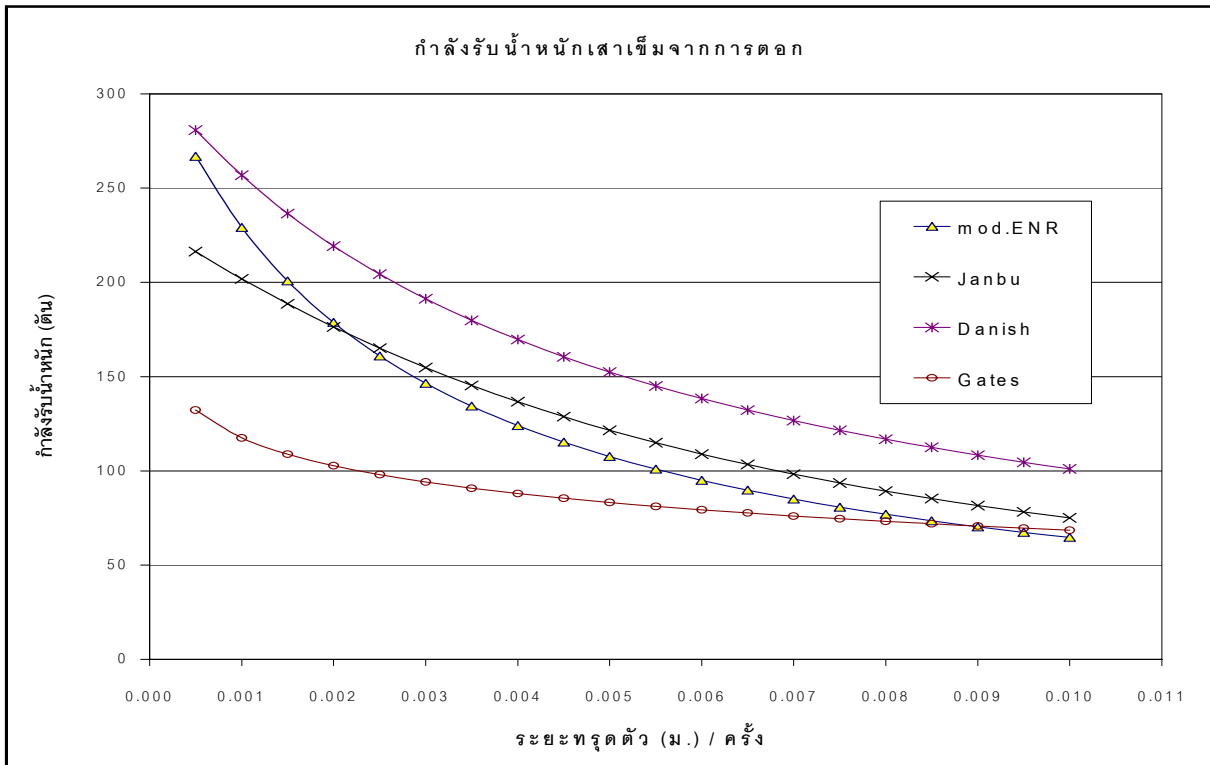
จึงมีความเหมาะสมเพราะความแข็งแรงของดินไม่ขึ้นอยู่กับการระบายของน้ำในดินหรืออัตราการกระทำของแรง แต่วิธีนี้จะไม่เหมาะกับดินเหนียวเพราะดินเหนียวมีแรงเสียดทานแปรตาม Thixotropic Effect

และแรงต้านทานส่วนปลายขึ้นอยู่กับ Excess Pore Water Pressure และไม่ควรรใช้วิธี Dynamic formula กับงานเข็มขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่



ภาพที่ 3 การตอกเสาเข็ม ต้องตรวจสอบแนวดิ่งของเสาเข็ม คุณภาพของเสาเข็ม

และทำการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้น



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกับระยะการทุรตุตตัว โดยใช้สูตรสำเร็จ



ภาพที่ 5 การตรวจสอบการทุรตุตตัวเฉลี่ยของเสาเข็ม เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุก
โดยวิธี Dynamic Formula

4 สูตรสำเร็จที่นิยมใช้ในการประเมินกำลังเสาเข็ม

1 MODIFIER ENR. $P_u = e_h * E_h * (W_r + n^2 * W_p) / ((S + C) * (W_r + W_p))$

2 JANBU $P_u = e_h * E_h / (k_u * S)$

3 DANISH $P_u = e_h * E_h / (S + c_1)$

4 GATES $P_u = 40 * \text{LOG}(1/4 * S) * \text{SQRT}(e_h * E_h)$

5 Hiley $P_u = (W_h Z / s + 0.01 c / 2) * ((W + n^2 w) / (W + w))$

โดยที่

P_u = ultimate pile capacity (ton)

e_h = ประสิทธิภาพของการใช้ลูกตุ้มและการควบคุม
drop hammer (rope & friction) , $e_h = 0.75$

E_h = พลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม(drop hammer , $E_h = W_r * h$)

W_r = น้ำหนักลูกตุ้ม(ton)

h = ระยะความสูงที่ปล่อยให้ลูกตุ้มตกอิสระ (m.)

W_p = น้ำหนักเสาเข็ม(ton)

n = coefficient of restitution between ram and pile cap
กรณีเข็มคสล. ใช้ไม้รองรับบนหัวเข็ม ค่า สปส. $n = 0.25$

S = ระยะเสาเข็มจมเฉลี่ย ต่อครั้ง(m.)

C = สปส. การสูญเสียพลังงาน = 0.00254 m.

c_1 = $\text{SQRT}(e_h * E_h * L / (2 * A * E))$

L = ความยาวเสาเข็ม(m.)

A = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม(m^2)

E = modulus of elasticity of pile (ton/m^2)

cd = $0.75 + 0.15 * W_r / W_p$

y = $e_h * E_h * L / (A * E * S^2)$

k_u = $cd(1 + \text{SQRT}(1 + y/cd))$

5 คอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อประเมินกำลังเสาเข็มตอก

5.1 ตัวอย่างแสดงการใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมในการคำนวณกำลังของเสาเข็ม สำหรับสูตรสำเร็จ
 Modifier Engineering New Record (1965), Gates (1957), Danish Formula, Janbu
 (1953)

ตารางประเมินสภาพการรับน้ำหนักสำหรับเข็มขนาด 0.40*0.40 ม. ยาว 12.00 ม.

น้ำหนักตุ้ม = 4 tons , ระยะยก: 0.5 เมตร

ค่าคงที่ของสูตร	S=ค่าทรุดตัวเฉลี่ย / 1 ครั้ง			ULT. PILE CAPA. (TONS)			
	S(m.)/1	y=(m.)	ku=(m.)	ENR	Janbu	Danish	Gates
eh= 0.75	0.0005	225.00	15.36	246	195	258	132
Wr= 4 ton	0.0010	56.25	8.19	211	183	238	117
h= 0.5 m.	0.0015	25.00	5.81	185	172	220	109
Eh= 2 ton-m.	0.0020	14.06	4.64	165	162	205	103
L= 12 m.	0.0025	9.00	3.95	148	152	192	98
A= 0.16 m ²	0.0030	6.25	3.50	135	143	181	94
E= 2000000 ton/m ²	0.0035	4.59	3.18	124	135	170	91
Wp= 4.608 ton	0.0040	3.52	2.95	114	127	161	88
n= 0.25	0.0045	2.78	2.77	106	120	153	85
	0.0050	2.25	2.63	99	114	146	83
	0.0055	1.86	2.53	93	108	139	81
C= 0.00254 m.	0.0060	1.56	2.44	87	103	133	79
c1= 0.00530 m.	0.0065	1.33	2.37	83	98	127	78
cd= 0.92280	0.0070	1.15	2.31	78	93	122	76
	0.0075	1.00	2.25	74	89	117	75
	0.0080	0.88	2.21	71	85	113	73
	0.0085	0.78	2.18	68	81	109	72
	0.0090	0.69	2.14	65	78	105	71
	0.0095	0.62	2.12	62	75	101	70
	0.0100	0.56	2.09	60	72	98	68
FACTOR OF SAFETY				3 to 6	3 to 6	3 to 6	3

5.2 ตัวอย่างแสดงการใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมในการคำนวณกำลังของเสาเข็ม

สำหรับสูตรสำเร็จ Hilley (1930)

เสาเข็มขนาด	0.40 * 0.40 เมตร	ยาว (L)	21.00 เมตร
น้ำหนักตุ้ม (W)	4.50 ตัน	ระยะยก(h)	120 ซม.
พท.หน้าตัดเสาเข็ม (A)	1,600.00 ตร.ซม.	F.S.=	3
น้ำหนักของเสาเข็ม (P)	8.064 ตัน	L ₂ =	10 ซม.
Q _a	50 ตัน		

S/ครึ่ง(ซม.)	Q _u	e	Z	C/2	C ₁	C ₂	C ₃
0.26	150	0.398	0.8	0.8859	0.0169	1.418	0.338

$$Q_u = (WhZ/s + 0.01c/2) * ((W + n^2 w) / (W + w))$$

Q_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม (ULTIMATE PILE CAPACITY) (ton)

Q_a = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (ALLOWABLE PILE CAPACITY) = Q_u / FS (ton)

$$e = \text{Efficiency factor} = (W + Pr^2) / (W + P)$$

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม (ton)

w = น้ำหนักของเสาเข็ม (ton)

r = Coefficient of restitution = 0.25

h = ระยะยกลูกตุ้มจากหัวเสาเข็ม (cm.)

Z = Equipment Loss Factor

= 1 สำหรับ Falling hammer

= 0.80 สำหรับ Drop Hammer with Friction winch

S = ระยะที่เสาเข็มจมเป็นเซนติเมตร โดยคิดค่าเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

C = Temporary Compression = C₁ + C₂ + C₃

C₁ = การยุบตัวของกระสอบรองหัวเสาเข็มหนา L₂ (ม.) = (1.8*Q_u*L₂) / A (cm.)

C₂ = การยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยาว L (ม.) = (0.72*Q_u*L) / A (cm.)

C₃ = การยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม = (3.60*Q_u) / A (cm.)

A = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (cm.²)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวได้บรรจุไว้ในแผ่น CD ที่แนบพร้อมนี้ หรือสามารถ download ได้ที่

Hwww.geocities.com/parkpoomi/
