

บทที่ 2

พื้นฐานและภูมิหลังการวิจัย

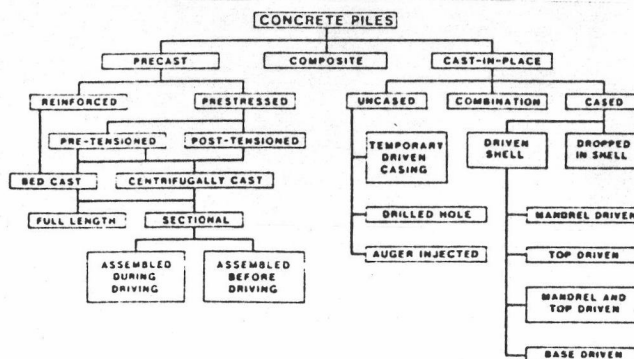
2.1 เสาเข็มคอนกรีตชนิดตอก

เสาเข็มคอนกรีตชนิดตอกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (REINFORCED CONCRETE PILES)
2. เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (PRESTRESSED CONCRETE PILES)

เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถผลิตได้ที่หน่วยงานก่อสร้างหรือโรงงาน ลักษณะมักเป็นท่อนตัน รูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, กลมหรือแปดเหลี่ยม ฯลฯ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมักจะผลิตที่โรงงานเป็นส่วนใหญ่ รูปหน้าตัดนอกจากจะทำได้เช่นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาแล้วยังสามารถผลิตชนิดที่มีรูตรงกลางตลอดความยาวเสาเข็ม หรือชนิดมีปลายข้างหนึ่งเป็นท่อนตันก็ได้ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามวิธีการอัดแรงอีก นั่นคือ ชนิดอัดแรงก่อนหล่อคอนกรีต (PRETENSIONED) และชนิดอัดแรงหลังจากหล่อคอนกรีตแล้ว (POSTTENSIONED) วิธีการหล่อคอนกรีตสามารถหล่อเป็นแพ (BEDCAST) หล่อในแนวตั้ง (VERTICALLY CAST) หรือหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยง (CENTRIFUGALLY CAST)

เสาเข็มคอนกรีตสามารถผลิตเต็มความยาวที่ออกแบบหรือผลิตเป็นส่วน ๆ แล้วนำมาต่อกัน โดยจะต้องระหว่งการตอกหรือก่อนการตอกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องตอกและผู้ออกแบบระบบโครงสร้าง วิธีการต่อเสาเข็มคอนกรีตในต่างประเทศมีหลายวิธี แล้วแต่บริษัทผู้ผลิตเสาเข็มในประเทศไทย โดยเฉพาะเสาเข็มในดินอ่อนกรุงเทพฯ จะใช้วิธีต่อเสาเข็มโดยการเชื่อมด้วยไฟฟ้า โดยเสาเข็มท่อนที่จะนำมาต่อกันนั้น จะต้องฝังแผ่นเหล็กไว้ที่หัวเสาเข็มด้านที่จะนำมาต่อกัน โดยปกติมักจะต่อระหว่งการตอกเสาเข็ม



รูปที่ 2.1.1 ชนิดของเสาเข็มคอนกรีตชนิดตอก

เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่ผลิตและใช้กันโดยทั่วไปในบริเวณดินเหนียวกรุงเทพฯ นั้น มีหน้าตัดรูปตัว I, DOUBLEHALF MOON, หน้าตัดกลมมีรูตรงกลาง, สี่เหลี่ยมตันและสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลาง โดยมีความยาวตั้งแต่ 7 เมตร ถึง 30 เมตร

2.2 เครื่องมือตอกเสาเข็มและอุปกรณ์

เครื่องมือตอกเสาเข็มมีดังนี้

1. DROP HAMMERS
2. SINGLE-ACTING STEAM HAMMERS
AIR HAMMERS
3. DOUBLE-ACTING STEAM HAMMERS
4. DIFFERENTIAL STEAM HAMMERS
AIR HAMMERS
HYDRAULIC HAMMERS
5. DIESEL HAMMERS
SINGLE-ACTING (OPEN-TOP)
DOUBLE-ACTING (CLOSED-TOP)
6. VIBROTORY DRIVER
LOW-FREQUENCY
HIGH-FREQUENCY

นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือตอกเสาเข็มชนิดพิเศษซึ่งออกแบบมาใช้เฉพาะงาน ดังนี้

7. LINEAR OSCILLATORS
HYDRAULIC
ELECTROHYDRAULIC
8. VIBRATORY-IMPACT HAMMERS
9. AIR-GUN HAMMERS
UNDERWATER
BOUNCER

สำหรับรายละเอียดเครื่องตอกเสาเข็มที่ใช้กันโดยทั่วไปมี ดังนี้

DROP HAMMER

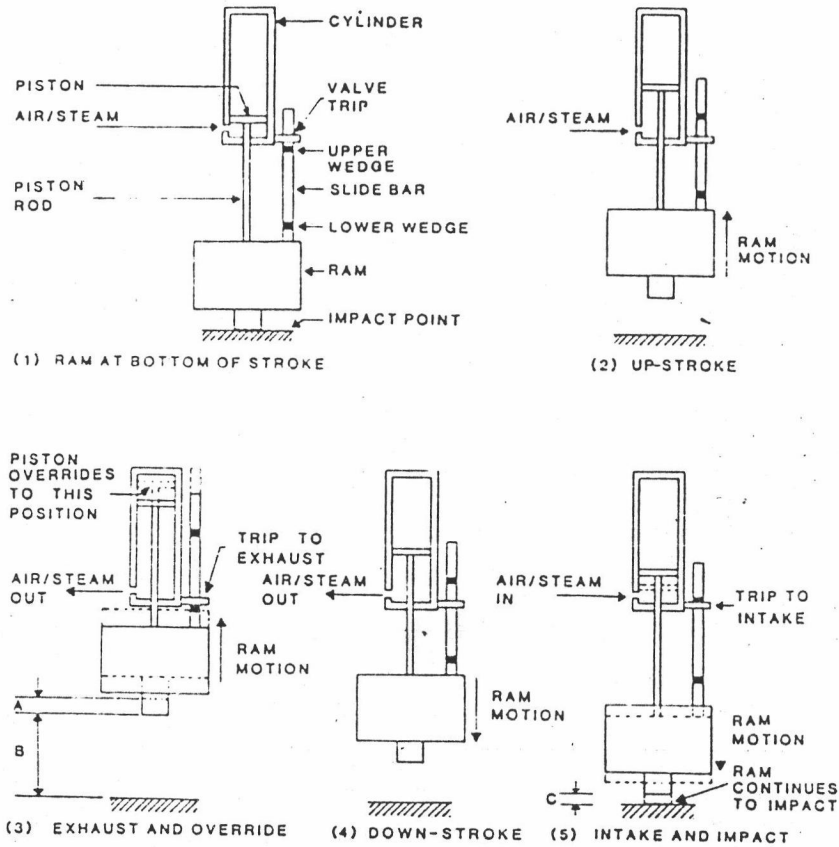
DROP HAMMER เป็นเครื่องตอกเสาเข็มที่ใช้กันมาแต่โบราณและมีลักษณะง่ายที่สุด พลังงานที่ใช้ตอกเสาเข็ม ได้จากการยกตุ้มน้ำหนักขึ้นด้วยลวดสลิง แล้วปล่อยให้ตกลงมา ตอกเสาเข็มโดยการคลายก้านที่ยกตุ้มน้ำหนักขึ้น ในการทำงานจะต้องมีโครงเหล็กซึ่ง เรียกทั่วไปว่าปั้นจั่น เป็นโครงสำหรับห้อยและฐานสำหรับ เครื่องจักรที่จะยกตุ้ม ลูกตุ้มมีขนาดตั้งแต่ 0.5 ตันถึง 10 ตัน ความสูงของปั้นจั่นตั้งแต่ 6-30 เมตร ระยะยก ของตุ้มน้ำหนักจะแปรเปลี่ยนไปตามความยากง่ายของการตอก และชนิดของเสาเข็มที่จะ ตอก

SINGLE ACTING HAMMER

เป็นเครื่องตอกเสาเข็มซึ่งพลังงานที่ใช้ตอกได้จากความดันของอากาศ (COMPRESSED AIR) หรือไอน้ำ (STEAM) ยกตุ้มขึ้นแล้วปล่อยให้ตกลงมาตอกเสาเข็ม ความดันของอากาศหรือไอน้ำจะถูกอัดเข้าด้านล่างของกระบอกสูบซึ่งต่อติดกับลูกตุ้ม เมื่อ ลูกสูบถูกอัดจนยกตัวสูงถึงระดับหนึ่ง (STROKE) ไอน้ำหรืออากาศที่อัดเข้าไปจะถูกปล่อย ออก ทำให้ลูกตุ้มตกลงมาตอกเสาเข็ม ไอน้ำหรืออากาศก็จะถูกอัดเข้าไปยกลูกสูบใหม่ วน เวียนเช่นนี้ตลอดไป ดังรูปที่ 2.2.1

ลักษณะโครงนอกของ SINGLE ACTING HAMMER อาจจะเป็นชนิดเปิดโล่ง (OPEN) หรือปิดทึบ (ENCLOSED) ซึ่งชนิดที่โครงนอกปิดทึบนี้สามารถใช้ตอกเสาเข็มใน น้ำได้

พลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็มสามารถปรับให้มากหรือน้อยได้โดยการปรับความดัน ของไอน้ำหรืออากาศที่อัดเข้าไป ลูกตุ้มของ SINGLE ACTING HAMMER จะมีน้ำหนักมาก ในขณะที่ความเร็วของลูกตุ้มมักมีค่าน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระยะยกที่ไม่สูงนัก



2.2.1 ลักษณะการทำงานของ SINGLE ACTING HAMMER

DOUBLE-ACTING STEAM HAMMER

เป็นเครื่องตอกเสาเข็มซึ่งปกติกำลังที่ใช้ยกลูกตุ้มน้ำหนักได้จากอากาศ แต่ก็สามารถที่จะใช้น้ำได้เช่นกัน การอัดอากาศจะอัดทั้งส่วนบนและล่างของกระบอกสูบ โดยในช่วงยกลูกสูบขึ้นจะอัดอากาศในส่วนล่างของกระบอกสูบ เมื่อลูกตุ้มตกลงก็จะอัดอากาศในส่วนบนของกระบอกสูบ เพื่อช่วยเร่งให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่ลงเร็วขึ้น โดยปกติลูกตุ้มของ DOUBLE-ACTING STEAM HAMMER จะมีน้ำหนักเบาว่า SINGLE-ACTING หรือ DIFFERENTIAL HAMMER แต่จะมีความเร็วมากกว่า ฉะนั้นในการตอกเสาเข็มที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก การใช้เครื่องตอกเสาเข็มชนิดนี้ตอกมักจะได้ผลดีกว่า DOUBLE-ACTING STEAM HAMMER เหมาะสำหรับตอกเสาเข็มที่มีน้ำหนักเบาถึงน้ำหนักปานกลางมากกว่า

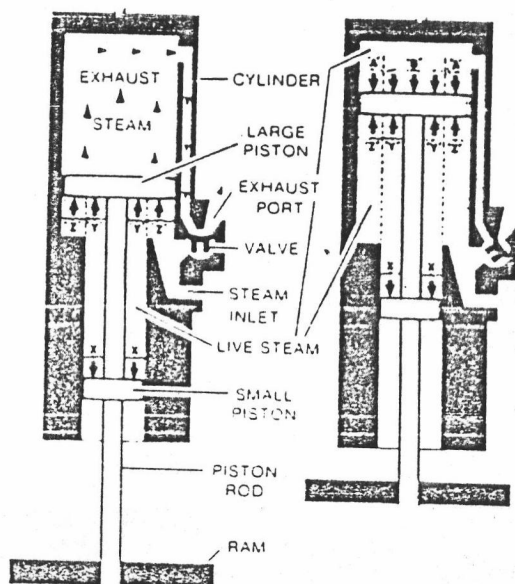
DIFFERENTIAL HAMMER

โดยปกติกำลังที่ใช้ในการยกลูกค้อนน้ำหนักได้จากไอน้ำและอากาศ แต่ก็สามารถออกแบบให้ใช้ความดันจาก HYDRAULIC FLUID ได้เช่นกัน

ไอน้ำ, อากาศ และ HYDRAULIC FLUID จะใช้ทั้งในการยกลูกค้อนและเร่งลูกค้อนขณะเคลื่อนที่ตกลง

ลักษณะการทำงานของ DIFFERENTIAL HAMMER สามารถอธิบายได้ ดังรูปที่

2.2.2

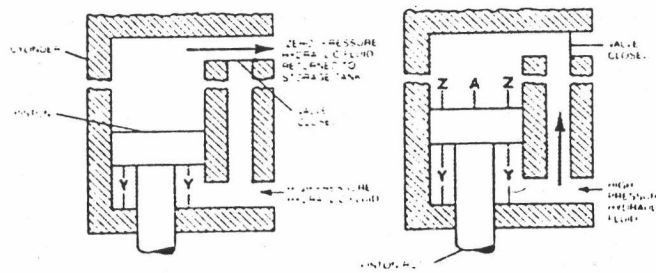


รูปที่ 2.2.2 ลักษณะการทำงานของ DIFFERENTIAL AIR หรือ STEAM HAMMER

ในช่วงยกลูกสูบขึ้น แรงดันจากไอน้ำหรืออากาศกระทำบนพื้นที่ XX บนลูกสูบส่วนล่าง ซึ่งแรงนี้จะถูกทำให้สมดุลย์โดยแรง YY พื้นที่ที่เหลืออยู่ของลูกสูบส่วนบนจะมีแรง ZZ มากระทำ ซึ่งแรงนี้จะยกลูกสูบขึ้นทำให้ลูกค้อนซึ่งต่อเชื่อมกับลูกสูบก็จะถูกยกขึ้นไปด้วย สำหรับไอน้ำหรืออากาศที่อยู่บนลูกสูบซึ่งจะใช้ในช่วงดันลูกสูบลงจะถูกปล่อยไล่ออกไป

ในช่วงอัดลูกสูบลงแรงดันจากไอน้ำหรืออากาศที่กระทำบนพื้นที่ XX จะสมดุลย์กับแรงดันบนพื้นที่ YY แรงดัน ZZ จะสมดุลย์กับแรงดัน AA แรงดัน B ที่เหลืออยู่จะเป็นแรงที่ดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ลงเร่งความเร็วของลูกค้อนซึ่งจะตกลงตอกเสาเข็ม

กรณีนี้ DIFFERENTIAL HAMMER ใช้ความดันจาก HYDRAULIC FLUID ลักษณะการทำงานจะเป็น เช่นรูปที่ 2.2.3



รูปที่ 2.2.3 ลักษณะการทำงานของ DIFFERENTIAL HYDRAULIC HAMMER

ในช่วงยกลูกสูงขึ้น แรงไฮดรอลิค YY จะดันลูกสูบขึ้น

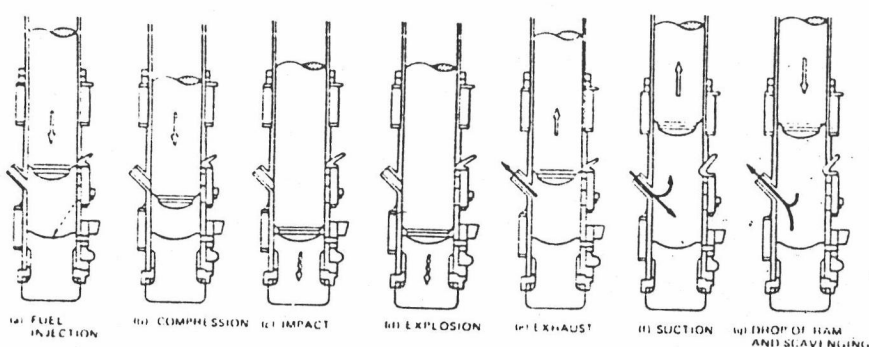
ในช่วงอัดลูกสูบลง แรงไฮดรอลิค YY จะสมดุลกับแรง ZZ แรง A ที่เหลือออกก็จะดันให้ลูกสูบลง

DIFFERENTIAL HAMMER ได้สร้างขึ้นโดยรวมข้อดีของ SINGLE-ACTING และ DOUBLE-ACTING HAMMER คือ ลูกคัมมีน้ำหนักมากและระยะยกของลูกคัมน้อย ซึ่งเป็นลักษณะของ SINGLE-ACTING HAMMER ขณะเดียวกันความเร็วของลูกคัมที่ตอกเสาเข็มมีความเร็วมาก ซึ่งเป็นลักษณะของ DOUBLE-ACTING HAMMER

DIESEL HAMMER

เป็นเครื่องตอกเสาเข็มที่สามารถทำงานได้ด้วยตนเอง ไม่ต้องอาศัย แหล่งพลังงานจากภายนอก เช่น หม้อต้มน้ำ หรือ เครื่องอัดอากาศขณะทำงาน เพราะในตัวเครื่องตอกชนิดนี้ จะประกอบไปด้วยโครงกระบอก, ลูกคัมน้ำหนัก, ระบบน้ำมันเชื้อเพลิง และหล่อลื่นอยู่พร้อมในตัวเสร็จ เมื่อจะเริ่มทำงาน หลังจากที่ได้ยกเครื่องตอกนี้ตั้งบนหัวเสาเข็มแล้ว เราจะต้องยกเฉพาะลูกคัมน้ำหนักขึ้นจนสุดระยะยก แล้วปล่อยให้ตกลง ขณะที่ลูกคัม เคลื่อนที่ลงน้ำมันจะปิดช่องสำหรับอากาศ เข้าพร้อมกับแรงให้ เครื่องสูบน้ำมันเชื้อ-

เพลิงฉีดน้ำมัน เข้าในช่องสันดาป ลูกตุ้มยังคงเคลื่อนที่ลงและอัดอากาศจนร้อน เมื่อลูกตุ้มตกกระทบหัวเสา เข็มก็จะตอกให้เสาเข็มจมลง ขณะเดียวกันอากาศที่อัดจนร้อนผสมกับน้ำมัน เชื้อเพลิงที่ฉีดเข้ามา เกิดการสันดาประเบิดขึ้น ดันให้ลูกตุ้มยกตัวขึ้นไป เมื่อลูกตุ้มลอยขึ้นจนสุดระยะก็จะตกลงมาอัดอากาศและตอกเสาเข็ม แล้วการสันดาปที่เกิดขึ้นก็จะดันให้ลูกตุ้มลอยตัวขึ้นไปอีก วนเวียนอยู่เช่นนี้ ดังรูปที่ 2.2.4



รูปที่ 2.2.4 ลักษณะการทำงานของ DIESEL HAMMER

DIESEL HAMMER ที่ใช้กันโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ SINGLE-ACTING และ DOUBLE-ACTING ในแบบ SINGLE-ACTING ปลายด้านบนของโครงกระบอกจะเปิดไว้ ฉะนั้น เมื่อเกิดการสันดาประเบิดขึ้นลูกตุ้มจึงลอยตัวได้สูงอย่างอิสระ สำหรับแบบ DOUBLE-ACTING นั้น ปลายด้านบนของโครงกระบอกจะปิด ฉะนั้น เมื่อลูกตุ้มลอยตัวขึ้น เมื่อเกิดการสันดาปแล้ว ก็จะไปอัดอากาศที่อยู่ส่วนบนของลูกตุ้ม เมื่อลูกตุ้มลอยตัวสูงสุดแล้วตกลงมาอากาศที่ถูกอัดก็จะขยายตัวช่วยดันให้ลูกตุ้มมีความเร็วเพิ่มขึ้น

VIBRATORY DRIVER

เป็นเครื่องตอกเสาเข็มที่ใช้แรงไดนามิกจากการหมุนเยื้องศูนย์กลางของแท่งน้ำหนัก แรงในทางราบจะหักล้างกันเอง ส่วนในทางตั้งนั้นแรงเยื้องศูนย์กลางจากแท่งน้ำหนักจะเสริมกัน ในการตอกเครื่องตอกจะต้องติดแน่นกับเสาเข็ม ทั้งนี้ เพื่อให้การถ่ายแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องตอกไปยังเสาเข็ม เป็นไปอย่างสมบูรณ์มีประสิทธิภาพ เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ

ของ VIBRATORY DRIVER ได้โดยเพิ่มน้ำหนักให้ส่วนที่ไม่มีการสั่นสะเทือน (SPRUNG WEIGHT)

ส่วนใหญ่ VIBRATORY DRIVER เป็นชนิด LOW-FREQUENCY ซึ่งมีความถี่ของการสั่นประมาณ 0-2000 รอบต่อนาที แหล่งพลังงานที่ให้แก OSCILLATOR ได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้า หรือไฮดรอลิค สำหรับ VIBRATORY DRIVER ชนิด HIGH-FREQUENCY นั้น จะมีความถี่ประมาณ 4800-7200 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้เกิด RESONANT ในเสาเข็ม แหล่งพลังงานที่จ่ายให้แก OSCILLATOR ชนิดนี้คือ เครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายใน VIBRATORY DRIVER เหมาะสำหรับการใช้ตอกเสาเข็มที่ไม่แทนที่ดินมากนัก เช่น เสาเข็มที่มีหน้าตัดแบน, STEEL SHEET PILE

สำหรับในประเทศไทย เครื่องตอกเสาเข็มที่มักใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ DROP HAMMER, DIESEL HAMMER ชนิด SINGLE-ACTING ส่วน VIBRATORY DRIVER นั้น มักใช้ในการตอก SHEET PILE

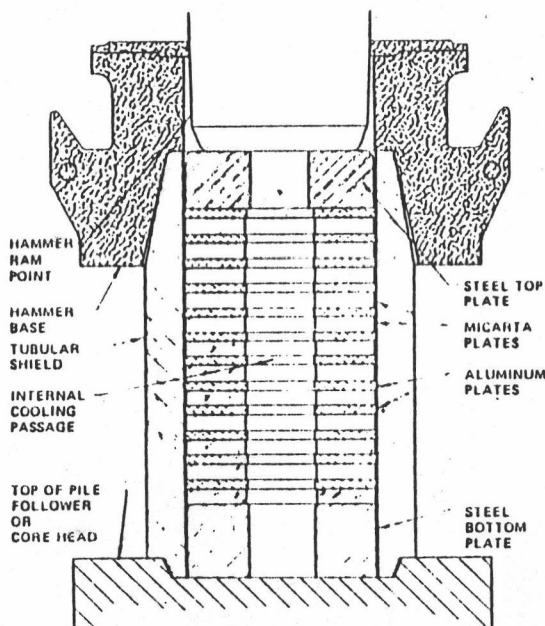
อุปกรณ์ใช้ร่วมกับการตอกเสาเข็ม

อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับการตอกเสาเข็มได้แก่

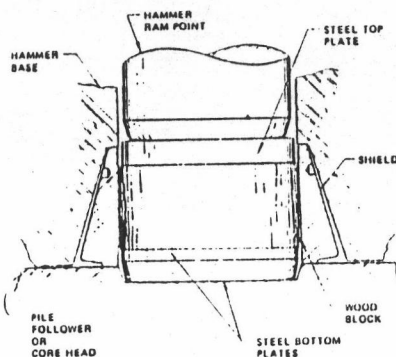
1. CAP BLOCK หรือ HAMMER CUSHION
2. HELMET หรือ DRIVE CAP หรือ DRIVE HEAD ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าหมวกครอบหัวเข็ม
3. CUSHION หรือ PILE CUSHION หรือเรียกทั่วไปว่า หมอนรองหัวเข็ม
4. FOLLOWER หรือ เสาส่ง

CAP BLOCK หรือ HAMMER CUSHION

CAP BLOCK จะอยู่ระหว่างลูกตุ้มตอกเสาเข็มกับหมวกครอบหัวเข็ม (HELMET) จุดประสงค์เพื่อลดแรงที่เกิดขึ้นขณะตอกเสาเข็ม ป้องกันการเสียหายของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม และหัวเสาเข็มเอง แต่ CAP BLOCK ก็จะต้องสามารถส่งถ่ายพลังงานจากลูกตุ้มตอกเสาเข็มไปยังเสาเข็มได้ดี ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่น (ELASTIC PROPERTY) ของวัสดุที่นำมาทำ CAP BLOCK ในปัจจุบัน CAP BLOCK จะทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมใส่เป็นชั้นสลับกับแผ่น MICARTA หรือวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ดังรูปที่ 2.2.5 นอกจากนี้ยังสามารถทำด้วยวัสดุอื่น ๆ อีก เช่น ASBESTOS หรือเส้นลวดดัก เป็นต้น



รูปที่ 2.2.5 ลักษณะของ CAP BLOCK ที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมใส่สลับกับแผ่น MICARTA



รูปที่ 2.2.6 ลักษณะของ CAP BLOCK ที่ทำด้วยไม้

015294

ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้ CAP BLOCK เป็นไม้ หากเครื่องตอกเสาเข็มเป็น DIESEL HAMMER ผู้รับเหมาตอกเสาเข็มมักจะสั่งไม้แผ่นหนาประมาณ 10 ซม. ตัดเป็นรูปครึ่งวงกลม 2 ซีก ส่วนใหญ่เป็นไม้เนื้อแข็ง ชนิดของไม้ไม่แน่นอนมาใช้เป็น CAP BLOCK ในกรณีที่เครื่องตอกเป็น DROP HAMMER และหมวกครอบหัวมีร่อง คนงานตอกเสาเข็มมักจะตัดไม้หมอนที่ใช้รองฐานป็นจันตอกเสาเข็มหนาประมาณ 10 ซม. เป็นท่อนานำมาอัดในร่องบนหมวกครอบหัวเข็มจนแน่น ชนิดของไม้อาจจะ เป็นไม้ยางหรือไม้เต็ง ไม้ไคร้แน่นอน และหากด้านบนของหมวกครอบหัวเข็มเป็นแผ่นเหล็กเรียบไม่มีร่องใส่ไม้ ขณะตอกเสาเข็มคนงานจะใช้แผ่นไม้อัด 2-3 แผ่น คอยสอดรองระหว่างลูกค้อนและหมวกครอบหัวเข็มเท่านั้น

หมวกครอบหัวเข็ม (HELMET)

โดยทั่วไปหมวกครอบหัวเข็มจะเป็นเหล็กเหนียว จุดประสงค์ของการใช้หมวกครอบหัวเข็มก็เพื่อบังคับให้ลูกค้อนตอกเสาเข็มตอกลงบนหัวเสาเข็ม และกระจายให้การตอกนั้นเกิดขึ้นไปทั่ว บนหัวเสาเข็ม โดยปกติหมวกครอบหัวเข็มจะทำหน้าที่ได้ตามวัตถุประสงค์ก็เมื่อมีหมอนรองหัวเข็มใส่อยู่ภายใน

หมอนรองหัวเข็ม (CUSHION)

หมอนรองหัวเข็มจะอยู่ระหว่างหมวกครอบหัวเข็มและหัวเสาเข็ม โดยทั่วไปจะเป็นไม้ วัตถุประสงค์ของการใช้หมอนรองหัวเข็มก็เพื่อป้องกันหัวเข็มแตกร้าว เนื่องจากแรงกดหรือแรงดึง ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของหมอนนี้จะทำให้ช่วงคลื่นของ STRESS WAVE ยาวขึ้นและค่า PEAK ต่ำลง หมอนรองหัวเข็มยังช่วยให้การตอกเสาเข็มนั้นเกิดขึ้นทั่วทั้งหัวเสาเข็ม, ช่วยปรับพื้นผิวหน้าของเสาเข็มส่วนที่ไม่เรียบให้ได้รับแรงกระทบใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มระยะเวลาในการกระทบให้นานขึ้นซึ่งมีผลมากต่อระยะการจมของเสาเข็มด้วย

ในประเทศไทยหากเครื่องตอกเป็น DIESEL HAMMER หมอนรองหัวเข็มมักเป็นไม้แผ่นหนาประมาณ 7.5 ซม. เป็นไม้เนื้อแข็งชนิดของไม้ก็ไม่แน่นอนเช่นเดียวกับ CAP BLOCK และหากเครื่องตอกเสาเข็ม DROP HAMMER หมอนรองหัวเข็มมักจะได้จากการนำไม้กระดานหนาประมาณ 2.5 ซม. กว้างเท่าใดก็ได้มาตัดให้พอดีกับขนาดของหมวกครอบหัวเข็ม แล้วนำมาเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น แต่ละชั้นวางแนวไม้ตั้งฉากกัน เย็บด้วยตะปู

เมื่อเตรียมหมอนดังกล่าวเสร็จก็นำไปอัดใส่ในหมวกครอบหัวเข็ม และเมื่อจะตอกเสาเข็ม ก็ยังต้องรองหัวเสาเข็มด้วยกระสอบอีก

เสาส่ง (FOLLOWER)

เสาส่งจะทำด้วยเหล็ก โดยทำเป็นโครงสร้างชั้นหนึ่ง เสาส่งจะใช้ในกรณีที่ต้องตอกส่งให้เสาเข็มลึกลงไปจากระดับดินหรือใต้น้ำ

2.3 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็ม

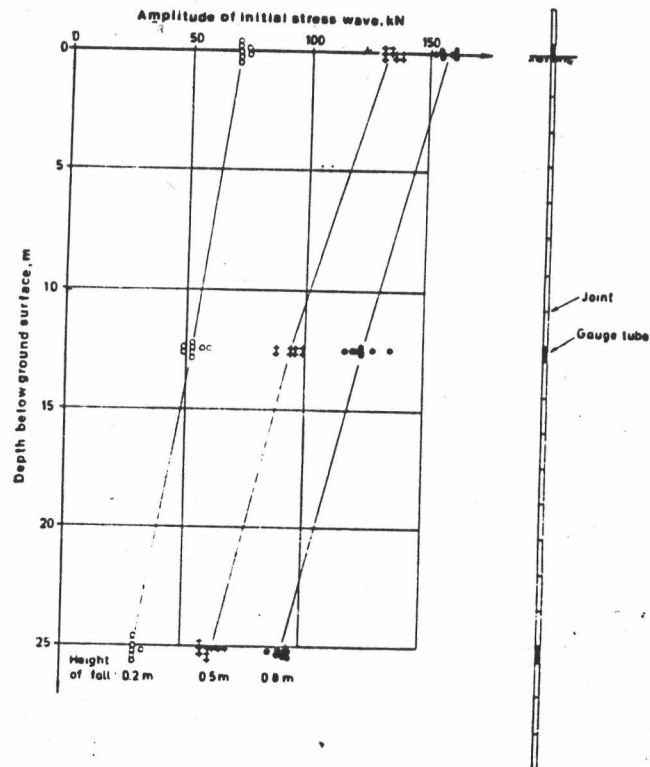
ระหว่างการตอกเสาเข็มและเมื่อตอกเสาเข็มแล้วเสร็จนั้น ได้ทำให้เกิดผลและพฤติกรรมต่าง ๆ เกิดขึ้น โดยพฤติกรรมหรือผลนั้นสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ

2.3.1 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่ตัวเสาเข็มเอง และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ระหว่างการตอก

2.3.2 พฤติกรรมหรือผลที่ได้เกิดขึ้นกับดินที่เสาเข็มตอกลงไป

2.3.1 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่ตัวเสาเข็ม และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ระหว่างการตอกเสาเข็ม

เมื่อลูกค้อนกระทบหัวเสาเข็ม จะเกิด STRESS WAVE เคลื่อนที่ลงไปตามตัวเสาเข็มด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียง ความเข้มของ STRESS ที่เกิดขึ้นขึ้นโดยตรงกับความเร็วของลูกค้อนที่กระทบเสาเข็ม (BROMS & HELLMEN, 1971) สำหรับเสาเข็มคอนกรีตนี้ค่าสูงสุดของ INITIAL STRESS WAVE จะประมาณ $\sqrt{30kh}$ MN/mm² โดยที่ h คือระยะที่ลูกค้อนตกลงมามีหน่วยเป็นเมตร สำหรับ K มีค่าเท่ากับ 0.8 กรณีใช้ลวดสลิงยกและปล่อยลูกค้อนลงมา และมีค่าเท่ากับ 1.0 กรณีลูกค้อนถูกปล่อยให้ตกมาโดยอิสระ STRESS WAVE นี้จะมีค่าลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.3.1



รูปที่ 2.3.1 STRESS DISTRIBUTION IN PILE DURING DRIVING
(FJELKNER & BROMS, 1972)

E. OLSSON, E. STENSGARD และ C-J GRAVARE ได้ทำการทดลองวัดค่า INITIAL STRESS WAVE ที่เกิดขึ้นที่หัวเสาเข็มคอนกรีตตอกโดย DROP HAMMER พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่า INITIAL STRESS WAVE ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า $\sqrt{30 kh}$ ประมาณ 7% นอกจากนี้ยังพบว่า

- ค่า INITIAL STRESS WAVE ที่หัวเสาเข็มขณะลูกตุ้มสัมผัสนั้น จะมีค่าลดน้อยลง หากเครื่องที่ใช้ยกและปล่อยลูกตุ้มนั้นยังเย็นอยู่
- ในกรณีที่ลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็มในลักษณะเฉียงศูนย์ AXIAL FORCE ที่มีค่า AMPLITUDE น้อยกว่าจะถ่ายแรงให้กับเสาเข็ม
- ในกรณีที่หน้าตัดเสาเข็มมีขนาดต่าง ๆ กัน หน้าตัดที่มีค่าประมาณ 600-700 cm^2 จะเกิด INITIAL STRESS WAVE มากที่สุด ทั้งนี้อธิบายได้ว่าในกรณีที่เสาเข็มหน้าตัดน้อย ขณะลูกตุ้มกระทบเสาเข็มมักจะกระทบในลักษณะเฉียงศูนย์

COMPRESSIVE STRESS ที่เกิดขึ้นบนหัวเสาเข็ม เมื่อมีลูกตุ้มมากกระทบนั้น สามารถคำนวณหาได้ดังนี้ (THORNTON, 1951)

max	=	COMPRESSIVE STRESS ที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นบนหัวเสาเข็ม, ปอนด์/นิ้ว
W	=	น้ำหนักของลูกตุ้ม, ปอนด์
V	=	ความเร็วของลูกตุ้มขณะจะกระทบหัวเสาเข็ม, นิ้ว/วินาที
	=	$2gh$
h	=	ระยะยกของลูกตุ้ม, นิ้ว
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 386 นิ้ว/วินาที ²
e	=	NAPIERIAN BASE, 2.71828
k	=	ค่าคงที่สปริงของหมอนรองหัวเข็ม, ปอนด์/นิ้ว
	=	$A_c E_c / t_c$
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของหมอนรองหัวเข็ม, นิ้ว ²
E_c	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหมอนรองหัวเข็ม, ปอนด์/นิ้ว ²
T_c	=	ความหนาของหมอนรองหัวเข็มก่อนถูกกด, นิ้ว
T	=	เวลา, วินาที
A	=	พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม, นิ้ว ²
E	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม, ปอนด์/นิ้ว ²
	=	น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเสาเข็ม, ปอนด์/นิ้ว ³
n	=	$(K/2A) \sqrt{g/EX}$
p	=	$\sqrt{Kg/W}$

กรณีที่ 1 เมื่อ $n < p$

$$\delta_{\max} = [-KV e^{-nt} \sin(t \sqrt{p^2 - n^2})] / A \sqrt{p^2 - n^2}$$

ซึ่งค่า t จะหาได้จาก $\tan(t \sqrt{p^2 - n^2}) = \sqrt{p^2 - n^2} / n$ ในเทอมของเรเดียน

กรณีที่ 2 เมื่อ $n = p$

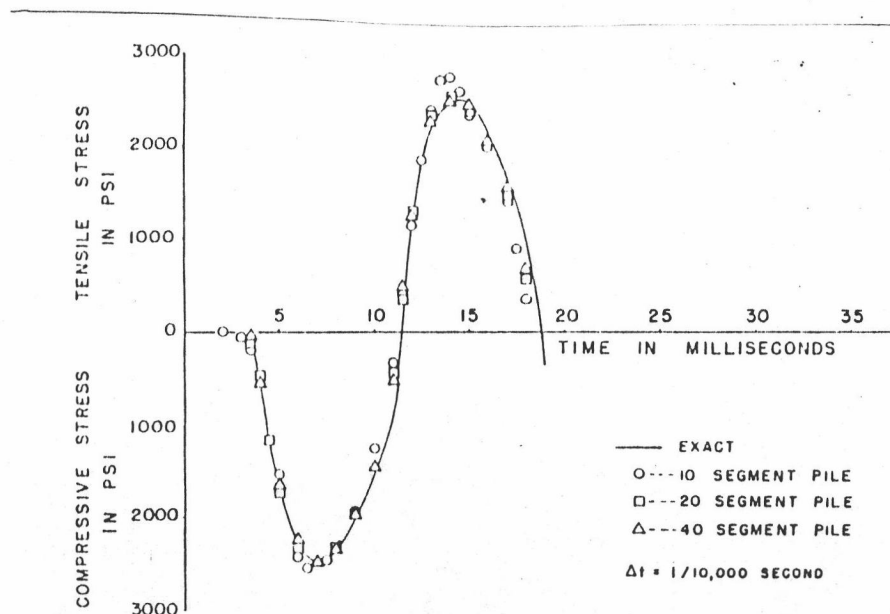
$$\delta_{\max} = -[(Kv/nA) - (W/A)] e^{-1}$$

กรณีที่ 3 เมื่อ $n > p$

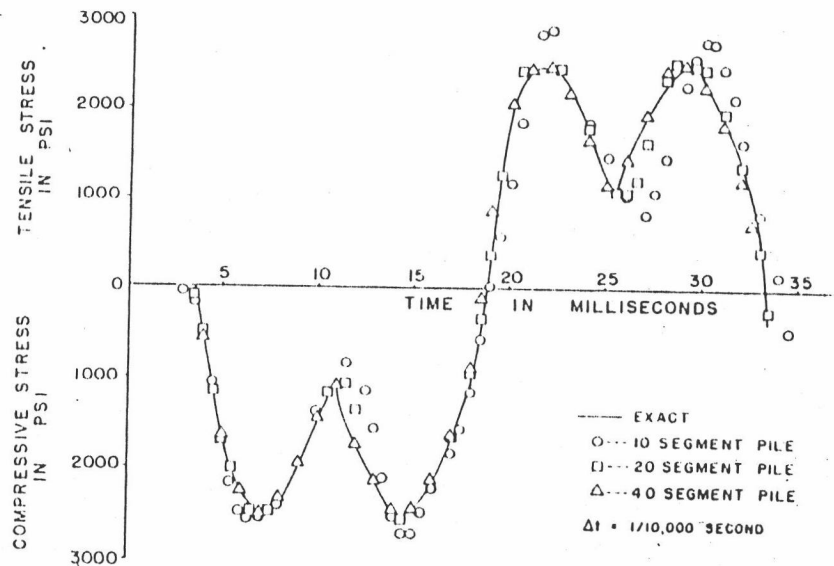
$$\sigma_{\max} = -[KV e^{-nt} \sinh (t \sqrt{n^2-p^2})] / A \sqrt{n^2-p^2}$$

ซึ่งค่า t จะหาได้จาก $\tanh (t \sqrt{n^2-p^2}) = \sqrt{n^2-p^2}/n$ ในเทอมของเรเดียน

C.H SAMSON, T.J.HIRSCH และ L.L.LOWERY (1963) ได้ศึกษาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะตอกเสาเข็มคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมกลาง ในกรณีที่ปลายเสาเข็มปล่อยอิสระและยึดแน่น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูป 2.3.2 และ 2.3.3



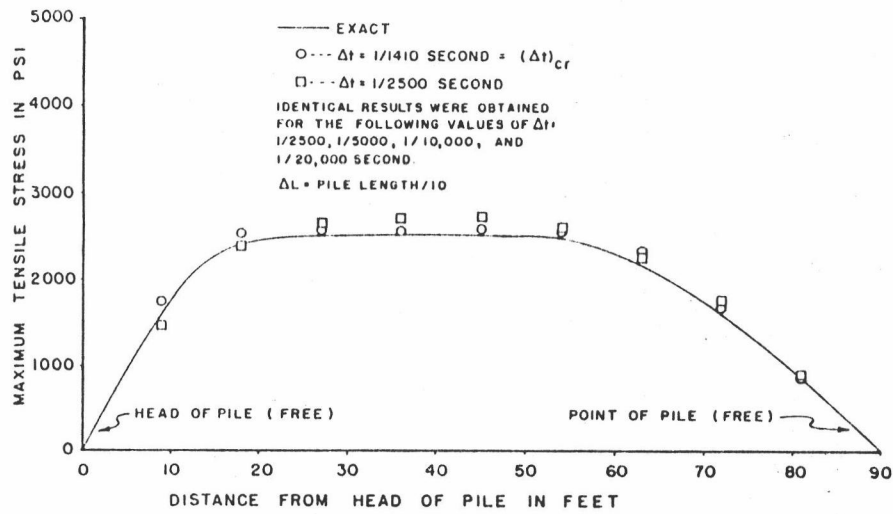
รูปที่ 2.3.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ระยะกึ่งกลางเสาเข็มคอนกรีตสี่เหลี่ยมกลาง ปลายเสาเข็มปล่อยอิสระ (FREE END)



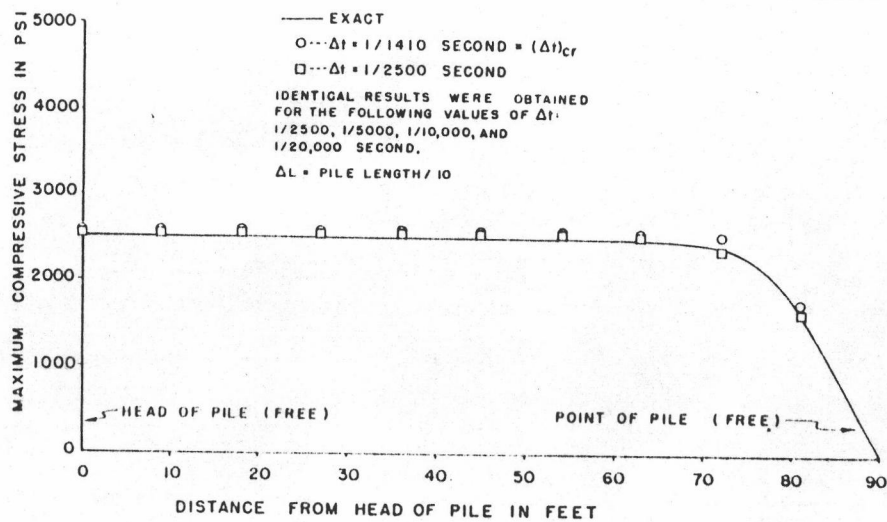
รูปที่ 2.3.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ระยะกึ่งกลางเสาเข็มคอนกรีตสี่เหลี่ยมกลวง
ปลายเสาเข็มยึดติดแน่น (FIXED END)

จากรูปที่ 2.3.2 จะสังเกตเห็นว่า ในกรณีที่ปลายเสาเข็มปล่อยอิสระ เช่น ในกรณี
ที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินอ่อน ผลจากลูกตุ้มกระทบเสาเข็มจะทำให้เกิด COMPRESSION
STRESS WAVE เคลื่อนที่ลงตามความยาวเสาเข็ม เมื่อถึงปลายเสาเข็ม STRESS WAVE
นี้จะสะท้อนกลับในรูป TENSION STRESS WAVE ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่ปลายเสาเข็มยึด
ติดแน่นที่เมื่อ COMPRESSION STRESS WAVE เคลื่อนที่ถึงปลายเสาเข็มแล้ว จะยังคงสะ
ท้อนกลับในรูปเดิมจนกระทั่งเมื่อ COMPRESSION STRESS WAVE นี้เคลื่อนที่มาถึงหัวเสา
เข็ม ซึ่งเปรียบดังเสาเข็มมีปลายปล่อยอิสระ คลื่นที่สะท้อนกลับจะกลายเป็น TENSION
STRESS WAVE เหมือนกรณีเสาเข็มปลายปล่อยอิสระนั่นเอง หากแต่รูปลักษณะของคลื่นจะ
มี 2 PEAK ซึ่งอาจจะเนื่องจากคลื่นที่สะท้อนกลับมาเป็นคลื่นชนิดเดียวกันจึงมาเสริมกัน

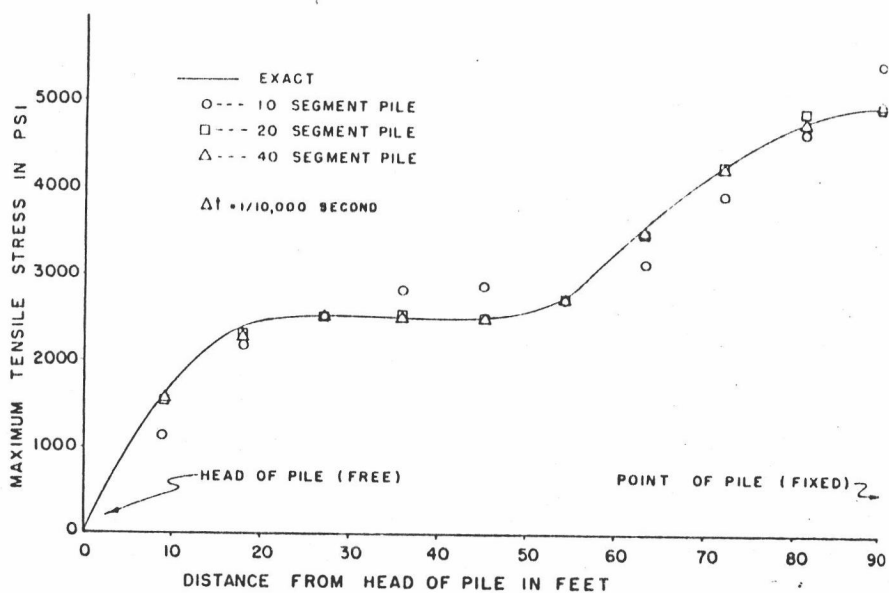
สำหรับหน่วยแรงที่แต่ละส่วนของเสาเข็มคอนกรีตสี่เหลี่ยมกลวง จะมีลักษณะดังรูปที่
2.3.4 ถึง 2.3.7



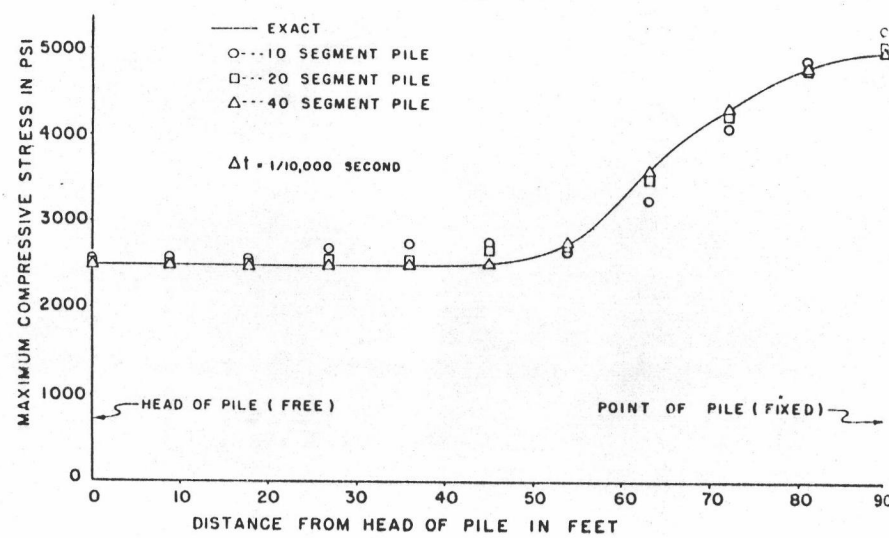
รูปที่ 2.3.4 หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นตามความยาวเสาเข็ม กรณีปลายเสาเข็ม
ปล่อยอิสระ



รูปที่ 2.3.5 หน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามความยาวเสาเข็ม กรณีปลายเสาเข็ม
ปล่อยอิสระ



รูปที่ 2.3.6 หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นตามความยาวของเสาเข็ม กรณีปลายเสาเข็มนยึดติดแน่น

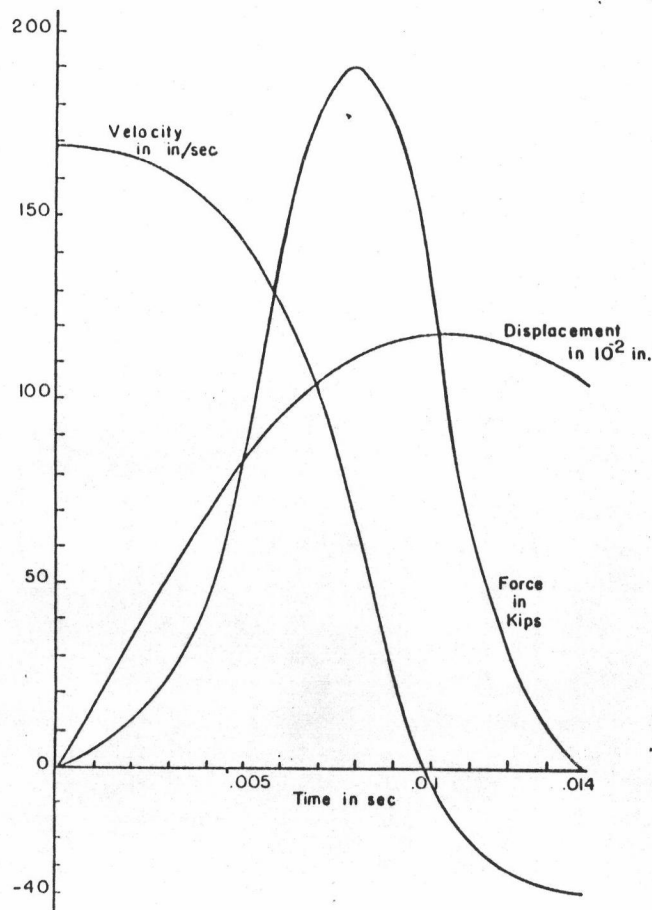


รูปที่ 2.3.7 หน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามความยาวเสาเข็ม กรณีปลายเสาเข็มนยึดติดแน่น

ในดินเหนียวอ่อน (SOFT CLAY) COMPRESSION WAVE ที่เกิดจากลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็ม เมื่อเดินทางแพร่ไปถึงปลายเสาเข็มจะสะท้อนย้อนกลับขึ้นมาเป็น TENSION WAVE ฉะนั้นในดินลักษณะนี้ หากตอกเสาเข็มโดยใช้ลูกตุ้มที่น้ำหนักเบา และระยะยกของลูกตุ้มสูงสุดแล้ว TENSILE STRESS ที่สะท้อนกลับขึ้นมาจะทำให้หัวเสาเข็มแตกได้ง่าย

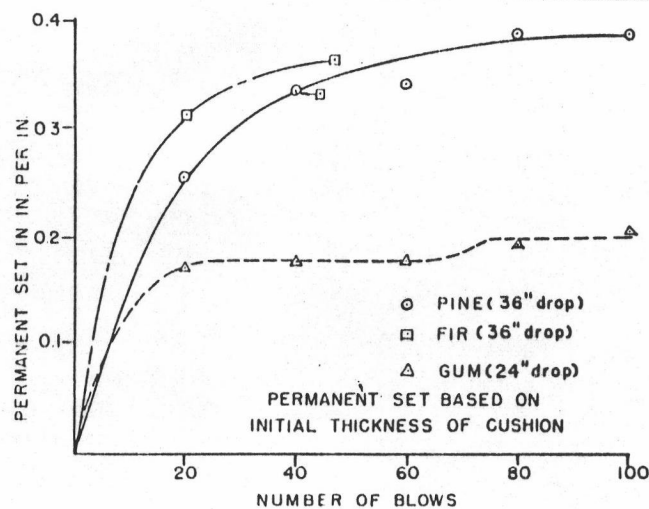
หมอนรอง (CUSHION)

พฤติกรรมของหมอนรองเมื่อแรงลักษณะไดนามิก (HIRSCH & EDWARDS, 1966) เช่น ลูกตุ้มตอกเสาเข็มมากกระทบจะมีลักษณะดังรูป 2.3.8 ซึ่งหมอนรองที่ผู้ทดลองนำมาศึกษานั้น ประกอบขึ้นจากไม้อัดที่ทากจากไม้สน (PINE & FIR) ซึ่งเป็นไม้เนื้ออ่อน และประกอบขึ้นจากไม้อัดที่ทากจากไม้โอ๊ก (OAK), ไม้ GUM ซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง

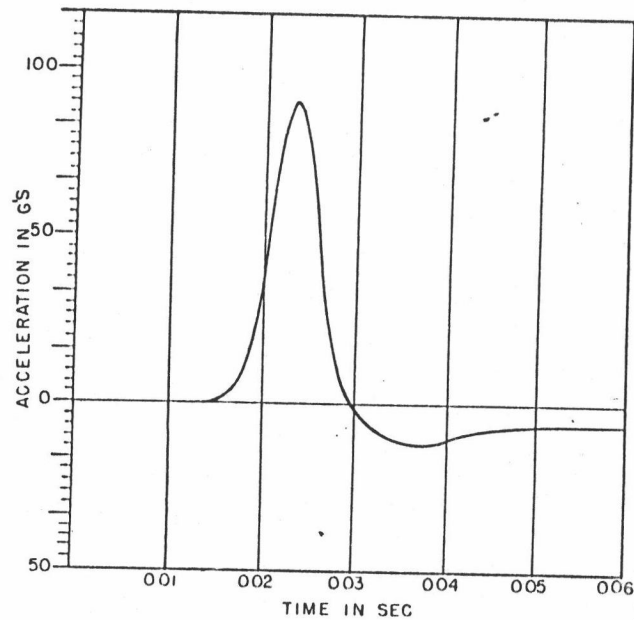


รูปที่ 2.3.8 แรงและการยุบตัวที่เกิดในหมอนรอง เมื่อมีแรงไดนามิกมากระทำ และความเร็วของลูกตุ้ม

ทันทีที่ลูกตุ้มกระทบกับหมอนรองความเร็วของลูกตุ้มจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันหมอนรองก็เกิดการยุบตัวและแรงที่กระทำต่อหมอนรองมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัว และแรงที่กระทำต่อหมอนรองจะมีค่ามากที่สุดเมื่อความเร็วของลูกตุ้มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จากดังกล่าวข้างต้น เมื่อลูกตุ้มตอกกระทบหมอนรองจะทำให้หมอนรองยุบตัว ในช่วงแรก ๆ อัตราการยุบตัวจะมีค่ามาก เมื่อจำนวนตอกกระทบมากขึ้นอัตราการยุบตัวก็จะเริ่มน้อยลง และเมื่อถึงจำนวนตอกกระทบค่าหนึ่ง ซึ่งหมอนรองได้ยุบตัวไประยะหนึ่งแล้ว ค่าการยุบตัวจะคงที่แม้ว่าจะยังคงตอกกระทบต่อไป ขนาดระยะยุบตัวและจำนวนครั้งที่ต้องตอกกระทบจนหมอนรองเริ่มมีค่าการยุบตัวคงที่นั้น ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ตอกและชนิดของไม้ หรือวัสดุที่ใช้ทำหมอนรอง เป็นที่แน่นอนว่า เมื่อหมอนรองทำด้วยไม้ชนิดเดียวกัน ท่อนที่ใช้พลังงานในการตอกมากกว่าย่อมมีระยะการยุบตัวมากกว่า และจำนวนครั้งที่ต้องตอกแล้วทำให้หมอนรองเริ่มมีค่าการยุบตัวคงที่ย่อมใช้จำนวนครั้งน้อยกว่า หมอนรองที่ทำด้วยไม้เนื้อแข็งกว่ามักจะมีค่าการยุบตัวน้อยกว่าหมอนรองที่ทำด้วยไม้เนื้ออ่อนกว่า ดังรูปที่ 2.3.9

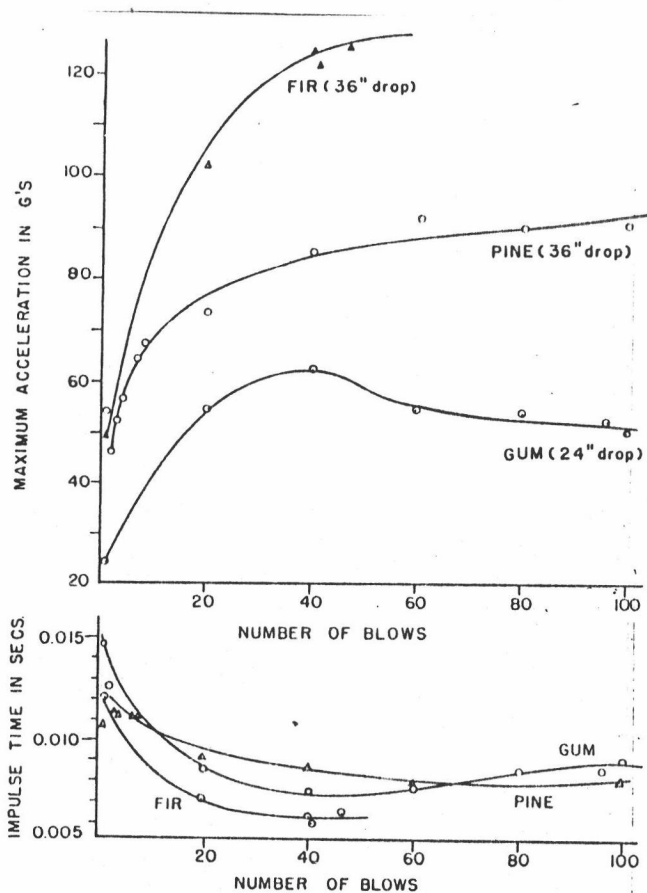


รูปที่ 2.3.9 ค่าการยุบตัวของหมอนรอง



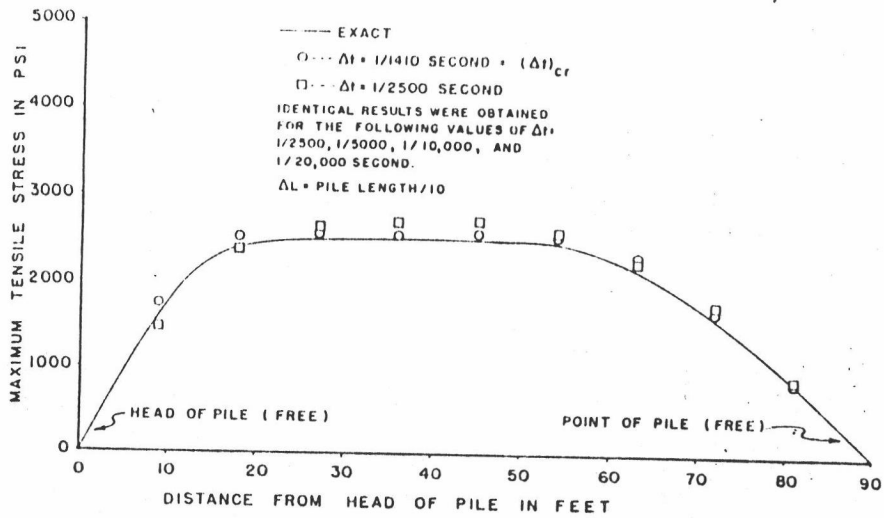
รูปที่ 2.3.10 กราฟแสดงลักษณะความเร่งของลูกตุ้มขณะตกลงบนหมอนรอง

ระยะเวลาตกกระทบ (IMPULSE TIME) ของลูกตุ้มและหมอนรองจะแปรเปลี่ยนไปเมื่อจำนวนครั้งของการตกกระทบมากขึ้น จากรูปที่ 2.3.11 จะเห็นว่าในช่วงแรก ๆ ของการตก ระยะเวลาตกกระทบมีค่ามาก โดยที่ค่าความเร่งสูงสุดของลูกตุ้มมีค่าต่ำ ทั้งนี้เพราะในช่วงนี้หมอนรองมีการยุบตัว พลังงาน, ความเร็วของลูกตุ้มถูกซึมซับไป เมื่อจำนวนครั้งของการตกกระทบมากขึ้น ระยะเวลาตกกระทบจะน้อยลงและมีค่าประมาณว่าเริ่มคงที่ ส่วนค่าความเร่งสูงสุดของลูกตุ้มนั้นจะมีค่ามากขึ้น เพราะหมอนรองเริ่มถูกตอกอัดแน่นขึ้น การซึมซับพลังงานก็น้อยลง ดังรูปที่ 2.3.11 การเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาตกกระทบ และค่าความเร่งสูงสุดของลูกตุ้ม เมื่อจำนวนของการตกกระทบมากขึ้นนี้ จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของไม้หรือวัสดุทำหมอนรอง และพลังงานที่ตกกระทบตั้งข้างต้น เช่นกัน

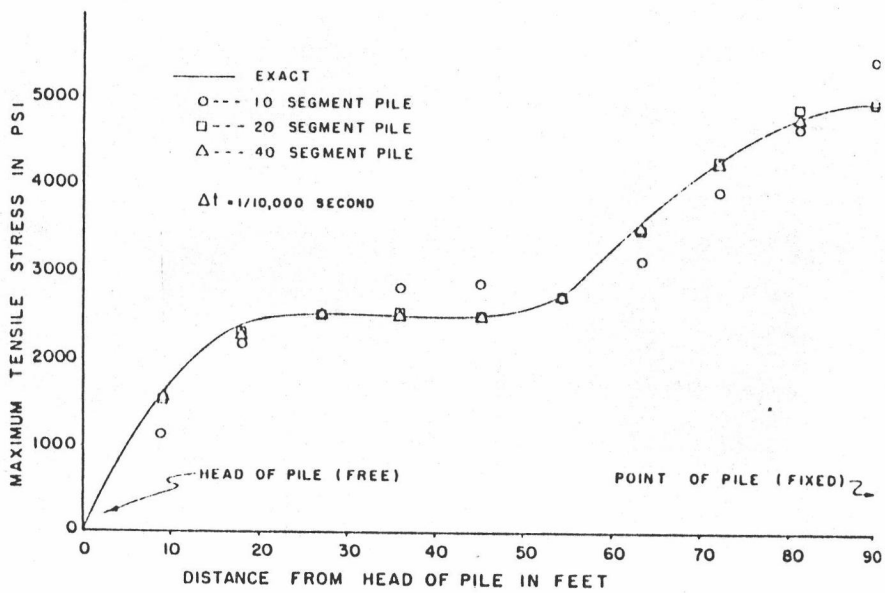


รูปที่ 2.3.11 แสดงค่าความเร่งและระยะเวลาตกกระทบ เทียบกับจำนวนครั้งของการตกกระทบ

ลักษณะของ STRESS-STRAIN CURVE ของหมอนรองในช่วงการตกแรก ๆ และหลังจากการตกไประยะหนึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.3.12 และ 2.3.13 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนครั้งของการตกมากขึ้น ลักษณะของกราฟจะเริ่มคงที่เหมือนเดิม เมื่อลักษณะการทดสอบเป็นแบบสแตติก และหากเราเปลี่ยนพลังงานในการตก ลักษณะของกราฟก็จะยังคงเช่นเดิม เพียงแต่ค่า MAX STRESS และ STRAIN จะเปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า SECANT MODULUS OF ELASTICITY เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

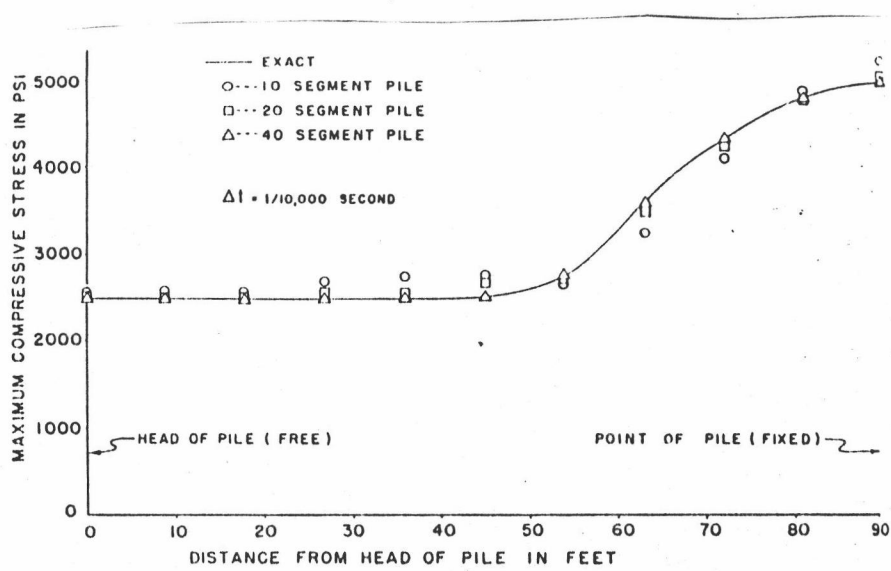


รูปที่ 2.3.12 ลักษณะ STRESS-STRAIN CURVE ของหมอนรองท่าจากไม้เนื้ออ่อน เมื่อลुकตัมมีระยะยก 36 นิ้ว



รูปที่ 2.3.13 ลักษณะ STRESS-STRAIN CURVE ของหมอนรองท่าจากไม้เนื้อแข็ง

สำหรับ COEFFICIENT OF RESTITUTION ของหมอนรองแต่ละชนิด หลังจากที่ถูก
 ตกกระทบจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.3.14 จะเห็นว่าเมื่อถูกตกกระทบไประยะหนึ่ง ค่าของ
 COEFFICIENT OF RESTITUTION จะคงที่

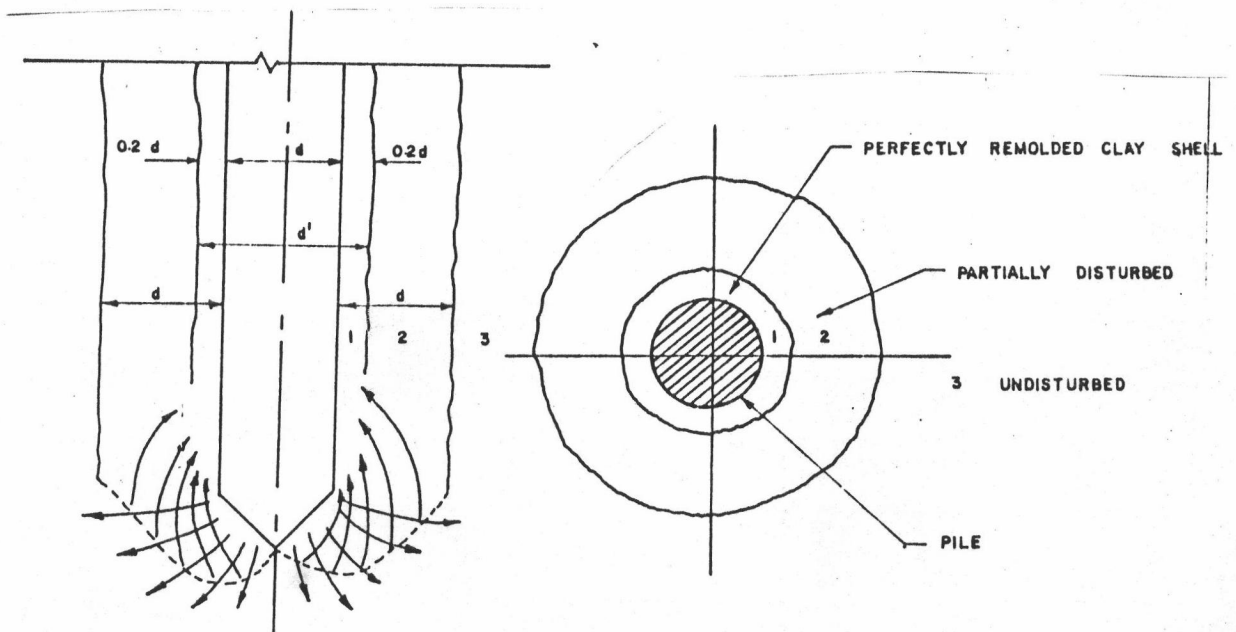


รูปที่ 2.3.14 ค่าเฉลี่ย COEFFICIENT OF RESTITUTION
 ของหมอนรองที่แต่ละจำนวนครั้งของการตก

2.3.2 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับดินที่เสาเข็มนั้นตกลงไป

2.3.2.1 ดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็ม

เมื่อดอกเสาเข็มลงไปดินเหนียวปริมาณของดินเท่ากับปริมาณของเสาเข็มจะถูกแทนที่ ทำให้ดินรอบ ๆ ทั้งด้านข้างและใต้ปลายเสาเข็มมีการเคลื่อนตัว มวลดินถูกรบกวน ZEEVAERT (1950) ได้ศึกษา HIGHLY SENSITIVE CLAY OF MEXICO CITY ได้วิเคราะห์ถึงบริเวณที่ดินถูกรบกวนขณะดอกเสาเข็มและได้แสดงทัศนคติว่าเมื่อดอกเสาเข็มดินเหนียวจะเริ่มถูกแทนที่จากปลายเสาเข็ม แรงดันซึ่งมีค่าสูงที่เกิดจากปลายเสาเข็มขณะที่เสาเข็มแทนที่ดินนั้น ทำให้ดินมีสภาพเปลี่ยนเป็น HIGHLY VISCOUS MATERIAL กระจายจากปลายเสาเข็มขึ้นมาจนรอบตัวเสาเข็มเป็นรูปวงกลม บางโอกาส FLUID CLAY นี้อาจจะแทรกพุ่งขึ้นมาผิวดินตามลำต้นเสาเข็ม ขบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นรวดเร็วมากจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า WATER CONTENT เลย ZEEVAERT ได้แบ่งดินรอบ ๆ เสาเข็มขณะดอกเสาเข็มออกเป็น 3 ส่วน ด้วยกันดังรูปที่ 2.3.15



2.3.15 แสดงภาพดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มตกในดิน Cohesive, ZEEVAERT

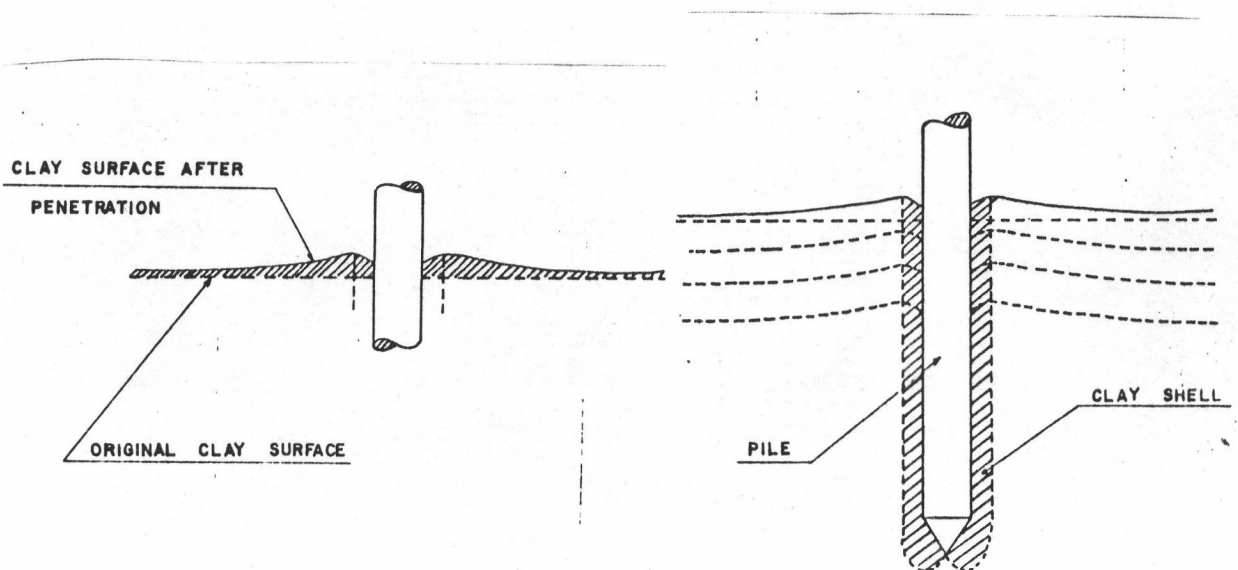
โซน I ดินในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพ COMPLETELY REMOLDED ขณะที่ดอกเสาเข็มดินส่วนนี้จะเคลื่อนตัวตามเสาเข็ม ความหนาของดินโซนนี้เมื่อนับจากผิวเสาเข็มจะหนาประมาณ 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

โซน II ดินในบริเวณนี้จัดอยู่ในสภาพ DISTURBED ดินส่วนใหญ่จะไม่มี การเคลื่อนตัวตามเสาเข็มขณะตอกดังเช่นดินโซน I นอกจากดินบริเวณใต้ปลายเสาเข็มเท่านั้นที่จะมี การเคลื่อนตัว ขนาดของดินโซนนี้เมื่อวัดถึงวงนอกสุดของบริเวณอาจมีความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

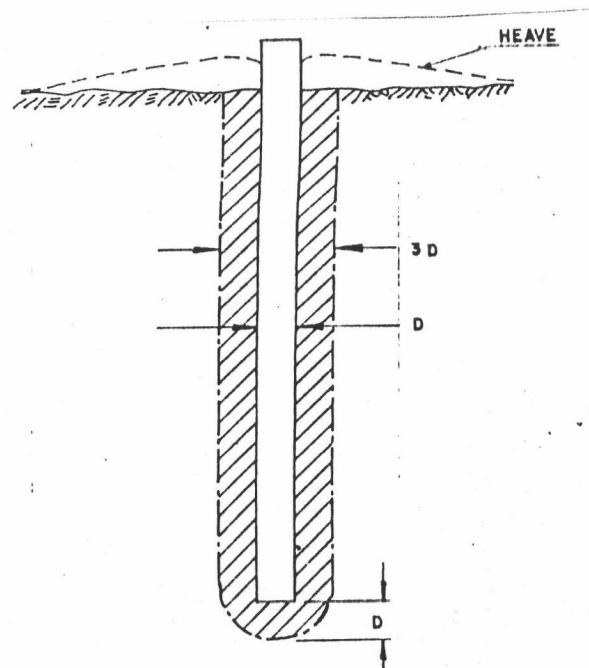
โซน III ดินในบริเวณนี้ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงขณะตอกเสาเข็ม อาจมี การเคลื่อนตัวขึ้นชั่วคราวในลักษณะ ELASTIC บ้างหากเกิดแรงดันซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของ REMOLD CLAY มากระพา ซึ่งหากการเคลื่อนตัวขึ้นมีมากจนเกินช่วง ELASTIC ไปก็จะถือว่าเป็น SLIGHTLY DISTURBED

ELDIN (1961) ได้แบ่งดินรอบ ๆ เสาเข็มขณะตอก คล้ายคลึงกับ SEEVAERT แต่ไม่ได้บอกถึงความแตกต่างระหว่างโซน II และโซน III ELDIN ยังได้กล่าวถึง ดินที่ถูกแทนที่ด้วยว่าได้เริ่มเกิดที่ปลายเสาเข็มก่อนแล้วจึงเคลื่อนตัวขึ้นในรูปแบบ CLAY SHELL รอบ ๆ เสาเข็ม ดังรูปที่ 2.3.16

BROMS (1966) ได้กล่าวถึงขนาดของบริเวณที่ถูกรบกวนขณะตอกเสาเข็ม ว่ามีระยะห่างจากผิวของเสาเข็มเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มนั้นดังรูปที่ 2.3.17

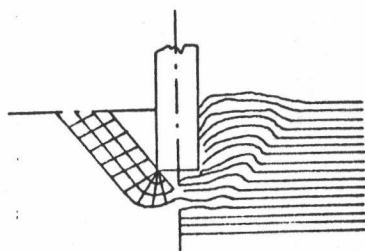


2.3.16 แสดงการแทนที่ดินและ CLAY SHELL รอบ ๆ เสาเข็ม, ELDIN (1961)

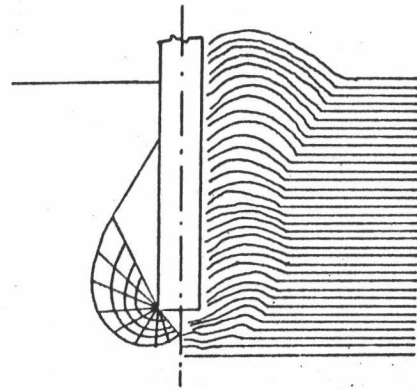


2.3.17 ดินที่ถูกรบกวนจากการตอกเสาเข็ม, BROMS (1966)

TERZAGHI (1943) ได้พบว่าการวิบัติของดินรอบ ๆ เสาเข็มมี 2 รูปแบบ คือ LOCAL SHEAR และ GENERAL SHEAR FAILURE โชนที่วิบัติและรูปแบบการถูกแทนที่ของดิน ในยุคแรกจากการศึกษาของ TERZAGHI (1943) และในยุคหลัง ๆ จากการศึกษานของ MEYERHOF (1959) แสดงดังรูปที่ 2.3.18



AFTER TERZAGHI (1943)



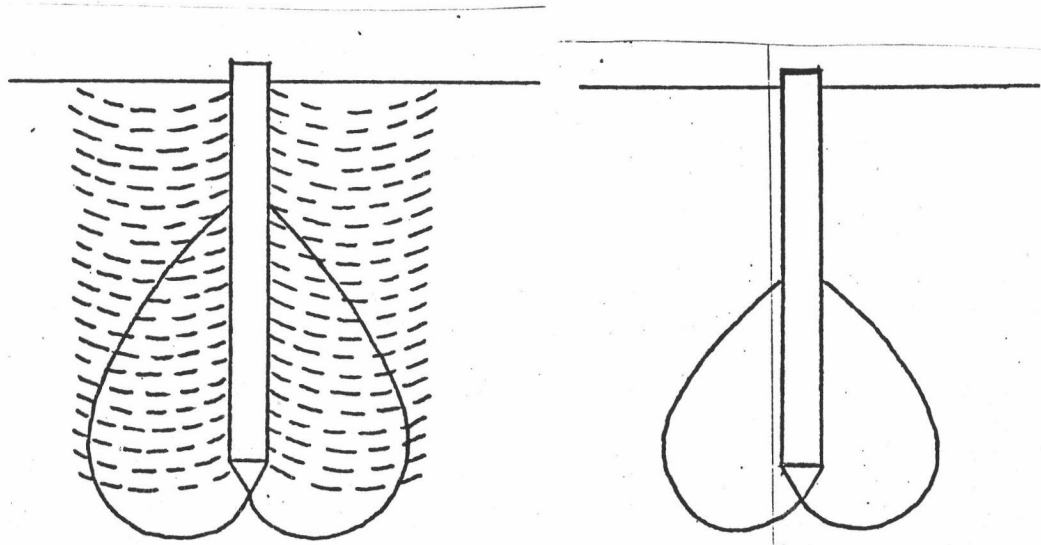
AFTER MEYERHOF (1959)

รูปที่ 2.3.18 โซนที่วิบัติและรูปแบบการถูกแทนที่ของดิน เมื่อเสาเข็มตอกในดิน COHESIVE

AIRHART ET AL (1967) ได้แบ่งการวิบัติของดินเนื่องจากการตอกเสาเข็มเป็น 2 รูปแบบ เหมือน TERZAGHI (1943), LOCAL SHEAR FAILURE เกิดขึ้นจากแรงดันและการแทนที่ทางแนวราบจากการที่เสาเข็มแทรกตัวลงไปดิน ตำแหน่งของ LOCAL SHEAR FAILURE จะเกิดขึ้นทันทีทันใดใกล้ ๆ กับเสาเข็ม ต่อจากนั้นการรบกวนซึ่งเกิดจาก VERTICAL SHEAR และการแทนที่ดินจากเสาเข็มซึ่งเคลื่อนตัวลงทุก ๆ ครั้งของการกระทบของลูกตุ้มตอก AIRHART ได้เสนอว่า เนื่องจากความไวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวอิมิตัวด้วยน้ำระหว่างช่วงเวลานั้น ๆ ที่มีน้ำหนักมากกระทบตอกเสาเข็ม จะมีผลต่อขบวนการเกิดการวิบัติของดิน ขอบเขตของการวิบัติจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและอัตราเร็วของการตอกเสาเข็ม โดยทั่วไปจะมีรูปแบบ ดังรูปที่ 2.3.19 ซึ่งรูปแบบการวิบัติจากการเสนอของ AIRHART (1967) เหมือนกับรูปแบบที่เสนอโดย MEYERHOF (1962) จากรูปที่ 2.3.20 จะเห็นว่าส่วนที่เคลื่อนตัวของดินตามลำต้นเสาเข็มที่เกิดจากการตอกเสาเข็มจะมีระยะจากผิวเสาเข็มน้อย ดินใน LOCAL

SHEAR FAILURE จะถูกทำให้แน่นขึ้น เนื่องจากถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม ขณะเดียวกันความดันน้ำโพรง (PORE PRESSURE) ก็สูงขึ้นด้วย ขอบเขตของ LOCAL SHEAR FAILURE ดังรูปที่ 2.3.19 นี้ ได้จากการคาดคะเนของ SODERBERG (1962) ซึ่งได้ประยุกต์ขึ้นจากวิธีการของ NADAI (1959) การวิบัติที่เกิดใกล้ ๆ กับผิวเสาเข็มและการเคลื่อนที่ลงทำให้ความหนาแน่นของการเรียงตัวของเม็ดดินลดลงบ้างนี้ ทำให้ความดันน้ำโพรงเพิ่มที่มีค่าหนึ่งตั้งแต่ INITIAL YIELD มีค่าลดลง จึงทำให้มีการดูดความชื้นจากดินรอบ ๆ ข้างเข้าสู่จุดวิบัติ และเร่งให้ขบวนการวิบัติเกิดเร็วขึ้นอีก เมื่อการเคลื่อนที่ลงหยุด ความดันน้ำโพรงจะยังคงมีค่าสูงขึ้นอีกระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งเกิด การสมมูลย์ในบริเวณ LOCAL SHEAR FAILURE การกระจายของความดันน้ำโพรงเพิ่มจะเริ่มที่ขอบนอกของ LOCAL SHEAR FAILURE ZONE ไปยังบริเวณที่มีการรบกวนน้อยกว่า ขบวนการยุบตัวแบบคายน้ำก็จะเกิดต่อเนื่องด้วยความเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเม็ดดินตลอด ปริมาตรของ SHEAR FAILURE และในส่วนที่ไม่ได้รับการรบกวน

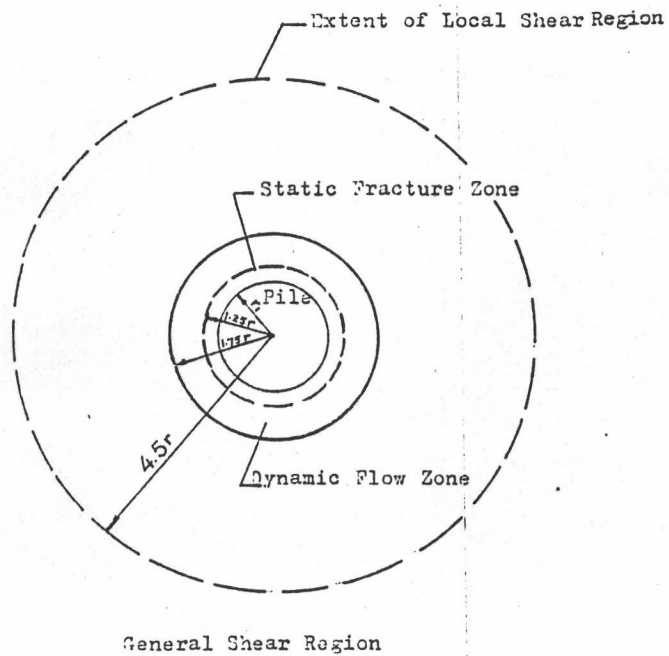
เมื่อน้ำหนักกระทำแบบสถิตจนถึงวิบัติ ขบวนการที่เกิดขึ้นเป็นแบบเดียวกับกับดังกล่าวข้างต้นแต่ในปริมาณที่น้อยกว่า การสัมผัสกันระหว่างเม็ดดินมีมากกว่าเพราะความดันน้ำโพรงเพิ่มมีค่าน้อยกว่า ฉะนั้นปริมาณของดินที่เคลื่อนตัวตามเสาเข็มรับน้ำหนักจะมีมากกว่าขณะตกเสาเข็ม STATIC FAILURE ของโครงสร้างเม็ดดินสมมุติฐานว่าอยู่ในรูปของ FRACTURE PATTERN ซึ่งต่างกับกรณีไดนามิกส์ซึ่งเป็นแบบ FLOW PATTERN ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อดึงเสาเข็มออกจากดิน การวิบัติจะเกิดระหว่างดินเองมากกว่าระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม TOMLINSON (1967), BROMS (1977) ส่วนขอบเขตของ FRACTURE และ FLOW ZONE ขึ้นอยู่กับการกระจายของความดันน้ำโพรงเพิ่ม



AIRHART, (1967)

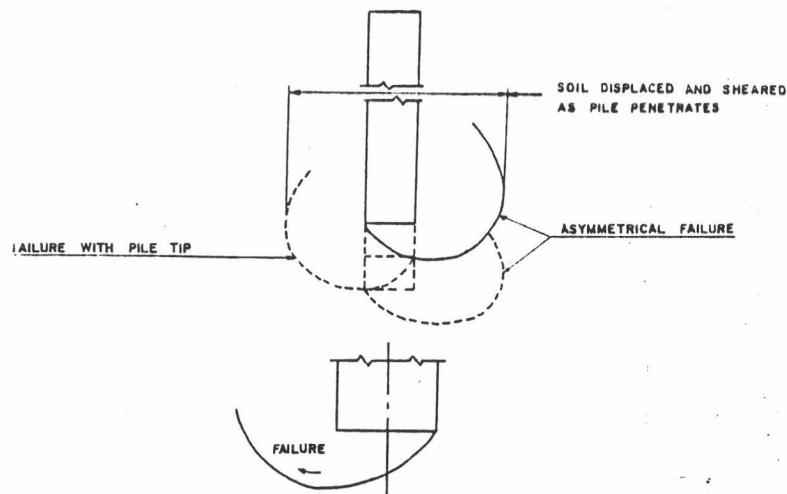
MEYERHOF (1951)

รูปที่ 2.3.19 รูปแบบการวิบัติของดิน จากการตอกเสาเข็ม



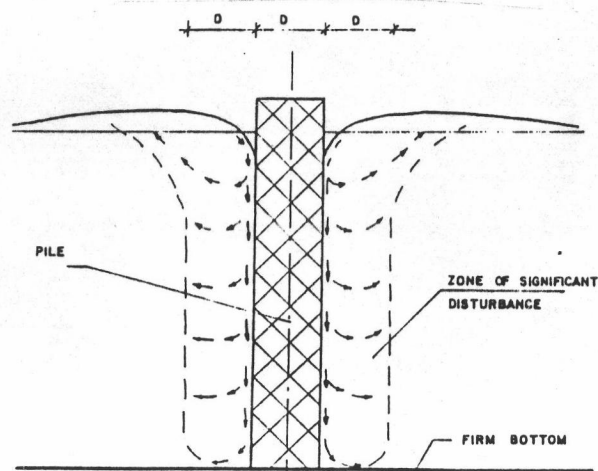
รูปที่ 2.3.20 รูปแบบการวิบัติของดิน รอบ ๆ เสาเข็ม AIRHART (1967)

HANNA (1968) จากการศึกษาเสาเข็มเหล็กรูปตัว H ได้แนะนำว่าขบวนการซึ่งเป็นธรรมชาติของเสาเข็มตอกทุกชนิด มีรูปแบบการวิบัติเหมือนดังแสดงไว้รูปที่ 2.3.21



รูปที่ 2.3.21 รูปแบบอุดมคติของการแทนที่ดินจากการตอกเสาเข็ม HANNA, (1968)

MASSARSCH (1974) ได้อธิบายถึงขบวนการเปลี่ยนแปลงของเสาเข็มจำลองซึ่งตอกใน STIFF AND COMPACTED CLAY ว่าบริเวณใกล้ผิวดิน การเคลื่อนที่ของดินจะมีรูปแบบเกือบวงกลม ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะยึดระหว่างเสาเข็มและดิน รูปแบบการแทนที่ดินจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่จะกลับเป็นไปตามรัศมี STIFF CLAY จะมีการเคลื่อนที่ลงตามแนวตั้งมากกว่า SOFT CLAY ดังรูปที่ 2.3.22



รูปที่ 2.3.22 การเคลื่อนตัวของดินรอบเสาเข็มตอกใน STIFF CLAY, MASSARSCH 1974

TOMLINSON (1970) ได้ศึกษาเสาเข็มต่อเหล็กคอกลงใน STIFF TO VERY STIFF CLAY พบว่าในช่วงความลึก 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อจากผิวดิน มีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างผิวท่อและดิน ซึ่งช่องว่างนี้ยังคงอยู่แม้เวลาผ่านไป 1 ปี หลังจากการคอกเสาเข็ม ช่วงความลึกระหว่าง 8 ถึง 14 หรือ 18 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ มีดินบางส่วนที่ติดกับผิวเสาเข็มและความลึกเกิน 16 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อลงไป ดินเหนียวได้ติดแน่นกับผิวของเสาเข็มเป็นลักษณะแผ่น ๆ หนาประมาณ 1-5 มม. ซึ่งถูกพาลงมาตามเสาเข็ม จะนั้นในส่วนล่าง ๆ ของเสาเข็มการวิบัติที่เกิดขึ้นมิได้เกิดที่ผิวของเสาเข็มและดิน หากแต่เกิดระหว่างแผ่นบาง ๆ ของดินที่ถูกนำลงมาพร้อมกับเสาเข็มขณะคอกกับดินรอบ ๆ ซึ่งถูกรบกวนมากกว่า นอกจากนี้ยังได้พบอีกว่า เมื่อคอกเสาเข็มลงไปชั้นดินเหนียวแข็งที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนหรือชั้นทรายวางตัวอยู่ข้างบน ดินเหนียวหรือทรายจะอยู่เต็มในช่องว่างระหว่างเสาเข็มและดินเหนียวแข็ง มีระยะประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.3.23, 2.3.24

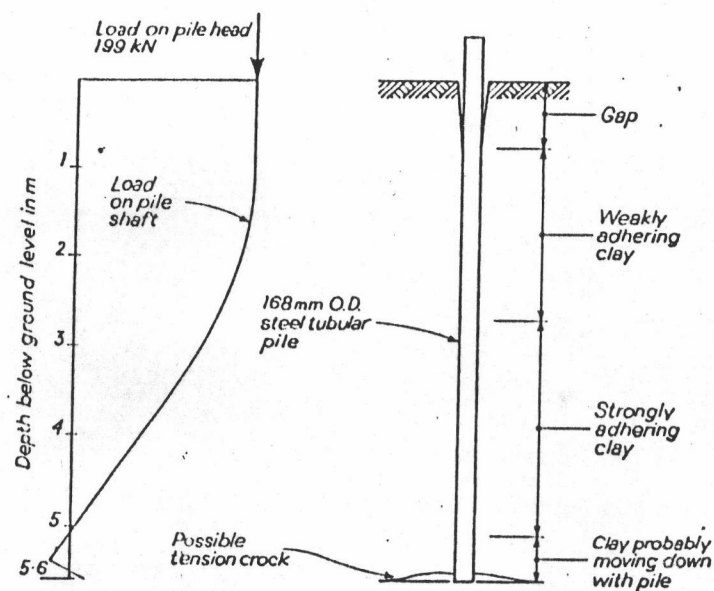
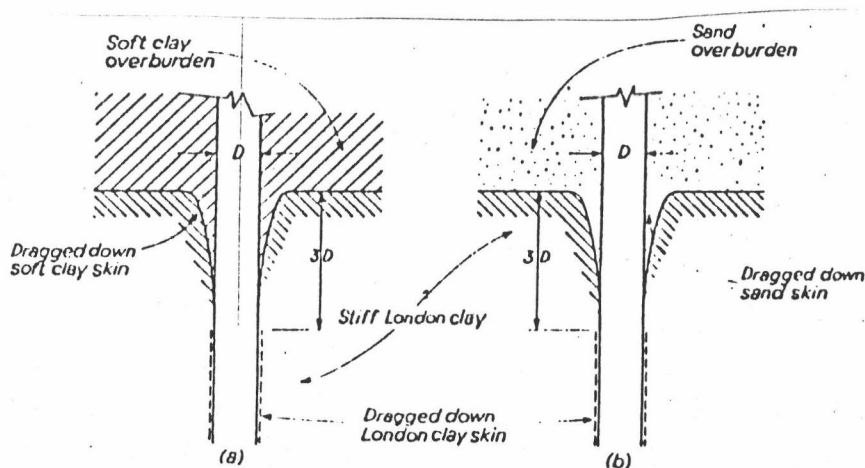


Fig. 4.5 Load transfer from pile to stiff clay at Stanmore^(4,5)

รูปที่ 2.3.23 การถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็ม



รูปที่ 2.3.24 DRAGDOWN OF OVERBURDEN SOIL ON PILE SHAFT TO CLAY

CLARK & MEYERHOF (1972) ได้วัดการเคลื่อนตัวของดินของไมเทลเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ปรากฏว่าการเคลื่อนตัวนี้จะลดลงอย่างมากเมื่อระยะทางจากผิวเสาเข็มเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของดินจะมีมากที่สุดที่กึ่งกลางความลึกของเสาเข็ม และจะสูญหายหมดไปเมื่อระยะทาง 3.5 เท่าของรัศมีเสาเข็ม

SEED & REESE (1957) ได้พบว่าเมื่อตอกเสาเข็มต่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลงไปในดินเหนียว LOW SENSITIVITY ค่ากำลังของดินรอบ ๆ เสาเข็มจะลดลงทันทีหลังจากตอก 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังที่จะลดลงทั้งหมดเมื่อ COMPLETE REMOLDING

KOIZUMI & ITO (1967) ได้พบว่าเมื่อตอกเสาเข็มใน VERY SENSITIVE CLAY, TOTAL NORMAL STRESS ที่ผิวของเสาเข็มจะมีค่าใกล้เคียงกันกับความดันน้ำโพรงมาก ซึ่งก็หมายความว่า EFFECTIVE STRESS ที่ผิวของเสาเข็มระหว่างการตอก และทันทีหลังการตอกเสาเข็มไม่เกิดขึ้น และดินเหนียวขณะนั้นมีสภาพคล้ายของเหลว ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม นับจากผิวเสาเข็ม

สุรชัย (1972) ได้ทดลองดักท่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เมตร ยาว 12.0 เมตร ในดินกรุงเทพฯ พบว่าผลการดักนั้นรบกวนดินรอบ ๆ เส้าเข็ม โดยรบกวนดินที่ปลายเข็มเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นกับดินชั้นบน ๆ ซึ่งทั้งนี้เพราะดินชั้นบน ๆ มีค่า SENSITIVITY มากกว่า ระยะที่ดินถูกรบกวนจะประมาณ 0.6 ถึง 1.0 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้าเข็มจากผิวเส้าเข็ม เมื่อวัดกำลังดินด้วย FIELD VANE และ UNCONFINED COMPRESSION TEST ตามลำดับ

2.3.2.2 ความดันน้ำโพรงเพิ่ม (PORE WATER PRESSURE)

ในการตอกเสาเข็ม จะทำให้เกิด EXCESS PORE PRESSURE ขึ้นซึ่งอาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ขึ้นอยู่กับประวัติการรับน้ำหนักในอดีต (STRESS HISTORY) ของดินนั้น

KOIZUMI & ITO (1967) ได้ทดลองวัดค่า PORE PRESSURE ของ SLIGHTLY OVERCONSOLIDATED SILTY CLAY หลังการตอกเสาเข็มใหม่ ๆ ปรากฏว่าผลที่อ่านได้มีค่าประมาณ 3-4 เท่าของค่า TOTAL OVERBURDEN PRESSURE

MEYERHOF (1976) ได้สรุปผลจากการสังเกตในสนามว่า ค่าสูงสุดของ PORE WATER PRESSURE ในดินเหนียวอ่อน จะประมาณ 5-7 เท่าของค่า S_u

TORSTENSSON (1973b) ได้ทดลองวัดค่า PORE WATER PRESSURE ปรากฏว่าอยู่ในช่วงประมาณ 4-5 เท่าของ S_u

จากการวิเคราะห์และสังเกตพบว่าค่า PORE WATER PRESSURE ในส่วนที่ติดกับผิวของเสาเข็มอาจจะมีค่าสูงมากจนทำให้เกิด HYDRAULIC FRACTURING ระหว่างการตอกได้ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยร้าวเป็นรัศมี (RADIAL CRACK) รอบเสาเข็ม (MASSARSCH, 1976) ซึ่งรอยร้าวลักษณะนี้ได้รับการยืนยันจากการพบของ TOMLINSON (1971) และ HOLTZ & HOLM (1972) เช่นกัน รอยร้าวตามรัศมีจะหายไปเมื่อค่าของ PORE WATER PRESSURE ใกล้เคียงกับค่า INITIAL LATERAL EFFECTIVE STRESS ของดินนั้น

TORSTENSSON (1975) ได้พัฒนาเครื่องมือวัด PORE PRESSURE สามารถวัดค่าได้ขณะตอกเสาเข็ม ได้พบว่า EXCESS PORE PRESSURE ของเสาเข็มกลมจะมีค่ามากที่สุดที่ปลายเสา และจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากปลายเสาเพิ่มขึ้น

สุรชัย (1972) ได้พบว่าในดินกรุงเทพฯ PORE PRESSURE ที่ปลายเสาเข็มจะมากกว่าส่วนอื่น ๆ ของเสาเข็ม และค่า PORE PRESSURE จะมีค่ามากที่สุดที่ระยะประมาณ 1.00 ม. จากศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิด LOCAL SHEAR FAILURE เมื่อพ้นระยะนี้ไปแล้วค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว ค่าความดันน้ำโพรงเพิ่มที่มีค่าสูงสุดนี้จะกระจายออกไปหมดภายใน 30 วัน หลังจากตอกเสาเข็มแล้วเสร็จ

2.3.2.3 การอุคของดิน (GROUND HEAVE)

HEAVE ที่เกิดจากการตอกเสาเข็มจะมีมากเมื่อระยะระหว่างเสาเข็มที่ตอกลงไปมีค่าน้อยและเสาเข็มยาว จากการวัดพบว่า HEAVE ในเสาเข็มกลุ่มจะมีค่าประมาณ 40-60% ของปริมาตรทั้งหมดของเสาเข็ม (CASAGRANDE, 1947; TSCHBOTARIOFF & SCHUYLER, 1948; HAGERTY, 1969; TORSTENSSON, 1973a; MASSARSCH, 1976;) ปริมาตรของ HEAVE จะมีค่าน้อยกว่าปริมาตรทั้งหมดของเสาเข็มที่ตอกลงไป ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการที่ EXCESS PORE PRESSURE สามารถแพร่กระจายได้รวดเร็ว ซึ่งทำให้การยุบตัวแบบคายน้ำเกิดขึ้นได้รวดเร็วตามไปด้วย

โดยทั่วไป ครึ่งหนึ่งของปริมาตรดินทั้งหมดที่ HEAVE จะปรากฏนอกบริเวณเสาเข็มกลุ่ม (HAGERTY, 1969) สำหรับ SOFT SENSITIVE CLAY จะเกิด HEAVE ภายในฐานรากประมาณ 60-30% ในกรณีที่มีการขุดดินลึกแล้วตอกเสาเข็ม และระยะระหว่างเสาเข็มน้อยกว่า 4 เท่าเส้นผ่านศูนย์กลาง GROUND HEAVE จะมีค่าประมาณ 0.5 ม. MASSARSCH (1976) ได้ใช้วิธี FINITE ELEMENT ศึกษาหาตัวแปรที่มีผลต่อ HEAVE ซึ่งสรุปได้ว่า ลักษณะการจัดเรียงตำแหน่งเสาเข็มในกลุ่ม ลำดับการตอกเสาเข็ม และความลึกของดินที่ขุดออกก่อนตอกเสาเข็มมีผลต่อ HEAVE

2.3.2.4 กำลังของดิน (SHEAR STRENGTH)

เมื่อตอกเสาเข็ม เสาเข็มจะแทรกดินทำให้ดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มและที่ปลายเสาเข็มถูกรบกวนเป็น REMOLD STATE ซึ่งทำให้ค่าแรงเฉือนของดินลดลงจากสภาพก่อนตอก นอกจากนี้เสาเข็มที่ตอกลงไปในดินจะทำให้แรงดันทางด้านข้างของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ COMPRESSIBILITY และ SHEAR STRENGTH ของดินนั้น ผลจากการที่ดินเปลี่ยนจากสภาพปกติมาเป็น REMOLD STATE และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านข้างนี้ ทำให้ความดันน้ำในโพรง (PORE WATER PRESSURE) ของดินเปลี่ยนไป ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับ STRESS HISTORY ของดิน คือ หากดินนั้นเป็นชนิด NORMALLY CONSOLIDATED และ OVERCONSOLIDATED ความดันน้ำในโพรงจะมีค่าสูงขึ้นหลังการตอกใหม่ ๆ ในขณะที่ดินชนิด HEAVILY OVERCONSOLIDATED นั้นความดันน้ำในโพรงจะลดลง

เมื่อเวลาผ่านไปค่าความดันน้ำโพรงนี้ก็เปลี่ยนแปลงอีก โดยจะปรับเข้าสู่ค่าความดันน้ำโพรงก่อนตอกเสาเข็ม โดยถ้าเป็นดินชนิด NORMALLY CONSOLIDATED และ OVERCONSOLIDATED ค่าความดันน้ำโพรงจะมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้กำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และหากดินเป็นชนิด HEAVILY OVERCONSOLIDATED ค่าความดันน้ำโพรงจะมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังของเสาเข็มจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่กำลังของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ค่า FINAL SHEAR STRENGTH ที่ผิวของเสาเข็มมักจะมีค่ามากกว่าก่อนตอกเสาเข็ม ทั้งนี้เพราะ WATER CONTENT ในดินบริเวณดังกล่าวลดลงอย่างมาก ลักษณะเช่นนี้จะเห็นได้จากการที่ได้ถอนเสาเข็มซึ่งตอกในดินเป็นเวลา 30 ปีขึ้นมา พบว่าได้มีแผ่นของดินหนาประมาณ 0.1 ม. หุ้มอยู่รอบ ๆ เสาเข็มนั้น แผ่นดินที่หุ้มรอบเสาเข็มนี้อาจมีผลมากต่อการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ดินบริเวณโดยรอบ (TOMLINSON, 1977)

ในกรณีที่ SHEAR STRENGTH ของดินลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปหลังจากการตอกเสาเข็มแล้วนั้น ได้เคยพบว่ากำลังลดไปถึง 50% ก็มี

สุรัชย์ (1972) ได้ศึกษาพบว่า เมื่อตอกท่อเหล็กปลายปิดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ซม. ยาว 12.00 ม. ลงในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ค่าแรงเฉือนของดินจะลดลงเฉลี่ยแล้ว 28% โดย FIELD VANE SHEAR TEST หรือลดลงประมาณ 71% โดยวิธี UNCONFINED COMPRESSION TEST ซึ่งกำลังของดินที่เสียไปนี้จะกลับคืนมาภายใน 14 วัน หลังจากการตอกเสาเข็มแล้วเสร็จ

ใน COHESIONLESS SOIL เช่น ทราย หรือ NON PLASTIC SILT เมื่อตอกเสาเข็มลงไปจะทำให้ดินแน่นขึ้น กลับกันหากดินนั้นแน่นอยู่แล้วก็จะทำให้ดินหลวมขึ้น กำลังของเสาเข็มที่ตอกใน COHESIONLESS SOIL มักจะไม่ขึ้นกับเวลา เพราะค่า PERMEABILITY ในดินเหล่านี้มีค่าสูง ค่าความดันน้ำโพรงจึงไม่เปลี่ยนแปลงขณะตอกมากนัก

กรณีที่ COHESIONLESS SOIL มี CLAY หรือ FINE SILT ปนอยู่มาก โดยเฉพาะกรณี DENSE SILTY FINE SAND การตอกเสาเข็มอาจจะทำให้ค่าความดันน้ำโพรงลดลง ฉะนั้นกำลังของเสาเข็มจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

2.4 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกเดี่ยว

การหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก สามารถทำได้หลายวิธี คือ

2.4.1 คำนวณหาโดยวิธีสแตติก

2.4.2 หาจากวิธีไดนามิค

2.4.3 จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

2.4.1 การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก โดยวิธีสแตติก

การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก โดยวิธีสแตติกนี้เป็นการคำนวณหา กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากคุณสมบัติของดินบริเวณที่ตอกเสาเข็ม โดยเท่ากับผลรวมของแรงต้านอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของเสาเข็มกับดินโดยรอบ (FRICTION) และแรงต้านทานที่ปลายเข็ม (END BEARING) ลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็มดังสูตรในสมการที่ 2.1

$$Q_{ULT} = Q_s + Q_p - W_p \quad (2.1)$$

โดยที่

$$Q_{ULT} = \text{กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม}$$

$$Q_s = \text{แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม}$$

$$Q_p = \text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม}$$

$$W_p = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม}$$

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีสแตติกนี้ มีสมมุติฐานว่าแรงเสียดทานที่ผิวและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม มีค่าสูงสุดพร้อมกัน ที่การทรุดตัวเดียวกันของเสาเข็ม รูปแบบทั่วไปของสมการที่ใช้หากำลังน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ดังนี้

การหาแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม

$$Q_s = A_s f_s$$

$$f_s = C_a + \sigma_n \tan \phi_a$$

โดยที่

$$f_s = \text{หน่วยแรงเฉือนระหว่างเสาเข็มและดินที่เกิดจากแรงเสียดทาน (PILE-SOIL SHEAR STRENGTH)}$$

$$C_a = \text{แรงยึดเกาะ (ADHESION)}$$

- σ_n = ความเค้นในแนวราบตั้งฉากกับผิวเสาเข็ม (NORMAL STRESS BETWEEN PILE AND SOIL)
 = $K_s \sigma_v$
 K_s = สัมประสิทธิ์ความกดดันด้านข้างของเสาเข็ม (COEFFICIENT OF LATERAL EARTH PRESSURE)
 σ_v = ความเค้นในแนวตั้งของดิน (VERTICAL STRESS)
 ϕ_a = มุมเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็ม
 A_s = พื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาเข็ม ซึ่งจะคิดตามแนวการพังทลายของดินมากกว่าจะคิดพื้นที่ผิวจริงของเสาเข็ม

จะเขียนได้ว่า

$$Q_s = A_s (C_a + K_s \sigma_v \tan \phi_a) \quad (2.2)$$

การหาแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

$$Q_p = A_p q_E$$

$$q_E = (C N_c + \sigma_v N_q + 0.5 B N_\gamma)$$

โดยที่

- q_E = หน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม
 C = หน่วยแรงเหนียวของดิน (COHESION)
 σ_v = ความเค้นในแนวตั้งของดิน
 = หน่วยน้ำหนักของดิน
 B = ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายเสาเข็ม
 N_c, N_q, N_γ = ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทานของดิน (BEARING CAPACITY FACTOR) เมื่อ $\phi = 0$
 N_q จะมีค่าเท่ากับ 1 และ N_γ จะมีค่าเท่ากับ 0
 A_p = พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม

จะเขียนได้ว่า

$$Q_p = A_p (C N_c + \sigma_v N_q + 0.5 B N_\gamma) \quad (2.3)$$

จะนั่นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดังสมการ 2.1 จะเขียนใหม่ในรูปแบบทั่วไปได้ว่า

$$Q_{ULT} = A_s (C_a + K_s \sigma_v \tan \phi_a) + A_p (C_{Nc} + \sigma_v N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma) - W \quad (2.4)$$

การหาค่า Q_{ULT} นั้น ทำได้ 2 รูปแบบ คือ ใช้การวิเคราะห์แบบ TOTAL STRESS และ EFFECTIVE STRESS ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และระยะเวลาที่เราสนใจอยากทราบความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มนั้น

2.4.1.1 การวิเคราะห์แบบ TOTAL STRESS

การวิเคราะห์แบบ TOTAL STRESS นี้จะใช้กับดิน COHESIVE ที่มีประวัติการรับน้ำหนักในอดีตเป็น NORMALLY CONSOLIDATED และ OVER CONSOLIDATED ซึ่งเสาเข็มที่อยู่ในดิน สภาพทั้งสองนี้จะมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยที่สุดเมื่อถูกน้ำหนักกระทำใหม่ ๆ ต่อมาเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกก็จะเพิ่มขึ้น ฉะนั้นปัญหาวิกฤตของการรับน้ำหนักจึงอยู่ในช่วงระยะสั้น

การวิเคราะห์แบบ TOTAL STRESS ที่ใช้กันอยู่ขณะนี้ ใช้หลักการ $\phi = 0$ ซึ่งหมายความว่า COHESION, C จะมีค่าเท่ากับกำลังเฉือนของดินแบบอันเดรน (S_u) ซึ่งได้มาจากการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSION หรือ UNCONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION ฉะนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ 2.4 ในส่วนของแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม จะได้ว่า

$$\text{เมื่อ } \phi = 0$$

$$Q_s = A_s C_a = \alpha S_u A_s, \quad C_a = \alpha S_u \quad (2.5)$$

โดยที่ = ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ
(ADHESION FACTOR)

S_u = ค่ากำลังเฉือนแบบอันเดรนของดิน
ซึ่งได้จากการทดลองแบบ UNCONFINED

COMPRESSION หรือ UNCONSOLIDATED
UNDRAIN TRIAXIAL COMPRESSION

และในส่วนองแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

$$C = S_u, Q_p = A_p (S_u N_c + \sigma_{vo}) \quad (2.6)$$

จะนั้นในกรณีวิเคราะห์แบบ TOTAL STRESS นี้

$$Q_{ULT} = \alpha S_u A_s + A_p (S_u N_c + \sigma_{vo}) \quad (2.7)$$

ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) เป็นค่าที่ประเมินได้ยาก ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ

ดังนี้

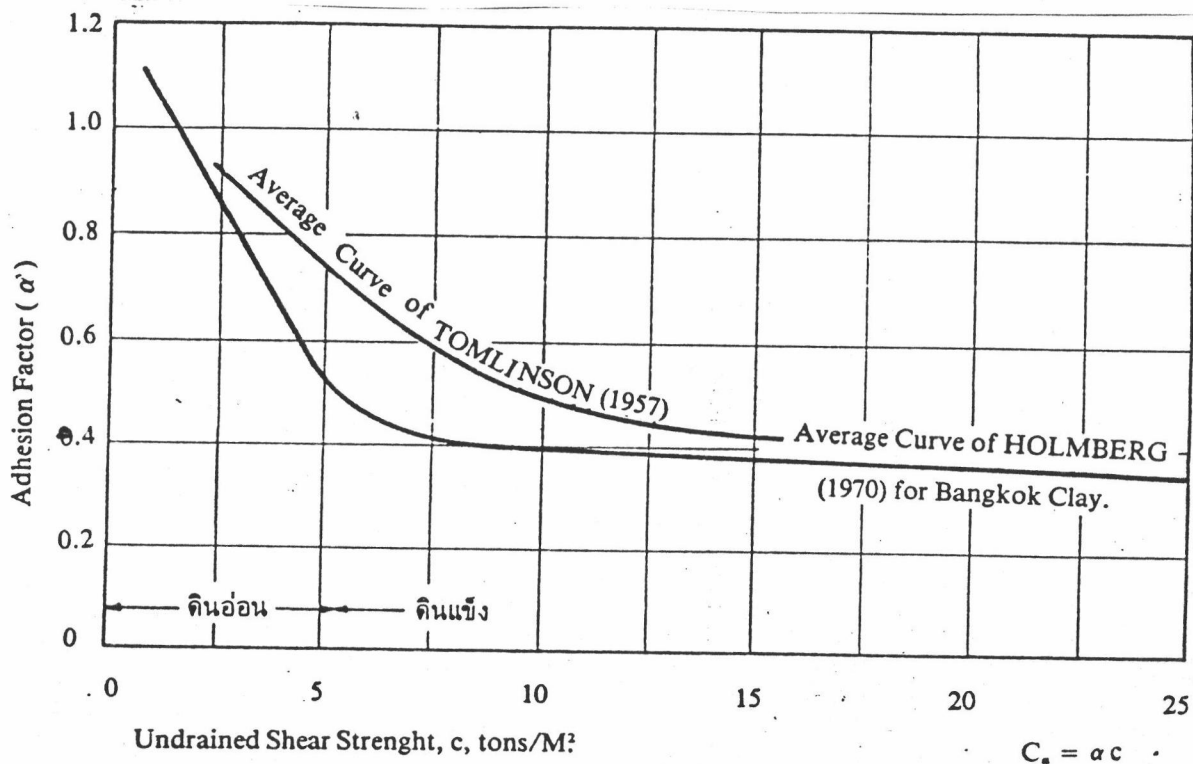
- คุณสมบัติของดิน
 - ค่ากำลังเฉือนของดิน
 - วิธีการตรวจวัดค่ากำลังเฉือนของดิน
 - PLASTICITY INDEX (BJERRUM, 1973 ; FLAAT AND SELNES, 1977)
 - ลักษณะเรียงชั้นของชั้นดิน (TOMLINSON, 1970)
- คุณสมบัติของเสาเข็ม- วัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม
 - รูปร่างของเสาเข็ม FELLENIUS (1955)
 - ชนิดของเสาเข็ม
 - วิธีการตอกเสาเข็ม

ระยะเวลาหลังจากการตอกเสาเข็ม

TOMLINSON (1957) เสนอค่า α ของดิน COHESIVE สัมพันธ์กับค่า S_u ที่ได้จากการทดสอบโดย UNCONFINED COMPRESSION สำหรับใช้คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.4.1

BROMS (1966) ได้แนะนำค่า α ดังตารางที่ 2.1

HOLMBERG (1970) ได้ศึกษาค่า α ของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ในเขตจังหวัดพระนครหรืออยุธยา โดยสัมพันธ์กับค่ากำลังเฉือนแบบขั้นเดรนที่ได้จากการทดสอบ GEONOR FIELD VANE สรุปดังรูปที่ 2.4.1



รูปที่ 2.4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u สำหรับเสาเข็มตอก เสนอโดย TOMLINSON (1957) และ HOLMBERG (1970)

(a) $C_u < 1000 \text{ lb/ft}^2$	<u>Adhesion C_a</u>
Steel piles	0.5 c_u
Concrete piles	0.8 c_u
Wood piles	1.0 c_u
(b) $C_u > 1000 \text{ lb/ft}^2$	
Steel piles	200 lb/ft^2
Concrete piles	600 lb/ft^2
Wood piles	1000 lb/ft^2

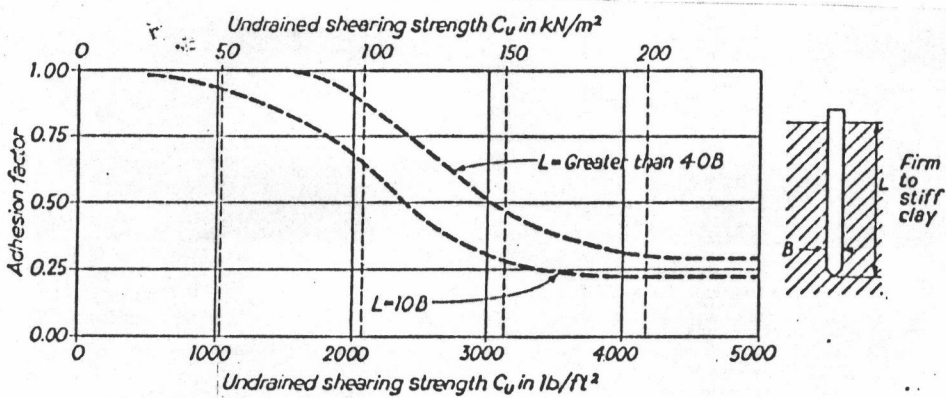
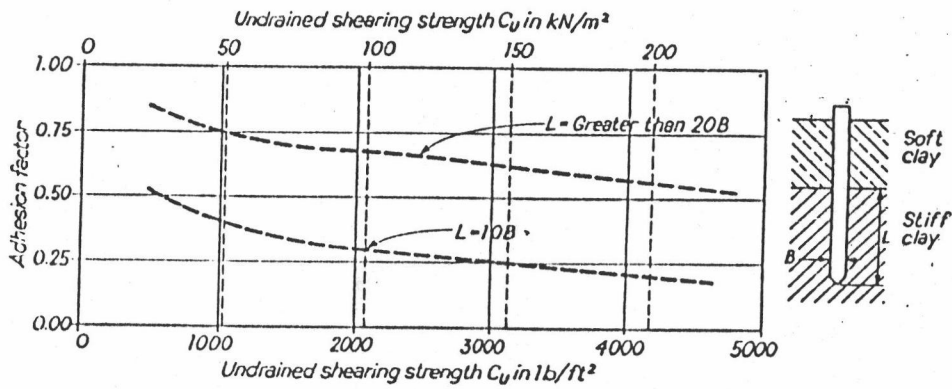
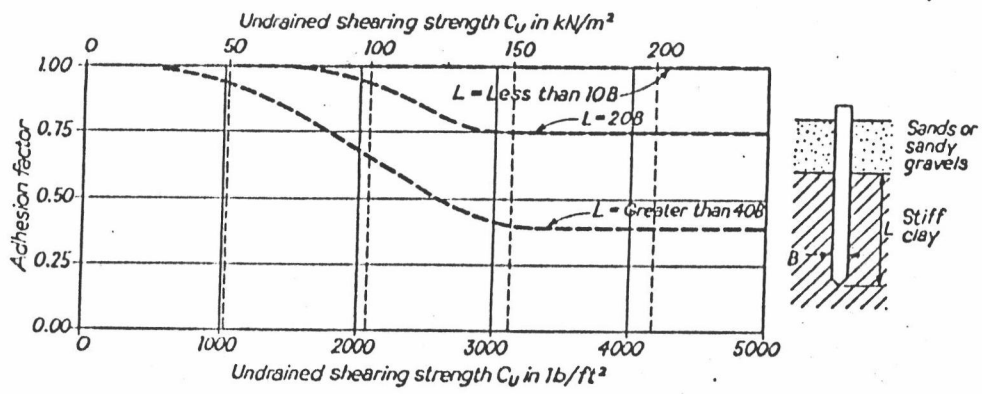
ตาราง 2.1 ค่าตัวประกอบการยึดเกาะสำหรับเสาเข็มตอกชนิดต่าง ๆ ในดิน

COHESIVE BROMS (1966)

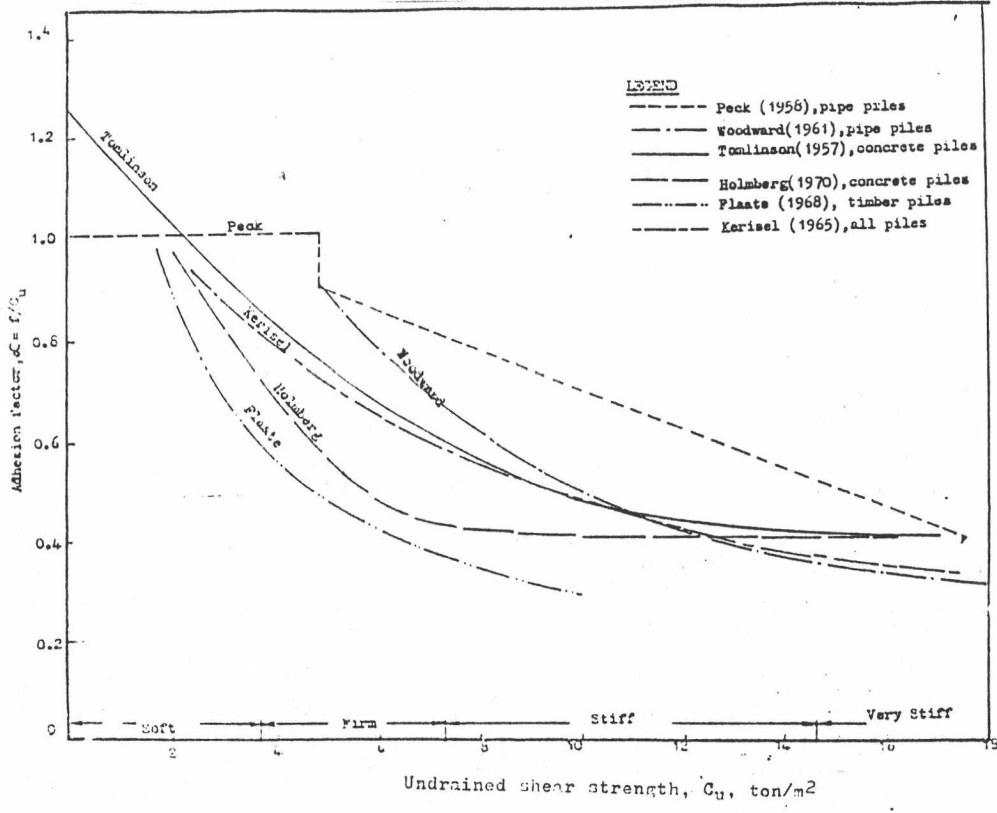
TOMLINSON (1970) ได้ศึกษาเสาเข็มจำนวน 93 ต้น ดอกในดินชนิดแข็งถึงแข็งที่สุด (STIFF TO HARD) สรุปได้ว่าลักษณะการเรียงชั้นของชั้นดินมีผลต่อค่าตัวประกอบการยึดเกาะ จึงได้แบ่งค่าประกอบการยึดเกาะออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 เสาเข็มที่ตกลงไปในชั้นดินที่มีชั้นทราย หรือกรวดวางด้านบนชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งที่สุด ดังรูป 2.4.2
- กรณีที่ 2 เสาเข็มที่ตกลงไปในชั้นดิน ที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนวางด้านบนชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งที่สุด ดังรูป 2.4.2
- กรณีที่ 3 เสาเข็มที่ตกลงไปในชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งที่สุดตลอดชั้น ไม่มีดินลักษณะอื่นแทรกเลย ดังรูป 2.4.2

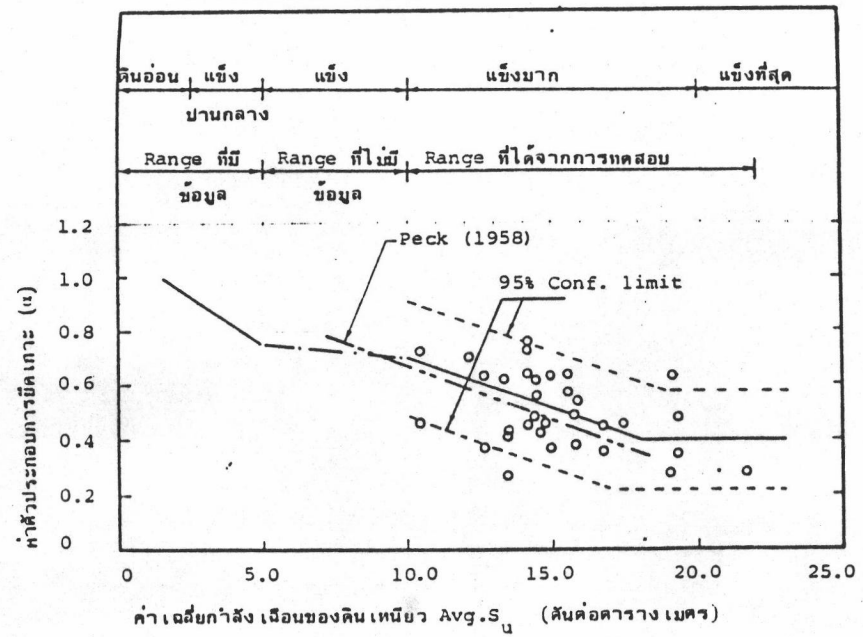
Mc CLELLAND (1974) ได้รวบรวมค่าตัวประกอบการยึดเกาะของเสาเข็มดอก ซึ่งได้จากการศึกษาของตน ดังรูปที่ 2.4.3



รูปที่ 2.4.2 ค่าตัวประกอบการยึดเกาะสัมพันธ์กับค่าแรงเฉือนแบบอันเดรนจากการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSION, TOMLINSON (1970)



รูปที่ 2.4.3 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะกับแรงเฉือนแบบอันเดรน McCLELLAND (1974)



รูปที่ 2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะของเสาเข็มตอกในดินกรุงเทพฯ กับแรงเฉือนแบบอันเดรนที่ได้จากการทดลอง UNCONFINED COMPRESSION วีรพันธ์ (2526)

วีรพันธ์ (2526) ได้ทำการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะของดินเหนียวแข็ง กับค่าแรงเฉือนแบบอันเดรอน ที่ได้จากการทดลอง UNCONFINED COMPRESSION จากเสาเข็มตอกทำด้วยคอนกรีตอัดแรงจำนวน 32 ต้น ในดินกรุงเทพ ดังรูปที่ 2.4.4 ซึ่งพบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนแบบอันเดรอนมีค่า 10.0 - 17.0 ตัน ต่อตารางเมตร ค่าตัวประกอบการยึดเกาะที่หาได้ใกล้เคียงกับค่าที่เสนอโดย PECK (1958) ซึ่งได้จากการศึกษาเสาเข็มชนิด PIPE และแนวโน้มของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบ การยึดเกาะกับค่าเฉลี่ยแรงเฉือนแบบอันเดรอน ที่หาได้ให้ค่ามากกว่าที่เสนอโดย HOLMBERG (1970) และ TOMLINSON (1957) แต่ให้ค่าน้อยกว่าของ TOMLINSON (1970) เมื่อค่าอัตราการฝังตัวมากกว่า 20 แต่เมื่อค่าอัตราการฝังตัวอยู่ระหว่าง 8 ถึง 20 ค่าที่ได้กลับมากกว่า ในกรณีที่ 2 ซึ่งมีชั้นดินเหนียวอ่อนวางตัวบนชั้นดินเหนียวแข็งซึ่งตรงกับลักษณะและสภาพของชั้นดินกรุงเทพ อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบการยึดเกาะที่หาได้ยังคงอยู่ในช่วงที่เสนอโดย TOMLINSON (1970)

จากที่กล่าวมาและจากการศึกษาของบุคคลอื่นอีก เช่น WOOD ET AL. (1961), COYLE and REESE (1966), VESIC (1967), MORGAN and POULOS (1968) จะเห็นว่าค่าที่เสนोक่อนข้างแตกต่างกันมาก แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันว่าในกรณีของดินเหนียวอ่อน ซึ่งเมื่อมีค่า S_u น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.4 ตันต่อตารางเมตรแล้ว ค่าตัวประกอบการยึดเกาะจะมีค่าเท่ากับ 1 และเมื่อดินมีค่ากำลังเฉือนมากขึ้น ค่าตัวประกอบการยึดเกาะจะมีค่าลดลง

ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทานของดิน (N_c)

ค่า N_c ที่ใช้ในการออกแบบอยู่เสมอและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป คือค่าที่เสนอโดย SKEMPTON (1951) ดังรูปที่ 2.4.5 ในกรณีปลายเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นดินที่จะพิจารณาเกินกว่าหรือเท่ากับ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อเสาเข็มเป็นเสากลม หรือ 4 เท่าของความกว้างหน้าเสา เมื่อเสาเข็มเป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัส N_c จะมีค่าเท่ากับ 9.0 หากกรณีที่เสาเข็มเป็นรูปสี่เหลี่ยมอื่นก็ให้ใช้วิธีเทียบอัตราส่วนจากกราฟทั้งสอง

นอกจากนี้ Sower (1961) ได้พบว่า N_c มีค่าอยู่ระหว่าง 5-8 ถ้าหากทดสอบหาด้วยแบบจำลอง MOHAN (1961) พบว่าสำหรับ EXPANSIVE CLAYS N_c จะมีค่าระหว่าง 5.7-8.2 LADANYI (1973) และ ROY ET AL (1974) พบว่าค่า N_c จะเปลี่ยนไปตามค่า SENSITIVITY ของดิน คือจะมีค่าประมาณ 5 สำหรับ VERY SENSITIVE NORMALLY CONSOLIDATED CLAY ถึงประมาณ 10 สำหรับ INSENSITIVE STIFF OVER

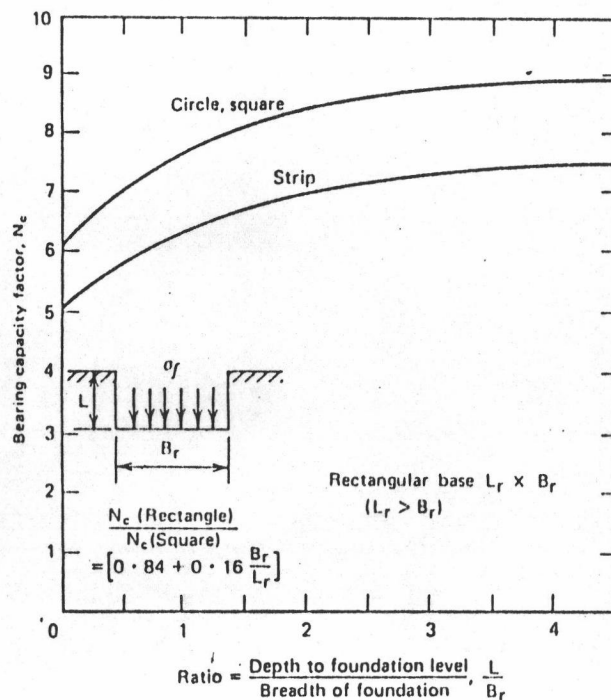
CONSOLIDATED CLAY, BROMS (1977) พบว่าสำหรับ VERY HIGHLY SENSITIVE CLAY (QUICK CLAYS) ค่า N_c สามารถลดลงเหลือ 4

ความเค้นในแนวตั้งของดิน (σ_v)

ความเค้นในแนวตั้งของดิน COHESIVE สามารถหาได้โดยให้เท่ากับแรงที่เกิดจากน้ำหนักของดินช่วงบน ๆ ของจุดที่ต้องการหา σ_v ทั้งนี้เพราะในดิน COHESIVE ค่า ทั้งสองไม่แตกต่างกันนัก ไม่เหมือนกับในกรณี COHESIONLESS SOIL

2.4.1.2 การวิเคราะห์แบบ EFFECTIVE STRESS (BURLAND 1973)

การวิเคราะห์แบบ EFFECTIVE STRESS นี้ นิยมใช้กับดิน COHESIVE ที่มีประวัติการรับน้ำหนักในอดีตเป็น HEAVILY OVER CONSOLIDATED และดิน COHESIONLESS ซึ่งดินเหล่านี้เมื่อมีน้ำหนักมากจะทำให้ความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Δu) มีค่าเป็นลบ ดังนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกก็จะลดลง ปัญหาวิกฤตของการรับน้ำหนักจึงอยู่ที่ช่วงระยะเวลา



รูปที่ 2.4.5 ค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทานของดินเหนียวภายใต้หลักการ

$\phi = 0$ SKEMPTON (1951)

แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเมื่อวิเคราะห์แบบ EFFECTIVE STRESS จะได้ว่า

$$Q_s = A_s K_s \sigma_{vo} \tan \phi_a \quad (2.8)$$

โดยที่ σ_{vo} = ความเค้นในแนวตั้งของดินในรูป EFFECTIVE

ϕ_a = มุมเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็มในรูป EFFECTIVE
และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

$$C=0, Q_p = A_b \sigma_{vo} N_q \quad (2.9)$$

เทอม $0.5 \times BN_q$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\sigma_{vo} N_q$ จึงไม่ต้องนำมา

พิจารณาด้วย

ฉะนั้น ในการวิเคราะห์แบบ EFFECTIVE STRESS นี้

$$Q_{ULT} = A_s K_s \sigma_{vo} \tan \phi_a + A_b \sigma_{vo} N_q \quad (2.10)$$

สัมประสิทธิ์ความกดดันด้านข้างของเสาเข็ม (K_s)

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อค่า K_s มีหลายประการ ดังต่อไปนี้

(Mc CLELLAND, FOCHT and EMRICH, 1969; VESIC, 1970)

1. รูปร่างลักษณะของเสาเข็ม
2. ปริมาณดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม
3. วิธีการก่อสร้างเสาเข็ม
4. ลักษณะแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม
5. ค่าสัมประสิทธิ์ความกดดันด้านข้างภาวะปกติของดิน (K_0) ก่อนตอกเสาเข็ม
6. ความหนาแน่นของดินก่อนตอกเสาเข็ม

MEYERHOF (1951) ได้แนะนำค่า K_s สำหรับใช้ในการออกแบบ โดยมีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับทรายหลวม และมีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับทรายแน่น ซึ่งค่าที่ให้นี้ไม่คำนึงถึงชนิดต่าง ๆ ของเสาเข็มเลย จากการทดลองในภายหลังปรากฏว่าค่าดังกล่าวค่าเกินไปสำหรับเสาเข็มไม้และเสาเข็มคอนกรีต

ค่า K_s ที่แนะนำโดย MEYERHOF (1951) นี้เมื่อให้สัมพันธ์กับค่า N จาก STANDARD PENETRATIONS และจะได้ดังนี้

N (BLOWS PER FOOT)	COMPACTIONESS	K_s
0 - 4	หลวมมาก	0.5
4 - 10	หลวม	0.6
10 - 30	แน่นปานกลาง	0.7
30 - 50	แน่น	0.8
> 50	แน่นมาก	1.0

BROMS (1966) ได้แนะนำค่า K_s ทั้งนี้โดยได้พิจารณาถึงปริมาณของดินที่จะถูกแทนที่, ชนิดของเสาเข็มด้วย ดังนี้

ชนิดของเสาเข็ม	ลักษณะของดิน	
	LOW RELATIVE	HIGH RELATIVE
	DENSITY	DENSITY
	$N < 20$	$N > 20$
เสาเข็มเหล็ก	0.5	1.0
เสาเข็มคอนกรีต	1.0	2.0
เสาเข็มไม้	1.5	4.0

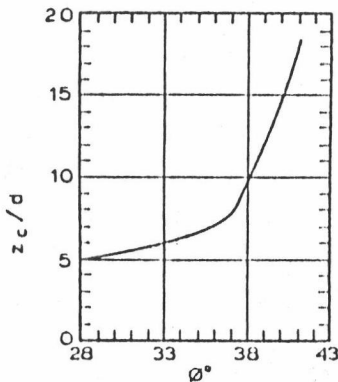
VESIC (1967) ได้ศึกษาจากผลการทดลองเสาเข็มท่อเหล็ก (STEEL TUBE PILES) โดยหาความสัมพันธ์ของค่า $K_s \tan \phi'$ กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (D_r) แต่ก็สามารถแปลงให้มาอยู่ในรูปของค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' ได้ โดยใช้วิธีการที่แนะนำ โดย MEYERHOF (1956)

$$\phi' = 28 + 15 D_r$$

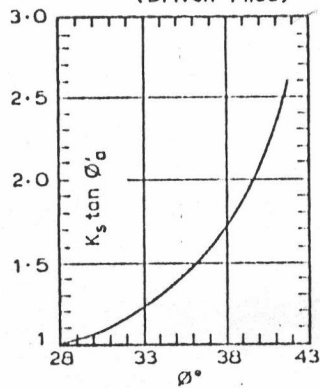
ฉะนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \phi'_a$ และ ϕ ดังรูปที่ 2.4.6

เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีการพิจารณาถึงชนิดและวัสดุของเสาเข็ม ฉะนั้นค่า $K_s \tan \phi'_a$ นี้จึงนำมาใช้กับเสาเข็มคอนกรีตด้วย

(a) z_c/d vs ϕ



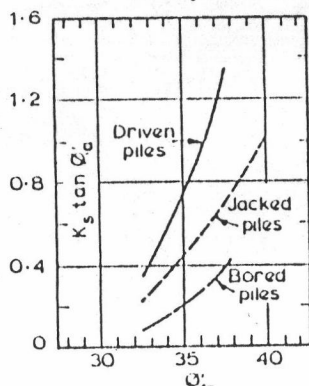
(b) $K_s \tan \phi'_a$ vs ϕ
(Driven Piles)



$$\phi = 3/4 \phi_1 + 10$$

ϕ_1 มุมเสียดทานภายในของดิน
ก่อนการตอกเสาเข็ม

(c) Values of $K_s \tan \phi'_a$ Based on Meyerhof (1976)

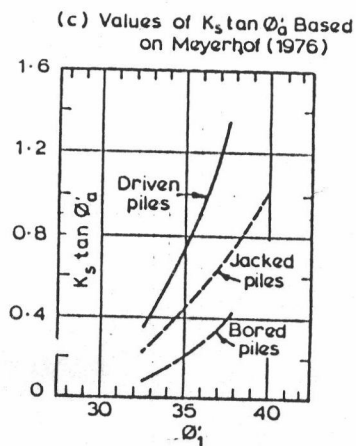


รูปที่ 2.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \phi'_a$ และ ϕ (VESIC, 1967)

MEYERHOF (1976) ได้แนะนำค่า $K_s \tan \phi'_a$ จากการศึกษาจากข้อมูลต่าง ๆ และใช้ค่า $\phi'_a = 3/4 \phi'$ ดังรูปที่ 2.4.7

POULOS & DAVIS (1980) ได้กล่าวถึงค่า $K_s \tan \phi'_a$ ที่เสนอโดย MEYERHOF (1976) ว่าเหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบ

TOMLINSON (1981) ได้กล่าวถึงค่า K_s ที่เสนอโดย BROMS (1966) ว่า เป็นค่าที่ค่อนข้าง CONSERVATIVE โดยเฉพาะในกรณีเสาเข็มที่มีปลายสอบ (TAPERED PILES) และเป็นค่าที่วิธีใช้งานง่าย



รูปที่ 2.4.7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \phi'_a$ และ ϕ' จาก MEYERHOF (1976)

ความเค้นในแนวตั้งของดิน (6v)

ค่าความเค้นในแนวตั้งของดินที่ใช้ในสมการ 2.10 นี้ NORDLUND (1963) และ BROMS (1966) สมมุติฐานว่าเท่ากับความเค้นเนื่องจากน้ำหนักดินเอง

KERISEL (1961) และ VESIC (1967) ได้พบว่าหน่วยแรงเสียดทาน และหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มนั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นกับความลึกเสมอไป โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนการฝังตัว (PENETRATION DEPTH/WIDTH RATIOS) เกิน 10-20 คือ ในช่วงความลึกหนึ่งหน่วยแรงทั้งสองจะเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นหน่วยแรงทั้งสองจะมีค่าค่อนข้างคงที่ดังรูปที่ 2.4.8 และ 2.4.9 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ก็ได้อธิบายโดย BCP COMM. (1971), HANNA AND TAN (1973) เช่นกัน จากลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าบริเวณใกล้ ๆ ปลายเสาเข็มนั้น ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่าความเค้นซึ่งเกิดจากน้ำหนักดินเองเสมอไป

มมเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็ม (ϕ'_a)

มมเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็ม (ϕ'_a) มักกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์กับค่ามมเสียดทานภายในของดิน ϕ'

POTYONDY (1961) ได้แนะนำค่า ϕ'_a ว่ามีค่าระหว่าง $0.64 \phi'$ สำหรับเสาเข็มเหล็กผิวเรียบ ถึง $0.9 \phi'$ สำหรับเสาเข็มคอนกรีตผิวหยาบ ในกรณีที่เป็นดินทรายอิมตัว

ต่อมา POTYONDY ได้ทำการวัดค่า ϕ'_a ของเสาเข็ม ชนิดต่าง ๆ สำหรับเสาเข็มคอนกรีตผิวเรียบจะได้ค่าน้อยกว่ามมเสียดทานภายในของดิน 4 - 5 องศา ส่วนเสาเข็มไม้ นั้นค่าจะเปลี่ยนไปแล้วแต่ทิศทางของเสี้ยนไม้ ในกรณีเสี้ยนไม้มีทิศทางตามแรงเฉื่อยที่กระทำค่า ϕ'_a ที่จะได้้น้อยกว่ามมเสียดทานภายในของดิน ประมาณ 4 - 10 องศา

BROMS (1966) ได้แนะนำค่า ϕ'_a เพื่อใช้ในการออกแบบ ดังนี้

ชนิดเสาเข็ม	ϕ'_a
เสาเข็มเหล็ก	20 องศา
เสาเข็มคอนกรีต	$3/4 \phi'$
เสาเข็มไม้	$2/3 \phi'$

MEYERHOF (1976) ในกรณีเสาเข็มคอนกรีต ได้สมมุติฐานว่า $\phi'_a = 3/4 \phi'$ เช่นกัน

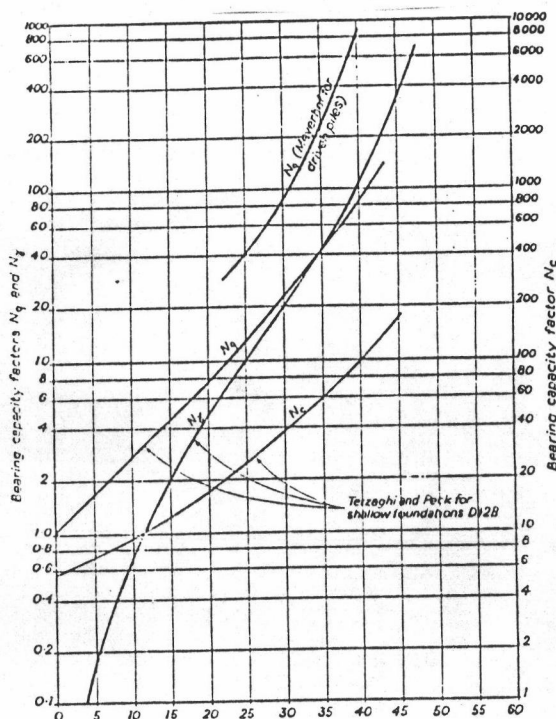
ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทาน N_q

มีนักวิจัยหลายคนที่ศึกษาหาค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทาน N_q ซึ่งค่าที่ได้แตกต่างกันมาก แล้วแต่สมมุติฐานของการเกิดการพังทลายในมวลดินของแต่ละคน

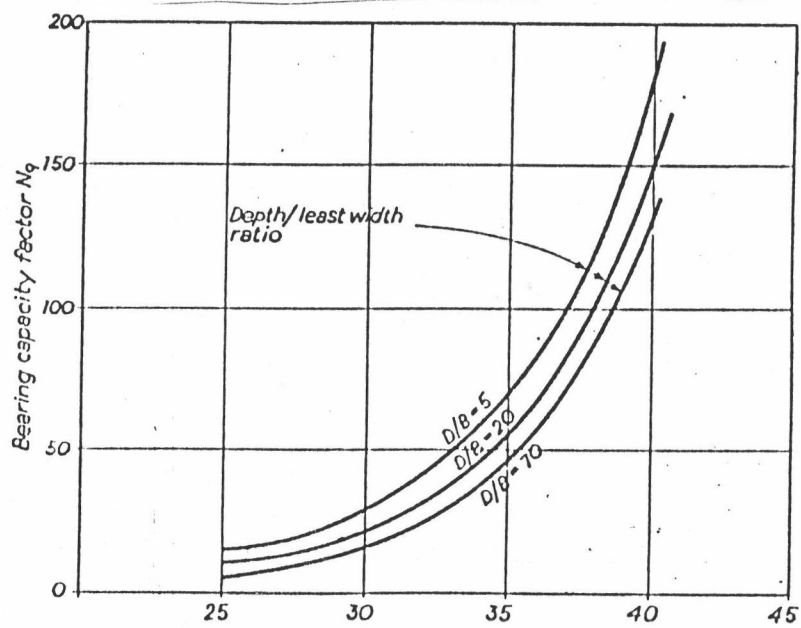
MEYERHOF (1951) ได้เสนอค่า N_q ดังรูปที่ 2.4.8 โดยได้จากการ fail ของเสาเข็ม ขณะที่เสาเข็มทรุดตัวลงโดยที่ไม่มีแรงมากระทำเพิ่มเติม

BEREZANTSEV, KRISTOFOROV AND GOLUBKOV (1961) ได้พบว่า ค่า N_q มิได้ขึ้นอยู่กับค่ามุมเสียดทานภายในของดินเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการฝังตัวของเสาเข็มด้วย ทั้งยังได้เสนอค่า N_q ดังรูปที่ 2.4.9 ซึ่งได้รับการยืนยันจากการศึกษาของ NORDLUND (1963) และ VESIC (1964) ว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะการพังทลายของเสาเข็มตรงกับการปฏิบัติงานจริง และ BROMS (1966) ได้แนะนำให้ใช้ค่า N_q ดังกล่าวในการออกแบบ

TERZAGHI AND PECK (1967) ได้แนะนำค่า N_q ดังรูปที่ 2.4.8 ซึ่งตามปกติจะใช้กับฐานรากตื้น ($D < B$) แต่ก็สามารถนำมาใช้กับการหาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มได้เช่นกันแม้ว่าค่าที่ได้จะ CONSERVATIVE ไปบ้าง



รูปที่ 2.4.8 ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทานจาก MEYERHOF (1951) และ TERZAGHI AND PECK (1967)



รูปที่ 2.4.9 ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงต้านทาน BEREZANTSEV ET AL (1961)

2.4.2 การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก

โดยวิธีสูตรการตอกเสาเข็ม

การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก โดยวิธีนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก ดังนี้

2.4.2.1 โดย EMPIRICAL FORMULAS ซึ่งในปัจจุบันไม่มีใช้แล้ว

2.4.2.2 โดยสมการคลื่น (WAVE EQUATION) ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3

2.4.2.3 โดยสูตรไดนามิค (DYNAMIC FORMULAS)

สูตรไดนามิค กล่าวกันว่ามาถึงประมาณ 400 สูตร แต่เท่าที่ค้นพบในขณะนี้ไม่มีต่ำกว่า 32 สูตร ซึ่งส่วนใหญ่มีสมมุติฐานเหมือนกันคือ ULTIMATE BEARING CAPACITY ของเสาเข็มจะเท่ากับ DYNAMIC FORCE ที่ใช้ตอกเสาเข็มนั้น โดย DYNAMIC FORCE นี้กระทำต่อทุกส่วนของเสาเข็มพร้อมกัน

ฉะนั้นจากสมมุติฐานดังกล่าว และการใช้หลักการคงตัวของพลังงานและโมเมนตัม จะวิเคราะห์ที่มาของสูตรไดนามิค ได้ดังนี้

2.4.2.3.1 ที่มาของสูตร

ในขณะที่ลูกตุ้มจะกระทบหัวเสาเข็มนั้น โมเมนตัมของลูกตุ้ม,

$$Mr \quad \quad \quad = MrVi = WrVi/g$$

และเมื่อลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็มแล้ว โมเมนตัมของลูกตุ้มจะ เปลี่ยน เป็น,

$$Mr \quad \quad \quad = \quad \quad \quad = WrVi/g - I \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad = WrVce/g$$

ฉะนั้นเราสามารถหาได้ว่า $Vce = [WrVi/g - I] g/Wr \dots\dots\dots 1$

ในขณะที่เมื่อลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็มแล้ว ทั้งลูกตุ้มและเสาเข็มจะ เคลื่อนที่

ไปด้วยกัน

ฉะนั้นความเร็วของเสาเข็มในช่วงนี้ก็เท่ากับ Vce ด้วย และโมเมนตัมของเสาเข็มก็จะเท่ากับโมเมนตัมที่ลูกตุ้มถ่ายให้ คือ เท่ากับ I

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } I &= Mp \\ &= Vce Wp/g \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } Vce = Ig/Wp \quad \dots\dots\dots 2$$

$$1 = 2 [W_r V_i / g - I] g / W_r = I g / W_p$$

$$I = V_i W_r W_p / g (W_r + W_p)$$

หลังจากที่ลูกตุ้มกระทบหัวเสาเข็มแล้ว จะมีการคืนตัวขึ้น

$$\text{โมเมนตัมของลูกตุ้มหลังการคืนตัว } W_r V_r / g = W_r V_i / g - I - nI$$

$$V_r = g [W_r V_i / g - I - nI] / W_r$$

$$= (W_r - nW_p) V_i / (W_r + W_p)$$

$$\text{โมเมนตัมของเสาเข็มหลังการคืนตัว } W_p V_p / g = I + nI$$

$$V_p = g [I + nI] / W_p$$

$$= (W_r + nW_r) V_i / (W_r + W_p)$$

เมื่อทราบความเร็วของลูกตุ้มและเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว ก็
สามารถหาพลังงานทั้งหมดได้

$$= W_r V_r^2 / 2g + W_p V_p^2 / 2g$$

$$= W_r [(W_r - nW_p) V_i / (W_r + W_p)]^2 / 2g + W_p [(W_r + nW_r) V_i / (W_r + W_p)]^2 / 2g$$

$$= W_r [V_i^2 (W_r^2 - 2nW_r W_p + n^2 W_p^2) / (W_r + W_p)^2] / 2g +$$

$$W_p [V_i^2 (W_r^2 + 2nW_r W_p + n^2 W_p^2) / (W_r + W_p)^2] / 2g$$

$$= V_i^2 (W_r^3 - nW_r^2 W_p + n^2 W_r W_p^2 + W_r^2 W_p + nW_r^2 W_p +$$

$$n^2 W_r^2 W_p) / 2g (W_r + W_p^2)$$

$$= W_r V_i^2 (W_r^2 + n^2 W_p^2 + W_r W_p + n^2 W_r^2 W_p) / (W_r + W_p) (W_r + W_p) (2g)$$

$$= W_r V_i^2 (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p) (2g)$$

$$\text{ฉะนั้นพลังงานที่สูญเสียจากการสูญเสียขณะกระทบกัน } = W_r h (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p)$$

ซึ่งหากพิจารณาถึงระบบที่ไม่มี การสูญเสียใด ๆ งานที่ให้ย่อมเท่ากับงานที่ได้

$$R_u S = W_r h$$

แต่ตามปกติเครื่องมือที่ใช้ตอกเสาเข็มประสิทธิภาพย่อมไม่เต็ม 100% จะต้องมีการสูญเสีย

$$\text{ต่าง ๆ ฉะนั้น } R_u S = e f W_r h$$

ขณะเดียวกัน เมื่อเกิดการกระทบกันระหว่างวัตถุสองชนิด พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไป

ในกรณีเสาเข็มนี้จะเหลือเท่ากับอัตราส่วน $(W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p)$

$$\text{ฉะนั้น } R_u S = e f W_r h (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p)$$

$$\text{หรือ } Ru = ef W_r h (W_r + n^2 W_p) / S (W_r + W_p)$$

ซึ่งเป็นสมการแม่บทสำหรับสูตรการตอกเสาเข็มทั่วไป

โดยที่

- g = ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก
- h = ระยะยกของลูกตุ้ม
- I = การคลที่เกิดในช่วง Compression หรือ โมเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปขณะลูกตุ้มกระทบหัวเข็ม
- m = มวลของวัตถุ
- Mr = โมเมนต์ของลูกตุ้ม
- Mp = โมเมนต์ของเสาเข็ม
- n = สัมประสิทธิ์ของการคืนตัว
- nI = การคลที่ทำให้เกิดการคืนตัว
- Ru = น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม
- S = ระยะจมของเสาเข็มต่อการตอกของตุ้ม 1 ครั้ง
- Vce = ความเร็วของลูกตุ้มและเสาเข็มในช่วงของการเกิด Compression
- Vi = ความเร็วของลูกตุ้มในขณะที่กระทบกับหัวเสาเข็ม
- Vp = ความเร็วของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว
- Vr = ความเร็วของลูกตุ้มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว
- Wr = น้ำหนักของลูกตุ้ม
- Wp = น้ำหนักของเสาเข็มรวมทั้งน้ำหนักของที่รองหัวเข็ม

สูตรการตอกเสาเข็มนี้ Taylor ได้คิดขึ้นเมื่อ คศ.1948 (พศ.2491) เป็นชาวอเมริกัน ในช่วงสุดท้ายของชีวิตท่านสอนหนังสือที่ M.I.T. ท่านคิดสูตรนี้ 7 ปี ก่อนท่านเสียชีวิต อายุท่าน 55 ปี ชื่อเต็มของท่าน DONALD WOOD TAYLOR

$$\text{จากสูตรแม่บท } RuS = ef W_r h (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p)$$

ถ้าพิจารณาว่าขณะที่ปลายเข็มเคลื่อนที่ไปเท่ากับ S แต่ที่หัวเสาเข็มจะเคลื่อนตัวได้มากกว่า โดยจะต้องเพิ่มขึ้นจาก S อีก เท่ากับ $C = C_1 + C_2 + C_3$

โดยที่ $C_1 = \text{Elastic Compressions in Cap}$
 $C_2 = \text{Elastic Compression of pile}$
 $C_3 = \text{Elastic Compression of soil}$

ซึ่งค่าทั้งสามนี้อยู่ในช่วงอีลาสติคจึงขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ ฉะนั้นเมื่อเพิ่มเติมในสูตรแม่บท
 ในรูปงานก็จะได้ว่า $R_u S + R_u C/2 = e_f W_r h (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p)$

$$R_u [S + C/2] = e_f W_r h (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p)$$

$$\text{ฉะนั้น } R_u = e_f W_r h (W_r + n^2 W_p) / (S + C/2) (W_r + W_p)$$

....HILEY'S FORMULA

โดยที่ค่า C_1, C_2 นั้นสามารถคำนวณหาได้เท่ากับ $R_u l / AE$ โดยเปลี่ยนค่าตามคุณสมบัติ
 ของวัสดุที่ใช้ทำ Cap และ Pile นั้น

ส่วน C_3 นั้นได้จาก Empirical Method

ต่อมาหากพิจารณาถึง REBOUND COEFFICIENT ของ CAP, PILE และดิน ในสูตรของ
 HILEY โดยใช้ค่าที่ได้มาจาก EMPIRICALLY METHOD แล้ว และใช้ FACTOR OF SAFETY
 เท่ากับ 3 ก็จะได้สูตรใหม่ว่า

$$R = 4N e_f W_r h / (S + C/2) \quad \text{CANADIAN NATIONAL BUILDING CODE FORMULA}$$

โดยที่ $R = \text{ALLOWABLE BEARING CAPACITY}$ สำหรับ
 DROP HAMMER ที่ปล่อยลูกตุ้มลงโดยอิสระ

$$N = (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p) \quad \text{สำหรับเสาเข็มเสียดทาน}$$

$$= W_r + 0.5 n^2 W_p / (W_r + W_p) \quad \text{สำหรับเสาเข็มค้ำยันที่ปลาย}$$

$$C = 3R (1/E + 0.001) / 4$$

ค่า ALLOWABLE BEARING CAPACITY นี้จะลดลงเหลือ 80% หากเครื่องตอกเป็น DROP
 HAMMER ชนิดที่ยกและปล่อยลูกตุ้มโดยสลิง, 90% หากเครื่องตอกเป็น SINGLE ACTING HAMMER

ถ้าหากพิจารณาว่า Temporary Compression นั้นมีเฉพาะที่ Pile ส่วนที่ Cap และ
 Soil ไม่มี และประสิทธิภาพของเครื่องตอกเป็น 100% ก็จะได้ว่า

$$R_u = W_r h (W_r + n^2 W_p) / (W_r + W_p) (S + R_u l / 2AE)$$

$$R_u = (AE/l) [-S + \sqrt{S^2 + W_r h (W_r + n^2 W_p) 2l / (W_r + W_p) AE}]$$

..... UNIVERSAL OR STERN FORMULA

ถ้าหากพิจารณาว่าการกระทกันนั้นเป็น PERFECTLY INELASTIC แทนที่ Semielastic ค่า $n = 0$ ก็จะได้ว่า

$$R_u = (AE/l) [-S + \sqrt{S^2 + (W_r^2 h) 2l / (W_r + W_p) AE}]$$

..... REDTENBACHER FORMULA

ถ้าหากพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียของพลังงานขณะกระทกันเลย ก็จะได้ว่า

$$R_u = (-SAE/l) + [\sqrt{(2W_r h AE/l) + (SAE/l)^2}]$$

..... WEISBACH FORMULA

จากสูตรของ UNIVERSAL หรือ STERN FORMULA เมื่อพิจารณาว่าการกระทกันของลูกตุ้มกับหัวเสาเข็มมีลักษณะเป็นอีลาสติคโดยสมบูรณ์ และเสาเข็มฝังในดินตลอดความยาว โดยเป็นเสาเข็มแรงเสียดทาน ไม่มีแรงต้านที่ปลายเลย ก็จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$R_u = (2AES/l) [\sqrt{1 + (W_r h l / S^2 EA)} - 1]$$

..... RANKINE FORMULA

ถ้าหากพิจารณาจาก HILEY FORMULA ว่าไม่มี TEMPORARY COMPRESSION เลย, ประสิทธิภาพของเครื่องตอก = 100% การกระทกันเป็น PERFECTLY INELASTIC ($n = 0$) ก็จะได้ว่า

$$R_u = (W_r h / S) [W_r / (W_r + W_p)] \quad \text{..... DUTCH FORMULA}$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักของลูกตุ้มและเสาเข็ม DUTCH FORMULA จะสามารถเขียนได้เป็น

$$R_u = (W_r h / S) [W_r / (W_r + W_p)] + W_r + W_p \quad \text{.... RITTER FORMULA}$$

จาก DUTCH FORMULA ถ้าให้ระยะลูกตุ้มมีหน่วยเป็นฟุตและให้ค่า FACTOR OF SAFETY = 6 ฉะนั้น สูตรการตอกเสาเข็มสำหรับ DROP HAMMERS ก็จะเป็น

$$R = 2W_r h / S(1 + W_p / W_r) \quad \text{... EYTELWRIN FORMULA}$$

หากเครื่องตอกเป็น SINGLE-ACTING STEAM HAMMER

$$R = 2W_r h / (S + 0.1W_p / W_r)$$

DOUBLE-ACTING STEAM HAMMER

$$R = 2(Wr+Ap)/(S+0.1Wp/Wr)$$

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของ PISTON มีหน่วยเป็นนิ้ว

P = ค่าความดันประสิทธิผลเฉลี่ยของไอน้ำหรืออากาศ มีหน่วยเป็นปอนด์/นิ้ว

จากสูตรของ EYTELWEIN กรณีเครื่องตอกเป็น SINGLE-ACTING STEAM HAMMER หากความสูงของระยะยกลูกตุ้มมีหน่วยเป็นฟุต และอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเสาเข็มค่อน้ำหนักลูกตุ้ม ถูกคูณด้วยค่า 0.3 เท่าของ S และใช้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 6 จะได้ว่า

$$R = 2Wrh/S(1+0.3Wp/Wr) \dots\dots \text{NAVY-MCKAY FORMULA}$$

จาก HILEY FORMULA ถ้าหากพิจารณาว่าไม่มีการสูญเสียของพลังงานขณะกระทบ, ประสิทธิภาพของเครื่องตอกเท่ากับ 100%, TEMPORARY COMPRESSION ของ CAP, PILE และ SOIL เท่ากับ 1.0, ค่า H มีหน่วยเป็นฟุต แล้วคูณด้วย 12, FACTOR OF SAFETY = 6 โดยทั้งหมดนี้ให้ใช้กับ DROP HAMMER ก็จะได้สูตรว่า

$$R = 2Wrh/(S+1.0) \dots\dots \text{ENGINEERING NEWS FORMULA}$$

แต่ถ้าหากเครื่องตอกเป็น SINGLE-ACTING STEAM HAMMER, DOUBLE AND DIFFERENTIAL-ACTING STEAM HAMMER, TEMPORARY COMPRESSION ของ CAP, PILE และ SOIL ให้เท่ากับ 0.10 ฉะนั้นสูตรของ ENGINEERING NEWS นี้ ก็จะประยุกต์เพิ่มเป็น SINGLE-ACTING,

$$R = 2Wrh/(S+0.1)$$

DOUBLE, DIFFERENTIAL-ACTING $R = 2En/(S+0.1)$

จากสูตร ENGINEERING NEWS เมื่อใช้จำนวนครั้งที่ต้องตอกให้เสาเข็มจมลงไป 1 ฟุต (n) แทนค่าเฉลี่ยระยะที่เสาเข็มจมลงไปเมื่อตอก 1 ครั้ง (s) จะได้

$$R = [20n/(120+n)]Wrh \dots \text{VULCAN IRON WORKS FORMULA}$$

ซึ่งใช้ในกรณีที่เครื่องตอกเป็น SINGLE-ACTING STEAM HAMMER

หากเครื่องตอกเป็น DOUBLE หรือ DIFFERENTIAL-ACTING STEAM HAMMER

$$R = [20n/(120+n)]En$$

นอกจากนี้บริษัท UNITED STATES STEEL จำกัด ยังได้ประยุกต์สูตร ENGINEERING NEWS โดยเปลี่ยนแปลงค่าคงที่เฉพาะส่วนบน ดังนี้

กรณี DROP HAMMER

$$R = FWrH / (S+1.0) \quad \dots \text{ UNITED STATE STEEL FORMULA}$$

กรณี SINGLE-ACTING STEAM HAMMERS

$$R = FWrH / (S+0.10)$$

กรณี DOUBLE หรือ DIFFERENTIAL-ACTING

$$R = FH(Wr+AP) / (S+0.10)$$

โดยที่ F มีค่าตั้งแต่ 2-6 ขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นดิน

A, P มีค่าเช่นเดียวกับ EYTELWEIN FORMULA

นอกจากนี้ยังมีผู้ประยุกต์ ENGINEERING NEWS FORMULAR ในรูปอื่นอีก ดัง

$$R = 2WrH / (S+0.3) \text{ BUREAU OF YARDS AND DOCKS FORMULA}$$

นอกจากสูตรการตอกเสาเข็มที่ประยุกต์มาจากสมการแม่บทดังกล่าวข้างต้นแล้ว สูตรการตอกเสาเข็มบางสูตรก็ไม่ได้ประยุกต์มาจากสมการแม่บทดังกล่าว แต่ใช้ทฤษฎีแท้ ๆ หรือเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรบ้าง หรือบางทีได้มาจากการรวบรวมข้อมูลจำนวนมาก ๆ แล้วแปลงเป็นสูตรตัวอย่างสูตรเหล่านี้ได้แก่

$$R = Wrh / 8s \quad \dots \text{ SANDERS FORMULA}$$

โดยที่ 8 นั้น เป็นค่า factor of Safety

$$R = Wrh / 6s \quad \dots \text{ MERRIMAN FORMULA}$$

โดยที่ 6 นั้น ก็คือค่า factor of Safety

$$Ru = Wrh / Kus \quad \dots \text{ JANBU FORMULA}$$

โดยที่ $Ku = Cd [1 + \sqrt{1 + \lambda / Cd}]$

$$Cd = 0.75 + 0.15 Wp / Wr$$

$$\lambda = Wrh1 / AES^2$$

หน่วยความยาวพื้นที่เป็น ซม. และ ซม.² ตามลำดับ

$$Ru = 10WrH / 3S \quad \dots \text{ GOODRICH FORMULA}$$

$$Ru = 4.0 \text{ efWrh log}_{10} (25/S) \quad \dots \text{ GATE FORMULA}$$

โดยที่หน่วยเป็น Metrictons และ Centimeters หรือถ้าเป็นหน่วยนิ้วและตันสูตรของ Gate จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$R_u = 5.6 \text{ efWrh} \log_{10} (10/s)$$

$$R = (Wrh/2S) + W_r + W_p \quad \dots \text{ BENABENCQ FORMULA}$$

$$R_u = a/(S + ab/2) \quad \dots \text{ SO FORMULA OR DANISH FORMULA}$$

โดยที่ $a = \text{efWrH}$ โดยที่ $\text{ef} = 0.80$

$$b = L/AE_L \quad L = \text{ความยาวของเสาเข็ม, ม.}$$

$$E_L = \text{MODULUS OF ELASTICITY}$$

$$= 2.0 \times 10^7 \text{ ton/m}^2 \text{ (ของเสาเข็มคอนกรีต)}$$

ซึ่งสูตรไดนามิกเหล่านี้ บางสูตรก็เป็นที่ยอมรับใช้ ใช้ต่อ ๆ กันมา บางสูตรก็ถูกประยุกต์เปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมต่อไปอีกให้เหมาะสมกับท้องถิ่น บางสูตรก็ไม่เป็นที่ยอมรับสูญหายไป

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้แนะนำสูตรไดนามิกสำหรับประเทศไทย มี 4 สูตร คือ HILEY'S FORMULA , ENGINEERING NEWS FORMULA, JANBU'S FORMULA และ LOAD BEARING CAPACITY หรืออีกชื่อหนึ่งว่า DANISH FORMULA หรือ SO

2.4.2.3.2 ความน่าเชื่อถือของสูตรไดนามิก

ในต่างประเทศ เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา วิศวกรหลายท่านหรือกลุ่ม ได้ศึกษาถึงความน่าเชื่อถือของสูตรไดนามิก โดยเปรียบเทียบกับ การทดสอบเสาเข็ม (Pile load Test)

กลุ่มแรก คือ Sorensen และ Hansen เมื่อ ค.ศ.1957 หรือ พ.ศ.2500 โดยได้ศึกษา 78 การทดลอง เสาเข็มที่ทดสอบเป็นเสาเข็มคอนกรีต, ไม้ และเหล็ก โดยส่วนใหญ่ของเสาเข็มที่ศึกษานี้ปลายเข็มอยู่ในชั้นทราย มีบ้างที่ปลายเข็มอยู่ในชั้น Moraine Clay ผลปรากฏว่าสูตรของ Danish, Hiley และ Janbu ให้ผลที่พอใช้ได้

ต่อมา Agerschou ได้ศึกษาโดยจะเน้นถึงสูตรของ Engineering News ในปี ค.ศ.1962 หรือ พ.ศ. 2505 ผลที่ได้ยืนยันผลการศึกษาของ Sorensen และ Hansen Agerschou ได้ผลสรุปเกี่ยวกับสูตรของ Engineering News ว่า แม้จะเป็นที่ยอมรับใช้ แต่ผลไม่เป็นที่น่าเชื่อถือ

ต่อมา Flaate ได้ศึกษาถึงความน่าเชื่อถือของสูตรของ Janbu, Hiley และ Engineering News ในปี ค.ศ.1964 หรือ พ.ศ.2507 โดยได้ศึกษา 116 การทดลอง

เสาเข็มเป็นคอนกรีต, ไม้ และ เหล็ก ในชั้นดินทราย ผลปรากฏว่าสูตรของ Janbu และ Hiley ให้ผลแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย โดยที่สูตรของ Janbu ให้ผลออกมาน่าเชื่อถือกว่าสูตร Hiley สูตรของ Janbu สามารถใช้ได้ทั้งเสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มไม้ ส่วน Hiley ก็ให้ผลใช้ได้ ในเสาเข็มไม้

ต่อมาในปี คศ.1966 The Michigan Department of State Highway ได้ทำการศึกษาเสาเข็มจำนวน 88 ต้น ผลปรากฏว่า สูตรของ Engineering News ให้ค่า Ultimate load อยู่ในช่วง 2-6 เท่าของที่วัดจริง ขณะที่ Hiley ให้ค่า 7-30 เท่า ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าของ Hiley ผิดไปมาก ๆ เช่นนี้ ก็เนื่องจากว่าสถานที่ที่ The Michigan Department of State Highway ทำการทดลองนี้ดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวจึงมีผู้ให้ข้อสังเกตว่าสูตรของ Engineering News อาจจะใช้ได้ในกรณีที่มีแรงเสียดทานด้านข้างดีกว่า กรณี Point Bearing

ในปี คศ.1967 Olsen และ Flaate ได้ศึกษาเพิ่มเติมจากที่ Flaate ได้ศึกษาเมื่อปี 1964 ปรากฏว่าสูตรของ Janbu, Danish และ Gate ให้ผลน่าเชื่อถือใช้ได้

เมื่อสรุปผลการศึกษาทั้งหมดที่ผ่านมาข้างต้นโดยใช้สถิติเข้ามาพิจารณาด้วย ดัง Table 1 สูตรที่น่าเชื่อถือคือสูตรของ Janbu, Danish และ Hiley

สำหรับในประเทศไทย สนิท พิธิธสมบัติ ได้ทำการศึกษา เมื่อ พศ.2523 เพื่อหาสูตรไดนามิคที่เหมาะสมกับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่ตอกภายในดินกรุงเทพมหานคร ในการวิเคราะห์นี้ได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มที่ทำการทดสอบจนถึงน้ำหนักพิบัติจำนวน 53 ต้น ความยาวตั้งแต่ 16-30 เมตร หน้าตัดมีทั้งสี่เหลี่ยมจัตุรัส, หน้าตัดรูปตัว I และหน้าตัดรูป DH อุปกรณ์ตอกเสาเข็มก็ใช้ Drop Hammer แล้วใช้หลักทางสถิติวิเคราะห์ผลออกมา โดยแบ่งตาม หน้าตัดของเสาเข็ม ดังนี้

เสาเข็มหน้าตัด DH สูตรที่เหมาะสมอันดับ

1 Gate formula

2 Hiley formula

3 Engineering News ซึ่งสนิทไม่ได้ใช้ค่า $C = 1.0$ ตามสูตรดั้งเดิม แต่ใช้ $= 0.7$

4 Danish formula ซึ่งในหนังสือหน้าหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ออกโดย
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์นั้น เรียกสูตรนี้
ว่า Load Bearing Capacity

เสาเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส อันดับ 1 Janbu formula

2 Hiley formula

3 Danish formula หรือ So

สำหรับเสาเข็มหน้าตัด I นั้น ข้อมูลมีน้อย แต่ลักษณะของหน้าตัดคล้ายกับ
หน้าตัด DH จึงได้ลองแทนค่าในสูตรที่เหมาะสมสำหรับหน้าตัด DH ปรากฏผลผิดไปถึง 40% แต่
ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง + 20% จึงสามารถที่จะใช้สูตรเช่นเดียวกับหน้าตัด DH ไปก่อนได้

สนิท (2523) ได้วิเคราะห์ต่อไปเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมสำหรับดินกรุงเทพฯ สรุปสูตรใหม่
ได้ว่า ในกรณีเสาเข็มคอนกรีต รูปหน้าตัด DH

$$R_u = W_r H [44.6 \cdot \log(t/s) + 8.22] \text{ MODIFIED GATE FORMULA}$$

โดยที่ W_r = น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม, ตัน

H = ระยะยกของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม, ม.

t = ด้านแคบที่สุดของหน้าตัดเสาเข็ม, ม.

S = ระยะจมจากการตอก 1 ครั้ง เลี่ยจาก 10 ครั้งสุดท้าย, ม.

สำหรับเสาเข็มคอนกรีต หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมทั้งชนิดมีรูตรงกลางและตัน

$$R_u = [2.14 W_r H] / [K_u s + 1/2 \sqrt{2ab}] \text{ MODIFIED JANBU FORMULA}$$

$$K_u = C_d [1 + \sqrt{1 + \lambda / C_d}]$$

$$C_d = 0.75 + 0.15 W_p / W_r$$

$$\lambda = W_r H L / A E L S^2$$

โดยที่ H, L, S มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

A มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

E_L MODULUS OF ELASTICITY ของเสาเข็ม JANBU กำหนดไว้
เท่ากับ 180 ตัน/ชม.²

R_u = มีหน่วยเป็นตัน

$$a = eWrH \quad (e = 0.80)$$

$$b = L/AE_L$$

โดยที่ L มีหน่วยเป็นเมตร

A มีหน่วยเป็นตารางเมตร

E_L MODULUS OF ELASTICITY ของเสาเข็ม = 2.0×10^7 ตัน/ม²
(กรณีเสาเข็มคอนกรีต)

ซึ่งสูตรทั้งสอง ได้มีบริษัท เสาเข็มบางบริษัทนำไปใช้คาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็ม
ตก อย่างแพร่หลาย

2.4.3 การหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็ม

น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มนั้น เป็นน้ำหนักประลัยของเสาเข็มซึ่งมวลดินรอบๆ เสาเข็มจะเกิดการบีบจนไม่สามารถรับน้ำหนักเพิ่มได้อีก ในทางทฤษฎีน้ำหนักประลัยที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มนั้น เป็นน้ำหนักที่ทำให้เสาเข็มทรุดตัวอย่างต่อเนื่องไม่หยุด โดยน้ำหนักที่ใช้ทดสอบไม่เพิ่มขึ้น ในสภาพจริงเมื่อเสาเข็มทรุดตัวอย่างต่อเนื่องแล้ว ค่าน้ำหนักที่ใช้ทดลองจะลดลง

ในการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม เราจะบันทึกการทรุดตัวของเสาเข็มและน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ แล้วนำมาพล็อตกราฟ หากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ทดสอบและค่าการทรุดตัวมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะอย่างเด่นชัด การหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยก็สามารถทำได้ง่าย โดยการลากเส้นสัมผัสส่วนที่เป็นเส้นตรงทั้งสองส่วนนั้น จุดตัดของเส้นสัมผัสก็คือ น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มต้นนั้น ดังรูปที่ 2.4.10

ในกรณีที่ลักษณะกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวที่ได้ ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดหรือการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ไม่ถึงจุดประลัยนั้น ได้มีผู้เสนอวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยแตกต่างกันไป ดังนี้

TERZAGHI (1942) กำหนดว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มคือ น้ำหนักทดสอบเสาเข็มที่ทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือความกว้างตรงปลายของเสาเข็มนั้น

NORDLUND, R.L. แนะนำว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มคือ น้ำหนักทดสอบเสาเข็ม ณ จุดที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวเริ่มมีความชันเกินกว่า 0.05 นิ้วต่อตัน ของน้ำหนักที่ทดสอบเสาเข็มนั้น หรือในกรณีที่การทดสอบการรับน้ำหนักเป็นแบบ CYCLICAL LOADING น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มก็คือ จุดที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวถาวร (PLASTIC SETTLEMENT) เริ่มมีความชันเกินกว่า 0.30 นิ้ว ต่อตัน ของน้ำหนักที่ทดสอบ ดังรูปที่ 2.4.11

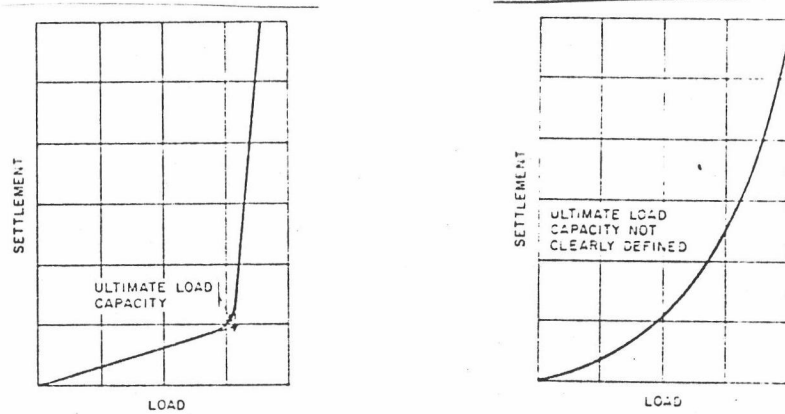
RABE, W.H. แนะนำว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มคือ น้ำหนักทดสอบเสาเข็ม ณ จุดที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวเริ่มมีความชันเกินกว่า 0.03 นิ้ว ต่อตัน ของน้ำหนักที่ทดสอบ

HOUSEL (1956) ได้แนะนำการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยในกรณีทดสอบเสาเข็มแบบ SLOW MAINTAINED LOAD ว่า เมื่อนำค่าการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วง 30 นาทีหลังกับน้ำหนักทดสอบเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นเท่า ๆ กันทุก 1 ชั่วโมง มาเขียนเป็นกราฟ จะได้เป็นเส้นตรง 2 เส้นโดยประมาณ เมื่อลากเส้นสัมผัสส่วนตรงทั้งสอง จุดที่เส้นสัมผัสตัดกันคือน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มนั้น ดังรูปที่ 2.4.12

DE BEER (1967) ได้แนะนำการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม เมื่อทำการทดสอบแบบ SLOW MAINTAINED LOAD ว่า เมื่อนำค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมาพล็อตในสเกลล็อก กับค่าน้ำหนักทดสอบซึ่งพล็อตในสเกลล็อกเช่นกัน กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง 2 เส้น โดยประมาณ เมื่อลากเส้นสัมผัสส่วนตรงทั้งสอง จุดที่เส้นสัมผัสตัดกันคือน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ดังรูป 2.4.13

DAVISSON (1975) ได้เสนอวิธีการเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โดยพิจารณาให้เสาเข็มนั้นเป็นชนิดรับแรงด้านที่ปลาย ปลายเสาอิสระ (FREE-STANDING COLUMN) คำนวณหา ELASTIC SHORTENING ของเสาเข็ม ลากเส้นผ่านค่า ELASTIC SHORTENING ที่คำนวณได้โดยเริ่มจากจุด ORIGIN แล้วลากเส้น OFFSET ซึ่งมีระยะห่าง 4.0 มม. บวกด้วย 0.01 เท่าของความกว้างที่ปลายเสาเข็ม (เป็นค่า QUAKE FACTOR ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดปลายเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มขนาดปกติค่านี้จะประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ของความกว้างปลายเข็ม) ขนานกับเส้น ELASTIC SHORTENING ไปตัดเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวและน้ำหนักที่ทดสอบ น้ำหนักที่จุดตัดจะเป็นน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

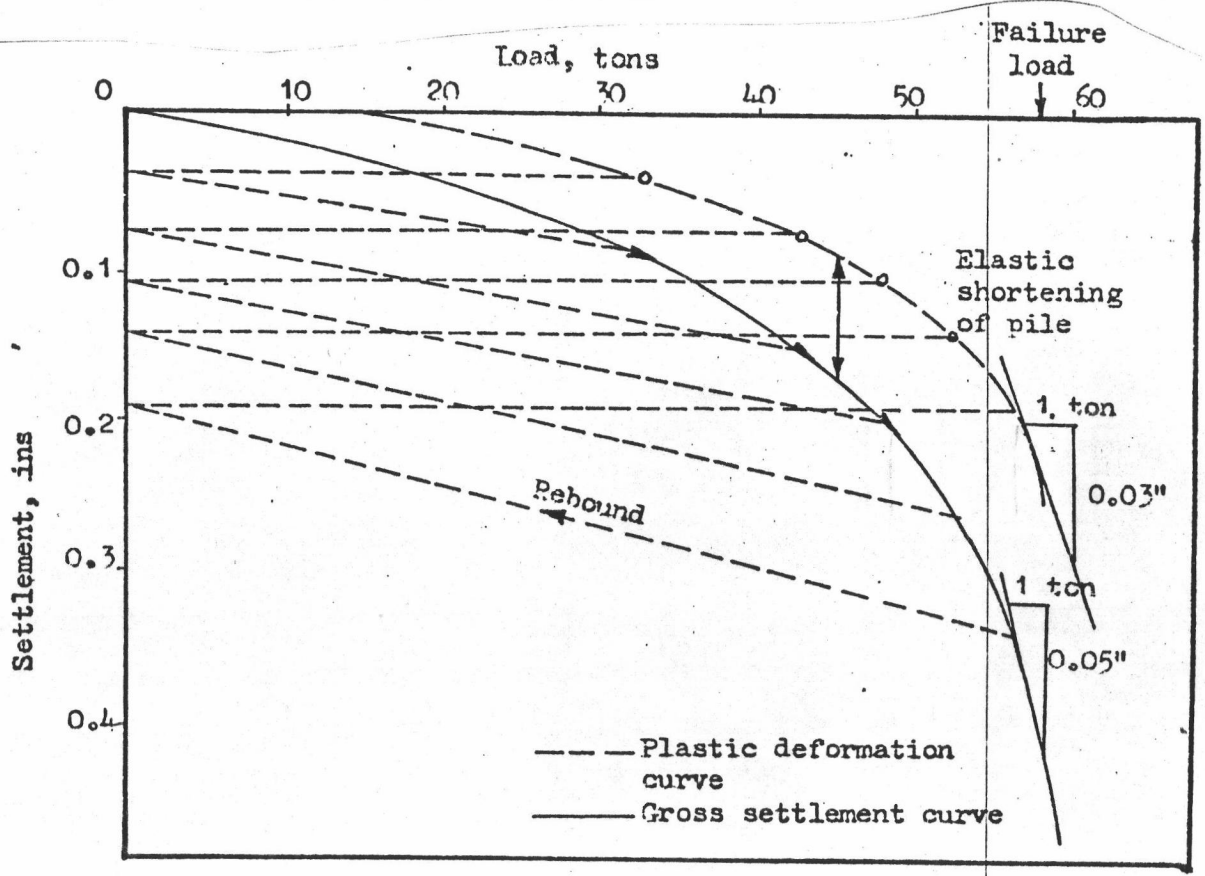
วิธีการนี้ควรใช้กับการทดลองที่ระยะการเพิ่มน้ำหนักกระทำแต่ละครั้ง ไม่เกิน 1 ชั่วโมง และมาตราส่วนของกราฟควรเลือกที่ทำให้มุมระหว่างเส้น ELASTIC SHORTENING กับแกนของน้ำหนักที่ทดสอบเท่ากับ 20 องศา ดังรูปที่ 2.4.14



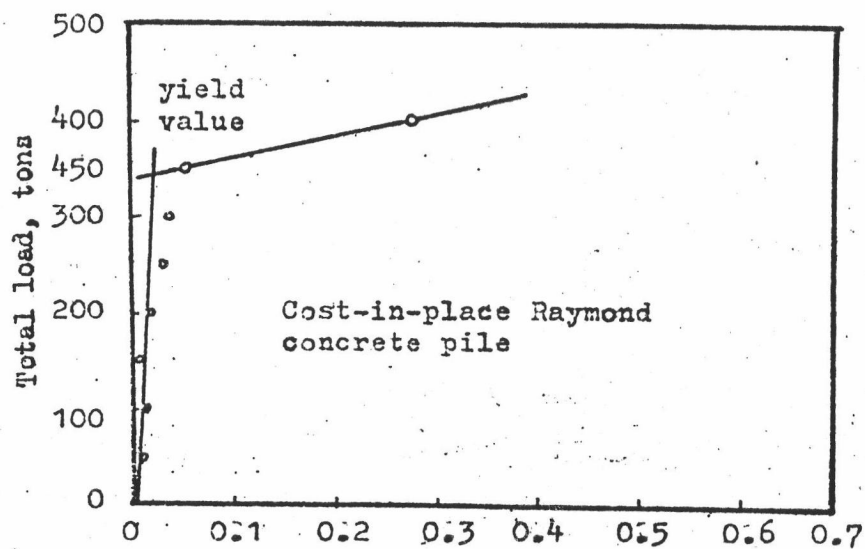
IDEALIZED RELATION

NORMAL RELATION

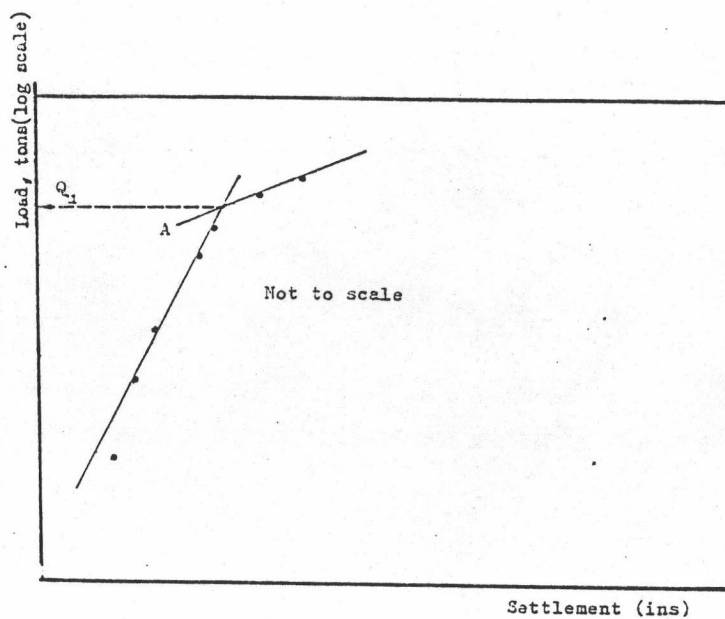
รูปที่ 2.4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม



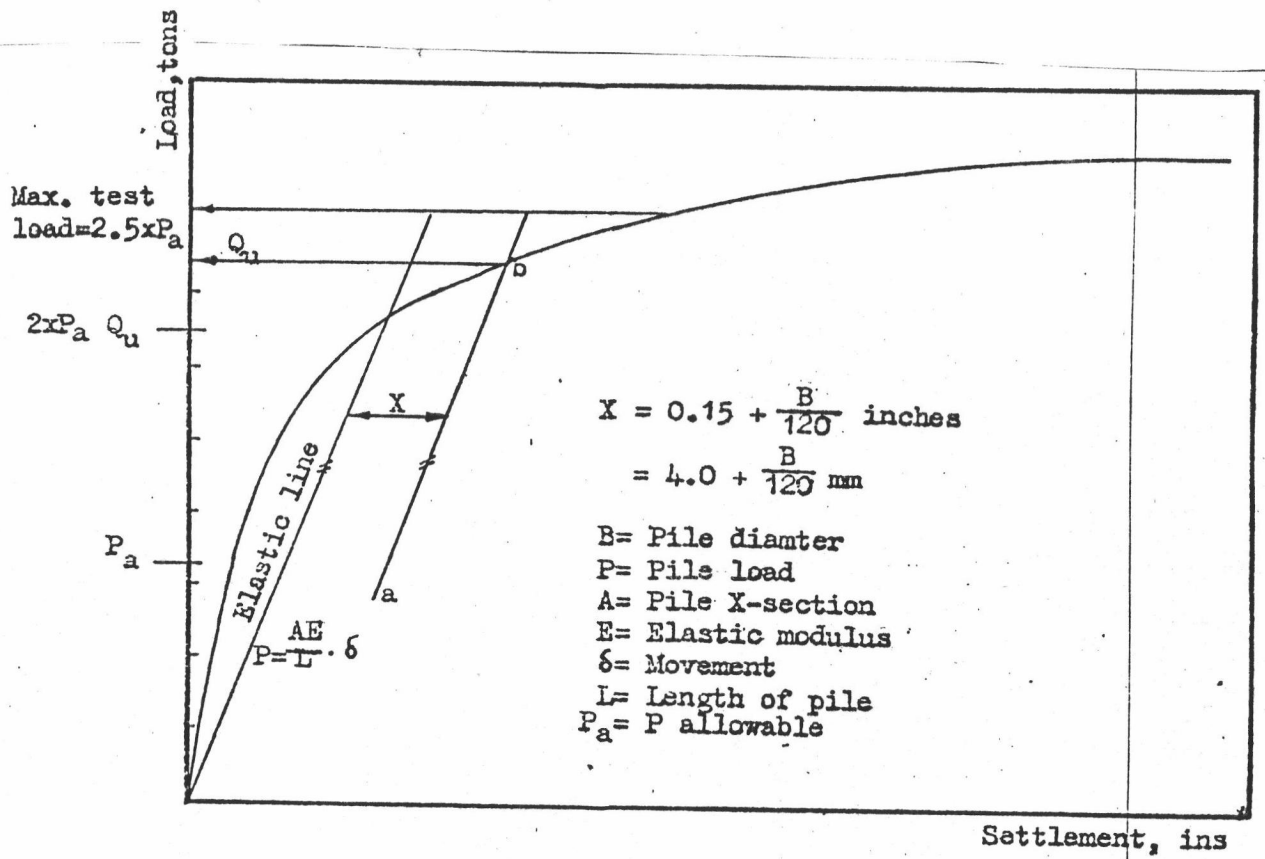
รูปที่ 2.4.11 การห่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มตามวิธีของ NORDLUND, R.L.



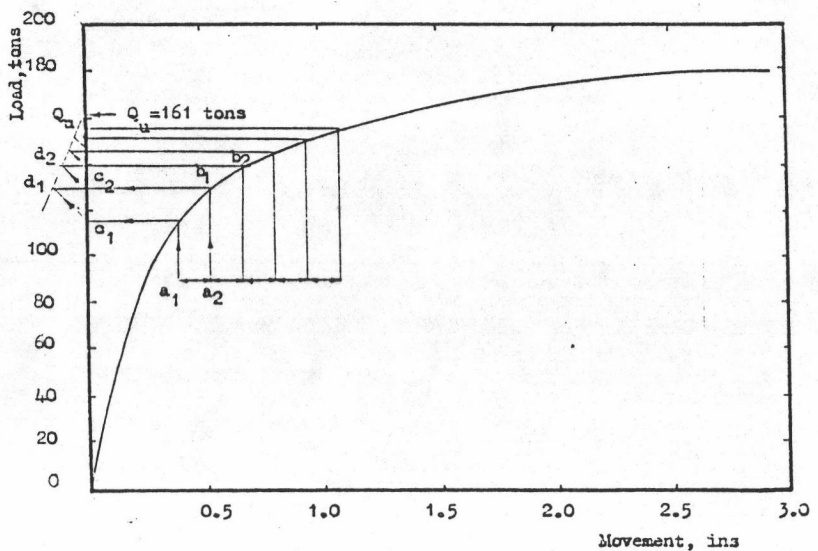
รูปที่ 2.4.12 การหาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ตามวิธีของ HOUSEL (1956)



รูปที่ 2.4.13 การหาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ตามวิธีของ DE BEER (1967).



รูปที่ 2.4.14 การหาน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ตามวิธีของ DAVISSON (1975)



รูปที่ 2.4.15 การหาน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ตามวิธีของ MAZURKIEWICZ (1972)

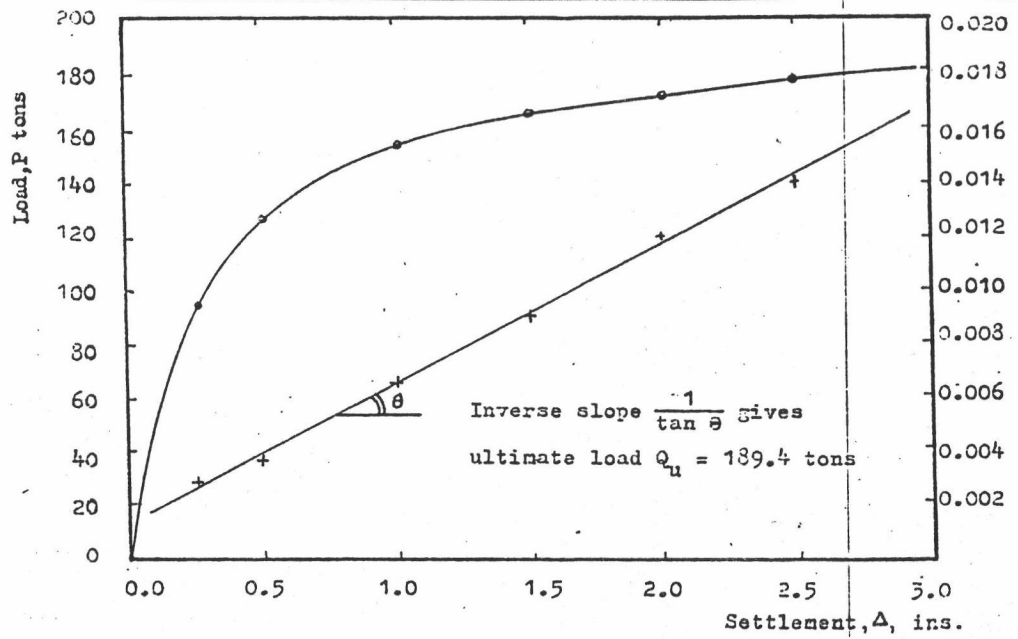
MAZURKIEWICZ (1972) ได้เสนอวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสา เข็มผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ถึงการประลัยก็ตาม โดยมีสมมุติฐานว่า ลักษณะกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ทดสอบกับค่าการทรุดตัว เป็นรูปพาราโบลาเมื่อเสาเข็มประลัย วิธีการเริ่มโดยให้เลือกราคาการทรุดตัวขึ้นมาหลาย ๆ ค่า โดยให้ค่าเหล่านี้อยู่ในอนุกรมเลขคณิต จากค่าเหล่านี้ลากเส้นตรงไปตัดเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและค่าการทรุดตัว จากจุดตัดนี้ลากเส้นตรงขนานกับแกนของค่าการทรุดตัว ไปตัดแกนของน้ำหนักที่ทดสอบและให้เส้นตรงนี้เลยแกนของน้ำหนักที่ทดสอบออกไประยะหนึ่ง ณ จุดตัดระหว่างแกนของน้ำหนักที่ทดสอบกับเส้นตรงที่ลากขนานกับแกนของค่าการทรุดตัว ลากเส้นตรงให้ทำมุม 45 องศา กับแกนของน้ำหนักที่ทดสอบไปตัดกับเส้นตรงที่ลากเลยแกนของน้ำหนักที่ทดสอบ เส้นซึ่งอยู่สูงถัดขึ้นไปกระทำเช่นนี้ทุกจุดตัดระหว่างแกนของน้ำหนักที่ทดสอบกับเส้นที่ลากขนานกับแกนของค่าการทรุดตัว แนวของจุดตัดที่เกิดจากเส้นที่ทำมุม 45 องศา กับเส้นที่ลากเลยแกนของน้ำหนักที่ทดสอบจะเป็นเส้นตรงโดยประมาณ ลากเส้นตรงตามแนวนี้ เมื่อเส้นตรงนี้ไปตัดแกนของน้ำหนักบรรทุก ณ จุดใด จุดนั้นคือ น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มต้นนั้น ดังรูปที่ 2.4.15

CHIN (1970) ได้เสนอวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มในกรณีที่ทำกาทดสอบเสาเข็มไม่ถึงจุดพิบัติ ซึ่งได้สรุปจากการศึกษาลักษณะ SHEAR DEFORMATION จาก SHEAR BOX, TRIAXIAL COMPRESSION TEST โมเดลการทดสอบเสาเข็มทั้งในห้องทดลองและในสนาม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ทดสอบ และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มถือได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบ HYPERBOLIC แต่สามารถจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$\Delta/P = m\Delta + C$$

โดยที่ คือค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม เมื่อมีน้ำหนักทดสอบ P กระทำ m และ C คือค่าคงที่

เมื่อพล็อตกราฟโดยให้ค่าอยู่ในแกนนอน, P อยู่ในแกนตั้ง กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง จุดตัดของเส้นกราฟที่ตัดกับแกนตั้ง คือค่าคงที่ C ความชันของเส้นกราฟคือ m ซึ่งค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจะหาได้จากค่าส่วนกลับของความชัน ($1/m$) ของเส้นกราฟ ดังรูปที่ 2.4.16



รูปที่ 2.4.16 การหาหน้าหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบเสาเข็มตามวิธีของ CHIN (1970)