บทที่ 3
ปัญหาในงานตอกเสาเข็ม

3.1 บทนำ

วิศวกรรมฐานรากเสาเข็มเป็นวิชาชีพที่ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเป็นอย่างมาก ต้องการแรงงานที่มีความน่าเชื่อถือ ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับงานที่เสร็จสมบูรณ์แล้วแทบจะไม่สามารถตรวจสอบข้อบกพร่องได้ง่าย เพราะฉะนั้นงานแก้ไขฐานรากเสาเข็มจึงเป็นงานที่ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ไม่ใช่ว่าการตรวจสอบจะเป็นไปไม่ได้เลย

วิธีการติดตั้งเสาเข็มมีสองวิธีหลัก ๆ คือการตอกและการเจาะ แต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียต่างกันการที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมต้องใช้ประสบการณ์ในงานก่อสร้างฐานรากเป็นอย่างสูง

การวิบัติของฐานรากในกรณีที่ทำการตอกเสาเข็มเสร็จเรียบร้อยแล้ว การวิบัติในตรงนี้ก็คือมีน้ำหนักลงมาบนเสาเข็มมากเกินกว่ากำลังของเสาเข็มที่สามารถรับได้ หรือเกินกว่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มนั่นเอง หรือในอีกกรณีหนึ่งก็คือชั้นดินที่ปลายเสาเข็มหยั่งอยู่นั้นมีกำลังรับน้ำหนักน้อยเกินไปปลายของเสาเข็มไม่ได้หยั่งอยู่บนชั้นดินแข็งอยู่ชั้นดินอ่อนที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงมากดินจะอ่อน และกำลังรับน้ำหนักลดลง

สาเหตุของการวิบัติของฐานรากเสาเข็ม(กรณีในประเทศฝรั่งเศส , 2533)

35% เนื่องจากการวิเคราะห์แปรข้อมูลสภาพชั้นดินและวิศวกรรมปฐพีผิดพลาด

25% เนื่องจากละเลยการสำรวจสภาพชั้นดิน

15% เนื่องจากความผิดพลาดในการติดตั้งเสาเข็มฐานราก

10% เนื่องจากการผุพังของวัสดุเสาเข็ม(เช่นการผุกร่อนของเสาเข็มไม้และปฏิกิริยาซัลเฟต)

15% เนื่องจากเหตุผลอื่นหรือหลายสาเหตุข้างต้นรวมกัน

3.2 การเลือกเสาเข็มฐานราก

3.2.1 ชนิดเสาเข็ม (ดูเรื่องเสาเข็มและอุปกรณ์การตอกในบทที่ 2)

3.2.2 ลักษณะสภาพฐานราก

- ตำแหน่งและประเภทงานโครงสร้าง
- สภาพชั้นดินและระดับน้ำใต้ดิน
- ความคงทนในระยาว
- มูลค่าการก่อสร้างระบบฐานราก

3.3 ปัญหาการติดตั้งเสาเข็ม

3.3.1 เสาเข็มตอก

การเสียหายที่หัวเสาเข็ม ผลจากการตอก

การขาดกันของรอยเชื่อมเสาเข็มคอนกรีต ผลจากความเค้นแรงดึง

การโก่งงอของเสาเข็มเหล็ก

การโก่งเดาะของเสาเข็มเหล็กในชั้นดินแข็งหรือชั้นหินภูเขา

การขจัดของมวลดิน การปูด และการเบียดกัน ผลจากการตอกเสาเข็มฐานราก

สภาพเสียงรบกวน ผลจากการทำงานของเสาเข็ม (ตารางที่ 3.1)

การสั่นสะเทือนของชั้นดินผลจาการตอกเสาเข็ม (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเสียงรบกวนงานเสาเข็มชนิดต่างๆ จาก CIRIA Report

Pile type	Dia. (or width) (m)	Method	Size	Dolly type and condition	L_w(A) (dB(A))	Soil	*Leq* (dB(A)) at 10 m (1 cycle)
Sheet steel	0.48	Diesel hammer	310 MN m energy	None	133	Clay	104
H-section steel	0.36 square	Diesel hammer	620 MN m energy	None	125	Fill/clay/ sandstone	96
Precast shell	0.535 dia.	Drop hammer	6 tonne, 0.5 m drop	Wood (good)	124	Fill	83
Precast concrete	0.275 square	Drop hammer	4 tonne, 0.5 m drop	Wood (average)	116	Chalk/clay	87
Cast-in-place driven casing	0.4 dia.	Drop hammer	4 tonne, 1.0 m drop	Wood (good)	119	Fill/clay/ sand-marl	89
Impact bored cast-in-place	0.5 dia.	Tripod winch	18 kW	None	104	Rough fill/ clay/limestone	76
Bored cast-in-place	0.75 dia.	Crane-mounted auger	Crane engine 99 kW Donkey engine 125 kW	None	117	Clay/silt	79

ตารางที่ 3.2 ความเร็วสูงสุดที่ยอมให้จาก DIN 4150

Class	Description	*Max. velocity (mm/s)
1	Ruins and buildings of great historic value	2
2	Buildings with existing defects (visible cracks in brickwork etc)	5
3	Undamaged buildings in technically good condition except for minor cracks	10
4	Strong buildings, industrial buildings of R.C. concrete or steel	10–40

3.3.2 เสาเข็มเจาะ

การป้องกันไม่เพียงพอต่อสภาพน้ำใต้ดินไหลเข้าหลุมเจาะทำให้ดินรอบหลุมพังทะลาย

การไหลเข้าของน้ำใต้ดินบริเวณการดึงปลอกเหล็กทำให้กรวดและทรายผสมในคอนกรีต(รูปที่ 3.1)

การเกิดคอคอดส่วนเสาเข็มเจาะเนื่องจากการดึงปลอกเหล็กเร็วเกินไป (รูปที่ 3.2)

การเกาะติดของคอนกรีตกับส่วนปลอกเหล็ก

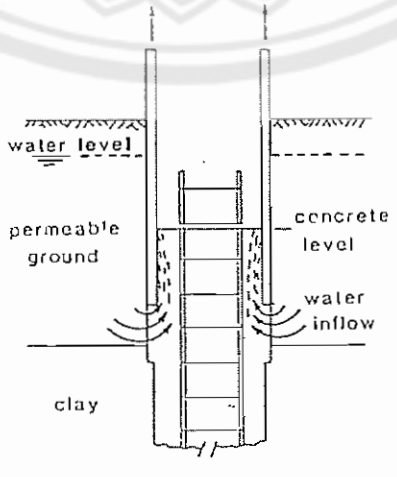
การใช้ตัวหน่วงในคอนกรีตเหลวมากเกินไป

การใช้คอนกรีตยุบตัวต่ำโดยไม่จี้เขย่าอาจเกิดโพรงในส่วนเสาเข็มเจาะ

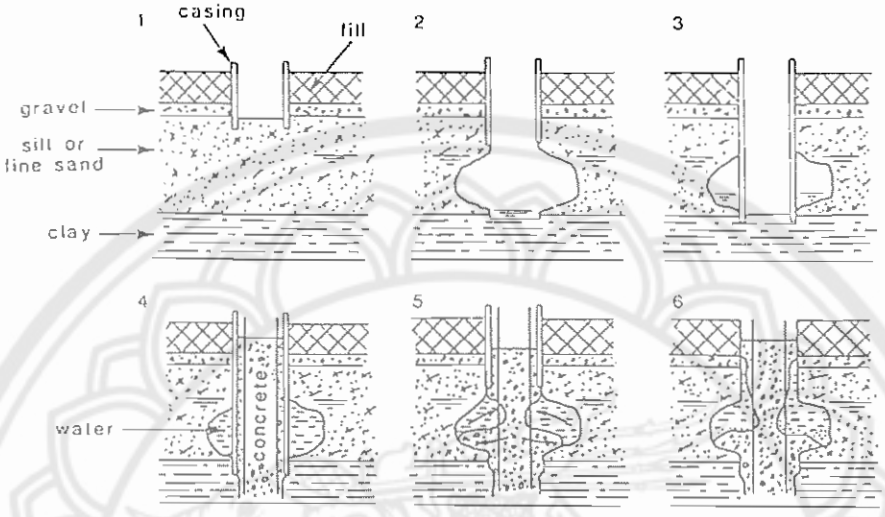
ตารางที่3.3 แสดงผลการสำรวจเสาเข็มเจาะพบว่าส่วนใหญ่ของปัญหาการทำงานเสาเข็มเจาะเป็นผลจากหยุดจังหวะการเทคอนกรีตและสภาพการจราจรในบริเวณโครงการไม่เหมาะสม โดยสาเหตุจากปัญหาการทำเสาเข็มบกพร่องมีเพียง 0.5 % เท่านั้น

ตารางที่ 3.3 ผลการสำรวจความเสียหายของเสาเข็มเจาะ

	1981	1982
Number of piles tested	5000	4550
Number of piles to show faults	73	88
Fault		
Soil contamination 0–2 m	24%	5%
2–7 m	9%	9%
Poor-quality concrete	6%	3%
Voids adjacent to pile shaft	3%	2%
Damage subsequent to construction	58%	80%
Total percentage of piles with defects	1.5%	1.9%
Percent failure due to construction defects	0.6%	0.4%



รูปที่ 3.1 ปัญหาการไหลเข้าของน้ำใต้ดินบริเวณหัวเสาเข็ม



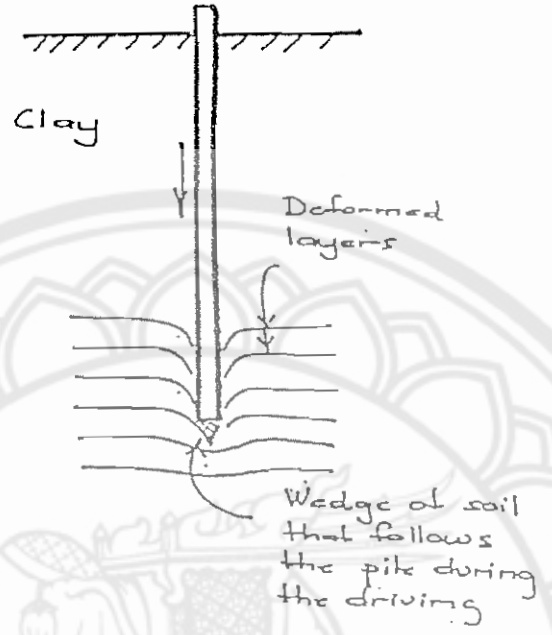
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเกิดคอคอดส่วนเสาเข็มเจาะ

3.4 ผลกระทบต่อมวลดินรอบเสาเข็มตอก

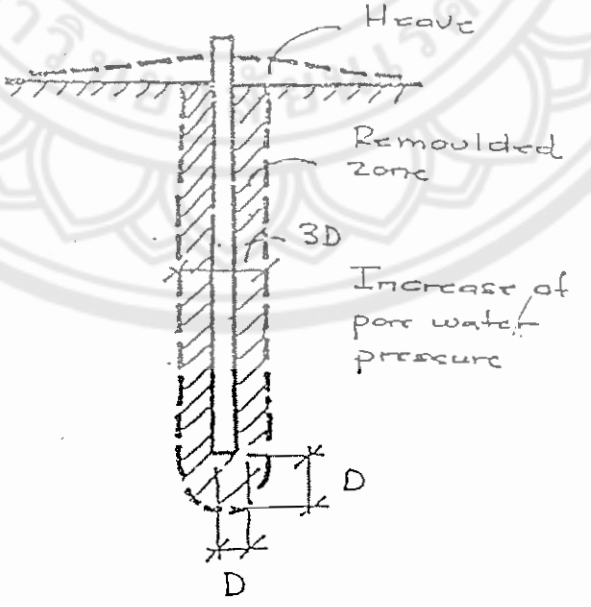
3.4.1 ผลกระทบต่อสภาพชั้นดินเนื่องจากการติดตั้งเสาเข็ม

ลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลดินรอบเสาเข็ม สองลักษณะใหญ่จากกระบวนการติดตั้งเสาเข็มคือ ลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลดินรอบเสาเข็มตอก ดูรูปที่3.3 เป็นผลให้เกิดการรบกวนดินและการเปลี่ยนสภาพความเค้นในมวลดินรอบเสาเข็ม และอีกลักษณะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการรบกวนดินกับการกระจายแรงดันน้ำในดินรอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว ดูรูปที่3.4 ปรากฏการณ์เหล่านี้ เป็นหัวใจของการเรียนรู้ในสาขาวิชาปฐพีกลศาสตร์และวิศวกรรมฐานราก ซึ่งพบว่าทักษะเรียนรู้ในการหากำลังของดินรอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียวยังจำกัดอยู่มาก

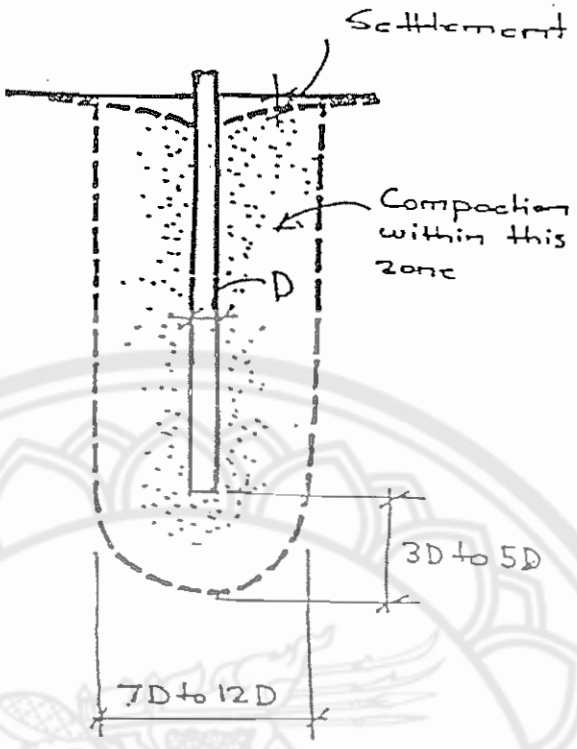
ลักษณะการอัดแน่นของดินทรายเมื่อถูกเสาเข็มตอก ดูรูปที่ 3.5 เห็นว่าดินทรายรอบๆเสาเข็มถูกแรงอัดและการสั่นสะเทือนเป็นผลทำให้เรียงตัวและบดอัดของดิน การตอกเสาเข็มในชั้นดินทรายหลวม จะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของดินทราย ซึ่งเป็นข้อดีกว่าการใช้เสาเข็มเจาะอย่างชัดเจน



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนรูปของมวลดินรอบเสาเข็มตอก



รูปที่ 3.4 ลักษณะการรบกวนดินรอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว



รูปที่ 3.5 ลักษณะการอัดตัวแน่นรอบเสาเข็มตอกในชั้นดินทราย

การเคลื่อนตัวของมวลดินรอบเมื่อได้รับแรงกระทำขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน โดยความสามารถในการระบายน้ำออกจากมวลดิน และระยะเวลาที่ได้รับแรงกระทำว่าช้าหรือเร็ว

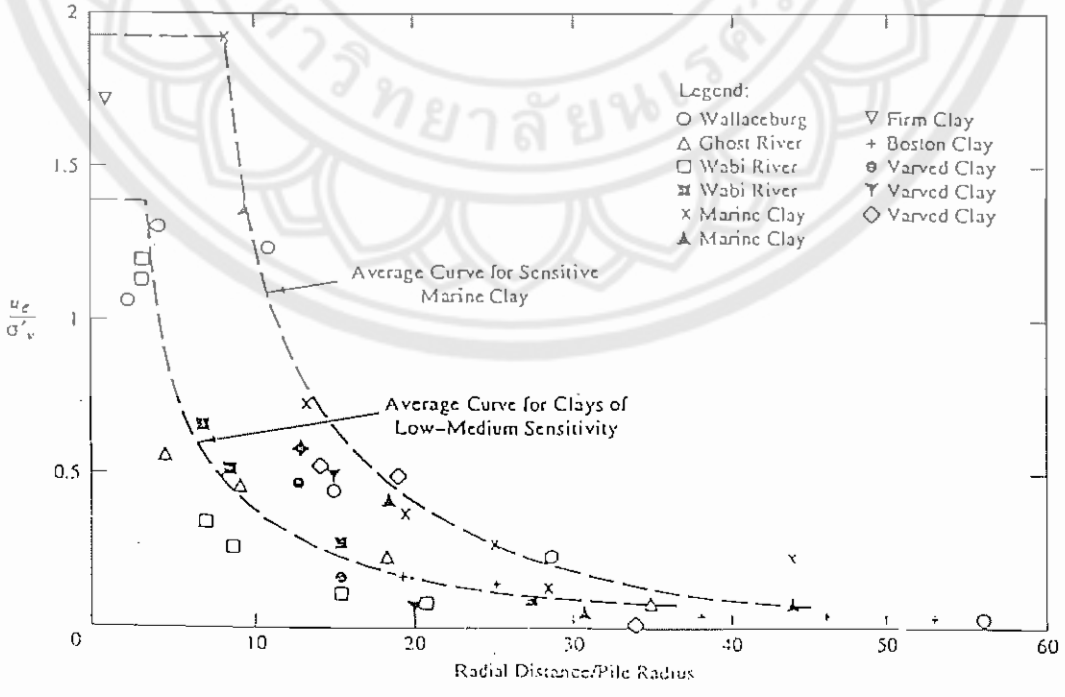
เมื่อพิจารณาสภาพของชั้นดินที่อยู่รอบเสาเข็มเนื่องจากการติดตั้งไม่ว่าจะด้วยวิธีตอกหรือเจาะลงไป มีผลทำให้ดินโดยรอบเกิดการพิบัติ การทดสอบเสาเข็มหลังจากนั้นต้องรออยู่ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้เสาเข็มพัฒนากำลังรับแรงเฉือน(Thixotropy) เสาเข็มช่วงใช้เวลา 1-3 วันแต่การรับน้ำหนักจริงของเสาเข็มจากอาคารเป็นการถ่ายหน่วยแรงทีละน้อยๆและค่อยๆเพิ่มมากขึ้นในขณะทำการก่อสร้างจนกระทั่งน้ำหนักทั้งหมดถูกถ่ายลงสู่เสาเข็ม เมื่อทำการก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมกับมีการทรุดตัวเกิดขึ้นในชั้นดิน ซึ่งพฤติกรรมจากเพิ่มน้ำหนักจากการก่อสร้างทีละน้อยนี้จะใช้เวลานานหลายเดือนหรืออาจเป็นปี ทำให้น้ำในมวลดินระบายออกได้ทัน ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในการใช้งานจริงจึงมีค่าสูงกว่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบในสนาม

3.4.2 อิทธิพลของเสาเข็มที่มีต่อดินเหนียว

ในสภาพของดินเหนียวขณะถูกเสาเข็มแทนที่ลงไปนั้น ชั้นดินเหนียวจะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขณะทดสอบและมีผลต่อการแปลผลการทดสอบ โดยชั้นดินเหนียวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

ก. การเคลื่อนตัวแบบเฉือน(Distortion) เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปในชั้นดิน สภาพดินภายใต้เสาเข็มจะถูกอัดตัวออก ทำให้เกิดแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวแบบเฉือนในชั้นดินเกิดจากผลการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบเสาเข็มเมื่อถูกตอกลงไปในชั้นดิน และเกิดการเคลื่อนตัวแบบเฉือนที่มากในเสาเข็มแทนที่ ดิน การรบกวนชั้นดินเหนียวนี้ทำให้ดินเหนียวมีโครงสร้างเปลี่ยนไป และจะมีค่า residual strength ลดลง เทคนิคการวิเคราะห์ในปัจจุบันจะใช้ค่า peak strength ในการวิเคราะห์ ซึ่งถือได้ว่าเมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้ peak strength และ residual strength พบว่าการใช้ residual strength อาจจะให้ค่าที่เหมาะสมกว่า

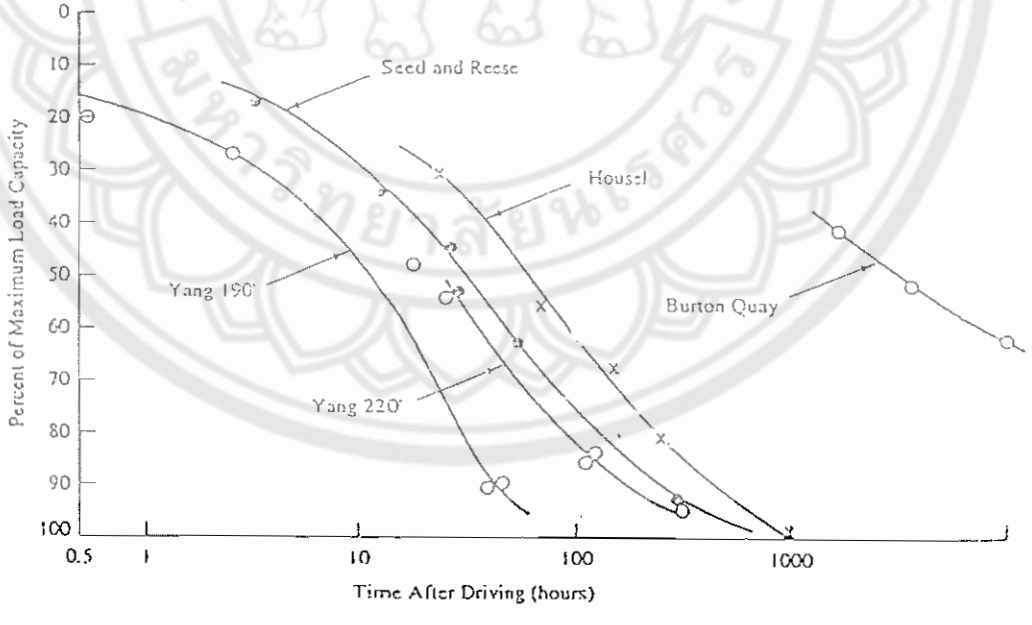
ข. แรงกดและแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) การตอกเสาเข็มเป็นการกดอัดดินให้แนบประชิดกับตัวเสาเข็ม ถ้าบริเวณโดยรอบเสาเข็มเป็นดินเหนียวอิ่มตัวการกดอัดนี้จะทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นจำนวนมาก อัตราส่วนของแรงดันน้ำส่วนเกิน U_eกับแรงดันประสิทธิผลของดินในแนวดิ่ง σ_v' อาจสูงถึง 1.5 ถึง 2.0 ที่บริเวณรอบๆเสาเข็มและจะมีค่าลดน้อยลงอย่างสม่ำเสมอจนเป็นศูนย์ที่ระยะห่าง 30 ถึง 40 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่3.6 แรงกดอัดจะมีค่ามากที่สุดบริเวณใกล้ปลายเสาเข็ม โดยค่า U_e/σ_v' บริเวณปลายเข็มอาจสูงเป็น 3 ถึง 4 เท่าค่าแรงดันน้ำที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วนี้มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ง่ายต่อการตอกเสาเข็มยิ่งขึ้น แต่ก็ยังมีผลให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมีค่าต่ำมากในช่วงระยะเวลาหนึ่งของการติดตั้ง



รูปที่ 3.6 ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน, U_eในดินรอบๆเสาเข็มตอกเดี่ยวในชั้นดินเหนียว (Poulos และ Davis)

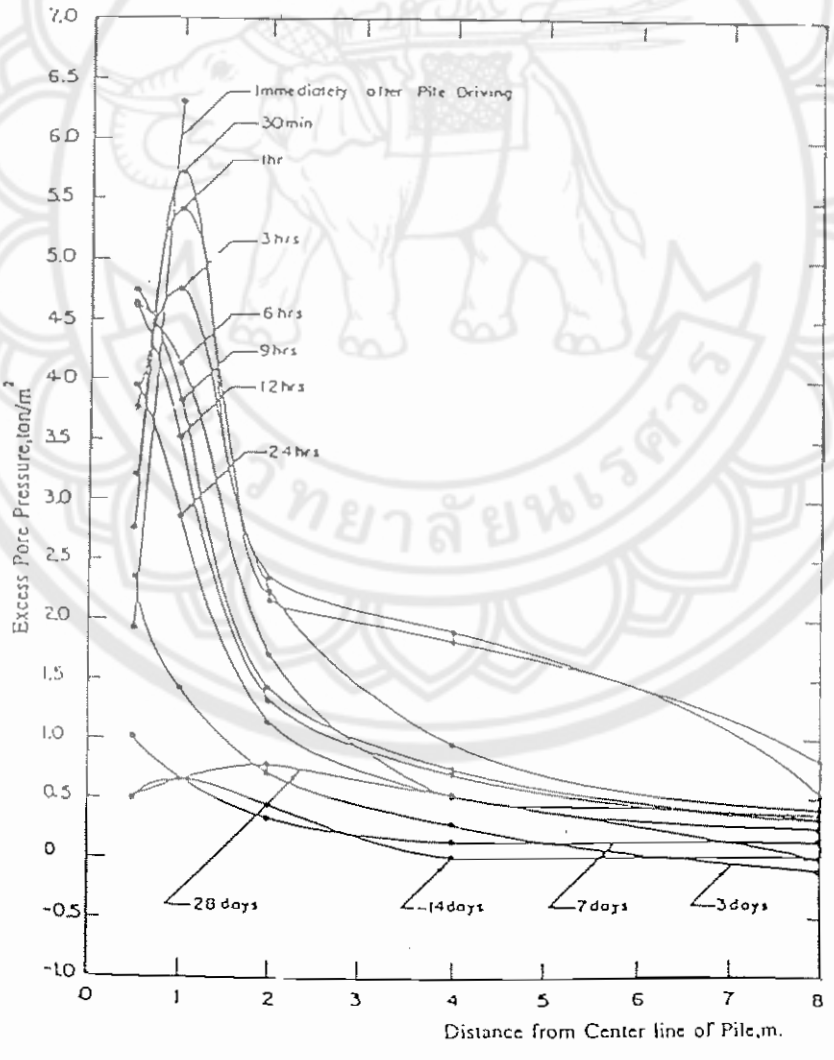
สภาวะของแรงดันน้ำส่วนเกินนี้เป็นสภาวะชั่วคราวเท่านั้น เพราะน้ำในมวลดินจะพยายามระบายแรงดันน้ำออกไปตามแนวรัศมีของเสาเข็มจนแรงดันน้ำนั้นกลับไปสู่สภาวะ hydrostatic ทำให้ชั้นดินเกิดสภาพ thixotropy และ consolidation ชั้นดินเหนียวจึงมีกำลังต้านทานเพิ่มมากขึ้นกับเวลา ซึ่งสามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่าหลังจากที่ทิ้งช่วงการตอกเสาเข็มไว้ประมาณ2วันแล้วมาตอกใหม่อีกครั้งจะทำให้blowcount เพิ่มขึ้นชั่วระยะหนึ่ง เราเรียกว่า Set up หรือ Freeze จนกว่าการตอกทำให้มีสภาพของแรงดันน้ำส่วนเกินโดยรอบผิวเสาเข็มสูงขึ้นเท่าเดิมอีกครั้ง

ในเสาเข็มเดี่ยวแรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะลดลงสู่สภาวะปกติ(Hydrostatic)อย่างสมบูรณ์ต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือนซึ่งหมายความว่าเสาเข็มจะรับน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยดังในรูปที่3.7 อย่างไร ก็ตาม สำหรับเสาเข็มกลุ่มแล้วแรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะแผ่ขยายออกจากกลุ่มเสาเข็มเป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งอาจจะต้องใช้ระยะเวลาในการระบายแรงดันน้ำส่วนเกินนี้เป็นปีหรือมากกว่านั้น



รูปที่ 3.7 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกกับเวลา , (Soderberg)

การศึกษาแรงดันน้ำส่วนเกินนี้ ดร.ชัย (2533) ทำการศึกษาโดยการติดตั้ง piezometer ที่ระยะต่างๆจากแนวศูนย์กลางก่อนทำการตอกเสาเข็มเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ซม. ยาว 12 เมตร ลงไปในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินนี้ส่วนใหญ่จะกระจายหมดภายในหนึ่งเดือนซึ่งผลการทดสอบสามารถสรุปดังในรูปที่3.8 แสดงถึงค่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะจากแนวศูนย์กลางของเสาเข็มที่เวลาต่างๆกัน หลังการตอกเสาเข็ม โดยที่ความลึก 6 เมตร ค่าแรงดันน้ำสูงสุดเกิดขึ้นระหว่างการตอกที่ระยะ 1 เมตรจากแนวศูนย์กลางเสาเข็มและค่าแรงดันน้ำนี้มีอัตราลดลงมาที่ระยะ 1 – 2 เมตร แต่ที่ระยะมากกว่า 2 เมตรค่าแรงดันน้ำนี้จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายหลังการตอกเสาเข็ม , ชัย (2533)

ค. การสูญเสียผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มและดิน ในระหว่างการตอกเสาเข็มจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเสาเข็มและดินในดินเหนียวอ่อนดินจะถูกแทนที่ในเวลาต่อมา แต่ถ้าเป็นดินแข็งจะไม่เกิดการแทรกตัวขึ้นหรือเกิดขึ้นช้ามาก ซึ่งสะท้อนในสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินกับหน่วยแรงเฉือนของดินในชั้นดินแข็งที่มีค่าสัมประสิทธิ์(α-factor)ต่ำกว่าชั้นดินเหนียวอ่อน

3.4.3 อิทธิพลของเสาเข็มที่มีต่อดินทราย

ชั้นทรายหลวมอิ่มตัวที่ถูกกดอัดจากการตอกเสาเข็มทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินขึ้น แรงดันน้ำนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการซึมน้ำค่อนข้างสูง จึงทำให้เสาเข็มพัฒนาการรับน้ำหนักได้เกือบทันทีทันใดภายหลังจากการตอกเสาเข็ม การเบียดตัวกันของเม็ดดินสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อตอกเสาเข็มผ่านชั้นทรายแน่น ทำให้เกิด negative excess pore pressure ขึ้นชั่วคราวและกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น การตอกเสาเข็มจะยากขึ้นด้วย การตอกเสาเข็มพบว่าทำให้เม็ดทรายมีการจัดเรียงตัวกันใหม่มีความแน่นมากขึ้น บางครั้งการตอกเสาเข็มอาจต้องทำการเจาะนำ หรือฉีดพ่นน้ำลงไปก่อนบางส่วนหรือตลอดความยาวเสาเข็มเพื่อติดตั้งเสาเข็มลงในชั้นทราย

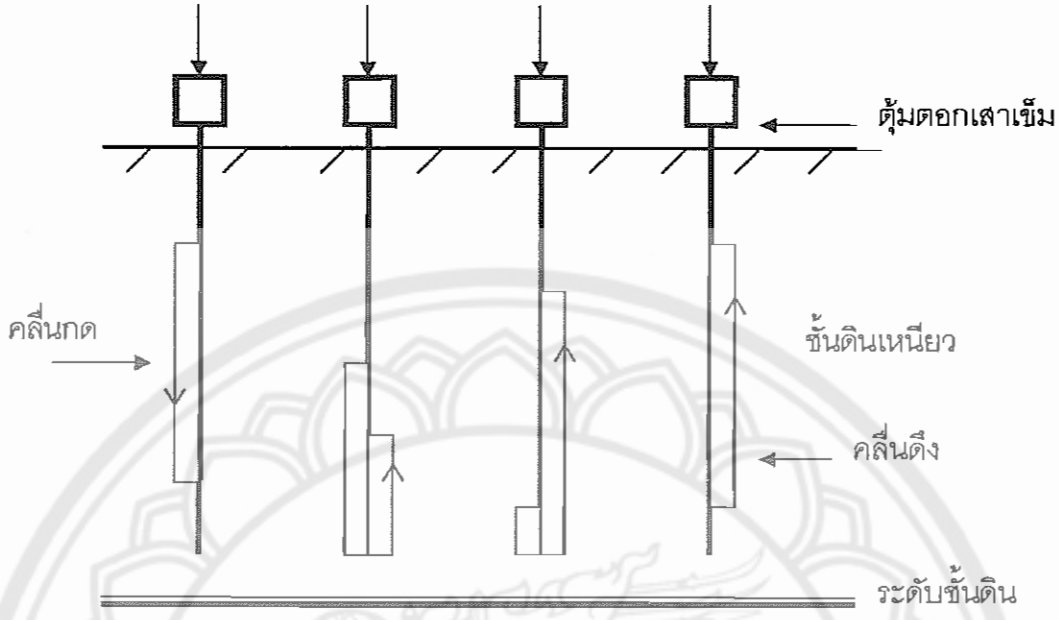
3.5 ปัจจัยกำหนดการตอกเสาเข็ม

3.5.1 คลื่นสะท้อนในเสาเข็ม

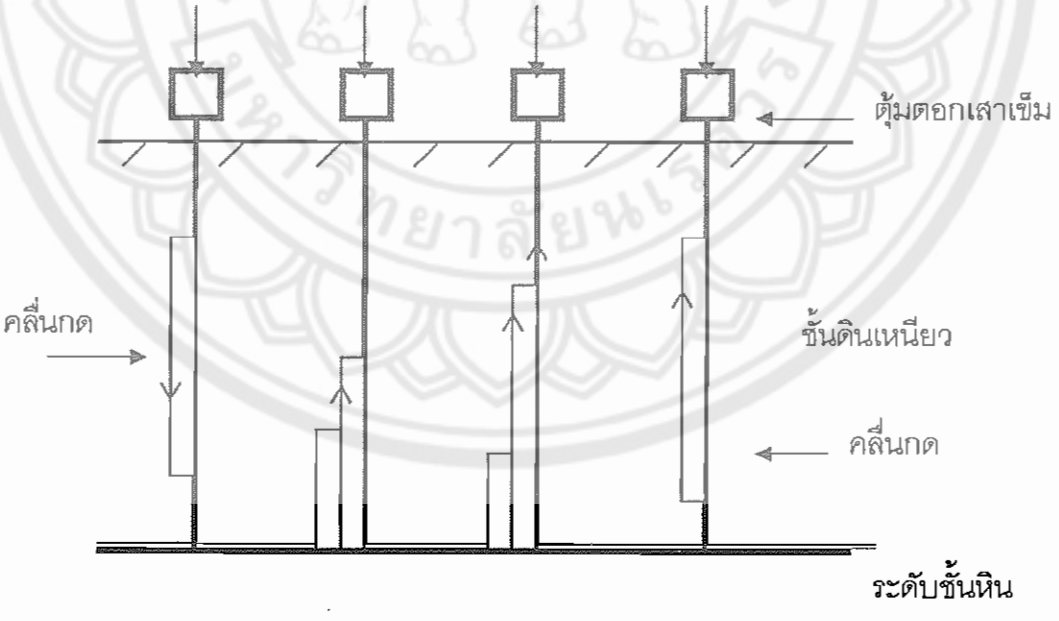
คลื่นความเค้นเพิ่มขึ้นที่ปลายล่างของเสาเข็มตอกถึงชั้นดินแข็งหรือหิน การสะท้อนกลับแสดงในรูปที่3.9 ค่าความยาวคลื่น(L)เท่ากับ $3W_h/ W_p$ โดยที่ W_h คือน้ำหนักของตุ้มตอก และ W_p คือน้ำหนักของเสาเข็มต่อหน่วยความยาว

การสะท้อนกลับของคลื่นความเค้นระหว่างการตอกเสาเข็มในชั้นดินอ่อน(รูปที่ 3.9ก) การสะท้อนกลับของคลื่นความเค้นที่ปลายเสาเข็มจะให้ค่าความเค้นแรงดึง เมื่อความยาวของเสาเข็มตอกมีขนาดมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น การจะลดความเค้นแรงดึงที่สะท้อนกลับทำโดยการลดระยะตุ้มตอกหรือเพิ่มน้ำหนักตุ้มตอกซึ่งเป็นการเพิ่มความยาวคลื่นความเค้นในตัวเสาเข็มนั้นเอง

การสะท้อนกลับของคลื่นความเค้น เสาเข็มแบกทาน เมื่อการตอกเสาเข็มปลายหยั่งในชั้นดินแข็งหรือชั้นหิน(รูปที่ 3.9ข) ความเค้นแรงอัดจากการกระทบตุ้มตอกจะสะท้อนกลับที่ปลายเสาเข็มซึ่งอาจมีค่าเป็นสองเท่าของความเค้นเดิม ทางทฤษฎีคลื่นความเค้นแรงอัดนี้จะเดินทางกลับมาที่หัวเสาเข็มและสะท้อนเป็นคลื่นความเค้นแรงดึงได้ทำให้หัวเสาเข็มแตกเสียหาย เกิดปรากฏการณ์ตุ้มตอกกระดอนจากหัวเสาเข็มตอก ผลของคลื่นความเค้นแรงดึงอาจทำให้ปลายเสาเข็มหลุดจากตำแหน่งหยั่งถึงชั้นหิน สภาพการตอกเสาเข็มที่ปลายหยั่งถึงชั้นหินแล้วคืออัตราการจมต่ำและตุ้มตอกกระดอนจากหัวเสาเข็มเวลาตกกระทบ

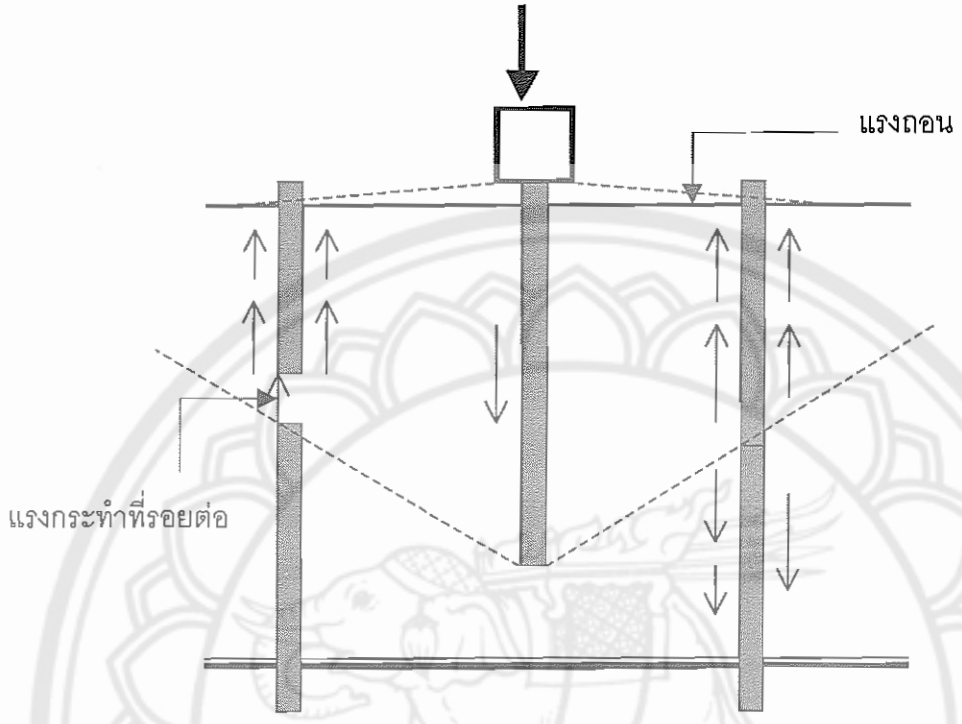


รูปที่ 3.9ก



รูปที่ 3.9ข

รูปที่ 3.9 การกระจายคลื่นความเค้นในตัวเสาเข็มตอก



รูปที่ 3.10 การขาดของรอยเชื่อมผลจากการเบียดแทนที่ของกลุ่มเสาเข็มในมวลดิน

ค่าความเค้นและความยาวของคลื่น ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากแรงเสียดทานของดินที่หน้าสัมผัสของเสาเข็มตอกด้วยจากการวัดในสนาม ความเค้นสูงสุดในชั้นดินเหนียวอ่อนลดค่าลงประมาณ 0.5% ต่อความยาวเสาเข็มหนึ่งเมตรและความเค้นสูงสุดภายในชั้นดินทรายอาจสามารถลดลงได้ถึง 2% ต่อความยาวเสาเข็มหนึ่งเมตร

ความเสียหายขึ้นกับเสาเข็มอาจหลีกเลี่ยงหรืออาจลดน้อยลงได้ โดยการใช้หมอนรองเสาเข็มเมื่อทำการตอก ที่ความต้านทานกำหนดเพื่อการตอกควรจะหยุด ค่าความต้านทานกำหนด

เสาเข็มไม้	การตอก 4-5 ครั้ง/25มิลลิเมตร
เสาเข็มคอนกรีต	การตอก 6-8 ครั้ง/25มิลลิเมตร
เสาเข็มเหล็ก	การตอก 12-15 ครั้ง/25มิลลิเมตร

3.5.2 ความสัมพันธ์เสาเข็มกับตุ้มตอก

อาศัยพื้นฐานของการตอกเสาเข็ม Hiley, Janbu และ Danish ในการกำหนดขนาดของลูกตุ้มและระยะยกของลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็ม อาจพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลหรือข้อกำหนดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางการพิจารณาคัดเลือก

Milligam(ว.ส.ท.2521)ได้กำหนดน้ำหนักสูงสุดของลูกตุ้มที่จะนำมาใช้งาน

$$W_{max} = \frac{0.0764\ A\sqrt{B}}{H} \qquad (3.1)$$

โดยที่ W_{max} เป็นน้ำหนักสูงสุดของลูกตุ้ม(ตัน), A เป็นพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม(เซนติเมตร),B เป็นความกว้างของหน้าตัดเสาเข็ม(เซนติเมตร), H เป็นระยะยกของลูกตุ้มสูงจากหัวเข็ม(เซนติเมตร),

Humes(ว.ส.ท.2521)ได้กำหนดน้ำหนักต่ำสุดของลูกตุ้มที่จะนำมาใช้งาน กล่าวคือเสาเข็มยาวไม่เกิน 15 เมตรใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนักเท่ากับเสาเข็ม เสาเข็มยาวตั้งแต่ 15 เมตร ถึง 18 เมตร ใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนัก 0.75 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม และเสาเข็มยาวมากกว่า 18 เมตรใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนัก 0.67 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม

สำหรับระยะตกกระทบของตุ้มน้ำหนักที่ใช้กันทั่วไป สำหรับเสาเข็มขนาดเล็กจะใช้ระยะตกกระทบ 30-50 เซนติเมตร เสาเข็มขนาดกลางระยะตกกระทบ 50-80 เซนติเมตร สำหรับเสาเข็มขนาดใหญ่ระยะตกกระทบ 80-120 เซนติเมตร

จากสมการตอกเสาเข็มและข้อมูลต่างๆ จะทำให้ทราบขนาดน้ำหนักของลูกตุ้มที่จะนำมาใช้งานและระยะตกกระทบ ถ้าใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนักมากใช้ระยะตกกระทบต่ำ ถ้าใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนักน้อยใช้ระยะตกกระทบสูง ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ลูกตุ้มที่มีน้ำหนักมากและระยะตกกระทบต่ำเป็นเกณฑ์

3.5.3 การหยุดตอกเข็ม

ระยะฝังลึกของเสาเข็มที่จะหยุดการตอกได้ ตามหลักการควรเป็นระยะที่อยู่ในชั้นรับแรงธาร 2-3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มหรือประมาณ2-3เมตร แต่เนื่องจากความลึกของชั้นรับแรงธารแตกต่างกันไปในแต่ละที่จึงควรจะหลีกเลี่ยงการตอกโดยใช้แรงเพื่อให้ได้ความลึกตามข้อกำหนดหรือในแบบ ในกรณีเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเป็นการยากที่จะตอกให้เข็มจมเกิน 2 เมตร ในชั้นดินเหนียวที่มีค่า N มากกว่า 10-15 หรือในชั้นดินทรายที่มีค่า N มากกว่า 30 แต่ในกรณีของเสาเข็มท่อเหล็กยากที่จะตอกให้ฝังลึก 2 เมตร (ในชั้นดินเหนียวที่มีค่า q_u เกิน 10 กก/ซม^2) ค่า N ระหว่าง 20-30 โดยทั่วไปถือเกณฑ์ว่าค่า N ของชั้นรับแรงธารจะต้องมากกว่า 30 สำหรับชั้นดินทราย และจะต้องมากกว่า 20 สำหรับชั้นดินเหนียว

3.6 ความคงทนของเสาเข็ม

3.6.1 การสึกกร่อนของเสาเข็มเหล็ก

การสึกกร่อนของเสาเข็มเหล็กเป็นมีปัญหาอย่างมากเมื่อสภาพแวดล้อมของชั้นดินถูกรบกวนเช่น ชั้นดินถมและเสาเข็มในทะเล

อัตราการสึกกร่อนของเหล็กในพื้นที่อุตสาหกรรม เฉลี่ย 8.5 ถึง 9.0 มิลลิเมตรใน 100 ปีถือว่าเป็นสภาพรุนแรงและอัตราการกัดกร่อนตามปกติเป็น

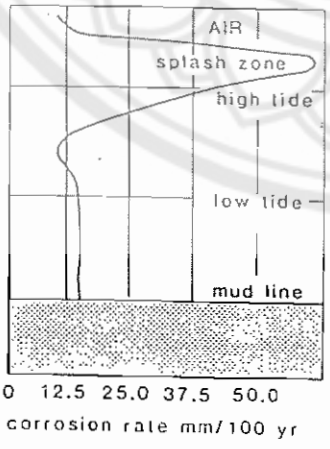
2.5 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อ 100 ปี ในอากาศ

0.5 ถึง 7.5 มิลลิเมตรต่อ 100 ปี ในดิน

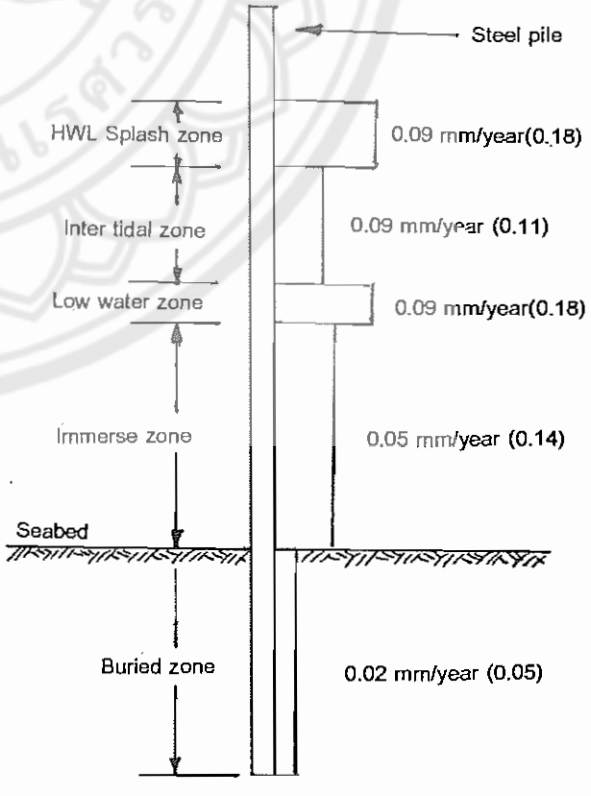
5.0 ถึง 25 มิลลิเมตรต่อ 100 ปี ในทะเล

ในสภาพแวดล้อมกลางทะเล อัตราการสึกกร่อนจะสูงกว่า (รูปที่3.11) โดยอัตราการสึกกร่อนของช่วงคลื่นกระทบ(splash zone)สูงถึง 60 ม.ม.ต่อ 100ปี ประมาณเกือบสองเท่าของอัตราการสึกกร่อนใต้น้ำ

เสาเข็มเหล็กสำหรับท่าเทียบเรือ โครงสร้างกลางทะเล และโครงสร้างกลางน้ำ ควรมีสารป้องกันการสึกกร่อนแบ่งเป็นห้าโซนคือ โซนอากาศ(atmospheric) โซนคลื่นกระทบ(splash zone) โซนน้ำขึ้นน้ำลง (inter tidal zone) โซนใต้น้ำ(immerse)และโซนฝังดิน(buried zone) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 อัตราการสึกกร่อนของเหล็กในน้ำทะเล(มม./100 ปี)



รูปที่ 3.12 การแบ่งโซนต่างๆ

มาตรการการป้องกันการสึกกร่อนต่อเสาเข็มเหล็ก

1. ใช้วัสดุเคลือบทองแดง(copper bearing) ในโซนอากาศ

2. ใช้วัสดุเหนียวยืดหยุ่นสูง(high yield steel)ในโครงสร้างเหล็กเพื่อการเตือนภัยต่อความเค้นวิกฤต

3. ใช้การเพิ่มความหนาเหล็ก โดยเลือกหน้าตัดเหล็กใหญ่ขึ้นหนึ่งเบอร์

4. ใช้การป้องกันถ่ายประจุอิออน(cathodic protection)ซึ่งค่อนข้างซับซ้อนแล้วแต่วัสดุและมีราคาแพง

5.ใช้คอนกรีตหุ้มเสาเข็มเหล็กส่วนที่เหนือน้ำ

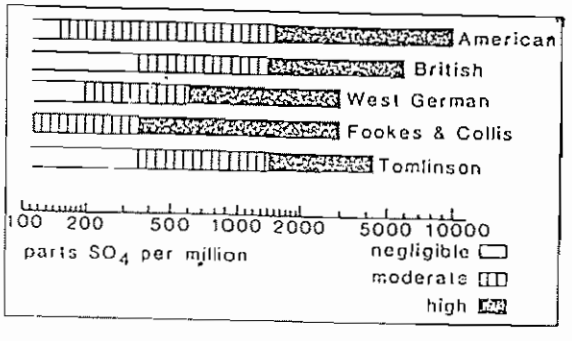
ในการป้องกันการสึกกร่อนพบว่าการใช้สารเคลือบต่างๆมีอายุน้อยกว่า 12 ถึง 15 ปี การเลือกใช้การป้องกันโดยใช้สารเคลือบ ควรพิจารณาทางเลือกของการใช้การเพิ่มความหนาเหล็กและการใช้วัสดุเหล็กเหนียวยืดหยุ่นสูงประกอบด้วย วิธีหลังสามารถทนการกัดกร่อนมากกว่า 35% โดยไม่เสียกำลังของเสาเข็มเหล็ก ด้วยราคาวัสดุเพิ่มเพียง 8% ตำแหน่งความเค้นสูงสุดในเสาเข็มเหล็กกลางทะเลเป็นบริเวณใกล้จุดฝังดินเมื่อเกิดการสึกกร่อนด้วยอัตราทั่วไป

3.6.2 **การสึกกร่อนของเสาเข็มคอนกรีต**

การสึกกร่อนของเสาเข็มคอนกรีตทั้งเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ เกิดในน้ำใต้ดินที่มีปริมาณซัลเฟตและคลอรีนสูง เมื่อค่า pH ต่ำ ระดับการสึกกร่อนของคอนกรีตขึ้นกับองค์ประกอบของสารเคมีในน้ำใต้ดินจึงมักใช้คอนกรีตมวลแน่นในคอนกรีตฐานราก

ก) ปฏิกิริยาซัลเฟต

เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้ เกลือซัลเฟตมีมากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ดินบริเวณริมทะเล หรือดินทั่วไป ชนิดที่พบมากที่สุดเป็นโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังพบอยู่ในน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือตามแหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติด้วยผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต ส่วนแมกนีเซียมซัลเฟตทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว การแบ่งระดับความรุนแรงตามความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การแบ่งระดับความรุนแรงตามความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต

ข) ปฏิกิริยาคลอไรด์

การสึกกร่อนจากปฏิกิริยาคลอไรด์พบมากบริเวณอุตสาหกรรม ตัวคอนกรีตเองไม่มีปัญหากับคลอไรด์แต่เหล็กอาจเกิดสนิมและร่อนแตก การป้อนกันเหล็กเสริมจึงเป็นปัญหาหลักซึ่งอาจใช้เหล็กไร้สนิมหรือเหล็กเคลือบคาวาไนล์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตนั้นเอง หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานต่อคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมากจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว

เสาเข็มคอนกรีตในดินควรมีท่อหุ้มป้องกันปฏิกิริยาคลอไรด์ในพื้นที่เขตร้อน เมื่อความเข้มข้นคลอไรด์เกิน 3%

ค) ปฏิกิริยากรดในน้ำใต้ดิน

สภาพดินนี้พบมากในดินพีซ(peaty soil)และดินปนเปื้อนเขตอุตสาหกรรม ในกรณีดินพีซการสึกกร่อนอาจไม่รุนแรง ดินปนเปื้อนเขตอุตสาหกรรมจะรุนแรงกว่าและเป็นบริเวณจำกัด ทางเลือกหนึ่งคือ การใช้คอนกรีตมวลแน่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และสารลดน้ำ ค่าระดับ pH ต่ำกว่า 6 การสึกกร่อนปานกลาง และค่าระดับ pH ต่ำกว่า 3.5 การสึกกร่อนรุนแรง

ในสภาพดินทั่วไป การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเคมีในน้ำมักจำกัดอยู่กับการหาค่า pH เปอร์เซนต์ซัลเฟตและเปอร์เซนต์คลอไรด์ เมื่อเปอร์เซนต์ซัลเฟตซัดเฟตเกิน 0.5% ในดิน ควรทดสอบการละลายในน้ำของสารเคมีซัลเฟตเป็นกรัมต่อลิตร ดังในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 มาตรฐานเยอรมันและ ตารางที่ 3.6 การป้องกันการสึกกร่อนคอนกรีต

ตารางที่ 3.4 การจำแนกเปอร์เซนต์ซัลเฟตที่มีผลต่อคอนกรีตฐานราก(Tomlinson)

Concentration of sulphates expressed as SO_3				Types of cement and limiting mix proportions[1] for dense fully-compacted concerete and other protective measures for
Class	In soil		In ground water parts/100 000	precast concrete piles and pile shells, precast concrete caps and ground beams
	Total SO_3 %	SO_3 in 2:1 aqueous extract (g/l)		
1	Less than 0.2	—	Less than 30	OPC: Min = 300kg/m³ (500lb/yd³) Max *w/c* ratio = 0.55
2	0.2–0.5	—	30–120	*a*. Above highest water level. OPC: Min = 310kg/m³ (525lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50. *b*. In contact with fluctuating water level. OPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³), Or SRPC: Min = 310kg/m³ (525lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50.
3	0.5–1.0	1.9–3.1	120–250	*a*. Above highest water level. OPC: Min = 380kg/m³ (650lb/yd³). Or SRPC: Min = 340kg/m³ (575lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50. *b*. In contact with fluctuating water level. SRPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50.
4	1.0–2.0	3.1–5.6	250–500	*a*. Above highest water level. SRPC: Min = 380kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.45. *b*. In contact with fluctuating water level in lower range of SO_3 and favourable cations use SRPC: Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.45. For higher range of SO_3 and unfavourable cations use SSC: Min = 370kg/m³ (625lb/yd³) or provide permanent sheathing in metal or plastics.
5	Over 2.0	Over 5.6	Over 500	*a*. Above highest water level. SRPC: Min = 390kg/m³)650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.40. *b*. In contact with fluctuating water level provide permanent sheating in metal or plastics over SRPC concrete. Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.40.

OPC: Ordinary Portland cement. SSC: Supersulphated cement.
SRPC: Sulphate-resisting Portland cement. Min: Minimum recommended cement content.

1. The minimum cement contents recommended above are suitable for:
   a Precast concrete with low workability [12–25mm (½–1in) slump].
   b Cast-in-situ concrete in pile shells, pile caps and ground beams with medium workability [50–75mm (2–3in) slump]
   c Cast-in-situ piles with high workability [100mm (4in) slump].
   If concrete of a lower workability than *c* is required by the specialist piling contractor, the cement content may be reduced provided that the concrete can be compacted to a dense impermeable mass, in no case must the maximum water/cement ratio be exceeded.

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การจำแนกเปอร์เซนต์ซัลเฟตที่มีผลต่อคอนกรีตฐานราก(Tomlinson)

Types of cement limiting mix proportions[1] for dense fully-compacted concrete and other protective measures for	
Concrete placed in thin steel shells in dry conditions[2]. Reinforced concrete in pile caps and ground beams[3]	Concrete in driven-and-cast-in-situ and bored-and-cast-in-situ piles[4]
a Above highest water level. OPC: Min = 300kg/m³ (500lb/yd³) Max *w/c* ratio = 0.55. *b* In contact with fluctuating water level. OPC: Min = 310kg/m³ (525lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.55.	*a* Above highest water level. OPC: Min = 330kg/m³ (550lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.55. *b* In contact with fluctuating water level. OPC: Min = 370kg/m³ (625lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.55.
a Above highest water level. OPC: Min = 330kg/m³ (550lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50. *b* In contact with fluctuating water level. OPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³). Or SRPC: Min = 310kg/m³ (525lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50.	*a* Above highest water level. OPC: Min = 370kg/m³ (625lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50. *b* In contact with fluctuating water level. OPC: Min = 380kg/m³ (650lb/yd³). Or SRPC Min = 340kg/m³ (575lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50.
a Above highest water level. OPC: Min = 400kg/m³ (675lb/yd³). Or SRPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50. *b* In contact with fluctuating water level. SRPC: Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50.	*a* Above highest water level. OPC: Min = 400kg/m³ (675lb/yd³). Or SRPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50. *b* In contact with fluctuating water level. SRPC: Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.50[5].
a Above highest water level. OPC: Min = 400kg/m³ (675lb/yd³). Or SRPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³). *b* Max *w/c* ratio = 0.45. In contact with fluctuating water table as for precast concrete but external sheathing to consist of polyethylene, hot bitumen spray, bituminous paint, trowel-applied mastic asphalt or adhesive plastics sheet.	*a* Above highest water level and soil free from seepage water. SRPC: Min = 400kg/m³ (675lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.45. *b* In contact with fluctuating water level in lower range of SO_3 and favourable cations use SRPC: Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.45. For higher range of SO_3 and unfavourable cations place concrete in durable metal or plastics sleeve left in place.
a Above highest water level. OPC: Min = 400kg/m³ (675lb/yd³). Or SRPC: Min = 350kg/m³ (600lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.40. *b* In contact with fluctuating water level. SRPC: Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.40 with permanent external sheathing as above.	*a* Above highest water level and soil free from seepage water. SRPC: Min = 390kg/m³ (650lb/yd³). Max *w/c* ratio = 0.40. *b* Cast-in-situ piles are unsuitable for installation below the water table.

2. The precautions assume that the shells may be ruptured or lost by corrosion.
3. The precautions assume fairly massive sections where the concrete can be vibrated.
4. The precautions assume that the driving tube or borehole casing is extracted during or after placing the concrete.
5. A higher cement content may be required if the concrete is placed under water by tremie pipe.

ตารางที่ 3.5 การจำแนกสภาพการสึกกร่อนต่อคอนกรีต(DIN4030)

Line	Examination	Degree of aggressiveness		
		Slight	Severe	Very severe
1	pH value	6.5–5.5	5.5–4.5	below 4.5
2	Lime-dissolving carbonic acid (CO_2) in mg/l determined by marble test according to Heyer	15–30	30–60	over 60
3	Ammonium (NH_4) in mg/l	15–30	30–60	over 60
4	Magnesium (Mg) in mg/l	100–300	300–1 500	over 1 500
5	Sulphate (SO_4) in mg/l	200–600	600–3 000	over 3 000

Notes
The maximum aggressiveness is applicable to the evaluation of water even if it is only achieved by one of the values in Lines 1 to 5. If two or more values lie in the upper quarter of a range (in the lower quarter for the pH) the aggressiveness is increased by one stage. This increase does not apply to sea water.
Greater aggression occurs at higher temperatures or if concrete is subject to abrasion by swift-flowing or agitated water. The aggressiveness declines in low temperatures or if water is present only in small volumes and is quiescent, *e.g.* in soils having low permeability ($K < 5$–$10 m/s$).

ตารางที่ 3.6 การป้องกันการสึกกร่อนคอนกรีต(DIN1045)

Degree of aggressiveness to DIN 4030	Precautions recommended in DIN 1045
Slight	Permeability to DIN 1048 $e_{max} < 50mm$ Water-cement ratio < 0.60
Severe	Permeability to DIN 1048 $e_{max} < 30mm$ Water-cement ratio < 0.50
Very severe	Use protective coating on concrete
From 400 mg/l of SO_4 in water From 3000 mg/kg of SO_4 in soil	Use sulphate-resisting cement to DIN 1164