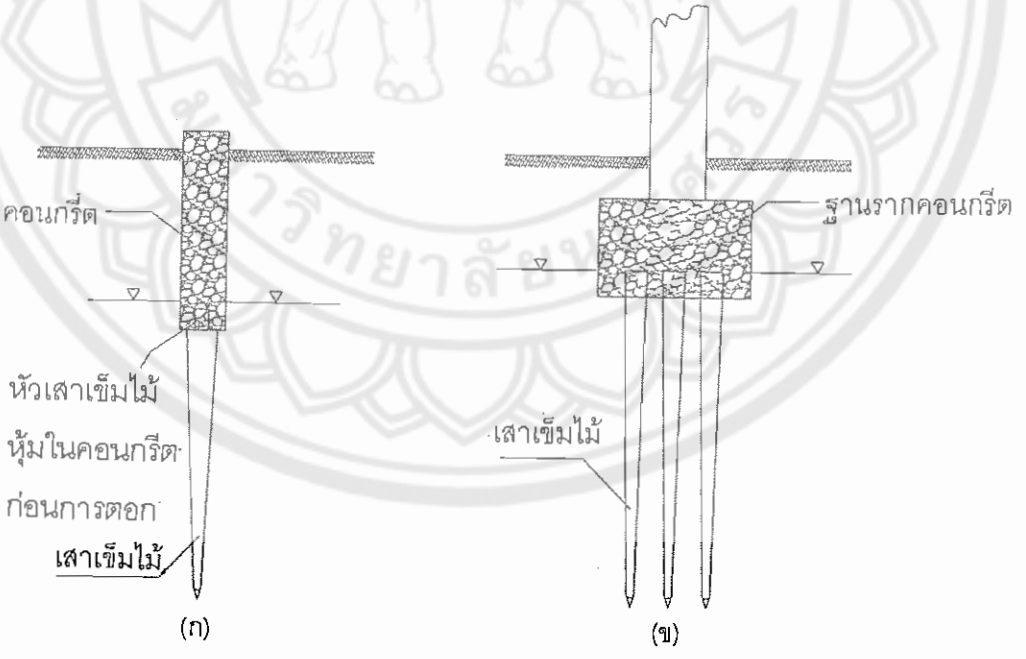
บทที่ 2
เสาเข็มและอุปกรณ์การตอก

2.1 ชนิดเสาเข็ม

เสาเข็มมีหลายชนิดแยกตามวัสดุได้แก่ เสาเข็มไม้ เสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มเหล็ก

2.1.1 เสาเข็มไม้

เสาเข็มไม้เมื่อตอกลงไปในดินต้องอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินตลอดปี จึงทนทานและมีอายุการใช้งานนานมาก เพราะไม่มีปัจจัยเรื่องอากาศทำให้เกิดการผุกร่อน ส่วนที่อยู่พ้นน้ำมีแนวโน้มถูกกัดกร่อนผุพังได้ สารป้องกันเนื้อไม้ต่อสภาพชื้นหรือสภาพแห้ง บ่อยครั้งไม่ได้ช่วยยืดอายุการใช้งานของเสาเข็มเท่าที่ควร เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติการวางระดับหัวเสาเข็มให้ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน โดยการต่อหัวเสาเข็มด้วยคอนกรีตดังรูปที่ 2.1(ก) และวางระดับฐานรากคอนกรีตให้ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินดังรูปที่ 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 การป้องกันเสาเข็มไม้ผุกร่อน

ก. การหล่อหัวเสาเข็มไม้ด้วยคอนกรีต

ข. การวางระดับฐานรากคอนกรีตต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

เสาเข็มไม้ในทะเลจะผุพังได้เร็วกว่า เพราะมีสิ่งมีชีวิตจำพวกหอยและเพรียงในทะเลมาเกาะกัดทำลายและการกัดทำลายจากน้ำทะเล ในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะในพื้นที่โซนเขตร้อนจะมีความรุนแรงในการผุกร่อนมาก การผุกร่อนที่เกิดขึ้นสามารถลดลงได้โดยการใช้ไม้เนื้ออ่อนเคลือบด้วยสาร creosote หรือลดความรุนแรงโดยการใช้ไม้เนื้อแข็ง

ว.ส.ท.สัมมนาวิศวกรรมฐานราก'46 ชี้ว่าในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้ friction pile เพราะเหมาะกับสภาพดินอ่อนของกรุงเทพ งานด้านฐานรากเสาเข็มในอดีตได้พัฒนาจากการใช้เสาเข็มไม้มาสู่เสาเข็มคอนกรีต โดยระยะแรกใช้การตอกเสาเข็มและตอกด้วยมือ เสาเข็มที่ใช้แรงงานคนตอกในช่วงแรก มีขนาด Ø6"x3ม. ต่อมาเพิ่มเป็น Ø6"x6ม. , Ø8"x8ม. , Ø10"x12ม. และขนาด Ø12"x16ม. รับน้ำหนักประมาณ 10-50 ตัน เมื่อจำนวนและขนาดเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น จึงใช้เครื่องจักรตอกเสาเข็มแทนแรงงานคน

จากนั้นวิศวกรได้พัฒนามาใช้เสาเข็มคอนกรีตที่หล่อจากโรงงาน เนื่องจากไม้เป็นทรัพยากรที่ต้องการการอนุรักษ์ทางธรรมชาติ ส่งผลให้การใช้ไม้เพื่อเป็นเสาเข็มฐานรากหาได้ยากขึ้น

2.1.2 เสาเข็มคอนกรีต

เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จมักเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เพราะให้ความแข็งแรงกว่าในเชิงการขนส่ง การใช้เสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จสมัยก่อนนำมาใช้กับงานก่อสร้างทางทะเล และโครงสร้างในแม่น้ำ ที่ซึ่งการหล่อเสาเข็มหน้างานทำได้ยากและไม่ประหยัด การหล่อเสาเข็มในที่หน้างานสำหรับงานก่อสร้างบนดินอาจเปรียบกว่าเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จอยู่บ้าง

1. การเสริมเหล็กอัดแรงของเสาเข็มหล่อสำเร็จ ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อการบิดและการดึงขณะการขนส่งและการตอก ในสภาพใช้งานเมื่อเสาเข็มรับแรงกด กำลังคอนกรีตของเสาเข็มกลับเสียไปส่วนหนึ่งเนื่องจากผลของการอัดแรงนั้น

2. ในลักษณะสภาพดินที่ตำแหน่งชั้นดินแข็งรับปลายเสาเข็มไม่แน่นอน การกำหนดความยาวเสาเข็มหล่อสำเร็จอาจจะทำได้ยาก ปัจจุบันนี้มักแก้ไขโดยการทดสอบการทะลุทะลวง (sounding) เพื่อนำมากำหนดความยาวของเสาเข็มในสนามก่อน

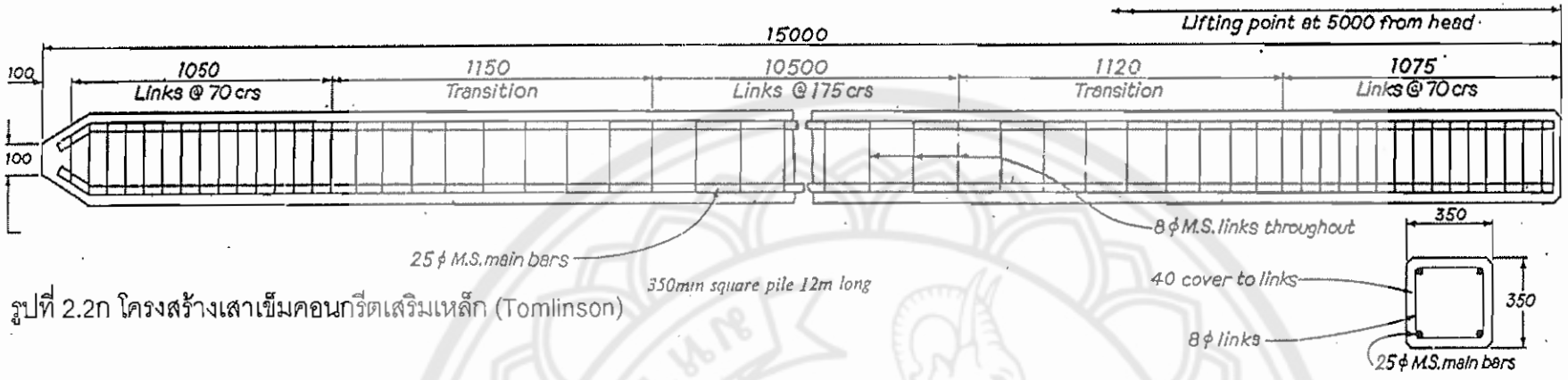
โครงสร้างเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กมาตรฐานยุโรปแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) เสาเข็มสี่เหลี่ยมหล่อสำเร็จสำหรับงานตอกเสาเข็มทั่วไป และรูปที่ 2.2(ข)เสาเข็มหกเหลี่ยมหล่อสำเร็จสำหรับการตอกที่ลำบากและหยั่งเสาเข็มถึงชั้นหิน โครงสร้างเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมาตรฐานอังกฤษแสดงในรูปที่ 2.3

ลักษณะคอนกรีตผสมสำหรับเสาเข็มหล่อสำเร็จ สอดคล้องกับสภาพความยากง่ายของการตอกเสาเข็มและกำลังของคอนกรีตที่เหมาะสม เปรียบเทียบตามมาตรฐานในตารางที่ 2.1 กำหนดกำลังความเค้นคอนกรีตที่ยอมให้ (P_{cb}) ดังนี้

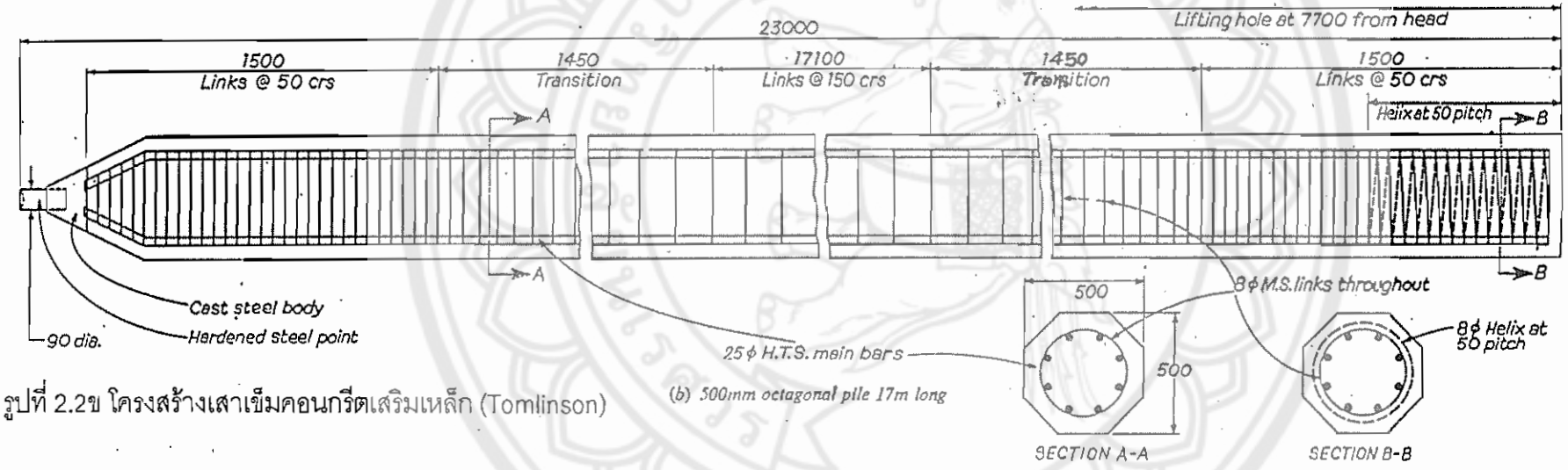
ตารางที่ 2.1 กำหนดกำลังความเค้นคอนกรีตที่ยอมให้ (P_{cb}) ดังนี้

มาตรฐาน	กำลังคอนกรีตลูกบาศก์ 28 วัน	กำลังความเค้นที่ยอมให้	
		แรงกดโดยตรง	แรงบิด
CP 114	$f'_c = 2.73\ P_{cb}$	$0.75\ P_{cb}$	P_{cb}

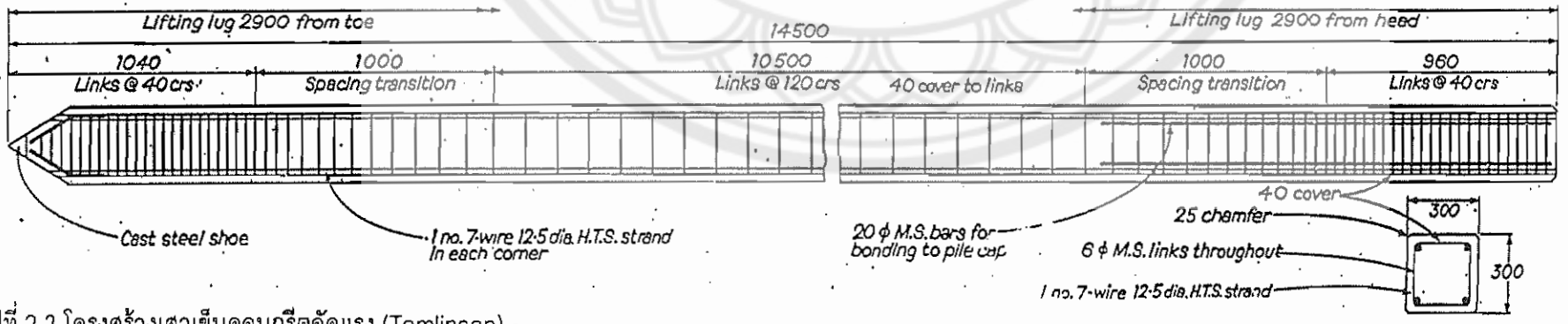
การหล่อคอนกรีตเสาเข็มควรใช้แบบหล่อที่ถอดประกอบได้ดังรูปที่2.4 และการเรียงเสาเข็มคอนกรีต เว้นช่องระบายลมดังรูปที่ 2.5 ส่วนรูปที่ 2.6 แสดงแบบหล่อเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เสาเข็มที่หล่อสำเร็จแล้ว ควรระบุเลขอ้างอิง, ขนาดความยาว , และวันหล่ออย่างชัดเจน ก่อนเวลาขนย้าย และควรใช้วัสดุไม้หมอนรองเสาเข็มคอนกรีต กับวัสดุคลุมเสาเข็มคอนกรีตช่วยในการบ่มคอนกรีต ระวังการวางหมอนไม้ผิดตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวบนตัวเสาได้ ดังรูปที่ 2.7



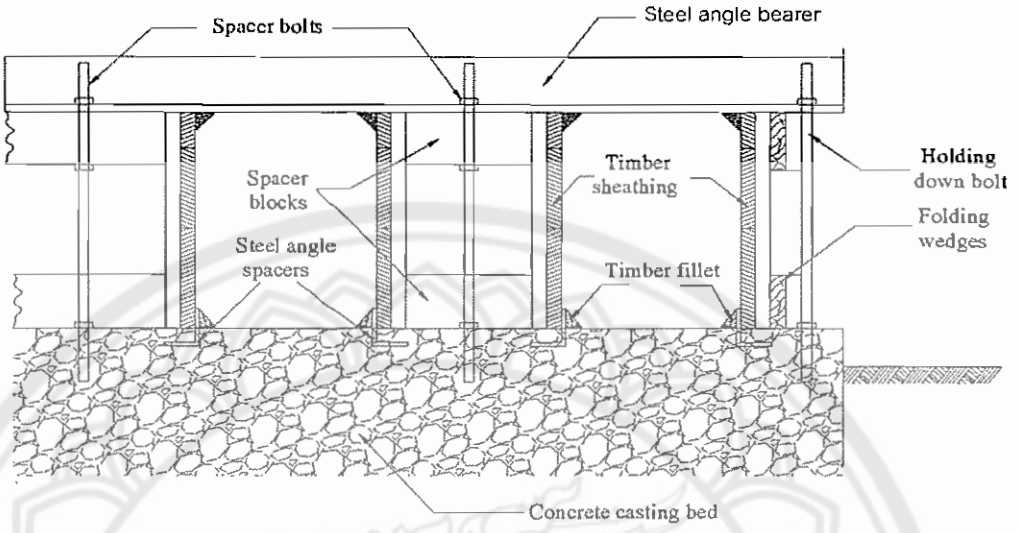
รูปที่ 2.2ก โครงสร้างเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tomlinson)



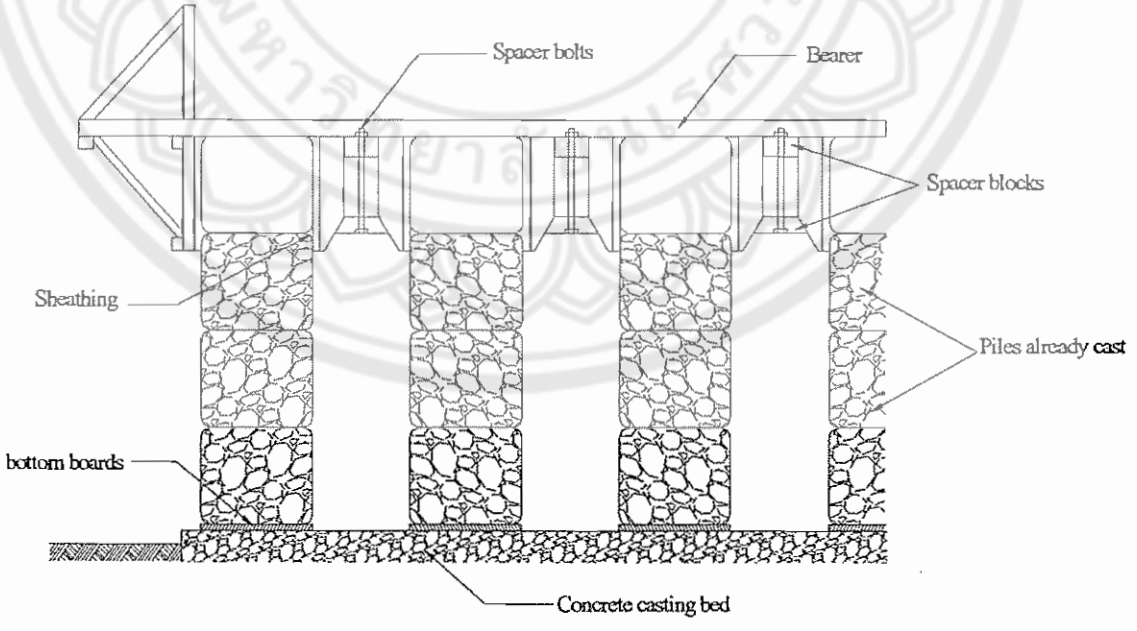
รูปที่ 2.2ข โครงสร้างเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tomlinson)



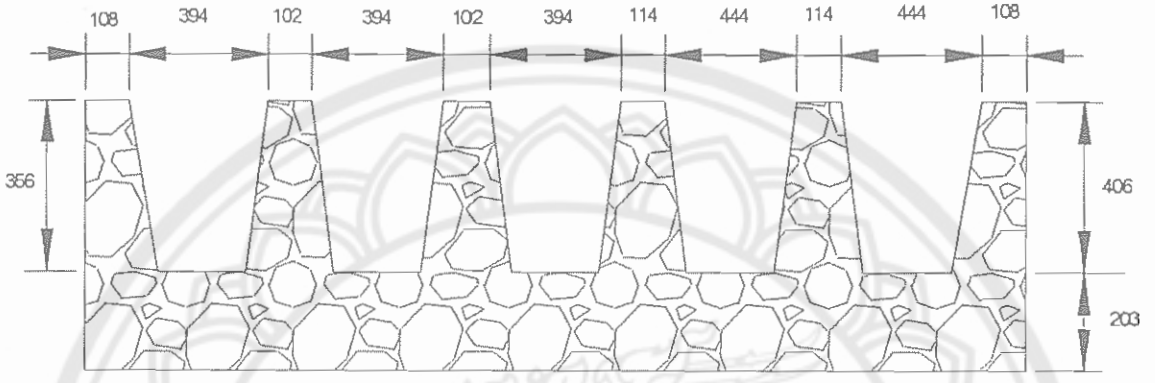
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Tomlinson)



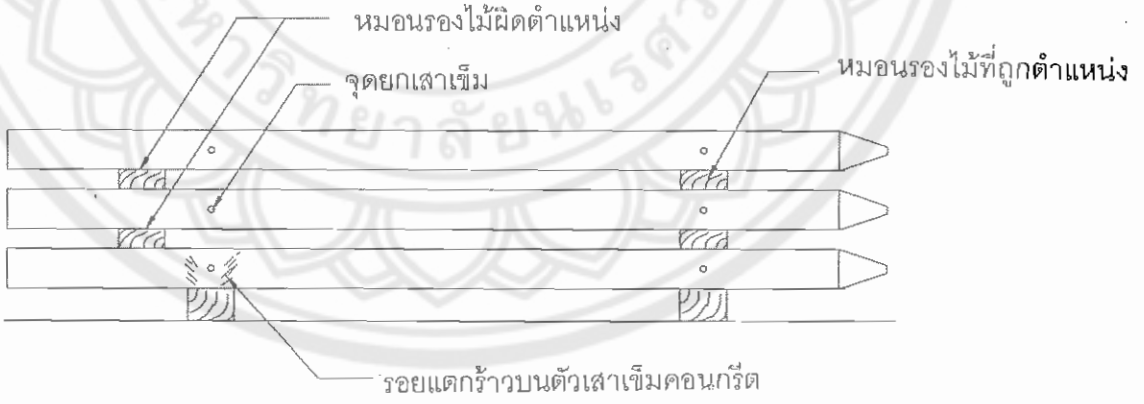
รูปที่ 2.4 แบบหล่อไม้สำหรับเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Tomlinson)



รูปที่ 2.5 การเรียงเสาเข็มคอนกรีต (Tomlinson)



รูปที่ 2.6 แบบหล่อเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Tomlinson)



รูปที่ 2.7 การวางหมอนไม้รองเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ

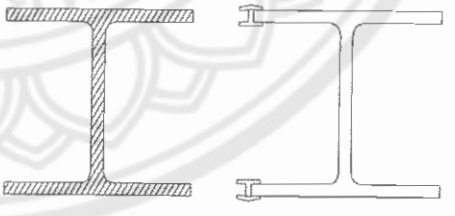
2.1.3 เสาเข็มเหล็ก

เสาเข็มเหล็ก มีข้อดีคือ มีความแข็งแกร่ง ทนทาน เบาต่อการยก รับน้ำหนักบรรทุกได้สูง ยังสามารถตอกทะลวงไปสู่ชั้นดินแบกทานได้ดีกว่าเสาเข็มคอนกรีต เหมาะกับงานที่ต้องการแทนที่มวลดินน้อย เสาเข็มเหล็กจะลดการบวมของดินบริเวณการตอกและการกระจายด้านข้าง

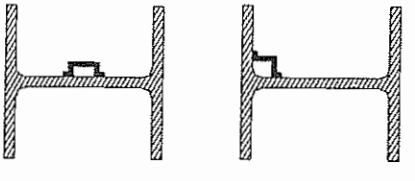
เสาเข็มเหล็กตัวเฮด (H-section piles) มีการแทนที่มวลดินน้อย เหมาะกับโครงการขนาดใหญ่ที่ใช้เสาเข็มฐานรากจำนวนมากตอกกันเป็นกลุ่ม และสภาพโครงการที่ต้องการลดการแทนที่มวลดิน ด้วยคุณสมบัติที่มีหน้าตัดน้อย เสาเข็มเหล็กในชั้นดินอ่อนจึงเป็นเสาเข็มเสียดทาน การเพิ่มแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มเหล็ก สามารถทำได้ในลักษณะการเชื่อมปีกเสา(winged piles) ดังรูปที่ 2.8 เสาเข็มเหล็กตัวเฮดยังมีข้อเสียที่อาจบิดเบี้ยวตามแนวแกนรองระหว่างการตอก ถ้าการโก่งมีมากเสาเข็มอาจหักงอได้ Bjerrum (1959) แนะนำค่าความโค้ง(curvature) รัศมีไม่เกิน 366 เมตร (1200ฟุต) หลังการตอกจมดิน สามารถวัดโดยติดตั้งเหล็กท่อกับตัวเสาเข็มเหล็กดังรูปที่ 2.9 ก่อนการตอก รูปแบบมาตรฐานของเสาเข็มเหล็กตัวเฮดรูปที่ 2.10 และแสดงคุณสมบัติในตาราง 2.2 และ 2.3

เสาเข็มเหล็กกล่อง (steel box piles) ที่นิยมใช้ในอังกฤษและยุโรป ดังตัวอย่างรูปที่ 2.11 รูปแบบขนาดมิติและคุณสมบัติหน้าตัดหาได้จากคู่มือการผลิตและผู้ขาย เช่น British steel piling hand book

รูปที่ 2.8 การเชื่อมปีกเสาเข็มเหล็ก



รูปที่ 2.9 เหล็กท่อเชื่อมติดกับเสาเข็มเหล็ก



รูปที่ 2.10 ชนิดเสาเข็มเหล็กตัวเฮด

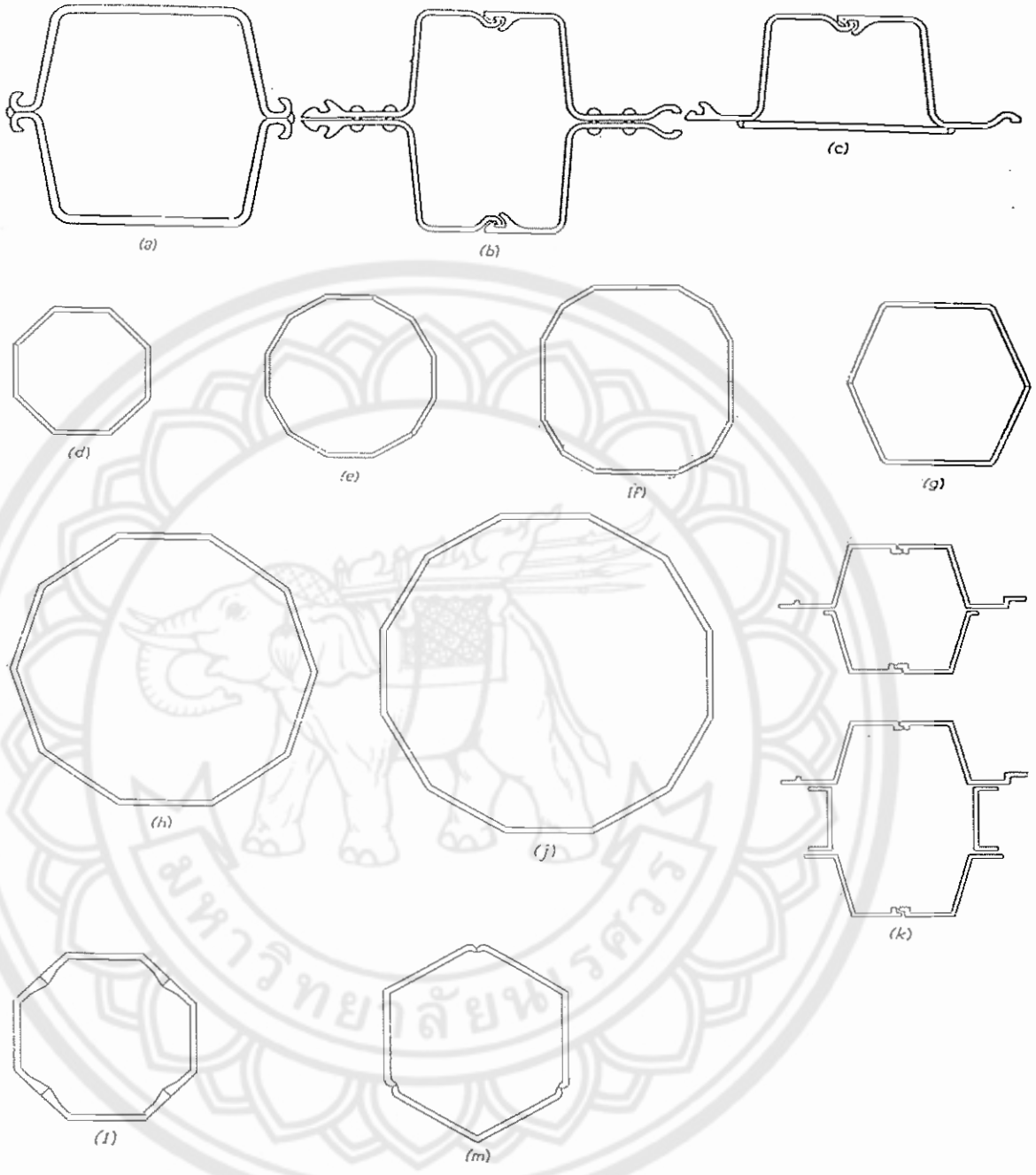
ตารางที่ 2.2 ขนาดและคุณสมบัติเสาเข็มเหล็กแบกทานตัวเฮด มาตรฐาน British steel Corporation

Section	Dimensions Depth over flanges × width over flanges		Mass per unit length		Area of section	
	mm	in	kg/m	lb/ft	mm²	in²
356 × 406mm (14 × 16in)	406.4 × 403.0	16.0 × 15.9	340	228	43 270	67.1
	393.7 × 399.0	15.5 × 15.7	287	193	36 600	56.7
	381.0 × 395.0	15.0 × 15.5	235	158	29 980	46.5
356 × 368mm (14 × 14½in)	374.7 × 374.4	14.7 × 14.7	202	136	25 790	40.0
	361.5 × 378.1	14.2 × 14.9	174a	117a	22 220	34.4
	358.4 × 375.5	14.0 × 14.8	152a	102a	19 360	30.0
	351.9 × 373.3	13.8 × 14.7	133a	89a	16 900	26.2
	346.4 × 370.5	13.6 × 14.6	109a	73a	13 840	21.4
305 × 305mm (12 × 12in)	365.3 × 321.8	14.4 × 12.7	283	190	36 040	55.9
	352.6 × 317.9	13.9 × 12.5	240	161	30 560	47.4
	338.0 × 325.4	13.3 × 12.8	223a	150a	28 500	44.2
	339.9 × 314.1	13.4 × 12.4	198	133	25 230	39.1
	328.4 × 320.5	12.9 × 12.6	186a	125a	23 700	36.7
	327.2 × 310.6	12.9 × 12.2	158	106	20 120	31.2
	318.2 × 315.5	12.5 × 12.4	149a	100a	19 000	29.4
	320.5 × 308.7	12.6 × 12.1	137	92	17 460	27.1
	312.6 × 312.7	12.3 × 12.3	126a	85a	16 100	25.0
	307.9 × 310.3	12.1 × 12.2	110a	74a	14 040	21.8
	303.8 × 308.3	12.0 × 12.1	95a	64a	12 100	18.8
	301.7 × 307.2	11.9 × 12.1	88a	59a	11 200	17.4
	299.2 × 306.0	11.8 × 12.1	79a	53a	10 040	15.6
254 × 254mm (10 × 10in)	289.1 × 264.5	11.4 × 10.4	167	112	21 240	32.9
	276.4 × 261.0	10.9 × 10.3	132	89	16 770	26.0
	266.7 × 258.3	10.5 × 10.2	107	72	13 660	21.2
	254.3 × 259.7	10.0 × 10.2	85a	57a	10 810	16.8
	249.9 × 257.5	9.8 × 10.1	71a	48a	9 100	14.1
	246.9 × 256.0	9.7 × 10.1	63a	42a	7 970	12.3
203 × 203mm (8 × 8in)	203.9 × 207.2	8.0 × 8.2	54a	36a	6 840	10.6
	200.2 × 205.4	7.9 × 8.1	45a	30a	5 700	8.8

a denotes sections with equal flange and web thicknesses.

ตารางที่ 2.3 ขนาดและคุณสมบัติเสาเข็มเหล็กแบกทานตัวเฮด มาตรฐานยุโรป

Section	Dimensions Depth over flanges × width over flanges		Mass per unit length		Area of section	
	mm	in	kg/m	lb/ft	mm²	in²
HP180 × 34	168 × 180	6.6 × 7.1	33.67	23	4 290	6.6
HP180 × 42	172 × 182	6.8 × 7.2	42.02	28	5 530	8.6
HP200 × 38	186 × 199	7.3 × 7.8	37.85	25	4 820	7.5
HP200 × 66	198 × 205	7.8 × 8.1	65.93	44	8 400	13.0
HP220 × 47	206 × 220	8.1 × 8.7	46.55	31	5 930	9.2
HP220 × 78	218 × 226	8.6 × 8.9	77.54	52	9 880	15.3
HP240 × 57	226 × 240	8.9 × 9.5	56.82	38	7 240	11.2
HP240 × 91	238 × 246	9.4 × 9.7	90.64	61	11 550	17.9
HP260 × 62	245 × 260	9.6 × 10.2	62.36	42	7 940	12.3
HP260 × 99	257 × 266	10.1 × 10.5	98.96	66	12 610	19.5
HP280 × 73	266 × 281	10.5 × 11.1	73.48	49	9 360	14.5
HP280 × 113	278 × 287	10.9 × 11.3	113.04	76	11 400	17.7
HP300 × 86	286 × 301	11.3 × 11.9	86.30	58	10 990	17.0
HP300 × 122	296 × 306	11.7 × 12.1	121.55	82	15 480	24.0
HP320 × 95	305 × 302	12.0 × 11.9	95.02	64	12 100	18.8
HP320 × 138	317 × 308	12.5 × 12.1	138.40	93	17 630	27.3
HP340 × 104	325 × 302	12.8 × 11.9	103.93	70	13 240	20.5
HP340 × 148	337 × 308	13.3 × 12.1	148.25	100	18 890	29.3
HP360 × 113	345 × 303	13.6 × 11.9	113.36	76	14 440	22.4
HP360 × 159	357 × 309	14.1 × 12.2	158.72	107	20 220	31.3
HP400 × 133	386 × 304	15.2 × 12.0	133.02	89	16 950	26.3
HP400 × 164	394 × 308	15.5 × 12.1	164.49	111	20 950	32.5
HP450 × 155	436 × 305	17.2 × 12.0	155.26	104	19 780	30.7
HP450 × 188	444 × 309	17.5 × 12.2	188.35	127	23 990	37.2
HP500 × 179	486 × 307	19.1 × 12.1	179.32	120	22 840	35.4
HP550 × 196	536 × 307	21.1 × 12.1	195.92	132	24 960	38.7
HP600 × 214	586 × 308	23.1 × 12.1	213.63	144	27 210	42.2
HP650 × 232	636 × 308	25.1 × 12.1	231.75	156	29 520	45.8
HP700 × 251	686 × 308	27.0 × 12.1	250.62	168	31 930	49.5
HP800 × 280	786 × 308	31.0 × 12.1	280.45	188	35 730	55.4
HP400 × 126	349 × 390	13.7 × 15.4	125.91	85	16 040	24.9
HP400 × 144	353 × 392	13.9 × 15.4	143.70	97	18 310	28.4
HP400 × 162	357 × 394	14.1 × 15.5	161.61	109	20 590	31.9
HP400 × 180	361 × 396	14.2 × 15.6	179.65	121	22 890	35.5



รูปที่ 2.11 ชนิดเสาเข็มเหล็กกล่อง (Tomlinson)

(a) *Larssen (British Steel Corporation and Hoesch AG-Hüttenwerke)*
(b) *Frodingham double box (British Steel Corporation)*
(c) *Frodingham plated box (British Steel Corporation)*
(d) *Frodingham box (British Steel Corporation) and Arbed-Belval CB 40 (Columeta)*
(e) and (f) *Frodingham box (British Steel Corporation)*
(g) *Rendlex (British Steel Corporation)*
(h) *Arbed-Belval CB 50 (Columeta)*
(j) *Arbed-Belval CB 60 (Columeta)*
(k) *Arbed-Belval CZ (Columeta)*
(l) *Union 104, 134 and 164* (Haesch AG-Hüttenwerke)*
(m) *Peine box (Stahlwerke-Peine-Salzgitter AG)*

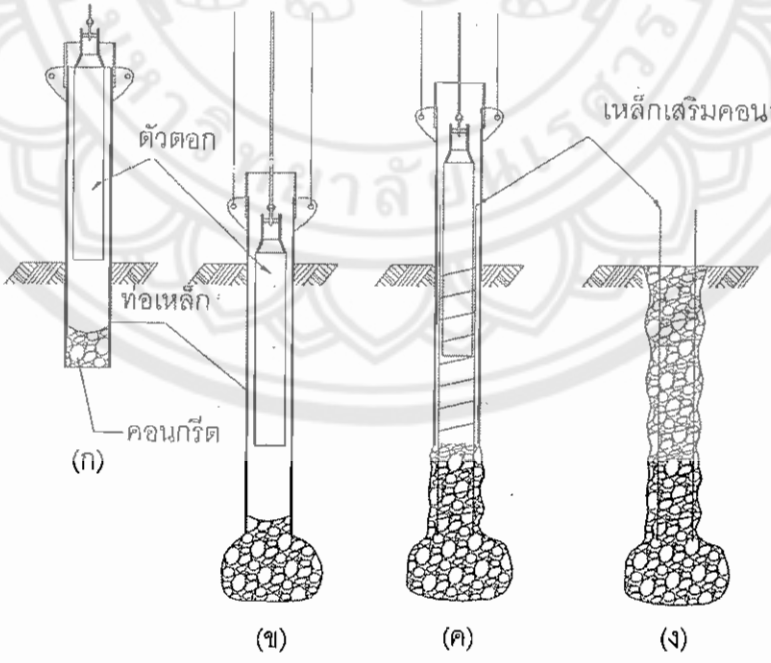
*Numerous sections are made up from 3, 4, 5, 6, 7 and 8 trough units in the Union pile range

2.1.4 เสาเข็มหล่อในที่

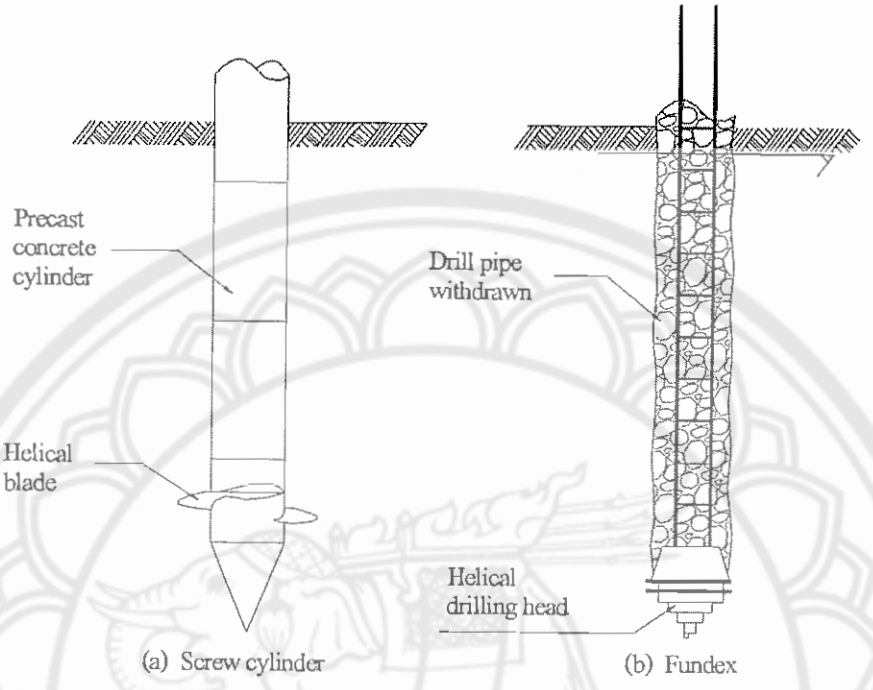
ก. เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (Driven-and-Cast-in-situ Piles) เป็นเสาเข็มที่ตอกนำด้วยท่อเหล็กหนาปลายปิดจนถึงตำแหน่งชั้นดินแบกทาน โดยหล่อคอนกรีตที่ปลายเสาเข็มและเทต่อเนื่อง ในขณะที่ท่อเหล็กถอนออกจากดินดังรูปที่ 2.12 ทั้งนี้เพื่อให้เสาเข็มมีการรับแรงด้วยค่าเสียดทานผิวได้ดี การถอนท่อเหล็กควรใช้ช่างที่มีความชำนาญและมีประสบการณ์ด้านเทคโนโลยีคอนกรีตเป็นอย่างดี

ข. เสาเข็มคอนกรีตสว่าน (Screw piles) พัฒนาจากเสาเข็มไม้ ในการรับแรงกดและแรงยกให้เพิ่มขึ้น โดยใช้ท่อเหล็กนำร่องหรือหัวเจาะ แล้วหล่อส่วนคอนกรีตตามลงไปดังรูปที่ 2.13

ค. เสาเข็มคอนกรีตเจาะ (Bored-and-Cast-in-situ Piles) เสาเข็มเจาะที่ใช้สว่านเจาะมือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Ø355 มิลลิเมตร (14 นิ้ว) และความยาวเพียง 5 เมตร (16 ฟุต) เท่านั้น ซึ่งเหมาะกับอาคารขนาดเล็ก เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่สามารถมีเส้นผ่าศูนย์กลางกว่า 2 เมตร และความลึกกว่า 90 เมตร (300 ฟุต)



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการเทคอนกรีตเสาเข็มหล่อในที่



รูปที่ 2.13 ชนิดเสาเข็มคอนกรีตสว่าน (Tomlinson)

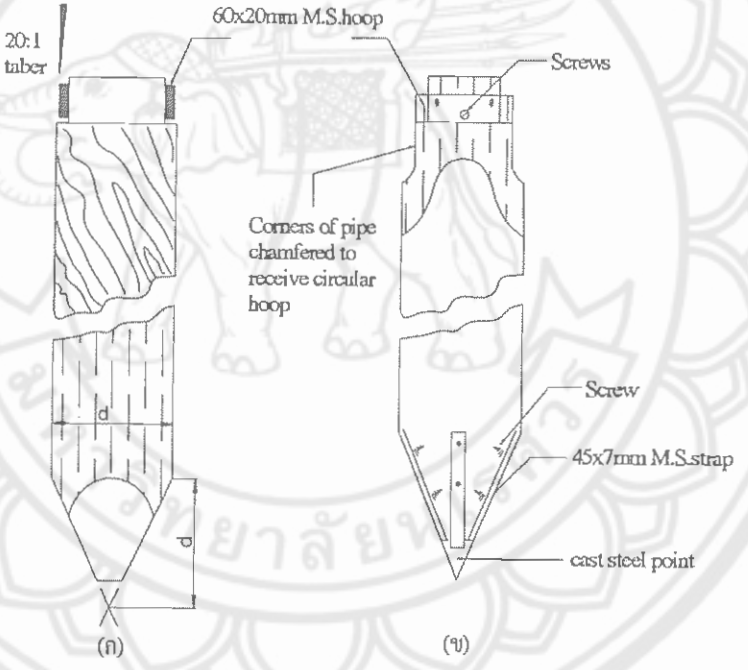
2.2 การตอกเสาเข็ม

2.2.1 การตอกเสาเข็มไม้

ในการตอกเสาเข็มไม้ควรใช้ความเร็วในการกระทบต่ำซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตอกคือDrop hammer หรือ Single – acting hammer (ในหัวข้อ 2.3) ด้วยการยกระดับต่ำและหมอนรองแบบอ่อน ขนาดของตุ้มที่ใช้ในการตอกขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเสาเข็ม ขนาดของเสาเข็ม ค่าอิมพิเด้น (impedance) และคุณสมบัติของดิน โดยทั่วไปกำหนดใช้น้ำหนักตุ้มประมาณ 1.5 เท่าของน้ำหนักเสาเข็มและหมวกเหล็กน้ำหนัก 1 ตัน สำหรับ Drop hammer มีพลังงานในการตอก 160000 N-m. คูณด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

นอกจากนี้ในการตอกเสาเข็มควรที่จะมีการป้องกันเสาเข็ม โดยที่เสาเข็มไม้กลมควรใช้ห่วงเหล็กรัดที่หัวเสาเข็มเพื่อป้องกันรอยแตกที่เกิดขึ้นเช่นดียวกับที่ปลายเสาเข็มดังรูปที่ 2.14 หลีกเลี่ยงการแขวนหรือการเหวี่ยงเสาเข็มเพราะจะทำให้เกิดร่องลึกที่ตัวเสาเข็มได้ และสภาพการตอกได้ลำบากในชั้นดินแข็ง ค่าระยะกำหนดไม่ควรเกิน 1-2 mm/blow เพื่อป้องการการตอกตะบัน (overdriving)

ปัญหาความเสียหายที่พบบ่อยในการต่อเสาเข็มไม้คือ การแตกตามแนวและการบี้ของไม้บริเวณหัวเสาเข็มและปลายเสาเข็ม รวมทั้งการแตกหักของเสาเข็มไม้ด้วย



รูปที่ 2.14 การป้องกันปลายเสาเข็มไม้ระหว่างการตอก (Tomlinson)

ก. ห่วงเหล็กรัดป้องกันหัวเสาเข็ม

ข. แผ่นเหล็กประกับป้องกันปลายเสาเข็ม

2.2.2 **การตอกเสาเข็มคอนกรีต**

ในปัจจุบันเสาเข็มคอนกรีตมักจะทำในรูปของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เนื่องจากสามารถรับหน่วยแรงดัดซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่งหรือการยกเสาเข็ม ลักษณะการตอกเสาเข็มคอนกรีตโดยเครื่องตอกเสาเข็มมีอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่น ตุ้มตกกระแทก (Drop Hammer) เครื่องตอกแบบไอน้ำ (Stream Hammer) เครื่องตอกแบบดีเซล (Diesel Hammer) เป็นต้น ซึ่งมีพลังงานจลน์ นั่นคือ มีก้อนน้ำหนักตกลงมากระแทกปลายบนของเสาเข็มให้จมลงไปในดิน ซึ่งมีวิธีการยกน้ำหนักขึ้นแตกต่างกัน

ก่อนการตอกเสาเข็มจะต้องตรวจสอบตำแหน่งของเสาเข็มว่าถูกต้องตามแบบพร้อมทั้งอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการตอกให้พร้อม นอกจากนี้ตุ้มตอกควรมีขนาดพอเหมาะกับขนาดเสาเข็ม ในการตอกเสาเข็มจะต้องนับจำนวนBlowcountsให้ตรงตามเกณฑ์กำหนด ถ้าค่าBlowcountsลดลงอย่างกะทันหันอาจเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ เสาเข็มหัก ซึ่งจำนวนBlowcountsจะไม่สูงขึ้นอีกเลย ส่วนอีกสาเหตุหนึ่ง หากตอกเสาเข็มลงไปยังไม่ถึงระดับที่กำหนดซึ่งยังห่างอยู่มากแต่Blowcountsขึ้นสูงมากผิดปกติหรือตอกเท่าไรก็ไม่ลงแสดงว่าปลายเสาเข็มอาจไปชนกับก้อนหินขนาดใหญ่ทำให้หัวเสาเข็มโผล่พ้นดินมากซึ่งผู้ควบคุมงานหรือวิศวกรผู้รับผิดชอบจะต้องคอยดูแลตรวจสอบอย่างใกล้ชิด

สิ่งที่พึงระวังในการตอกเสาเข็ม คือ ความสั่นสะเทือนในการตอกและปริมาณ การกระจัดของดินเหนียวที่ถูกแทนที่โดยเสาเข็ม ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่ออาคารข้างเคียง รวมทั้งถนนและท่อระบายน้ำ และเสาเข็มต้นที่ตอกไปแล้วก็อาจหนีศูนย์หรือชำรุดได้ การลดอันตรายและความเสียหายจากการสั่นสะเทือนและการแทนที่ดินอาจทำได้หลายวิธี เช่น การตอกเสาเข็มพืดที่ลึกพอสมควรเพื่อป้องกันด้านสิ่งที่มีสิ่งปลูกสร้าง จัดลำดับการตอกเสาเข็มโดยพยายามบังคับทิศทางการเคลื่อนตัวของดินให้ไปทางที่ไม่มีอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างอื่นเท่าที่จะสามารถทำได้ เป็นต้น

2.2.3 การตอกเสาเข็มเหล็ก

เสาเข็มเหล็กมีความแข็งแรงทนทานและทนต่อแรงกระแทกได้สูง ส่วนใหญ่แล้วความเสียหายที่เกิดขึ้นภายนอกของเสาเข็ม ซึ่งมีลักษณะบิดเบี้ยวผิดรูปที่หัวเสาเข็มและปลายเสาเข็ม บางครั้งจำเป็นที่จะต้องลดความต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็ม โดยการขุดเอาดินหรือหินที่แตกย่อยออกที่ปลายด้านล่างของเสาเข็ม นอกจากนี้ในการตอก ติดตั้งเสาเข็มเหล็ก การวัดแนวเสาเข็มในตำแหน่งดิ่ง(alignment)เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสำเร็จ เพราะเสาเข็มเหล็กเป็นวัสดุเหนียว สามารถโก่งผิดเปลี่ยนแนว โดยไม่ขาดจากกัน

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางปฏิบัติค่าความเค้นใช้งานเสาเข็มเหล็ก (Tomlinson)

Country	Code	Working stress in compression			Remarks
		Related to tensile yield strength	N/mm²	lb/in²	
United Kingdom	CP 2004	$0.30f_y$ (1) $0.50f_y$ (2)	—	—	(1) Where safety factor on driving resistance is not greater than 2. (2) For jacked piles. Steel to conform to BS4360.
W. Germany	DIN 4026	—	—	—	H-sections to conform to DIN 17100. Seamless steel tubes to conform to DIN 1629. Welded steel tubes to conform to DIN 17100.
USA	American Concrete Institute Recommendations	$0.35f_y$	165	24 000	Minimum thickness of pipe piles 2.5mm (0.1in). Cross-sectional area of pipe piles to be at least 3% of gross cross-section. Pipe to ASTM A252-69
	American Petroleum Institute Code RPZO (1972)	$0.35f_y$	—	—	For offshore platforms. Steel to ASTM A53 (Grade B), A106 (Grade B) A139 (Grade B), A135 (Grade B), A381 (Grade Y35), API Spec. 5L (Grade B).
	New York City (1968)	$0.35f_y$	≯248	≯36 000	Pipe piles min. thickness 3mm (⅛in).
			≯248	≯36 000	H-piles min. thickness 10mm (0.4in). Unless higher loads can be substantiated by a specific load test procedure, the basic maximum loads are as follows. Open-ended pipes bearing on medium to hard rock 2 500kN (250 tons) for piles of 457mm (18in) OD or greater; 2 000kN (200 tons) for 457mm (18in) or less OD. Closed-ended piles bearing on medium to hard rock 1 500kN (150 tons); open-ended pipes or H-piles bearing on soft rock 800kN (80 tons); closed or open-ended piles or H-piles bearing on hardpan over rock 1 000kN (100 tons).

ตารางที่ 2.5 ค่าความเค้นและน้ำหนักบรรทุกใช้งานเสาเข็มหล่อในที่ (Tomlinson)

Country	Code	Shell	Structural core	Reinforcing steel	Concrete in shaft	Remarks
United Kingdom	CP 2004	—	—	—	$0.25u_{cu}$	Concrete not to be leaner than 1:2:4
USA	American Concrete Institute Recommendations (1974)	—	$0.50f_y$ 172N/mm² (25 000lb/in²) max	$0.40f_y$ 206N/mm² (30 000lb/in²) max	$0.33u_{cu}$ (unconfined) $0.40u_{cu}$ (confined)*	* Steel shell confining concrete to be not more than 432mm (17in) in diameter. Shell to be 14g(US) or thicker, seamless or spiral welded, $f_y \leq$ 206N/mm² (30 000lb/in²), not exposed to corrosion and does not carry part of working load. Corrugated steel shells not considered as load-bearing
	New York (1968)	$0.35f_y$ ≯ 248N/mm² (36 000lb/in²)	—	$0.40f_y$ ≯ 206N/mm² (30 000lb/in²)	$0.25u_{cu}$	Metal shells thinner than 3mm (⅛in) not to contribute to strength of pile section. Max working load not to exceed 1 500kN (150 tons) for bearing on intermediate to hard rock, 600kN (60 tons) for soft rock, 1 000kN (100 tons) for hardpan overlying rock
W. Germany	DIN 4014	—	—	—	—	Pile diameter (mm) (in) / Max working load (kN) (tons): 300 12 / 200 20; 350 14 / 250 25; 400 16 / 300 30; 500 20 / 400 40. Minimum cement content to be 350kg/m³ (590lb/yd³)
Sweden	SBS-s23:6 (1968)	—	—	—	—	Concrete to have minimum crushing strength of 39N/mm² (5 700lb/in²)

ตารางที่ 2.6 ค่าความเค้นและน้ำหนักบรรทุกใช้งานเสาเข็มหล่อเจาะ (Tomlinson)

Country	Code	Tube	Structural core	Reinforcing steel	Concrete in shaft	Remarks
United Kingdom	CP 2004	—	—	—	$0.25u_w$	Concrete not to be leaner than 1:2:4
USA	American Concrete Institute Recommendations	$0.35f_y$ 87N/mm² (12 600lb/in²) max	$0.50f_y$ 172N/mm² (25 000lb/in²) max	$0.40f_y$ 206N/mm² (30 000lb/in²) max	$0.33u_w$ (unconfined) $0.40u_w$ (confined)*	*Steel shell confining the concrete to be not greater than 432mm (17in) in diameter. Shell to be 14g (us) or thicker. Seamless or spiral welded; $f_y \leq$ 206N/mm² (30 000lb/in²). Not exposed to corrosion and does not carry part of working load. Corrugated steel shells not considered as load bearing
	Chicago	—	—	—	$0.25u_w$	Where permanent lining tube is provided, maximum allowable stress is $0.3u_w + 1.5t/D$ but not greater than $0.4u_w$ (where t is thickness and D is diameter of tube)
	New York (1965)	$0.35f_y$ ≯ 248N/mm² (36 000lb/in²)	$0.50f_y$ ≯ 248N/mm² (36 000lb/in²)	$0.40f_y$ ≯ 206N/mm² (30 000lb/in²)	$0.25u_w$	Min thickness of tube to be 3mm (⅛in) before it can contribute to structure strength of pile. Max. working load not to exceed 1 500kN (150 tons) for piles bearing on medium to hard rock, 800kN (80 tons) for bearing on soft rock and 1 000kN (100 tons) for bearing on hardpan over rock. Max. loads can be exceeded if substantiated by load tests. No upper limit for caisson piles with structural steel core. Uncased piles permitted only when borehole can be kept free of water during placement of concrete and sides and bottom can be inspected before placement
W. Germany	DIN 4014					Min. cement content 350kg/m³ (590lb/yd³) [400kg/m³ (675lb/yd³) for concrete placed under water]. Min. 5 reinforcing bars 14mm (⅝in) diameter. Longitudinal steel to be 0.8% of gross cross-sectional area. Cover 30mm (1⅛in) [50mm (2in) in aggressive ground]. Max. load on piles: Without enlarged base — Diameter (mm) (in): 300 12; 350 14; 400 16; 500 20 — Max. load (kN) (tons): 200 20; 250 25; 300 30; 400 40. With enlarged base — Size of base (mm) (in): 600 24; 700 28; 800 32; 900 36; 1 000 40 — Max. load (kN) (tons): 300 30; 380 38; 470 47; 550 55; 650 65
Sweden	SBS—B26:3 (1968)	—	—	—	—	Concrete to have minimum crushing strength of 39N/mm² (5 700lb/in²).

2.3 อุปกรณ์การตอกเสาเข็ม

2.3.1 ตุ้มตอกทิ้งดิ่ง

โดยทั่วไปตุ้มตอกขนาด 3 ถึง 5 ตันใช้กับเสาเข็มคอนกรีต และใช้ตุ้มขนาด 1 ถึง 3 ตันกับเสาเข็มไม้ พื้นที่หน้าตัดของตุ้มขนาด 0.4 ตารางเมตรดูรูปที่2.15

มวลของตุ้มต้องสัมพันธ์กับระยะยกอย่างน้อย 1 ถึง 2 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม มวลตุ้มอย่างน้อย 3 ตันเมื่อใช้กับเสาเข็ม 20 ถึง 25 เมตร สำหรับเสาเข็มคอนกรีตที่ยาวมาก ๆ มวลตุ้มก็ต้องประมาณ 30 ถึง 40 เท่าของน้ำหนักเสาเข็มต่อเมตรคือประมาณ 4 ถึง 5 ตัน ถ้าเป็นตุ้มที่ใช้กับเสาเข็มไม้มวลของตุ้มต้องมีน้ำหนักเป็น 2 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม ความยาวของตุ้มก็มีความยาวให้มากที่สุดเพื่อผลตกกระทบในแนวแกน ระบบปั้นจั่นสานที่หมุนเปลี่ยนมุมได้แสดงในรูปที่2.16

2.3.2 ตุ้มตอกเสาเข็ม

ตุ้มที่ใช้ตอกเสาเข็มสมัยก่อนอาจใช้พลังงานไอน้ำ โดยแกนไกด์เพื่อกำหนดแนวการเคลื่อนที่ในการตกกระทบของตุ้มตอก ซึ่งติดตั้งกับเครนที่มีเสถียรภาพ อัตราการตอก(blow rate)เสาเข็มโดยทั่วไป ลดลงเมื่อเลือกใช้ตุ้มตอกขนาดใหญ่กว่า มวลน้ำหนักตุ้มตอกควรมากกว่ามวลน้ำหนักของเสาเข็ม

ตุ้มตอกจังหวะเดียว (Single-acting hammer) ใช้พลังงานไอน้ำหรือแรงดันอากาศยกลูกตุ้ม แล้วปล่อยให้ตกกระทบอิสระ มักใช้มวลตุ้มหนัก ระยะกระทบต่ำเพื่อถ่ายพลังการตอกสูง ตุ้มตอกจังหวะเดียวจะถ่ายพลังงาน(blow per minute) มากกว่าตุ้มตอกทิ้งดิ่งดังตารางที่2.7

ตุ้มตอกสองจังหวะ (double-acting hammer) ใช้พลังงานไอน้ำหรือแรงดันอากาศเสริมการตอกลูกตุ้มเวลาตกกระทบเสาเข็มลูกตุ้มตอกชนิดนี้มีน้ำหนักเบากว่าแต่ถ่ายพลังงาน(blowper minute) มากกว่าตุ้มตอกจังหวะเดียว ซึ่งช่วยลดความเสียดทาน ความเฉื่อยและแรงต้านแบกทานในดินได้ดี ชนิดและขนาดตุ้มตอกสองจังหวะแสดงในตารางที่2.8

2.3.3 ตุ้มตอกดีเซล

ใช้แรงดันจากการจุดระเบิดน้ำมันดีเซลต่อลูกตุ้มในการตอกในแนวดิ่ง ระบบการตอกประกอบไปด้วยเครื่องยนต์ดีเซล แกนไกด์ลูกตุ้ม รวมทั้งท่อบังคับการเคลื่อนตัวของลูกตุ้ม การจุดระเบิดอยู่ภายในหัวของลูกตุ้มตอกการเคลื่อนที่ขึ้นลงบังคับด้วยท่อเหล็ก การสันดาปจะทำงานต่อเนื่องในขณะตอกช่วงระยะจะขึ้นอยู่กับการต้านทานการตอกเสาเข็มกับดิน ตาราง2.9 แสดงชนิดของตุ้มตอกดีเซล ณ จุดสะท้อนการตอกเสาเข็มที่ปลายหยั่งอยู่ในชั้นหิน อาจมีความหนาแน่นการตอกเป็นสองเท่าของการตอกในชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งเสาเข็มอาจเสียหายเมื่อทำการตอกต่อไป อัตราการตอกปรกติในช่วง 10-15 ครั้งต่อ 10 เซนติเมตร (40–60 ครั้งต่อนิ้ว) ตุ้มตอกดีเซลสมัยก่อนนำมาใช้กับการตอกเสาเข็มในดินทรายและดินเหนียวแข็ง ข้อดีคือสามารถติดตั้งกับเรือลอยน้ำและใช้กับตุ้มตอกขนาดกว่า 70 ตัน ในการตอกเสาเข็มกลางทะเล

เสาเข็มที่ต้องตอกใต้น้ำ(underwater driving)ลูกตุ้มตอกอยู่พ้นน้ำโดยการใช้ตัวต่อหัวเสา(follower) ต่อนำขึ้นมาพ้นน้ำเพื่อการตอกแต่การตอกเสาเข็มใต้น้ำจริง ๆ ทำได้โดยใช้ลูกตุ้มตอกแบบปิด ทำงานด้วยพลังงานไอน้ำและแรงดันอากาศขนาด 11.3 กิโลนิวตันต่อตารางเมตรต่อความลึกน้ำ ไล่น้ำออกจากกระบอกสูบลูกตุ้มตลอดเวลา

2.3.4 ตุ้มตอกสั่นสะเทือน (vibratory hammer)

เหมาะสำหรับงานเสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มเหล็กในสภาพชั้นดินที่ลำบากเช่นดินกรวด ดินทรายแน่นและดินทรายแป้ง และได้ผลอย่างมากในดินทรายหลวมกับดินกรวดแน่นปานกลาง แต่ผลการทดสอบเสาเข็มระบุว่าค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มตอกแบบสั่นสะเทือน อาจลดลงเกือบครึ่งหนึ่งของค่ากำลังเสาเข็มตอกโดยลูกตุ้มทิ้งดิ่งทั่วไป ข้อดีของการตอกแบบสั่นสะเทือนคือระดับเสียงรบกวนน้อยการทะลุทะลวงได้ดีกว่าโดยเฉพาะดินทรายกับดินกรวด ตารางที่2.10การเปรียบเทียบความเร็วในการตอกของตุ้มตอกชนิดต่าง ๆ(Tomlinson)

2.3.5 ตุ้มตอกแรงดันลม (pneumatic hammer or air hammer)

ใช้พลังงานระบบขนส่งรางและการตอกย้ำเสาเข็มประสิทธิภาพเครื่องตอกขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศที่ใช้ในเครื่อง อัตราการตอกประมาณ 100 ถึง 300 ครั้งต่อนาที

2.3.6 ตุ้มดอกไฮโดรลิก (Hydraulic hammer)

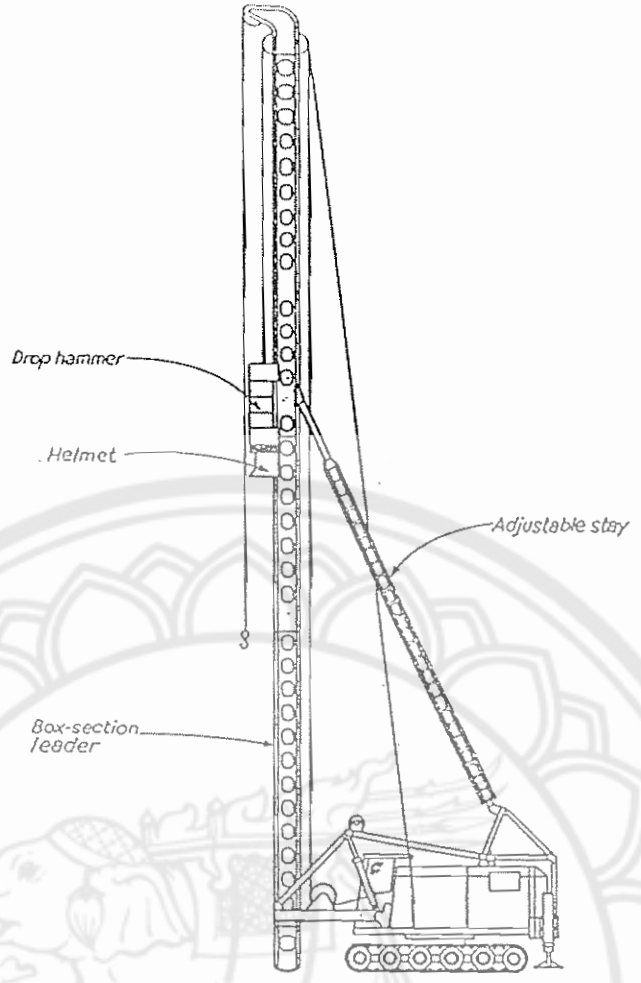
เมื่อพิจารณาจากกลุ่มประเทศสวีเดน อเมริกา และอังกฤษ มีข้อได้เปรียบเรื่องระบบเสียงรบกวนต่ำมากและประสิทธิภาพการตอกสูง ซึ่งระดับเสียงรบกวนเป็นปัญหาการใช้ตุ้มตอกแรงดันลมในบริเวณเมืองใหญ่

2.3.6.1 เทคนิคการลดมวลดิน (pre-excouseting)

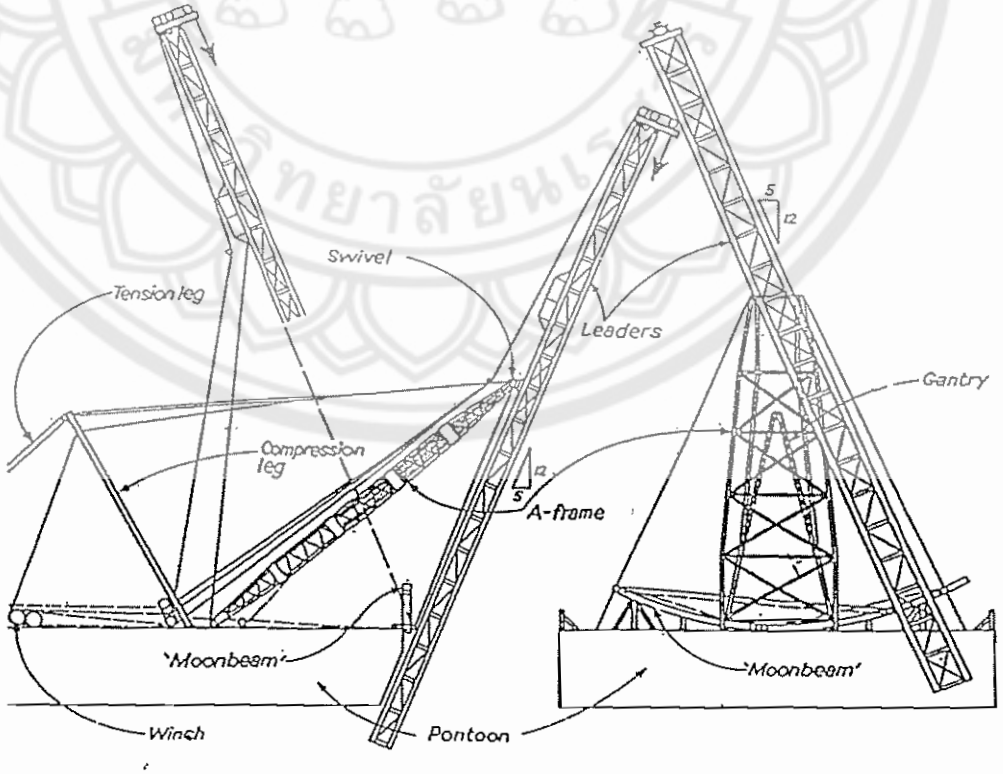
ในการขุดเจาะดินบริเวณการตอกเสาเข็มออกก่อนการตอกเพื่อผลการตอกเสาเข็มและการทำระบบฐานรากทำได้เร็วขึ้น โดยปกติใช้การเจาะนำขนาดหลุมประมาณ 5.08 เซนติเมตร(2นิ้ว) ใหญ่กว่าขนาดของเสาเข็มตอกโดยใช้สว่านเจาะ

2.3.6.2 เทคนิคการฉีดน้ำ (jetting)

เทคนิคการฉีดน้ำใช้ในการหล่อลื่นการตอกเสาเข็มในชั้นดินทราย โดยเฉพาะกรณีที่การสั่นสะเทือนเสาเข็มอาจเกิดปัญหาข้างเคียงโดยใช้ท่อฉีดน้ำแยกส่วนกับระบบตุ้มตอกเสาเข็ม เทคนิคการฉีดน้ำเป็นผลทำให้ค่าการเกาะเสียดทานผิวของเสาเข็มกับดินลดน้อยลง โดยปกติแล้วใช้การฉีดน้ำเฉพาะจุดไม่ใช้ตลอดความยาวของเสา



รูปที่2.15 ตุ้มตอกเสาเข็ม



รูปที่ 2.16 ระบบปั้นจั่นสานที่เปลี่ยนมุมได้

ตารางที่2.7 ชนิดและขนาดตุ้มตอก่จังหวะเดียว (Tomlinson)

Maker	Type	Mass of ram (kg)	Mass of ram (lb)	Max energy per blow		Max striking/rate (blows/min.)
				m/kg	ft/lb	
BSP International Foundations Ltd (UK)	—	2 540	5 600	3 425	24 806	50
	—	3 050	6 720	4 110	29 767	50
	—	4 060	8 960	5 480	39 690	50
	—	5 080	11 200	6 850	49 612	50
	—	6 110	13 440	8 220	59 535	50
	—	8 130	17 920	10 960	79 380	50
	—	10 160	22 400	13 700	99 225	50
	—	12 190	26 880	16 440	119 070	50
	—	15 240	33 600	20 550	148 837	50
Koehring-MKT (USA)	S10	4 500	10 000	4 500	32 500	55
	S14	6 350	14 000	5 100	37 500	60
	S20	9 000	20 000	8 300	60 000	60
	OS40	18 100	40 000	16 600	120 000	55
	OS60	27 200	60 000	24 900	180 000	55
Menck (W. Germany)	MRB180	2 000	4 410	2 560	18 100	50
	MRB270	3 000	6 610	3 150	22 800	50
	MRB500	5.000	11 020	6 250	42 250	50
	MRB600	6 750	14 880	8 430	61 030	50
	MRB1000	10 000	22 050	12 500	90 500	50
	MRB1500	15 000	33 070	18 750	135 750	50
	MRB2000	20 000	44 100	25 000	181 000	50
	MRBS500	5 000	11 020	6 250	45 200	42
	MRBS750	7 500	16 540	9 375	67 810	42
	MRBS1500	15 000	33 070	18 750	135 600	42
	MRBS2500	25 000	55 120	31 250	226 100	42
	MRBS4000	40 000	88 200	50 000	361 000	42
	MRBS7000	70 000	154 350	87 500	632 900	42
	MRBS1500SL	17 500	38 590	26 250	189 800	36
	MRBS2500SL	30 000	66 100	45 000	325 500	36
	MRBS4000SL	46 000	101 430	69 000	499 000	36
	MRBS7000SL	80 000	176 400	120 000	868 000	36
Raymond (USA)	1	2 270	5 000	2 070	15 000	60
	1-S	2 950	6 500	2 690	19 500	58
	0	3 400	7 500	3 370	24 375	52
	00	4 540	10 000	4 490	32 500	50
	000	5 670	12 500	5 620	40 625	48
	4/0	6 800	15 000	6 740	48 750	46
	5/0	7 940	17 500	7 860	56 875	44
	22X	10 000	22 000	7 870	56 900	58
	8/0	11 340	25 000	11 230	81 250	33–38
	30X	13 610	30 000	10 370	75 000	70
	40X	18 140	40 000	13 830	100 000	64
Vulcan (USA)	2	1 360	3 000	1 000	7 260	70
	1	2 270	5 000	2 070	15 000	60
	06	2 950	6 500	2 690	19 500	60
	08	3 630	8 000	3 590	26 000	50
	010	4 540	10 000	4 490	32 500	50
	014	6 360	14 000	5 810	42 000	60
	016	7 260	16 000	6 740	48 750	60
	020	9 070	20 000	8 300	60 000	60
	030	13 610	30 000	12 440	90 000	55
	040	18 100	40 000	16 600	120 000	60
	060	27 200	60 000	24 890	180 000	62

ตารางที่2.8 ชนิดและขนาดตุ้มตอกสองจังหวะ (Tomlinson)

Maker	Type	Mass of ram (kg)	Mass of ram (lb)	Energy per blow		Max. striking rate (blows/min.)
				m/kg	ft/lb	
BSP International Foundations Ltd (UK)	500N	91	200	165	1 200	330
	600N	227	500	415	3 000	250
	700N	385	850	650	4 700	225
	900	726	1 600	1 210	8 750	145
	1000	1 360	3 000	1 815	13 100	105
	1100	2 270	5 000	2 650	19 150	95
Kochring-MKT (USA)	9B3	726	1 600	1 210	8 750	145
	10B3	1 360	3 000	1 815	13 100	105
	11B3	2 270	5 000	2 650	19 150	95
Menck (W. Germany)	SB80	270	600	400	2 900	205
	SB120	390	860	600	4 340	175
	SB180	600	1 320	945	6 840	150
	SB270	870	1 920	1 410	10 200	130
	SB400	1 300	2 860	2 170	15 700	115
Raymond* (USA)	15M	2 270	5 000	2 070	15 000	75-90
	65C	2 950	6 500	2 700	19 500	100-110
	80C	3 630	8 000	3 370	24 450	95-105
	125CX	6 800	15 000	5 620	40 625	110-120
	150C	6 800	15 000	6 740	48 750	95-105
Vulcan* (USA)	18C	816	1 800	500	3 600	150
	30C	1 360	3 000	1 000	7 260	133
	50C	2 270	5 000	2 080	15 100	120
	65C	2 950	6 500	2 650	19 200	117
	80C	3 630	8 000	3 370	24 450	111
	140C	6 350	14 000	4 970	36 000	103
	200C	9 070	20 000	6 930	50 200	98
	400C	18 140	40 000	15 660	113 488	100

ตารางที่ 2.9 ชนิดและขนาดตุ้มตอกดีเซล (Tomlinson)

Maker	Type	Mass of ram		Energy per blow		Max striking rate blows/min
		kg	lb	m/kg	ft/lb	
BSP International Foundations Ltd. (UK)	DE30B	1 360	3 000	3 731	27.000	47
	DE50B	2 260	5 000	6 219	45 000	47
	B15	1 500	3 300	3 630	26 300	80–100 (double-acting)
	B45	4 500	9 920	10 900	78 840	80–100 (double-acting)
Delmag (W. Germany)	D2	220	485	120–250	868–1 815	60–70
	D4	380	840	225–500	1 625–3 630	50–60
	D5	500	1 100	1 250	9 050	40–60
	D12	1 250	2 760	3 125	22 610	40–60
	D22	2 700	5 950	5 500	39 780	40-60
	D30	3 000	6 610	3 300–7 500	23 870-54 200	39-60
	D36	3 600	7 940	4 200–10 200	30 380-73 780	37-53
	D44	4 300	9 480	6 000–12 000	43 500-87 000	37-56
	D55	5 400	11 900	8 650–16 200	62 570-117 170	36-47
Hera (Holland)	H1500	1 500	3 300	4 140	29 900	40–60
	H2500	2 500	5 510	8 000	57 900	37–50
	H3500	3 500	7 720	11 200	81 000	37–50
	H5000	5 000	11 020	16 000	115 700	37–50
	HD	7 500	16 540	27 000	195 300	37–50
Ishikawajima Harima (Japan)	J22	2 200	4 850	5 410	39 100	42–70
	J35	3 500	7 720	8 780	63 500	42–70
	J44	4 400	9 700	11 000	79 400	42–70
Kobe (Japan)	K13	1 300	2 870	3 700	26 760	40–60
	K25	2 500	5 510	7 500	54 200	39–60
	K35	3 500	7 720	10 500	75 900	39–60
	K45	4 500	9 920	13 500	97 600	39–60
	KB45	4 500	9 920	13 500	97 600	35–60
	KB60	6 000	13 230	16 000	115 700	35–60
	K150	15 000	33 070	39 500	286 000	42–60
Kochring-MKT (McKiernan-Terry USA)	DE10	500	1 100	1 220	8 800	48
	DE20	910	2 000	2 200	16 000	48
	DE30A	1 270	2 800	3 100	22 400	48
	DE40	1 810	4 000	4 400	32 000	48
	DE70	3 175	7 000	8 700	63 000	48
	DA35B	1 270	2 800	3 100	22 400	48 single-acting 82 double-acting
	DA55B	2 270	5 000	5 500	40 000	48 single-acting 82 double-acting
Link Belt (USA)	180	780	1 720	1 120	8 100	90–95
	312	1 750	3 860	2 080	15 000	100–105
	440	1 814	4 000	2 420	18 200	86–90
	520	2 300	5 070	3 640	26 300	80–84
Mitsubishi (Japan)	M14	1 350	2 980	3 600	26 000	42–60
	M23	2 295	5 060	6 220	45 000	42–60
	M33	3 290	7 250	8 850	64 000	40–60
	M43	4 290	9 460	11 620	84 000	40–60
	MB70	7 185	15 840	18 950	137 000	38–60
Vulcan (USA) and M.A.N.I.L. SA (Belgium)	1N100	1 360	3 000	3 400	24 600	50–60
	4N100	1 800	3 970	4 500	32 550	50–60
	3N100	2 400	5 290	6 000	43 400	50–60

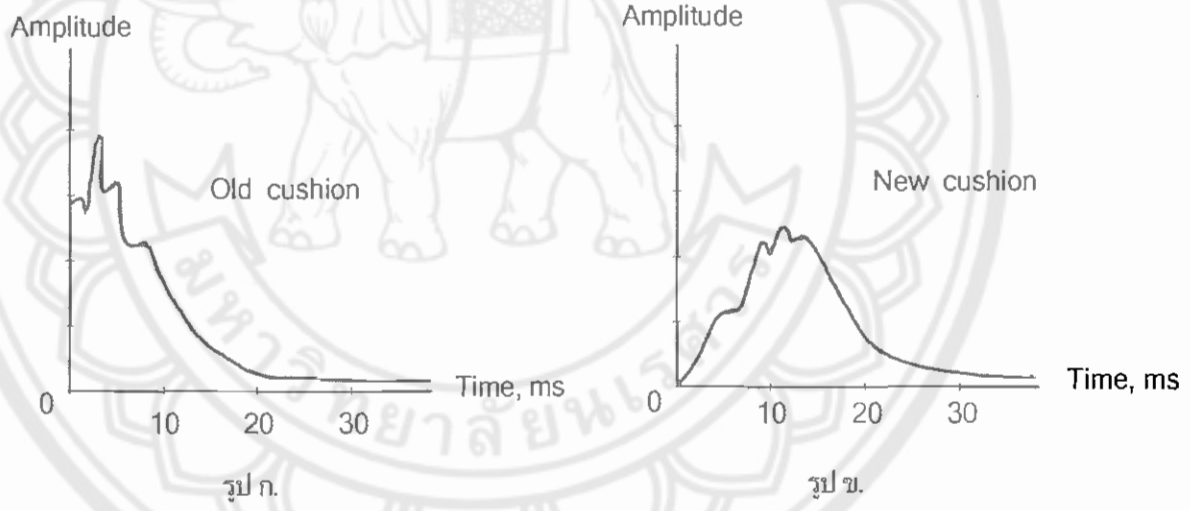
ตารางที่2.10 การเปรียบเทียบความเร็วในการตอกของตุ้มตอกชนิดต่าง ๆ (Tomlinson)

Soil type	Piling hammer		Time in minutes for driving pile to 10m (33ft) penetration		Remarks
	Type	Maker's designation	300 × 300mm (12 × 12in) H	1:155 x 400mm(6 x 16) H	
Medium-dense sandy gravel [standard penetration test N = 10 to 30 blows per 300mm (12in)]	Single-acting	Menck MRB270	6	3	
	Double-acting	Menck MSB270	7.5	6.5	
	Diesel	Delmag D12	20	10	
	Diesel	Delmag D22	9	5	
	Hydraulic	Cordes Hydrobar	17.5	13	
	Vibratory	Schenck DR60	6 (at 24Hz)	2.5(at 20Hz)	
	Vibratory	Menck MVB44-30	7 (at 50Hz)	3(at 50Hz)	
Medium-dense to very dense gravelly sand [standard penetration test N = 30 to 85 blows per 300mm (12in)]	Single-acting	Menck MRB270	14	7	
	Double-acting	Menck MSB270	12.5	10.5	
	Double-acting	Demag VR40	14	-	
	Diesel	Delmag D22	15.5	8	
	Hydraulic	Cordes Hydrobar	18	12.5	
	Vibratory	Schenck DR60	25 (at 32Hz)	†(15) (at 25.5Hz)	†Refused further penetration at 5m (16.4ft)
	Vibratory	Menck MVB44-30	*(30) (at 50Hz)	‡(30) (at 50Hz)	*Refused further penetration at 7m (23ft) ‡Refused further penetration at 7.5m (24.6ft)
	Vibratory	Muller MS26D	†(20) (at 25Hz)	‡(28) (at 25Hz)	†Refused further penetration at 8m (26.2ft) ‡Refused further penetration at 9m (29.5ft)
0 to 5m (16ft) very dense gravelly sand [standard penetration test N = 60 blows per 300mm (12in)] Below 5m (16ft) stiff clay [c_u = 64 to 171kN/m² (0.6 to 1.6 tons/ft²)]	Single-acting	Menck MRB270	7.5	5.5	
	Double-acting	Menck MSB270	9	5.5	
	Double-acting	Demag VR40	11	—	
	Diesel	Delmag D22	4	3	
	Hydraulic	Cordes Hydrobar	16	105	
	Vibratory	Schenck DR60	7 (at 17Hz)	2 (at 17Hz)	
	Vibratory	Menck MVB44-30	*(20) (at 50Hz)	22 (at 50Hz)	*Refused further penetration at 8m (26.2ft)
	Vibratory	Muller MS120	†(10) (at 17Hz)	4 (at 20Hz)	†Refused further penetration at 7m (23ft)

B740328

2.3.7 **หมอนกันกระแทก**(Helmets/Cushions)

หมอนกันกระแทกแบบเป็นไม้ใช้วางซ้อนกันสามชั้นชั้นละ25 มิลลิเมตร ที่ใช้โดยทั่วไปการใช้งานวางอยู่บนหัวเสาเข็มตรงที่ดุ้มกระแทกตอกลงเพื่อลดแรงกระแทกของการตอก ในสนามงานตอกจริงจะเปลี่ยนหมอนรองเมื่ออัตราการทะลวงลดลง ตัวอย่างเช่น อัตราการตอกลดลงจาก 70 มิลลิเมตรถึง 20 มิลลิเมตรสำหรับตอก 10 ครั้ง การใช้หมอนรองใหญ่และใหม่สำหรับตุ้มตอก 2.8 ตันจะมีคลื่นกระทบต่อเสาเข็มแตกต่างกัน(รูปที่2.17) เมื่อใช้หมอนรองตัวเก่าคลื่นความเค้นแนวแกนที่หัวเข็มเพิ่มขึ้นจากผลการกระทบลูกตุ้มตอกอย่างมาก(ดังรูป2.17ก) ในขณะที่คลื่นความเค้นที่เกิดขึ้นจริงกับหมอนรองตัวใหม่ช้ากว่าและขนาดต่ำกว่า(ดังรูป2.17ข)



รูปที่2.17 การแปรเปลี่ยนคลื่นความเค้นจากหมอนรองสู่เสาเข็ม

2.3.8 **ตัวต่อหัวเข็ม** (follower)

ในการตอกเสาเข็มบนเรือลอยน้ำจำเป็นต้องใช้ตัวต่อเสาเข็มให้พ้นน้ำเพื่อการตอกตัวต่อหัวเสาเข็มทำด้วยเหล็กมีค่ายืดหยุ่นพลศาสตร์และค่าอิมพีเดียลใกล้เคียงกับตัวเสาเข็มตอก

2.4 โครงสร้างเสาเข็ม

2.4.1 ความเค้นการยกเสาเข็ม

โครงสร้างเสาเข็มต้องออกแบบ เพื่อให้เสาเข็มสามารถต้านทานความเค้นจากการยกและการขนส่ง เพื่อมิให้เสาเข็มเสียหาย เนื่องจากเกิดหน่วยแรงดัดในเสาเข็มมากเกินไปความยาวสูงสุดของเสาเข็มคอนกรีต ท่อนเดียวอาจยาวถึง 14 เมตร

ค่าของโมเมนต์ดัดมากที่สุดขึ้นอยู่กับตำแหน่งจุดยก(รูปที่2.18) ค่าโมเมนต์ลบสูงสุดประมาณเท่ากับโมเมนต์บวกสูงสุด ไม่เกินเท่ากับ $0.7W_pL$ โดยยก ณ จุดที่ไม่เกินระยะห่างจาก L/4 ถึง L/3 จากปลายของเสาเข็ม โดยที่ W_p คือค่าน้ำหนักมากที่สุดของเสาเข็ม และ L คือความยาวของเสาเข็ม ถ้าเสาเข็มมีรอยร้าวขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งรอยแตกมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางรอบเสาเข็มหรือถ้ารอยร้าวในแนวนอนมีค่ามากกว่า 20 เซนติเมตร ไม่ควรนำมาใช้งาน

รูปที่ 2.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ดัดเกิดจาน้ำหนักของเสาเข็มในช่วงการยกและการขนส่ง ค่าสัมประสิทธิ์ควรเพิ่มอีก 20% ถึง 30% เพื่อการสั่นสะเทือนและการพลิ้วไหวขณะการยก โดยค่า fc'=250 ksc. และมีเปอร์เซ็นต์เหล็กยืนไม่น้อยกว่า 0.4 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณคอนกรีต

2.4.2 ความเค้นการตอกเสาเข็ม

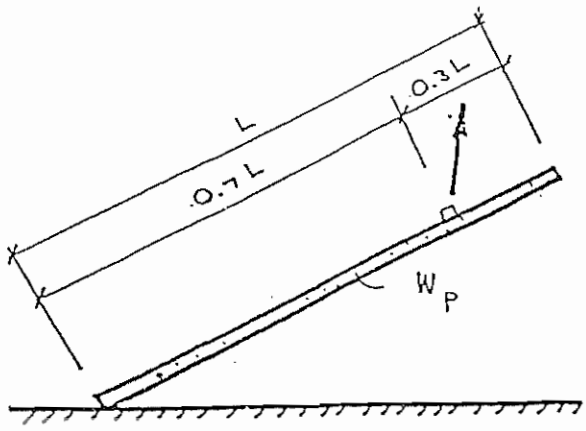
คลื่นความเค้นแรงอัดในเสาเข็มขณะตอกมีค่าความเร็วของคลื่นความเค้นอยู่ในช่วง 3000 เมตรต่อวินาที ถึง 4000 เมตรต่อวินาที ในคอนกรีตและไม้ตามลำดับ ส่วนเหล็กจะมีค่าอยู่ที่ 5000 เมตรต่อวินาที โดยความเร็วคำนวณได้จาก

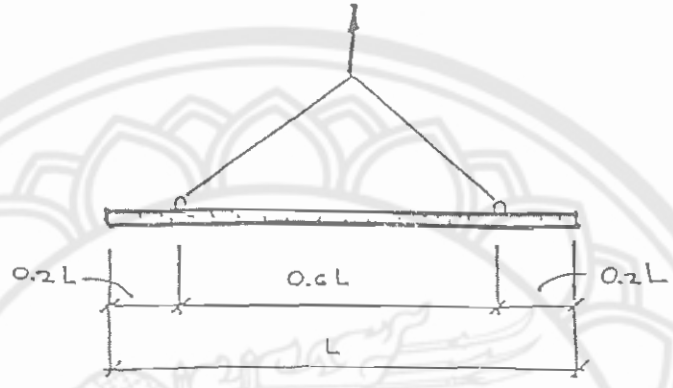
$$C = \sqrt{(E_p g/\rho)} \qquad (2.1)$$

โดยที่ E_p เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัตถุเช่นเหล็กมีค่าโมดูลัสเท่ากับ 0.21×10^6 MPa. คอนกรีตมีค่าโมดูลัสเท่ากับ 0.035×10^6MPa. และไม้มีค่าโมดูลัสเท่ากับ 0.0010×10^6 MPa. ρ คือค่าความหนาแน่นต่อน้ำหนักของวัสดุเสาเข็ม

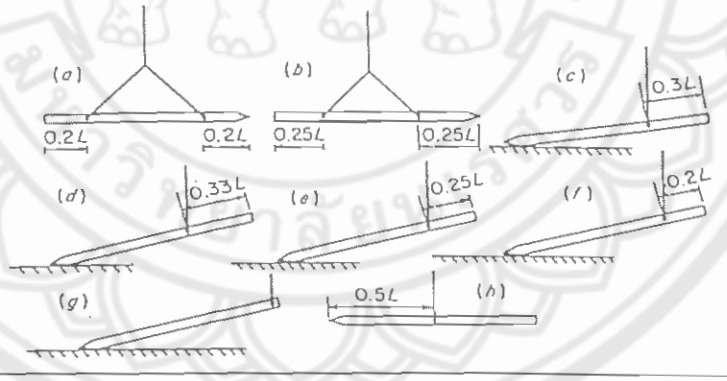
ค่าสูงสุดของคลื่นความเค้นขึ้นอยู่กับค่าความเร็วการตกกระทบ และความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับมวลลูกตุ้มตอก ซึ่งคำนวณค่าความเร็ว(v_o) จากระยะยก(h_e) ได้จาก

$$v_o = \sqrt{(2\, h_e g)} \qquad (2.2)$$





รูปที่2.18 การยกเสาเข็ม



Condition	*Maximum static bending moment*
(*a*) Lifting by two points 0.20L from either end	± *WL*/40
(*b*) Lifting by two points 0.25L from either end	− *WL*/32
(*c*) Pitching by one point 0.30L from the head	± *WL*/22
(*d*) Pitching by one point 0.33L from the head	− *WL*/18
(*e*) Pitching by one point 0.25L from the head	+ *WL*/18
(*f*) Pitching by one point 0.20L from the head	+ *WL*/14
(*g*) Pitching by one end	+ *WL*/8
(*h*) Lifting by the centre	− *WL*/8

รูปที่2.19 โมเมนต์ดัดเนื่องจากการยกเสาเข็ม

ค่าความเค้นสูงสุดตามแนวแกนของเสาเข็มระหว่างการตอก เกิดขึ้นที่ส่วนหัวและส่วนปลายของเสาเข็ม ซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างการตอกเสาเข็มเพราะการตกกระทบไม่ตรงตามแนวแกน ค่าความเค้นมากสุดตามแนวแกนของเสาเข็มอาจมีค่าเป็นสองเท่าสำหรับเสาเข็มขนาด 30x30 เซนติเมตร เมื่อการตอกกระทบเยื้องศูนย์ 5 เซนติเมตร

ค่าความเค้นสูงสุดที่หัวเสาเข็มคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ

$\sigma_h = 3\sqrt{h_e}$ MPa สำหรับเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ (2.3)

$\sigma_h = 12\sqrt{h_e}$ MPa สำหรับเสาเข็มเหล็ก (กรณีมีไม้เป็นส่วนประกอบ) (2.4)

$\sigma_h = 18\sqrt{h_e}$ MPa สำหรับเสาเข็มเหล็ก (กรณีไม่มีไม้เป็นส่วนประกอบ) (2.5)

$\sigma_h = 1.2\sqrt{h_e}$ MPa สำหรับเสาเข็มไม้ (2.6)

โดยที่ σ_h คือค่าความเค้นสูงสุด และ h_e มีหน่วยเป็น เซนติเมตร