

บทที่ 3

การวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็ม



3.1 รายละเอียดต่างๆ ของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์

3.1.1 ชนิด รูปร่างหน้าตัด ขนาด ความยาว และระดับความลึกของปลายเสาเข็ม

ก. หน้าตัดรูป DH (Double Half Moon) มีขนาดตั้งแต่ $.25 \times .25$ ไปจนถึงขนาด $.40 \times .40$ และมีความยาวตั้งแต่ 16.0 - 26.0 เมตร ส่วนใหญ่ตอกลงไปจนระดับปลายเสาเข็มมีความลึกเกิน 20 เมตรจากผิวดินลงไป

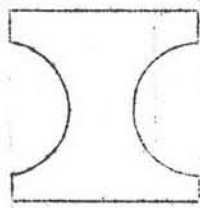
ข. หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1) หน้าตัดรูป SS (Solid Square) มีขนาดตั้งแต่ $.18 \times .18$ ไปจนถึงขนาด $.40 \times .40$ และความยาวตั้งแต่ 21.0 - 25.0 เมตร ส่วนใหญ่ตอกลงไปจนระดับปลายเสาเข็มมีความลึกเกิน 20 เมตรจากผิวดินลงไป

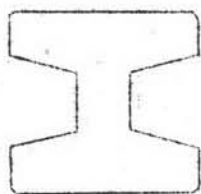
2) หน้าตัดรูป HS (Square Hollow) เสาเข็มแบบนี้เป็นเสาเข็มเฉพาะแนวทางกวนพิเศษ โดยมีหน้าตัดขนาด $.525 \times .525$ และมีรูกลมกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $.30$ ภายใน และมีความยาว 30 เมตรทั้งหมด ตอกลงไปจนระดับปลายเสาเข็ม มีความลึกประมาณ 25.0 - 27.0 เมตร จากผิวดินลงไป

ค. หน้าตัดรูป I มีขนาดตั้งแต่ $.26 \times .26$ ไปจนถึงขนาด $.40 \times .40$ มีความยาวตั้งแต่ 21.0 - 23.0 เมตร และตอกลงไปจนระดับปลายเสาเข็มมีความลึกประมาณ 20 - 23 เมตร จากผิวดิน

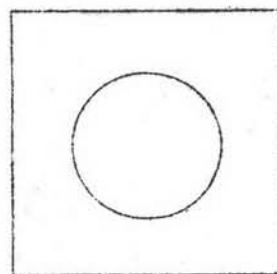
รายละเอียดต่างๆ ของ ขนาด ความยาว พื้นที่หน้าตัด น้ำหนักเสาเข็ม น้ำหนักของลูกตุ้มตอก ระยะยก ระยะทรุดตัว ระดับปลายเข็มจากผิวดิน น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากการทดสอบในสนาม และสถานที่ทดสอบเสาเข็ม ของเสาเข็มทั้ง 3 ชนิดนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



เสาค้ำรูป DH

เสาค้ำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัน ,
(SOLID SQUARE)

เสาค้ำรูป I

เสาค้ำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง
(SQUARE HOLLOW)

รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างหน้าตัดของเสาค้ำแบบต่างๆที่นำมาวิเคราะห์

3.1.2 ชนิดและน้ำหนักของลูกค้อนที่ใช้คอกเสาค้ำ

ก. ชนิดของลูกค้อน ลูกค้อนที่ใช้คอกเสาค้ำทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นลูกค้อนคอกแบบ Drop Hammer ทั้งหมด เพราะลูกค้อนคอกแบบนี้มีน้ำหนักที่สุด เนื่องจากเป็นแบบที่ง่ายที่สุด มีราคาถูกกว่าแบบอื่น และใช้งานได้ดีสำหรับคอกเสาค้ำในกรุงเทพฯ ที่มีควมลึกไม่มาก

ข. น้ำหนักของลูกค้อนคอก

1) สำหรับเสาค้ำหน้าตัดรูป DH น้ำหนักของลูกค้อนจะอยู่ระหว่าง 3.4 - 6.3 ตัน และมีอัตราส่วนของน้ำหนักลูกค้อนต่อน้ำหนักของเสาค้ำ (W_r/W_p) อยู่ระหว่าง 0.58 - 3.03

2) สำหรับเสาค้ำหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส น้ำหนักของลูกค้อนจะอยู่ระหว่าง 3.1 - 8.7 ตัน อัตราส่วนของน้ำหนักลูกค้อนต่อน้ำหนักเสาค้ำ (W_r/W_p) อยู่ระหว่าง 0.52 - 2.21

3) สำหรับเสาค้ำหน้าตัดรูป I น้ำหนักของลูกค้อนจะอยู่ระหว่าง 3.0 - 5.5 ตัน อัตราส่วนของน้ำหนักลูกค้อนต่อน้ำหนักเสาค้ำ (W_r/W_p) อยู่ระหว่าง 0.72 - 2.26

3.1.3 การทดสอบเสาเข็มในสนาม (Pile Load Test) ของเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์ การทดสอบเสาเข็มในสนามที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ หมายถึง การทดสอบเสาเข็ม เพื่อให้รับแรงสถิตย์ที่ตกลงในแนวตั้งเท่านั้น ไม่รวมไปถึงการทดสอบการรับแรงค้ำข้าง แรงสั่นสะเทือน หรือแรงค้ำของเสาเข็ม การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มนี้ ส่วนใหญ่จะใช้ Hydraulic Jack ค้ำกับคานเหล็ก ซึ่งยึดติดกับเข็มสมอ หรือค้ำกับกระบะที่บรรจุน้ำหนักไว้ข้างบน

3.1.4 น้ำหนักพิบัติ (Failure Load) ของเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์
 น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากข้อมูลในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ส่วนใหญ่ได้มาจากการทดสอบเสาเข็มแบบ Quick Load Test เพราะส่วนมากที่ทำการทดสอบเสาเข็ม มักทำการทดสอบเสาเข็มแบบอื่น ๆ จนถึง 2 เท้า หรือ 3 เท้า ของน้ำหนักที่กำหนดให้เสาเข็มรับ เสร็จแล้วจึงทำการทดสอบเสาเข็มแบบ Quick Load Test นี้ จนกระทั่งเสาเข็มพิบัติ เพราะการทดสอบแบบนี้ สามารถทำได้รวดเร็วกว่าแบบอื่น น้ำหนักพิบัติที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มแบบนี้ จะสามารถหาได้จากกราฟที่เขียน ระหว่างน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม กับ ระยะเวลาทรุดตัวของเสาเข็ม โดยดูจากน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทำให้ระยะเวลาทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของเสาเข็ม DH

	1 ชนิดและขนาด ของเสาเข็ม	2 L m	3 A m ²	4 Wp ton	5 Wr ton	6 h m	7 S m/blow	8 D m	9 Rt ton	10 สถานที่ทดสอบเสาเข็ม
1	DH .25 x .25	21.0	.0404	2.10	4.5	.30	.0144	22.4	90	การเคหะ สายบางนา-ตราด
2	DH .25 x .25	22.0	.0404	2.20	4.3	.40	.0025	22.0	113.8	กระทรวงอุตสาหกรรม
3	DH .25 x .25	16.0	.0404	1.60	4.7	.30	.0078	14.0	90	โรงงาน Raynold Aluminium รั้งสิต
4	DH .25 x .25	16.0	.0404	1.60	4.7	.30	.0435	13.3	40	โรงงาน Raynold Aluminium รั้งสิต
5	DH .25 x .25	22.0	.0404	2.20	4.2	.20	.0113	22.9	70	ศูนย์การค้าสยาม
6	DH .30 x .30	23.0	.0545	2.99	3.4	.50	.0138	22.5	87.5	โรงงานยาสูบ ชอยนานา
7	DH .30 x .30	20.0	.0545	2.60	3.4	.50	.0138	22.7	90	โรงงานยาสูบ ชอยนานา
8	DH .30 x .30	24.0	.0545	3.12	4.7	.60	.0049	24.0	130	ธนาคารทหารไทย พญาไท
9	DH .30 x .30	20.0	.0545	2.60	5.0	.30	.0050	20.0	107	ธนาคารแห่งประเทศไทย
10	DH .36 x .36	23.0	.0929	5.13	4.3	.70	.0064	22.9	130	ศูนย์การค้าจรัลรัตน์ ประตูน้ํา
11	DH .36 x .36	23.0	.0929	5.13	3.8	.80	.0067	23.2	160	ตึก สยามยามาฮา กินแดง
12	DH .36 x .36	20.0	.0929	4.46	5.0	.50	.0071	20.0	112.5	ธนาคารแห่งประเทศไทย
13	DH .36 x .36	22.0	.0929	4.90	4.7	.30	.0105	24.2	84	ลาดกระบัง

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของเสาเข็ม DH (ต่อ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ชนิดและขนาด ของเสาเข็ม	L m	A m ²	Wp ton	Wr ton	h m	S m/blow	D m	Rt ton	สถานที่ทดสอบเสาเข็ม
14	DH .36 x .36	24.0	.0929	5.35	4.7	.60	.0089	24.0	135	ธนาคารทหารไทย พญาไท
15	DH .36 x .36	23.0	.0929	5.13	3.4	.80	.0039	24.9	165	โรงงานยาสูบ ขอยานา
16	DH .36 x .36	23.0	.0929	5.13	4.7	.80	.0116	24.0	155	ธนาคาร Bangkok Metropolitan
17	DH .40 x .40	23.0	.1233	6.90	4.3	.60	.0056	22.9	143	ศูนย์การค้า จารุรัตน์ ประตูน้ำ
18	DH .40 x .40	24.5	.1233	7.40	4.3	.60	.0123	22.8	125	โรงพยาบาล สุขุมวิท
19	DH .40 x .40	23.0	.1233	6.90	4.8	.80	.0010	23.8	240	องค์การโทรศัพท์ สุริวงค์
20	DH .40 x .40	25.0	.1233	7.50	5.1	.60	.0010	25.4	270	ศูนย์การค้าสยาม
21	DH .40 x .40	26.0	.1233	7.80	5.0	1.00	.0061	28.7	200	แหลมทอง Corporation ก.ม.19 พระประแดง
22	DH .40 x .40	23.0	.1233	6.90	4.0	.30	.0037	25.0	175	ชุมสายโทรศัพท์ ปทุมวัน
23	DH .40 x .40	24.5	.1233	7.35	6.0	.60	.0059	-	200	สถานทูตออสเตรเลีย สาทร
24	DH .40 x .40	26.0	.1233	7.80	6.3	.80	.0037	27.5	270	ศูนย์การค้าสยาม

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของเสาเข็ม สี่เหลี่ยมจัตุรัส

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ชนิดและขนาด ของเสาเข็ม	L m	A m ²	Wp ton	Wr ton	h m	S m/blow	D m	Rt ton	สถานที่ทดสอบเสาเข็ม
1	SS .18 x .18	21.0	.0324	1.64	3.1	.30	.0191	18.3	30	Thai Melon Textile รังสิต
2	SS .18 x .18	21.0	.0324	1.64	3.5	.30	.0090	-	50	องค์การแก้ว บางนา
3	SS .35 x .35	21.0	.1225	6.17	3.5	.60	.0095	-	130	โรงแรมชาติ สุขุมวิท
4	SS .35 x .35	21.0	.1225	6.17	4.3	.40	.0050	-	150	ตึก กมลสุโกศล
5	SS .35 x .35	23.7	.1225	6.99	5.0	.60	.0113	24.5	150	สะพานลอยข้าม ถ.เซอเพลิง ของนทบุรี
6	SS .35 x .35	27.0	.1225	7.58	5.5	.60	.0234	36.6	150	ท้าวพระ
7	SS .35 x .35	24.0	.1225	7.08	4.7	.50	.0028	-	168	Ohbayashi Gumi พระประแดง
8	SS .35 x .35	21.0	.1225	6.17	4.7	.60	.0140	-	170	ศูนย์การค้า ราชดำริ
9	SS .35 x .35	24.0	.1225	7.08	4.7	.50	.0050	-	170	Ohbayashi Gumi พระประแดง
10	SS .35 x .35	24.5	.1225	7.35	5.2	.80	.0108	23.7	190	สะพานลอย ราชเทวี
11	SS .35 x .35	23.0	.1225	6.90	5.2	.80	.0067	23.7	200	สะพานลอย ราชเทวี
12	SS .40 x .40	25.0	.1600	9.60	5.0	.60	.0103	24.0	180	ธนาคารนครหลวงไทย ประตูน้ำ
13	HS .525 x .525	30.0	.2049	14.75	8.7	1.20	.0286	25.0	275	คลองแสนแสบ
14	HS .525 x .525	30.0	.2049	14.75	8.5	1.20	.0150	27.0	300	ชอปปิงเจ็ต สุขุมวิท

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดต่างๆ ของเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อ)

	1 ชนิดและขนาด ของเสาเข็ม	2 L m	3 A m ²	4 Wp ton	5 Wr ton	6 h m	7 S m/blow	8 D m	9 Rt ton	10 สถานที่ทดสอบเสาเข็ม
15	HS .525 x .525	30.0	.2049	14.75	8.5	1.20	.0100	26.0	275	สถานีรถไฟ มัถกะสัน
16	HS .525 x .525	30.0	.2049	14.75	8.7	.80	.0145	27.0	320	ระหว่าง ถ.เพชรบุรี กับ สถานีรถไฟมัถกะสัน
17	HS .525 x .525	30.0	.2049	14.75	8.7	1.00	.0156	27.0	300	ใกล้คลองแฉมแสบ

หมายเหตุ เสาเข็ม S_Q ตั้งแต่ 13 - 15 เป็นเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูกลมกลางตรงกลาง

จากตารางที่ 2 และ 3

- ชนิดและขนาดของเสาเข็ม
- L = ความยาวของเสาเข็ม
- A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
- Wp = น้ำหนักของลูกตุ้มตอก
- Wr = น้ำหนักของลูกตุ้มตอก
- h = ระยะยกของลูกตุ้มตอก
- S = ระยะทรุด เฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย
- D = ระดับของปลายเสาเข็มจากผิวดิน
- Rt = น้ำหนักพิชิตของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนาม
- สถานที่ทดสอบเสาเข็ม

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดค่าต่าง ๆ ของเสาเข็ม I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ชนิด และ ขนาด ของเสาเข็ม	L m	A m ²	Wp ton	Wr ton	h m	S m/blow	B m	Rt ton	สถานที่ทดสอบเสาเข็ม
1	I .26 x .26	21.0	.0406	2.04	3.5	.30	.0027	20.0	80	ที่พิกัดริมอุตสาหกรรม บางชัน
2	I .26 x .26	21.0	.0406	2.04	3.5	.30	.0032	22.3	85	ที่พิกัดริมอุตสาหกรรม บางชัน
3	I .26 x .26	21.0	.0518	2.60	4.4	.30	.0076	21.8	80	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี บางมก
4	I .26 x .26	20.0	.0406	1.94	4.2	.30	.0072	-	100	แพลต กรมไปรษณีย์ หลักสี่
5	I .26 x .26	21.0	.0414	2.08	4.7	.30	.0077	18.5	78	การเคหะ เตาปูน
6	I .26 x .26	21.0	.0414	2.08	3.0	.30	.0031	20.5	82.5	การเคหะ ลาดกระบัง
7	I .26 x .26	21.0	.0490	2.47	3.0	.30	.0136	20.7	67	ศูนย์การค้าลาดพร้าว
8	I .30 x .30	23.0	.0660	3.64	4.3	.50	.0035	22.7	117	สถานีขนส่งสายเหนือ หมอชิต
9	I .30 x .30	22.0	.0660	3.48	4.5	.50	.0170	-	142	โครงการเคหะชุมชน กิ่งแก้ว
10	I .30 x .30	21.0	.0550	2.77	4.7	.40	.0055	-	112	ธนาคารกสิกรไทย ราษฎร์บูรณะ
11	I .35 x .35	23.0	.0880	4.85	5.5	.40	.0072	22.5	210	อาคารที่จอดรถ สนามนางเลิ้ง
12	I .40 x .40	21.0	.1240	6.26	4.5	.60	.0094	21.0	150	บ.เจ้าพระยาสยาม (1975) ซอยวัชรภคินีนาถ

3.2 สูตรการตอกเสาเข็มที่นำมาทดลองแทนค่า

ข้อมูลที่นำมาแทนลงในสูตรการตอกเสาเข็มนี้ ได้แยกประเภทออกเป็น 2 ชนิด โดยแบ่งตามลักษณะของรูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม คือ รูป DH และรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สูตรต่าง ๆ ที่ทดลองแทนค่านี้อยู่ 12 สูตรดังนี้

ตารางที่ 3.4 สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile driving formula) ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ชื่อสูตร	น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากสูตร, (ton)	หมายเหตุ
1. Engineering News	$R_c = \frac{Wrh}{S + 0.0254C}$	C แทนค่าตั้งแต่ 0.5-1.0
2. Modified Eng. News	$R_c = \frac{Wrh}{S + 0.0254C} \frac{(Wr + n^2 Wp)}{(Wr + Wp)}$	C แทนค่าตั้งแต่ 0.5-1.0 n = 0.25
3. Hiley	$R_c = \frac{WrhZ}{S + 0.01c/2} \frac{(Wr+n^2 Wp)}{(Wr + Wp)}$	Z = 0.80 n = 0.25 $c/2 = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{2}$ $C_1 = \frac{1.80 R_c L_2}{A}$ $C_2 = \frac{0.72 R_c L}{A}$ $C_3 = \frac{3.60 R_c}{A}$ A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม ตร. L ₂ = ความหนาของที่รองหัวเสาเข็ม เมตร L = ความยาวของเสาเข็ม, เมตร
4. Dutch	$R_c = \frac{10}{12(S+0.0254C)} \frac{Wr}{Wr + Wp}$	C = 1.0

ชื่อสูตร	น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากสูตร (ton)	หมายเหตุ
5. So	$R_c = \frac{a}{S + \frac{1}{2} \sqrt{2ab}}$	$a = eWrh \quad (e = 0.80)$ $b = \frac{L}{AE_L}$ <p>L = ความยาวของเสาเข็ม, เมตร A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, เมตร² E_L = พิกัดยืด (Modulus of Elasticity) = 2.0 x 10⁷ ตัน/เมตร² (เฉพาะเข็มคอนกรีต)</p>
6. Janbu	$R_c = \frac{Wrh}{KuS}$	$Ku = Cd \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{Cd}} \right]$ $Cd = 0.75 + 0.15 \frac{Wp}{Wr}$ $\lambda = \frac{WrhL}{AE_L S^2}$ <p>h, L และ S มีหน่วยเป็น ซม. A = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม, ซม.² E_L = พิกัดยืดของเสาเข็ม Janbu ได้กำหนดไว้ = 180 ตัน/เมตร²</p>
7. Gate	$R_c = 4.0 \sqrt{e_n Wrh \log(25/S)}$	$e_n = 0.75$ <p>S = ระยะทรุดของเสาเข็ม, ซม. h = ระยะยกของลูกตุ้ม, ซม.</p>
8. Eytelwein	$R_c = \frac{Wrh}{S + 0.0254 \frac{Wp}{Wr}}$	

ชื่อสูตร	น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากสูตร (ton)	หมายเหตุ
9. Navy Mckay	$R_c = \frac{Wrh}{S(1 + 0.80 \frac{W_p}{W_r})}$	
10. Rankine	$R_c = \frac{2AE_L S}{L} \left[\sqrt{1 + \frac{EnL}{S^2 ELA}} - 1 \right]$	EL = พิกัดยืดของเสาเข็มคอนกรีต = 2.0×10^7 ตัน/เมตร ²
11. Redtenbacher	$R_c = \frac{AE_L}{L} \left[-S + \sqrt{S^2 + \frac{EnWr2L}{(Wr+W_p)AE_L}} \right]$	En = Wrh , ตัน-เมตร
12. Pacific Coast Uniform Building Code	$R_c = \frac{En \frac{Wr + n^2 W_p}{Wr + W_p}}{S + \frac{RuL}{AE_L}}$	n = 0.25 En & EL เหมือนสูตร 10 และ 11

หมายเหตุ ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ได้แสดงหน่วยไว้ให้ถือว่า

 Wr, Wp มีหน่วยเป็น ตัน

 S , h มีหน่วยเป็น เมตร

 A มีหน่วยเป็น เมตร²

3.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มกับที่ได้จากการทดสอบในสนาม

3.3.1 โดยการ Plot กราฟ คำนวณน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม ที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม (Rc) ในแกนตั้ง และที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนาม (Rt) เป็นแกนนอน โดยใช้สูตรการตอกเสาเข็มทั้ง 12 สูตรที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 กราฟที่ Plot แสดงไว้ในรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 9 ในภาคผนวก ก ผลที่ได้จากการ Plot กราฟ

1. สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH สูตรที่ให้ค่าใกล้เคียง ได้แก่สูตร Engineering News, So, Janbu และ Gate เพราะเมื่อลากเส้นตรงผ่านจุดที่ Plot แล้ว เส้นตรงจะทำมุมประมาณ 45° กับแกนทั้งสอง และจุดต่าง ๆ ไม่กระจายจากแนวเส้นตรงมาก ส่วนสูตรที่จุดที่ Plot กระจายออกจากแนวเส้นตรงไปมาก คือ แทบไม่มีความสัมพันธ์กันเลย ได้แก่สูตร Eytelwein, Navy-Mckay, Redtenbacher และ Pacific Coast

2. สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สูตรที่ให้ค่าใกล้เคียง ได้แก่สูตร Engineering News, Hiley, Janbu และ Gate เพราะจุดต่าง ๆ จะเกาะกลุ่มตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่าน ส่วนสูตรที่จุดที่ Plot มีการกระจายกันมาก ได้แก่ สูตรของ Navy Mckay, Rankine, Redtenbacher และ Pacific Coast

จะเห็นว่า สำหรับหน้าตัดทั้ง 2 ชนิด คือ DH และ จัตุรัส สูตรที่เหมาะสมให้ค่าใกล้เคียง ได้แก่สูตร Engineering News และ Gate

จากกราฟที่ Plot นี้ เราสามารถหาน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ โดยแทนค่าที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มลงในสมการ (3.1)

$$R_u = K_1 R_c + K_2 \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

เมื่อ R_u = น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ปรับค่าจากสูตรการตอกเสาเข็มแล้ว

R_c = น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากสูตรการตอกเสาเข็ม

K_1, K_2 = ค่าคงที่สำหรับปรับค่าที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มที่ได้จากตารางที่ 3.5

ตัวอย่างที่ 1

เสาเข็มรูป DH มีค่าต่าง ๆ กำหนดให้ดังนี้ $S = 0.0067$ m/blow, $W_r = 4.7$ ton, $h = 0.60$ m, หน้าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากสูตร Engineering News และ Gate

$$1. \text{ Engineering News. } R_c = \frac{W_r h}{S + 0.0254C} \quad \text{กำหนดให้ } C = 0.70$$

$$R_c = \frac{4.70 \times 0.60}{0.0067 + (0.0254)(0.7)} = 115.2 \text{ ton}$$

จากตารางที่ 3.5 สำหรับสูตร Engineering News หนักค้ำเสาเข็มรูป DH $C = 0.7$,

$$A = 1.00, B = 38$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น น้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม (Ru)} &= (1.00) 115.2 + 38 \\ &= 153.2 \text{ ton} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าคงที่ A และ B ที่ใช้ในการหาน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม จากสมการ (3.1) หัวข้อ 3.3.1

ชื่อสูตรการค้ำเสาเข็ม	รูปร่างหน้าค้ำของเสาเข็ม			
	DH		SS & HS	
	K_1	K_2	K_1	K_2
1. Engineering News $C = 0.5$	0.71	41	1.32	-6
	0.86	41	1.39	-8
	1.00	38	0.89	72
	1.14	32	0.94	76
	1.33	24	1.00	75
	1.41	24	1.08	73
2. Modified Eng. News $C = 0.5$	1.74	30	3.51	-49
	2.11	21	4.00	-40
	2.35	18	4.76	-67
	2.86	7	4.65	-44
	3.44	-7	5.12	-44
	3.64	0.1	5.68	-41

ชื่อสูตรการตอกเสาเข็ม	รูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม			
	DH		SS & HS	
	K ₁	K ₂	K ₁	K ₂
3. Hiley	2.04	2	3.33	-50
4. Dutch	5.71	-43	7.52	-86
5. So	0.91	34	1.43	7
6. Janbu	1.21	27	1.67	-10
7. Gate	1.68	-5	3.45	-110
8. Eytelwein	2.11	-5.5	2.98	-56
9. Navy Mckay	0.56	43	1.57	-30
10. Rankine	0.26	53	0.62	2
11. Redtenbacher	0.59	50	1.92	-52
12. Pacific Coast Uniform Building Code	0.75	36	2.05	-56

$$\begin{aligned}
 2. \text{ Gate} \quad R_c &= 4.0 \sqrt{enWrh} \log(25/S) \\
 &= 4.0 \sqrt{0.75 \times 4.7 \times 60} \log(25/0.67) \\
 &= 91.4 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 3.5 สูตร Gate หน้าตัดรูป DH, A = 1.68, B = -5
 เพราะฉะนั้น น้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม (Ru) = (1.68) (91.4) -5
 = 149.05 ton.

การหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม โดยวิธี Plot กราฟนี้ เราไม่สามารถที่จะ
 ตัดสินลงไปได้เลยว่า สูตรไหนให้ผลได้ดีกว่ากัน เพราะลักษณะการกระจายของกราฟไม่แน่นอน
 เพียงแต่เป็นการรู้ว่า สูตรไหนให้ค่าใกล้เคียงเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติช่วย

3.3.2 การหาความสัมพันธ์โดยใช้วิธีการทางสถิติ

วิธีการทางสถิติที่นำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formula) และจากการทดสอบเสาเข็มในสนาม (Pile Load Test) ใช้หลักการของเส้นถดถอยแบบธรรมดา (Simple Linear Regression) โดยสมมุติให้น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากทั้ง 2 วิธี แทนด้วยสมการ

$$Y = \beta X \dots\dots\dots (3.2)$$

กำหนดให้

X_i = ตัวแปรต้นของน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม

Y_i = ตัวแปรต้นของน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนาม

β = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ X , ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \dots\dots\dots (3.3)$$

คุณภาพของเส้นถดถอยแบบธรรมดา หาจาก Coefficient of Determination (R^2) โดยที่ค่า R^2 นี้ควรมีค่าเกิน 0.8 ขึ้นไป และมีค่าสูงสุด = 1.0 ค่า R^2 นี้ หาได้จากสมการ(3.4)

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n X_i Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

เมื่อทดลองหาค่า β และ R^2 จากสูตรการตอกเสาเข็มทั้ง 12 สูตร ในตารางที่ 3.4 แล้วได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่า β และ R^2 จากสูตรการตอกเสาเข็มต่าง ๆ

ชื่อสูตรการตอกเสาเข็ม	เสาเข็มหน้าค้ำรูป DH		เสาเข็มหน้าค้ำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส		
	β	R^2	β	R^2	
1. Engineering News	C = 0.5	0.97	0.9511	0.94	0.9252
	0.6	1.11	0.9514	1.03	0.9260
	0.7	1.26	0.9514	1.13	0.9350
	0.8	1.39	0.9510	1.23	0.9350
	0.9	1.54	0.9505	1.35	0.9263
	1.0	1.67	0.9408	1.40	0.9246
2. Modified. Eng. News	C = 0.5	1.98	0.9415	2.52	0.9424
	0.6	2.27	0.9406	2.79	0.9454
	0.7	2.55	0.9396	3.06	0.9474
	0.8	2.79	0.9348	3.32	0.9487
	0.9	3.11	0.9372	3.58	0.9496
	1.0	3.39	0.9360	3.82	0.9489
3. Hiley		2.06	0.9703	2.62	0.9612
4. Dutch		4.38	0.9294	4.82	0.9415
5. So		0.98	0.9511	1.25	0.9596
6. Janbu		1.03	0.8476	1.54	0.9618
7. Gate		1.63	0.9789	2.14	0.9388
8. Eytelwein		1.77	0.8752	1.99	0.9331
9. Navy McKay		0.24	0.6469	0.87	0.8328
10. Rankine		0.32	0.9157	0.46	0.8957
11. Redtenbacher		0.70	0.9178	1.00	0.7995
12. Pacific Coast Uniform Building Code		0.83	0.9478	1.24	0.8949

จากตารางที่ 3.6 เมื่อเรียงสูตรตามค่า R^2 จากมากไปหาน้อย เราจะได้สูตรการทอกเสาเข็มที่เหมาะสมเรียงตามลำดับคือ

ตารางที่ 3.7 สูตรการทอกเสาเข็มเรียงตามค่า R^2 จากมากไปหาน้อยตามลำดับ

สำหรับเสาเข็มหน้ากัก DH		สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	
ชื่อสูตรการทอกเสาเข็ม	R^2	ชื่อสูตรการทอกเสาเข็ม	R^2
1. Gate	0.9789	1. Janbu	0.9618
2. Hiley	0.9703	2. Hiley	0.9612
3. Engineering (C = 0.70) News	0.9514	3. So	0.9596
4. So	0.9511	4. Modified Eng. News (C = 0.9)	0.9496
5. Pacific Coast Uniform Building Code	0.9478	5. Dutch	0.9415
6. Modified Eng. (C = 0.50) News	0.9415	6. Gate	0.9388
7. Dutch	0.9294	7. Engineering News (C = 0.7)	0.9350
8. Redtenbacher	0.9178	8. Eytelwein	0.9331
9. Rankine	0.9157	9. Rankine	0.8957
10. Eytelwein	0.8752	10. Pacific Coast Uniform Building Code	0.8949
11. Janbu	0.8476	11. Navy McKay	0.8328
12. Navy McKay	0.6469	12. Redtenbacher	0.7995

จะเห็นว่า เมื่อใช้วิธีการทางสถิติแล้ว เราสามารถตัดสินได้ว่า สูตรไหนให้ผลที่ได้จากสูตรการทอกเสาเข็มได้ดีกว่ากัน โดยดูจากค่าของ Coefficient of Determination (R^2) ถ้าค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดี

จากตารางที่ 3.7 เมื่อแบ่งตามรูปร่างหน้ากักเสาเข็ม จะเห็นว่า

1. เสาเข็มที่มีหน้าตัดรูป DH สูตรที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการตอกเสาเข็มมากที่สุด ได้แก่ สูตร Gate คือ มีค่า R^2 ถึง 0.9789 รองลงไป ได้แก่ สูตรของ Hiley และ Engineering News ตามลำดับ ส่วนสูตรอื่นที่ให้ค่าใกล้เคียงพอสมควร นอกจากสูตรของ Navy McKay เท่านั้น ที่มีค่า R^2 ต่ำมาก คือ เท่ากับ 0.6469 เท่านั้น จึงไม่ควรนำมาใช้หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

2. เสาเข็มที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สูตรที่ให้ค่าใกล้เคียง ได้แก่ สูตรของ Janbu, Hiley และ So ตามลำดับ โดยสูตร Janbu ให้ค่าใกล้เคียงที่สุด มีค่า $R^2 = 0.9618$ และสูตรที่ให้ค่า R^2 ต่ำที่สุดได้แก่ สูตรของ Redtenbacher ให้ค่า $R^2 = 0.7995$

จากการวิเคราะห์สูตรการตอกเสาเข็มทั้ง 12 สูตร โดยใช้วิธีทางสถิตินี้ เราสามารถหาน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ให้ค่าใกล้เคียงได้ โดยการคูณค่าที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มด้วยค่าคงที่ คือ β จากตารางที่ 3.6 ซึ่งค่า β นี้ ใช้ได้เฉพาะหน้าตัดเสาเข็มแต่ละชนิด และแต่ละสูตร

ตัวอย่างที่ 2 จากตัวอย่าง 1 เราหาค่าน้ำหนักพิบัติจากสูตร Engineering News = 115.2 ton และจากสูตร Gate = 94.4 ton เมื่อใช้วิธีทางสถิติ เราจะหาค่าน้ำหนักพิบัติที่แท้จริงของเสาเข็มได้ดังนี้

จากตารางที่ 3.6 สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH ค่าของ β สำหรับสูตร Engineering News ($C = 0.7$) และ Gate จะมีค่าเท่ากับ 1.25 และ 1.63 ตามลำดับ

เพราะฉะนั้น สำหรับสูตร Engineering News : $R_u = 115.2 \times 1.25 = 144 \text{ ton}$

Gate : $R_u = 94.4 \times 1.63 = 153.8 \text{ ton}$

3.4 การวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมสำหรับดินกรุงเทพฯ

การวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมนี้ ได้ทำการวิเคราะห์จากสูตรเดิมที่เห็นว่าให้ค่าน้ำหนักพิบัติ จากสูตรนั้น ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเสาเข็ม โดยแบ่งการหาสูตรการตอกเสาเข็มออกเป็น 2 ชนิด ตามรูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม คือ รูปร่างหน้าตัดแบบ DH และ สี่เหลี่ยมจัตุรัส

3.4.1 การหาสูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH

สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH สูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ค่า R^2 สูง 4 สูตรแรก จากตารางที่ 3.7 เรียงตามลำดับคือ

$$1. \text{ Gate : } R_c = 4.0 \sqrt{e n W r h} \log(25/S)$$

$$2. \text{ Hiley : } R_c = \frac{W r h Z}{S + 0.01 C / 2} \cdot \frac{W r + n^2 W p}{W r + W p}$$

$$3. \text{ Engineering News. } R_c = \frac{W r h}{S + 0.0254 C}$$

$$4. \text{ So } R_c = \frac{a}{S + \frac{1}{2} \sqrt{2ab}} \quad \begin{array}{l} a = e W r h \\ b = \frac{L}{AE_L} \end{array}$$

เมื่อพิจารณาจากสูตรทั้ง 4 นี้แล้ว จะเห็นว่า น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจะมีความสัมพันธ์กับค่าต่าง ๆ ในสูตรเหล่านี้ จึงได้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนาม (R_t) กับค่าต่าง ๆ จากสูตรทั้ง 4 โดยการหาค่า Coefficient of Determination (R^2) ระหว่างค่า R_t และค่าต่าง ๆ ที่ประกอบกันเข้าเป็นสูตรเหล่านี้ และสมมุติเป็นสูตรใหม่ขึ้นมาอีก 8 สูตร ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 แสดงค่า β และ R^2 ที่ได้จากสูตรการตกเสาเข็มที่สมมุติขึ้นใหม่ของ
เสาเข็มหน้าตัดรูป DH

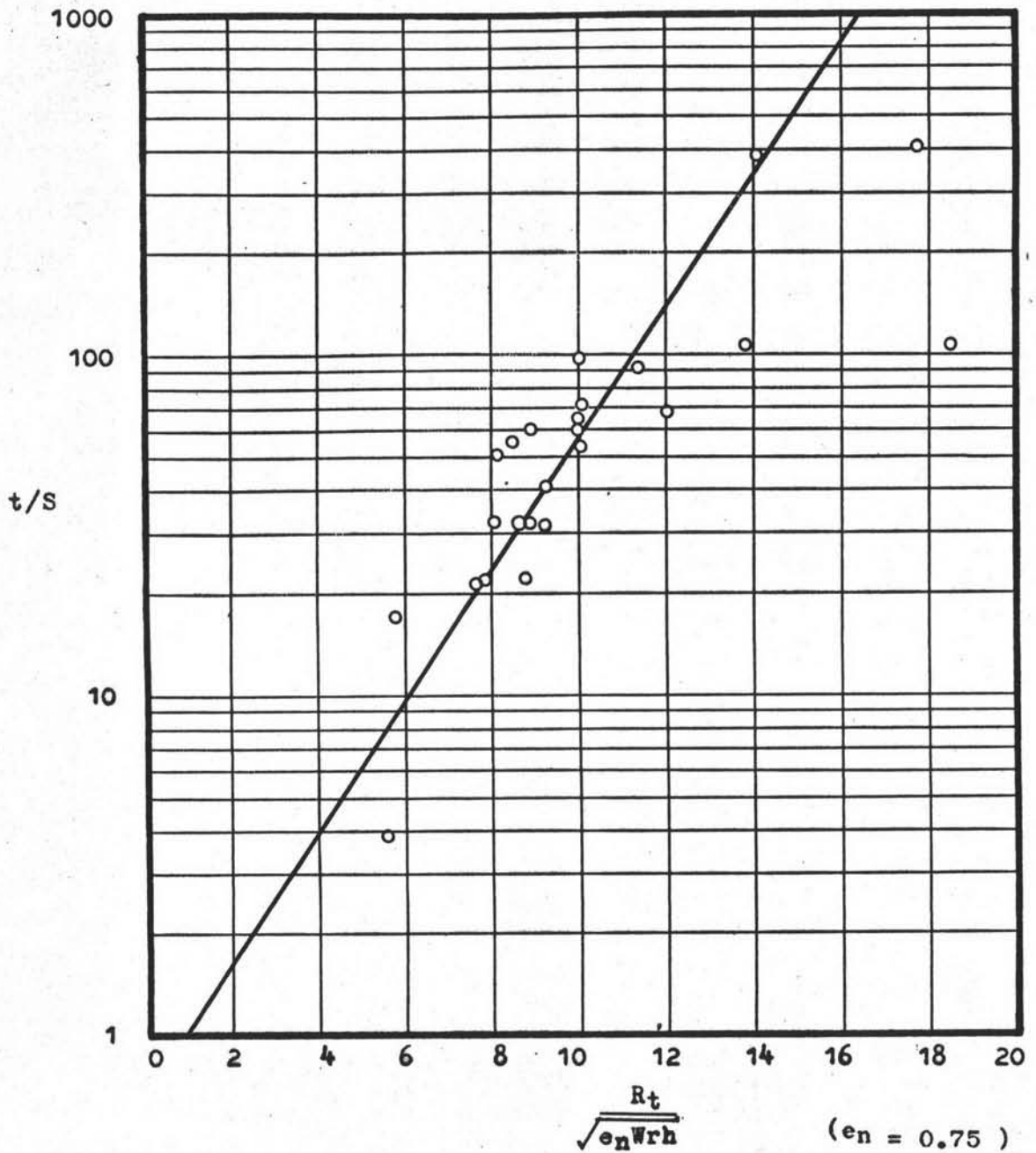
			β	R^2	หมายเหตุ
1	Rt	$\sqrt{enWrh} \log l/S$	4.76	0.971	
2	Rt	$\sqrt{enWrh} \cdot \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp} \cdot \log l/S$	9.19	0.915	
3	Rt	$\sqrt{enWrh} \log t/S$	5.95	0.982	t = คำนวณค่าที่สูงสุดของหน้าตัดเสาเข็ม
4	Rt	$\sqrt{enWrh} \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp} \cdot \log t/S$	11.75	0.941	
5	Rt	$\sqrt{enWrh} A/L \log t/S$	92.77	0.979	A = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม, m^2
6	Rt	$\frac{enWrh}{S + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}} \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp}$	3.14	0.927	a และ b จากสูตร S_0
7	Rt	$\frac{enWrh}{S + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}} \log t/S$	0.81	0.949	a และ b จากสูตร S_0
8	Rt	$\frac{enWrh}{S + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}} \cdot \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp} \cdot \log t/S$	1.63	0.932	a และ b จากสูตร S_0

*t = คำนวณค่าที่สูงสุดของหน้าตัดของเสาเข็ม

จากตารางที่ 3.8 จะเห็นว่าสูตรที่ให้ค่าใกล้เคียงคือ มีค่า R^2 มากที่สุด ได้แก่ สูตรในข้อ 3
คือ ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.982 และเมื่อเขียนเป็นสูตรออกมาจะให้ค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มสำหรับ
หน้าตัดรูป DH ตามสมการที่ (3.5)

$$R_c = 5.95 \sqrt{enWrh} \log(t/S) \dots \dots \dots (3.5)$$

เมื่อ t = คำนวณค่าที่สูงสุดของหน้าตัดของเสาเข็ม



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/S กับ $\frac{R_t}{\sqrt{e_n W r h}}$ ของเสาเข็มหน้าตักรูป DH

จากสมการที่ 3.5 เมื่อทดลองเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง t/S ใน log-scale และ $\frac{Rt}{\sqrt{enWrh}}$ ใน Scale ธรรมดา ดังรูปที่ 3.2 หน้า 50 ปรากฏว่าจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้ง 2 ดังสมการ 3.6

$$Rc = \sqrt{enWrh} (5.15 \log t/S + 0.949) \dots\dots\dots(3.6)$$

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่หาได้จากสูตรโดยใช้วิธีทางสถิติ (ตามสมการที่ 3.5) กับน้ำหนักพิบัติที่หาจากสูตรโดยการทดลองเขียนกราฟ (ตามสมการที่ 3.6) ปรากฏว่า ค่าน้ำหนักพิบัติที่หาได้จากการทดลองเขียนกราฟตามสมการที่ (3.6) ให้ค่าใกล้เคียงกว่า โดยให้ค่า $R^2 = 0.986$ และเมื่อเปรียบเทียบ Error ที่ผิดไปจากน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนาม ดังตารางที่ 3.9 ค่า Rc ตามสมการที่ 3.6 จะให้ค่า Error ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 20 %

ตารางที่ 3.9 แสดง Error ของน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม ที่ได้จากสมการ 3.5 และ 3.6 หัวข้อ 3.4.1

	เสาเข็ม	น้ำหนักพิบัติจากการทดสอบในสนาม Rt , ตัน	น้ำหนักพิบัติจากสมการ(3.5) $Rc = 5.95 \sqrt{enWrh} \log t/S$		น้ำหนักพิบัติจากสมการ(3.6) $Rc = \sqrt{enWrh} (5.15 \log t/S + 0.949)$	
			Rc , ตัน	Error %	Rc , ตัน	Error %
			1	DH .25 x .25 x 21.0	90	111.2
2	DH .25 x .25 x 22.0	113.8	134.7	+18.4	127.3	+11.9
3	DH .25 x .25 x 16.0	90	92.1	+ 2.3	89.5	- 0.5
4	DH .25 x .25 x 16.0	40	46.4	+ 1.6	49.9	+24.9
5	DH .25 x .25 x 22.0	70	63.5	-9.3	62.5	-12.5
6	DH .30 x .30 x 23.0	87.5	89.8	+2.6	88.5	+ 1.1
7	DH .30 x .30 x 20.0	90	89.8	-0.2	88.5	-1.7
8	DH .30 x .30 x 24.0	130	154.3	+18.7	147.4	+13.4
9	DH .30 x .30 x 20.0	107	112.4	+ 5.0	107.4	+0.3
10	DH .36 x .36 x 23.0	130	157.9	+21.5	150.9	+16.1

เสาเข็ม	น้ำหนักพิบัติ จากการทดสอบในสนาม Rt ตัน	น้ำหนักพิบัติจากสมการ(3.5) $Rc = 5.95 \sqrt{enWrh} \log t/S$		น้ำหนักพิบัติจากสมการ(3.6) $Rc = \sqrt{enWrh}(5.15 \log t/S + 0.949)$		
		Rc, ตัน	Error %	Rc, ตัน	Error %	
		11	DH .36 x .36 x 23.0	160	155.4	-2.8
12	DH .36 x .36 x 20.0	112.5	138.7	+23.3	133.0	+18.3
13	DH .36 x .36 x 22.0	84	93.9	+11.8	91.0	+8.4
14	DH .36 x .36 x 24.0	135	138.7	+2.7	133.9	-0.8
15	DH .36 x .36 x 23.0	165	166.6	+0.9	157.8	-4.4
16	DH .36 x .36 x 23.0	155	149.0	-3.8	144.9	-6.5
17	DH .40 x .40 x 23.0	143	153.8	-7.6	146.4	+2.4
18	DH .40 x .40 x 24.5	125	125.9	+0.72	121.5	-2.8
19	DH .40 x .40 x 23.0	240	260.4	+8.5	241.5	+0.6
20	DH .40 x .40 x 25.0	270	235.4	-12.8	218.1	-19.2
21	DH .40 x .40 x 26.0	200	209.2	+4.6	199.5	-0.2
22	DH .40 x .40 x 23.0	175	114.8	-34.4	140.0	-20.0
23	DH .40 x .40 x 24.5	200	179.3	-10.4	170.8	-14.6
24	DH .40 x .40 x 26.0	270	234.8	-13.0	221.7	-17.9

ดังนั้น สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH จะใช้สูตรการตอกเสาเข็มเพื่อหาน้ำหนักของเสาเข็มได้ใกล้เคียงที่สุดตามสมการที่(3.6) และเมื่อแทนค่า $n = 0.75$ และให้ค่า h มีหน่วยเป็นเมตร สมการที่ (3.6) จะได้ว่า

$$Rc = \sqrt{Wrh}(44.6 \log t/S + 8.22) \dots\dots\dots (3.7)$$

เมื่อ Rc = น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม, ตัน

Wr = น้ำหนักของลูกตุ้มตอกเสาเข็ม, ตัน

h = ระยะยกของลูกตุ้มตอก, เมตร

t = ความแคบที่สุดของหน้าตัดเสาเข็ม, เมตร

S = ระยะทรุดเฉลี่ย 10 ครั้งสุดท้าย, เมตร/ครั้ง

3.4.2 การหาสูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สำหรับเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมนี้ มีทั้งเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมตัน (Solid Square) และมีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีรูตรงกลาง (Square Hollow Pile) เฉพาะแนวทางค้นพิเศษ สูตรการตอกเสาเข็มสำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ให้ความ R^2 สูง 4 สูตรแรก จากตารางที่ 3.7 เรียงตามลำดับคือ

$$1. \text{ Janbu : } R_c = \frac{Wrh}{KuS} \quad \left(K_u = C_d \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{6d}} \right] \right)$$

$$C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_r}$$

$$2. \text{ Hiley : } R_c = \frac{WrhZ}{S+0.01C/2} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \quad \left(\lambda = \frac{WrhL}{AE_L S^2} \right)$$

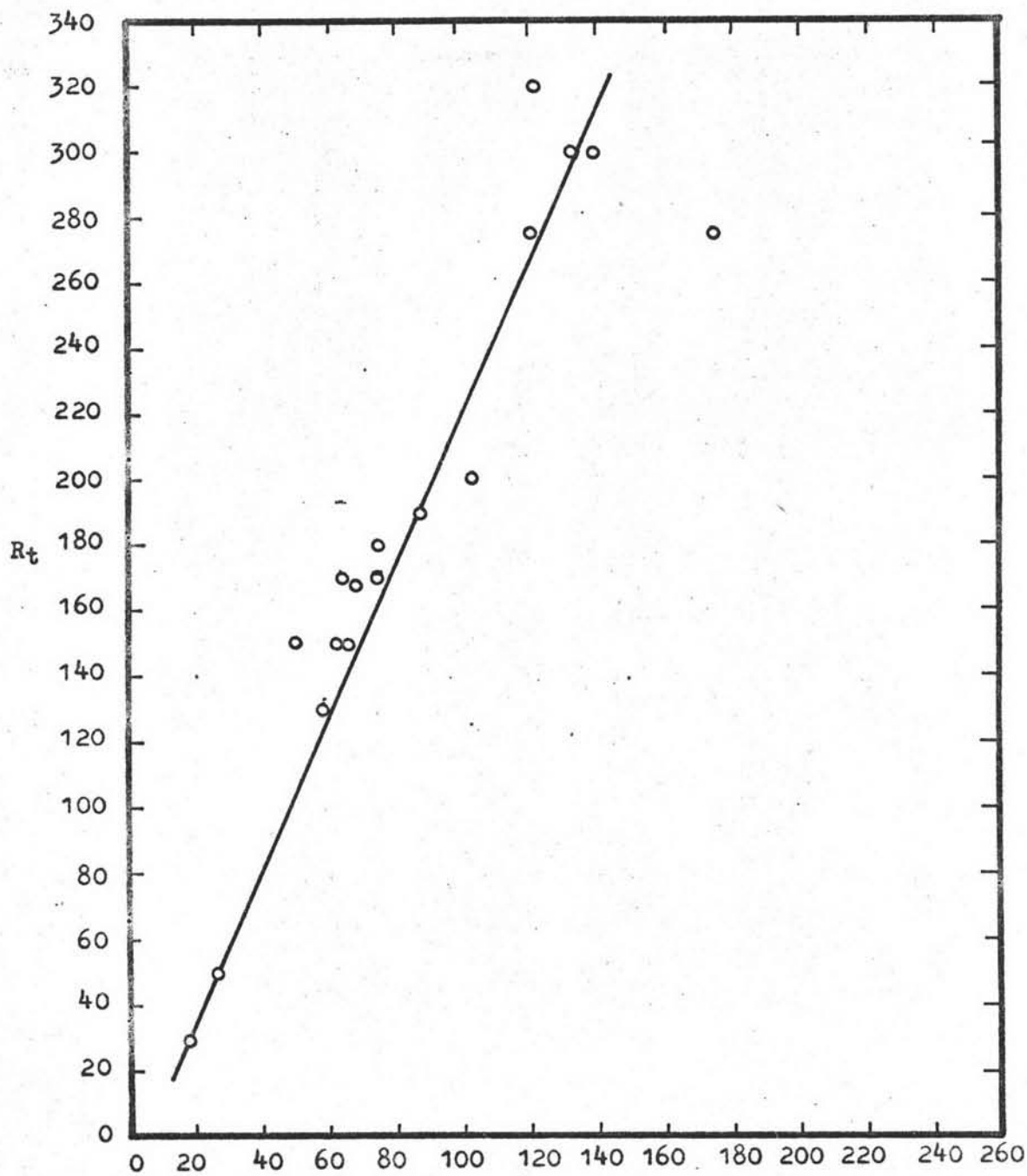
$$3. \text{ So : } R_c = \frac{a}{S + \frac{1}{2} \sqrt{2ab}} \quad \left(a = eWrh, \quad b = \frac{L}{AE_L} \right)$$

$$4. \text{ Modified Eng. News. (C = 0.9) : } R_c = \frac{Wrh}{S+0.0254C} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$$

จากสูตรที่ให้ค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มใกล้เคียงกับที่ทดสอบในสนามทั้ง 4 สูตรนี้ ได้ทดลองวิเคราะห์หาสูตรใหม่ โดยทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนาม (R_t) ของเสาเข็มแต่ละต้นกับค่าต่าง ๆ ที่ได้จากสูตรทั้ง 4 และหาค่า Coefficient of Determination (R^2) เพื่อเปรียบเทียบว่า สูตรไหนให้ค่าใกล้เคียงที่สุด ดังแสดงไว้ตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 แสดงค่า β และ R^2 ที่ได้จากสูตรการตกเสาเข็มที่สมมุติขึ้นใหม่
ของเสาเข็มหน้าตักรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

			β	R^2	หมายเหตุ
1	Rt	$\frac{Wrh}{KuS + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}}$	2.14	0.9741	a และ b จากสูตร So Ku จากสูตร Janbu
2	Rt	$\frac{Wrh}{KuS + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}} \cdot \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp}$	5.04	0.9699	
3	Rt	$\frac{Wrh}{KuS + C}$	(C = 0.001) 1.59 (C = 0.002) 1.64 (C = 0.003) 1.68 (C = 0.004) 1.72 (C = 0.005) 1.741	0.9625 0.9630 0.9633 0.9635 0.9575	
4	Rt	$\frac{Wrh}{KuS + C} \cdot \frac{Wr + n^2Wp}{Wr + Wp}$	(C = 0.001) 3.75 (C = 0.002) 3.85 (C = 0.003) 3.96 (C = 0.004) 4.06 (C = 0.005) 4.11	0.9565 0.9578 0.9589 0.9594 0.9548	



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_t กับ
 สี่เหลี่ยมจตุรัส

$$\frac{Wrh}{KuS + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}}$$

$$\frac{Wrh}{KuS + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}}$$

ของเสาเข็มหน้าค้ำรูป

จากตารางที่ 3.10 จะเห็นว่าสูตรที่ให้ค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มใกล้เคียงที่สุด คือ สูตรที่ 1 ซึ่งให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9741 และเมื่อเขียนเป็นสูตรการตอกเสาเข็มออกมาจะได้ค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม ตามสมการที่ (3.8)

$$R_c = \frac{2.14 W_{rh}}{K_u S + \frac{1}{2} \sqrt{2ab}} \dots \dots \dots (3.8)$$

จากสมการที่(3.8) เมื่อทดลองเขียนกราฟระหว่างค่า น้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนาม (R_t) กับค่า $\frac{W_{rh}}{K_u S + \frac{1}{2} \sqrt{2ab}}$ ดังรูปที่ 3.3 หน้า 55 ปรากฏว่าจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.9)

$$R_c = \frac{2.3 W_{rh}}{K_u S + \frac{1}{2} \sqrt{2ab}} \dots - 10 \dots \dots \dots (3.9)$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากสมการ(3.8) และ(3.9) ดังตารางที่ 3.11 และหาค่า R^2 ของสมการที่(3.9) ปรากฏว่าได้ค่า $R^2 = 0.9711$ น้อยกว่าที่ได้จากสมการที่ (3.8) ดังนั้น สูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ค่าน้ำหนักพิบัติใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนาม ได้แก่ สูตรตามสมการที่ (3.8)

ตารางที่ 3.11 แสดง Error ของน้ำหนักพืษติของเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากสมการ 3.8 และ 3.9

	เสาเข็ม	น้ำหนักพืษติ จากการทดสอบ ในสนาม Rt, ตัน	น้ำหนักพืษติจากสมการ 3.8		น้ำหนักพืษติจากสมการ 3.9	
			$Rc = 2.14 \frac{Wrh}{KuS + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}}$		$Rc = \frac{2.3Wrh}{KuS + \frac{1}{2}\sqrt{2ab}} - 10$	
			Rc, ตัน	Error %	Rc, ตัน	Error %
1	SS .18 x .18 x 21.0	30	41.8	+39.3	34.9	+16.3
2	SS .18 x .18 x 21.0	50	58.5	+17.0	52.8	+5.6
3	SS .35 x .35 x 21.0	130	127.7	-1.7	127.2	-2.2
4	SS .35 x .35 x 21.0	150	141.6	-5.6	142.1	-5.3
5	SS .35 x .35 x 23.7	150	136.0	-9.3	136.2	-9.2
6	SS .35 x .35 x 27.0	150	109.8	-26.8	108.0	-28.0
7	SS .35 x .35 x 24.0	168	149.2	-6.8	150.4	-6.0
8	SS .35 x .35 x 21.0	170	137.8	-18.9	138.1	-18.7
9	SS .35 x .35 x 24.0	170	162.2	-4.6	164.4	-3.3
10	SS .35 x .35 x 24.5	190	189.8	-0.1	193.9	+2.1
11	SS .35 x .35 x 23.0	200	222.0	+11.0	228.6	+14.3
12	SS .40 x .40 x 25.0	180	160.5	-10.8	162.5	-9.7
13	HS .525 x .525 x 30.0	275	257.4	-6.4	266.6	-3.1
14	HS .525 x .525 x 30.0	300	285.7	-4.7	297.1	-0.9
15	HS .525 x .525 x 30.0	275	376.3	+36.8	394.5	+43.5
16	HS .525 x .525 x 30.0	320	262.2	-18.1	271.8	-15.1
17	HS .525 x .525 x 30.0	300	298.4	-0.5	310.7	+3.6

3.4.3 สูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มหน้าค้ำรูป I

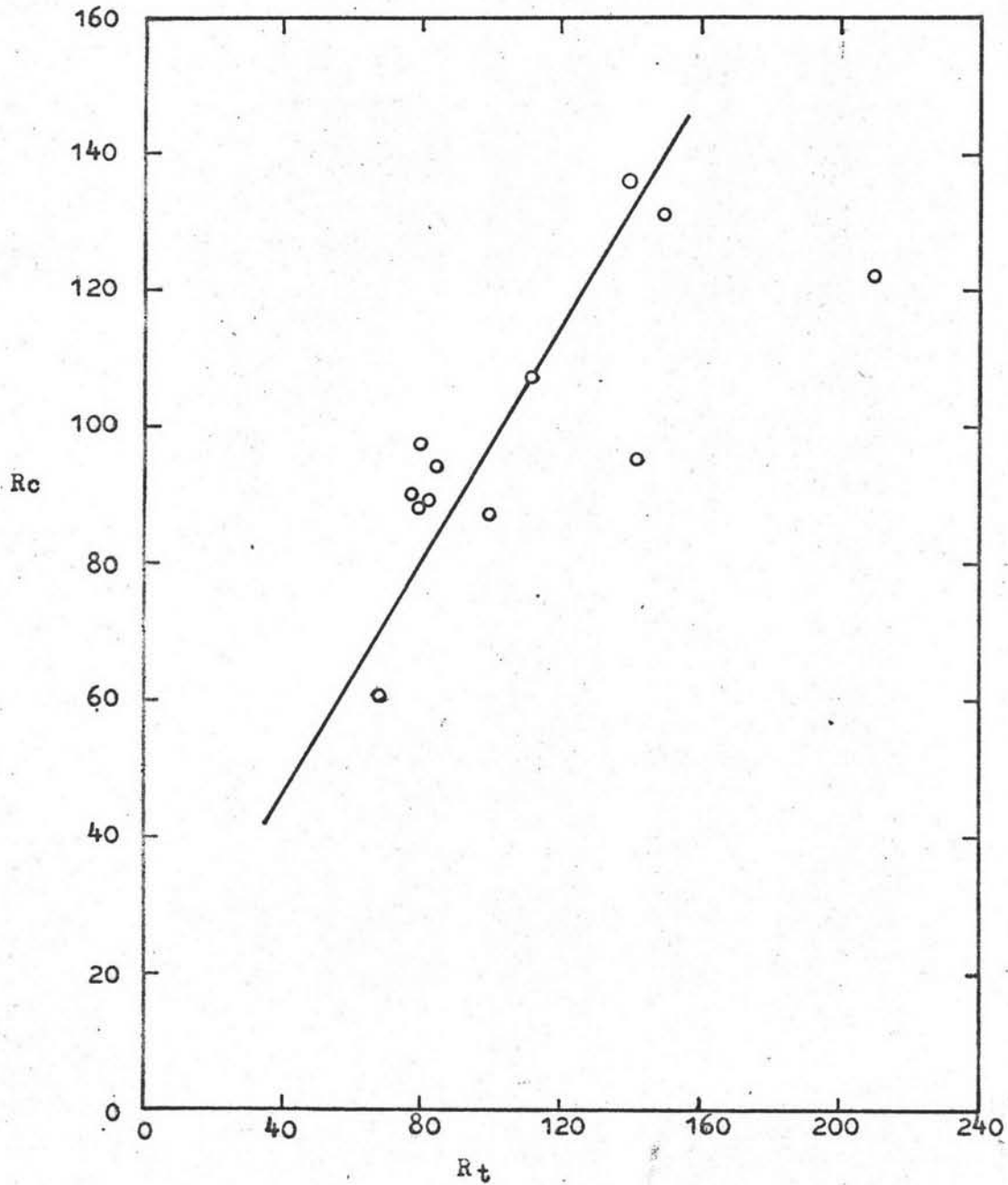
สำหรับเสาเข็มหน้าค้ำรูป I เนื่องจากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มจนถึงน้ำหนักพิบัติมีน้อยกว่าเสาเข็มหน้าค้ำรูป DH หรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส จึงไม่ได้ออกตารางสูตรการตอกเสาเข็มสำหรับเสาเข็มรูป I โดยเฉพาะ แต่เมื่อพิจารณาจากรูปหน้าค้ำของเสาเข็ม I แล้ว จะเห็นว่ามิลักษณะใกล้เคียงกับเสาเข็มรูป DH จึงได้ออกตารางข้อมูลต่าง ๆ ของเสาเข็ม I ลงในสูตรการตอกเสาเข็มที่ใช้สำหรับเสาเข็มหน้าค้ำรูป DH ตามสมการที่ 3.7 ในหัวข้อ 3.4.1 คือ

$$R_c = \sqrt{W_r h} (44.6 \log t/S + 8.22)$$

ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.13 ปรากฏว่ามีบางคนที่ให้ Error ผิดไปจากที่ทดสอบได้ถึงประมาณ 40 % แต่ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงน้อยกว่า ± 20 % และเมื่อทดลองเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มกับที่ได้จากการทดสอบ ปรากฏว่า ส่วนใหญ่ไม่กระจายออกไปจากแนวเส้นตรงมากนัก ดังนั้น สำหรับเสาเข็มหน้าค้ำรูป I จึงสามารถใช้สูตรการตอกเสาเข็มเช่นเดียวกับเสาเข็มหน้าค้ำรูป DH ได้

ตารางที่ 3.12 แสดง Error ของน้ำหนักพื้ของเสาเข็ม I ที่ได้จากการแทนค่าในสูตร
การตอกเสาเข็มที่ใช้สำหรับเสาเข็มรูป DH

			L	A	Wp	Wr	h	S	D	Rt	Re	Error
			m	m ²	ton	ton	m	m/blow	m	ton	ton	%
1	I	.26 x .26	21.0	.0406	2.40	3.5	.30	.0027	20.0	80	97.8	+ 22.25
2	I	.26 x .26	21.0	.0406	2.04	3.5	.30	.0032	22.3	85	94.95	+ 11.71
3	I	.26 x .26	21.0	.0518	2.60	4.4	.30	.0076	21.8	80	88.14	+ 10.17
4	I	.26 x .26	20.0	.0406	1.94	4.2	.30	.0072	-	100	87.16	- 12.83
5	I	.26 x .26	21.0	.0414	2.08	4.7	.30	.0077	18.5	78	90.7	+ 16.28
6	I	.26 x .26	21.0	.0414	2.08	3.0	.30	.0031	20.5	82.5	89.4	+ 8.32
7	I	.26 x .26	21.0	.0490	2.47	3.0	.30	.0136	20.7	67	61.9	- 7.5
8	I	.30 x .30	23.0	.0660	3.64	4.3	.50	.0035	22.7	117	136.7	+ 16.84
9	I	.30 x .30	22.0	.0660	3.48	4.5	.50	.0170	-	142	95.73	- 32.58
10	I	.30 x .30	21.0	.0550	2.77	4.7	.40	.0055	-	112	117.46	+ 4.88
11	I	.35 x .35	23.0	.0880	4.85	5.5	.40	.0072	22.5	210	123.5	- 41.19
12	I	.40 x .40	21.0	.1240	6.26	4.5	.60	.0094	21.0	150	131.8	- 12.13



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่คำนวณได้ (Re) จากสูตรการตอกเสาเข็ม $R_u = \sqrt{Wrh(44.6 \log t/S + 8.22)}$ กับน้ำหนักพิบัติที่ได้จากการทดสอบในสนาม (R_t) ของเสาเข็มหน้าคักรูป I