บทที่ 4

ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์และผลการวิจัย

การศึกษาและวิจัยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินการดังต่อไปนี้

- หาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกวิบัติและราคาเสาเข็มจากข้อมูลที่รวบรวมขึ้นในบทที่ 3 โดยใช้หลักการทางสถิติ ค่าน้ำหนักบรรทุกและราคาเสาเข็มที่หาได้จะใช้เป็นหลักในการวิจัยต่อไป

- หาความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวในการวิเคราะห์จะพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกเมื่อเสาเข็มมีขนาดหน้าตัดเพิ่มใหญ่ขึ้นจะมีผลต่อน้ำหนักบรรทุกและราคาอย่างไร กรณีที่สองจะพิจารณาเสาเข็มที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างชนิดกัน คือ เสาเข็มหน้าตัดไอ เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน และเสาเข็มหน้าตัดกลมกลวง โดยจะเปรียบเทียบความแตกต่างในด้านน้ำหนักบรรทุกและราคา

- หาความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม โดยเปรียบเทียบราคากับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากที่ใช้เสาเข็มจำนวนมากกว่า 1 ต้น ผลของการวิเคราะห์จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกขนาดและจำนวนของเสาเข็มที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในกรุงเทพฯ

4.1 น้ำหนักบรรทุกวิบัติ และราคาเสาเข็ม

ในขั้นต้นของการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาเชิงสถิติเพื่อหาค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติและราคาที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มหน้าตัดต่าง ๆ โดยตั้งสมมติฐานว่าที่ระดับความลึกเดียวกันชั้นดินจะมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเหมือนกัน สาเหตุที่ต้องตั้งสมมติฐานนี้เพราะตามสภาพดินกรุงเทพฯ ที่ระดับความลึก 18.0 เมตร ถึง 28.0 เมตร (ความยาวปลายเสาเข็มของข้อมูลในตาราง 3.1) จะมีชั้นดินที่แปรเปลี่ยนหลายลักษณะคือ ชั้นดินเหนียวแข็ง ชั้นดินปนทราย และชั้นทราย เป็นเหตุให้ค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแตกต่างกันตามสภาพดินที่ปลายเสาเข็มตั้งอยู่ กล่าวคือ เสาเข็มที่มีขนาดและความยาวเท่ากัน อาจมีค่าน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันได้ อีกทั้งข้อมูลที่รวบรวมขึ้นระดับปลายเสาเข็ม

อยู่ในระดับที่แตกต่างกัน จำเป็นที่จะต้องกำจัดตัวแปรที่เป็นความยาวเสาเข็มออก เพื่อผลของการวิจัย ดังนั้น ในการวิจัยนี้จะถือว่าเสาเข็มตอกที่มีความยาวเท่ากันนั่นคือ ค่าน้ำหนักบรรทุกจะขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ ขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม

4.1.1 น้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็ม

จากข้อมูลน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่ได้รวบรวมไว้ในการวิจัยนี้ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งมีทั้งสิ้น 78 ข้อมูล โดยเป็นข้อมูลของเสาเข็มที่มีความยาวตั้งแต่ 18.0 เมตร จนถึง 28.0 เมตร ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยความยาวเสาเข็มของกลุ่มข้อมูลนี้ได้เป็น 23.0 เมตร ดังนั้นในการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มหน้าตัดต่าง ๆ จะใช้ค่าความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 23.0 เมตร เป็นเกณฑ์ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐาน และข้อจำกัดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 วิธีการปรับค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีความยาวแตกต่างกันให้เป็นค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ความยาว 23.0 เมตร จะใช้สมการถดถอยแบบเส้นตรงดังนี้ คือ

$$Y = cX$$

โดยที่ Y คือ น้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็ม

X คือ ความยาวของเสาเข็ม

c คือ ค่าคงที่ $= \dfrac{\sum_{i=1}^{n} X_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}$

น้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นน้ำหนักบรรทุกวิบัติที่ได้จากการประมาณโดยวิธี Mazurkiewicz (1972) และทำการปรับแก้ตามสมการที่ (3.2) แล้วดังแสดงในช่อง น.น. 3 ของตารางที่ 3.1 รายละเอียดในการวิเคราะห์ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ง. ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

เสาเข็มหน้าตัดไอ (I)

ขนาด 0.22 x 0.22 เมตร $Y = 3.36 X$

ขนาด 0.26 x 0.26 เมตร $Y = 3.78 X$

ขนาด 0.30 x 0.30 เมตร $Y = 4.33 X$

ขนาด 0.35 x 0.35 เมตร $Y = 6.02 X$

ขนาด 0.40 x 0.40 เมตร $Y = 6.40 X$

เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน

ขนาด 0.26 x 0.26 เมตร $Y = 3.45 X$

ขนาด 0.30 x 0.30 เมตร $Y = 5.32 X$

ขนาด 0.35 x 0.35 เมตร $Y = 6.40 X$

ขนาด 0.40 x 0.40 เมตร $Y = 7.44 X$

เสาเข็มหน้าตัดกลมกลวง

ขนาด Ø 0.25 เมตร $Y = 3.20 X$

ขนาด Ø 0.30 เมตร $Y = 4.60 X$

ขนาด Ø 0.35 เมตร $Y = 5.89 X$

ขนาด Ø 0.40 เมตร $Y = 6.08 X$

ขนาด Ø 0.45 เมตร $Y = 8.84 X$

ขนาด Ø 0.60 เมตร $Y = 12.60 X$

การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มที่มีความยาวเฉลี่ย 23.0 เมตร โดยใช้สมการถดถอยแบบเส้นตรงผ่านจุดศูนย์ สำหรับเสาเข็มรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ จะให้ค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็นเล็กน้อย สำหรับข้อมูลเสาเข็มที่มีความยาวน้อยกว่า 23.0 เมตร และในทางกลับกันสำหรับข้อมูลเสาเข็มที่มีความยาวมากกว่า 23.0 เมตร ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติที่วิเคราะห์ได้จะมากกว่าที่ควรจะเป็นเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มขนาด และรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ที่มีความยาวเฉลี่ย 23.0 เมตร ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มเฉลี่ยที่ความยาว 23.0 เมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	น้ำหนักบรรทุกวิบัติ (ตัน)
I 0.22 X 0.22	77
I 0.26 X 0.26	87
I 0.30 X 0.30	99
I 0.35 X 0.35	138
I 0.40 X 0.40	147
□ 0.26 X 0.26	79
□ 0.30 X 0.30	122
□ 0.35 X 0.35	147
□ 0.40 X 0.40	171
● Ø 0.25	73
● Ø 0.30	106
● Ø 0.35	135
● Ø 0.40	140
● Ø 0.45	203
● Ø 0.60	290

หมายเหตุ รายละเอียดของการวิเคราะห์แสดงอยู่ในภาคผนวก ง.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพื่อให้ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติที่ วิเคราะห์ได้สำหรับที่จะใช้ในการวิจัยตามที่แสดงไว้ ในตารางที่ 4.1 สอดคล้องกับสมมติฐานที่กำหนดขึ้น และ เพื่อ เป็นการ เปรียบ เทียบหาระดับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกวิบัติกับขนาดหน้าตัด (เส้นผ่าศูนย์กลาง) ของ เสา เข็ม จึงทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยแบบ เส้นตรง สำหรับ เสา เข็มรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ผลปรากฏว่า

ก. เสา เข็มหน้าตัดรูป โอ (I)

$$Pu = 433d - 23 \qquad (4.1)$$

$$R^2 = 0.964$$

ข. เสา เข็มหน้าตัดสี่ เหลี่ยมตัน (□)

$$Pu = 638d - 79 \qquad (4.2)$$

$$R^2 = 0.952$$

ค. เสา เข็มหน้าตัดกลมกลวง (⊙)

$$Pu = 588d - 74 \qquad (4.3)$$

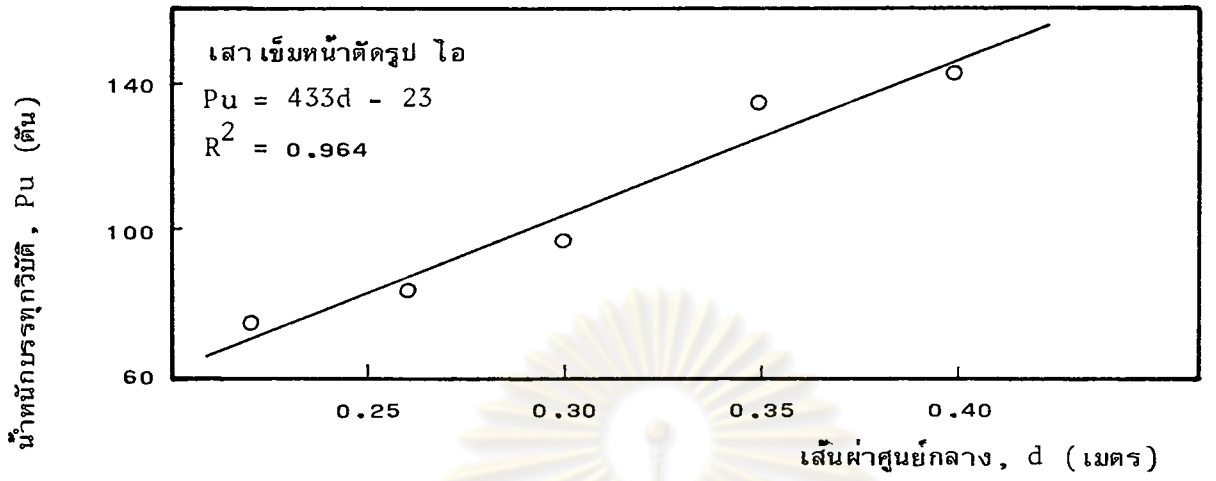
$$R^2 = 0.980$$

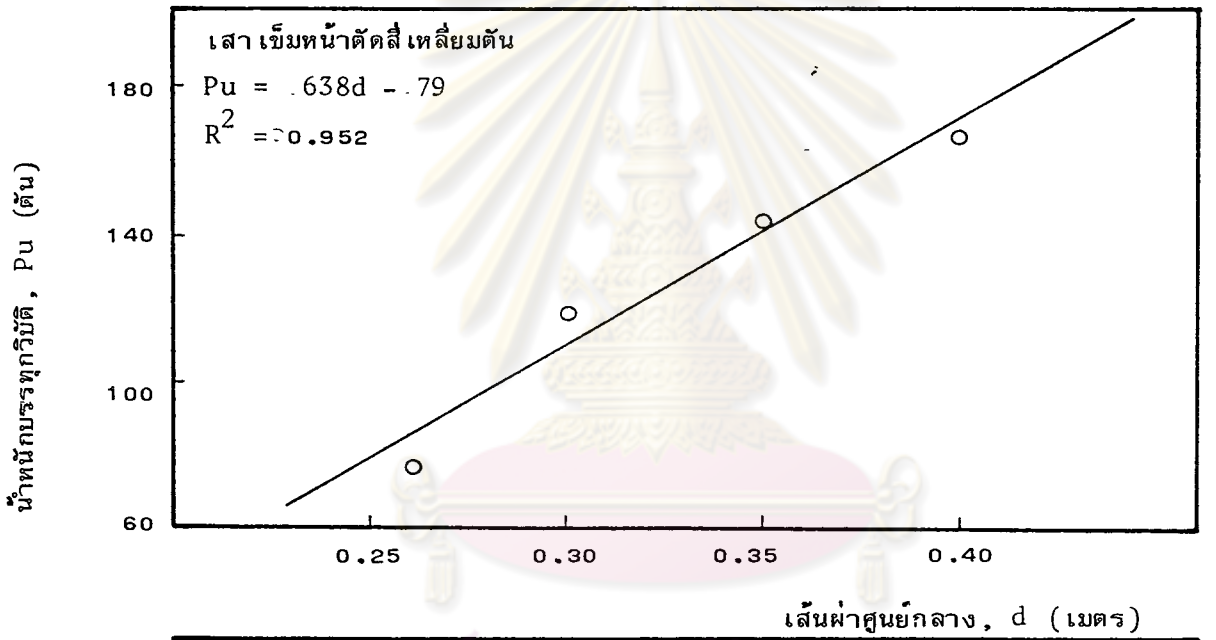
เมื่อ Pu คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติ (ตัน)

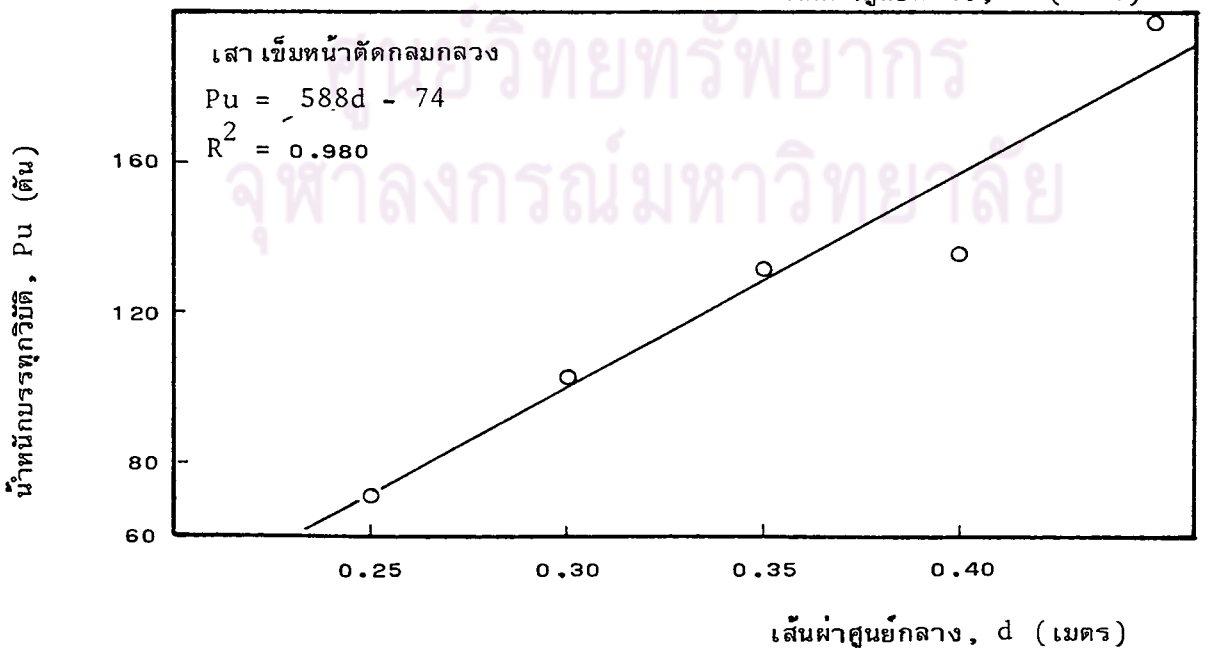
d คือ ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง เสา เข็ม (เมตร)

ค่า R^2 ที่ได้ มีค่ามากกว่า 95% สำหรับ เสา เข็มหน้าตัดทั้ง 3 แบบ ซึ่งแสดงว่า ความยาว เส้นผ่าศูนย์กลางและน้ำหนักบรรทุกวิบัติของ เสา เข็มมีความสัมพันธ์ในแบบ เส้นตรง เป็นอย่างดี ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติที่จะใช้ในการวิจัยต่อไปจะใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกตามสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) เป็นสำคัญ ค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติที่คำนวณตามสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย







รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นผ่าศูนย์กลางกับน้ำหนักบรรทุกวิบัติของ เสา เข็ม หน้าตัดรูปไอ สี่เหลี่ยมตัน และกลมกลวง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 ราคาเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

ราคาเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจะประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ คือ คอนกรีต ลวดเหล็กอัดแรง เหล็กปลอก เหล็กเสริมพิเศษบริเวณหัวและปลายเสาเข็ม ค่าจ้างแรงงาน ค่าแบบหล่อเสาเข็มรวมทั้งอายุการใช้งานของแบบหล่อ ค่าขนส่ง ค่าตอกเสาเข็ม ค่าเครื่องจักร ตลอดถึงค่าเงินลงทุนและการปรับปรุงโรงงาน สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเสาเข็มของแต่ละโรงงานแตกต่างกัน ดังนั้น การกำหนดราคามาตรฐานของเสาเข็มรูปร่างหน้าตัดและขนาดต่าง ๆ ที่จะใช้ในการวิจัย ได้นำข้อมูลราคาขายเสาเข็มรวมค่าตอกตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 มาสร้างความสัมพันธ์กับขนาดหน้าตัด (เส้นผ่าศูนย์กลาง) ของเสาเข็ม ตามรูปที่ 4.2 ซึ่งจะได้ว่า

ก. เสาเข็มหน้าตัดรูป ไอ

$$C_p = 30.21d - 3.97 \qquad (4.4)$$

$$R^2 = 0.960$$

ข. เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน

$$C_p = 43.42d - 5.70 \qquad (4.5)$$

$$R^2 = 0.979$$

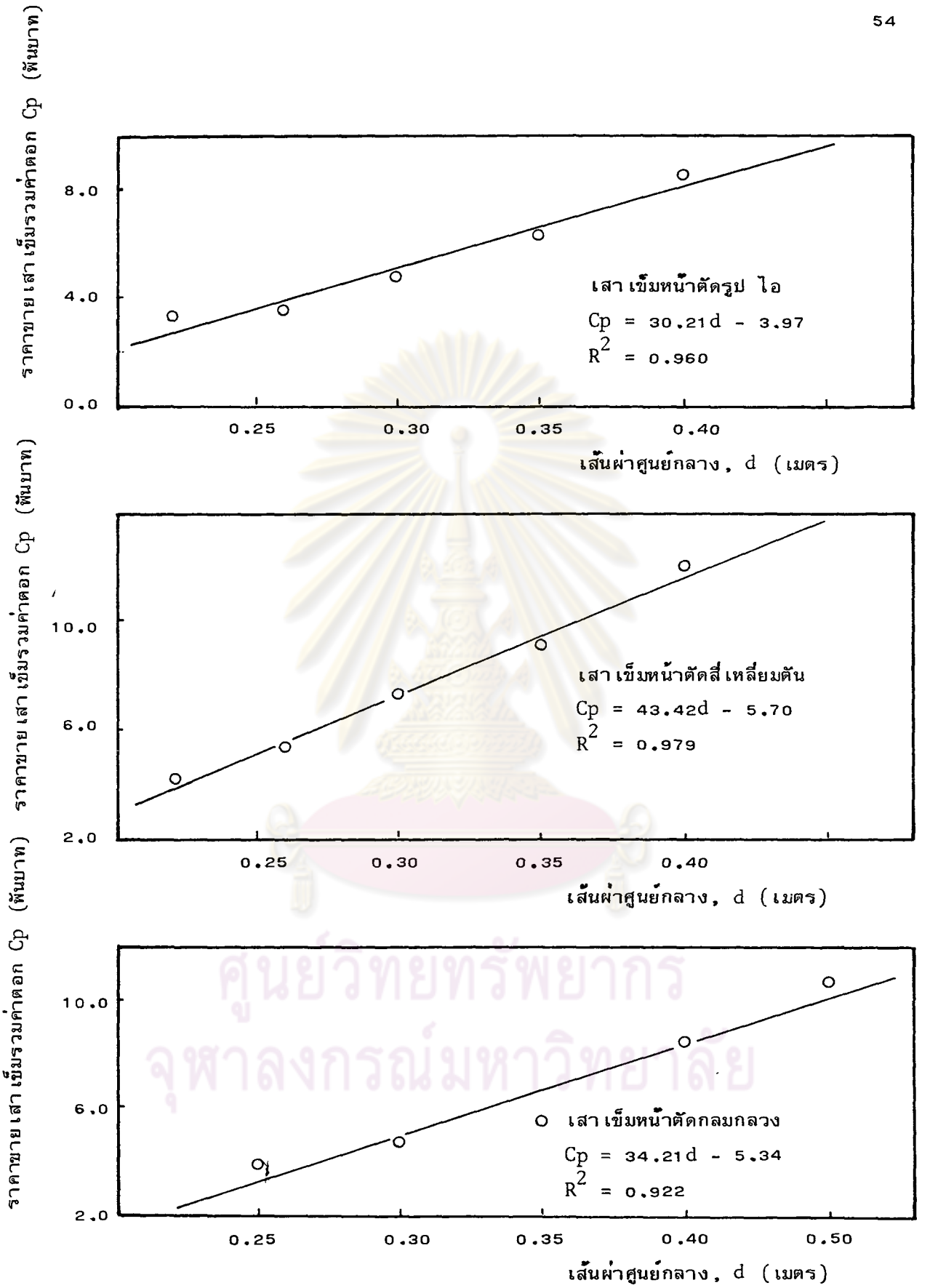
ค. เสาเข็มหน้าตัดกลมกลวง

$$C_p = 34.21d - 5.34 \qquad (4.6)$$

$$R^2 = 0.922$$

เมื่อ C_p คือ ราคาเฉลี่ยของเสาเข็มรวมค่าตอก (บาท)

ค่า R^2 ที่ได้มีค่ามากกว่า 95% ยกเว้นเสาเข็มหน้าตัดกลมกลวงซึ่งให้ค่า R^2 ต่ำกว่า 95% เล็กน้อย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ราคาเสาเข็มและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มมีความสัมพันธ์ในแบบเส้นตรงเป็นอย่างดี ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับราคาเสาเข็มในการวิจัยนี้จะใช้ราคาตามสมการที่ (4.4) ถึง (4.6) ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาว เส้นผ่าศูนย์กลาง กับ ราคาขาย เสา เข็มรวม ค่าตอก ของ เสา เข็มหน้าตัดรูปไอ สี่เหลี่ยมตัน และกลมกลวง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกวิบัติ (P_u) และราคาเสาเข็ม (C_p)ที่ได้จากสมการ (4.1) ถึง (4.6)

ขนาด (เมตร)	P_u (ตัน)	C_p (พันบาท)	$C_p : P_u$ (บาท/ตัน)	อัตราการเพิ่มขึ้นของราคาและน้ำหนักบรรทุกวิบัติ เมื่อขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้น		
				P'_u	C'_p	$C'_p : P'_u$
I 0.22 x 0.22	72	2.67	37	1.00	1.00	1.00
I 0.26 x 0.26	89	3.88	43	1.24	1.45	1.16
I 0.30 x 0.30	107	5.09	47	1.49	1.91	1.27
I 0.35 x 0.35	128	6.60	51	1.77	2.47	1.38
I 0.40 x 0.40	150	8.11	54	2.08	3.04	1.46
□ 0.26 x 0.26	87	5.59	64	1.00	1.00	1.00
□ 0.30 x 0.30	112	7.33	65	1.29	1.31	1.02
□ 0.35 x 0.35	144	9.50	66	1.65	1.70	1.03
□ 0.40 x 0.40	176	11.67	66	2.0	2.09	1.03
● Ø 0.25	73	3.21	44	1.00	1.00	1.00
● Ø 0.30	102	4.92	48	1.39	1.53	1.09
● Ø 0.35	132	6.63	50	1.81	2.06	1.14
● Ø 0.40	161	8.34	52	2.21	2.60	1.18
● Ø 0.45	190	10.05	53	2.60	3.13	1.20

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกวิบัติของ เสา เข็ม

จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์จะ เป็นการ เปรียบ เทียบขนาด และรูปร่างของหน้าตัด โดยอาศัยราคาและน้ำหนักบรรทุกวิบัติของ เสา เข็มที่มีความยาว เท่ากัน เป็นตัว เปรียบ เทียบ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 ประกอบด้วย

ก. น้ำหนักบรรทุกวิบัติของ เสา เข็ม (P_u)

ข. ราคาขาย เสา เข็มรวมค่าตอก (C_p)

ค. ราคา เสา เข็มต่อตันของน้ำหนักบรรทุก ($C_p : P_u$)

ง. อัตราการ เพิ่มขึ้นของค่า P_u และ C_p ของ เสา เข็มหน้าตัดขนาดต่าง ๆ เมื่อ เทียบกับขนาด เล็กสุดของหน้าตัดนั้น ๆ ตามข้อมูลที่รวบรวมได้ โดยแสดงด้วยสัญญลักษณ์ P'_u และ C'_p ซึ่งหมายถึงค่าที่แสดงอัตราการ เพิ่มขึ้นของ P_u และ C_p เมื่อ เสา เข็มมีขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้นยกตัวอย่าง เช่น

เสา เข็ม I 0.22 x 0.22 P_u = 72 ; P'_u = 1

I 0.26 x 0.26 P_u = 89 ; P'_u = $\frac{89}{72}$ = 1.24

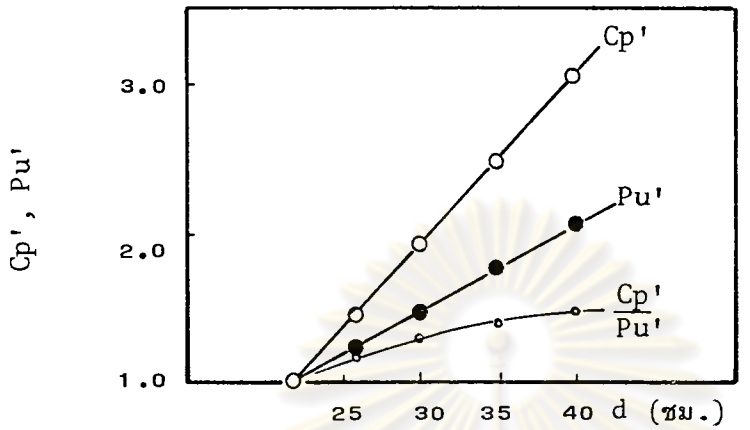
I 0.30 x 0.30 P_u = 107 ; P'_u = $\frac{107}{72}$ = 1.49

การศึกษาจะแยกออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรก เป็นการหาความสัมพันธ์ของ เสา เข็มที่มีหน้าตัดชนิด เดียวกัน และกรณีที่สอง เป็นการหาความสัมพันธ์ของ เสา เข็มที่มีหน้าตัดต่างชนิดกัน

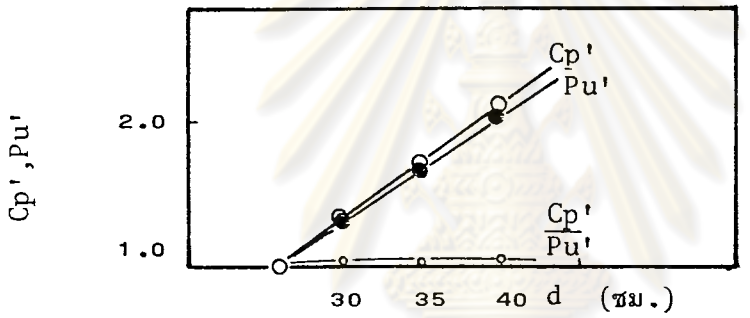
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกวิบัติของ เสา เข็มที่มีหน้าตัดชนิด เดียวกัน

หลักการหาความสัมพันธ์จะพิจารณาว่า เมื่อ เพิ่มขนาดของ เส้นผ่าศูนย์กลางของ เสา เข็มจะมีผลต่อราคาและน้ำหนักบรรทุกวิบัติ เพียงไร วิธีการวิเคราะห์ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง เสา เข็ม (d) กับค่า P'_u ค่า C'_p และ ค่าอัตราส่วน $C'_p : P'_u$ ดังแสดงตามรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่า เมื่อขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของ เสา เข็ม เพิ่มขึ้นอัตราการ เพิ่มขึ้นของราคาจะสูงกว่าอัตราการ เพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกวิบัติ ซึ่งส่งผลให้ราคา เสา เข็มต่อตันของน้ำหนักบรรทุก มีค่า เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3

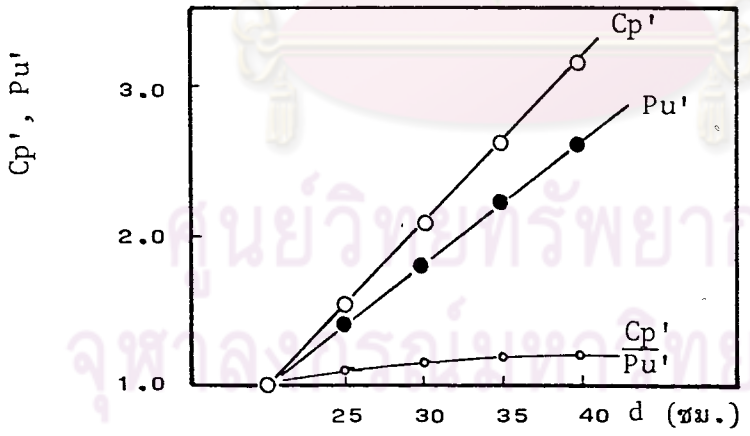
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการ เพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก (P'_u) กับอัตราการ เพิ่มขึ้นของราคา โดยใช้หลักการของสมการถดถอยแบบ เส้นตรง ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังนี้



ก. เสา เข็มหน้าตัดรูป ไอ

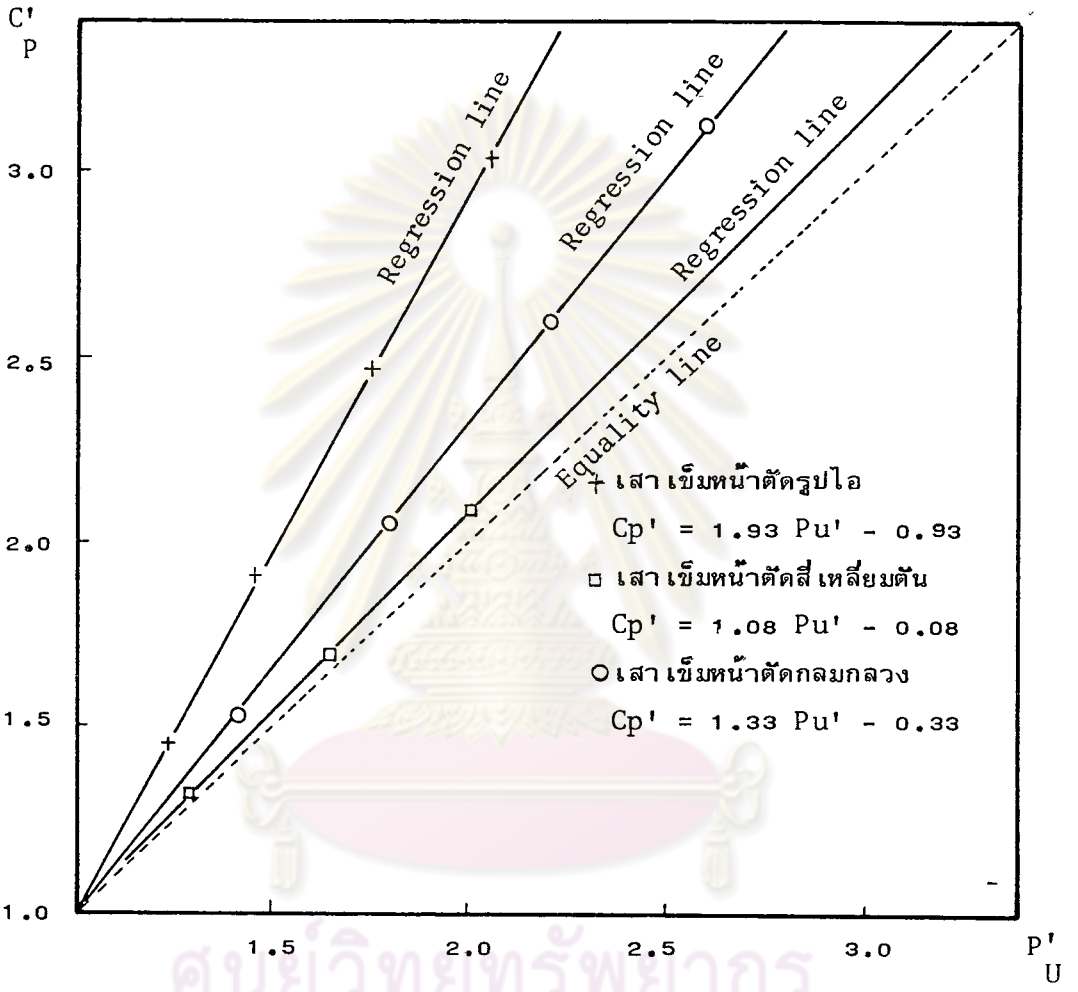


ข. เสา เข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน



ค. เสา เข็มหน้าตัดกลมกลวง

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาว เส้นผ่าศูนย์กลางของ เสา เข็ม, d กับค่า Pu', Cp', และ Cp' : Pu'



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก (Pu') กับอัตราการเพิ่มขึ้นของราคา (Cp')

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสาเข็มหน้าตัดรูป ไอ

$$C'_p = 1.93P'_u - 0.93 \quad \text{---------- (4.7)}$$

เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน

$$C'_p = 1.08P'_u - 0.08 \quad \text{---------- (4.8)}$$

เสาเข็มหน้าตัดกลมกลวง

$$C'_p = 1.33P'_u - 0.33 \quad \text{---------- (4.9)}$$

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของราคาจะสูงกว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกวิบัติ และสามารถสรุปได้ว่าการใช้เสาเข็มที่มีขนาดหน้าตัดเล็กจะมีราคาต่อตันของน้ำหนักบรรทุกต่ำกว่า การใช้เสาเข็มที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้จะมีผลต่อราคาในการเลือกใช้เสาเข็มกลุ่ม ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.3

4.2.2 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มที่มีหน้าตัดต่างกัน</u>

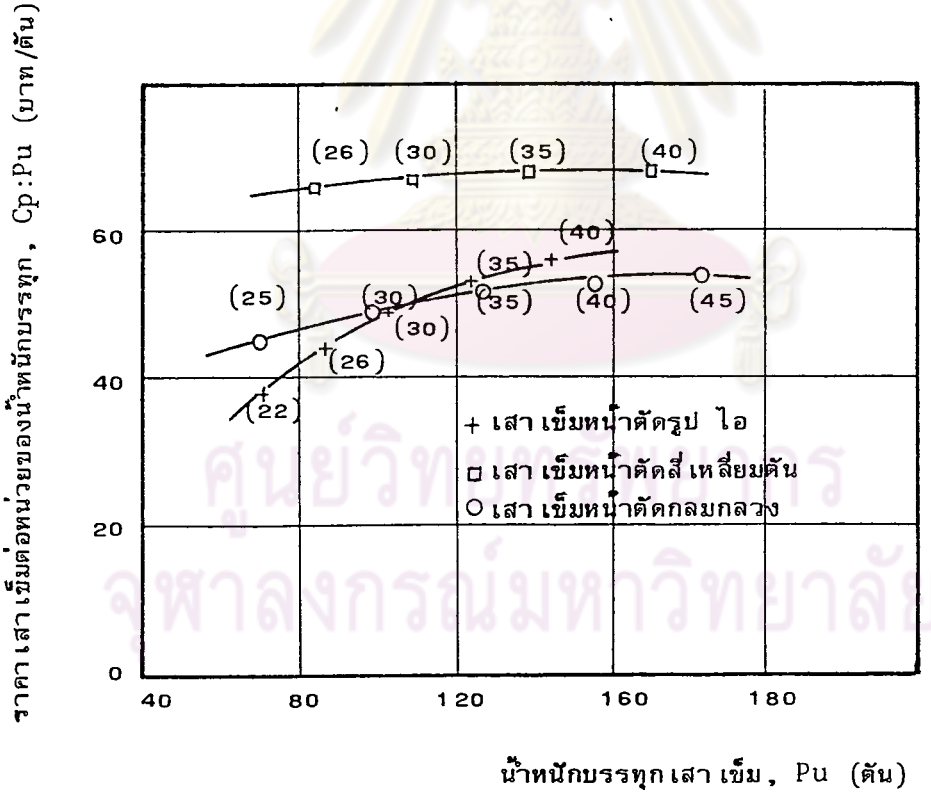
ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบราคากับน้ำหนักบรรทุกวิบัติของเสาเข็มที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างกัน โดยการเปรียบเทียบจะแสดงให้เห็นว่าที่น้ำหนักบรรทุกหนึ่ง ๆ การใช้เสาเข็มที่มีหน้าตัดต่างกัน จะมีราคาแตกต่างกันอย่างไร

ข้อมูลที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกวิบัติ (P_u) ราคาเสาเข็มต่อหน่วยน้ำหนัก ($C_p:P_u$) รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_u กับ $C_p:P_u$ สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูปไอ รูปสี่เหลี่ยมตัน และรูปกลมกลวง ซึ่งพบว่า

ก. ที่น้ำหนักบรรทุกใด ๆ เสาเข็มสี่เหลี่ยมตันจะมีราคาต่อตันของน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าเสาเข็มหน้าตัดรูป ไอ และหน้าตัดกลมกลวง

ข. เมื่อพิจารณาเสาเข็มหน้าตัดรูปไอ เปรียบเทียบกับเสาเข็มหน้าตัดกลมกลวง ที่น้ำหนักบรรทุกวิบัติต่ำกว่า 110 ตัน ซึ่งได้แก่เสาเข็มไอขนาด I 0.22 x 0.22 เมตร I 0.26 x 0.26 เมตร และ I 0.30 x 0.30 เมตร และเสาเข็มกลมกลวงขนาด Ø0.25 เมตร และ Ø 0.30 เมตร จะพบว่าเสาเข็มหน้าตัดไอ มีราคาต่อตันของน้ำหนักบรรทุกที่ต่ำกว่าเสาเข็มกลมกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Ø 0.25 เมตร และØ 0.30 เมตร แต่ที่น้ำหนักบรรทุกมากกว่า 110 ตันขึ้นไป เสาเข็มกลมกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Ø 0.35 เมตรขึ้นไป จะมีราคาต่อตันของน้ำหนักบรรทุกต่ำกว่าเสาเข็มหน้าตัด I 0.35 x 0.35 เมตร และ I 0.40 x 0.40 เมตร

แต่อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงโอกาสที่จะเกิดความเสียหายนอกเหนือจากการวิบัติ เนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในแนวดิ่งเท่านั้น อาทิเช่น ผลของการทรุดตัว ความแน่นอนของสภาพเสาเข็มภายหลังการตอก ตลอดจนความเสียหายที่เกิดขึ้นในขณะขนส่ง หรือขณะตอกซึ่งมีผลเนื่องมาจากรูปทรงทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันโดยที่ค่า Section Modulus มีค่าสูง แรงเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำ ดังนั้น ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มที่เท่ากัน เสาเข็มสี่เหลี่ยมตันจะมีค่า Section Modulus สูงที่สุด



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม (Pu) กับ ราคาเสาเข็มต่อหน่วยของน้ำหนักบรรทุก, (Cp:Pu)

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกของฐานราก เสาเข็มกลุ่ม

วัตถุประสงค์ของการวิจัยในหัวข้อนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบราคากับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากที่ใช้เสาเข็มจำนวนมากกว่า 1 ต้น โดยกำหนดรูปแบบของฐานรากเป็น Isolated pile fundation การศึกษาจะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกจะเป็นการกำหนดขนาดและประมาณราคาฐานรากที่ใช้เสาเข็มจำนวนตั้งแต่ 2 ต้น จนถึง 9 ต้น ในส่วนที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างราคากับน้ำหนักบรรทุกของฐานราก เสาเข็มกลุ่ม

ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังกล่าวจะไม่คำนึงถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ทางด้านวิศวกรรม เช่น ผลของการทรุดตัว ความแน่นอนของสภาพเสาเข็มภายหลังการตอกเป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาเลือกใช้เสาเข็มรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะไม่อาจประเมินผลขององค์ประกอบดังกล่าวออกมาในลักษณะของราคาหรือน้ำหนักบรรทุก ซึ่งกำหนดไว้เป็นตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยนี้

4.3.1 การกำหนดขนาดของฐานราก เสาเข็ม เพื่อใช้ประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกและราคา

ในการศึกษาจะเลือกพิจารณาเสาเข็มตั้งแต่ 2 ต้นจนถึง 9 ต้น โดยใช้ข้อกำหนดสำหรับมิติต่าง ๆ ดังนี้คือ

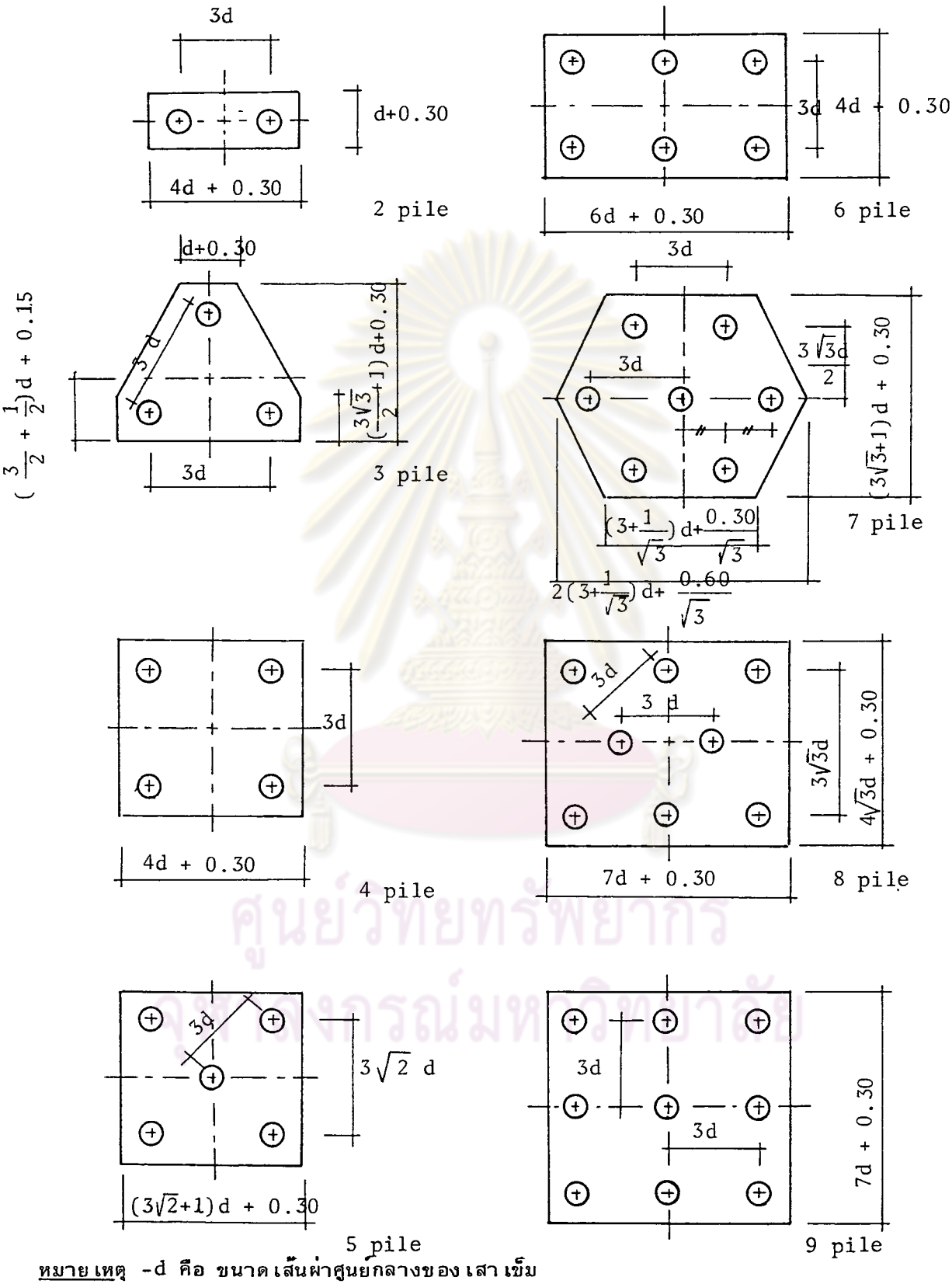
ก. การจัดเรียงเสาเข็ม กำหนดให้เสาเข็มระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเท่ากับ 3d (d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม) (Sowers et al, 1961)

ข. ขนาดหน้าตัดของหมวกเสาเข็ม (Pile Cap) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ซึ่งได้กำหนดตามวิธีการของ R.T. Whittle และ D. Beattie (1972)

ค. ความหนาของหมวกเสาเข็มจะกำหนดตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งแนะนำโดย R.T. Whittleและ D. Beattie (1972) ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดความหนาของหมวกเสาเข็ม (Pile Cap Depth)

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (เมตร)	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
ความหนาของหมวกเสาเข็ม (เมตร)	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หมายเหตุ -d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม

- มิติที่ระบุเป็นเมตร

รูปที่ 4.6 ลักษณะการจัดเรียงของเสาเข็มกลุ่ม และขนาดหน้าตัดของหมวกเสาเข็ม (Pile Cap)

(after R.T. Whittle, and D. Beattie (1972))

ง. ส่วนปลอดภัย (Safety Factor) กำหนดใช้ค่า F.S. = 2.5

จ. ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มในที่นี้จะเลือกใช้วิธีการของ Feld (1943) ทั้งนี้เพราะค่าที่ได้จากวิธีการนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.70 ถึง 0.85 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่แนะนำโดย de Mello (1969)...

ค่าประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มที่มีลักษณะการจัดเรียงตามรูปที่ 4.6 โดยวิธีการของ Feld ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม (Feld 1943)

จำนวนเสาเข็ม (ต้น)	2	3	4	5	6	7	8	9
ประสิทธิภาพ%	94	87	81	80	77	78	75	72

ผลการหาค่าน้ำหนักบรรทุก และราคาของฐานรากเสาเข็มกลุ่มได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยที่

Pg คือ น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม (F.S = 2.5)

Cf คือ ราคาของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม (เสาเข็ม + หมวกเสาเข็ม)

และ n คือ จำนวนเสาเข็ม

ส่วนรายละเอียดการคำนวณสำหรับเสาเข็มกลุ่มต่าง ๆ ตั้งแต่ 2 ต้นจนถึง 9 ต้น โดยใช้เสาเข็มรูปร่างหน้าตัดและขนาดต่าง ๆ กัน ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก จ.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักบรรทุกปลอดภัย และ ราคาฐานรากเสาเข็มกลุ่ม

ขนาด	n = 2			n = 3			n = 4			n = 5			n = 6			n = 7			n = 8			n = 9		
	Pg ตัน	Cf พันบาท	$\frac{Cf}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$	Pg ตัน	C_f พันบาท	$\frac{C_f}{Pg}$ $\frac{บาท}{ตัน}$
I 0.26 X 0.26	66	8.88	134	91	13.72	151	113	18.25	162	140	22.55	161	16 2	27.53	170	191	31.86	167	210	37.81	180	227	41.85	184
I 0.30 X 0.30	79	11.76	149	110	18.27	166	136	24.30	179	168	30.21	180	194	36.84	190	229	42.72	186	252	50.80	202	272	55.89	205
I 0.35 X 0.35	94	15.41	164	130	24.08	185	162	32.18	199	200	39.84	199	231	48.95	212	273	56.53	207	300	67.65	226	324	74.52	230
I 0.40 X 0.40	109	19.21	176	151	30.33	201	188	40.56	216	232	50.47	218	268	61.91	231	317	71.78	226	348	86.50	248	376	94.61	252
□ 0.26 X 0.26	64	12.30	192	89	18.85	212	110	25.09	228	136	31.10	229	157	37.79	241	186	43.83	236	204	51.49	252	220	57.24	260
□ 0.30 X 0.30	83	16.24	196	115	24.99	217	142	33.26	234	176	41.41	235	203	50.28	248	240	58.40	243	264	68.72	260	285	76.05	267
□ 0.35 X 0.35	105	21.21	202	146	32.78	224	181	43.78	242	224	54.34	242	259	66.35	256	306	46.83	251	336	90.85	270	363	100.62	277
□ 0.40 X 0.40	128	28.33	206	177	41.01	232	220	54.80	249	272	68.27	251	314	83.27	265	371	96.70	261	408	144.98	282	441	126.55	287
● Ø 0.25	53	7.49	141	73	11.59	159	91	15.38	169	112	18.99	170	129	23.26	180	153	26.82	175	168	31.98	190	181	35.19	194
● Ø 0.30	75	11.42	152	104	17.76	171	130	23.62	182	160	29.36	184	185	35.82	194	218	41.53	190	240	49.44	206	259	54.36	210
● Ø 0.35	96	15.47	161	133	24.17	182	165	32.30	196	204	39.99	196	236	49.13	208	278	56.74	204	306	67.89	222	330	74.79	227
● Ø 0.40	118	19.67	167	164	31.02	189	204	41.48	203	252	51.62	205	291	63.29	217	334	73.39	213	378	88.34	234	408	96.68	237
● Ø 0.45	139	24.04	173	193	38.09	197	240	51.22	213	296	63.47	214	342	78.41	229	404	91.14	226	444	109.72	247	480	120.20	250

Pg คือ น้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม โดยไม่คำนึงถึงน้ำหนักของหมวกเสาเข็ม

C_f คือ ราคาของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม (เสาเข็ม + หมวกเสาเข็ม)

n_1 คือ จำนวนเสาเข็ม

4.3.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและราคาของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม

วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือกขนาด และจำนวนของเสาเข็มในการออกแบบฐานรากเสาเข็มกลุ่มที่รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยประมาณ 50 ถึง 500 ตัน ได้อย่างเหมาะสมและประหยัด โดยกำหนดความยาวเฉลี่ยของเสาเข็มเท่ากับ 23.00 เมตร

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏอยู่ในตารางที่ 4.5 ประกอบด้วยค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม (P_g) ราคาฐานรากเสาเข็มกลุ่ม (C_f) และราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็ม ($C_f : P_g$) ในการหาความสัมพันธ์จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ การเลือกจำนวนเสาเข็ม กับ การเลือกขนาดของเสาเข็ม

4.3.2.1 การเลือกจำนวนเสาเข็มที่เหมาะสม จากค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยและราคาของฐานรากเสาเข็มกลุ่มตามตารางที่ 4.5 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และราคาโดยใช้หลักการวิเคราะห์ การถดถอยแบบเส้นตรง ซึ่งพบว่า สมการถดถอยที่ได้สำหรับเสาเข็มแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ให้ค่า R^2 มากกว่า 0.90

ตารางที่ 4.6 สมการถดถอยแบบเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Pg) กับราคา (Cf) ของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม

จำนวนเสาเข็ม	สมการถดถอย	คุณภาพของเส้นถดถอย
2	Cf = 0.21 Pg - 3.42	0.903
3	Cf = 0.24 Pg - 5.81	0.916
4	Cf = 0.26 Pg - 8.08	0.916
5	Cf = 0.26 Pg - 9.78	0.918
6	Cf = 0.28 Pg - 13.00	0.923
7	Cf = 0.28 Pg - 15.38	0.924
8	Cf = 0.30 Pg - 19.60	0.934
9	Cf = 0.31 Pg - 20.51	0.928

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

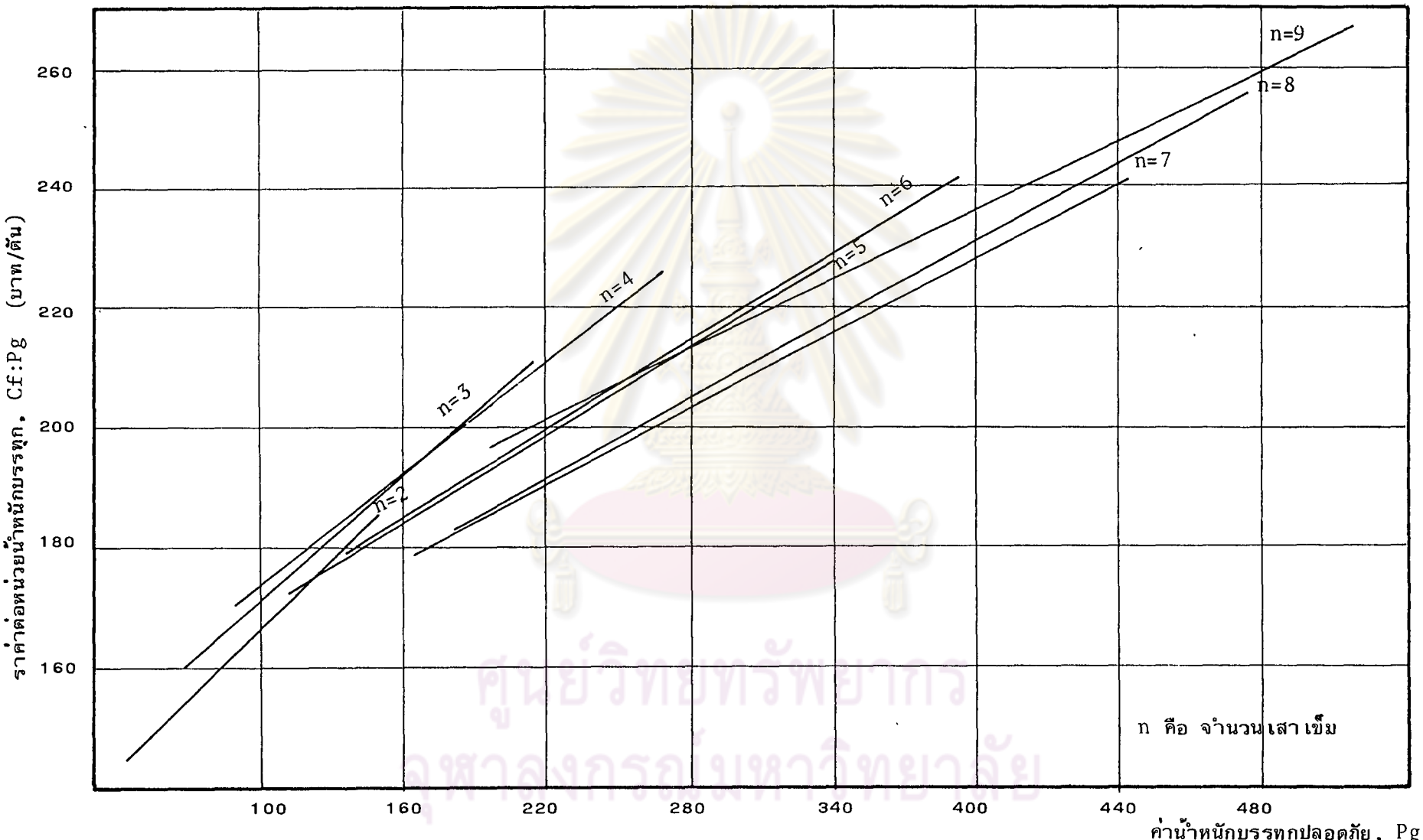
เมื่อแทนค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยสูงสุดและต่ำสุดของ เสา เข็ม ในกลุ่มที่ใช้เสา เข็มจำนวน เท่ากัน (ตารางที่ 4.5) ลงในสมการถดถอยของฐานราก เสา เข็มกลุ่มที่วิ เคราะห์ได้ตามตารางที่ 4.6 เพื่อหาค่าราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและต่ำสุดของ เสา เข็มกลุ่มต่าง ๆ ที่ใช้ เสา เข็มจำนวน เท่ากัน ผลการหาค่าราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและต่ำสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและต่ำสุดของฐานราก เสา เข็มกลุ่ม

จำนวน เสา เข็ม (ต้น)	ค่าต่ำสุด			ค่าสูงสุด		
	Pg (ตัน)	Cf (พันบาท)	Cf:Pg (บาท/ตัน)	Pg (ตัน)	Cf (พันบาท)	Cf:Pg (บาท/ตัน)
2	53	7.71	145	139	25.77	185
3	73	11.71	160	193	40.51	210
4	91	15.58	171	240	54.32	226
5	112	19.34	173	296	67.18	227
6	129	23.12	179	342	82.76	242
7	153	27.46	179	404	97.74	242
8	168	30.80	183	444	113.60	256
9	181	35.61	197	480	128.29	267

เมื่อนำราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก (Cf:Pg) สูงสุดและต่ำสุดของ เสา เข็มกลุ่ม เปรียบ เทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Pg) จะได้ความสัมพันธ์ที่แสดงความแตกต่างกันในด้านราคาของฐานราก เสา เข็มกลุ่มที่น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก ของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

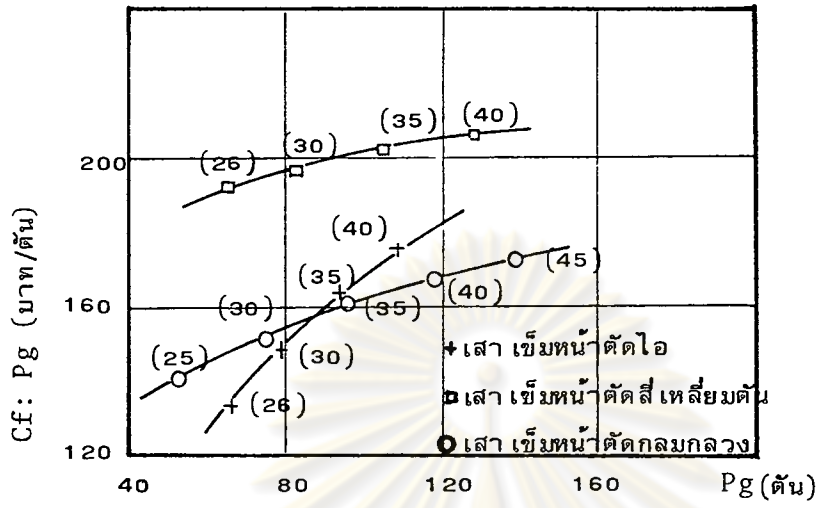
4.3.2.2 การเลือกขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม

การวิเคราะห์ในส่วนนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Pg) กับราคาต่อหน่วนน้ำหนักบรรทุก (Cf:Pg) ของเสาเข็มหน้าตัดต่าง ๆ เพื่อใช้พิจารณาเลือกขนาดและรูปร่างหน้าตัดของเสาเข็มที่จะให้ราคาต่อน้ำหนักบรรทุกต่ำสุด โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.5 แยกหาความสัมพันธ์ตามจำนวนเสาเข็มที่ใช้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ถึง 4.15 ซึ่งพบว่า เสาเข็มหน้าตัดไอจะมีราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกต่ำที่สุด แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง เสาเข็มหน้าตัดกลมกลวงจะมีราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกต่ำสุด สำหรับเสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมตันจะมีราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามมิได้หมายความว่าเสาเข็มสี่เหลี่ยมตันจะไม่เหมาะสมสำหรับการใช้ เพราะในการวิเคราะห์ไม่ได้รวมสาเหตุอื่นที่อาจมีผลต่อเสาเข็มซนิดตอกได้ อาทิเช่น การแตกหักเนื่องจากการตอก การขนส่งและแรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มขณะรับน้ำหนักบรรทุกเป็นต้น ผลที่ได้นี้สามารถใช้ร่วมกับรูปที่ 4.7 เป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาออกแบบฐานราก ยกตัวอย่างเช่น

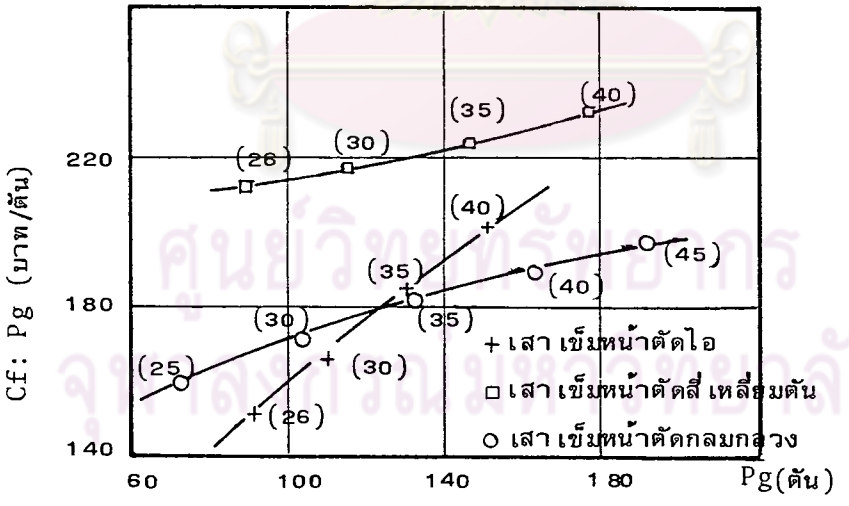
ในกรณีที่ต้องการออกแบบให้ฐานรากในบริเวณกรุงเทพฯ ที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 140 ตัน (F.S. = 2.5) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 พบว่าที่น้ำหนักบรรทุก 140 ตัน การใช้เสาเข็มจำนวน 5 ต้น จะให้ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกต่ำสุด เมื่อเลือกใช้เสาเข็มจำนวน 5 ต้น แล้วก็พิจารณาในรูปที่ 4.11 พบว่าถ้าใช้เสาเข็มหน้าตัด I 0.26 X 0.26 จะให้ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มต่ำที่สุด คือ 160 บาทต่อน้ำหนักบรรทุก 1 ตัน

เป็นที่น่าสังเกตุว่า การพิจารณาเลือกใช้เสาเข็มในรูปที่ 4.8 ถึง 4.15 นั้น ราคาของเสาเข็มที่น้ำหนักบรรทุกหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดที่มีการผลิตจำหน่ายในท้องตลาดด้วย

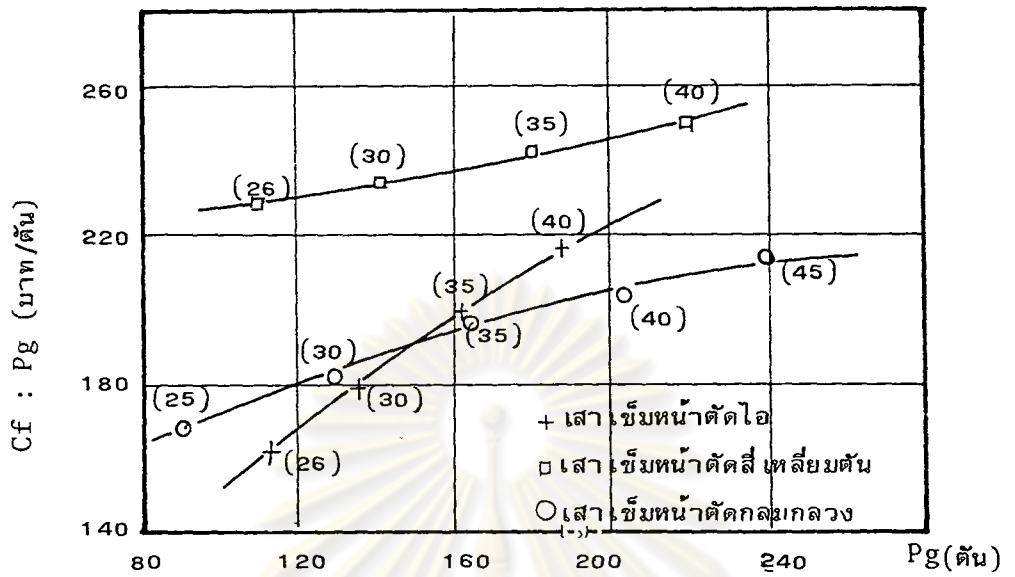
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



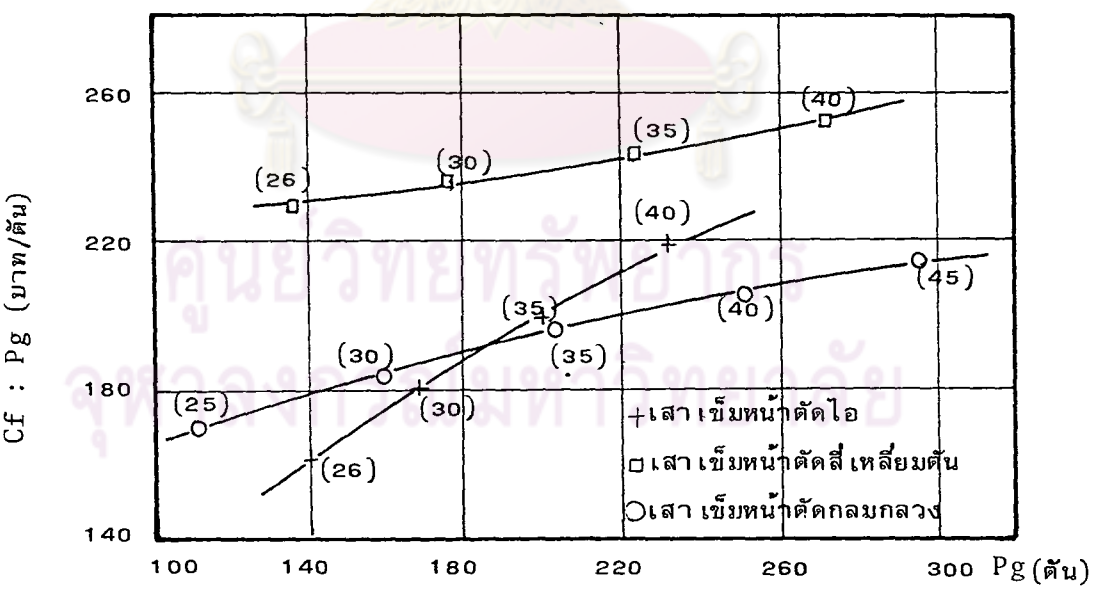
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วย น้ำหนักบรรทุก ของฐานราก เสา เข็มจำนวน 2 ต้น



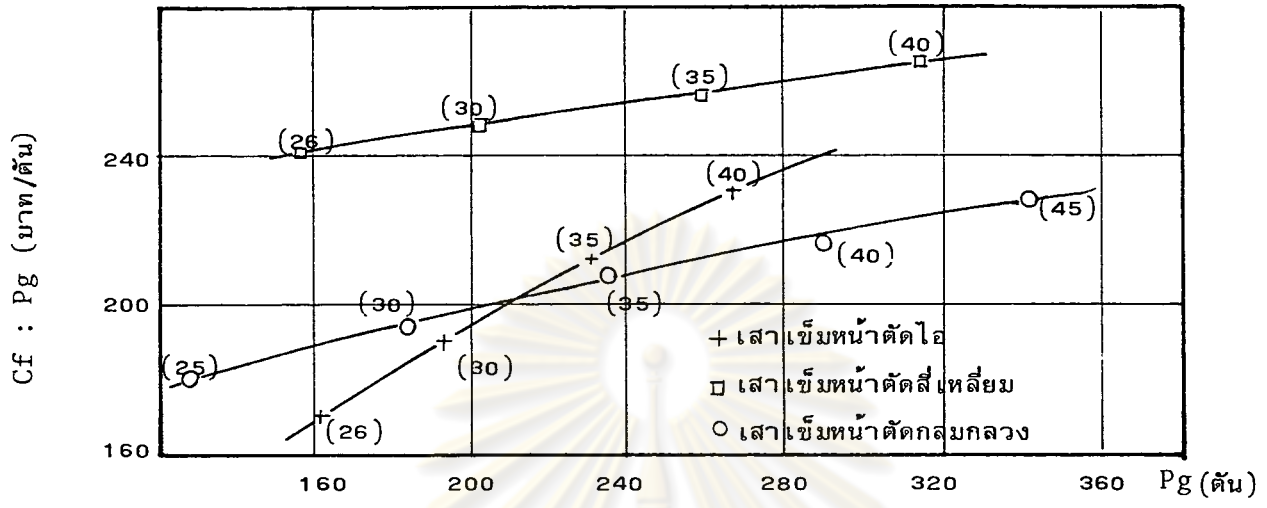
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วย น้ำหนักบรรทุก ของฐานราก เสา เข็มจำนวน 3 ต้น



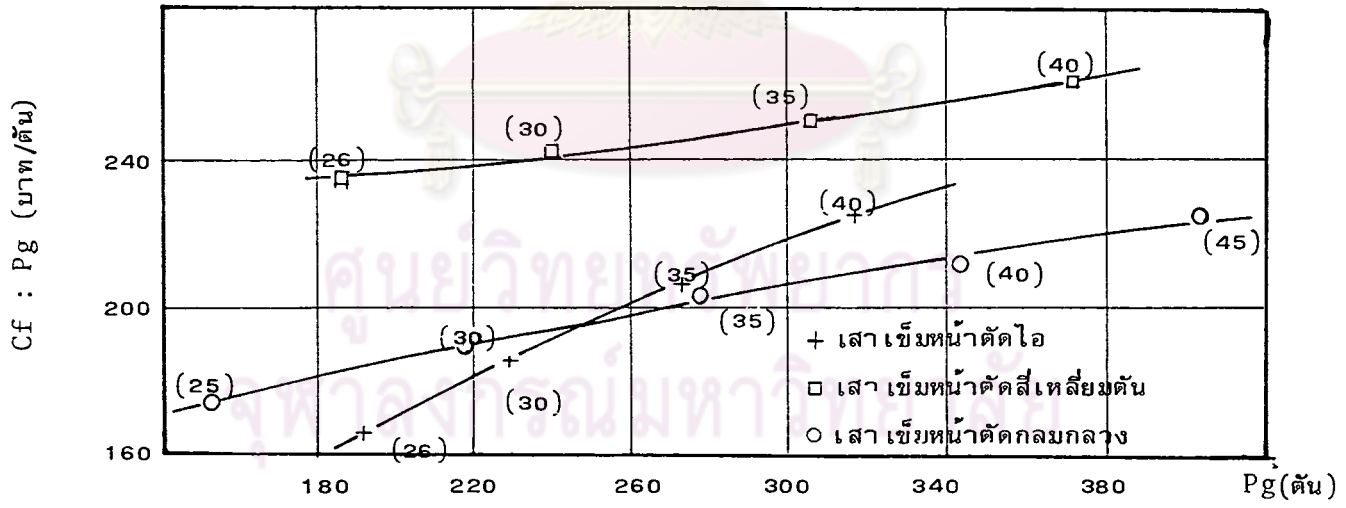
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มจำนวน 4 ต้น



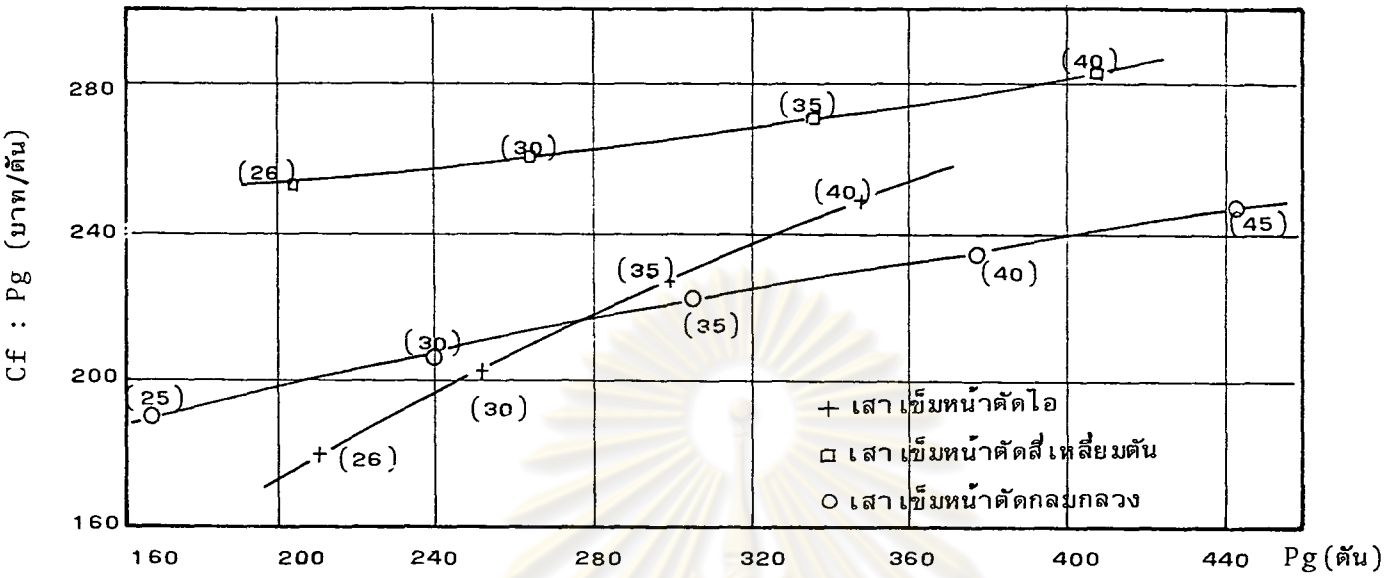
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มจำนวน 5 ต้น



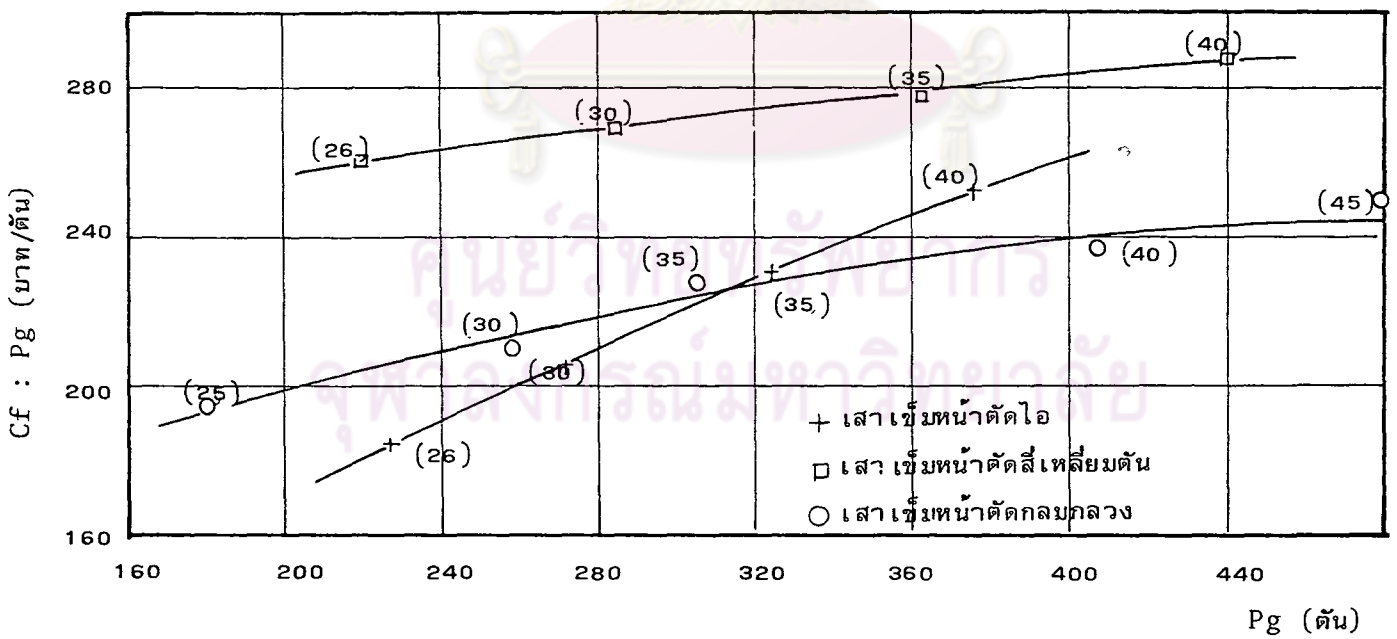
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก ของฐานรากเสาเข็มจำนวน 6 ต้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก ของฐานรากเสาเข็มจำนวน 7 ต้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกของฐานราก เสาเข็มจำนวน 8 ต้น



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Pg) กับ ราคาต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุกของฐานราก เสาเข็มจำนวน 9 ต้น