



REFERENCE

1. ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete",  
ACI Journal, July-August 1984, pp. 364-411.
2. Collier, J.L., "Variations of Compressive Strength of Concrete within  
the Water-Cement Ratio Low", American Society for Testing and  
Materials, Proceedings Vol. 30, Part 2, 1930.
3. Gaynor, R., "Tests of Water-Reducing Retarders", National Ready-Mixed  
Concrete Associated Publication, No. 108, Aug. 1962.
4. Tognon, G. Ursella, P. and Coppetti, G., "Design and Properties of  
Concrete with Strength Over 1500 kgf/cm<sup>2</sup>", ACI Journal,  
May-June, 1980, pp. 171-176.
5. "High-Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings", Task Force  
Report No. 5, Chicago Committee on High-Rise Buildings,  
Feb. 1977, 63 pp.
6. "Concrete Beats Steel by 29 %", Engineering News-Record, Vol 206,  
May 14, 1981, P. 16.
7. Perenchio, W.F., "An Evaluation of Some of the Factors Involved in  
Proceeding Very High Strength Concrete", Portland Cement  
Association, Bulletin No. RD 014-1973.
8. Saucier, Kenneth L.; Smith, Eugene F., and Tynes, William D.,  
"High-Compressive Strength Concrete: Development of Concrete  
Mixtures", U.S. Air Force Weapon Laboratory RTD-TDR-63-3114  
(February 1964).
9. Klieger, Paul, "Early High-Strength Concrete for Prestressing",  
Portland Cement Association, R & D Bulletin 91 (1958).

10. Gilkey, H.J., "Water-Cement Ratio Versus Strength-Another Look",  
Journal of the American Concrete Institute, ACI, Vol. 54,  
April. 1961, pp. 1287-1312.
11. The Concrete Society, "The Science of Admixtures", Proceedings  
of A Symposium, Nov. 1969.
12. Freedman, S., "High Strength Concrete", Publication No. 15176,  
Portland Cement Association, 1971 (Reprint from Modern  
Concrete, 1970-1971), 19 pp.
13. Thoman, W.H. and Wareen, R., "Ultimate Strength and Modulus of  
Elasticity of High Strength Portland Cement Concrete",  
ACI Journal, Vol. 30, Jan-Feb. 1934, pp. 231-238.
14. Gold Beck, A.T., "Gradation and Charactor of Aggregates As A  
Factor in Workability", ACI Journal, Vol. 24, 1928.
15. Weymouth, L.A.G., "Effects of Particle Interference in Mortars  
and Concretes", Rock Products, Feb., 1933.
16. McCreary, R.K., "Mechanical Packing of Spherical Particles",  
ACI Journal, Vol. 44, Oct. 1961.
17. Walker, S. and Bloem, D., "Effect of Aggregate Size on Properties  
of Concrete", ACI Journal, Vol. 57, Sept. 1960.
18. Cordon, W.A. and Gillespie, H.A., "Variables in Concrete Aggregates  
of Portland Cement Paste which Influence the Strength of  
Concrete", ACI Journal, Vol. 60, Aug. 1963, pp. 1029-1055;  
March 1964, 1981-1998.
19. Mather, K., "High Strength High Density Concrete", ACI Journal,  
Vol. 61, Aug. 1965, pp. 951-962.
20. Morgan, Austin H., "High-Strength Ready-Mixed Concrete", Paper  
Presented to 41st Annual Convention of the National Ready  
Mixed Concrete Association, Jan. 1971, 18 pp.

21. Dodson, V.H.; and Farkas, E., "Delayed Addition of Set Retarding Admixtures of Portland Cement Concrete", ASTM Reprint No. 77, 1964.
22. Gaynor, Richard D., "High-Strength Air-Entrained Concrete", National Ready Mixed Concrete Associate Joint Research Laboratory Publication 17, March 1968.
23. Blick, R.L.; Petersen, C.F. and Michael, W.E., "Proportioning and Controlling High Strength Concrete", Paper for Presentation to ACI Annual Convention, 1972.
24. Yamamoto, Y. and Ohira, K., "On Effective Use of Highly Water-Reducing Admixtures in Concrete", Annual Technical Report, Vol. 30, Cement Association of Japan, 1976.
25. Rixom, M.R., "Chemical Admixtures for Concrete", First Edition, 1978.
26. Rixom, M.R., "Concrete Admixtures; Use and Application", The Cement Admixtures Association, 1977.
27. Hewlett, P.C., "Superplasticizing Admixtures in Concrete", Cement and Concrete Association, June 1978.
28. Perera, K.J.W., "Mechanical Properties of High Strength Concrete", Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, Aug. 1979.
29. Nilson, A.H.; Carrasquillo, R.L.; and Slate, F.O., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads", ACI Journal, May-June 1981, pp. 171-178.
30. สุพรรณ ศิริวัชรินทร์, "การศึกษาคอนกรีตกำลังสูงมาก", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.

31. สกล พจนารถ, " พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก",  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
32. มานิต คิวกุล, " พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก",  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
33. ฐิติ ฉัตรทอง, " ผลของเหล็กเสริมทางขวางต่อพฤติกรรมของ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก  
ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก ที่รับน้ำหนักตามแนวแกน", วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2526.
34. ปรีชา ภาวสุทธีวงศ์, " พฤติกรรมการดัดของคาน ทำด้วยคอนกรีตกำลังอัดสูงมากและเสริม  
ด้วยลวดกำลังดึงสูง", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
35. Bloem, D.L., and Gaynor, R.D. "Effects of Aggregate Properties on  
Strength of Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 60,  
Oct. 1963, pp. 1429-1455.
36. Nedderman, H., "Flexural-Stress Distribution in Very-High Strength  
Concrete", Master's Thesis, The Faculty of the Graduate  
School, The University of Texas at Arlington, 1973.
37. Wang, P.T., Shah, S.P. and Naaman, A.E., "High-Strength Concrete  
in Ultimate Strength Design", Journal of Structure Division,  
ASCE, Vol. 104, ST 11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
38. Leslie, Keith E., Rajagopalan, K.S., and Everade, Noel J., "Flexural  
Behavior of High-Strength Concrete Beams", ACI Journal,  
Proceedings V. 73, Sept. 1976, pp. 517-521.
39. Zia, P., "Review of ACI Code for Design with High-Strength Concrete",  
Concrete International, Aug. 1983, pp. 16-20.

40. Hognestad, E., "What Do We Know About Diagonal Tension and Web Reinforcement in Concrete", Bulletin No. 3, Circular Series No. 64, University of Illinois Engineering Experiment Station, March 1952, 47 P.
41. Mathey, R.G. and Watstein, D., "Shear Strength of Beams Without Web Reinforcement Containing Deformed Bars of Different Yield Strengths", ACI Journal, Proceedings, V. 60, No. 2, Feb. 1963, pp. 183-206.
42. Rajagopalan, K.S., and Ferguson, P.M., "Exploratory Shear Tests Emphasizing Percentage of Longitudinal Steel", ACI Journal, Proceedings, V. 65, No. 8, Aug. 1968, pp. 634-638.
43. Palaskas, M.N., Attiogbe, E.K., and Darwin, D., "Shear Strength of Lightly Reinforced T-Beam", ACI Journal, Proceedings, V. 78, Nov-Dec. 1981, pp. 447-455.
44. Bresler, B., and Scordelis, A.C., "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, Proceedings, V. 60, No. 1, Jan. 1963, pp. 51-72.
45. Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data", ACI Journal, Proceedings, V. 65, No. 11, Nov. 1968, pp. 942-951.
46. Kani, G.N.J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, Vol. 64, Mar. 1967, pp. 128-141.
47. Kani, G.N.J., "Basic Facts Concernings Shear Failure", ACI Journal, Vol. 63, June 1966, pp. 675-692.
48. Hiranmas, S., "Shear Capacity of High Strength Concrete Beams", Master's Thesis, The Faculty of The Graduate School, The University of Texas at Arlington, Aug. 1974.


49. Mphonde, A.G., and Frantz, G.C., "Shear Tests of High and Low Strength Concrete Beams Without Stirrups", *ACI Journal, Proceedings*, V. 81, July-August 1984, pp. 350-357.
50. Kani, G.N.J., "Rational Theory for The Function of Web Reinforcement", *ACI Journal, Proceedings* Vol. 66, No. 3, Mar. 1969, pp. 185-197.
51. American Society for Testing Material,
- ASTM C 33-80 Standard Specification for Concrete Aggregate.
- ASTM C 39-72(1979) Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C136-80 Sieve or Screen Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM C469-65(1975) Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM C494-80 Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete.
- ASTM C496-71(1979) Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM A370-80 Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
52. Lin, T.Y. and Burns, N.H., "Design of Prestressed Concrete Structures", John Wiley & Sons, Inc., 3rd Edition, SI Version, 646 P.
53. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)", American Concrete Institute, Detroit, 1983, 111 Pages.
54. Kupfer, H.; Hilsdorf, H.K. and Rüsçh, H., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stress", *ACI Journal*, Vol. 66, No. 8, Aug. 1969, pp. 656-666.

55. Timoshenko, S., "Strength of Materials", Part II, Advanced Theory and Problems, D. Van Nostrand Company, Inc., 3rd Edition, pp. 444-462.
56. Raphael, J.M., "Tensile Strength of Concrete", ACI Journal, Mar. - Apr. 1984, pp. 158-165.
57. ACI-ASCE Committee 326, "Shear and Diagonal Tension", ACI Journal, Vol. 59, Jan., Feb., Mar. 1962, pp. 1-30, pp. 277-334, pp. 352-396.
58. Joint ASCE-ACI Task Committee 426, "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 99, ST 6, Jun. 1973, pp. 1091-1187.
59. Bresler, B. and Macgregor, J.G., "Review of Concrete Beams Failing in Shear", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 93, Feb. 1967, pp. 343-372.
60. Zsutty, T., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests", ACI Journal, Vol. 68, Feb. 1971, pp. 138-143.
61. Elzanaty, A.H.; Nilson, A.H. and Slate, F.O., "Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete", ACI Journal, Vol. 83, March - April, pp. 290-296.
62. Ahmad, S.H.; Khaloo, A.R. and Poveda, A., "Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams", ACI Journal, Vol. 83, March - April, pp. 297-305.
63. Kani, G.N.J., "The Riddle of Shear Failure and Its Solution", ACI Journal, Proceedings Vol. 61, Apr. 1964, pp. 441-467.
64. Placas, A. and Regan, P.E., "Shear Failure of Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, Proceedings Vol. 68, Oct. 1971, pp. 763-773.

65. Fenwick, R.C. and Paulay, T., "Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, July 1969, pp. 2325-2351.
66. Ferguson, P.M., "Some Implications of Recent Diagonal Tension Tests", ACI Journal, Proceedings Vol. 53, No. 2, Aug. 1956, pp. 157-172.
67. Haddadin, M.J.; Hong, S. and Mattock, A.H., "Stirrup Effectiveness in Reinforced Concrete Beams with Axial Force", Journal of the Structural Division, ASCE, Sept. 1971, pp. 2277-2297.
68. Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures", New York: Wiley, 1975.
69. Wang, C.K., and Salmon, C.G., "Reinforced Concrete Design", 3rd Ed., Haper International Edition, 1979.
70. Din, Sahib, and Warner, R.F., "Shear Tests on Concrete I-Beams with Stirrup Reinforcement", UNICIV Report No. R-20, U. of New South Wales, Kensington, Australia, May 1967, 40 pp.
71. Laupa, A.; Siess, C.P., and Newmark, N.M., "Strength in Shear of Reinforced Concrete Beams", Bulletin No. 428, Engineering Experiment Station, Urbana, Ill. University of Illinois, Urbana, Ill., Mar. 1955.
72. Yoko, T., "Shear Strength of Reinforced RHA Concrete Beams", Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, Apr. 1983.
73. Sozen, M.A.; Zwoyer, E.M. and Siess, C.P., "Investigation of Prestressed Concrete for Highway Bridges, Part I: Strength in Shear of Beams without Web Reinforcement", Bulletin No. 452, Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., University of Illinois, Urbana, Ill., 1959.



74. Oleson, S.E.; Sozen, M.A., and Siess, C.P., "Investigate of Prestressed Reinforced Concrete for Highway Bridges - Part IV:Strength in Shear of Beams with Web Reinforcement, Bulletin No. 493, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., 1967.
75. Ramakrishnan, V., "Behavior and Ultimate Strength of Reinforced Concrete in Shear", PSG College of Technology, Coimbatore, India, Jan. 1969.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

ชุดของตัวอย่างทดสอบ	ตัวอย่าง ทดสอบ	ระยะ เรียงเหล็กปลอก (ซม.)	อัตราส่วนการเสริมเหล็กปลอก (Web Reinforcement Ratio)
1. ชุดของคานคอนกรีต	BO-5	-	-
เสริม เหล็กมีเฉพาะ	BO-7	-	-
เหล็กเสริมตามยาว	BO-28	-	-
	BO-56	-	-
2. ชุดของคานคอนกรีต	BW-D	φ 6 mm @ 23.00	$1.62 \times 10^{-3}$
เสริม เหล็กมีเหล็ก	BW-3D4	φ 6 mm @ 17.25	$2.16 \times 10^{-3}$
เสริมตามยาวกับ	BW-D2	φ 6 mm @ 11.50	$3.25 \times 10^{-3}$
เหล็กปลอก	BW-D4	φ 6 mm @ 5.75	$6.49 \times 10^{-3}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติและกำลังรับแรงดึงของหน้าตัดเหล็กเสริม

ชนิด	มวลต่อ เมตร (กก.)	พื้นที่ หน้าตัด (ซม <sup>2</sup> .)	กำลังคลาก (กก/ซม <sup>2</sup> .)	กำลังรับ แรงดึง (กก/ซม <sup>2</sup> .)	ค่าการยึดตัว ในช่วง 20 ซม. (%)	ค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น (กก/ซม <sup>2</sup> .)
SD-40 X 25 mm	3.826	4.874	4226.51	5908.90	17.50	1.98x10 <sup>6</sup>
	3.835	4.885	4063.46	6038.89	19.00	
	3.828	4.876	4327.32	6173.09	18.25	
ค่าเฉลี่ย	3.830	4.878	4205.76	6040.29	18.25	1.98x10 <sup>6</sup>
SR-24 φ 6 mm	0.219	0.279	2688.17	4480.29	23.50	2.00x10 <sup>6</sup>
	0.220	0.281	2918.15	4501.78	22.00	
	0.220	0.280	2857.14	4392.86	22.00	
ค่าเฉลี่ย	0.220	0.280	2821.15	4458.31	22.50	2.00x10 <sup>6</sup>
SR-24 φ 9 mm	0.471	0.600	3666.67	5433.33	21.50	2.05x10 <sup>6</sup>
	0.472	0.601	3660.57	5307.82	22.50	
	0.474	0.604	3642.38	5347.68	20.50	
ค่าเฉลี่ย	0.472	0.602	3656.54	5362.94	21.50	2.05x10 <sup>6</sup>

ตารางที่ 2.3 การทดลองผสมคอนกรีตโดยสัดส่วนผสมต่าง ๆ กัน

ส่วนผสมที่	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซีเมนต์:ทราย:หิน	W/C โดยน้ำหนัก	สัดส่วนน้ำยาผสมคอนกรีต ต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก (%)	อายุ (วัน)	$f'_c$ (กก/ซม <sup>2</sup> .)	$f_{SP}$ (กก/ซม <sup>2</sup> .)
1	1:1.429:2.332	0.30	-	7	553.14	-
2	1:1.333:2.175	0.30	-	7	560.54	-
3	1:1.250:2.039	0.30	-	7	560.30	-
4	1:1.176:1.919	0.30	-	7	518.81	-
5	1:1.110:1.811	0.30	-	7	509.75	-
6	1:1.333:2.175	0.30	0.6	7	560.27	-
7	1:1.333:2.175	0.28	0.6	7	605.55	-
8	1:1.333:2.175	0.27	0.6	7	653.65	51.17
9	1:1.333:2.175	0.27	1.0	7	687.61	49.75
10	1:1.333:2.175	0.27	1.1	7	594.62	46.45
11	1:1.333:2.175	0.27	1.2	7	628.18	45.74

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนการผสมคอนกรีตกำลังสูงมากในงานวิจัยนี้

วัสดุ	น้ำหนัก (กก.)/คอนกรีต 1 ม <sup>3</sup> .
ซีเมนต์	526
ทราย	702
หิน	1145
น้ำ	137
สารเคมีผสมเพิ่ม	5.8

ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> )	$E_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$\epsilon_o$ (ความเครียดที่ $f'_c$ )
599.84	$3.45 \times 10^5$	$2020 \times 10^{-6}$
676.23	$3.30 \times 10^5$	$1780 \times 10^{-6}$
639.45	$5.96 \times 10^5$	$2212 \times 10^{-6}$
775.26	$4.97 \times 10^5$	$2259 \times 10^{-6}$
793.94	$4.13 \times 10^5$	$2261 \times 10^{-6}$
814.87	$5.22 \times 10^5$	$1964 \times 10^{-6}$
854.49	$5.13 \times 10^5$	$1553 \times 10^{-6}$
916.73	$4.72 \times 10^5$	$1913 \times 10^{-6}$

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดจริงของคานตัวอย่าง

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก/ซม <sup>2</sup> )	$f_{SP}$ (กก/ซม <sup>2</sup> )	b (ซม.)	h (ซม.)	d (ซม.)	d' (ซม.)	a/d	$\rho$ *	$\rho'$ **	S (ซม.)	r ***	อายุ (วัน)
BO-5	672.65	67.91	15.3	31.4	24.4	-	3.689	5.227	-	-	-	196
BO-7	749.51	62.95	15.2	31.3	24.3	-	3.704	5.283	-	-	-	198
BO-28	738.48	72.15	15.3	31.1	24.1	-	3.734	5.292	-	-	-	210
BO-56	773.56	63.66	15.1	31.2	24.2	-	3.719	5.340	-	-	-	208
BW-D	777.15	69.32	15.2	30.7	23.7	4.25	3.797	5.416	0.334	23.0	0.160	205
BW-3D4	724.33	73.00	15.2	31.0	24.0	4.55	3.750	5.349	0.330	17.25	0.214	205
BW-D2	676.94	69.32	15.1	30.5	23.5	4.05	3.830	5.499	0.339	11.50	0.322	214
BW-D4	800.73	71.44	15.1	30.8	23.8	4.35	3.782	5.429	0.335	5.75	0.645	214

หมายเหตุ a = 90 ซม.

L = 210 ซม.

\*  $f_y = 4205.76$  กก/ซม<sup>2</sup>. สำหรับเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึง

\*\*  $f'_y = 3656.54$  กก/ซม<sup>2</sup>. สำหรับเหล็กเสริมตามยาวรับแรงอัด

\*\*\*  $f_{yw} = 2821.15$  กก/ซม<sup>2</sup>. สำหรับเหล็กปลอก

ตารางที่ 4.1 กำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตกำลังสูงมากและการเปรียบเทียบ

$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_{SP}$ (ทดสอบ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_{SP}$ (ACI 363R-84) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_{SP}$ (สุพรรณ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_{SP}/f'_c$ (%)	$\frac{f_{SP} \text{ (ทดสอบ)}}{f_{SP} \text{ (ACI 363R-84)}}$	$\frac{f_{SP} \text{ (ทดสอบ)}}{f_{SP} \text{ (สุพรรณ)}}$
672.65	67.91	50.83	42.11	10.10	1.34	1.61
749.51	62.95	53.66	48.07	8.40	1.17	1.31
738.48	72.15	53.26	47.23	9.77	1.35	1.53
773.56	63.66	54.51	49.87	8.23	1.17	1.28
777.15	69.32	54.64	50.13	8.92	1.27	1.38
724.33	73.00	52.75	46.15	10.08	1.38	1.58
676.94	69.32	51.00	42.45	10.24	1.36	1.63
800.73	71.44	55.46	51.87	8.92	1.29	1.38
653.65	51.17	50.11	40.59	7.83	1.02	1.26
687.61	49.75	51.40	43.30	7.24	0.97	1.15
594.62	46.45	47.79	35.71	7.81	0.97	1.30
628.18	45.74	49.12	38.51	7.28	0.93	1.19
			ค่าเฉลี่ย	8.73	1.19	1.38
			สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน	12.67 %	14.46 %	11.99 %



ตารางที่ 4.2 โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากและการเปรียบเทียบ

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_r$ (ทดสอบ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_{SP}$ (ทดสอบ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_r$ (ACI 363R-84) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$\frac{f_r \text{ (ทดสอบ)}}{f'_c}$ (%)	$\frac{f_r \text{ (ทดสอบ)}}{f_{SP} \text{ (ทดสอบ)}}$	$\frac{f_r \text{ (ทดสอบ)}}{f_r \text{ (ACI 363R-84)}}$
BO-5	672.65	62.82	67.91	80.40	9.34	0.93	0.78
BO-7	749.51	67.98	62.95	84.87	9.07	1.08	0.80
BO-28	738.48	76.00	72.15	84.24	10.29	1.05	0.90
BO-56	773.56	65.16	63.66	86.22	8.42	1.02	0.76
BW-D	777.15	70.37	69.32	86.42	9.05	1.02	0.81
BW-3D4	724.33	72.39	73.00	83.43	9.99	0.99	0.87
BW-D2	676.94	58.96	69.32	80.66	8.71	0.85	0.73
BW-D4	800.73	74.42	71.44	87.72	9.29	1.04	0.85
				ค่าเฉลี่ย	9.27	1.00	0.81
				สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน	6.69 %	8.00 %	7.41 %



ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงเฉือนล้วนของคอนกรีตกำลังสูงมาก

$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$f_t$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_{PS}$ (ทดสอบ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_{PS}/f'_c$ (%)	$\frac{v_{PS} \text{ (ทดสอบ)}}{v_{PS} \text{ (สูตร)}}.$
672.65	67.91	61.68	9.17	0.73
749.51	62.95	58.07	7.75	0.60
738.48	72.15	65.73	8.90	0.69
773.56	63.66	58.82	7.60	0.59
777.15	69.32	63.64	8.19	0.64
724.33	73.00	66.32	9.16	0.72
676.94	69.32	62.88	9.29	0.73
800.73	71.44	65.59	8.19	0.63
653.65	51.17	47.46	7.26	0.58
687.61	49.75	46.39	6.75	0.53
594.62	46.45	43.08	7.24	0.59
628.18	45.74	42.64	6.79	0.54
		ค่าเฉลี่ย	8.02	0.63
		สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน	11.66 %	11.36 %

คู่มือวิชาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงเฉือนของคานทดสอบชุดไม้เสริม เหล็กปลอก

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_c$ (ตัน)	$v_{uo}$ (ตัน)	$v_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_{uo}$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_{uo} - v_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	ลักษณะการวิบัติ
BO-5	672.65	9.50	10.37	25.45	27.78	2.33	แรงดึงแนวทแยง
BO-7	749.51	9.39	11.38	25.42	30.81	5.39	แรงดึงแนวทแยง
BO-28	738.48	11.00	11.58	29.83	31.41	1.58	แรงดึงแนวทแยง
BO-56	773.56	11.00	12.86	30.10	35.19	5.09	แรงดึงแนวทแยง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนทดสอบต่อหน่วยแรงเฉือนจากการคำนวณของคานชดไม่เสริมเหล็กปลอก

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม. <sup>2</sup> .)	$v_c$ (ทดสอบ) (กก./ซม. <sup>2</sup> .)	$v_{uo}$ (ทดสอบ) (กก./ซม. <sup>2</sup> .)	$v_c$ (ทดสอบ)	$v_c$ (ทดสอบ)	$v_c$ (ทดสอบ)	$v_{uo}$ (ทดสอบ)	$v_{uo}$ (ทดสอบ)	$v_{uo}$ (ทดสอบ)
				$v_c$ (สมการ 3-32) ACI (318-83)	$v_c$ (สมการ 3-33) ACI (318-83)	$v_c$ (สมการ 3-34) Zsutty	$v_c$ (สมการ 3-32) ACI (318-83)	$v_{uo}$ (สมการ 3-36) Zsutty	$v_{uo}$ (สมการ 3-40) A+K+P
BO-5	672.65	25.45	27.78	1.65	1.85	1.19	1.80	1.21	1.64
BO-7	749.51	25.42	30.81	1.57	1.75	1.15	1.90	1.30	1.75
BO-28	738.48	29.83	31.41	1.85	2.07	1.36	1.95	1.33	1.79
BO-56	773.56	30.10	35.19	1.83	2.04	1.34	2.14	1.46	1.97
			<b>ค่าเฉลี่ย</b>	1.73	1.93	1.26	1.95	1.33	1.79
			<b>สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน</b>	7.94 %	7.95 %	8.37 %	7.33 %	7.81 %	7.68 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ใช้หาความสัมพันธ์ของสมการที่ใช้คำนวณหน่วยแรงเฉือนของคานขุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$\frac{v_c}{\sqrt{f'_c}}$	$\frac{v_{uo}}{\sqrt{f'_c}}$	$\frac{v_d}{\rho_M \sqrt{f'_c}}$ ( $\times 10^{-3}$ /กก./ซม <sup>2</sup> .)	$(f'_c \rho_a^d)^{1/3}$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)
BO-5	672.65	0.98	1.07	0.750	2.120
BO-7	749.51	0.93	1.13	0.714	2.203
BO-28	738.48	1.10	1.16	0.712	2.187
BO-56	773.56	1.08	1.27	0.706	2.231
Mphonde & Frantz (49)					
AO-11-3a	764.26	0.542	0.728	0.469	1.925
AO-11-3b	761.31	0.543	0.726	0.469	1.922
AO-15-3a	829.66	0.659	0.728	0.450	1.978
AO-15-3b	955.55	-	0.726	0.419	2.074
AO-15-3c	936.70	0.701	0.717	0.423	2.060
Ahmad, Khaloo and Poveda (62)					
A1	620.51	0.918	0.918	0.525	1.827
A2	620.51	0.988	1.094	0.789	2.011
A3	620.51	0.988	1.094	0.928	2.083
A7	620.51	0.586	0.724	0.237	1.400
A8	620.51	0.655	0.758	0.356	1.541
A9	620.51	0.759	1.241	0.418	1.596
B1	683.24	0.780	0.780	0.643	2.050
B2	683.24	0.864	1.050	0.965	2.256
B3	683.24	0.949	1.525	1.134	2.336
B7	683.24	0.657	0.659	0.287	1.566
B8	683.24	0.690	0.690	0.431	1.724
B9	683.24	0.690	1.183	0.507	1.786
C1	656.09	0.909	0.924	0.864	2.217
C2	656.09	0.833	1.288	1.296	2.440
C3	656.09	0.682	1.174	1.588	2.527
C7	656.09	0.540	0.689	0.424	1.749
C8	656.09	0.675	0.675	0.636	1.925
C9	656.09	0.675	0.689	0.748	1.993

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนทดสอบต่อหน่วยแรงเฉือนจากการคำนวณโดยสมการที่เสนอของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_c$ (ทดสอบ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_{uo}$ (ทดสอบ) (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_c$ (ทดสอบ) $v_c$ (สมการ 4-2)	$v_c$ (ทดสอบ) $v_c$ (สมการ 4-4)	$v_{uo}$ (ทดสอบ) $v_{uo}$ (สมการ 4-3)	$v_{uo}$ (ทดสอบ) $v_{uo}$ (สมการ 4-5)
BO-5	672.65	25.45	27.78	1.30	1.16	1.22	1.05
BO-7	749.51	25.42	30.81	1.24	1.11	1.30	1.12
BO-28	738.48	29.83	31.41	1.46	1.32	1.33	1.15
BO-56	773.56	30.10	35.19	1.44	1.30	1.46	1.27
			ค่าเฉลี่ย	1.36	1.22	1.33	1.15
			สัมประสิทธิ์แปรปรวน	7.87 %	8.46 %	7.52 %	8.00 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงเฉือนของคานทดสอบชุดที่เสริมเหล็กปลอก

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$V_c$ (ตัน)	$V_u$ (ตัน)	$v_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_u$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$\frac{v_c \text{ (ทดสอบ)}}{v_c \text{ (สมการ 4-4)}}$	$v_u - v_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$rf_{yw}$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	ลักษณะการวิบัติ
BW-D	777.15	9.00	10.02	24.98	27.81	1.08	2.82	4.51	แรงดึงแนวทแยง
BW-3D4	724.33	11.50	17.00	31.52	46.60	1.40	15.04	6.04	แรงเฉือน-อัด
BW-D2	676.94	11.50	18.50	32.41	52.13	1.46	19.72	9.08	แรงเฉือน-อัด
BW-D4*	800.73	12.00	20.50	33.39	-	1.43	-	18.20	แรงดัด

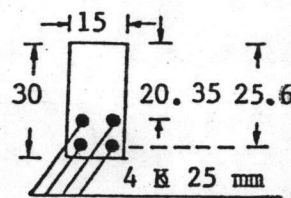
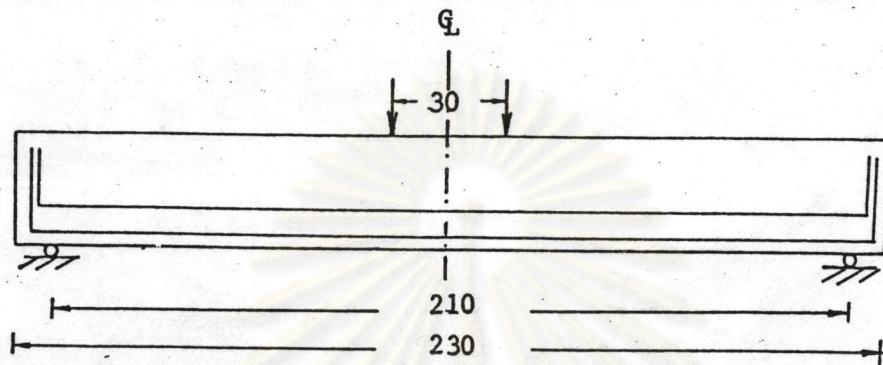
\* BW-D4 คานวิบัติเนื่องจากแรงดัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

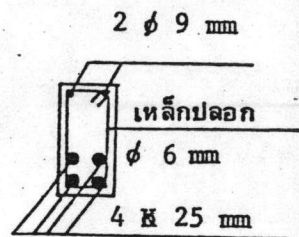
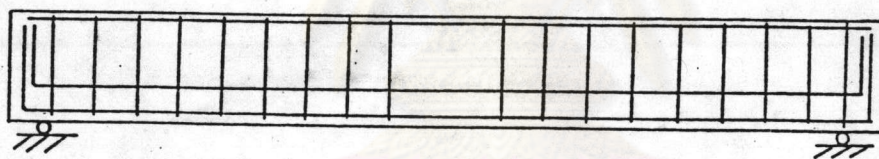
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนทดสอบกับหน่วยแรงเฉือนจากการคำนวณของคานชุกที่เสริมเหล็กปลอก

ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม <sup>2</sup> .)	$v_u$ (ทดสอบ)	$v_u$ (ทดสอบ)	$v_u$ (ทดสอบ)	$v_u$ (ทดสอบ)	$v_u$ (ทดสอบ)
		$v_c(\text{สมการ 3-32}) + r_{f_{yw}}$	$v_c(\text{สมการ 3-32}) + 1.53r_{f_{yw}}$	$v_{uo}(\text{สมการ 3-36}) + 1.53r_{f_{yw}}$	$v_c(\text{สมการ 4-4}) + 1.53r_{f_{yw}}$	$v_{uo}(\text{สมการ 4-5}) + 1.53r_{f_{yw}}$
BW-D	777.15	1.33	1.19	0.90	0.93	0.80
BW-3D4	724.33	2.12	1.85	1.42	1.46	1.28
BW-D2	676.94	2.12	1.77	1.41	1.45	1.29

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ตัวอย่างชุดแรก



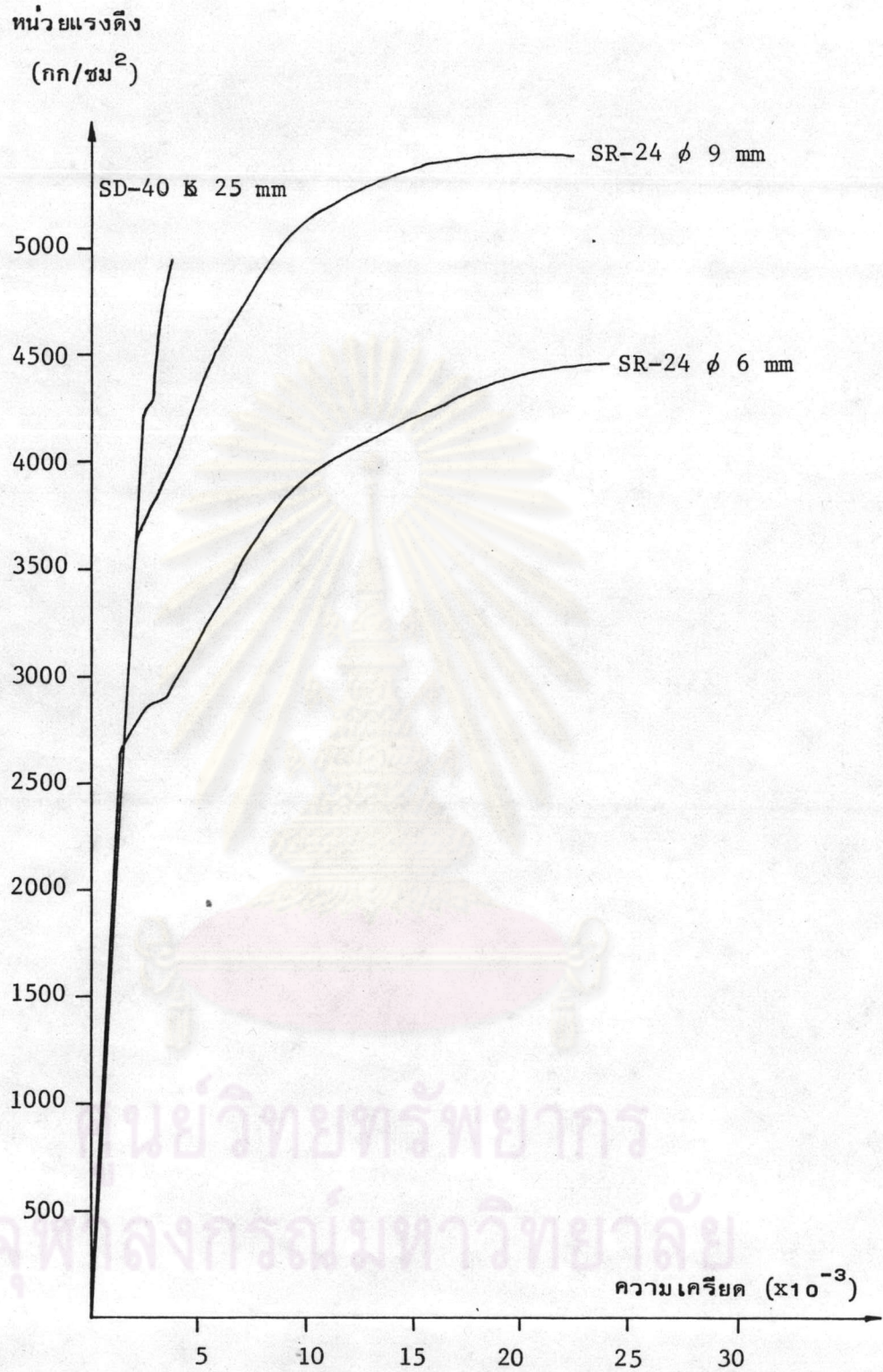
\* แปรงคันระยะเรียงเหล็กปลอก

(ข) ตัวอย่างชุดที่สอง

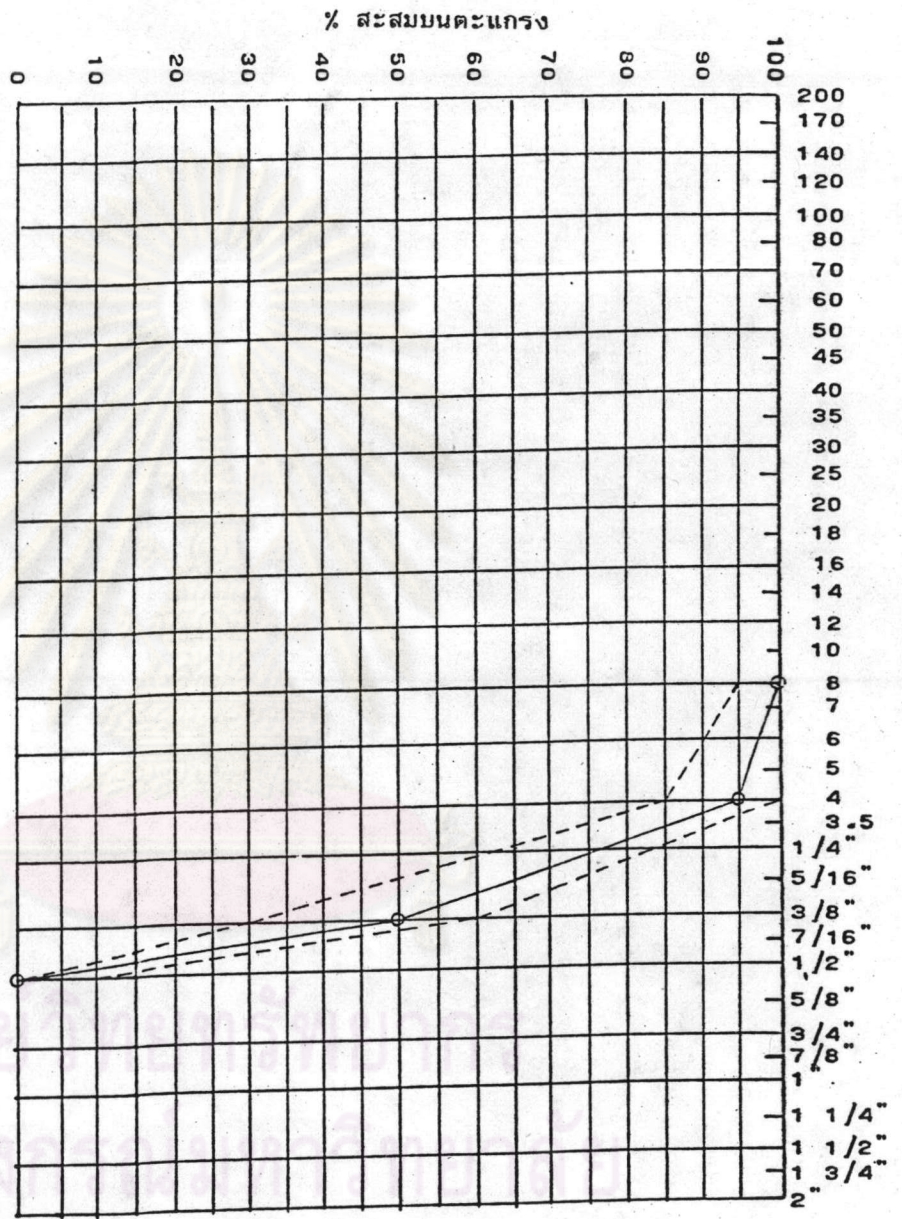
รูปที่ 2.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบ (ขนาดของคานหน่วยเป็น ซม.)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียดของเหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัย

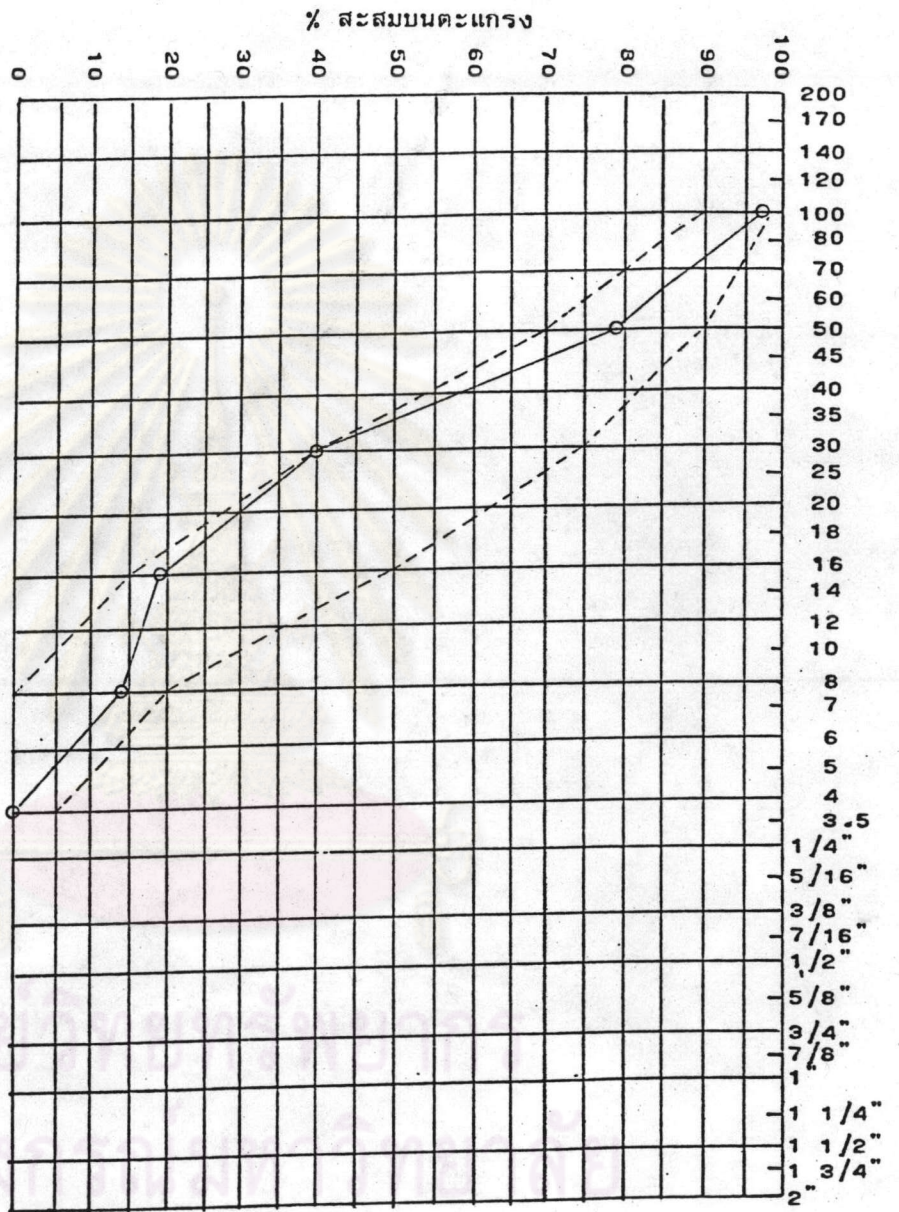


รูปที่ 2.3

ปริมาณคละของหิน

○—○ หินที่ใช้ในงานวิจัย

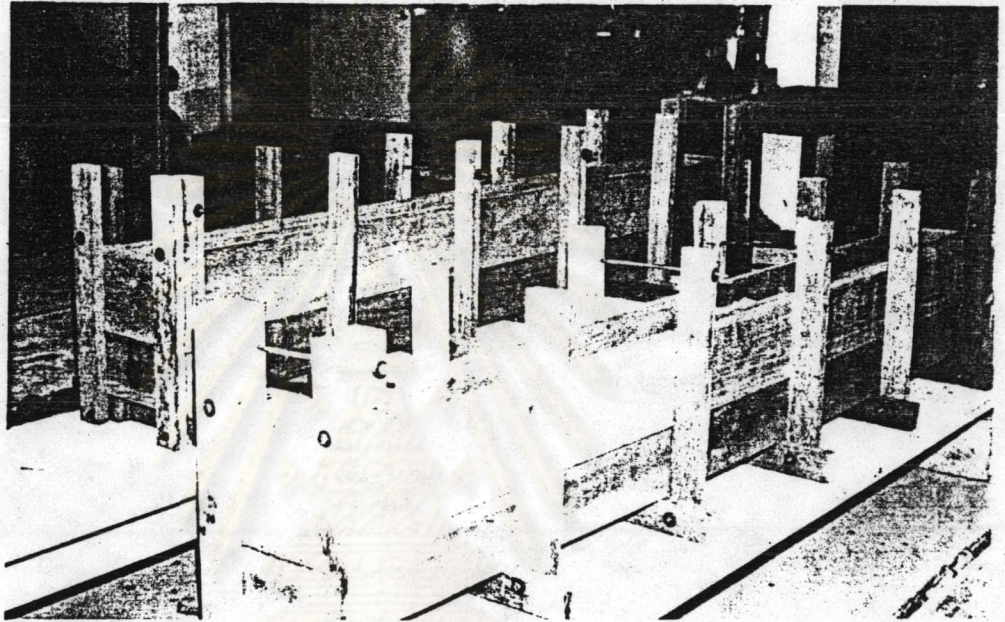
----- ช่วงที่กำหนดโดย ASTM C33-80



รูปที่ 2.4

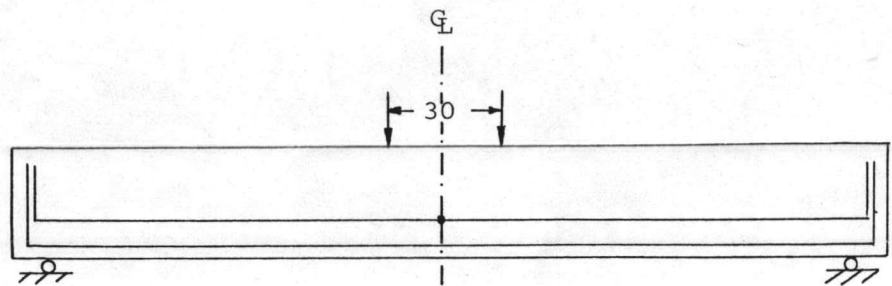
ปริมาณคละของทราย

- ทรายที่ใช้ในงานวิจัย
- ช่วงที่กำหนดโดย ASTM C33-80

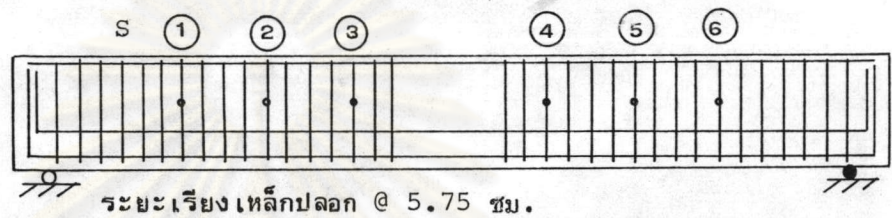


รูปที่ 2.5 แสดงแบบหล่อคานคอนกรีต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



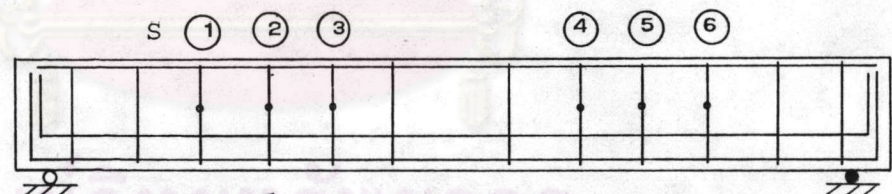
• ตำแหน่งการติดตั้งแกนชนิดไฟฟ้าบนเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึง



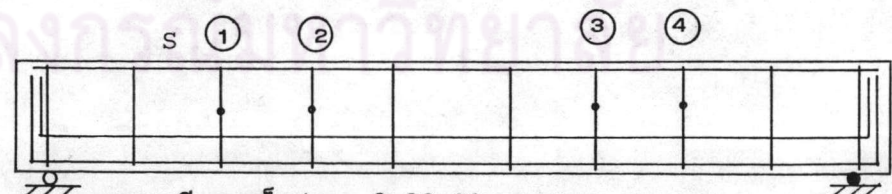
ระยะเรียงเหล็กปลอก @ 5.75 ซม.



ระยะเรียงเหล็กปลอก @ 11.50 ซม.



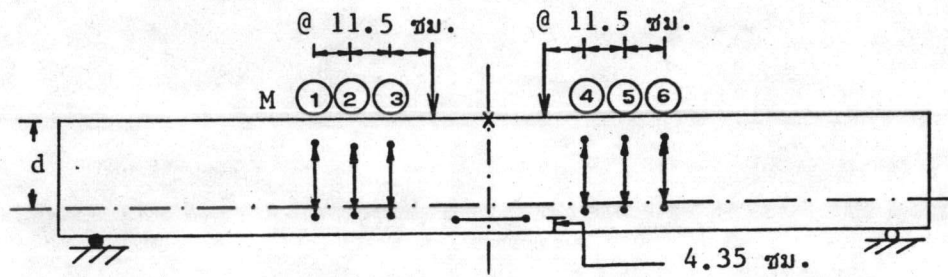
ระยะเรียงเหล็กปลอก @ 17.25 ซม.



ระยะเรียงเหล็กปลอก @ 23.00 ซม.

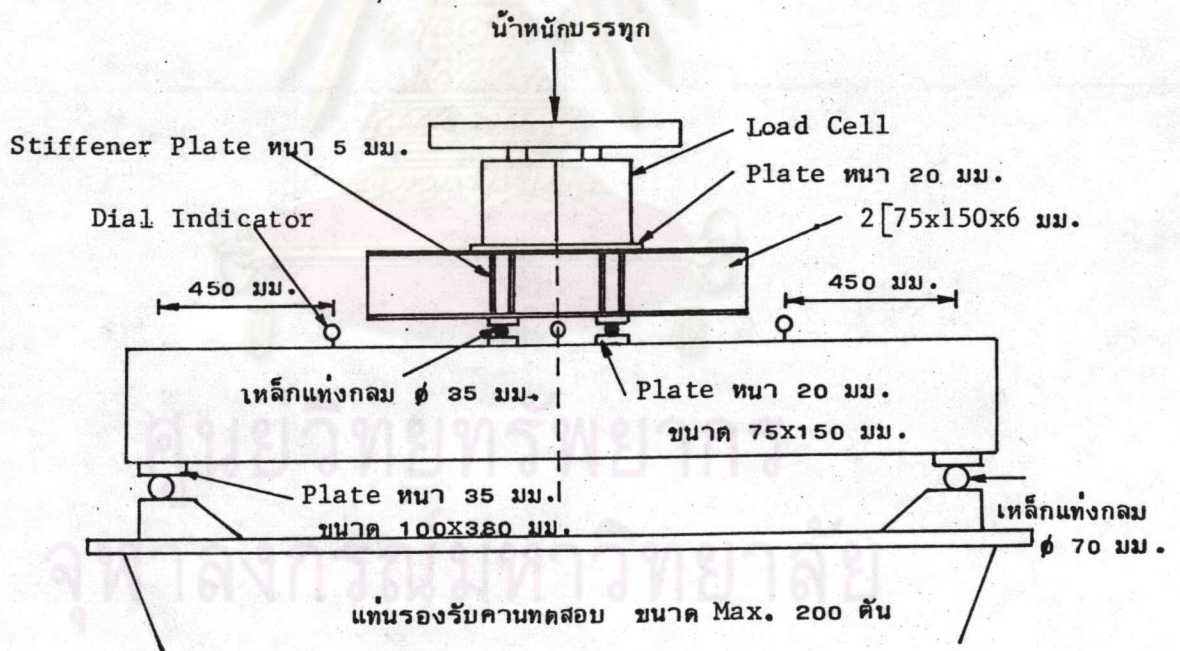
• ตำแหน่งการติดตั้งแกนชนิดไฟฟ้าบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

รูปที่ 2.6 รายละเอียดตำแหน่งการติดตั้งแกนชนิดไฟฟ้าบนเหล็กเสริม

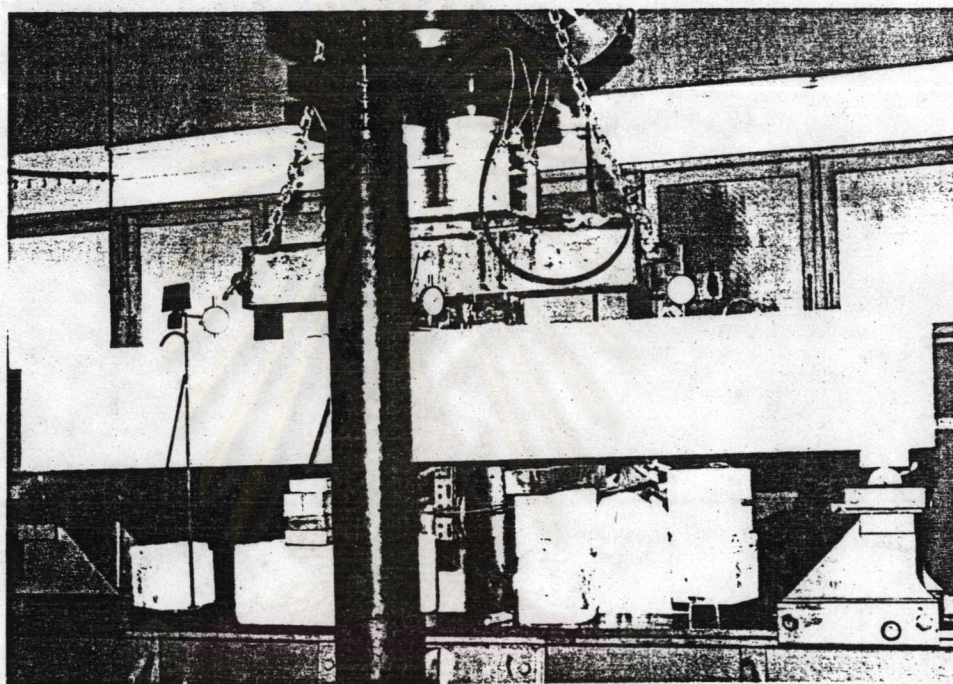


x ตำแหน่งการติดตั้งเกจชนิดไฟฟ้า  
 — ตำแหน่งการติดตั้ง Mechanical Strain Gage

รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเกจที่ผิวตัวอย่าง

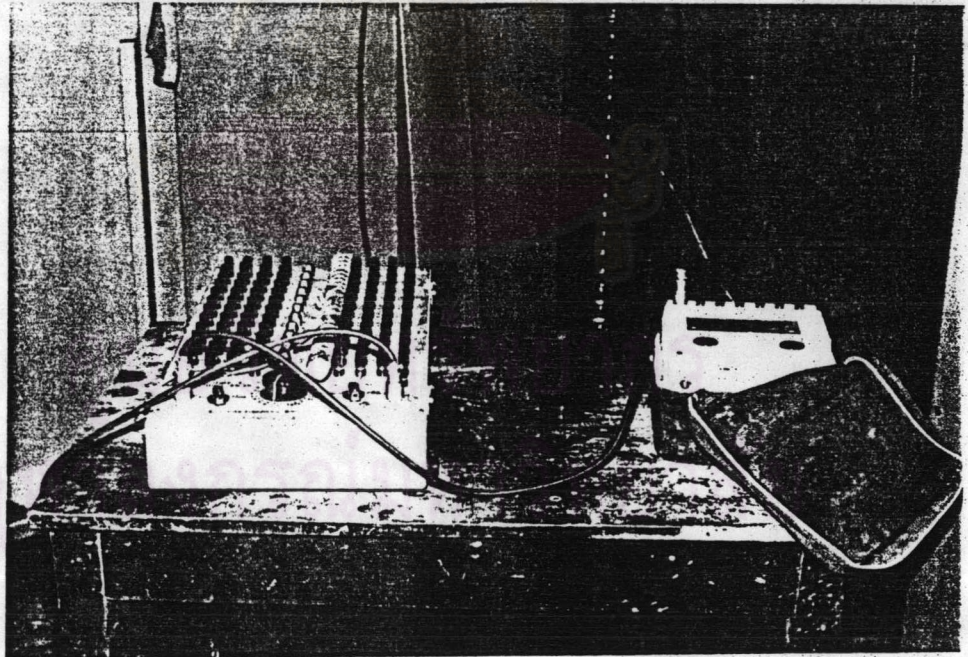
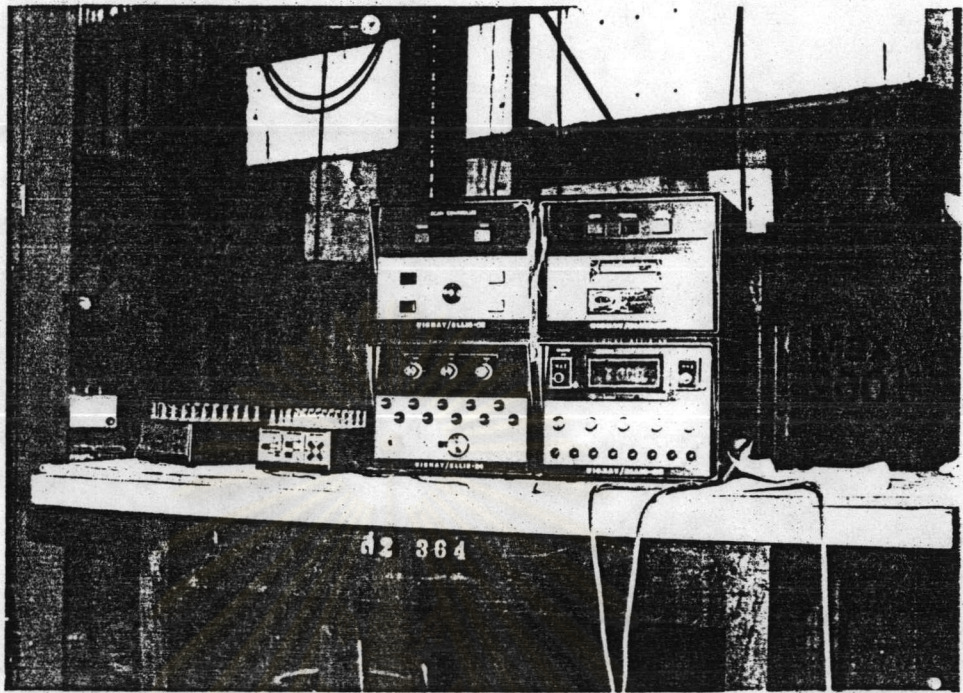


รูปที่ 2.8 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ



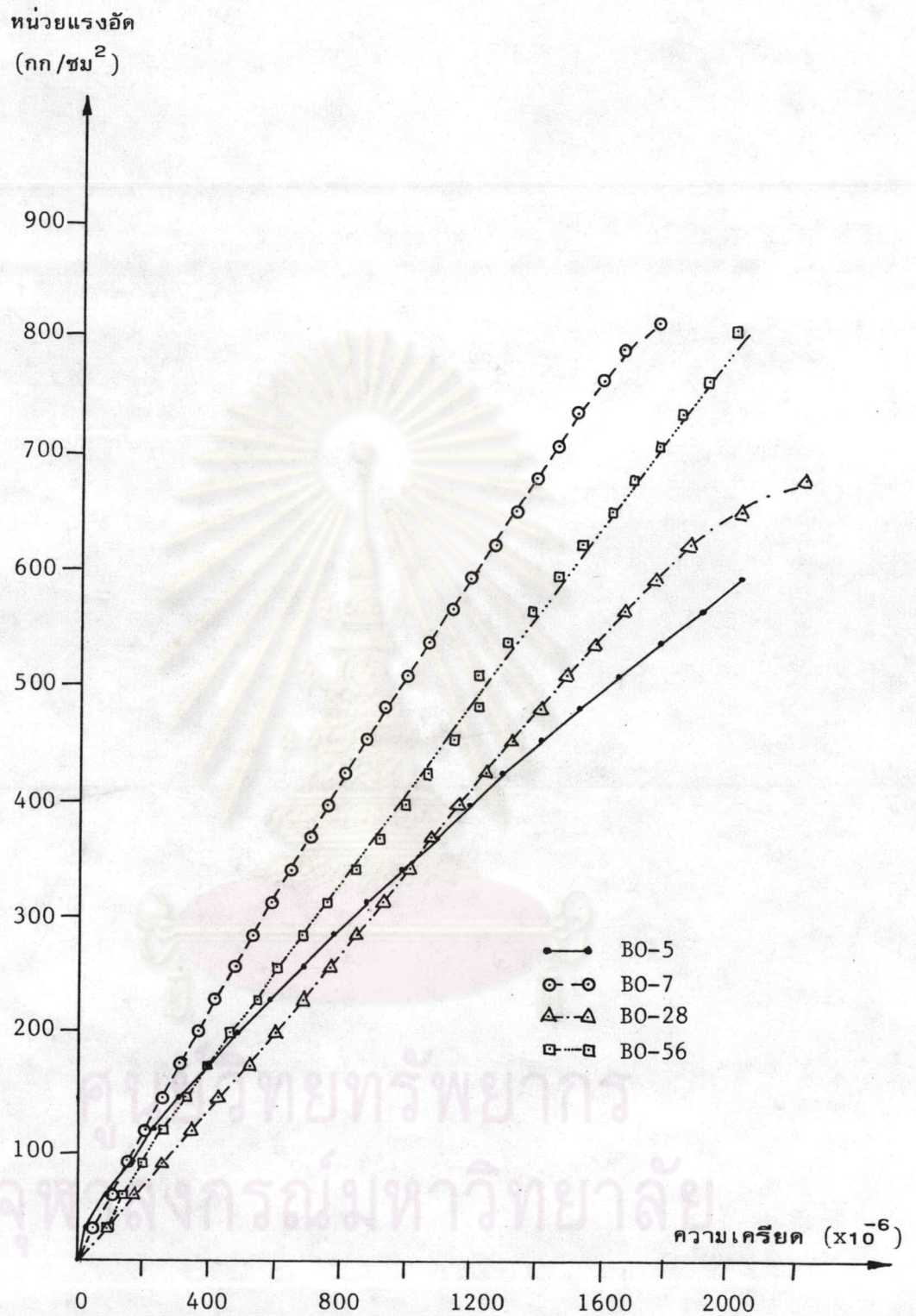
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายชุด เครื่องมือทดสอบพร้อมจะทำการทดสอบ

ศูนย์ถ่ายทอดทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

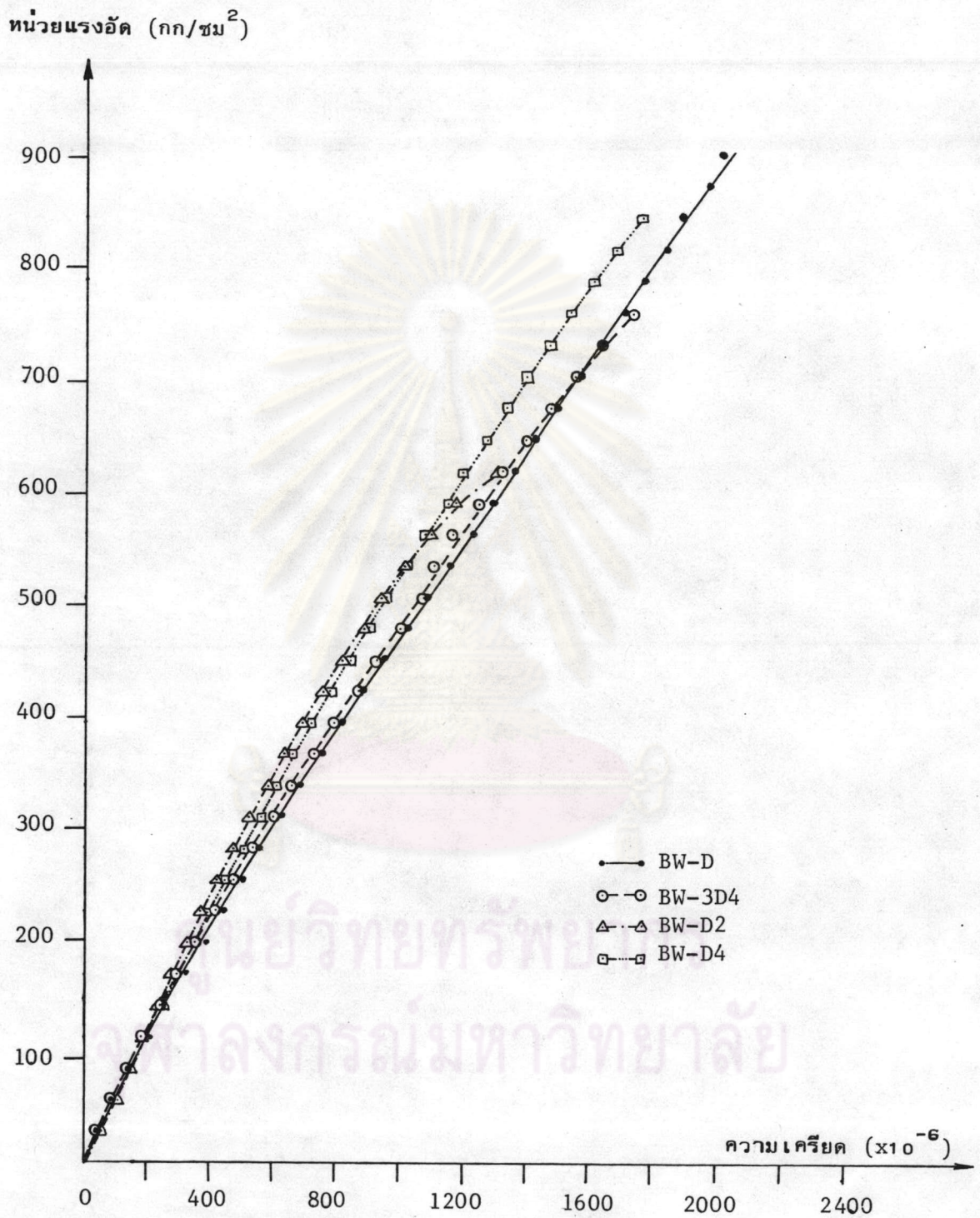


รูปที่ 2.10 แสดงอุปกรณ์การอ่านค่าความเครียด

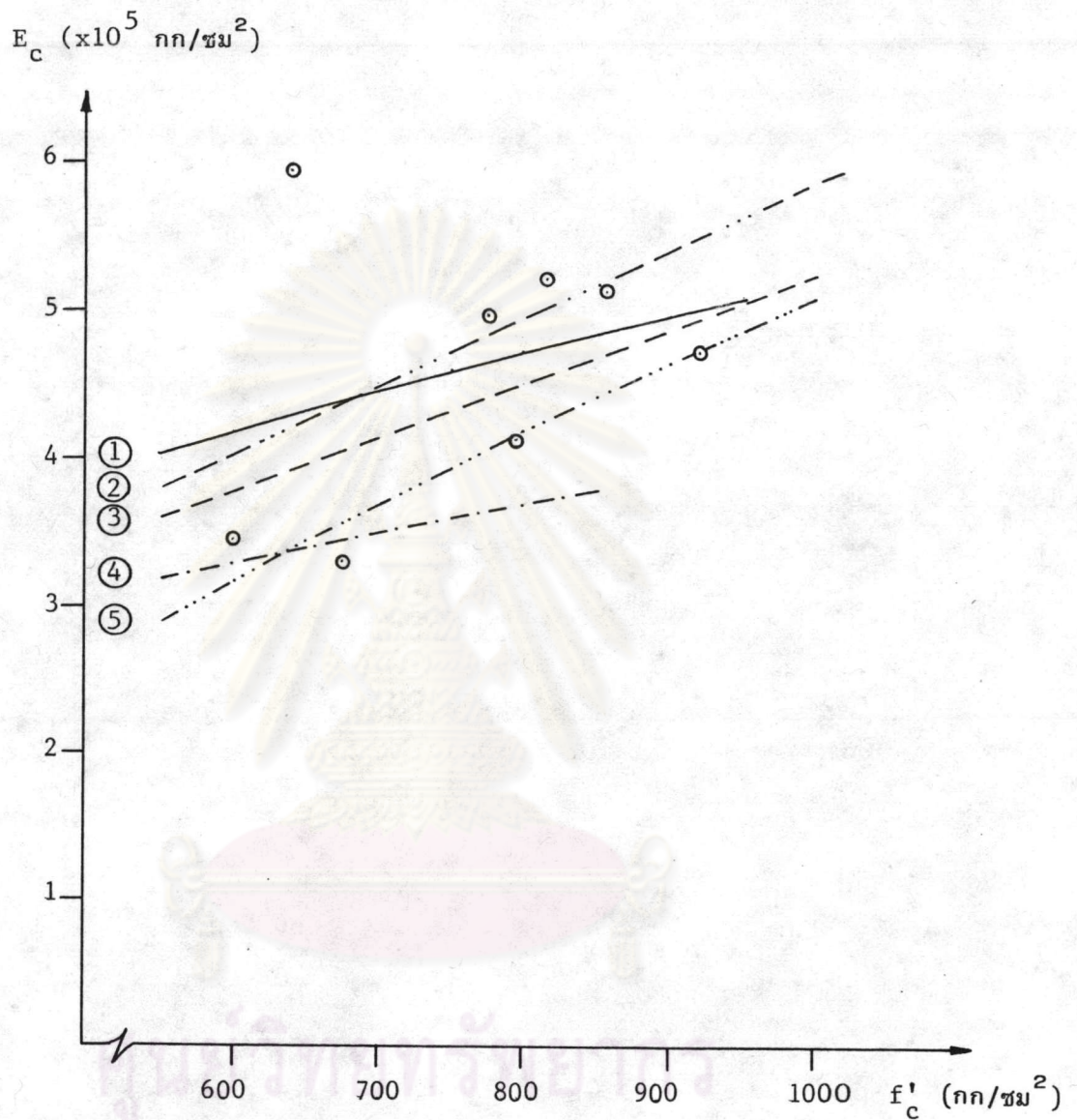




รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีต  
ทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน BO-5, BO-7, BO-28 และ BO-56

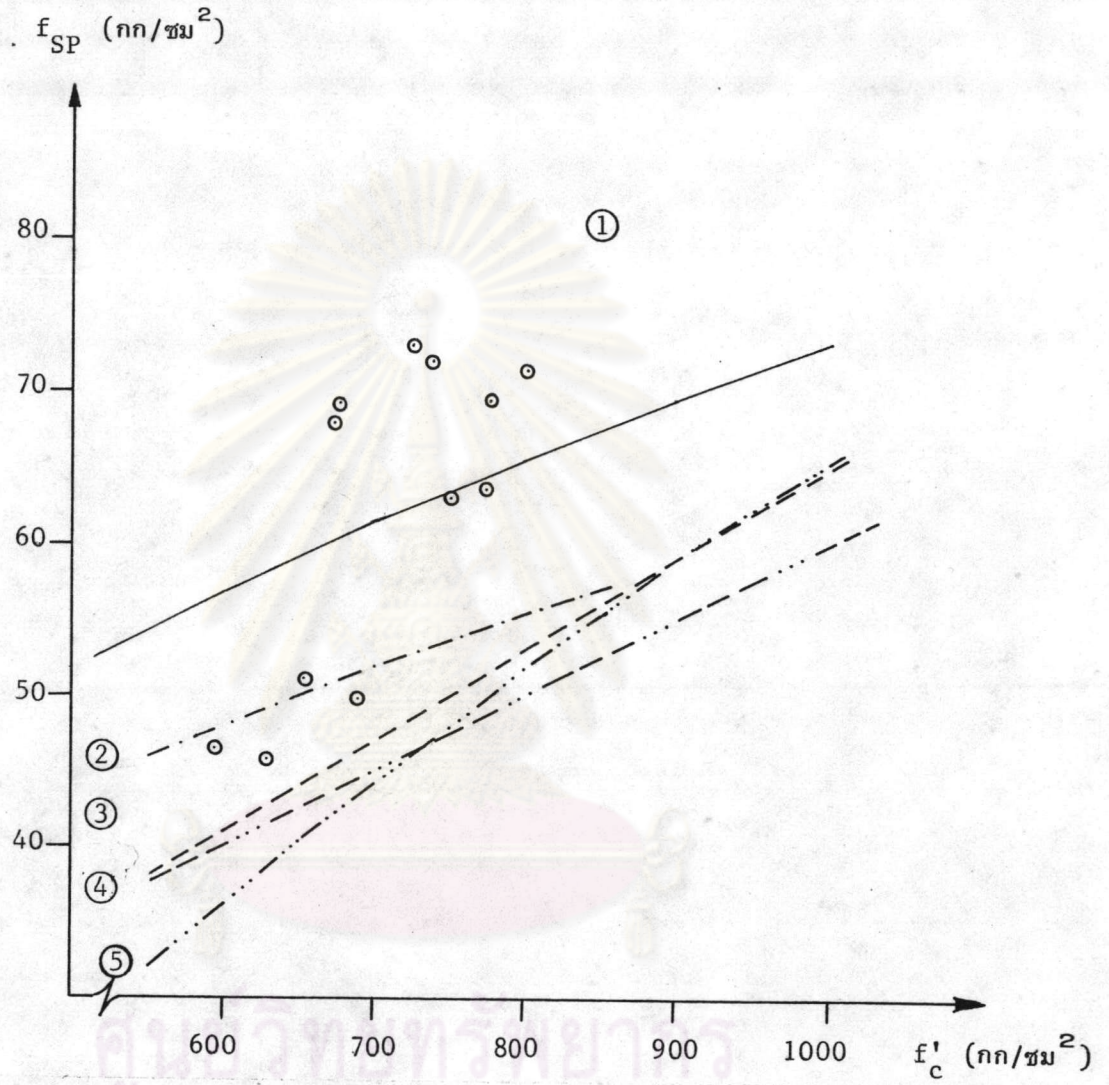


รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคาน BW-D, BW-3D4, BW-D2 และ BW-D4



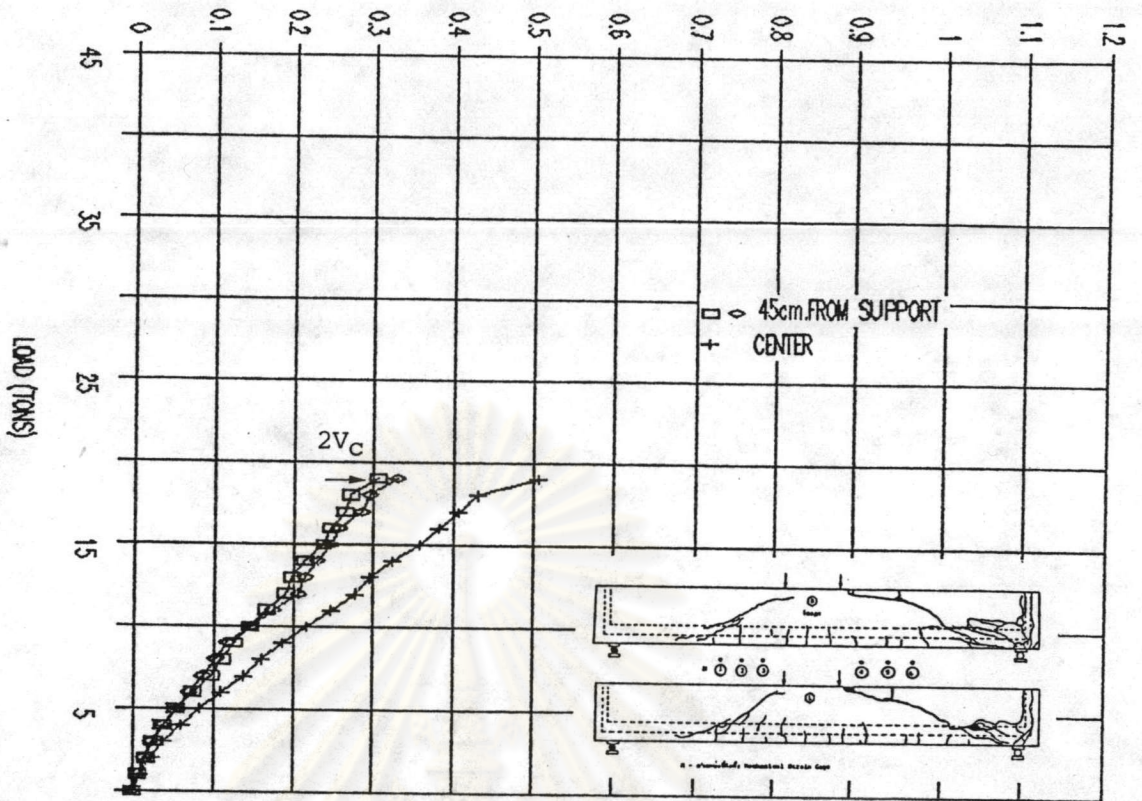
- ① งานวิจัยนี้  $E_c = 66000 + 14400 \sqrt{f'_c}$
- ② Inge Lyse<sup>(28)</sup>  $= 126555 + 460 f'_c$
- ③ Perera<sup>(28)</sup>  $= 160000 + 364 f'_c$
- ④ ACI (363R-84)<sup>(1)</sup>  $= 70300 + 10600 \sqrt{f'_c}$  เมื่อ  $210 < f'_c < 845$  กก/ซม<sup>2</sup>
- ⑤ สุพรรณณ<sup>(30)</sup>  $= 27000 \sqrt{f'_c} - 34400$

รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมากจากงานวิจัยนี้

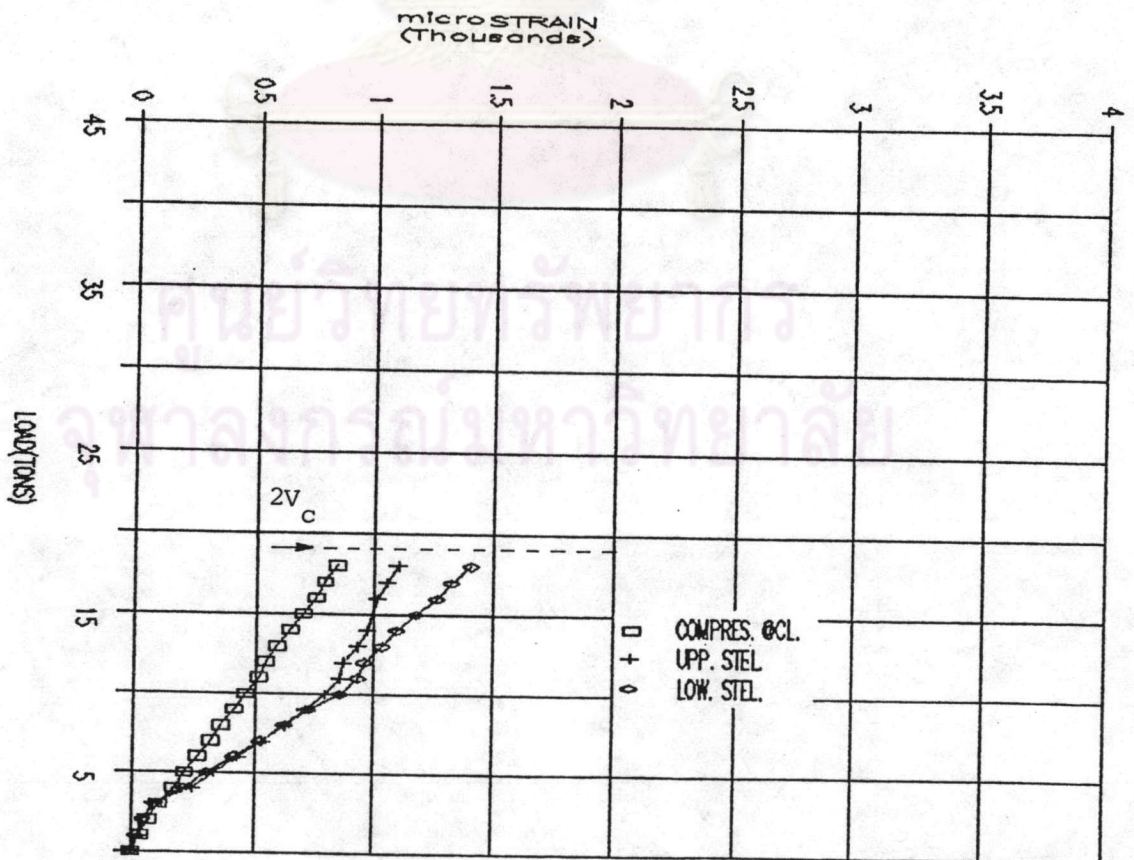


- ① งานวิจัยนี้  $f_{sp} = 2.32 \sqrt{f'_c}$
- ② ACI (363R-84)<sup>(1)</sup>  $= 1.96 \sqrt{f'_c}$  เมื่อ  $210 < f'_c < 845$  กก/ซม<sup>2</sup>
- ③ Perera<sup>(28)</sup>  $= 0.60 f'_c + 5$
- ④ Yamamoto<sup>(28)</sup>  $= 0.05 f'_c + 10$
- ⑤ สุพรรณณ<sup>(30)</sup>  $= 4.13 \sqrt{f'_c} - 65$

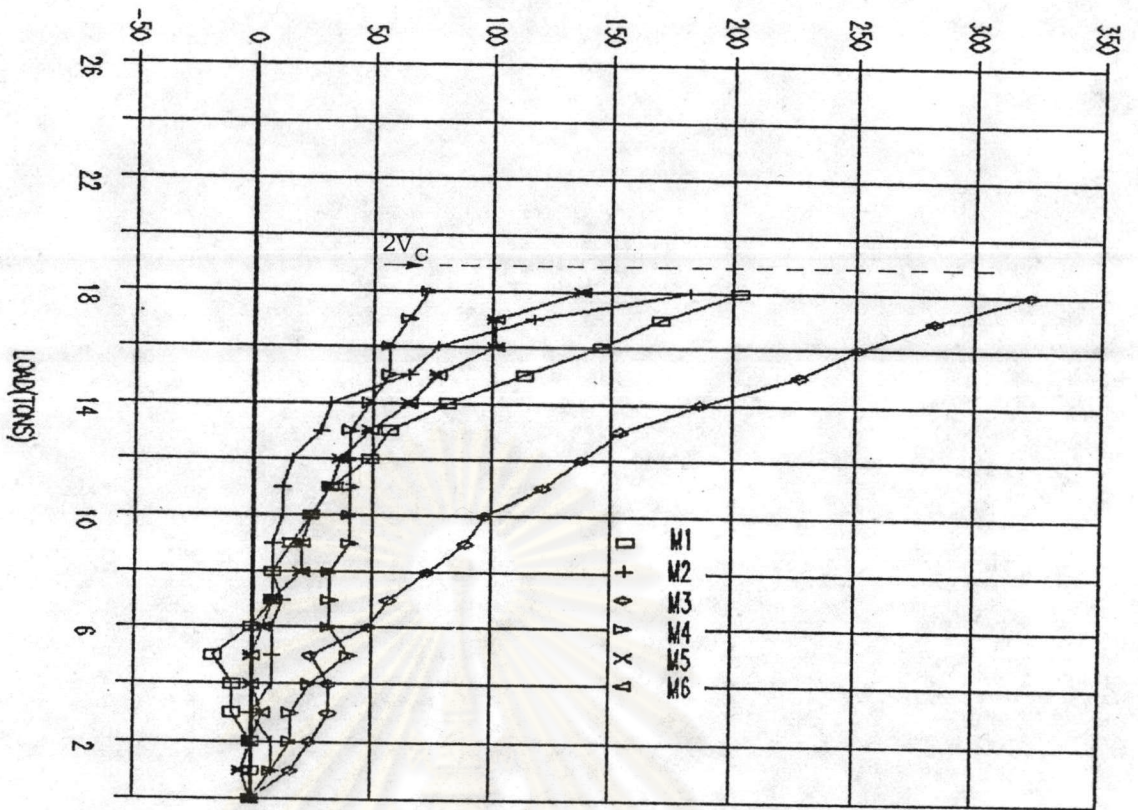
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังดึงแยกตัว ( $f_{SP}$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมากจากงานวิจัยนี้



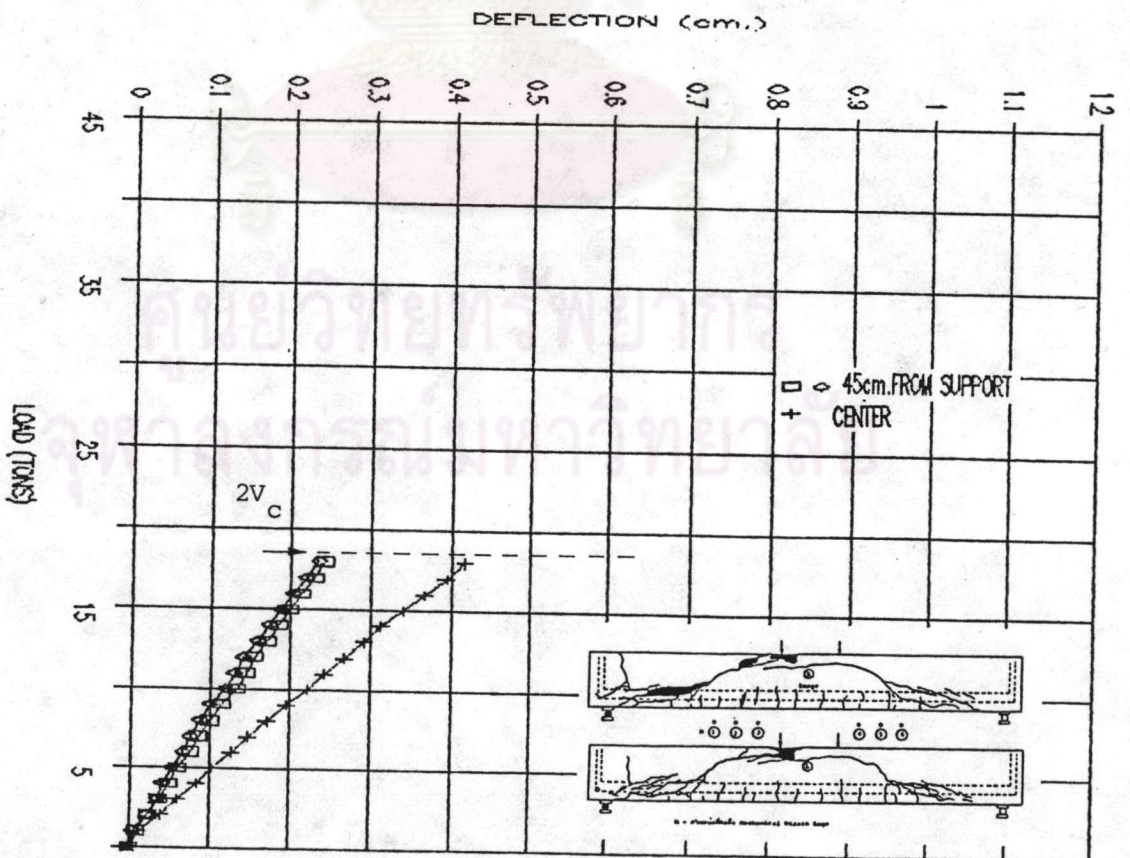
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BO-5



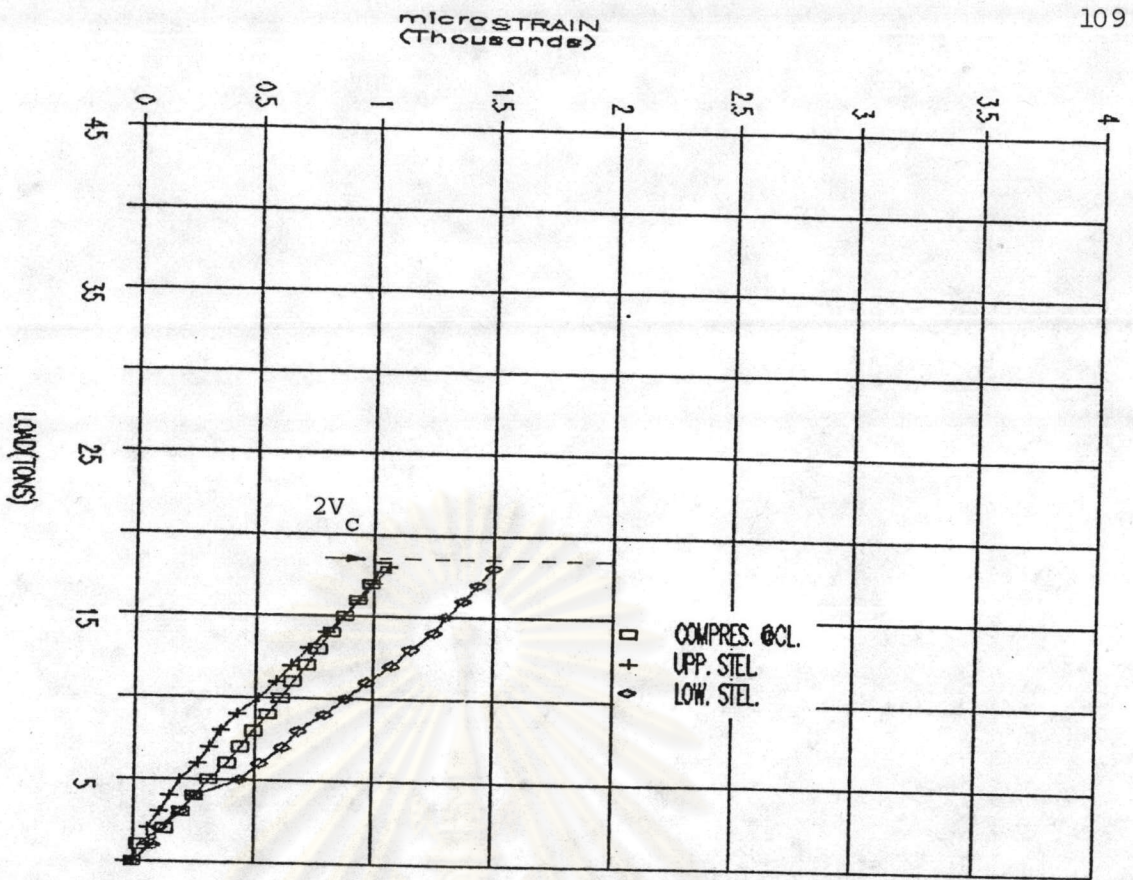
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-5



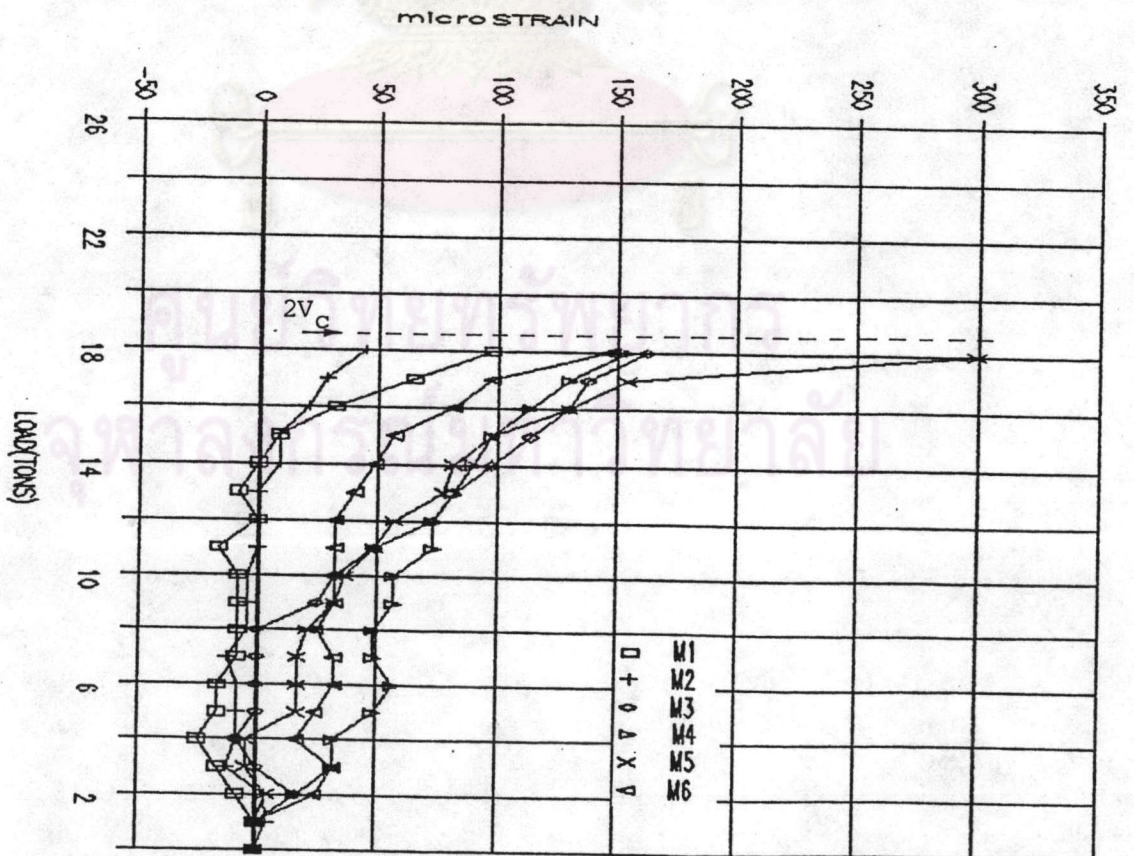
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BO-5



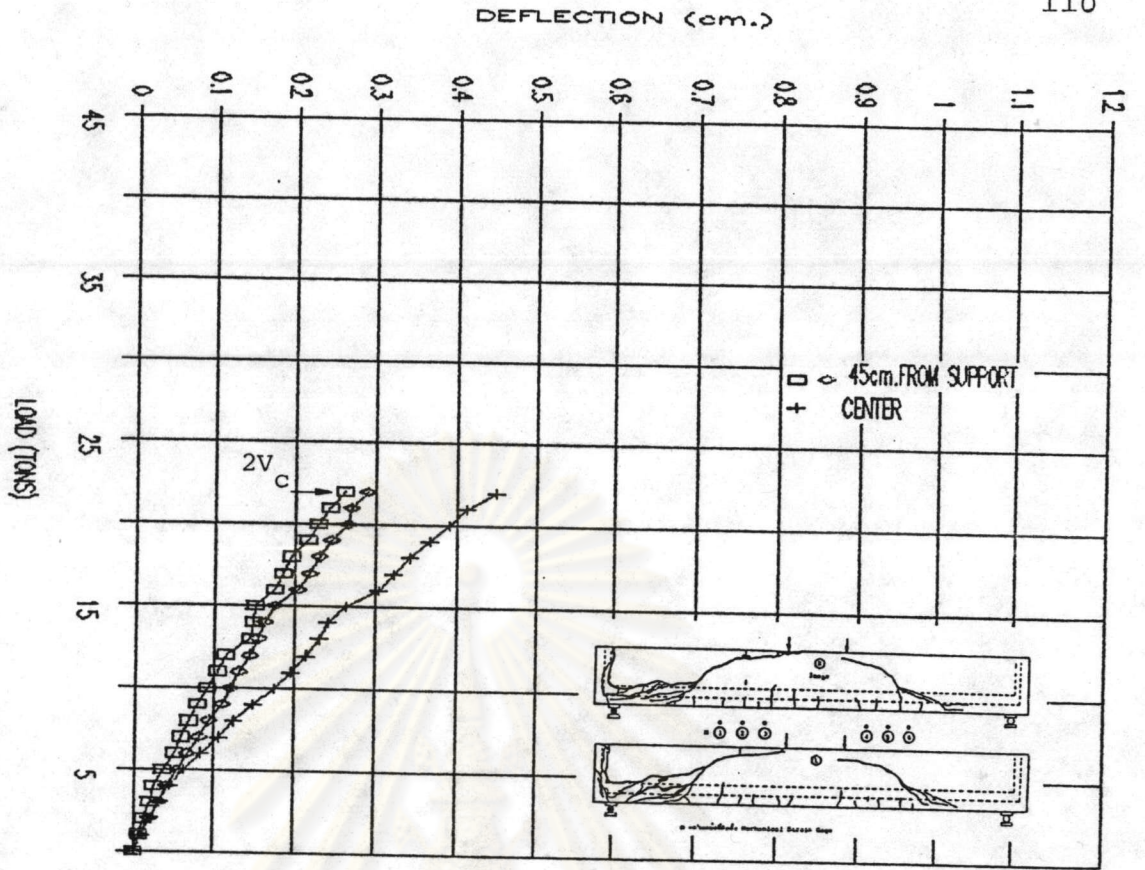
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BO-7



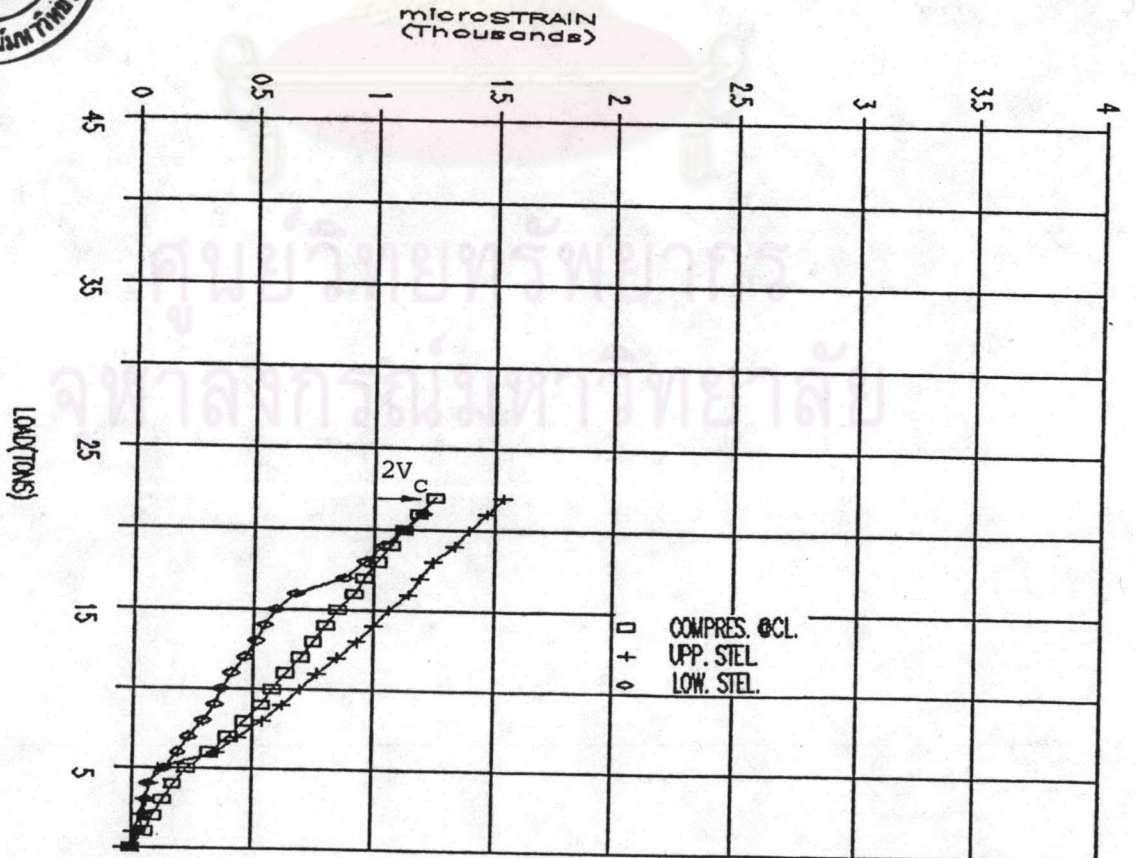
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-7



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BO-7

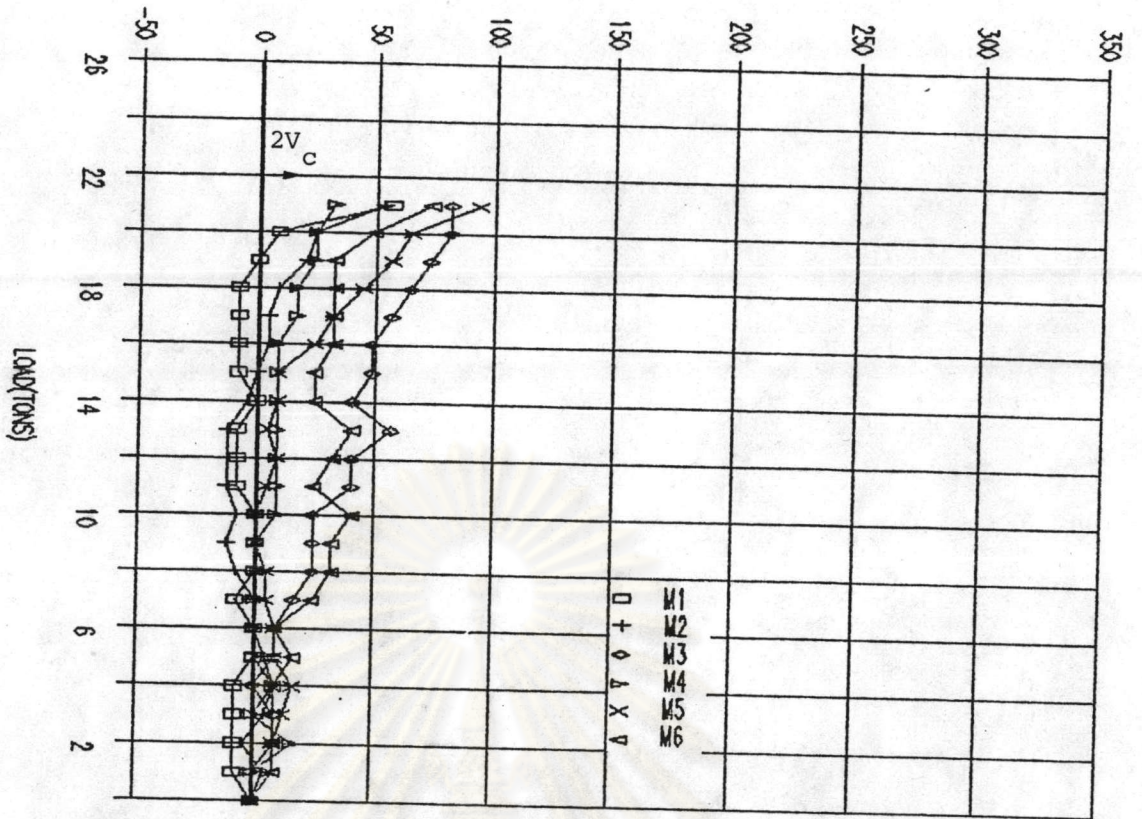


รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BO-28

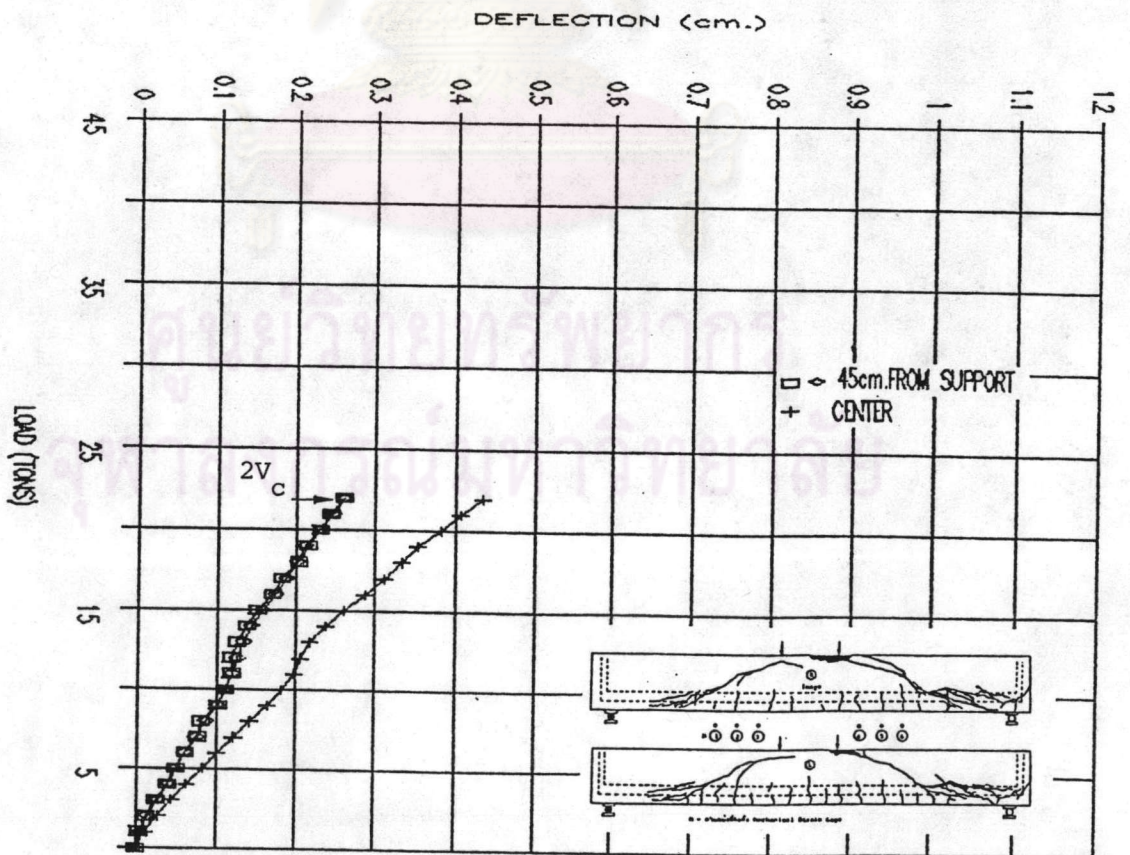


รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-28

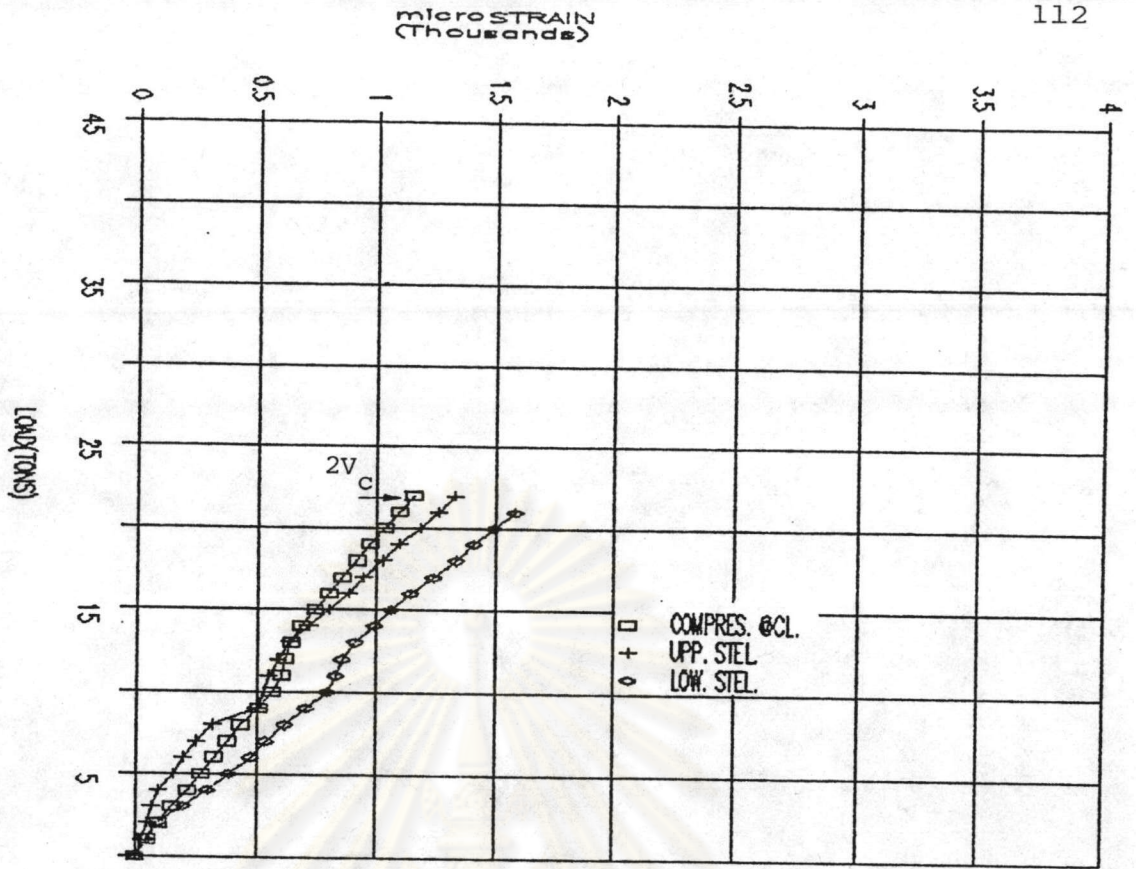




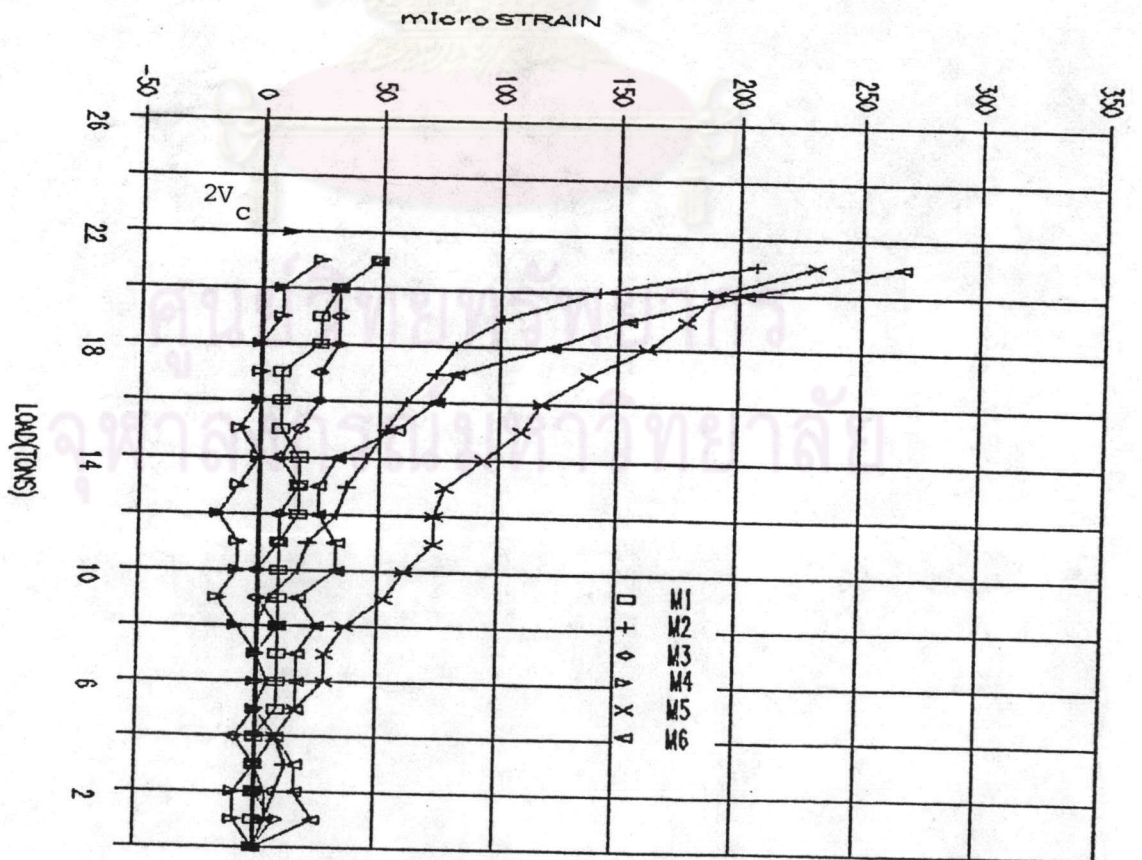
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BO-28



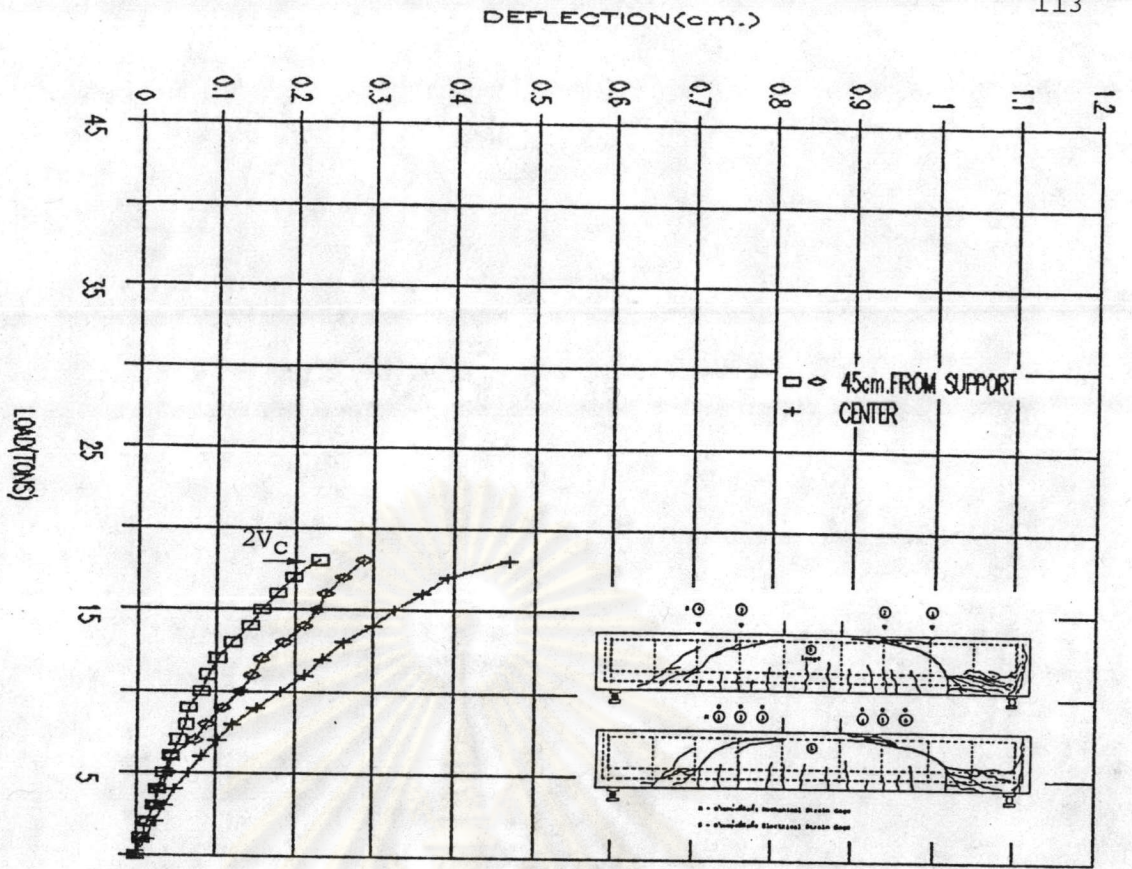
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BO-56



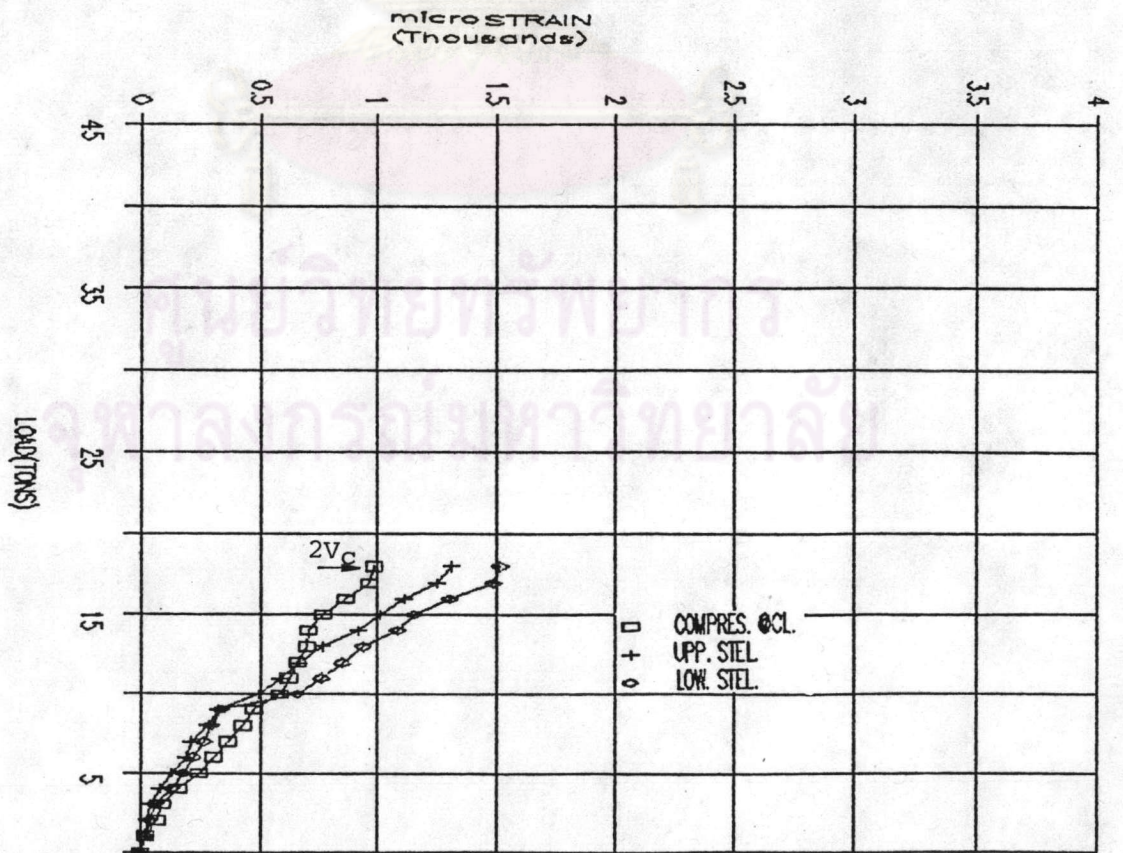
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BO-56



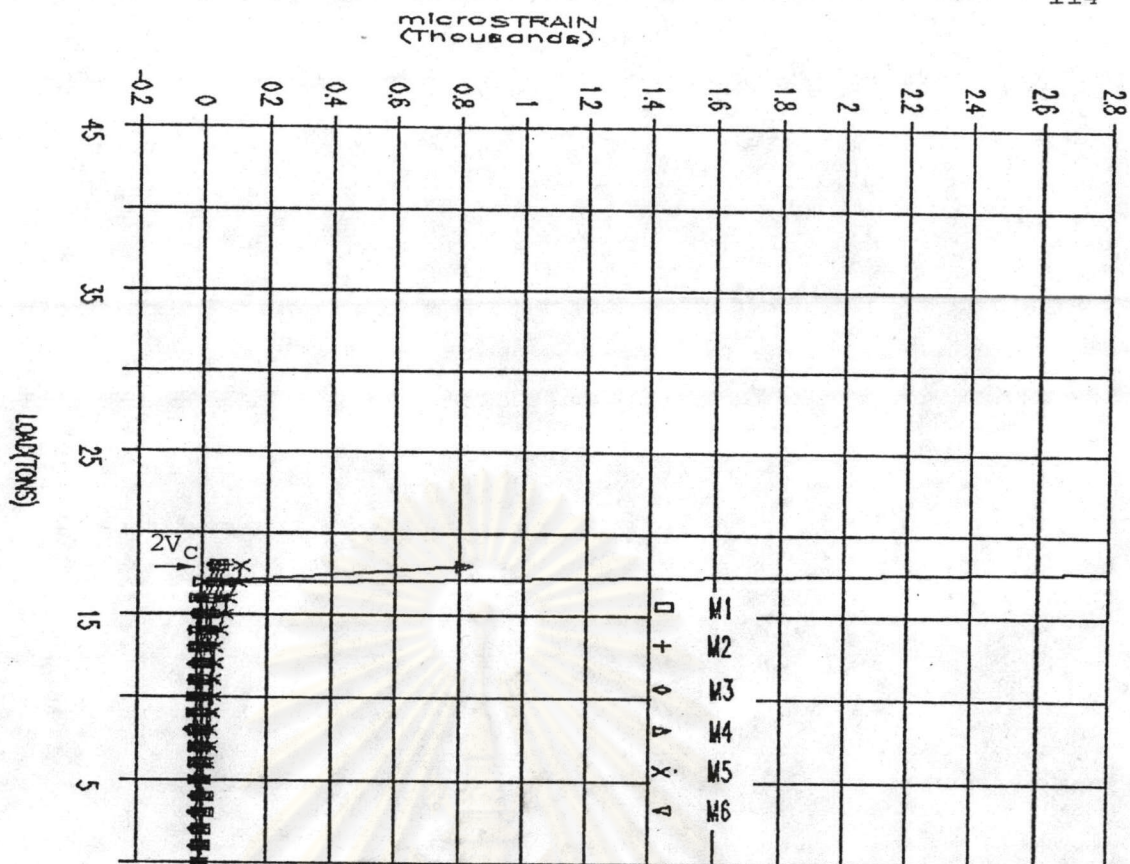
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BO-56



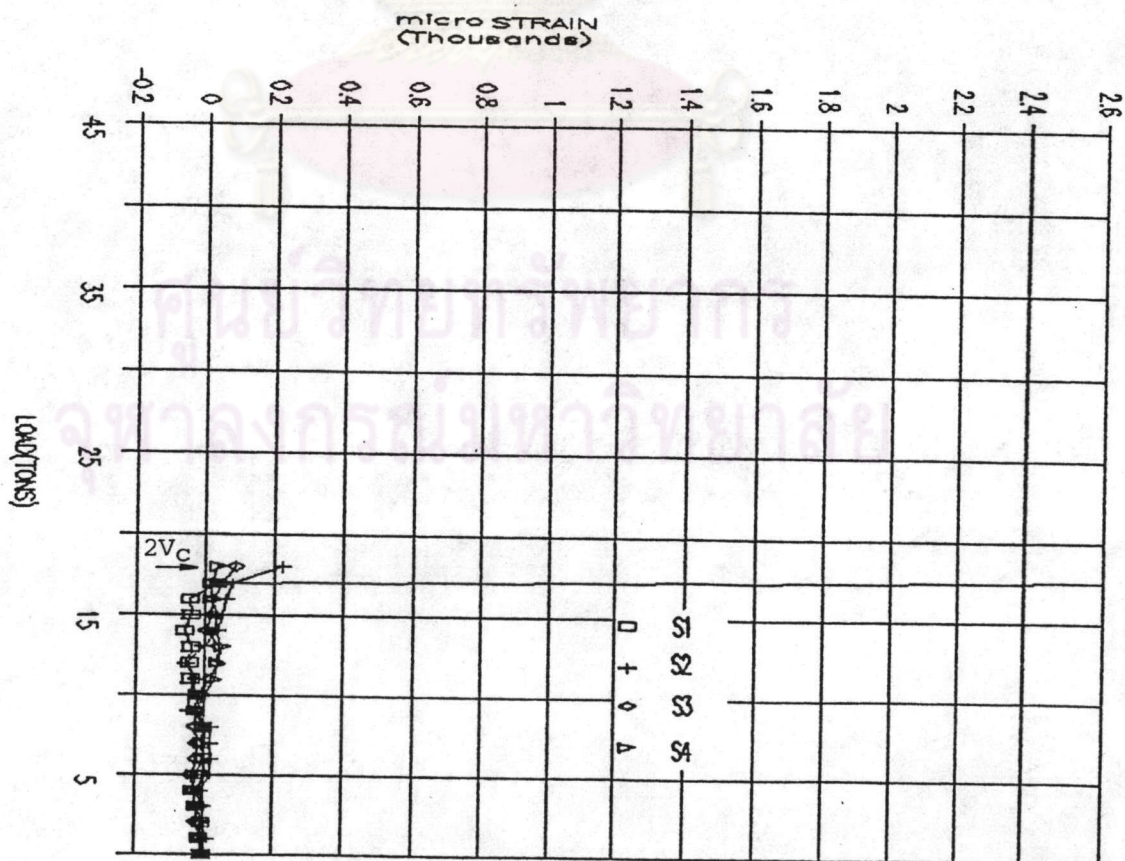
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-D



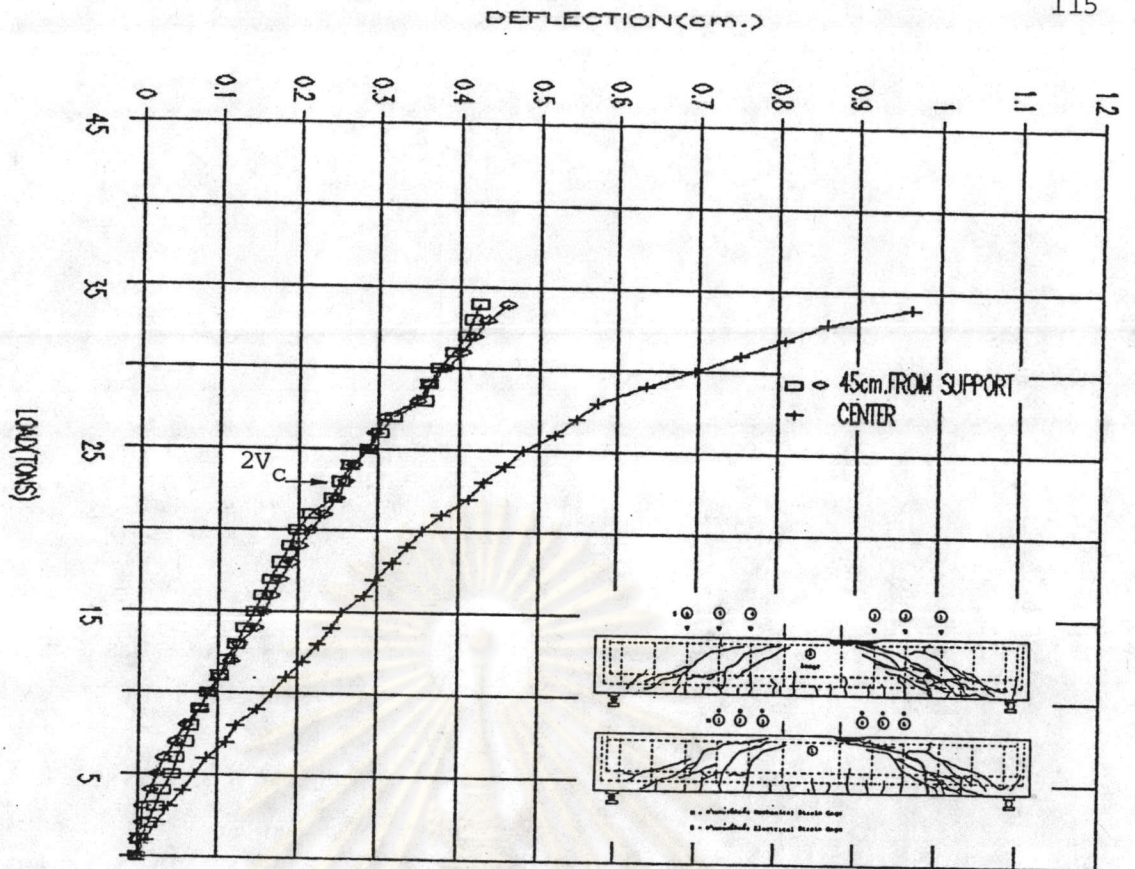
รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-D



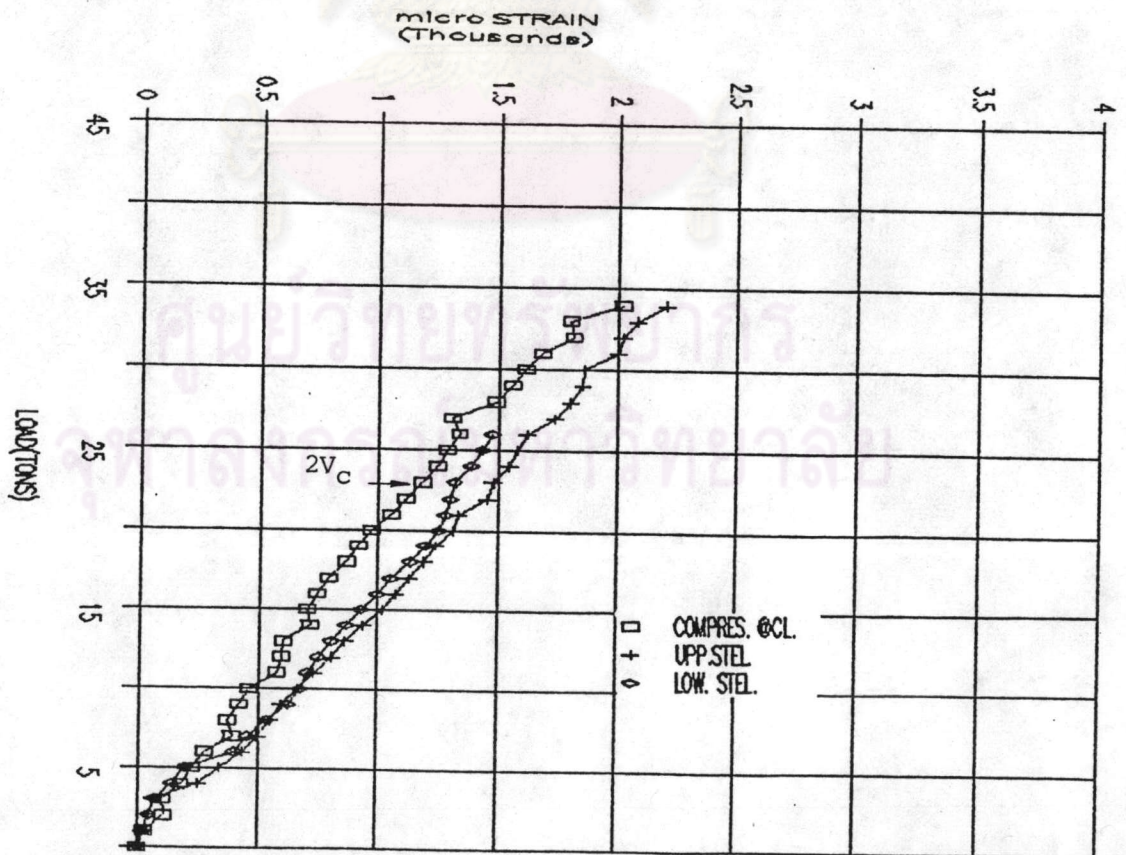
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีต ในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-D



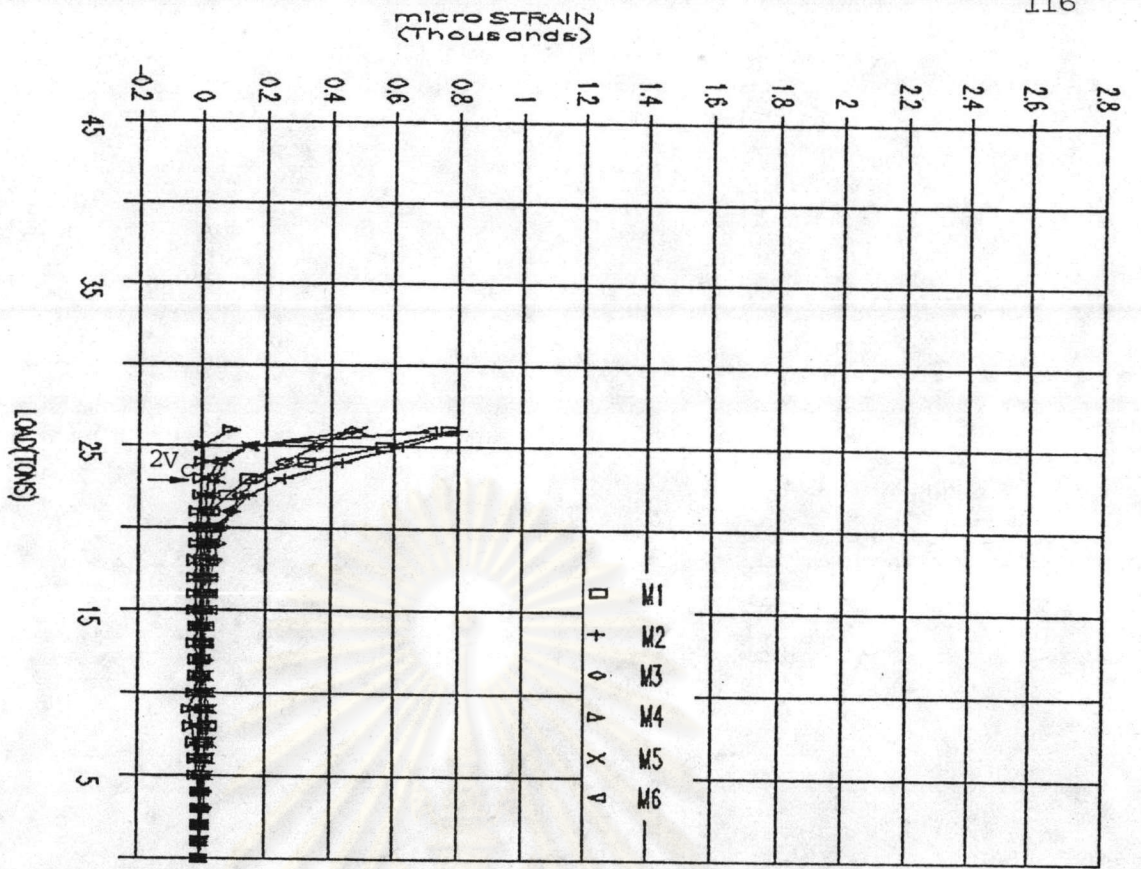
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-D



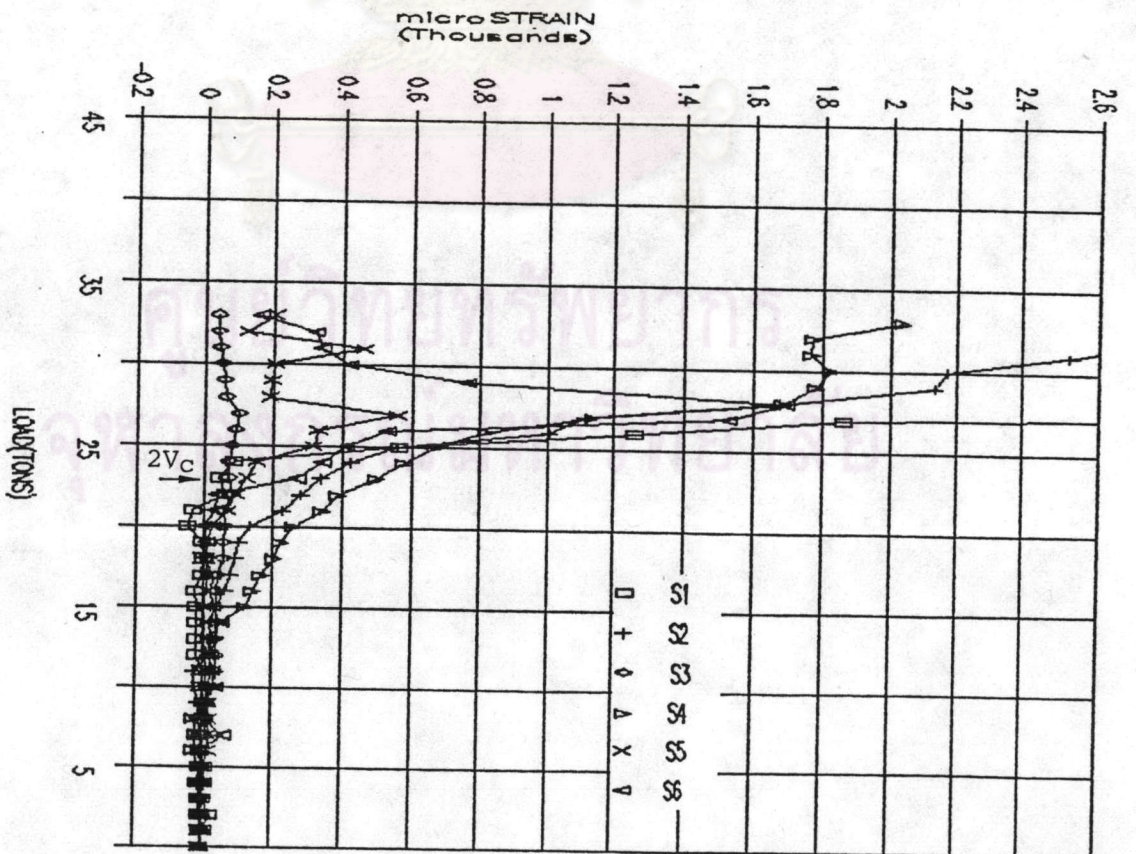
รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-3D4



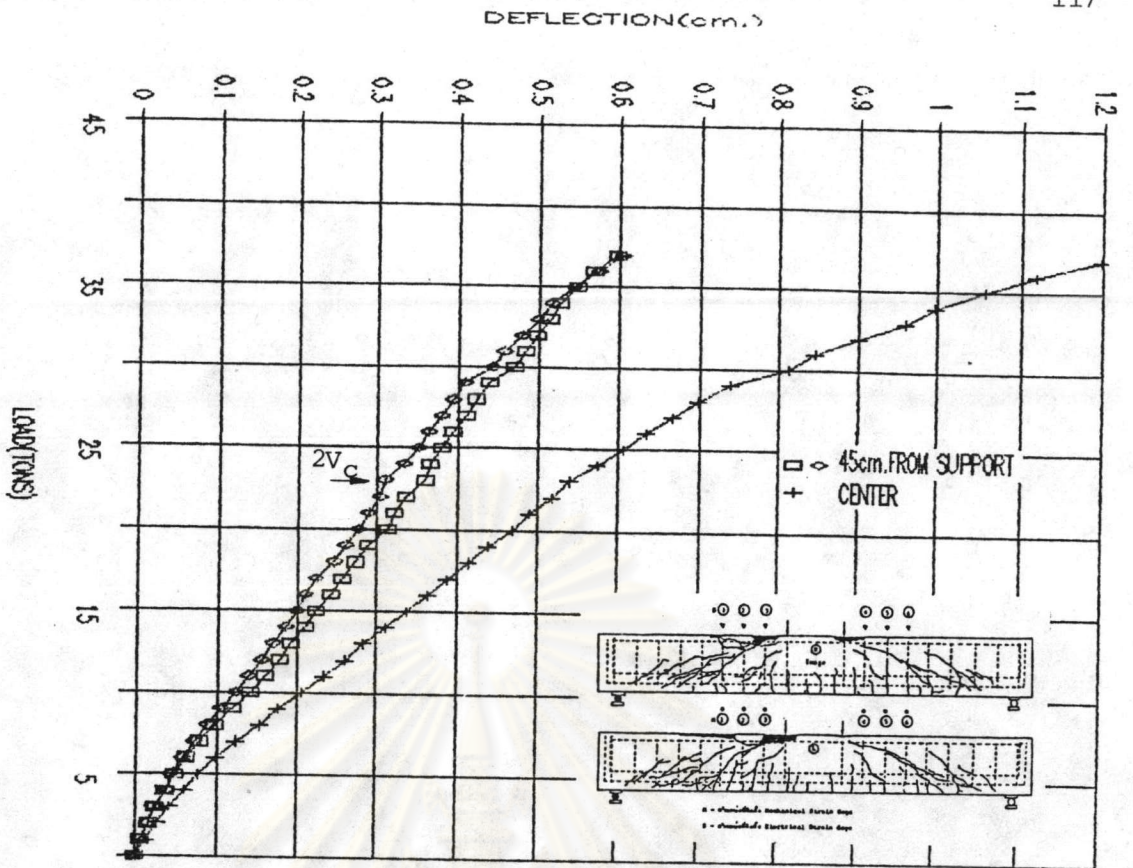
รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-3D4



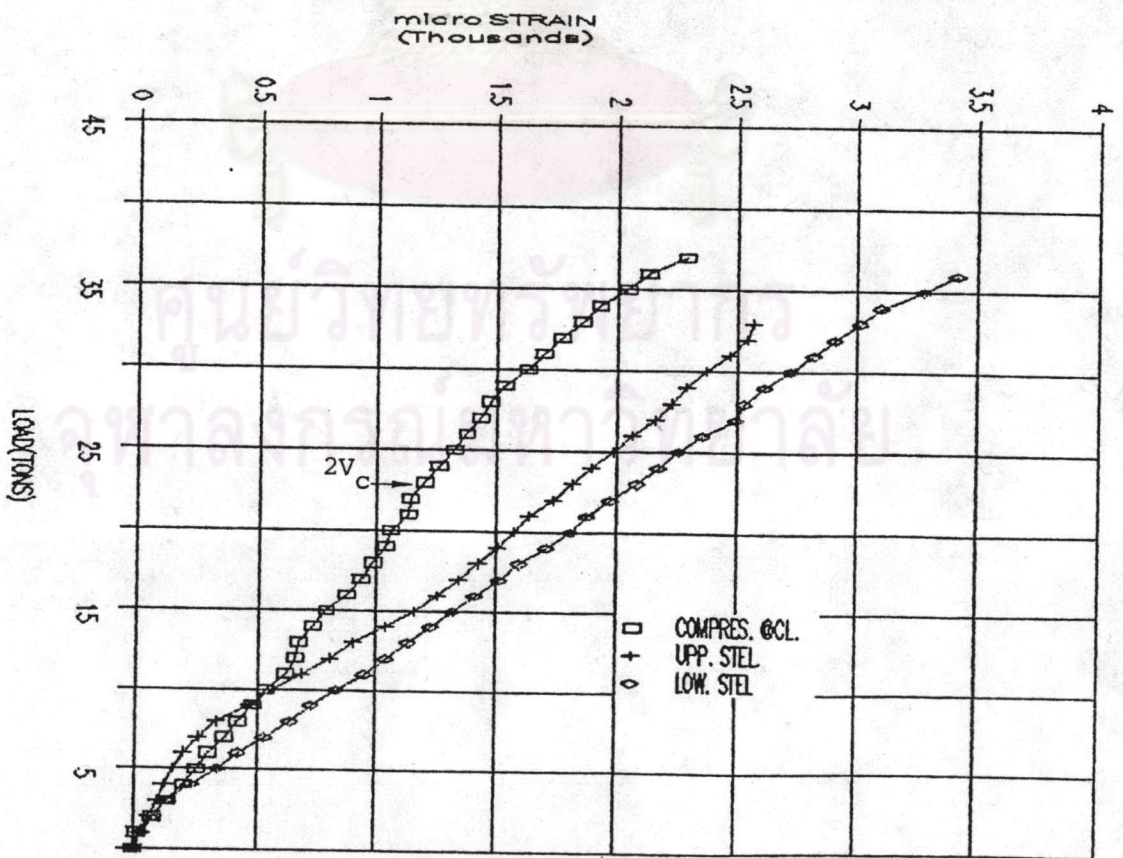
รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-3D4 (หยุดการอ่านภายหลังจาก 26 ตัน)



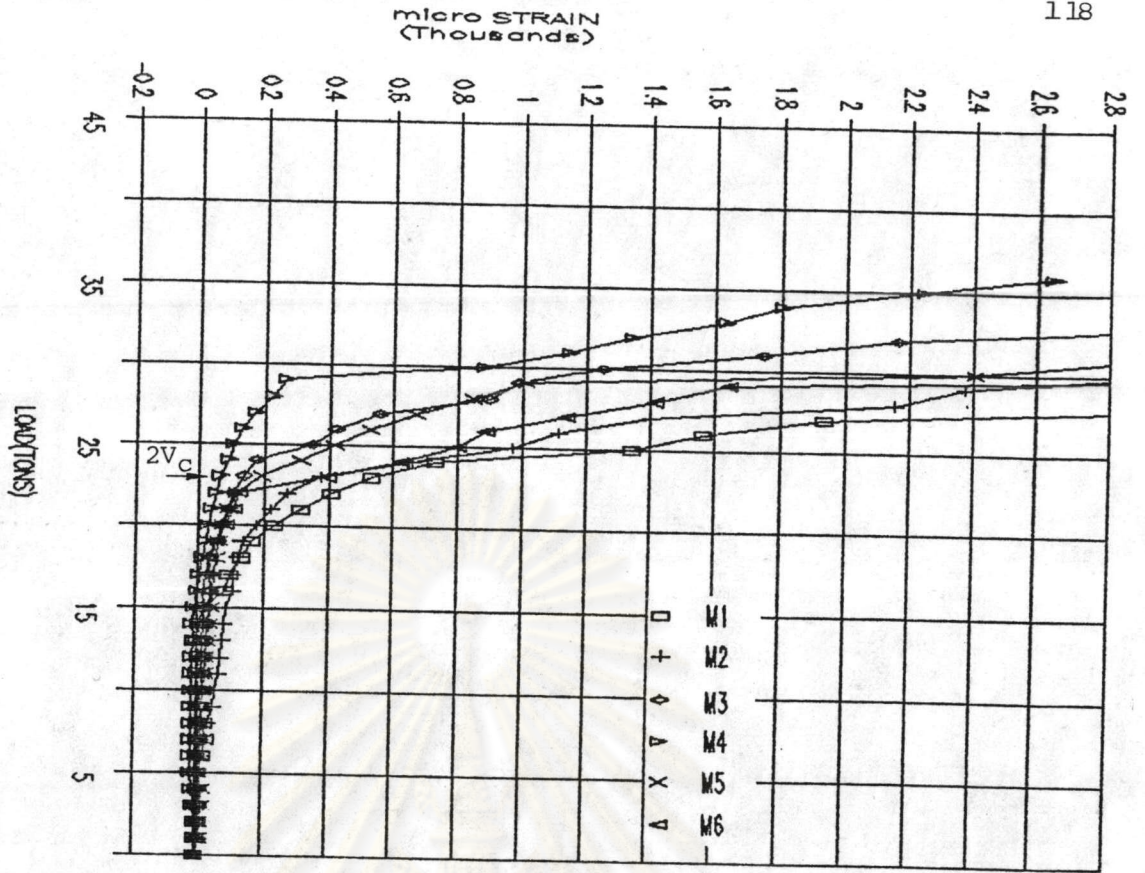
รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-3D4



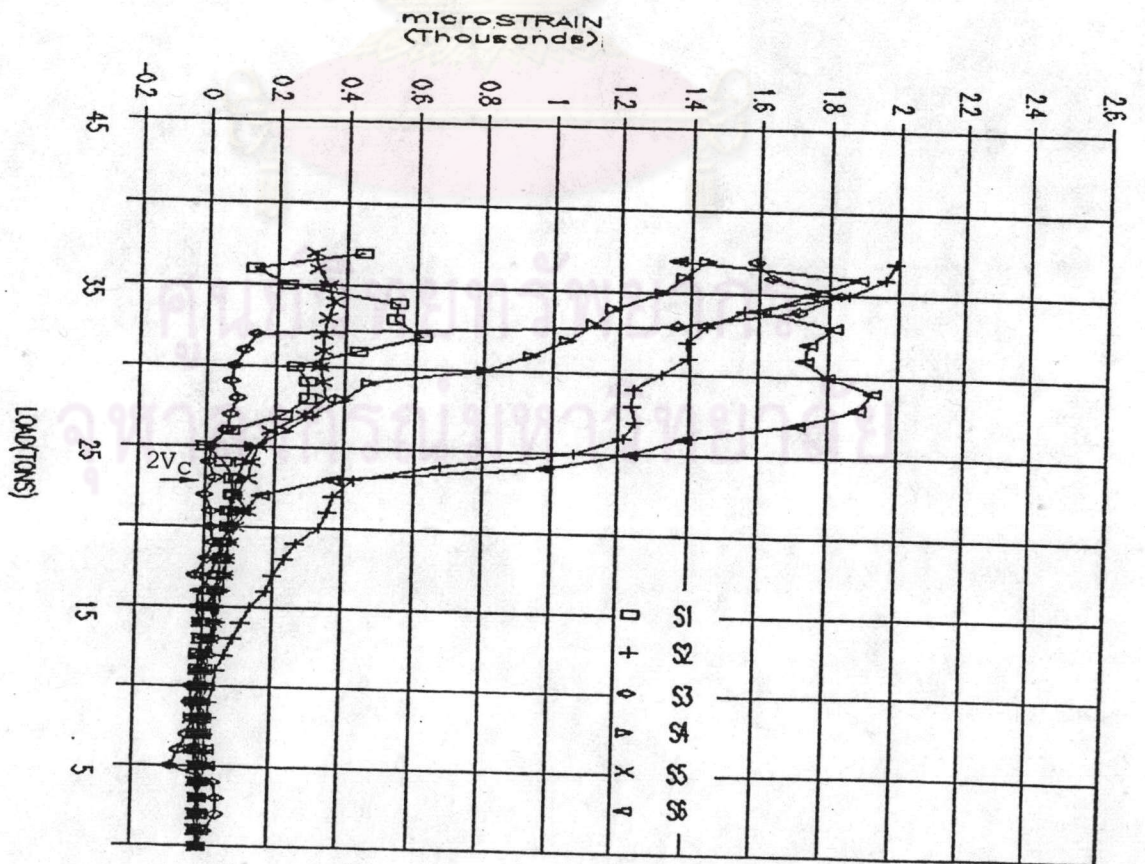
รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-D2



รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-D2

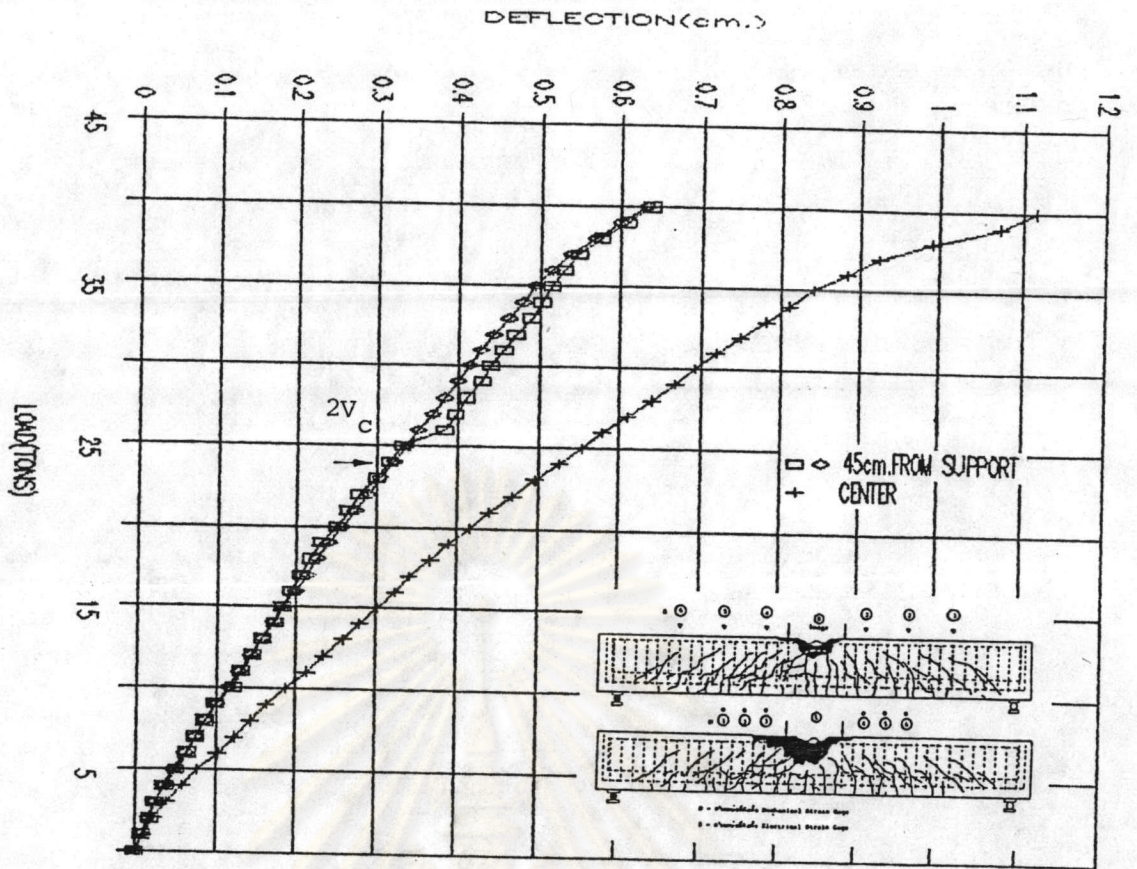


รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีต ในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-D2

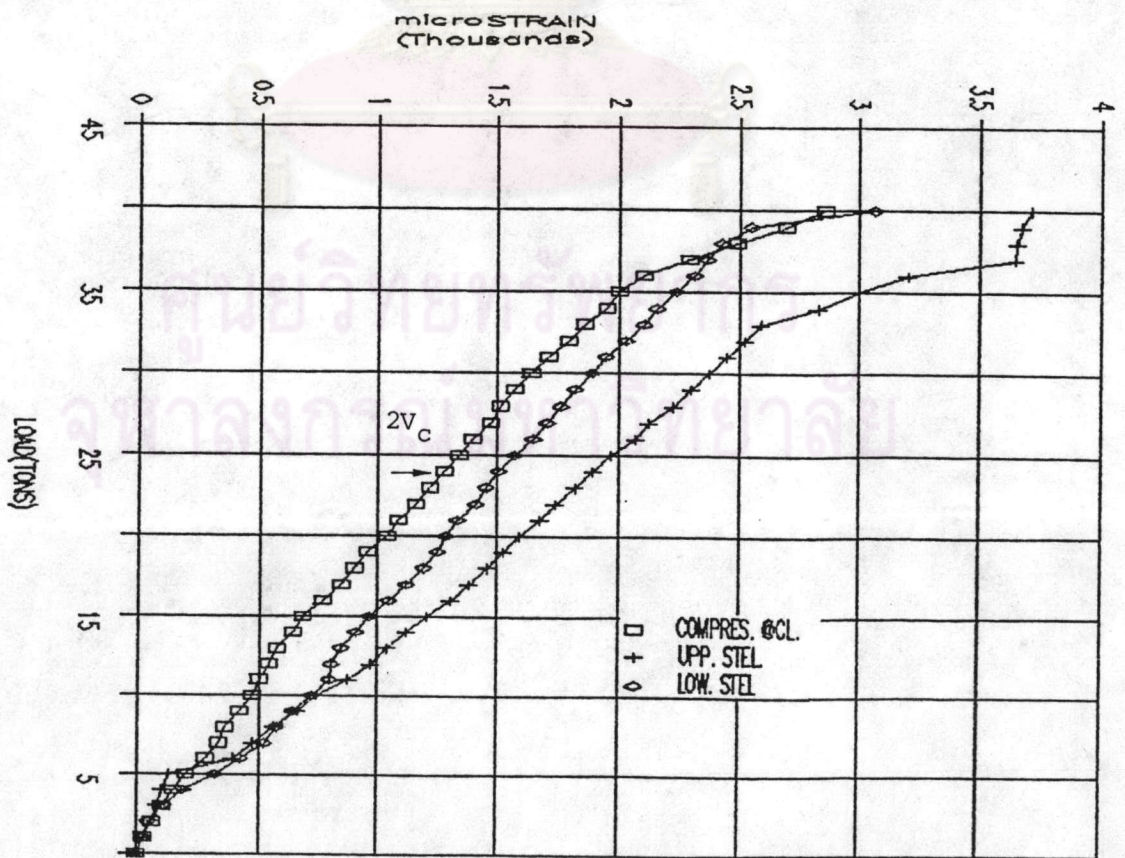


รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-D2

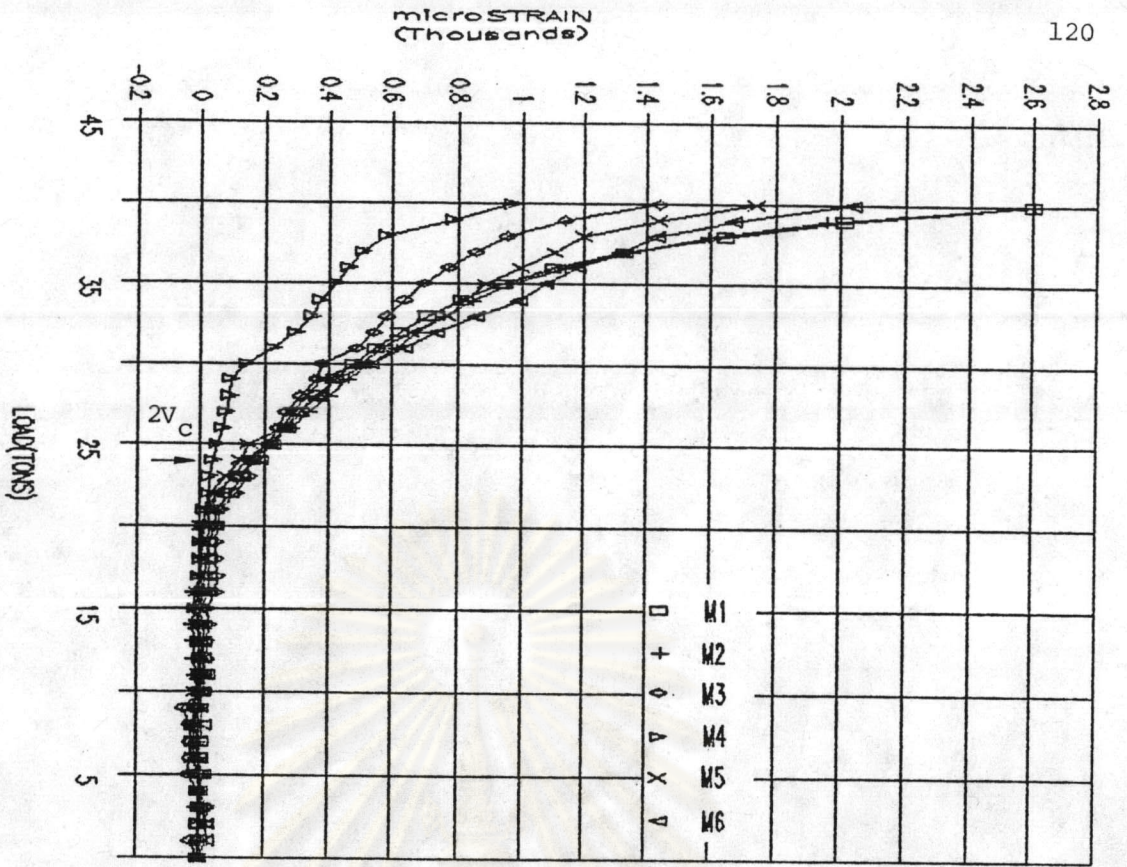




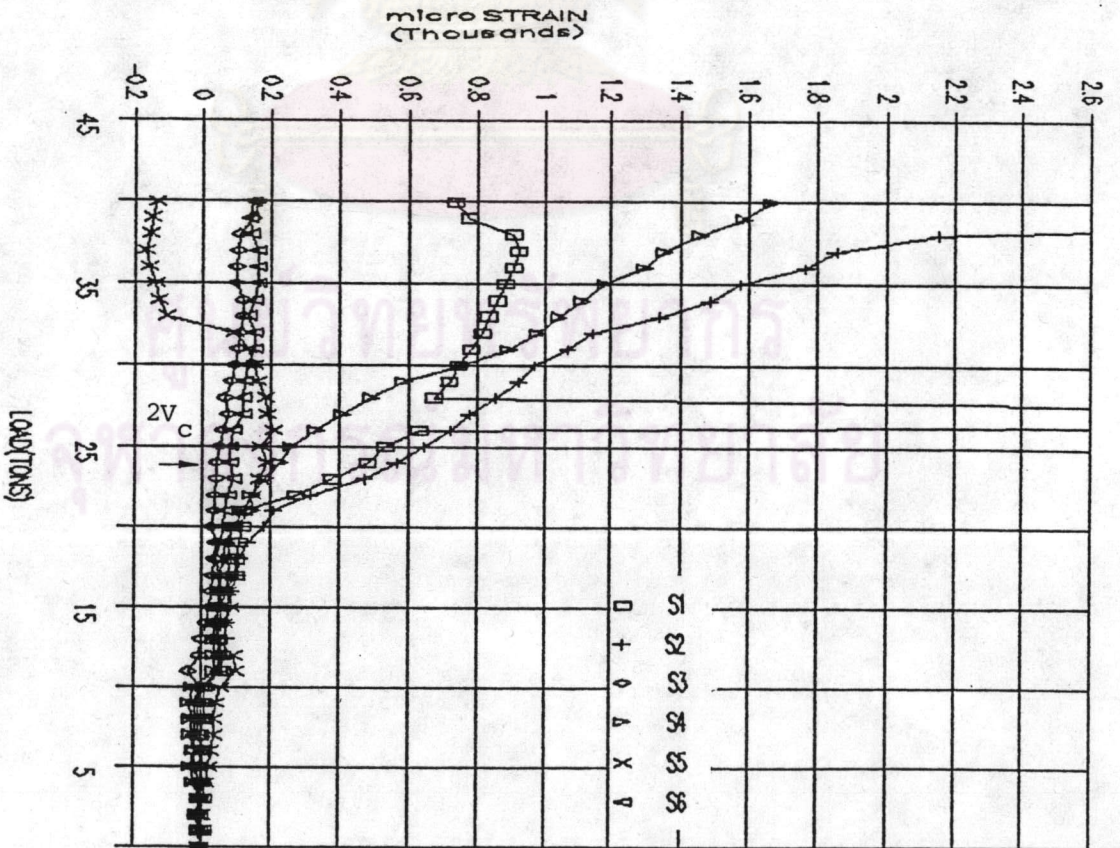
รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวของคาน BW-D4



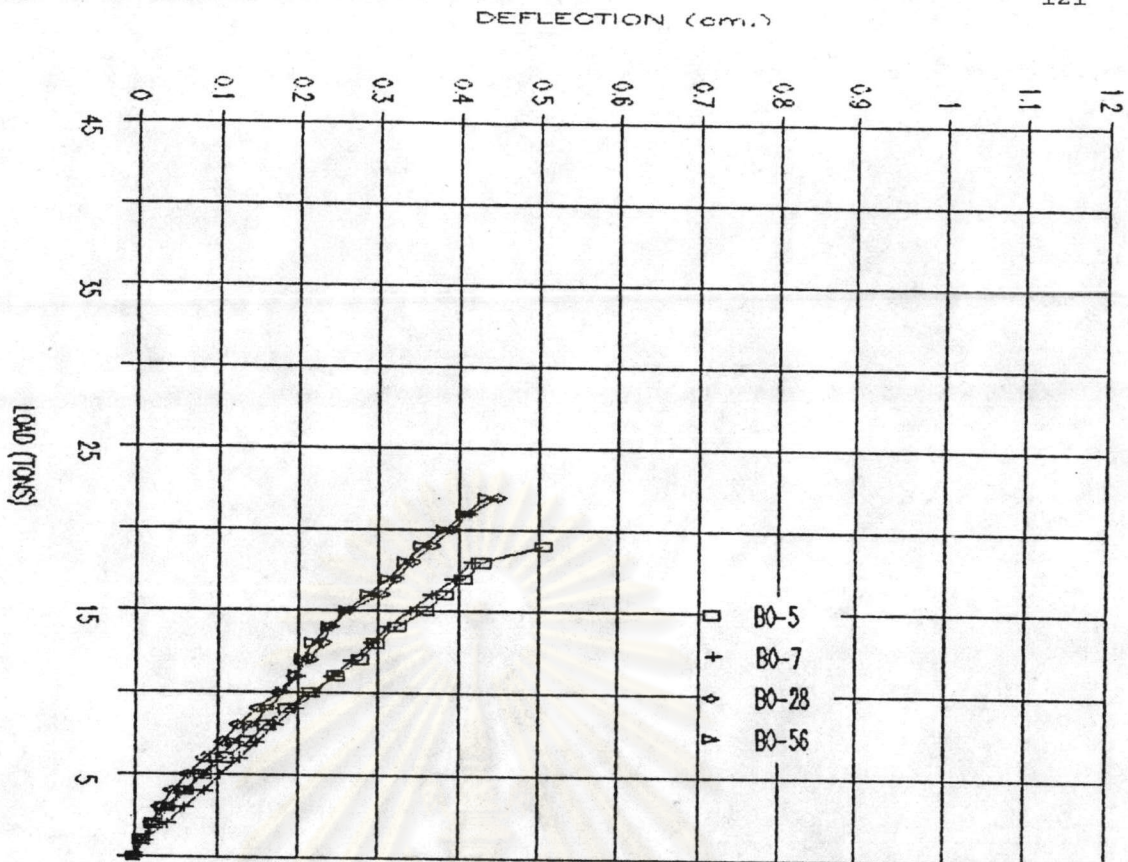
รูปที่ 2.40 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของผิวคอนกรีตและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่กึ่งกลางคานของคาน BW-D4



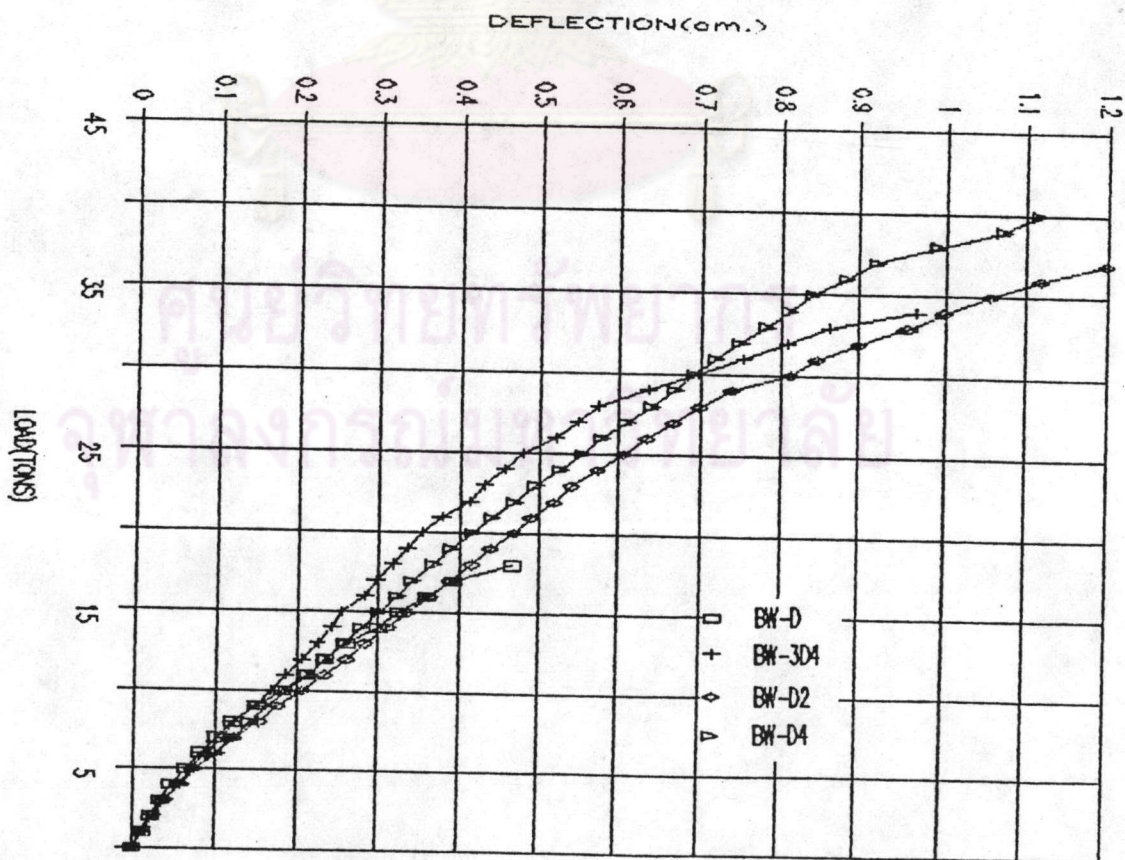
รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนของคาน BW-D4



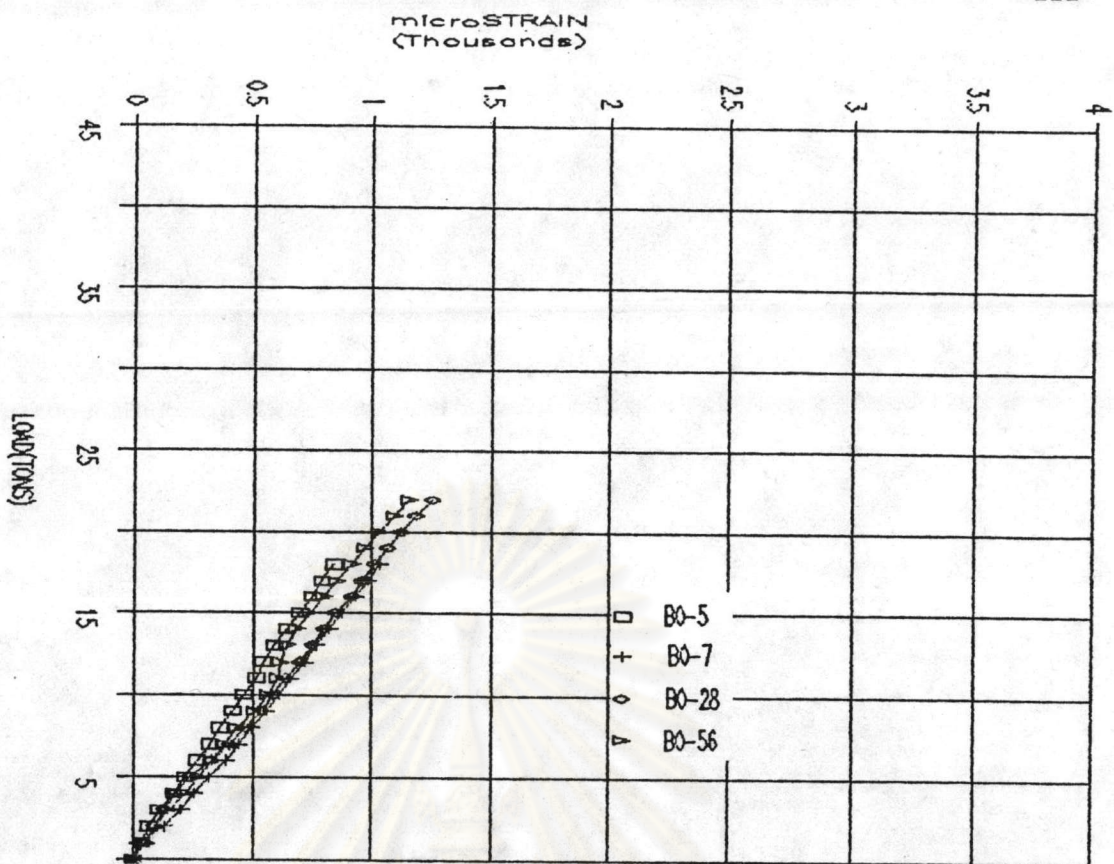
รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BW-D4



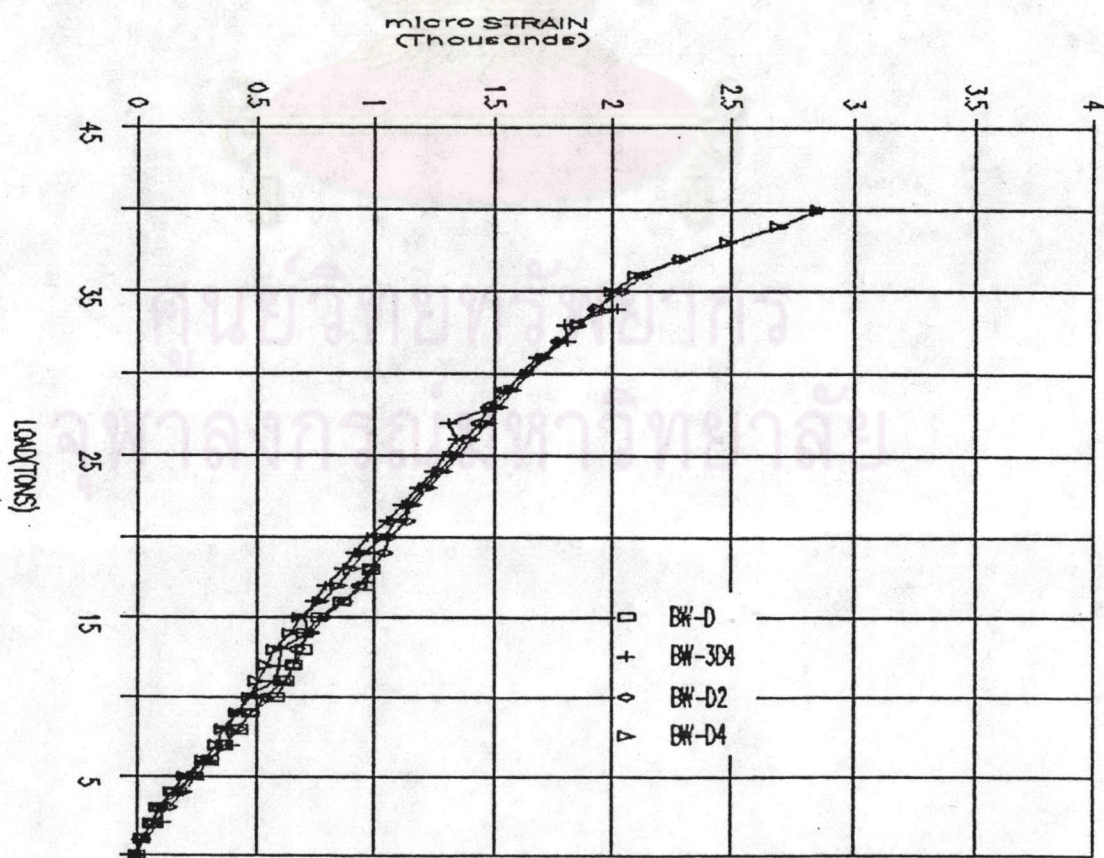
รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก



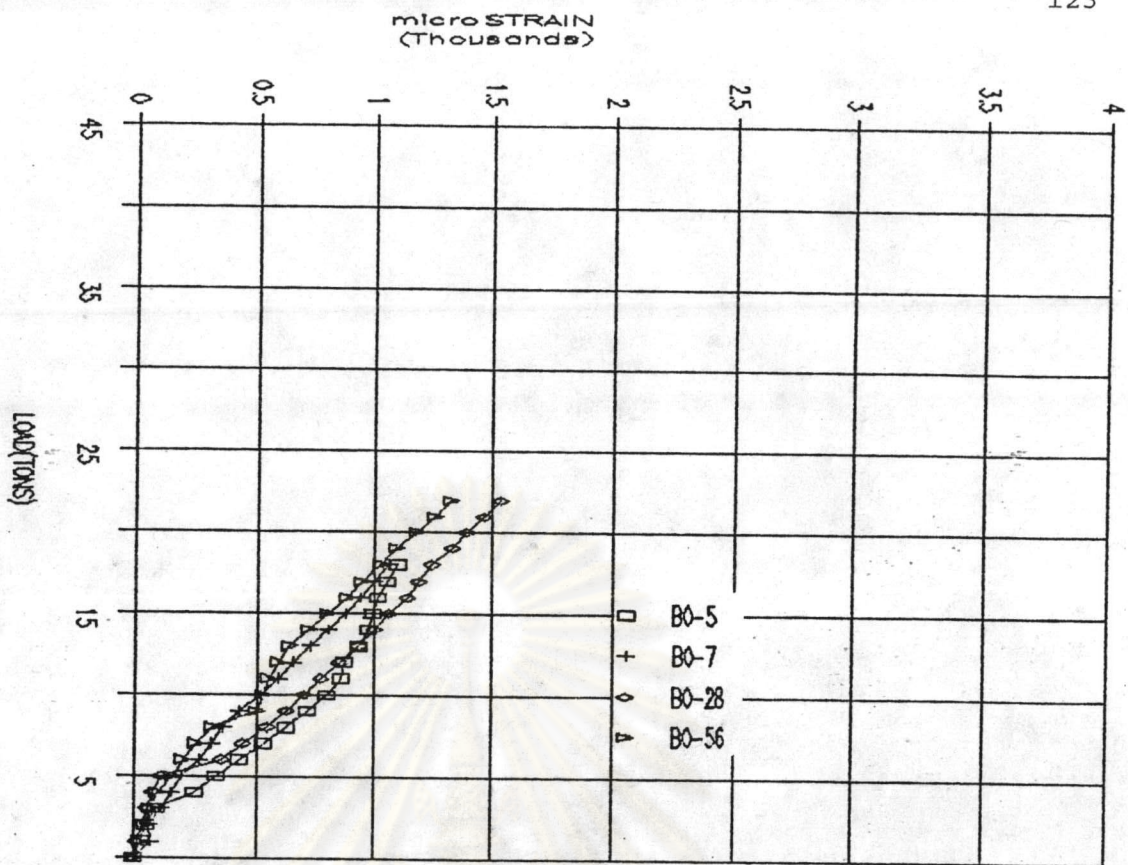
รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก



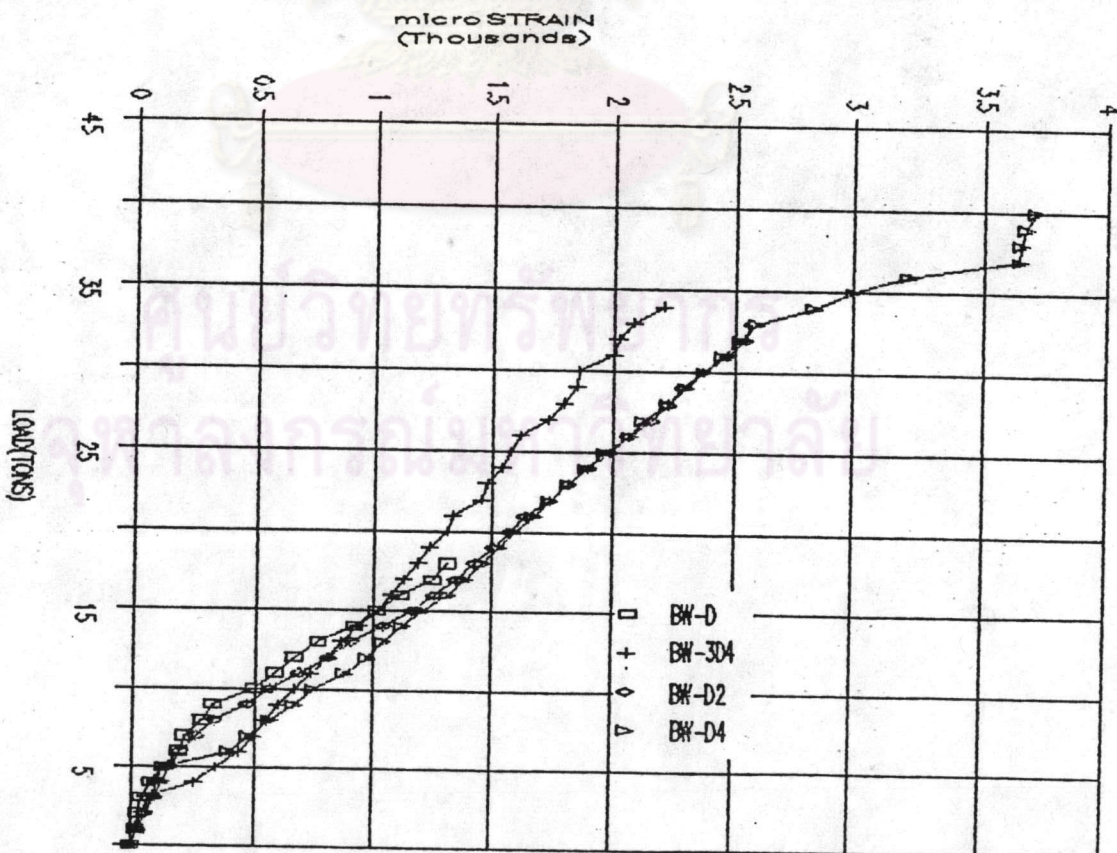
รูปที่ 2.45 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตผิวบนที่กึ่งกลางคานของคานชุดที่โบ เสริม เหล็กปลอก



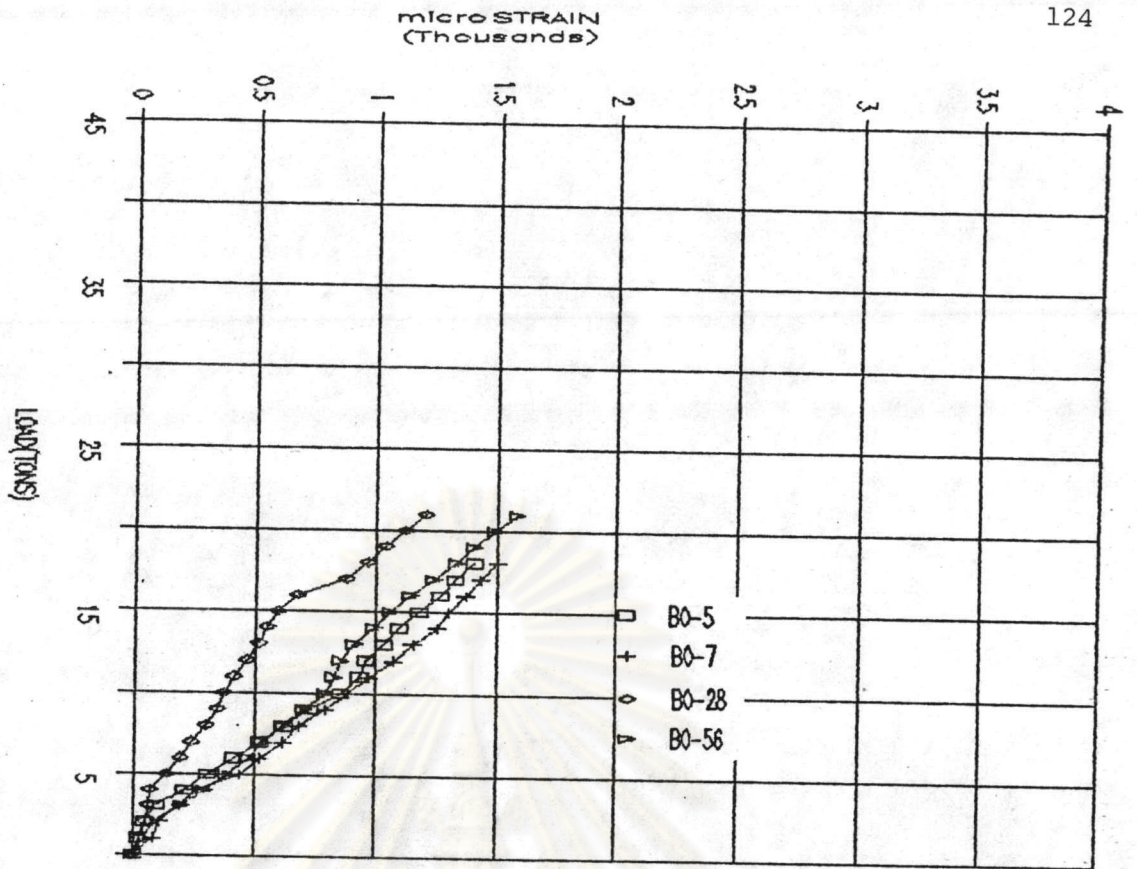
รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตผิวบนกึ่งกลางของคานชุดที่ เสริม เหล็กปลอก



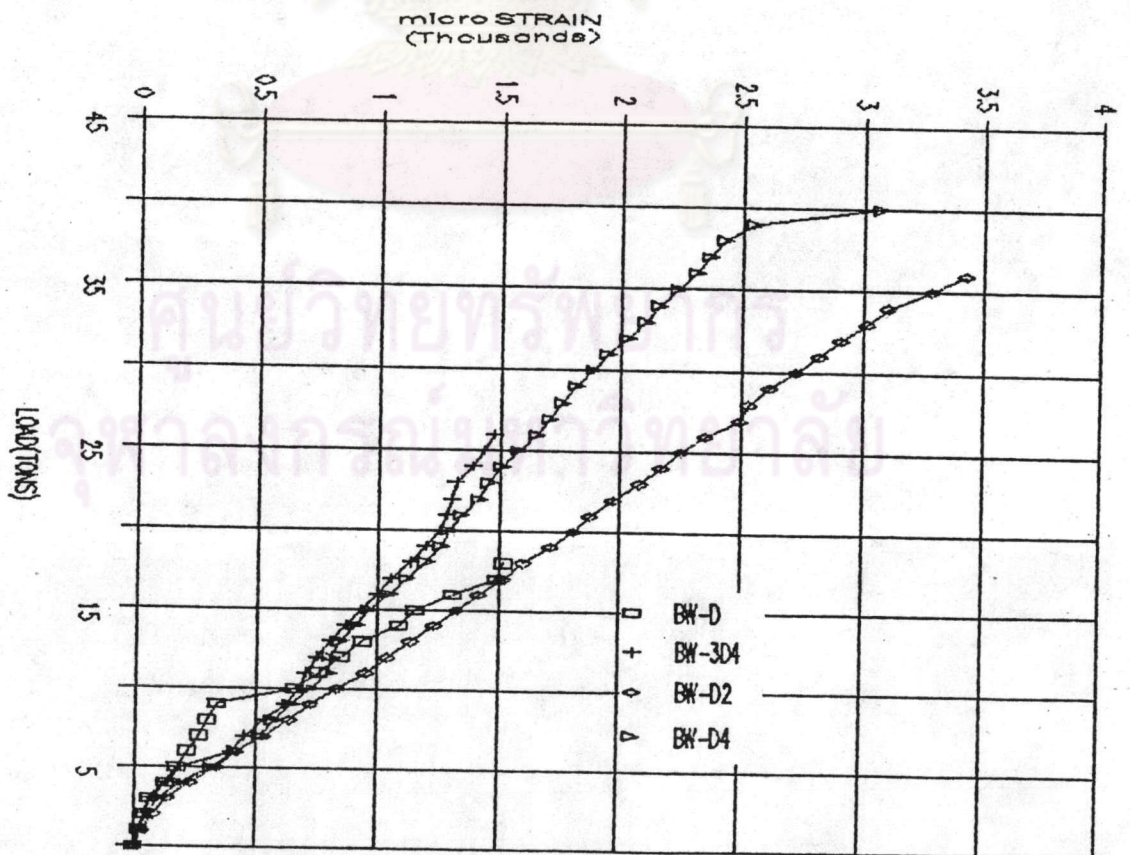
รูปที่ 2.47 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็ก เสริมตามยาวเส้นบนของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก



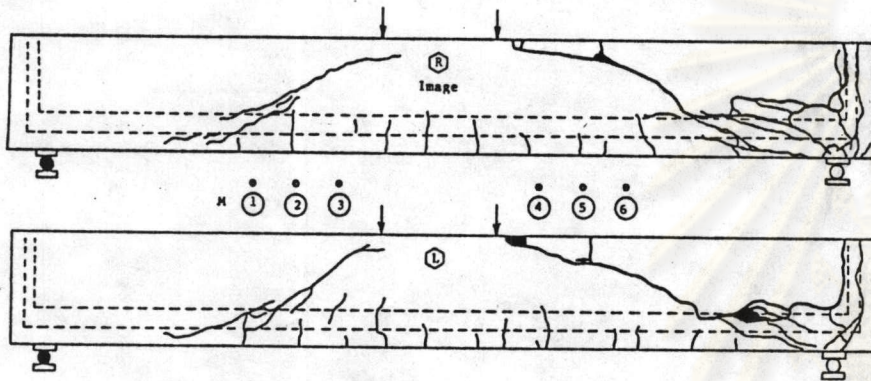
รูปที่ 2.48 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็ก เสริมตามยาวเส้นบนของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก



รูปที่ 2.49 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวเส้นล่างของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก

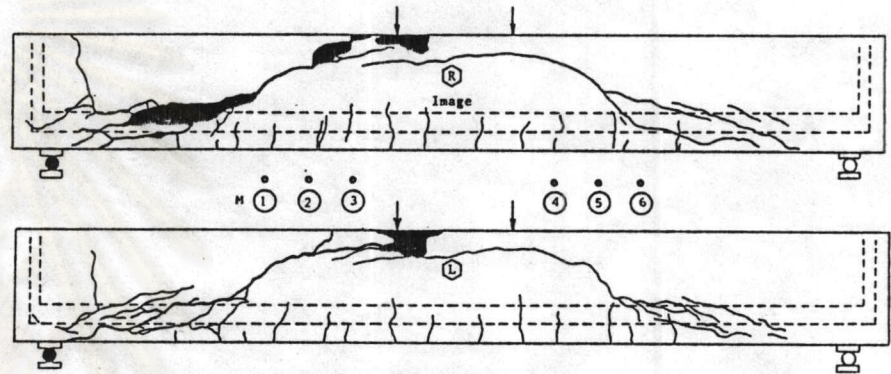


รูปที่ 2.50 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวเส้นล่างของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก



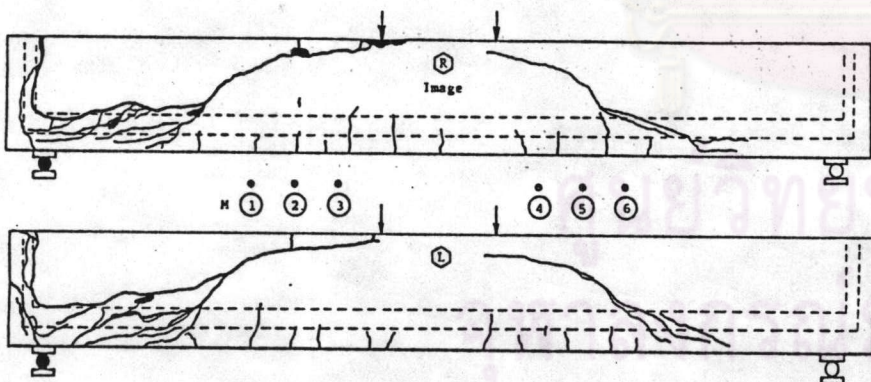
M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage

ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BO-5



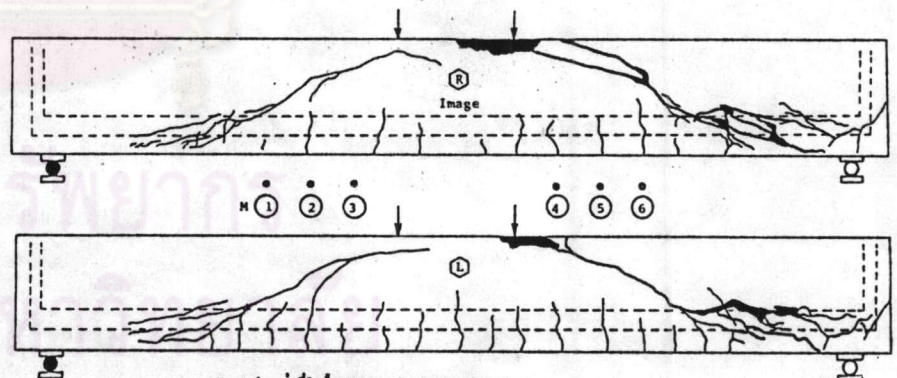
M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage

ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BO-7



M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage

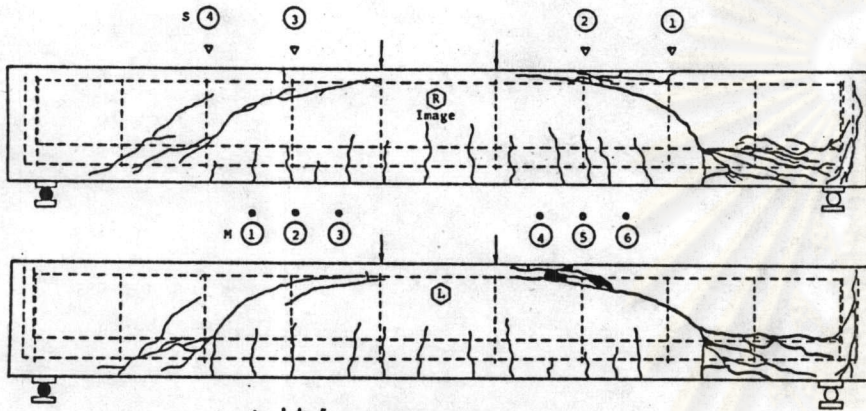
ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BO-28



M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage

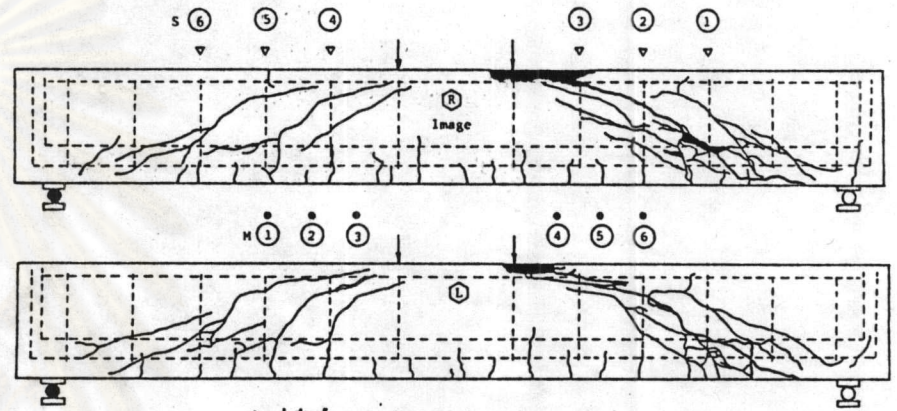
ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BO-56

รูปที่ 2.51 ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก



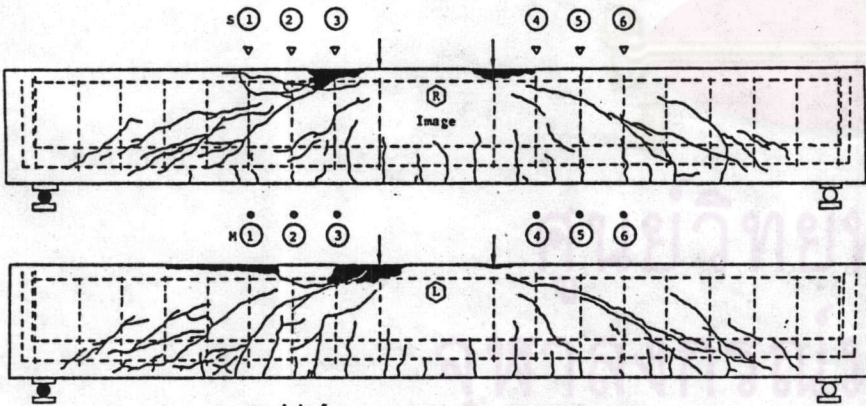
M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage  
 S - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Electrical Strain Gage

ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BK-D



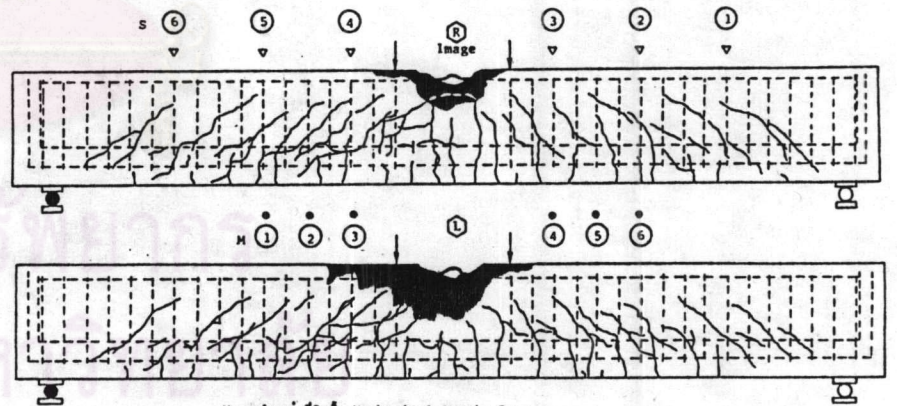
M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage  
 S - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Electrical Strain Gage

ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BW-3D4



M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage  
 S - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Electrical Strain Gage

ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BN-D2

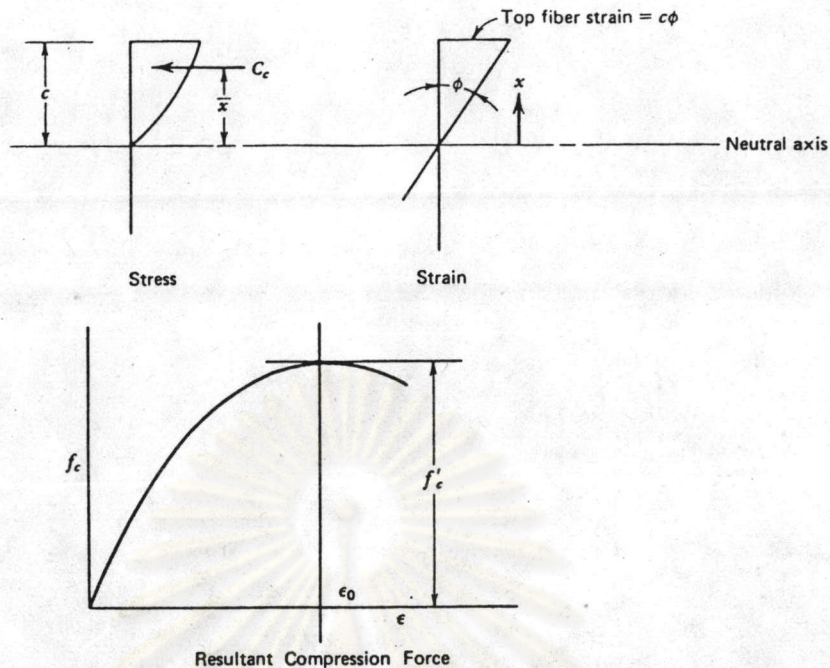


M - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Mechanical Strain Gage  
 S - ตำแหน่งที่ติดตั้ง Electrical Strain Gage

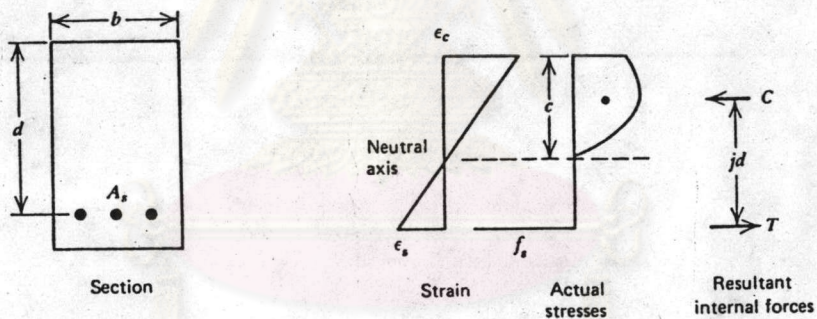
ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคาน BN-D4

รูปที่ 2.52 ลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก

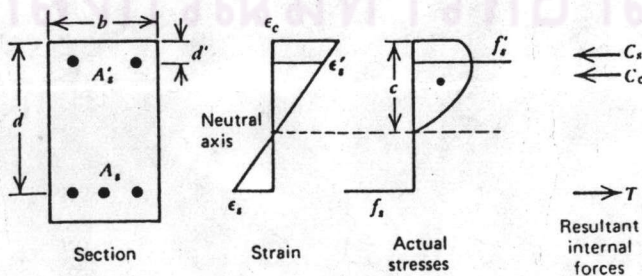




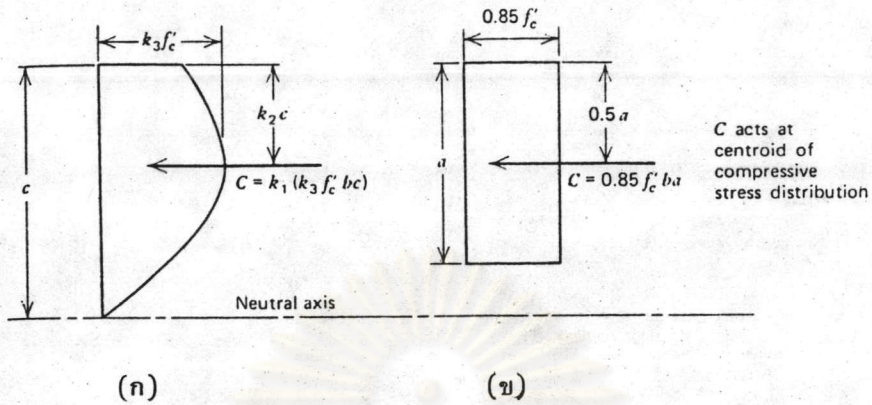
รูปที่ 3.1 แรงอัดลัพธ์ของคอนกรีต เหนือแกนสะเทิน



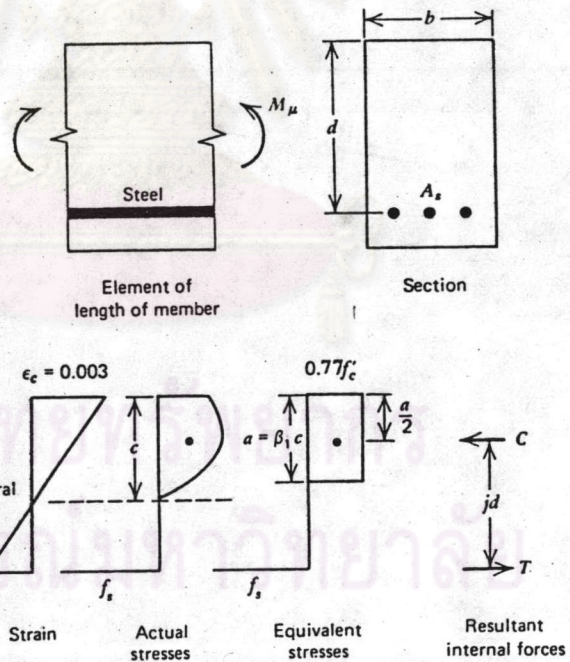
รูปที่ 3.2 หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามยาวรับแรงดึงเมื่อรับโมเมนต์



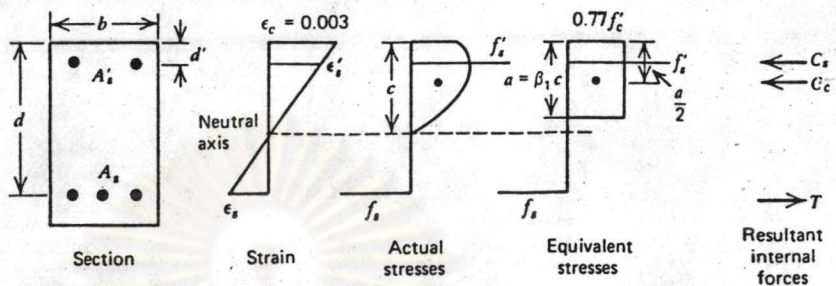
รูปที่ 3.3 หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด เมื่อรับโมเมนต์



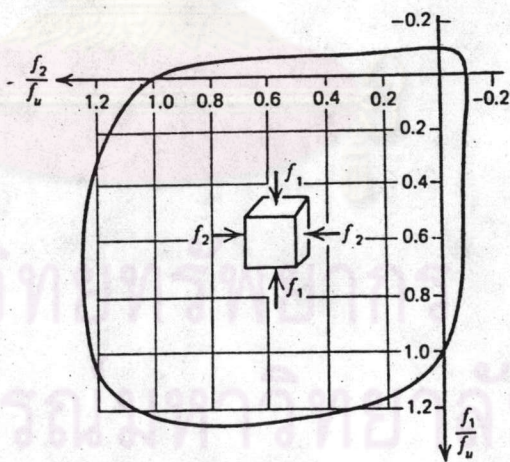
รูปที่ 3.4 การกระจายหน่วยแรงอัดในบริเวรับแรงอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI (318-83) ก. การกระจายแบบแท้จริง ข. การกระจาย เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสมบูรณ์



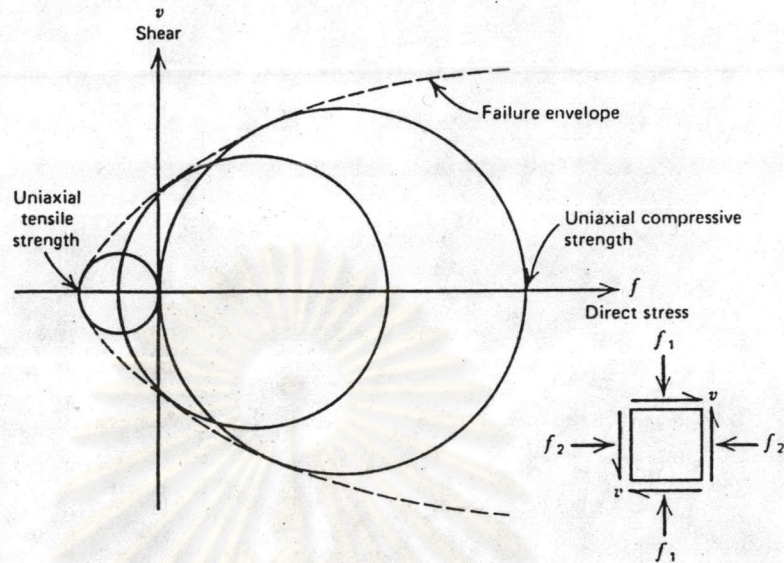
รูปที่ 3.5 หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามยาวรับแรงดึง เมื่อรับโมเมนต์ตัดประลัย



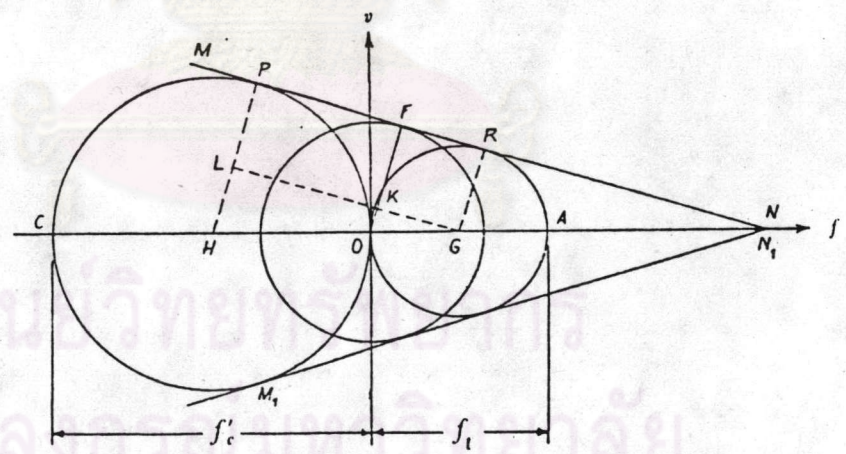
รูปที่ 3.6 หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริม เหล็กตามยาวรับแรงดึงและแรงอัด  
เมื่อรับโมเมนต์คดประลัย



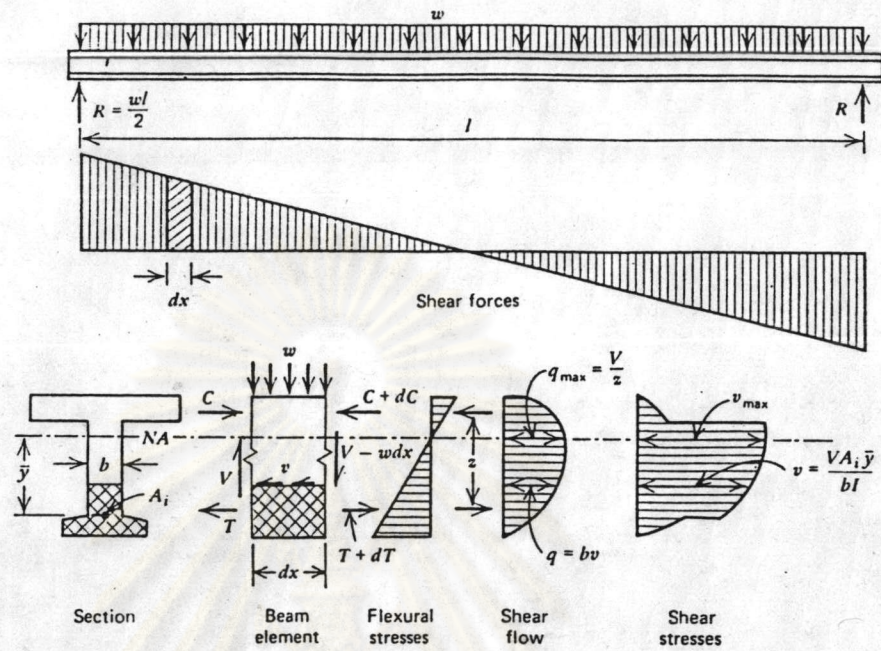
รูปที่ 3.7 กำลังของคอนกรีตถูกหน่วยแรงกระทำ 2 แกน  
โดย  $f_u$  = กำลังของคอนกรีตถูกหน่วยแรงกระทำแกนเดียว



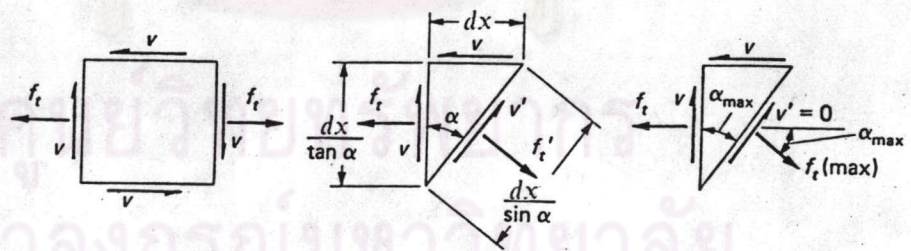
รูปที่ 3.8 กำลังของคอนกรีตภายใต้ระบบหน่วยแรง 2 มิติ



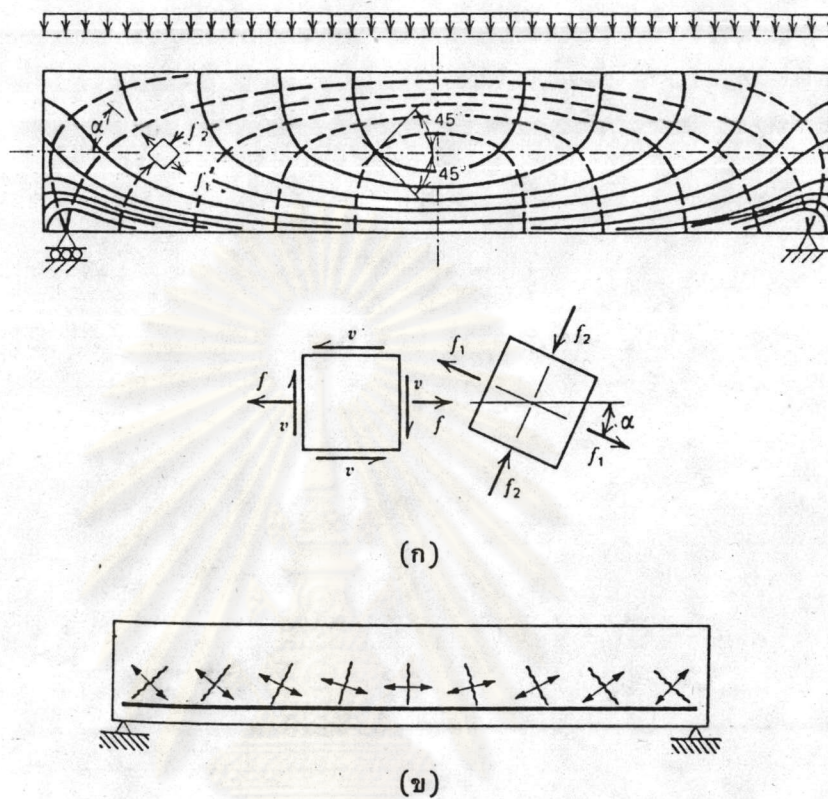
รูปที่ 3.9 วงกลม Mohr ใช้ในการหาค่าหน่วยแรงเฉือนลื่นของคอนกรีต



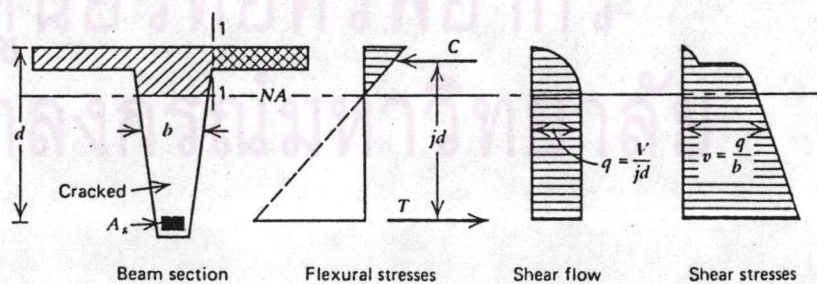
รูปที่ 3.10 แรงเฉือน การไหลของแรงเฉือนและหน่วยแรงเฉือนในคาน  
เนื้อเดี่ยวกดสมบัติสม่ำเสมอ



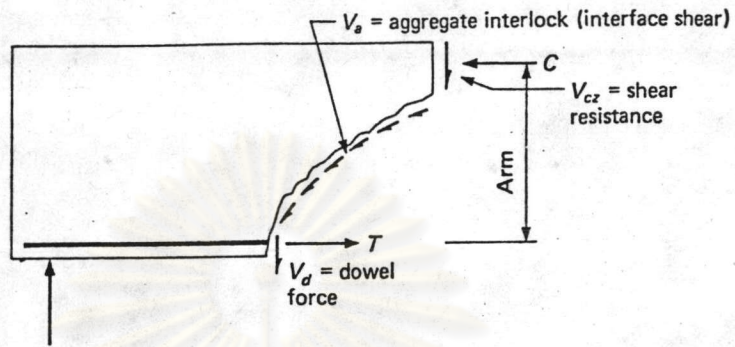
รูปที่ 3.11 สภาพหน่วยแรงของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ



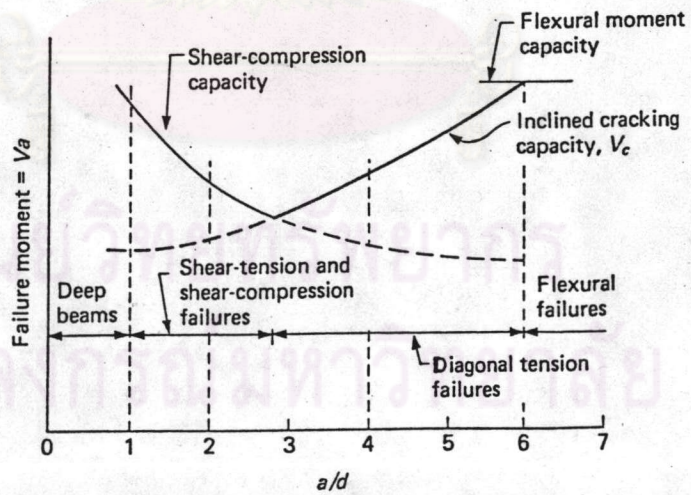
รูปที่ 3.12 (ก) เส้นแสดงหน่วยแรงหลักในคานเนื้อเดียวคุณสมบัติสม่ำเสมอ  
 (ข) ทิศทางของรอยแตกกร้าวในคานช่วงเดียว



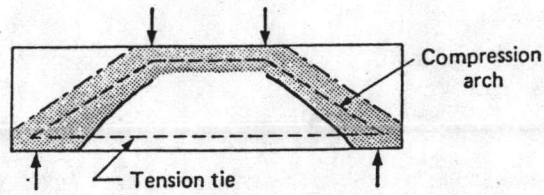
รูปที่ 3.13 หน่วยแรงเฉือนบนหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กแตกกร้าวในอุดมคติ



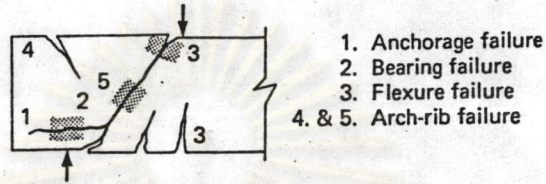
รูปที่ 3.14 การกระจายแรงเฉือนใหม่ภายหลังการเกิดรอยแตกแนวทแยง



รูปที่ 3.15 การแปรผันในกำลังรับแรงเฉือนที่ขึ้นกับค่า  $a/d$  ของคาน  
หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (59)



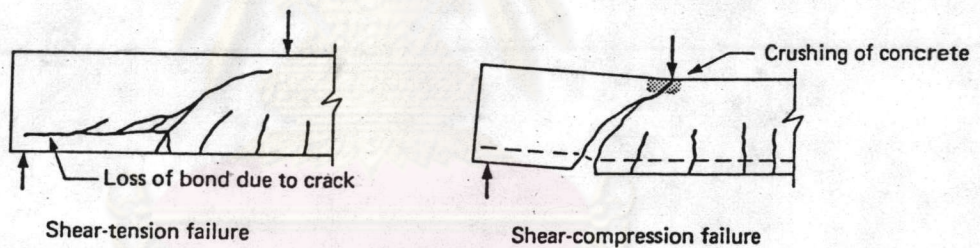
(ก)



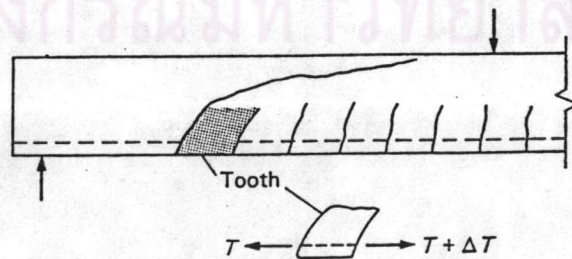
(ข)

รูปที่ 3.16 ชนิดของการวิบัติในคานเล็ก,  $a/d \leq 1.0$  <sup>(59)</sup>

(ก) Arch action (ข) ชนิดของการวิบัติ

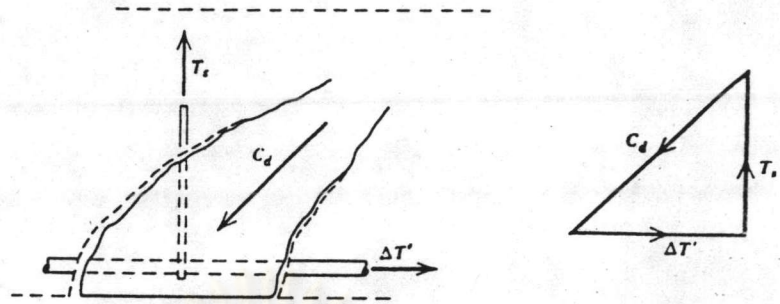


รูปที่ 3.17 ชนิดของการวิบัติในคานสั้น,  $1.0 < a/d \leq 2.5$  <sup>(59)</sup>

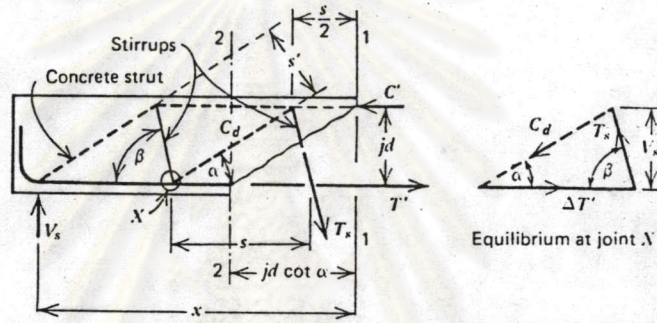


รูปที่ 3.18 การวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยงหรือแบบ Tooth Cracking ในคานความยาวปานกลาง,  $2.5 < a/d \leq 6.0$  <sup>(59)</sup>

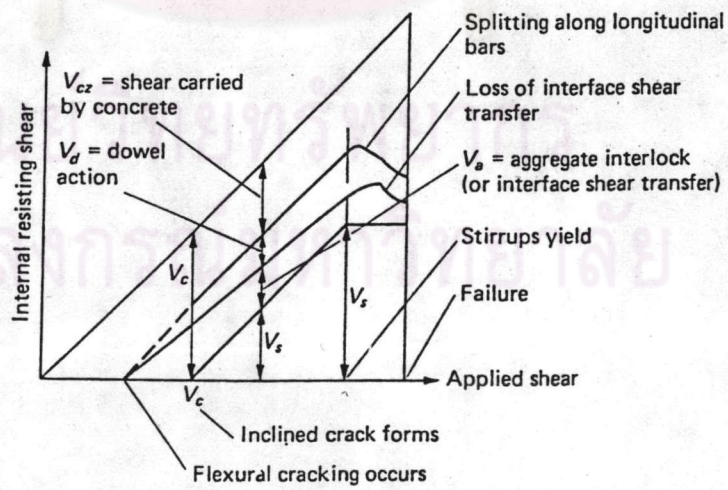




รูปที่ 3.19 ในคานคอนกรีต เสริมเหล็กมีเหล็กปลอกคานกรีตระหว่างรอยแตกทำให้ทำหน้าที่เหมือน Struts

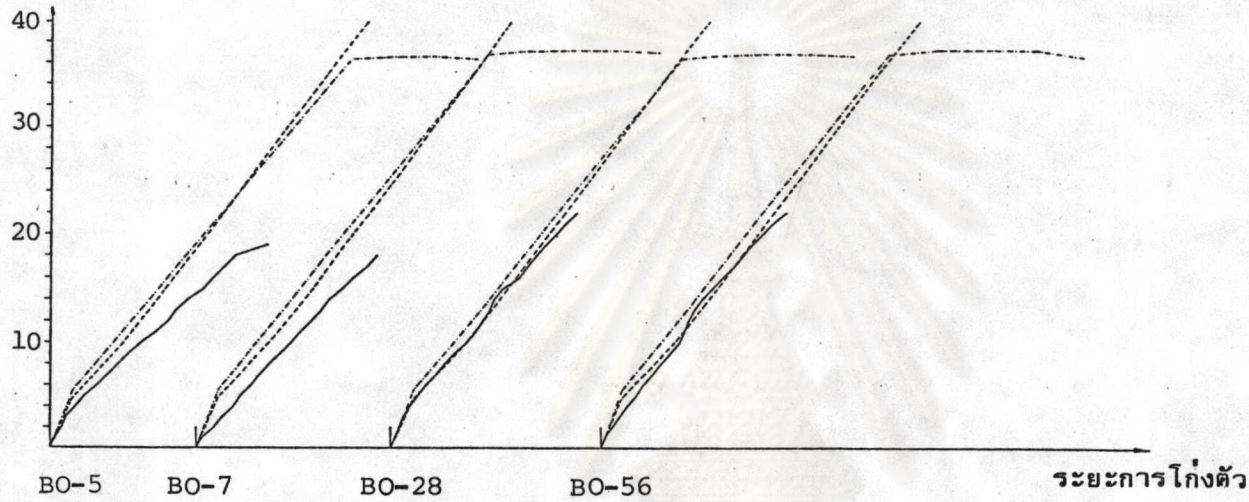


รูปที่ 3.20 แรงภายในในโครงข้อหมุนอุปมัย

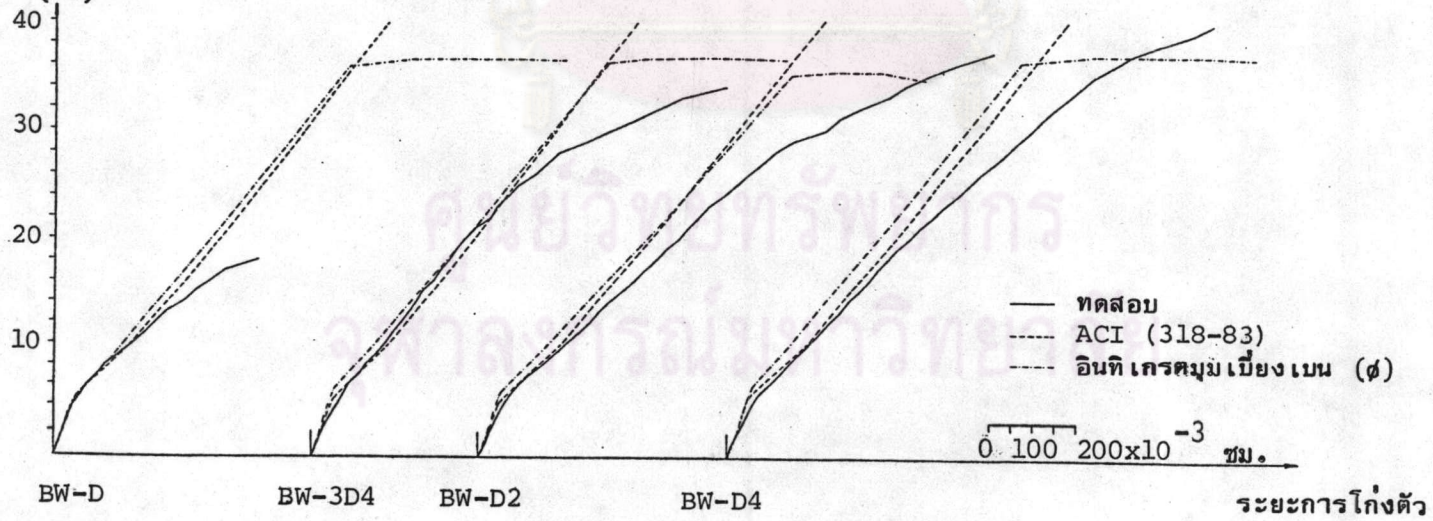


รูปที่ 3.21 การกระจายแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอก (58)

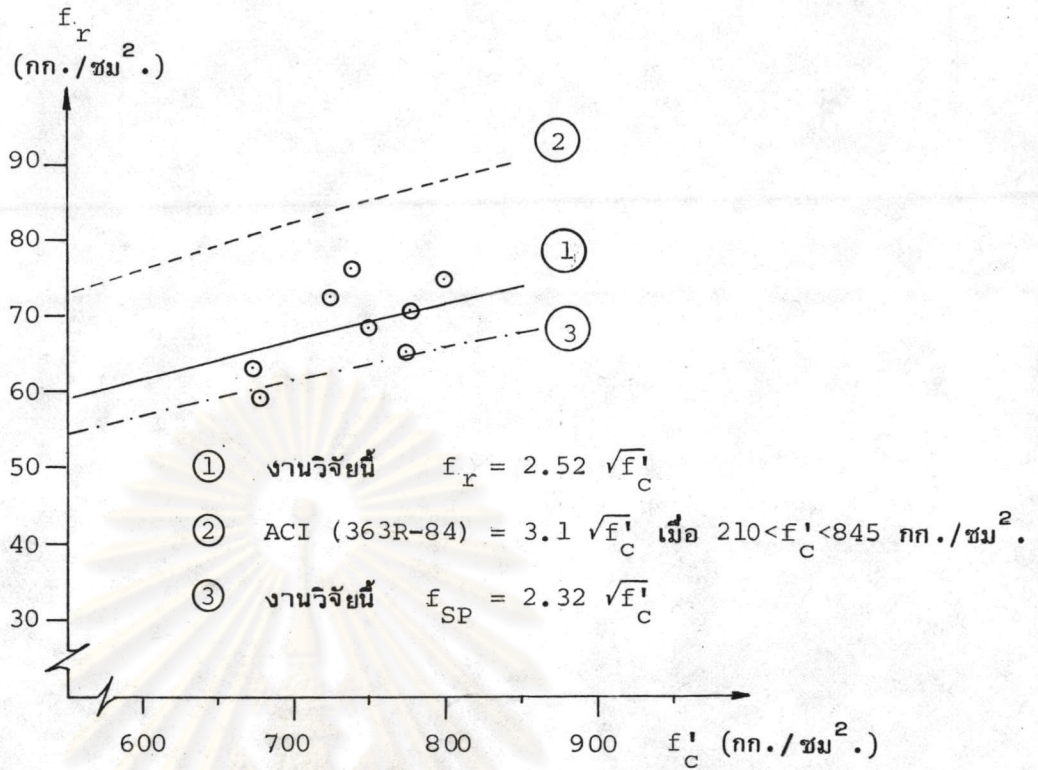
น้ำหนักบรรทุก  
(ตัน)



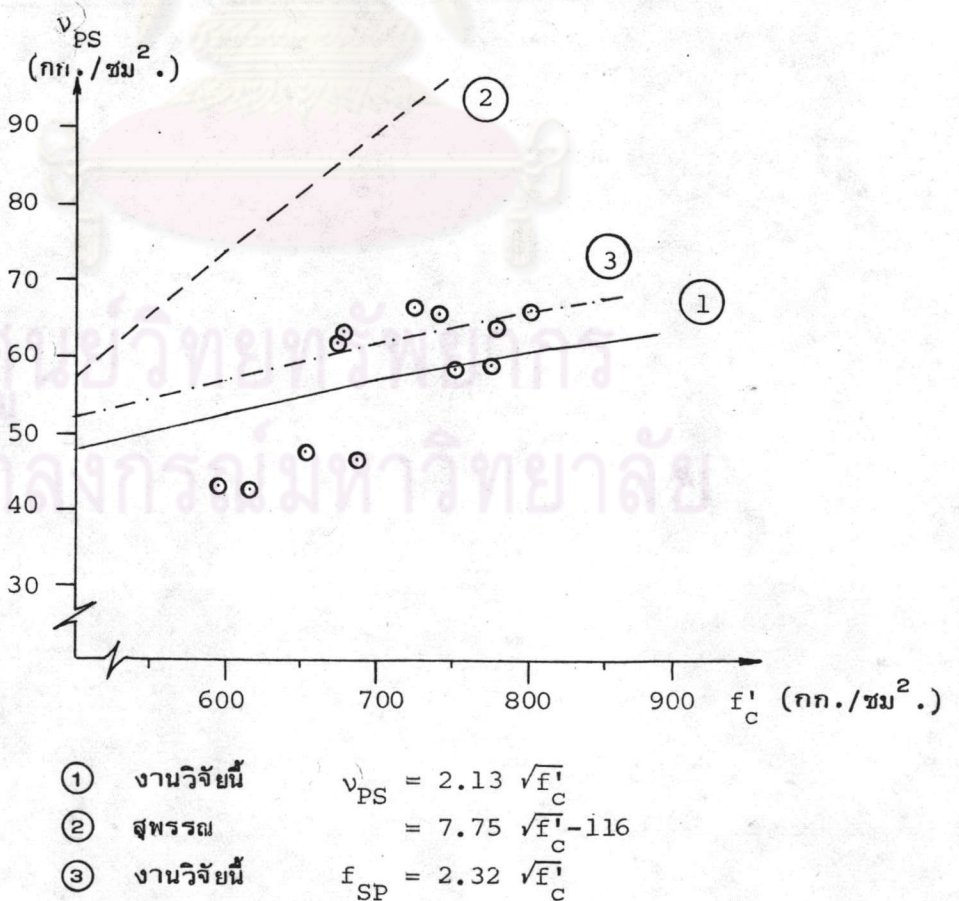
น้ำหนักบรรทุก  
(ตัน)



รูปที่ 4.1 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานจากการคำนวณและการทดสอบ

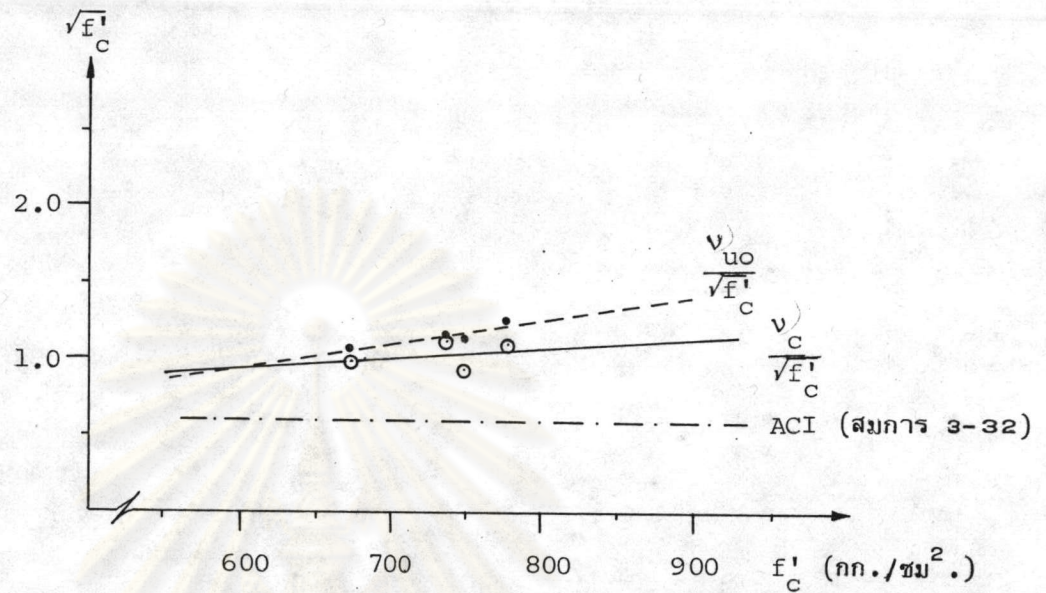


รูปที่ 4.2 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าว ( $f_r$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมากจากงานวิจัยนี้



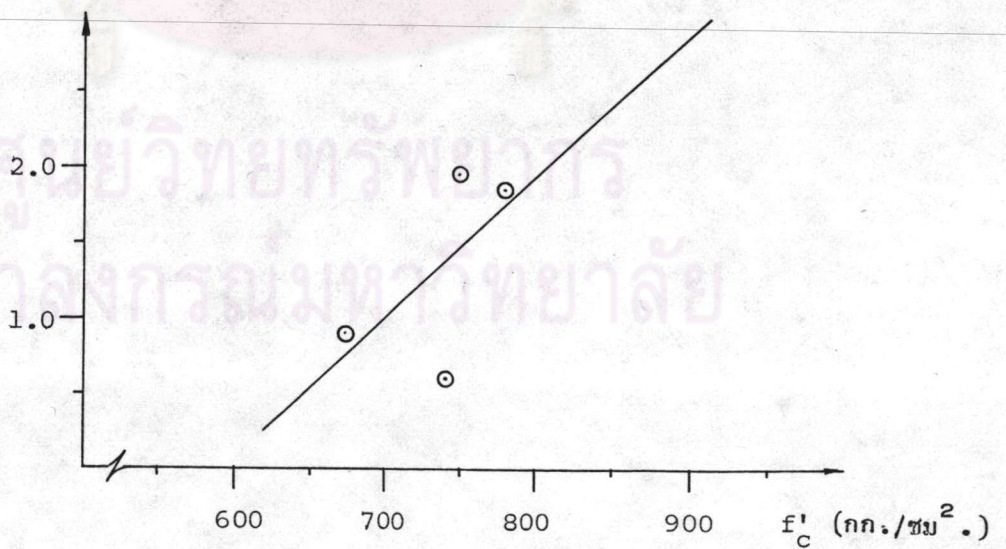
รูปที่ 4.3 เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนล้วน ( $v_{PS}$ ) กับกำลังอัดประลัย ( $f'_c$ ) ของคอนกรีตกำลังสูงมากจากงานวิจัยนี้

หน่วยแรงเฉือน

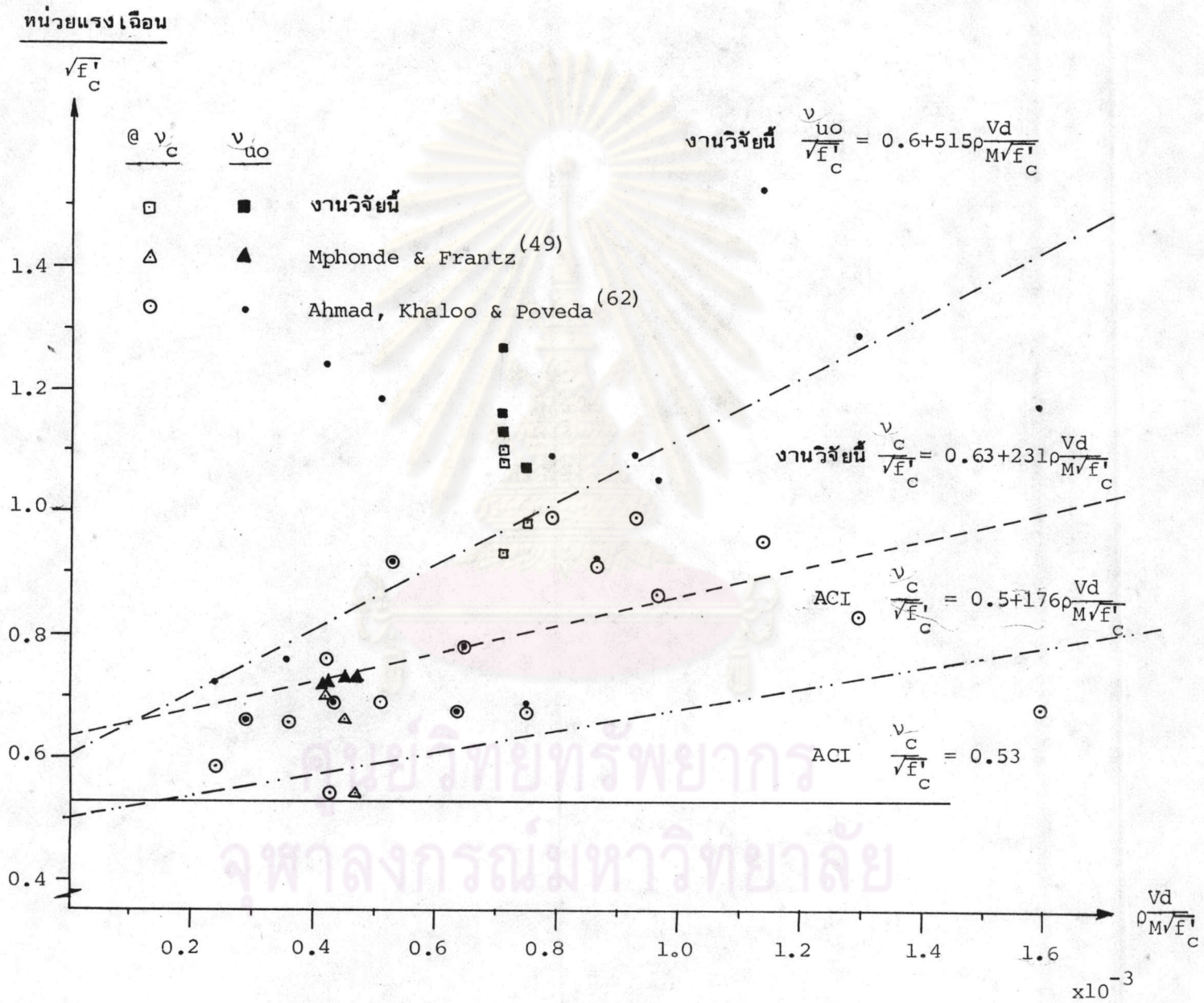


รูปที่ 4.4 อิทธิพลของกำลังอัดประลัยต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่เสริมเหล็กปลอก

$$\frac{v_{uo} - v_c}{\sqrt{f'_c}}$$

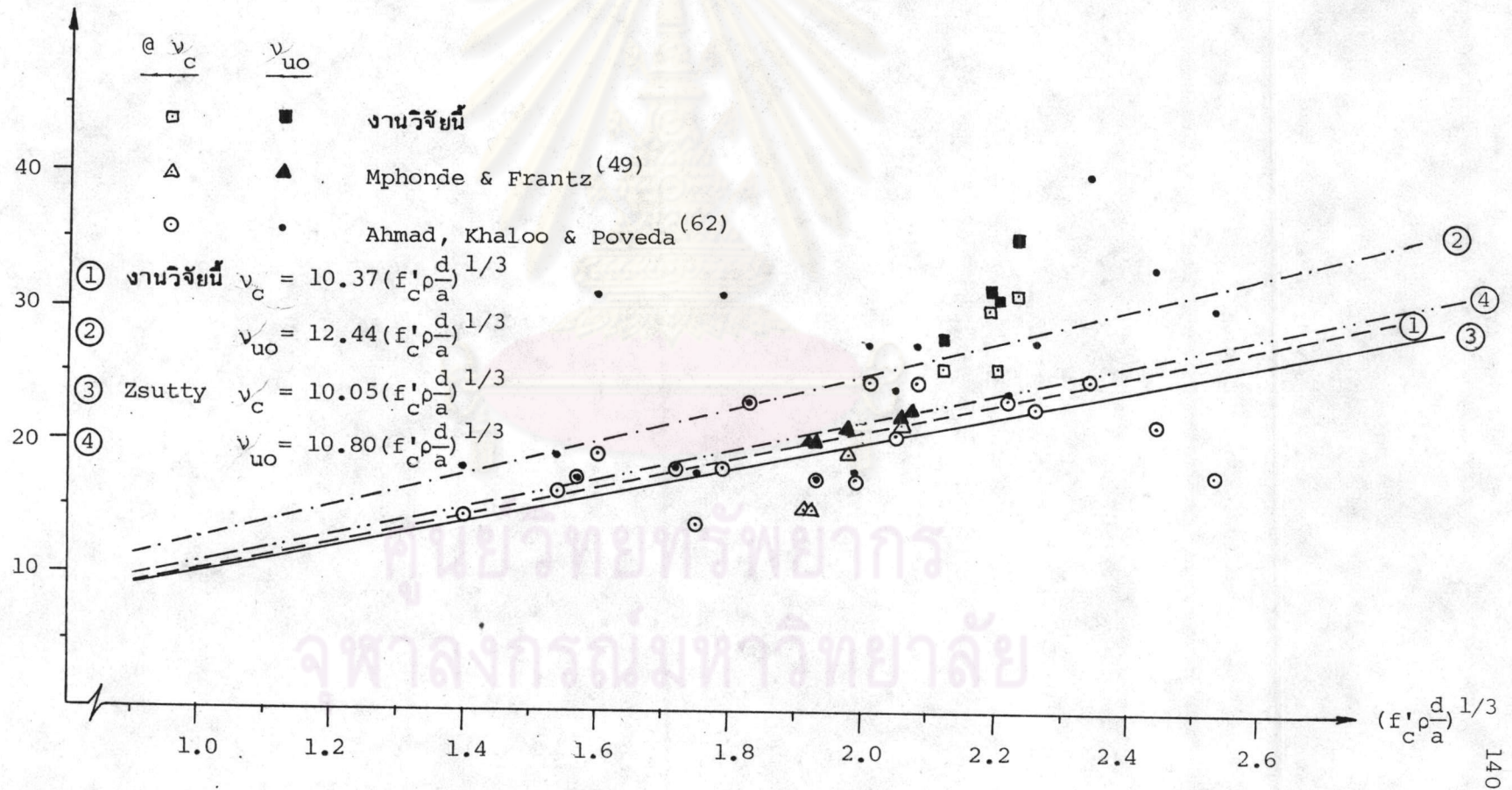


รูปที่ 4.5 อิทธิพลของกำลังอัดประลัยต่อกำลังรับแรงเฉือนส่วนที่เหลือภายหลังการเกิดรอยแตกร้าวนวทแยง

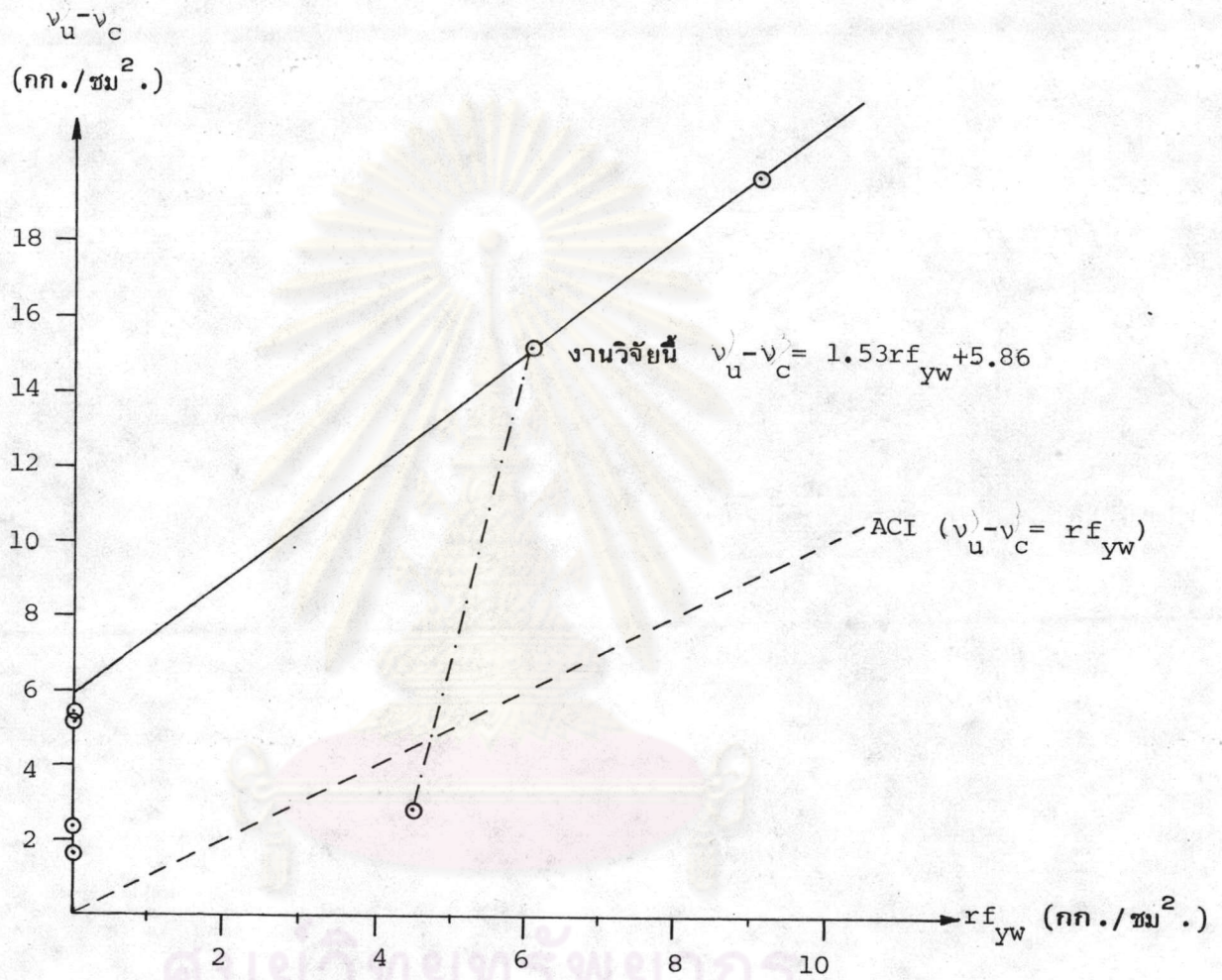


รูปที่ 4.6 สมการในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานาคอนกรีตเสริมเหล็กใช้คอนกรีตกำลังสูงมากไม่เสริมเหล็กปลอกในรูปแบบของสมการในมาตรฐาน ACI (318-83) (53)

หน่วยแรงเฉือน  
(กก./ซม<sup>2</sup>.)



รูปที่ 4.7 สมการในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้คอนกรีตกำลังสูงมากไม่เสริมเหล็กปลอกในรูปแบบของ Zsutty (45)



รูปที่ 4.8 ความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกคั้ง

ภาคผนวก

กลไกการวิบัติของชั้นส่วนคอนกรีตยื่น

การวิบัติจากรอยแตกร้าวแนวทแยงจะเกิดขึ้น เมื่อช่วงแรงดัดแข็งแรงกว่าช่วงแรงเฉือน ในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงดัดในเหล็กเสริมตามยาวที่กระทำต่อคอนกรีตจะกระจายตลอดความยาวของเหล็กเสริมโดยแรงยึดเหนี่ยว ดังรูปที่ ผ.1 โดยแรงดัดจะมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดรองรับและมีค่าสูงสุดที่ช่วงแรงดัด จากรูปที่ ผ.2 ซึ่งแสดงกลไกของชั้นส่วนคอนกรีตที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าวจากแรงดัดถูกกระทำโดยแรงยึดเหนี่ยว  $\Delta T$  ดังนั้นอาจเปรียบเทียบชั้นส่วนของคอนกรีตดังกล่าว เหมือนคานยื่น โดยมีบริเวณรับแรงอัดของคาน เป็นส่วนยึดรั้ง มีแรงที่กระทำต่อชั้นส่วนคือแรงยึดเหนี่ยว  $\Delta T$ , แรงจากปฏิกิริยาเดือย  $V_d$  และแรงชัดประสาน  $V_a$  ดังนั้นโมเมนต์ที่จุดยึดรั้งของชั้นส่วนคอนกรีตยื่นมีค่า

$$\begin{aligned} M &\approx (\Delta T)S - (V_a + V_d)\Delta X \\ &= R(\Delta T)S \end{aligned}$$

โดย  $R =$  อัตราส่วนความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวโดยคอนกรีตที่ส่วนยึดรั้ง

หน่วยแรงดัดพื้นฐานของชั้นส่วนคอนกรีตมีค่า

$$\begin{aligned} f_t &= \frac{M}{I} \cdot \frac{\Delta X}{2} \\ &= \frac{6R(\Delta T)S}{b(\Delta X)^2} \end{aligned}$$

ชั้นส่วนคอนกรีตจะต้านทานแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำได้จนกระทั่งหน่วยแรงดัดพื้นฐานของชั้นส่วนคอนกรีตมีค่า เท่ากับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

$$\begin{aligned} f_t &= f_{SP} = 2.32 \sqrt{f'_c} \\ \text{ดังนั้น} \quad \frac{\Delta T}{\Delta X} &= \frac{f_{SP}}{6R} \cdot \frac{\Delta X}{S} \cdot b \end{aligned}$$



ให้แรงดึงใน เหล็ก เสริมสูงสุดที่ช่วงแรงดัดมีค่า  $T$  ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยว เฉลี่ยระหว่าง คอนกรีตกับ เหล็กเสริมจะมีค่า เท่ากับ  $T/a$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \frac{T}{a} &= \frac{\Delta T}{\Delta X} \\ &= \frac{f_{SP}}{6R} \cdot \frac{\Delta X}{S} \cdot b \\ R &= \frac{f_{SP}}{6} \cdot \frac{\Delta X}{S} \cdot \frac{ba}{T} \end{aligned}$$

ระยะห่างระหว่างรอยแตกกว้าง ( $\Delta X$ ) จะได้จากการเฉลี่ยค่าที่วัดได้จากตัวอย่างทดสอบ ส่วนค่าความสูงของรอยแตกกว้าง ( $S$ ) รวมทั้งแรงดึงใน เหล็กเสริมตามยาว ( $T$ ) จะได้ความสัมพันธ์ของความเครียดที่ผิวหน้ารับแรงอัดและที่เหล็กเสริมตามยาว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางคาน เมื่อคานเกิดรอยแตกกว้างแนวทแยง ในรูปที่ ผ.3 โดยจะพิจารณาชั้นส่วนคอนกรีตชั้นที่อยู่ห่างจากจุดที่หน้าหักกระทำ เป็นระยะ เท่ากับความลึกประสิทธิภาพ ( $d$ )

$$\begin{aligned} S &= S_L \frac{(a-d)}{a} \\ \text{ดังนั้น} \quad R &= \frac{f_{SP}}{6} \cdot \frac{\Delta X}{S_L} \cdot \frac{a}{(a-d)} \cdot \frac{ba}{T} \end{aligned}$$

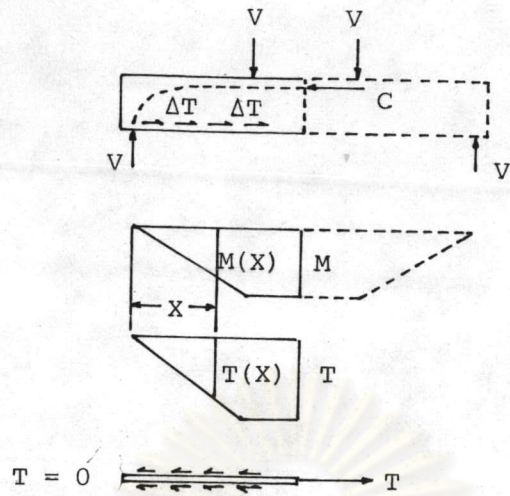
จากตารางที่ ผ.2 ในคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก จะเห็นได้ชัดว่า ความต้านทาน ต่อแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำต่อชั้นส่วนคอนกรีตชั้นโดยปฏิกิริยา เตื่อยและแรงขีดประสานรวมกันมีแนวโน้มที่จะลดลงตามกำลังอัดประลัยที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจจะลดลงอย่างมากถ้าปริมาณ การเสริม เหล็กดำจนไม่สามารถรักษารอยแตกกว้างให้แคบเพียงพอที่แรงขีดประสานจะคงอยู่ได้ และสำหรับคานคอนกรีต เสริม เหล็กใช้คอนกรีตกำลังสูงมากมีค่าประมาณ 56 % ซึ่งให้ค่าที่ต่าง ไปไม่มากจากผลสรุปของ Fenwick และ Paulay<sup>(65)</sup> ซึ่งทำการทดลองจากคอนกรีตกำลัง ธรรมดาได้ค่าประมาณ 80 % ของแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำ แสดงว่าแรงขีดประสานที่จะลดลง อย่างมาก อันเป็นผลมาจากความ เรียบของผิวรอยแตกกว้างของคอนกรีตกำลังสูงมากนั้นจะยังคงรักษาไว้ไม่ให้ลดลงมากได้ โดยการเสริม เหล็กตามยาวให้มีปริมาณสูง เพียงพอ รวมทั้ง เป็น การเพิ่มแรงจากปฏิกิริยา เตื่อยไปพร้อมกันด้วย สำหรับคานชุดที่เสริม เหล็กปลอกจะเห็นได้ว่า เหล็กปลอกสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงยึดเหนี่ยว โดยแรงจากปฏิกิริยา เตื่อยร่วมกับ แรงขีดประสานได้อีกประมาณ 15 % เนื่องจากเหล็กปลอกช่วยรองรับ เหล็กเสริมตามยาวภายหลัง การเกิดรอยแตกกว้างในแนวตั้ง

ตารางที่ ผ.1 ข้อมูลความเครียดที่ผิวคอนกรีตและเหล็กเสริมตามยาว ณ จุดกึ่งกลางคาน

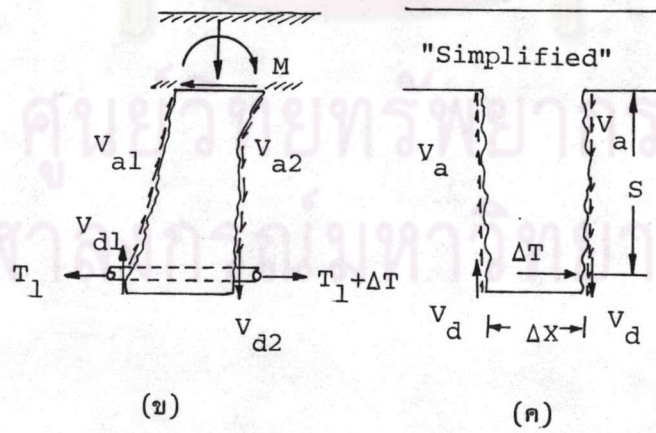
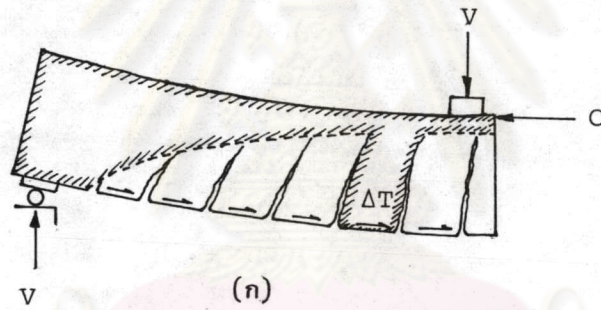
ตัวอย่างทดสอบ	$2V_c$ (ตัน)	$\epsilon_c$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{s1}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{s2}$ ( $\times 10^{-6}$ )
BO-5	19.00	902.00	1152.60	1482.30
BO-7	18.78	1070.66	1101.46	1549.04
BO-28	22.00	1246.00	1535.10	1279.80
BO-56	22.00	1155.00	1323.00	1668.60
BW-D	18.00	986.00	1305.60	1514.70
BW-3D4	23.00	1181.70	1479.00	1312.20
BW-D2	23.00	1201.90	1815.60	2081.70
BW-D4	24.00	1282.70	1892.10	1506.60

ตารางที่ ผ.2 ความต้านทานต่อแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำกับชิ้นส่วนคอนกรีตยื่น

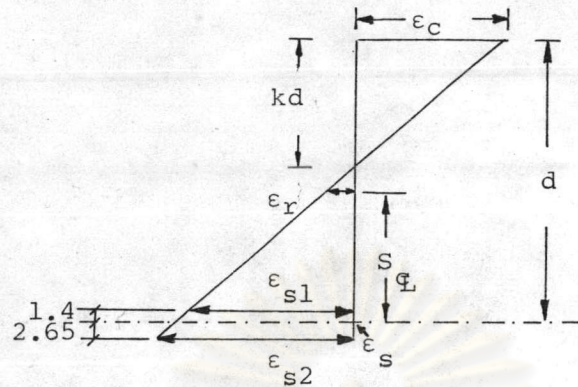
ตัวอย่างทดสอบ	$f'_c$ (กก./ซม. <sup>2</sup> .)	kd (ซม.)	$S_{\epsilon}$ (ซม.)	$\epsilon_s$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\Delta X$ (ซม.)	R	(1-R)
BO-5	672.65	10.17	12.55	1261.97	12.83	0.40	0.60
BO-7	749.51	11.15	11.59	1262.89	13.50	0.47	0.53
BO-28	738.48	11.68	11.02	1325.44	10.95	0.38	0.62
BO-56	773.56	10.81	11.98	1430.41	10.50	0.51	0.49
BW-D	777.15	9.99	12.19	1353.57	10.00	0.31	0.69
BW-3D4	724.33	11.33	11.23	1320.99	11.67	0.40	0.60
BW-D2	676.94	9.19	13.17	1871.43	9.68	0.19	0.81
BW-D4	800.73	10.61	11.94	1594.25	9.23	0.25	0.75



รูปที่ ผ.1 แรงภายในที่กระทำต่อคานคอนกรีตเสริม เหล็กโดยแรงยึดเหนี่ยว



รูปที่ ผ.2 ชิ้นส่วนของคอนกรีตเย็น



$$\frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_{s1}}{(d-kd-1.4)} = \frac{\epsilon_{s2}}{(d-kd+2.65)} = \frac{\epsilon_r}{(d-kd-S_{QL})} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_r}{S_{QL}}$$

$$\epsilon_r = f_r / E_c$$

$$kd = \left| \frac{\epsilon_c (d-1.4)}{(\epsilon_{s1} + \epsilon_c)} + \frac{\epsilon_c (d+2.65)}{(\epsilon_{s2} + \epsilon_c)} \right| / 2$$

$$S_{QL} = d - kd - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} kd$$

$$\epsilon_s = \frac{S_{QL} \epsilon_c}{kd} + \epsilon_r$$

รูปที่ ผ.๓ ความเครียดที่หน้าตัดกึ่งกลางคานของคานทดสอบ

ประวัติผู้เขียน

นายพิทยา เจนเกียรติฟู เกิดวันจันทร์ที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2504 สำเร็จการศึกษา  
ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการ  
ศึกษา 2525 และได้เข้าศึกษาต่อชั้นปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2526 ในระหว่างการศึกษาทำหน้าที่เป็นนิสิตผู้ช่วยสอนวิชา 161-403  
Timber and Steel Design ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย