

[68] 高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱の曲げ強度と変形性状に関する実験研究

正会員 ○ 林 静雄 (東京工業大学)

正会員 鄭 憲秀 (東京工業大学)

正会員 黒正清治 (東京工業大学)

1 目的

本論文は、軸力と曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の強度と変形性状に及ぼすコンクリート強度の影響を調べるための実験と解析を行い、高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱の合理的な設計法を確立するための基礎的な資料を得ることを目的としたものである。

2 試験体

試験体一覧を表1に、試験体配筋図例を図1に示す。試験体は全部で23体であり、断面は15cm×20cmでシアスパン比は2.5で共通である。変動因子は、コンクリート強度($c\sigma_B$)、平均軸方向圧縮応力度(N/B)の $c\sigma_B$ に対する比、帯筋比(p_w)および繰返し回数である。

3 使用材料

(1) コンクリート 使用したコンクリートの調査表を表2に示す。目標としたコンクリート強度を、200 kgf/cm²、400 kgf/cm²、600 kgf/cm²、800 kgf/cm²とした4種類の調査を行った。各試験体のコンクリート強度は表1試験体一覧表に示す。コンクリートの応力ひずみ関係は、高剛性フレームに組み込んだ300tfのオイルジャッキにより行ったシリンダー試験により求めた。各調査によるコンクリートの応力ひずみ関係の例を図2に示す。

(2) 鉄筋 主筋は、SD35のD10を使用した。主筋と帯筋の力学的性質を表3に、主筋の応力ひずみ関係を図3に示す。

表3 鉄筋の力学的性質

Bar	σ_y (tf/cm ²)	σ_{max} (tf/cm ²)	s^E (tf/cm ²)
D10	3.77	5.41	1880
9φ	3.51	5.00	1970
8.2φ	3.68	5.85	1880
4φ	4.10	4.60	1950

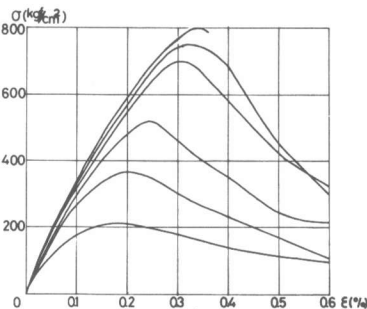


図2 コンクリートの応力ひずみ関係

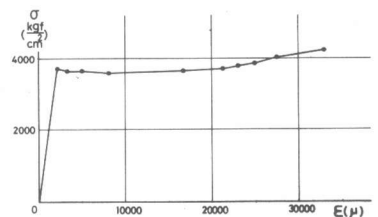


図3 主筋の応力ひずみ関係

表1 試験体一覧

Specimen	$c\sigma_B$ (kgf/cm ²)	N (tf)	N/B (kgf/cm ²)	$N/B \cdot c\sigma_B$	p_w (%)	number of load cycles (n)	
200-02-77-1.2-1	243	14.2	47.3	0.2	1.2 (9φ 70)	1	
200-03-77-1.2-1	282	21.3	71.0	0.25			
200-04-77-1.2-1	333	40.5	135.0	0.4			
400-02-77-1.2-1	434	25.8	86.0	0.2			
400-03-77-1.2-1	467	38.7	129.0	0.28			
400-04-77-1.2-1	569	62.2	207.3	0.36			
600-01-77-1.2-1	723	20.8	69.3	0.1			
600-02-77-1.2-1	597	36.1	120.3	0.2			
600-03-77-1.2-1	677	61.0	203.3	0.3			
800-01-77-1.2-1	944	29.3	97.7	0.1			
800-02-77-1.2-1	828	48.8	162.7	0.2			
800-03-77-1.2-1	850	78.4	261.3	0.31			
200-04-79-1.2-1	169	20.3	67.7	0.4	1.2 (8.2φ 58)	10	
600-03-79-1.2-1	546	49.0	163.3	0.3			
800-025-79-1.2-1	750	56.2	187.3	0.25			
200-02-79-1.2-10	160	9.6	32.0	0.2			
400-02-79-1.2-10	355	21.3	71.0	0.2			
600-02-79-1.2-10	609	36.6	122.0	0.2			
800-015-79-1.2-10	753	33.9	113.0	0.15			
200-02-79-0.2-10	179	10.7	35.8	0.2			0.2 (4φ 80)
400-02-79-0.2-10	380	22.8	76.0	0.2			
600-02-79-0.2-10	557	33.4	111.4	0.2			
800-015-79-0.2-10	782	35.2	117.3	0.15			

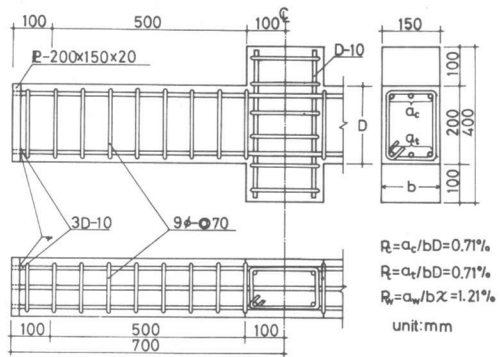


図1 試験体配筋図例

表2 コンクリートの調査

Design strength, (kg/cm ²)	W/C (%)	S/a (%)	Mix proportion by weight (kg/m ³)				
			Cement	Water	Sand	Aggregate	Admixture
200	75	50	297	223	888	888	—
400	52	45	429	223	750	927	—
600	38	37	500	190	624	1067	2.5
800	27	35	700	190	532	992	5.6

4 加力および測定方法

加力および変形の測定方法を図4に示す。加力は、軸力を一定に保って正負交番繰返し曲げせん断を加えた。変形は、スタブに固定したゲージホルダーで両支点位置で測定した。荷重履歴としては、引張鉄筋が圧縮鉄筋の降伏が先に起きた時の変形を δ_y とし、 $\delta_y, 2\cdot\delta_y, 4\cdot\delta_y, 6\cdot\delta_y$ で各1回繰返した15体と、同じ変形レベルで各10回繰返した8体の試験体がある。

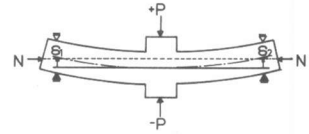


図4 加力および変形測定方法

5 実験結果および考察

(1) 荷重変形履歴曲線 表4に実験結果の一覧を示す。図5に繰返し回数各1回で漸増繰返し荷重を行った荷重変形曲線の1例を、図6に繰返し回数各10回で漸増繰返し荷重を行った荷重変形曲線の1例を示す。

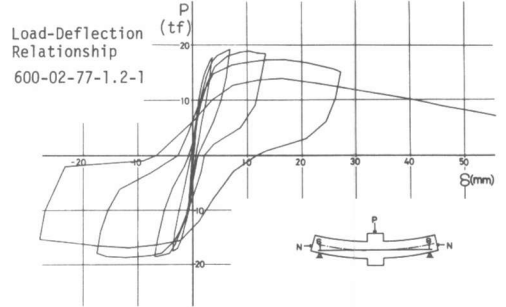


図5 荷重変形曲線(漸増荷重)

これらはいずれも $c\sigma_B = 600 \text{ kgf/cm}^2$, $N/BD = 120 \text{ kgf/cm}^2$ である。両試験体とも引張鉄筋降伏後、 $2\cdot\delta_y$ で最大耐力を示し、その後徐々に耐力を失った。多数繰返し荷重を行った試験体の方が耐力低下がやや大きかった。図7に $N/BD \cdot c\sigma_B = 0.2$ で繰返し回数各1回の漸増荷重試験体の包絡線を示す。軸力比一定であるので、コンクリート強度に比例して軸力も大きくなっている。従って、最大耐力はコンクリート強度が高い程大きい、最大耐力時の変形は、コンクリート強度が高い程小さくなる傾向があり、最大耐力以後の耐力低

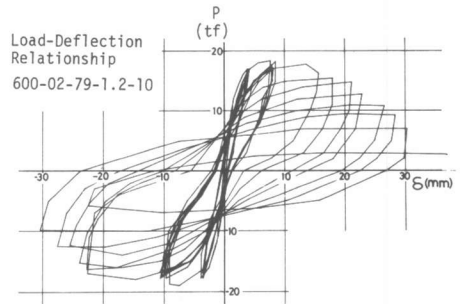


図6 荷重変形曲線(多数回繰返し)

表4 実験結果一覧

Specimen	$c\sigma_B$ kgf/cm ²	N/bD kgf/cm ²	K_i (tf/cm)			P_{crack} (tf)			$P_{s\sigma_t=s\sigma_y}$ (tf)			P_{max} (tf)			$P_{s\sigma_c=s\sigma_y}$ (tf)		
			exp.	cal.	exp./cal.	exp.	cal.	exp./cal.	exp.	cal.	exp./cal.	exp.	cal.	exp./cal.	exp.	cal.	exp./cal.
200-02- 77-1.2-1	243	47	93.8	98	0.96	3.0	3.18	0.94	10.0	8.81	1.14	11.6	9.2	1.26	—	9.2	—
200-03- 77-1.2-1	280	71	86.2	105	0.82	5.0	4.03	1.24	12.0	10.4	1.15	13.0	10.9	1.20	—	—	—
200-04- 77-1.2-1	333	135	62.5	92	0.68	7.0	7.58	0.92	16.2	—	—	16.6	12.7	1.31	14.	12.7	1.1
400-02- 77-1.2-1	434	86	142.9	106	1.33	4.3	5.09	0.84	14.0	12.0	1.17	16.0	12.7	1.26	—	12.7	—
400-03- 77-1.2-1	467	129	119.0	116	1.02	6.0	6.81	0.88	17.0	15.1	1.13	19.5	15.2	1.28	—	15.5	—
400-04- 77-1.2-1	569	207	105.0	143	0.73	11.0	10.16	1.08	23.0	—	—	23.8	18.27	1.30	20.	18.2	1.1
600-01- 77-1.2-1	723	69	166.0	210	0.79	5.0	4.87	1.03	14.0	11.7	1.20	16.0	12.32	1.30	—	—	—
600-02- 77-1.2-1	597	120	111.1	127	0.87	7.0	6.62	1.06	17.0	14.9	1.14	19.0	15.5	1.26	—	—	—
600-03- 77-1.2-1	677	203	123.0	150	0.82	12.0	10.08	1.13	24.0	20.5	1.17	25.7	20.5	1.25	22	20.5	1.1
800-01- 77-1.2-1	944	98	166.0	156	1.06	7.0	6.49	1.08	15.0	13.6	1.10	17.7	14.88	1.19	—	—	—
800-02- 77-1.2-1	828	163	103.4	145	0.71	7.6	8.76	0.86	19.0	18.7	1.02	21.2	20.0	1.06	—	19.9	—
800-03- 77-1.2-1	850	261	131.7	178	0.74	11.0	12.67	0.87	23.5	24.9	0.94	26.8	25.0	1.07	—	24.2	—
200-04- 79-1.2-1	169	68	77.0	77	1.00	4.0	3.84	1.04	10.0	9.1	1.10	11.5	9.05	1.27	9	9.0	1.0
600-03- 79-1.2-1	546	163	109.0	120	0.91	9.0	8.41	1.07	19.0	17.42	1.09	20.0	17.78	1.12	19	17.2	1.1
800-025-79-1.2-1	750	187	125.0	115	1.09	10.0	9.70	1.03	22.0	19.6	1.12	23.5	20.84	1.13	20	19.8	1.0
200-02- 79-1.2-10	160	32	86.2	82	1.06	2.6	2.36	1.1	8.0	7.3	1.11	10.0	7.62	1.31	—	7.6	—
400-02- 79-1.2-10	355	71	104.0	79	1.32	4.7	4.47	1.05	11.0	10.75	1.02	12.4	11.3	1.10	—	—	—
600-02- 79-1.2-10	609	122	100.0	124	0.81	6.5	6.85	0.95	16.0	15.11	1.06	19.0	15.94	1.19	—	15.82	—
800-015-79-1.2-10	753	113	104.2	136	0.76	6.5	6.74	0.96	16.0	14.46	1.11	18.8	15.92	1.18	—	15.8	—
200-02- 79-0.2-10	179	36	66.7	77	0.87	2.5	2.57	0.97	8.0	7.64	1.05	9.5	8.03	1.18	—	8.0	—
400-02- 79-0.2-10	380	76	78.1	96	0.81	5.0	4.66	1.07	12.0	11.1	1.08	12.8	11.76	1.09	—	11.8	—
600-02- 79-0.2-10	557	111	151	120	1.25	6.0	6.34	0.95	16.0	14.1	1.14	18.4	15.05	1.22	—	15.0	—
800-015-79-0.2-10	782	117	131.6	138	0.95	6.0	6.95	0.86	18.0	14.77	1.22	20.0	16.32	1.23	—	—	—

K_i : initial stiffness

下もコンクリート強度が高い程激しい傾向がある。

(2) 曲げひびわれモーメント 図8に曲げひびわれモーメント実験値を菅野式による計算値で除した値と、 $c\sigma_B$ との関係を示す。実験値は計算値に対し、±20%以内に入っており、高強度コンクリート部材で高軸力(100kgf/cm²~260kgf/cm²)を受けている場合でも菅野式をそのまま適用できることがわかった。

(3) 曲げ降伏ならびに曲げ終局モーメント 試験体の曲げ降伏ならびに曲げ終局モーメントを計算するために断面曲げ解析を行った。コンクリートの応力ひずみ関係は、試験体と同一バッチからとったコンクリートシリンドラーの圧縮試験によって得られたものを、そのまま使用した。主筋の応力ひずみ関係も図3に示す引張試験結果をそのまま使用した。

図9に引張鉄筋降伏モーメントの実験値と計算値の比とコンクリート強度との関係を示す。実験値は計算値の0.94~1.22倍とやや高い値だった。圧縮鉄筋降伏モーメント実験値は計算値の1.00~1.10倍とよい一致を示していた。図10に曲げ終局モーメント実験値と計算値の関係を示す。実験値と計算値は、ほぼ一致しているが、全体に実験値の方が計算値より高かった。これは、解析では、コアコンクリートに対する帯筋の拘束効果を考えていないためと考えられる。

(4) つりあい軸力とコンクリート強度との関係 引張鉄筋の降伏と圧縮鉄筋の降伏において、引張鉄筋の降伏が先行するもの、圧縮鉄筋の降伏が先行するもの、ほぼ同時に降伏するものに分類する。この分類と平均軸方向圧縮応力度(N/BD)と $c\sigma_B$ との関係を図11に示す。引張鉄筋と圧縮鉄筋が同時に降伏するときの軸力をつりあい軸力と呼ぶことにすると、つりあい軸力時のN/BDは、コンクリート強度が500kgf/cm²までは

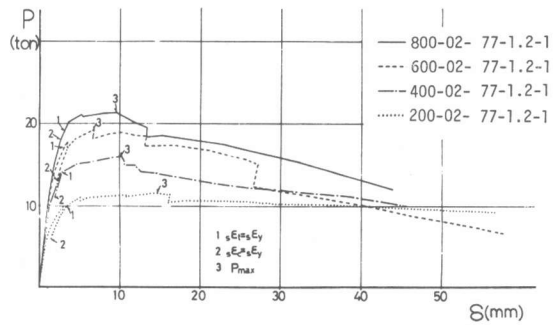


図7 荷重変形曲線(包絡線)

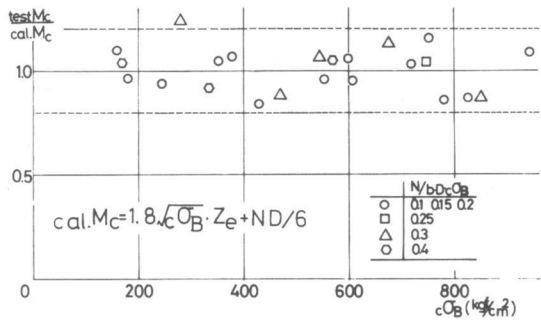


図8 実験値と計算値の関係(曲げひびわれモーメント)

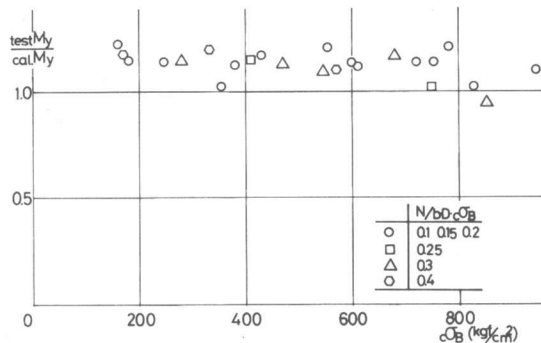


図9 実験値と計算値の関係(曲げ降伏モーメント)

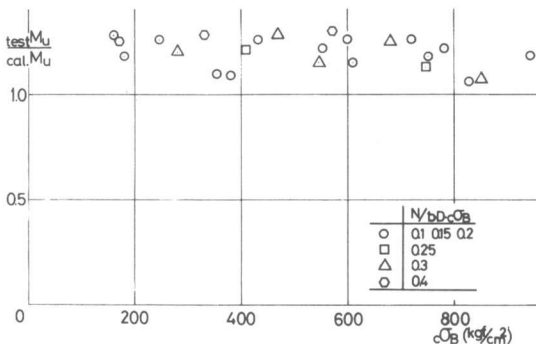


図10 実験値と計算値の関係(曲げ終局モーメント)

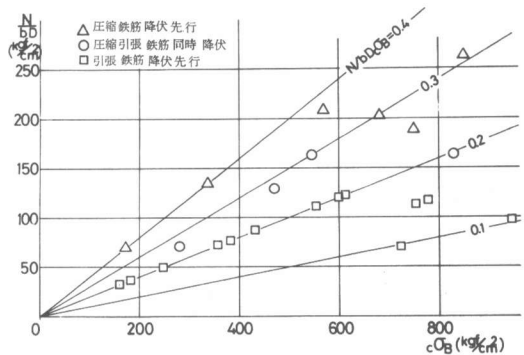


図11 つりあい軸力とコンクリート強度との関係

0.3 $c\sigma_B$ 程度であるが、それ以上では、160 kgf/cm²で頭打ちとなる。このことから、高強度コンクリート部材にじん性を期待するためには、軸力をコンクリート強度に比例して上げることはできない。しかし、コンクリート強度800 kgf/cm²のものを使った部材は200 kgf/cm²のものを使った部材に比べ約2.5倍の軸力に耐えられるものと考えられる。

(5) 多数回繰返し荷重時の変形能力 (4)の結果から強度600 kgf/cm²までのコンクリートを使った部材は、 $N/B \cdot D$ を0.2 $c\sigma_B$ で、約800 kgf/cm²のコンクリート

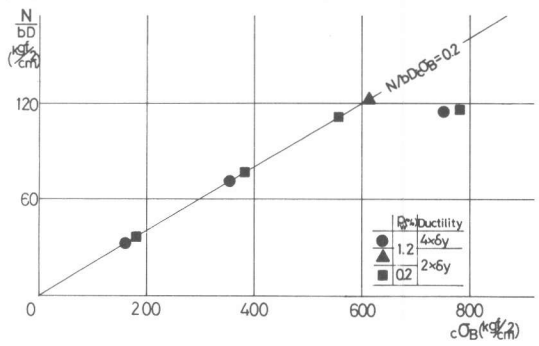


図12 変形能力とコンクリート強度との関係

を使った部材は0.15 $c\sigma_B$ で多数回繰返し荷重を行った。図12に变形能力と $c\sigma_B$ との関係を示す。帯筋比1.2%と多い場合には、 $c\sigma_B$ が約600 kgf/cm²の1体だけが4·δyの繰返し荷重中に壊れた。帯筋比0.2%の試験体は、曲げ降伏時のせん断力が、広沢による修正荒川min.式によるせん断終局強度とほぼ同じか、やや上回るものもあったが、すべてせん断破壊することなく、2·δyの繰返しでは耐力低下はあまりなく4·δyの繰返し荷重中に壊れた。従って、せん断補強量がかなり多い場合には、 $c\sigma_B$ が400 kgf/cm²以下の場合には、軸力比($N/B \cdot D \cdot c\sigma_B$)を0.2以下に、500 kgf/cm²以上の場合では、0.15以下に押えておけば、4·δyの变形能力を確保でき、また、その程度の軸力比であれば、せん断補強筋が少くとも2·δy程度の変形能力は確保できる。

6 まとめ

以上の実験と解析から次のことがいえる。

- (1) 圧縮強度が、800 kgf/cm²程度までの高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱が、軸力と曲げモーメントを受ける場合、その曲げ性状は、コンクリートの応力ひずみ関係をシリンダー試験に基づいてモデル化すれば、平面保持を仮定した断面曲げ解析により追跡できる。
- (2) 曲げひびわれモーメントは、高強度コンクリート部材で高軸力を受けている場合でも、普通強度コンクリートで低軸力の実験から求めた菅野式で、ほぼ計算できる。
- (3) 鉄筋コンクリート柱が、軸力と曲げせん断を受ける場合、コンクリート強度が500 kgf/cm²までは、軸力比($N/B \cdot D \cdot c\sigma_B$)が0.3以内であれば、圧縮鉄筋の降伏は先行せずかなりのじん性が期待できる。コンクリート強度が500 kgf/cm²をこえる場合には、圧縮鉄筋の降伏を先行させず、じん性を期待するためには、軸力比を普通強度コンクリートよりも少なめに押える必要がある。
- (4) 鉄筋コンクリート柱が軸力と多数回繰返し曲げせん断を受ける場合、コンクリート強度が400 kgf/cm²以下で、軸力比が0.2以下であれば、また、500 kgf/cm²以上でも、0.15以下であれば、せん断耐力が曲げ降伏時のせん断力とほぼ同じであっても2·δy程度の変形能力を確保でき、せん断補強筋が十分あれば4·δy程度の変形能力を確保することができる。
- (5) 以上のように、軸力と曲げせん断を受けるシアスパンの長い鉄筋コンクリート柱の曲げ強度と変形性状に及ぼすコンクリート強度の影響について調べ、高強度コンクリートを使った柱は軸力負担能力がすぐれていることを示し、高強度コンクリートを使用した構造物の設計への基礎的な資料を得た。今後さらに研究を重ね、解析法の拡張を計り、高強度コンクリートを構造物に使用するうえでの可能性と限界について調べて行きたい。

謝辞：本研究に際し、御協力頂いた株式会社神戸製鋼所と高周波熱錬株式会社へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 菅野俊介, 「鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究」, コンクリートジャーナル Feb. 1973
- (2) 荒川卓, 「鉄筋コンクリートばりの許容せん断力とせん断補強について」, コンクリートジャーナル July 1970
- (3) 広沢雅也, 「軸力を受ける鉄筋コンクリート部材の強度と粘り」, 日本建築学会大会 No.v. 1971