

[127] 高軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の強度と靱性

正会員○ 周 小真(西安冶金建築学院建工系)

佐藤 稔雄(日本大学 理工学部)

正会員 小野 新(日本大学 理工学部)

正会員 清水 泰(東京都立大学 工学部)

1. はじめに

中国の中高層建築物の柱の中には、部材断面が小さく、大地震時の水平動や上下動による軸力の変化に伴い、軸力比($\eta_0 = N / (F_c \cdot B \cdot D)$), N : 軸力, F_c : コンクリート強度, B, D : 柱の巾とせい)の値が0.6~0.8程度にまで達する場合もあると考えられる物が多数存在している。このため、高軸力下に於ける鉄筋コンクリート造柱の耐震性能に関する研究は極めて重要な研究課題となっている。しかしながら、この高軸力を受ける柱部材の力学的性状に関する系統立った研究例は少ないのが現状である。特に、軸力比 η_0 が0.6を超える範囲での実験資料は大変に少なく、この範囲内の実験資料の蓄積が望まれている。

本論文はこの点に着目し、軸力を主要変動因子として軸力比0.6を超す範囲までに渡る柱の実験を行ない、その実験結果と鉄筋コンクリート部材に対する既往の種々の代表的な耐力算定式による算定値とを比較して、高軸力を受ける柱の耐震性能に関する検討を行なった結果をまとめたものである。

2. 試験体

表1 試験体一覧

試験体の概要を図1と表1に示す。試験体は実物の約1/5の縮尺模型が17体(AZシリーズ)、約1/2.5の物が18体(BZ, CZ, DZシリーズ)、合計35体である。試験体の主要変動因子は η_0 であるが、その他にも主筋比 P_t やせん断補強筋比 P_w 、シアスパン比 M/QD 等も変化させている。全試験体は P_t によってAZ(0.89%), BZ(0.61%), CZ(1.04%), DZ(1.20%)の4シリーズに分けられている。 P_w はAZシリーズでは0.39%, BZ, CZシリーズでは0.36%と0.59%の2種類、DZシリーズでは0.36%とした。また、 M/QD はAZシリーズでは1.0, BZ~DZシリーズでは2.0とした。各試験体の設計時に想定した破壊モードはAZ, DZシリーズがせん断破壊指向型で、BZ, CZシリーズは曲げ破壊指向型とした。なお、実験時に於ける各試験体の軸方向力に関しては、その試験体のコンクリート強度を加力直前に測定し、その値を基にして所定の軸力比になるような軸力の値を採用した。試験体作成時に使用した鋼材の試験結果を表2に示す。コンクリートの粗骨材の最大粒径は全試験体共

20mmである。

(備考) B, D, A: 柱断面の幅, せい, 断面高, h_0 : 内り高さ, a_t, p_t : 引張り鉄筋断面積, 鉄筋比
 a_w, p_w : せん断補強筋断面積, 鉄筋比, $\sigma_c = N / (B \times D)$, N : 軸力, $\eta_0 = \sigma_c / F_c$

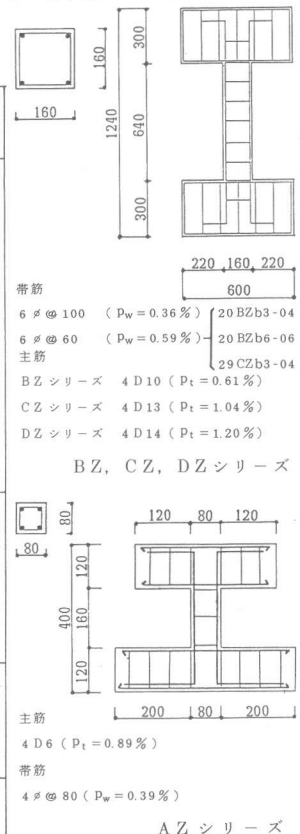


図1. 試験体配筋図

3. 実験方法

加力装置を図2に示す。水平方向の加力は逆対称応力加力として、試験体に所定の軸方向力を加えた状態で正負交番の多数回繰返し静加力実験を行なった。予定荷重履歴としては、AZシリーズは降伏以前では荷重制御として、まず1 ton ($\bar{\tau}=15.6 \text{ Kg/cm}^2$) で正負各1回ずつの繰返し加力を行なった後、繰返し制御荷重を0.5 ton ($\bar{\tau}=7.8 \text{ Kg/cm}^2$) ずつ増加させて、各繰返し制御荷重毎に1回ずつの繰返し加力を予定した。降伏以後は部材角Rで制御し、 $R=1/500$ で正負各1回繰返した後、 $R=1/200$ と $1/100$ で各3回ずつ繰返し、最後に押し切る事を計画した。

BZ, CZ, DZ シリーズは同一の予定荷重履歴を採用し、まず荷重で制御して繰返しの制御荷重を2.5 ton ($\bar{\tau}=9.8 \text{ Kg/cm}^2$) から始めて1 ton ($\bar{\tau}=3.9 \text{ Kg/cm}^2$) ずつ増加させ、各1回ずつの繰返し加力を行なった後、部材角による制御を行ない $R=1/200, 1/100, 1/50, 1/25$ で各3回ずつの繰返し加力を行ない、最後に押し切る事を計画した。測定項目としては、変位測定用ゲージホルダーを試験体基礎部分に固定して柱頭・柱脚間の水平変位の測定を行なった他、鉄筋のひずみ等も測定した。

4. 実験結果

各試験体の実験結果を表3に一括して示す。ここで、初期剛性は正側加力時の第2サイクルまでの荷重・変位曲線より、曲げひび割れ発生時または荷重が平均せん断応力度 $\bar{\tau}$ の値で 20 Kg/cm^2 前後になった時の剛性を目安としてグラフ上で判断して決定した。降伏点は荷重・変位曲線の視察により、主筋の降伏状況や破壊の進展状況を参考として決定した。終局時の限界変形は最大耐力後急激に耐力低下を生じた点、または、徐々に耐力低下を生じた場合には最大耐力の85%まで荷重が低下した点の変形を採用した。

5. 実験結果の検討

5.1 諸ひび割れ発生荷重の検討

曲げひび割れとせん断ひび割れの発生荷重について、実験値と計算値とを比較して図3に示す。同図の縦軸は平均せん断応力度 $\bar{\tau}$ とコンクリート強度 F_c の比の値で、横軸は軸力比とした。また、これらの図ではシアスパン比の異なるAZシリーズとBZ~DZシリーズを分けて示してあり、それぞれの図には $F_c = 300 \text{ Kg/cm}^2$ とした場合の計算値の線を書き込んである。なお、ここで用いた計算式は以下のものである。

(曲げひび割れ)

$$Q_{BC} = (2h_0) \cdot (1.8\sqrt{F_c} \cdot Z_e + N \cdot D/6) \quad (1)^{1)}$$

(せん断ひび割れ)

$$Q_{SC} = 0.971\sqrt{F_c} \cdot B \cdot D \left(1 + \frac{\sigma_a}{\sigma_t}\right)^{0.411} \left(\frac{M}{Q \cdot D}\right)^{-0.606} \quad (2)^{2)}$$

ここで、 Z_e : 等価断面係数、 h_0 : 柱内法高さ、

$$\sigma_a = N/(B \cdot D), \quad \sigma_t = 1.8\sqrt{F_c}$$

これらの図を見ると、シアスパン比の長いBZ~DZシリーズでは殆どの試験体でせん断ひび割れに先行して曲げひび割れが発生しており、この傾向は曲げひび割れ発生荷重の計算値がせん断ひび割れのそれよりも相当に下回った結果となっている事と一致している。AZシリーズでは軸力比が0.5以下の小さな範囲内では

表2 使用材料の試験結果(鋼材)

呼び名 (径)	断面積 as cm ²	降伏点強度 $\sigma_y \text{ kg/cm}^2$	最大強度 $\sigma_m \text{ kg/cm}^2$	使用部位
4φ	0.126	3480	4570	Aシリーズの帯筋
6φ	0.283	3400	4420	B, C, Dシリーズの帯筋
D6	0.285	3430	3860	Aシリーズの主筋
D10	0.79	3720	5760	Bシリーズの主筋
D13	1.31	3710	5560	Cシリーズの主筋
D14	1.53	3730	5810	Dシリーズの主筋

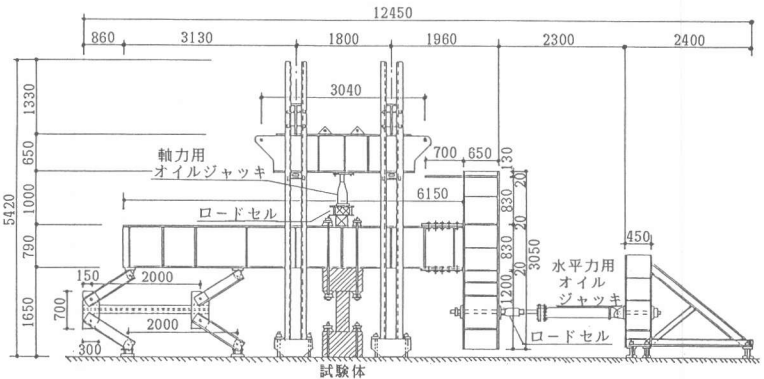


図2 加力装置 (BZ~DZ シリーズ)

曲げひび割れがせん断ひび割れに先行して発生しているが、それ以上の範囲ではせん断ひび割れが先行する様になっている。更に、軸力比 0.7 以上では曲げひび割れは発生しなくなり、せん断ひび割れも 0.9 以上では発生していない。

これらのひび割れ発生荷重はAZシリーズでは実験値に比較して計算値が多少低目の値となっており、また、全体的にバラツキも大きい。しかしながら、全シリーズで平均的に見ると計算値は比較的良好な適合性を示しており、軸力の変化に対する適合も軸力比が 0.8 程度までは良いと思われる。

5.2 最大耐力に関する検討

最大耐力実験値と曲げ耐力計算値 Q_{mu} 及びせん断耐力計算値 Q_{mean} とを比較して図 4 に示す。同図の縦軸と横軸は図 3 と同様のものを採用しており、また、AZ シリーズは他のシリーズと分けて示し、全ての図に $F_c=300 \text{ Kg/cm}^2$ の計算値の線を記入した。計算式を次に示す。

$$Q_{mean} = \left\{ \frac{0.115 k_u \cdot k_p (180 + F_c)}{0.1 M / Q \cdot D + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} B \cdot J \quad (3)^2$$

$$Q_{mu} = \left(\frac{2}{h_o} \right) \{ 0.8 a_t \cdot s \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D (1 - \frac{N}{B \cdot D \cdot F_c}) \} \quad (4)^3$$

但し、 $N > 0.4 B \cdot D \cdot F_c$ の場合

$$Q_{mu} = \left(\frac{2}{h_o} \right) (0.8 a_t \cdot s \sigma_y \cdot D + 0.12 B \cdot D^2 \cdot F_c) \left(\frac{N_m - N}{N_m - 0.4 B \cdot D \cdot F_c} \right)$$

表 3 実験結果一覧

試験体 No	η	K_e t/mm	tQBC ton	tQSC ton	tQVC ton	tQy ton	δy mm	tQm ton	δm mm	tQu ton	δu mm
1A20-0	0	—	0.6	—	—	0.75	0.8	1.85	3.2	1.35	4.0
2A21-01	0.1	45.5	1.5	2.5	—	1.9	0.8	2.72	2.4	—	—
3A22-02	0.2	68.2	1.5	1.75	—	2.5	0.52	2.75	0.8	2.7	1.2
4A23-03	0.3	43.9	1.5	2.5	—	2.5	0.9	2.62	1.4	2.34	2.13
5A24-04	0.4	39.1	1.92	2.5	—	1.9	0.8	2.5	1.04	1.8	1.32
6A25-04	0.4	41.7	2.1	2.1	—	2.1	0.6	3.15	0.6	1.87	0.86
7A26-05	0.5	73.5	—	2.8	—	3.5	0.7	3.5	0.7	2.75	1.0
8A27-055	0.55	68.6	2.75	2.25	—	3.25	0.68	3.25	0.68	3.0	0.92
9A28-06	0.6	115.4	2.25	2.0	—	3.1	0.46	3.5	0.56	3.0	0.63
10A29-06	0.6	125.0	2.5	2.5	3.2	3.2	0.43	3.5	0.6	3.45	0.68
11A210-07	0.7	107.1	—	3.0	3.5	3.7	0.62	3.7	0.62	3.3	0.8
12A211-07	0.7	114.3	—	3.75	2.75	3.76	0.62	3.9	0.72	3.75	0.85
13A212-08	0.8	115.4	—	2.6	3.0	3.5	0.5	3.5	0.5	2.9	0.5
14A213-09	0.9	—	—	—	1.75	3.05	0.52	3.5	0.52	2.5	0.6
15A214-09	0.9	93.8	—	—	2.75	3.05	0.44	3.05	0.44	2.7	0.8
16A215-11	1.1	75.0	—	—	2.0	2.0	0.32	2.0	0.32	2.0	0.44
17A216-12	1.2	—	—	—	—	—	—	0.25	0.01	—	—
18B2a1-02	0.2	6.3	2.0	3.4	—	3.0	6.0	5.4	24.0	4.3	30.0
19B2a2-04	0.4	12.5	3.0	4.0	—	4.5	4.0	6.08	11.4	6.0	13.0
20B2b3-04	0.4	14.3	3.3	5.0	—	5.0	6.2	6.3	13.0	4.8	24.0
21B2a4-05	0.5	10.5	3.5	4.5	—	6.0	8.0	6.55	10.0	6.2	12.2
22B2a5-06	0.6	25.0	3.8	6.2	6.2	4.0	3.3	5.56	6.3	5.0	6.4
23B2b6-06	0.56	20.0	4.1	4.4	—	7.2	7.0	7.5	13.0	7.5	13.0
24B2a7-07	0.7	20.0	—	6.0	6.0	7.1	6.4	7.1	6.4	7.1	6.4
25B2a8-08	0.8	20.0	4.2	5.1	6.0	6.8	6.4	6.2	6.4	5.7	11.2
26B2a9-095	0.95	33.3	—	—	—	4.1	4.0	4.65	4.0	4.1	4.0
27C2a1-02	0.2	20.0	3.1	5.6	5.6	5.6	8.0	6.25	12.8	4.0	40.0
28C2a2-04	0.4	20.0	5.8	6.3	—	7.0	8.0	7.75	11.4	5.5	26.0
29C2b3-04	0.4	20.0	5.4	7.5	8.2	7.5	8.0	8.1	12.8	5.0	40.0
30C2a4-05	0.5	25.0	6.0	6.3	—	6.0	5.0	7.8	10.2	6.6	11.6
31C2a5-06	0.6	25.0	5.3	7.7	—	7.5	6.4	8.0	11.2	7.4	13.0
32C2a6-08	0.8	20.0	4.0	5.1	—	5.1	6.4	6.55	6.4	5.1	11.0
33D2a1-04	0.4	12.5	3.0	4.5	4.5	4.5	6.4	7.4	12.8	5.2	24.0
34D2a2-06	0.6	16.7	5.0	6.1	—	4.4	6.4	7.5	12.8	4.6	12.8
35D2a3-08	0.8	16.7	4.0	5.4	—	2.1	3.2	6.75	10.4	—	—

(備考) K_e ; 初期剛性、tQBC、tQSC、tQVC ; 初ひび割れ発生荷重、曲げひび割れ、せん断ひび割れ、割裂状の縦ひび割れ、tQy、 δy ; 荷重降伏時荷重と変形、tQm、 δm ; 最大耐力時荷重と変形、tQu、 δu ; 終局時荷重と変形

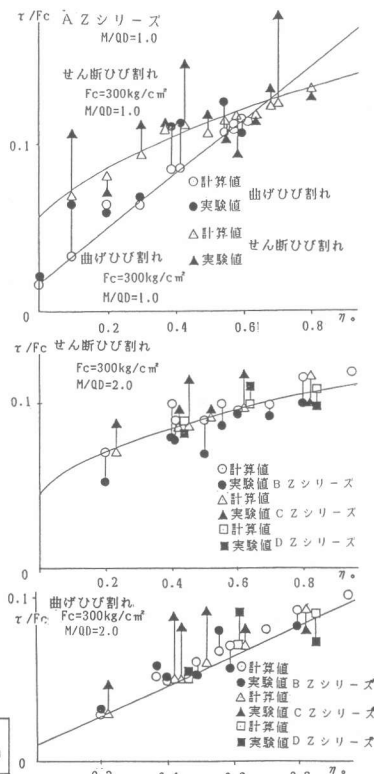


図 3 諸ひび割れ発生荷重の検討

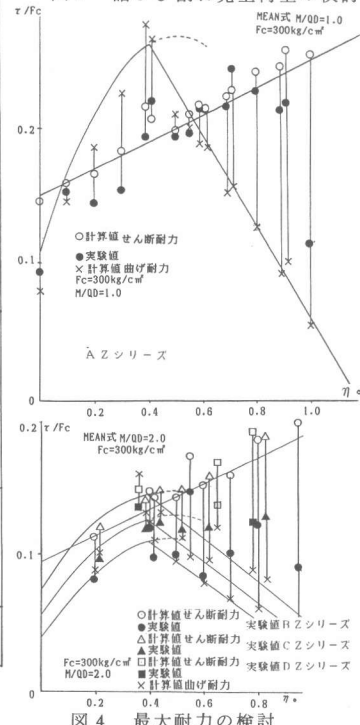


図 4 最大耐力の検討

ここで、 $k_u = 1.0$, $k_p = 0.82 p_t^{0.23}$, $j = 0.875 d$, d : 柱有効せい
 a_t : 引張り主筋断面積, $s_{\sigma y}$, σ_{wy} : 主筋 帯筋降伏強度,
 $N_m = B \cdot D \cdot F_c + 2 a_t \cdot s_{\sigma y}$

この図を見ると、殆どの試験体がせん断破壊したAZシリーズでは軸力比が1.0を下回る範囲で実験値と修正大野・荒川(3)式による値とは比較的良く適合している。計算上曲げ耐力の方がせん断耐力よりも小さな試験体が多いBZとCZシリーズでは軸力比0.4以下で実験値と曲げ耐力計算値の良い適合が見られるもののこれを超える範囲では実験値が計算値を大幅に上回る傾向を示した。このような傾向はAZシリーズの一部でも見受けられた。

これは軸力比の値が0.4を超えた所で曲げ耐力の算定式は大幅に変更されているが、実験結果を見ると必ずしも軸力比0.4を限界値として試験体の破壊モード等が大幅に変化する事は無く、軸力比の変化に伴って徐々に変わって行く傾向が見受けられた。その結果、実験値が算定値を大幅に上回る所も出て来た。本実験結果では軸力比が0.8前後の値に達してから試験体の破壊モードが大きく変化して行く傾向を示した。

5.3 変形性能に関する検討

塑性率 μ と軸力比との関係を図5に示す。図5では縦軸を塑性率に、横軸を軸力比として、各シリーズ毎の図と全体をまとめたものの両方を示した。また、各シリーズ毎の図中には次の算定式による計算値と $F_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ の計算値の線も示した。

$$\mu = 1.0 (Q_{mean}/Q_{mu} - 1) \geq 1.0 \quad (5)^3$$

但し、 $\eta_o > 0.4$ の場合 $\mu = 1.0$

更に、最大耐力時の部材角 R_{max} と軸力比との関係を縦軸に R_{max} をとって図6に示した。これらの図を見ると軸力比の増加に従って塑性率や最大耐力時部材角の値は小さくなっており、変形性能が徐々に悪くなる傾向が有る事が分かる。また、(5)式による値はいずれのシリーズでも実験値を下回っておりほぼ安全側となっている事や、軸力比が0.4を超えると塑性率で2を超える試験体は殆ど無くなり、変形性能上の問題が出て来る事が分かる。シアスパン比が1.0と小さな値のAZシリーズでは塑性率、最大耐力時部材角の両方共に他のシリーズに比べて低い値となった。

6. まとめ

軸力を主要変動因子として軸力比の値で0.6を超える高軸力の範囲までの実験を行なった結果、軸力比の変化に伴ってひび割れの発生荷重や最大耐力、変形性能が変わって行く様子の典型的な一例を示す事が出来た。また、既往の算定式を用いてこれらの傾向を検討した結果、算定式の限界値に関する資料が得られた。

(参考文献) 1)日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準」1982, 2)広沢 雅也「鉄筋コンクリート部材の強度と靱性」建築研究報告 No.76, 1973, 3)日本建築防災協会「耐震診断基準」建設省住宅局建築指導課, 1977, 4)中国建築工業出版社

「鋼筋混凝土结构设计規范 TJ10-74」, 5)周 小真, 東 洋一, 姜 維山, 清水 泰 「高軸力を受ける鉄筋コンクリート造柱の耐震性能に関する研究」JCI 年次講演会(第7回), 1985, P.625 6)黒正清治, 松崎育弘, 滝口克巳, 和田 章, 林 静雄, 福原正志, 小林克巳他「高軸力における鉄筋コンクリート柱の耐震性能の評価に関する研究」日本建築学会大会学術講演会, (1)~(4)1983, P.2109 (5)~(7)1984, P.1729, (8), (9)1985, P.439, 7)東 洋一, 佐藤 稔雄, 小野 新, 清水 泰, 周 小真「鉄筋コンクリート造短柱の高軸力下での耐震性能」日本建築学会大会学術講演会 1985, 10, P.399

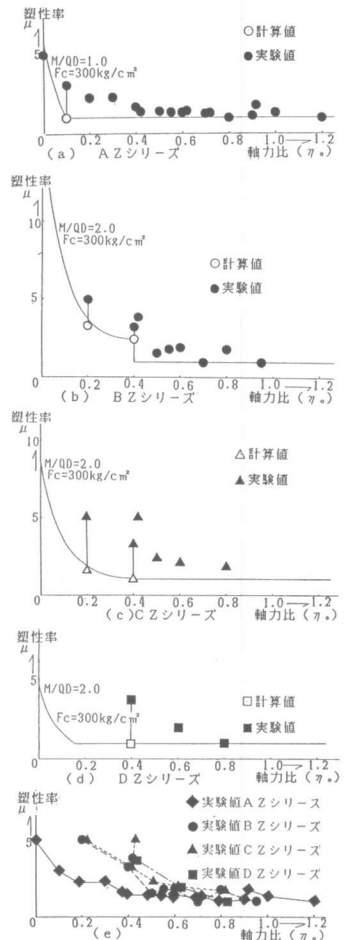


図5 塑性率と軸力比との関係

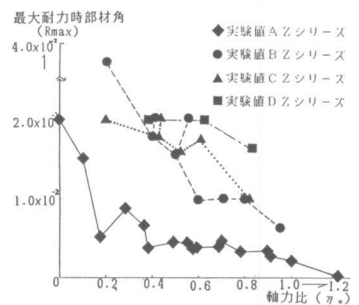


図6 最大耐力時部材角と軸力比との関係