

論文

[2184] 多段配筋柱の耐震性に関する基礎的研究

吉川真次*4・嶋津孝之*1・荒木秀夫*3・蓼原真一*2

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱が地震時において動的な繰り返し慣性荷重を受けた時の耐震性能については不明な点が多い。特に現実的な配筋状況すなわち中段筋を含む多段配筋柱の動的特性を明らかにしたものは皆無といってよい。

本研究は主筋量とその配置を基本的な軸として、動的と静的加力の違い、せん断スパン比の影響、帯筋量とその配し方の効果、さらにはX形配筋の効果についても検討を行なった振動台実験を内容とするものである。

2. 実験方法

2-1 試験体

試験体は先に述べたように多段配筋の効果を検討するために計16体用意した。考慮した実験変数は加力方法の違い、せん断スパン比および配筋方法である。

①試験体形状および材料特性 試験体は図2-1に示すように極めて剛な梁と基礎をもつ柱崩壊型の1層1スパン鉄筋コンクリートフレームで、実物の約1/10の縮小モデルである。せん断スパン比は2と3の2種類がある。柱断面は6cm×6cmで主筋に4φ丸鋼鉄筋を用い、せん断補強筋には2φおよび1φ鉄筋を用いている。梁、および基礎にはD6鉄筋を用い強固なものとした。せん断補強筋量は以下のように決定した。曲げ終局強度式により柱の最外引張鉄筋のみを考慮した曲げ耐力を求め、この耐力と、短期許容せん断耐力¹⁾により求まるせん断耐力が等しくなるよう式中のせん断補強筋比 P_w を決めた。

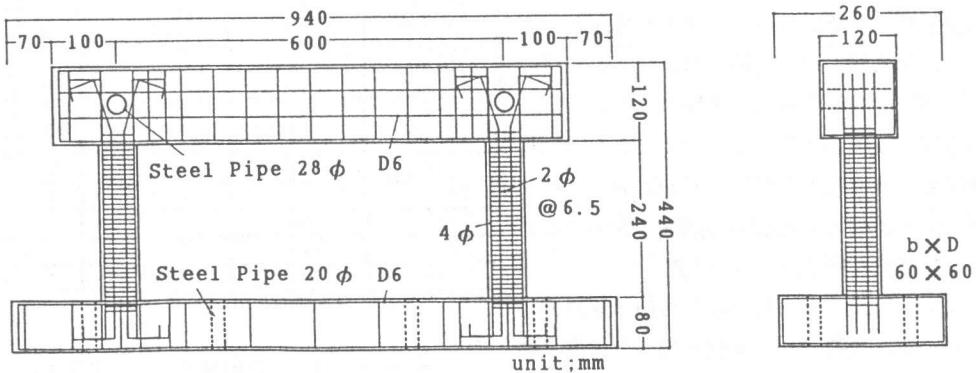


図2-1 試験体詳細(S2-4 type)

- *1 広島大学教授 工学部第四類 工博(正会員)
- *2 長崎大学講師 工学部構造工学科 工修(正会員)
- *3 広島大学助教授 工学部第四類 工博(正会員)
- *4 鴻池組(株)東京本店設計部 工修(正会員)

表 2-1 試験体一覧

Specimen	加力方法	M/QD	配筋方法	Pt (%)	Pw (%)	Qf (kgf)	Qs (kgf)	Qf/Qs	
S2-1, S2-2	動的	2	多段	0.70	0.62	1019	999	1.02	
S2-3, S2-4				1.40	1.61	1825	1810	1.01	
S2-1S, S2-2S	静的	2		0.70	0.62	1019	999	1.02	
S2-3S, S2-4S				1.40	1.61	1825	1810	1.01	
S3-1, S3-2	動的	3		0.70	0.20	679	655	1.04	
S3-3, S3-4				1.40	0.87	1217	1204	1.01	
T2-1	動的	2		多段	0.70	0.62	1019	999	1.02
T2-2				サブタイ	1.40	1.61	1825	2469	0.74
X2-1			X型	0.70	0.62	1019	999	1.02	
X2-2			配筋	1.40	1.61	1825	1810	1.01	

Ptは最外縁引張鉄筋比 $\sigma_y=4000\text{kg/cm}^2$, $wf_s=3000\text{kg/cm}^2$, $f_s=12\text{kg/cm}^2$ ($F_c=300\text{kg/cm}^2$)

$$Q_f = [0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D (1 - N / F_c \cdot b \cdot D)] / (H/2) \times 2$$

$$Q_s = b \cdot j [f_s + 0.5 \cdot w \cdot f_s (P_w - 0.002)] \times 2$$

表2-1に各変数、曲げ耐力Qfおよび短期許容せん断耐力Qsを示す。表最後欄に耐力比を示すが、ほぼ一致している。使用したセメントモルタルには早強ポルトランドセメント、細骨材は最大粒径2.5mmのものを用いた。水セメント比は43%、スランプは18cmである。鋼製型枠横打ち後自然養生し翌日に脱型した。モルタルおよび鉄筋の材料特性を表2-2a、2-2bに示す。鉄筋は明確な降伏点はなく0.2%歪時を降伏点とした。

②配筋 多段配筋の効果をみるため基本となる配筋は四隅に鉄筋を1本ずつ配したもので、および引張主筋量を2倍にし、中段筋のないもの、これら2種類に中段筋を2本ずつ加えたものの計4種類である。図2-2-(a)にその断面を示す。加力方法、せん断スパン比の影響を調べために3シリーズ12体となっている。動的加力でせん断スパン比2のS2-1, S2-2, S2-3, S2-4の4体を比較の基準とするため基本試験体と呼ぶ。また、中段筋を有効に利用して靱性向上や耐力上昇を目的としたサブ・タイ補強とX形配筋の試験体も用意した。配筋状況を図2-2-(b)に示す。

③加力方法 本研究では2種類の加力方法を用いた。振動台による動的加力と正負交番繰返し静的加力である。振動台の能力および試験体の耐力を勘案して、試験体頂部に慣性荷重用の厚鉄板(900kg)をボルト締めした。この錘による柱の軸方向応力度 σ_o は12.5kg/cm²であり、通常柱の受ける軸力レベルより低めの値となった。加力プログラムは文献

表 2-2 a コンクリートモルタルの材料特性

Specimen	Fc (kg/cm ²)	Ec (10 ⁵ kg/cm ²)	ϵ_o (%)
S2-1	371	2.44	0.34
S2-2	376	2.46	0.33
S2-3	339	2.08	0.30
S2-4	360	2.33	0.25
S2-1S	341	2.23	0.21
S2-2S	321	2.11	0.23
S2-3S	302	2.29	0.22
S2-4S	325	2.51	0.20
S3-1	336	2.34	0.18
S3-2	348	2.09	0.25
S3-3	351	2.45	0.28
S3-4	407	2.16	0.29
T2-1	391	2.33	0.29
T2-2	364	2.43	0.21
X2-1	315	2.14	0.22
X2-2	308	2.33	0.20

Ec : Young's Modulus at 1/3Fc

表 2-2 b 使用鉄筋の材料特性

Diameter	σ_y (kg/cm ²)	Es (10 ⁶ kg/cm ²)
1φ	3100	2.10
2φ	3342	2.10
4φ	5332	2.04
D6	4669	1.90

2) 3) 等を参考にして自由振動試験 (Free Vibration Test)、正弦波微振動試験 (Low Amplitude Steady State Test)、正弦波破壊試験 (High Amplitude Steady State Test) からなる一連の実験 (Run) を繰り返すことによって最終的な破壊に至らしめた。最大入力加速度レベルはRun1からRun4までほぼ0.4G, 0.8G, 0.1, 1G, 1.4G程度になる。動的加力装置の概要を図2-3に示す。一方、静的加力試験体にも動的実験同様厚鉄板をボルト締めし、鉛直荷重とした。加力プログラムは変位制御による正負交番漸増繰返し加力である。

3. 実験結果

3-1 破壊性状

せん断スパン比2の動的、静的両加力方法の8試験体についてみると、動的加力の全体的な破壊性状は過去の地震被害例をよく再現しているものとなった。鉄筋量の増加とともにかぶりコンクリートの脱落が激しく、終局状況は両端部からはぼ部材せい (= 6cm) の範囲でカバーコンクリートが剥落し、主筋やせん断補強筋が露出する。コア・コンクリートにもひびわれが進行していた。静的加力の破壊経過、破壊性状は動的加力とほぼ同じであった。せん断スパン比3の4体は端部での完全な曲げ破壊に近く、ひび割れも全体的に少ない。せん断スパン比2と同様、鉄筋量の増加に伴って若干の斜めひび割れが増加する傾向にあった。試験体T2-1, T2-2はサブ・タイ補強することによりコア・コンクリートの拘束効果を期待したものであるが、破壊状況からみると、これまでの基本試験体に比べて大きな相違はない。一方、X形配筋試験体X2-1, X2-2は通常配筋の試験体の傾向と異なるものであった。大きなひび割れの発生や進展は他シリーズと比較してかなり少ない。ただし、引張鉄筋量の多いものほどかぶりコンクリートの脱落は激しかった。

3-2 荷重変形曲線

図3-1に荷重-変形曲線を示す。動的加力の場合、縦軸のせん断力Qは顶部応答加速度に付加した質量を乗じて求めたものである。初期剛性はいずれの試験体もほぼ同じである。動的加力のものは部材角1/30あたりで最大耐力に達した後、急激に荷重が低下する傾向にある。これは、後述するように変形が進行するとループ特性がハードスプリング形になるため共振状態になりにく

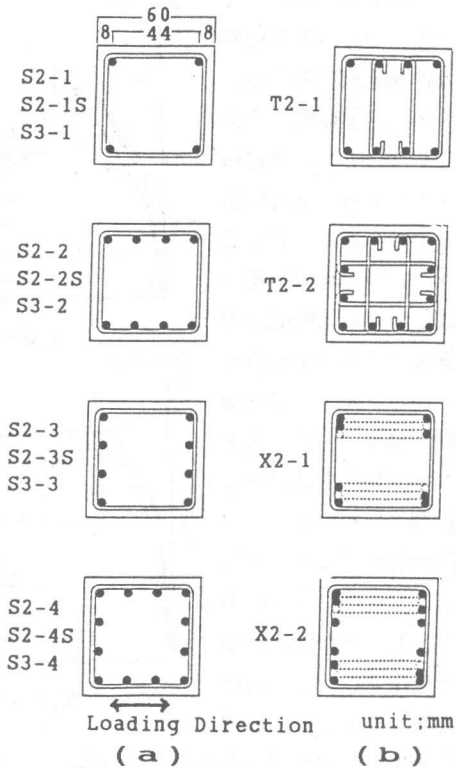


図2-2 配筋詳細

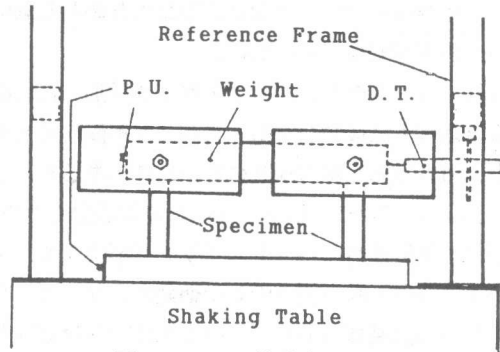


図2-3 動的加力詳細

いことも原因していると考えられる。一方、静的加力のもは動的加力のものと比較すると初期剛性こそあまり変わらないものの部材角1/50あたりで最大耐力に達し、その後もあまり耐力低下しない。同一配筋の耐力を比較してみると動的加力は静的加力のものより高くなっている。ループ形状特性は動・静加力に係わらずいずれの試験体もほぼ同じで、初期の紡錘形からスリップ傾向の大きなハードスプリング型に移行するものである。ループが困む面積も非常に小さい。これは繰返し回数が多いことに起因

する付着劣化に原因があると考えられる。

せん断スパン比3のものは2のものとは比べ全体的に大きな相違はないが、初期ひび割れのためか四隅配筋のS3-1の初期剛性が特に低い。

補強シリーズのなかでサブ・タイを付加したものは基本試験体とほぼ同じであったが、X形配筋のものは最大耐力以降も耐力低下のない靱性のあるものとなった。また、図3-2に示すようにこのX形配筋のループ形状は先に述べたハードスプリング形でなく、最終までエネルギー吸収能の優れた紡錘形となっていた。耐力は基本試験体の同タイプのものに比べほぼ同じ値である。

4. 解析および考察

4-1 解析方法

解析方法は平面保持仮定の断面分割法である。本試験体はフレーム形式であるため梁にせん断力が生じその結果、両柱に長期軸力 N_d に加えて作用水平力 Q に比例した軸力 ΔN が加わる。この軸力変動を考慮して解析を行なった。鉄筋は2次勾配を持つバイリニア型とし、コンクリートは文献⁴⁾のものをを用いた。曲率は弾性仮定の直線分布とし、曲率の積分により曲げ変形を、それにせん断変形と鉄筋抜け出しによる回転変形を加えたものを全変形とした。せん断変形は曲げひび割れを生じた部分はせん断抵抗はないものとし、せん断弾性剛性を基準に、柱の高さ方向にせん

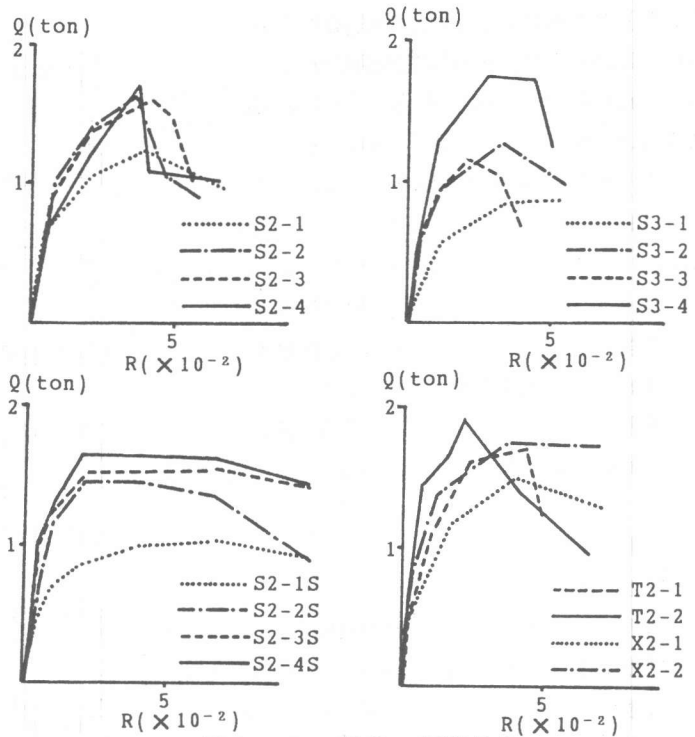


図3-1 荷重-変形曲線

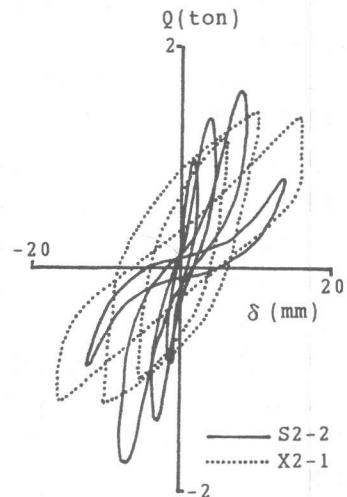


図3-2 ループ特性比較

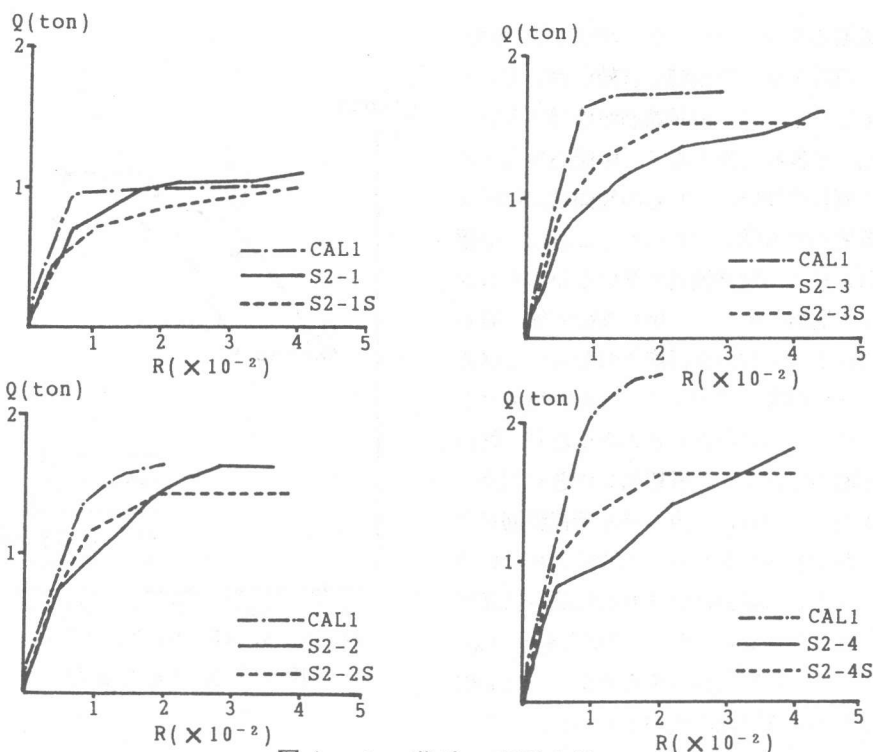


図4-1 荷重-変形曲線

断有効面積を減少させる塑性せん断変形を算出した。鉄筋の抜け出しによる回転変形は主筋を定着させている基礎内部の付着力はないものとし、引張反力はすべてアンカー部分で負担すると仮定して、この基礎定着部分の抜け出し量を計算することによって求めた。

4-2 実験値との比較

図4-1に実験値と解析値の比較について基本試験体の荷重-変形曲線を例示する。全体的な傾向として、最大耐力の5割程度の初期段階では実験値と解析値は比較的一致しているが、それ以降、実験値の剛性低下が大きく、解析値から外れる。この傾向は引張鉄筋量の多い試験体ほど大きい。また、主筋量が増えるに従い、かぶりコンクリートが脱落し、コア・コンクリートのみで抵抗するようになり曲げ変形やせん断変形が増大して、解析結果と実験結果の相違は大きくなると考えられる。次に表4-1にすべての試験体の最大耐力について曲げ解析結果と実験値の比較を示す。せん断スパン比2で主筋量の多いもの4体 (S2-4, S2-4S, T2-2, X2-2)を除き、ほぼ一致していることがわかる。

図4-2に表2-1に示した略算式による曲げ耐力値 Q_f 、許容せん断耐力値 Q_s および断面分割による曲げ解析値 CAL1 に対する実験値をプロットしたものを示す。中段筋の有無に係わら

表4-1 最大耐力

Specimen	EXP (kg)	CAL1 (kg)	EXP CAL1
S2-1	1159	1006	1.152
S2-2	1716	1663	1.031
S2-3	1606	1737	0.925
S2-4	1795	2328	0.771
S2-1S	1022	998	1.024
S2-2S	1445	1589	0.909
S2-3S	1540	1721	0.895
S2-4S	1620	2294	0.706
S3-1	840	730	1.151
S3-2	1263	1153	1.095
S3-3	1152	1275	0.904
S3-4	1811	1717	1.055
T2-1	1718	1764	0.974
T2-2	1934	2427	0.797
X2-1	1489	1714	0.869
X2-2	1854	2440	0.760

引張鉄筋の少ないS2-1, S2-2はほぼ曲げ解析値でほぼ追跡でき、中段筋も有効に働いていることが分かる。一方、引張鉄筋が倍増するS2-3は解析値より低めの値となり、中段筋を有するS2-4は3割程度低い。これらの傾向は図に示すように静的加力も同じであった。これは、引張鉄筋量およびせん断補強筋が多いとかぶりコンクリートが脱落しやすく、更に多数回繰り返し水平加力によって脱落が促進されたものと考えられる。その結果、コンクリートの圧縮域がコアコンクリート内に存在することになり、柱自体の曲げ耐力が減少し、計算値を大きく下回った原因と考えられる。一方、せん断補強筋量が少なく、かぶりコンクリートの脱落の少ないせん断スパン比3の耐力はいずれの配筋もほぼ計算値と対応していることが表4-1からも分かる。以上のことは内部配筋を変えたシリーズも引張鉄筋量が多いと同様な傾向であった。

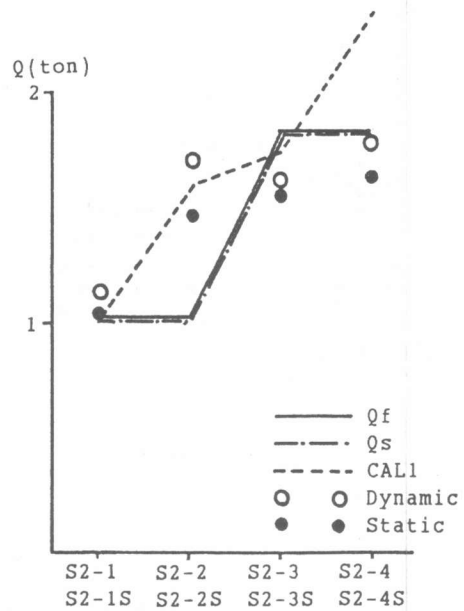


図4-2 最大耐力

結論

鉄筋コンクリート多段配筋柱の振動台実験を行ない、以下の結論を得た。

- 1) せん断スパン比2の場合、耐力的には引張鉄筋量が少なく中段筋は有効に働くが、引張鉄筋量、せん断補強筋量が増加すると、圧縮を受け持つかぶりコンクリートの脱落が激しくなり曲げ耐力自体にも達しなくなる。サブ・タイを付加しても、X形配筋にしてもその効果は余りなく、曲げ耐力に有効な引張鉄筋量の限界については今後検討する必要がある。また、基本試験体について静的加力との比較を行なったが、大きな差異はなかった。なお、せん断スパン比3については主筋量が多い場合でも曲げ耐力計算値に達する。
- 2) 靱性やループ面積を大きくさせるのにX形配筋が有効である。

謝辞 本論文は筆者の一人の修士論文をまとめたものである。動的实验では中国電力株式会社の振動台を使用しました。また、試験体作製にあたっては㈱ニチブの協力を得ました。ここに深謝いたします。

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・同解説
- 2) 小川淳二；鉄筋コンクリート骨組の動的特性、コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 7, July, 1970
- 3) Mete A. Sozen and Denby G. Morrion ; Response of Reinforced Concrete Plate Column Connections to Dynamic and Static Horizontal Loads, Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 490
- 4) Park, Robert et. al; Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Journal of the Structural Division, ASCE, ST7, July 1972