

論文

[2057] 鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ性状に関する研究

正会員○村田耕司（竹中工務店技術研究所）

正会員 東端泰夫（竹中工務店技術研究所）

正会員 長嶋俊雄（竹中工務店技術研究所）

1. はじめに

本研究は、高強度コンクリート ($F_c=450\text{kg/cm}^2$) を用いたSRC柱の基本的な性状を把握するための実験的研究である。特にSRC柱の耐力と靱性に関わる要因として鉄骨と帯筋によるコンクリートの拘束効果に着目し、それらが柱の曲げせん断性状に及ぼす影響を検討する。

前報では、鉄骨の成・幅・厚および帯筋の強度・量・配置の異なるSRC柱の中心圧縮実験を行い、それらが圧縮性状に及ぼす影響を検討し、最大耐力と軸ひずみ1%、3%時の保有強度を推定した[1][2]。本報では、前報の結果を踏まえて軸力曲げせん断応力下での柱の性状を検討する。実験は中心圧縮実験と曲げせん断実験とから構成される。中心圧縮実験では、前報同様にコンクリートの拘束に有効な鉄骨形状と帯筋配置を実験変数とし、また鉄骨と帯筋に高強度材料を使用して、それらが圧縮性状に及ぼす影響を検討する。一方曲げせん断実験では、それらの因子の他、作用軸力レベルおよびSとRCの曲げ耐力比の違いが曲げせん断性状に及ぼす影響を検討する。

2. 中心圧縮実験

2.1 実験計画

試験体は表1に示すSRC柱6体である。試験体形状寸法、加力方法、測定方法の概要を図1に示す。加力は中心圧縮力を静的に加え、図に示す測定区間の軸ひずみで7%まで単調載荷を行った。試験体に用いた材料の試験結果を表2に示す。

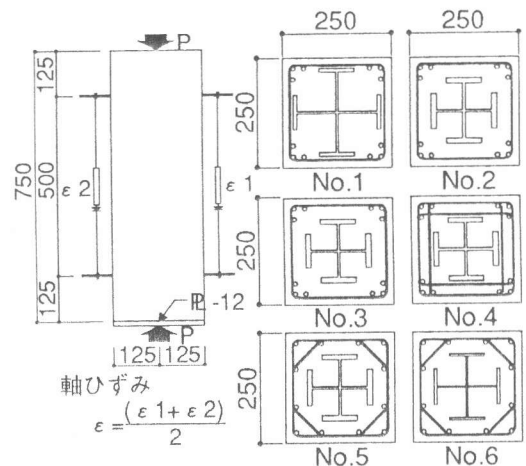


図1 試験体形状および断面

表1 試験体一覧

試験体 名称	鉄骨 断面	帯筋量 Pw (%)	帯筋 降伏点 (Kgf/cm^2)	帯筋 形状
No.1	L	0.287	8000	□
No.2	Ⓜ	0.287	8000	□
No.3	M	0.287	8000	□
No.4	M	0.574	8000	田
No.5	M	0.574	8000	⊠
No.6	S	0.574	13000	⊠

1)鉄骨断面

S: $\pm 150 \times 80 \times 3 \times 6$ (SM490A)
 L: $\pm 200 \times 80 \times 6 \times 8$ (SM490A)
 M: $\pm 150 \times 80 \times 6 \times 12$ (SM490A)
 Ⓜ: $\pm 150 \times 80 \times 6 \times 12$ 高張力鋼
 (HT80と称す)

2)帯筋間隔: 35mm(共通)

3)主筋: 12-D10(共通)

表2 材料試験結果

鋼材				コンクリート		
	降伏点 σ_y (kgf/cm^2)	引張強度 σ_t (kgf/cm^2)	降伏 ひずみ ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	圧縮強度 f_c (kgf/cm^2)	圧縮強度 時のひずみ ($\times 10^{-6}$)	計算に用 いた試験体
鉄筋	4φ	3697	4467	圧縮 実験	484	No.1~6
	4φ	8763	9735		2204	
	4φ	10220	15202		2007	
	D10	3865	5379		2151	
鋼板	R-3	3986	5634	曲げ せん断 実験	410	No.4,6
	R-6	3968	5538		2042	No.12
	R-8	3753	5067		2150	No.1,3,5, 9,10
	R-12	3639	5462		2270	No.7,8,11
	R-6	7659	8308			
	R-12	7773	8503			

2. 2 実験結果

図2に荷重 P と軸ひずみ ϵ の関係を示す。いずれの試験体も $\epsilon=0.3\sim0.5\%$ でかぶりコンクリートがはく落して一旦耐力が低下した（この時の最大荷重を最大耐力と定義する）。その後はほぼ一定強度の安定した挙動を示したが、□型配筋のものは3~4%で、▣型配筋のものは2.5~3%で帯筋の破断（▣型は中子筋）を生じるとともに主筋が座屈して、徐々に耐力が低下した。これに対して田型のものは、前述の安定した領域においても強度の上昇傾向を示し、 $\epsilon=6\%$ 付近で中子帯筋の破断とともに強度低下を示した。なお、軸方向鋼材は、いずれの試験体も最大耐力時には全て降伏していた。

図3は、□型・田型・▣型それぞれの帯筋のひずみ状況である。いずれも最大耐力時には降伏ひずみに達していない。最大耐力以降は外周筋より中子筋のひずみが大きく、コンクリートの膨張にともなう主筋の腹み出しに対する拘束としての中子帯筋の有効性がうかがえる。ここで、特に▣型の中子斜辺部分のひずみの増大傾向が顕著であり、これは、田型の中子に比べて▣型の中子斜辺部分で拘束する主筋間隔が短いためと考えられる。

2. 3 考察

表3に、最大耐力および軸ひずみ1%と3%時の保有強度について実験値と計算値を示す。最大耐力では、SRC規準式[3]は安全側の評価となっており、Park式[4]では、横補強筋の拘束力として帯筋の降伏応力を取っているため若干過大評価になっている。前報提案式[1]による計算値は、前2式の間値を示しており、実験値に良く対応している。

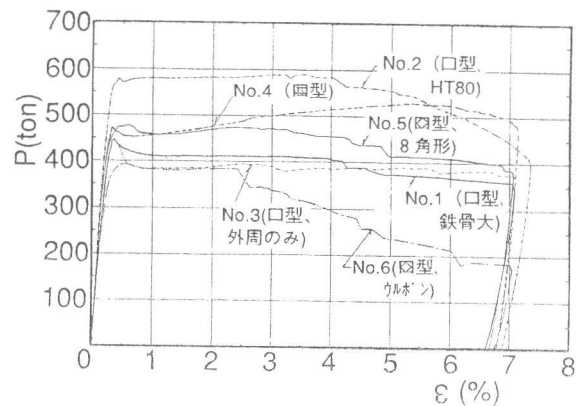


図2 荷重～軸ひずみ関係

表3 実験結果一覧

試験体 名称	最大荷重時				軸ひずみ $\epsilon=1\%$ 時		軸ひずみ $\epsilon=3\%$ 時	
	実験値	計算値	計算値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
	Pmax (ton)	Pmax1 (ton)	Pmax2 (ton)	Pmax3 (ton)	P1% (ton)	P1%1 (ton)	P3% (ton)	P3%1 (ton)
No.1	444.0	415.0 (1.07)	473.3 (0.94)	457.5 (0.97)	410.0	434.6 (0.94)	411.0	468.4 (0.88)
No.2	577.2	637.2 (0.91)	699.8 (0.82)	642.5 (0.90)	579.4	611.5 (0.95)	588.0	662.1 (0.89)
No.3	450.5	424.0 (1.06)	486.6 (0.93)	452.8 (0.99)	383.0	398.2 (0.96)	398.7	393.4 (0.99)
No.4	472.1	424.0 (1.11)	510.3 (0.93)	468.9 (1.01)	456.0	433.7 (1.05)	500.0	483.8 (1.03)
No.5	476.9	424.0 (1.12)	510.3 (0.93)	462.7 (1.03)	458.5	450.5 (1.02)	472.2	486.9 (0.97)
No.6	392.8	365.7 (1.07)	442.8 (0.89)	399.8 (0.98)	382.0	398.8 (0.96)	337.9	395.8 (0.85)

特記事項

- 1) 最大強度計算値(Pmax1): SRC規準の累加強度式
- 2) 最大強度計算値(Pmax2): Park式
- 3) 最大強度計算値(Pmax3): 前報提案式
- 4) 最大強度計算値(P1%1): 前報提案式
- 5) 最大強度計算値(P3%1): 前報提案式
- 6) 計算値の下の()は、実験値/計算値を示す。

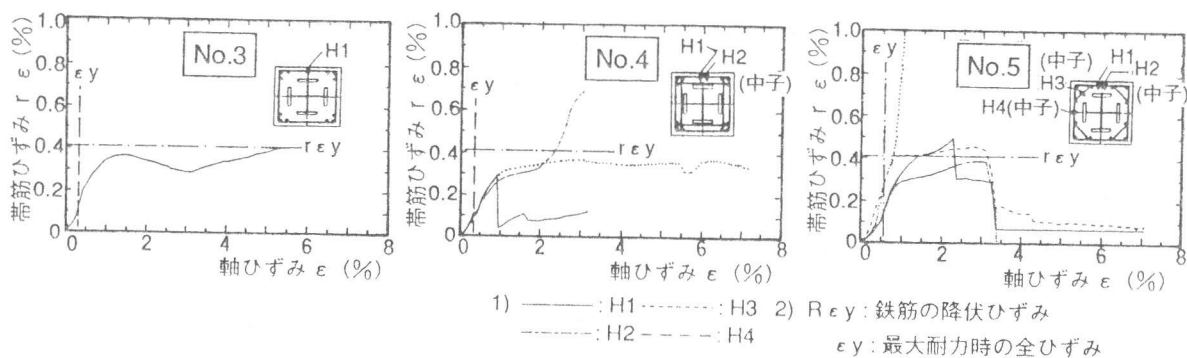


図3 帯筋ひずみ～全体軸ひずみ関係

但し、いずれの推定式もHT80を用いたNo.2に関しては過大評価となっている。これは、高強度鉄骨の降伏ひずみがコンクリートの圧縮強度時のひずみに比べて大きいこと、鉄骨の降伏強度とコンクリートの圧縮強度の累加が成立しないためであると思われる。

軸ひずみ1%の保有強度に関して、計算値は実験値に良く対応している。軸ひずみ3%の保有強度もほぼ一致しているが、高強度鉄骨あるいは□型の高強度帯筋を使用した場合、若干過大評価の傾向にある。また、鉄骨成の大きなものに関しても同様の傾向がうかがえる。

以上の圧縮実験より、前報で提案した保有強度の推定式[1],[2]で概ねSRC柱の圧縮性状を推定することができるものと思われる。但し、成の大きな鉄骨の拘束効果に関して、前報提案式は本実験の2倍の帯筋量を配した場合の実験結果に基づいたものであり、拘束効果に関する帯筋と鉄骨の相互関係に関しては再考の余地がある。また、□型の高強度帯筋を使用した場合も、中子斜辺部分の変形性状を考慮して、その拘束効果を評価する必要があるものと思われる。さらに高強度の鉄骨を用いた場合も、その強度の取り扱いに関しては今後の課題である。

3. 曲げせん断実験

3.1 実験計画

表4に試験体一覧を示す。試験体は、以下に示す変動因子とその水準を組合わせたSRC柱12体である。

- ①軸力比 $N/N_0 = 0.3, 0.5, 0.7$ SRC規準
- ②曲げ耐力比 $sM_0/M_0 = 0.3, 0.4, 0.6$ による
- ③鉄骨成比 $SH/D = 0.6, 0.8$
- ④鉄骨強度 SM490A, HT80
- ⑤帯筋量 $P_w = 0.287, 0.574\%$
- ⑥帯筋強度 $w\sigma_y = 4000, 8000, 13000 \text{ kg/cm}^2$
- ⑦帯筋形状 □型, 田型, □型

試験体の形状は図4に示すように、断面は圧縮実験試験体と同様の25×25cmで、成高き比6.0としている。載荷は建研式加力装置により軸力を一定に保ちつつ、正負に交番繰返し水平荷重を作用させた。使用材料の機械的性質は、圧縮実験と同様で表2に示すものである。

3.2 実験結果

a) 実験経過および荷重～変形関係

図5に荷重～変形関係、表5に主な実験結果と計算値の一覧を示す。初期には端部に曲げひび割れが生じ、No.1以外はR=10/1000付近で端部圧縮側のかぶりコンクリートの圧壊と同時に最大耐力となった。この最大耐力(表5中の Q_{max1})は多くの試験体でSRC規準[3]による計算値を下回っている。これは、今回の試験体が大きな成高き

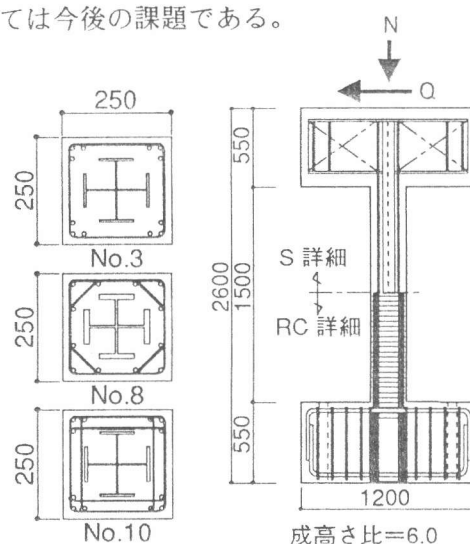


図4 試験体形状および断面

表4 試験体一覧

試験体 名称	軸力比 N/N_0	曲げ耐力比 sM_0/M_0	鉄骨 断面	帯筋量 P_w (%)	帯筋 降伏点 (Kg/cm^2)	帯筋 形状
No.1	0.3	0.61	(M)	0.287	8000	□
No.2	0.3	0.41	M	0.287	8000	□
No.3	0.3	0.27	S	0.287	8000	□
No.4	0.5	0.41	M	0.287	8000	□
No.5	0.5	0.41	M	0.574	4000	田
No.6	0.5	0.42	L	0.287	8000	□
No.7	0.5	0.41	M	0.574	8000	□
No.8	0.5	0.42	M	0.574	8000	田
No.9	0.5	0.27	S	0.287	8000	□
No.10	0.5	0.27	S	0.574	8000	田
No.11	0.7	0.27	S	0.574	8000	田
No.12	0.7	0.27	S	0.574	13000	田

1)鉄骨断面 S: $\pm 150 \times 80 \times 3 \times 6$ (SM490A)
M: $\pm 150 \times 80 \times 6 \times 12$ (SM490A)
L: $\pm 200 \times 80 \times 6 \times 8$ (SM490A)
(M): $\pm 150 \times 80 \times 6 \times 12$ (HT80)

2)帯筋間隔: 35mm(共通) 3)主筋: 12-D10(共通)

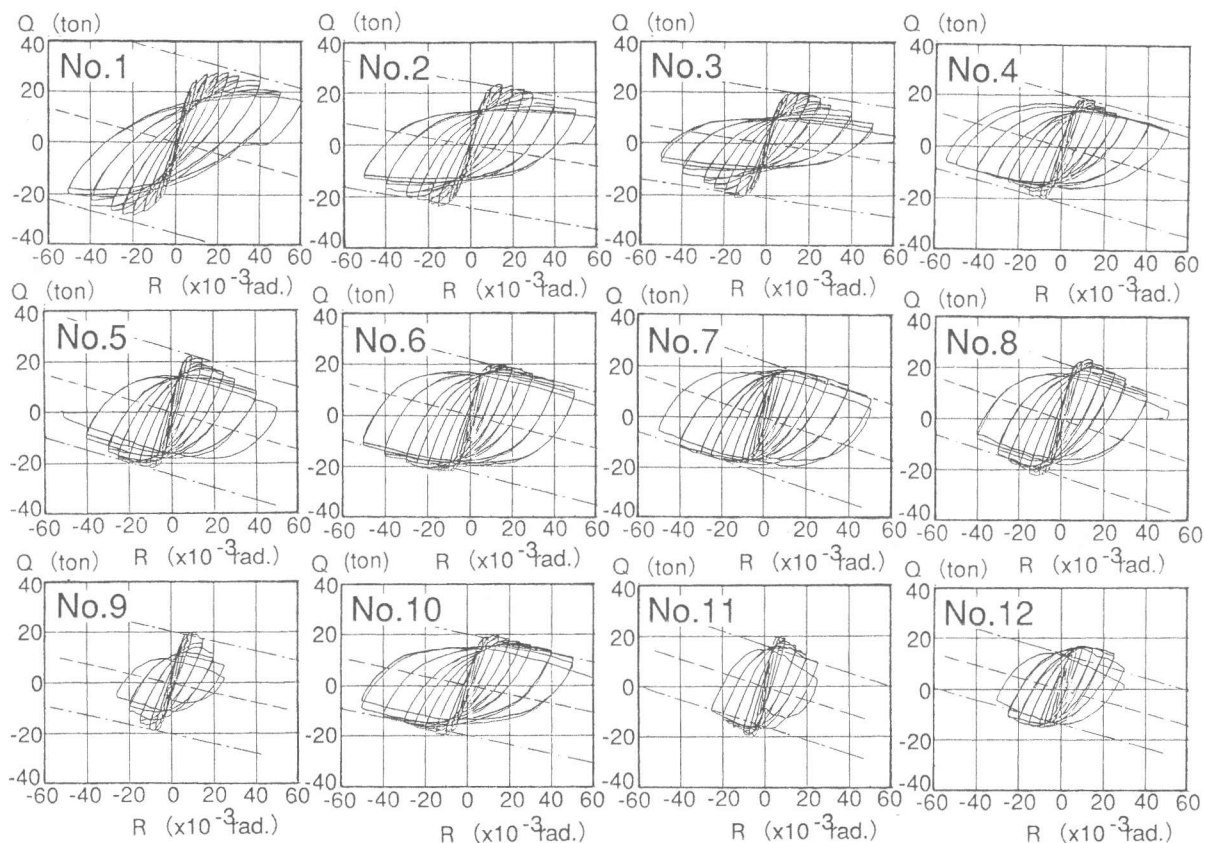


図5 荷重～変形関係

比に対して高軸力であったためにP- δ 効果の影響を強く受けた結果と考えられ、この効果を考慮した実験値の最大耐力（表5中の Q_{max2} ）は高強度鉄骨を用いたNo.1を除いて計算値を上回る耐力となった。また、軸力比の高いNo.11,12では計算値（ Q_{cal} ）に対して1.2倍程度の実験値を示している。この2体は破壊性状も他の試験体と異なり、コンクリート圧壊位置が若干高さ中央寄りであった。このことから判断すると、高軸力の場合、基礎スタブの拘束効果による柱コンクリート部分の圧縮耐力上昇が顕著に表われ、危険断面位置が中央部に移動したことにより、荷重が上昇したものと思われる。

最大耐力以降の挙動は試験体により異なるが、No.9以外は少なくとも $R=20/1000$ まで著しい耐力低下はなかった。 $R=20/1000$ 以降には、端部圧縮側における主筋の座屈および帯筋の破断を生じて強度が低下した。軸力比0.5以上かつ鉄骨曲げ耐力比0.3のものは、No.10を除いて最終的には鉄骨フランジの座屈により、軸力保持が不可能な状態となった。

b) 軸方向のひずみについて

図6に試験体上下端に設けた基礎スタブ間の軸方向の変形状況を示す。軸力比が高い程、また鉄骨量あるいは帯筋量の小さい程、軸縮みの増大傾向が著しいものとなっている。図7は、各加

表5 実験結果一覧

試験体	軸力比 η	実験値		計算値			R_u ($\times 10^{-3}$ rad.)
		Q_{max1} (ton)	Q_{max2} (ton)	Q_{cal} (ton)	Q_{max1} Q_{cal}	Q_{max2} Q_{cal}	
No.1	0.29	28.2	32.9	35.4	0.80	0.93	40.0
No.2	0.30	24.0	26.2	24.1	1.00	1.09	30.0
No.3	0.29	20.9	23.8	20.9	1.00	1.14	25.0
No.4	0.50	20.4	22.2	21.3	0.96	1.04	15.0
No.5	0.48	22.2	24.6	24.3	0.91	1.01	20.0
No.6	0.50	22.2	25.6	22.9	0.97	1.12	30.0
No.7	0.56	18.8	24.0	22.6	0.83	1.06	30.0
No.8	0.56	23.7	27.3	22.1	1.07	1.24	20.0
No.9	0.48	19.8	21.7	20.6	0.96	1.05	15.0
No.10	0.48	19.8	22.8	20.6	0.96	1.11	30.0
No.11	0.66	19.9	21.8	16.5	1.21	1.32	15.0
No.12	0.66	17.0	20.5	14.3	1.19	1.43	25.0

Q_{max1} : 最大耐力 R_u : 限界変形角(0.8 Q_{max} 時変形角)
 Q_{max2} : P- δ 効果を考慮した最大耐力
 Q_{cal} : S R C 規準による計算値

力サイクルにおいて水平変形が0の状態での軸方向の変形分布を示したものである。軸力比の違いに関わらず、水平変形の増大にともなう試験体端部の軸変形が増加しているのに対し、試験体中央部では初期の変形を保っている。その軸変形が増大する範囲は軸力比の増加にともなう広がる傾向が見られる。図8は水平正加力ピーク時におけるコンクリート表面のひずみ分布である。水平加力にともなう圧縮ひずみの増大領域は、柱成 Dに対して端部から1.0D~1.5Dに集中しており、曲げヒンジ領域はこの範囲に限定できるものと思われる。

以上より、本実験におけるSRC柱の曲げ耐力、変形性能および軸縮みの現象は端部ヒンジ領域での圧縮性状が支配的であると考えられる。

c) 軸鋼材のひずみ状況について

図9に同一水平断面内での軸鋼材のひずみ状況を示す。概ね平面保持の仮定が成立するひずみ分布状況になっており、軸方向の分布も上述の軸ひずみ分布と一致していると考えられる。但し、軸力比0.7では大変形時に鋼材の圧縮ひずみの増加が著しくなっている。なお、軸力比0.3では圧縮側・引張側それぞれで降伏ひずみに達したが、軸力比0.5以上では全て圧縮降伏となった。

d) 帯筋のひずみ状況

図10は帯筋各部のひずみ状況である。□型配筋の帯筋ひずみは、軸力比の増大にともなう増加傾向にあるが、測定位置では降伏に至らなかった。田型配筋でも外周筋のひずみは□型と同程度であったが、中子筋のひずみ増大が著しく、この傾向は軸力比が高い程顕著である。また□型では外周・中子ともにひずみが大きく、特に中子の斜辺部分の増加が著しい。

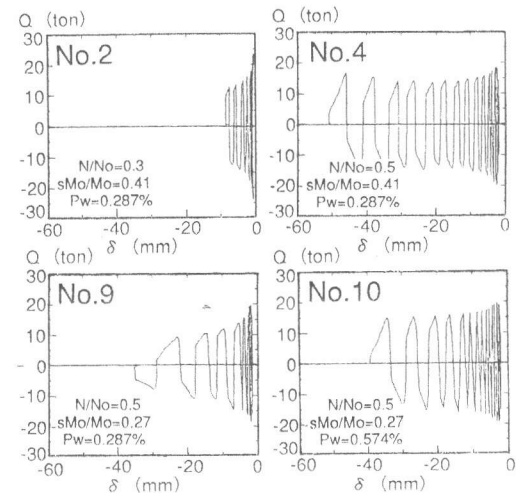


図6 荷重～軸ひずみ関係

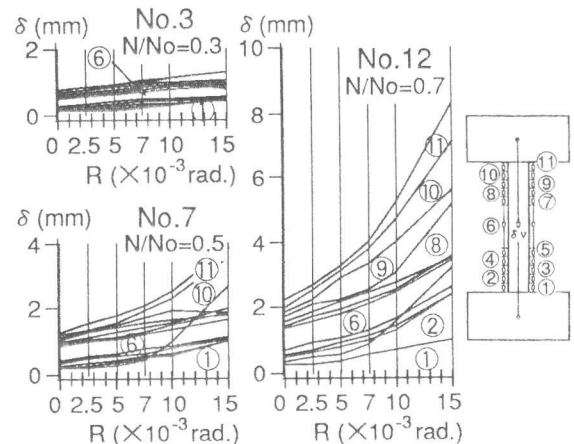


図7 軸方向ひずみ成分図

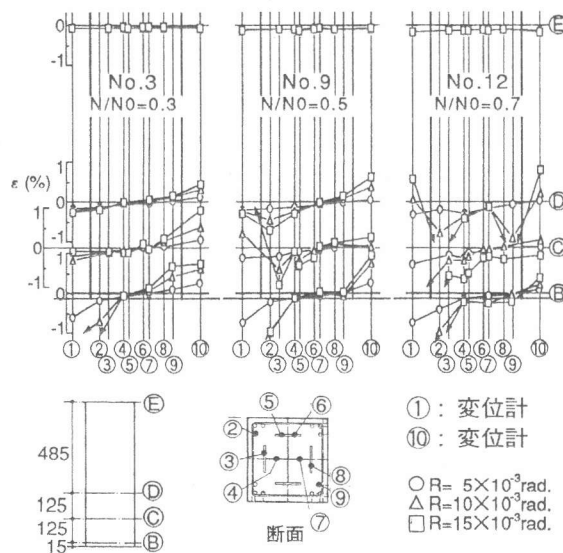


図9 断面内のひずみ分布

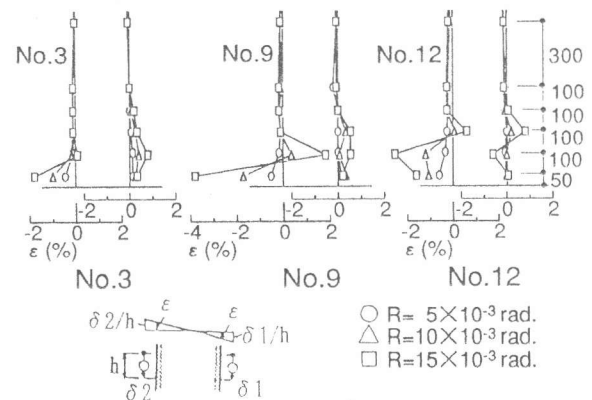


図8 コンクリート面の軸方向ひずみ分布

3. 3 考察

以上の実験結果より、いずれの試験体も、端部1.0D～1.5Dの領域で曲げ破壊を生じており、この部分の圧縮耐力と変形性能が、全体の曲げ耐力と変形性能および軸方向の縮みに影響しているものと思われる。また中心圧縮状態における鉄骨と帯筋による拘束効果が、軸力曲げせん断応力下で断面内の応力勾配が存在する場合においても、その変形性能に対して概略同じ効果が期待できるものと思われる。そこで、曲げせん断実験で得られた変形性能に対して、前述の中心圧縮実験による横方向拘束の評価法を適用して検討する。

図11は、横方向の拘束量と曲げ破壊する柱の靱性能の関係を示したものである。横方向の拘束効果としては、中心圧縮状態における大変形時の強度保持能力と考えることとした。つまり、まず中心圧縮状態における最大荷重時と軸ひずみ3%時のコンクリート耐力を前報提案式[1]により算出した。さらにそれらの値を用いてSRC規準の一般化累加強度式によりそれぞれの曲げ耐力(M_u, M_u')を算出し、両者の比を拘束量と見なした。また、柱の靱性能としては軸力比 n (N/N_0)と限界変形角 R_u の積で表わすこととした。このような方法で横拘束量と靱性能を定義した場合両者の相関係数は0.8程度であり、図より横拘束による靱性能向上の傾向が概ねうかがえる。

4 まとめ

前報に引き続き、新たな鉄骨強度・成および帯筋強度・配置を設定したSRC柱の中心圧縮実験を行い、それらの拘束効果を考慮した圧縮性状推定方法の適応性を確認した。さらに軸力比およびSとRCの曲げ耐力比の異なる状況での横拘束の効果を、定性的ではあるが中心圧縮性状よりその傾向を把握した。今後さらに、断面内の応力勾配および軸方向の累積ひずみも考慮して、横方向拘束と曲げ性状の関係を定量的に検討してゆく方針である。

- [1] 村田、東端「鉄骨鉄筋コンクリート柱の圧縮性状に関する研究」 JCI年次論報1990
- [2] 東端、村田「鉄骨鉄筋コンクリート柱の圧縮性状に関する研究」日本建築学会C1990
- [3] 「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1987)」日本建築学会
- [4] Park, R., et. : "Ductility of Square-Confined Concrete Columns", ST4 ASCE, April, 1982

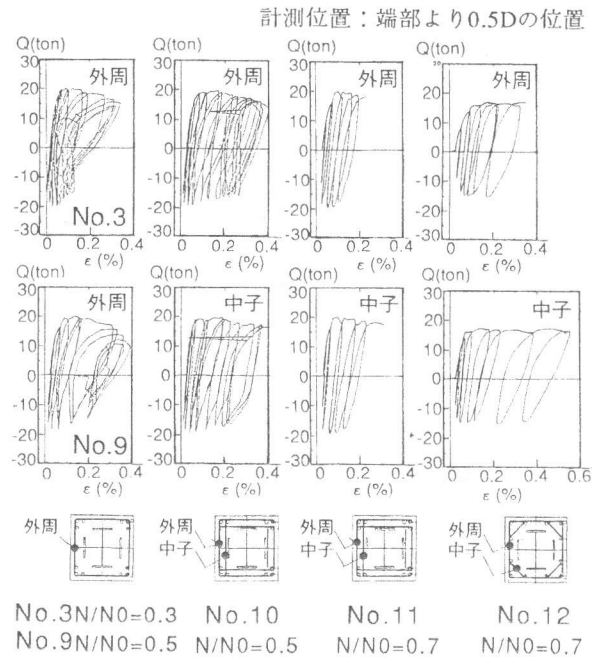


図10 荷重～帯筋ひずみ関係

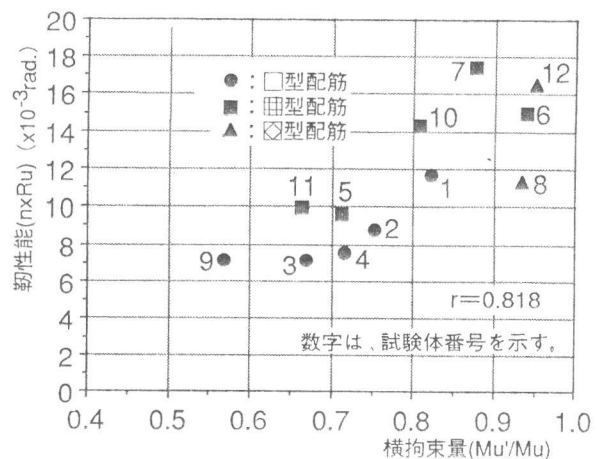


図11 靱性能 ($n \times R_u$) と
横拘束量 (M_u'/M_u) の関係図