

論文

[2088] 載荷履歴を受けた鉄筋コンクリート柱の曲げせん断性状に関する実験研究

磯 雅人<sup>\*1</sup>・山本 俊彦<sup>\*2</sup>・大滝 健<sup>\*3</sup>

1. はじめに

近年、我が国において超高層鉄筋コンクリート建物が数多く建てられるようになってきた。これらの超高層鉄筋コンクリート構造物では、柱の受ける軸力がかなり大きくなり、一旦地震により柱が大きな損傷を受けた場合、柱の軸方向剛性の低下やクランプ歪により構造物全体の長期的な変形が著しく大きくなる恐れがある。そこで筆者らは、1/100 (rad)程度の損傷を与えたRC柱〔高強度コンクリート (Fc=600kgf/cm<sup>2</sup>), 高強度1種軽量コンクリート (Fc=360kgf/cm<sup>2</sup>) 使用〕についてのクランプ特性を把握するための実験研究を行ってきた。そして、1/100 (rad)程度の損傷であれば長期的な変形が著しく増すことはないという結果を得た[1], [2], [3], [4]。しかし、これら損傷を受けさらに長期軸力を受けた後の柱の曲げせん断性状については、実験データも少なく、不明な点も多い。そこで本研究では、地震により大きな損傷を受けた後クランプ特性を把握した試験体〔高強度コンクリート (Fc=1200kgf/cm<sup>2</sup>), 普通コンクリート (Fc=210kgf/cm<sup>2</sup>), 高強度1種軽量コンクリート (Fc=360kgf/cm<sup>2</sup>) を使用したRC柱〕を用いて曲げせん断実験を行い、破壊性状、変形性状、耐力におよぼす事前の載荷履歴及びコンクリートの種類の影響を明らかにすることを目的とした。また、事前の載荷履歴

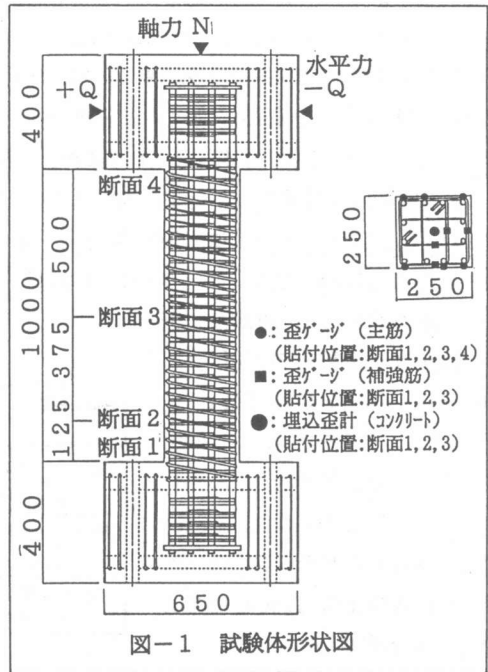


図-1 試験体形状図

表-1 試験体要因一覧

シリーズ名称	No	試験体名	せん断補強筋比 pw (%)	補強筋降伏応力度 wσy (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断補強筋量 pwσy (kgf/cm <sup>2</sup> )	コンクリート強度 cσB (kgf/cm <sup>2</sup> )	軸力 σ0 (kgf/cm <sup>2</sup> )	事前の載荷履歴
Hシリーズ	1	H1	1.20 (4-08.4 ④40 ④17%)	13800	165.6	1240 1438	400 (0.28)*	曲げせん断実験による周間変位1/100経験後 クランプ試験(軸力σ0=400(kgf/cm <sup>2</sup> ))
	2	H2						クランプ試験(軸力σ0=400(kgf/cm <sup>2</sup> ))
	3	H3						乾燥収縮試験
Nシリーズ	4	N1	0.50 (4-04 ④40 ④17%)	18000	90.0	314 393	100(0.25)* 200(0.51)*	曲げせん断実験による周間変位1/100経験後 クランプ試験(軸力σ0=100(kgf/cm <sup>2</sup> )(No. 4 N1試験体) σ0=200(kgf/cm <sup>2</sup> )(No. 5 N2試験体))
	5	N2						
Lシリーズ	6	L1				409 518	140(0.27)* 280(0.54)*	曲げせん断実験による周間変位1/100経験後 クランプ試験(軸力σ0=140(kgf/cm <sup>2</sup> )(No. 6 L1試験体) σ0=280(kgf/cm <sup>2</sup> )(No. 7 L2試験体))
	7	L2						

【共通要因】  
断面 b×D=25×25 (cm)  
せん断スパン比 a/D=2.0  
有効せい d=22.5 (cm)  
主筋 4-D13 pt=0.81 (%)  
載荷履歴 正負交替繰返載荷

【試験体の説明】  
①コンクリートの種類  
②ナンバー

コンクリート強度 (養生: 現場気中)  
H: 高強度コンクリート 上段: 4W強度  
N: 普通コンクリート 下段: 1Y強度  
L: 高強度1種軽量コンクリート  
\*: ( ) 内は軸力比 (γ0=σ0/cσB) を表す。  
cσBは、材令1年のものを使用した。

- \*1 東急建設 (株) 技術研究所建築研究部建築構造研究室研究員、工修 (正会員)
- \*2 東急建設 (株) 技術研究所建築研究部建築構造研究室室長、工博 (正会員)
- \*3 東急建設 (株) 技術研究所建築研究部建築構造研究室研究員、工修

の影響を見るために地震力を受けていない試験体(乾燥収縮特性及びクリープ特性を把握するための試験体)も一部交えて検討することにした[1],[2],[3],[4]。

## 2. 実験概要

(1)試験体及び使用材料 試験体要因一覧を表-1、試験体形状図を図-1、コンクリート及び鉄筋の材料試験結果一覧を表-2, 3に示す。試験体断面は、 $b \times D = 25(\text{cm}) \times 25(\text{cm})$ 、せん断スパン比 $a/D = 2.0$ とした。主筋は、12-D13( $\rho_g = 2.44\%$ )とし、HシリーズにおいてはSD50材を、N,LシリーズではSD35材を使用した。変動要因は、せん断補強筋比( $\rho_w$ )、コンクリートの種類・強度( $F_c$ )、軸力( $\sigma_0$ )、事前の載荷履歴の4要因とし、総数7体を計画した。

(2)加力及び測定方法 加力模式図を図-2に示す。加力は建研式加力とし、アクチュエータ3台により柱に逆対称モーメントを加えた。載荷履歴は、試験体の部材角で

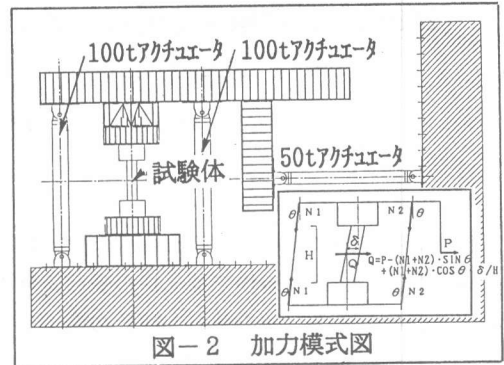


図-2 加力模式図

表-2 コンクリートの材料試験結果一覧

シリーズ	養生	材令	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $\times 10^4$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	単位重量 (tf/m <sup>3</sup> )
Hシリーズ	現気	28	1240	3.94	2.43
	1年		1438	4.27	2.41
Nシリーズ	現気	28	314	2.31	2.24
	1年		393	2.47	2.19
Lシリーズ	現気	28	409	1.63	1.86
	1年		518	1.83	1.82

備考: Hシリーズ: 高強度コンクリート( $F_c = 1200 \text{ kgf/cm}^2$ )のシリーズ  
 Nシリーズ: 普通コンクリート( $F_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ )のシリーズ  
 Lシリーズ: 高強度1種軽量コンクリート( $F_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ )のシリーズ

表-3 鉄筋の材料試験結果一覧

鉄筋の種類		降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)	降伏ひずみ ( $\mu$ )	ヤング係数 $\times 10^4$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
主筋	D13(SD50)	5520	6750	13.0	3120	1.84
	D13(SD35)	3450	5100	19.5	1820	1.91
補強筋	U6.4(丸棒)	13800	14600	—	8250	2.25
	U4(丸棒)	18000	19800	8.7	10400	2.11

備考: D13(SD50), U6.4(丸棒)は、Hシリーズで使用  
 D13(SD35), U4(丸棒)は、N, Lシリーズで使用

表-4 実験結果一覧

シリーズ名称	No	試験体名	実験結果				計算値		比較値			
			$Q_{max}$ (tf)	$\delta_{max}$ (mm)	$-Q_{max}$ (tf)	$-\delta_{max}$ (mm)	e関数 $Q_{my}$ (tf)	略算 $Q_{my}$ (tf)	$\frac{\pm Q_{max} \pm e}{e}$ 関数 $Q_{my}$	$\frac{\pm Q_{max} \pm e}{e}$ 略算 $Q_{my}$		
Hシリーズ	1	H1	54.2	20.01	-49.0	-20.02	57.6	56.4	0.94	0.85	0.96	0.87
	2	H2	53.2	20.14	-50.6	-19.73			0.92	0.88	0.94	0.90
	3	H3	54.5	19.78	-50.1	-19.23			0.95	0.87	0.97	0.89
Nシリーズ	4	N1	21.6	34.55	-20.2	-35.22	20.0	18.6	1.08	1.01	1.16	1.09
	5	N2	23.2	20.05	-22.6	-19.72	22.0	18.8	1.05	1.03	1.23	1.20
Lシリーズ	6	L1	24.3	19.00	-23.4	-20.09	24.0	23.0	1.01	0.98	1.06	1.02
	7	L2	21.4	16.75	-21.0	-13.10	26.6	21.6	0.80	0.79	0.99	0.97

★記号の説明  
 $Q_{max}$ : 正載荷時の最大耐力  
 $\delta_{max}$ :  $Q_{max}$ 時の変位  
 $-Q_{max}$ : 負載荷時の最大耐力  
 $-\delta_{max}$ :  $-Q_{max}$ 時の変位  
 e関数 $Q_{my}$ : e関数法による曲げ耐力計算値  
 略算 $Q_{my}$ : 略算式による曲げ耐力計算値

\*: 左の欄が正載荷時の比較値  
 右の欄が負載荷時の比較値

コンクリートの歪を埋め込み歪計、主筋及びせん断補強筋の歪を歪ゲージにより測定した。

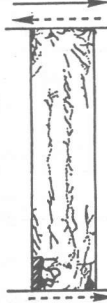



## 3. 実験結果

(1)破壊性状 実験結果一覧を表-4、最終破壊状況の一例を図-3に示す。事前の載荷履歴の影

響では、損傷を与えた H1 試験体の破壊性状は、 $R=1/100(\text{rad})$ から柱頭・柱脚の圧壊が増え始め、 $R=1/50(\text{rad})$ から、中央部にせん断ひび割れ及び主筋に沿った付着ひび割れが徐々に増え始めた。最終破壊状況は、柱頭・柱脚の圧壊が進行して終局を迎えた。長期軸力を受けた H2 試験体及び無損傷の H3 試験体の破壊性状は、 $R=1/400\sim 1/200(\text{rad})$ で柱頭・柱脚に曲げひび割れ及び圧壊を生じ、 $R=1/200\sim 1/100(\text{rad})$ でせん断ひび割れ及び主筋に沿った付着ひび割れが増え始めた。それとともに圧縮部コンクリートも徐々に剥落してゆき、最終破壊状況は、柱頭・柱脚の圧壊が進行して終局を迎えた。これより、H1, H2, H3 試験体の最終破壊状況は、ほぼ同様な性状を示し、事前の載荷履歴の違いによる影響は見られなかった。次に、コンクリートの種類による影響であるが、高軸力比、普通コンクリートの N2 試験体の破壊性状は、 $R=1/100(\text{rad})$ から柱頭・柱脚の圧壊が増え始め、 $R=1/50(\text{rad})$ から主筋に沿った付着ひび割れが徐々に増え始めた。それとともに圧壊及び付着ひび割れ部分のコンクリートも徐々に剥落して行き、最終破壊状況は、柱頭・柱脚の圧壊が進行して終局を迎えた。高軸力比、高強度 1 種軽量コンクリートの L2 試験体の破壊性状は、 $R=1/50(\text{rad})$ で柱中央に圧壊を生じ始め、 $R=1/25(\text{rad})$ 、 $-7\text{cycle}$ の加力中に軸力が保持できなくなり加力を中止した。最終破壊状況は、柱脚の被りコンクリートの剥落と同時に、この位置で主筋が座屈し、補強筋が破断して終局を迎えた。これより高軸力比を受ける高強度 1 種軽量コンクリートの破壊性状は、普通コンクリートに比較して脆性的な破壊性状を示し、コンクリートの種類による影響が見られた。また、この原因として L2 試験体の事前の破壊状況は、N2試験体に比べ損傷度

が大きかった事が、原因の 1つと考えられる。次に、低軸力比の普通コンクリートの N1 試験体、高強度 1 種軽量コンクリートの L1 試験体の破壊性状はコンクリートの種類による影響は見られずほぼ同様な性状を示した。

(2)変形性状  
図-4に履歴曲線の一例を、図-5に

コンクリートの種類による影響		
試験体	実験開始前	最終破壊状況
N2 普通コンクリート $c\sigma B=393$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) $\eta_0=0.51$ $pw=0.50(\%)$ $w\sigma y=18000$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		
L2 高強度 1 種 軽量コンクリート $c\sigma B=518$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) $\eta_0=0.54$ $pw=0.50(\%)$ $w\sigma y=18000$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		



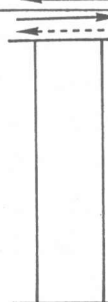

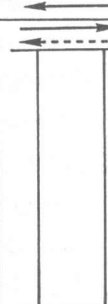
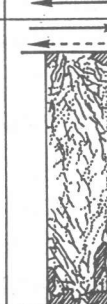
事前の載荷履歴による影響		
試験体	実験開始前	最終破壊状況
H1 曲げせん断 実験による 層間変位 1/100経験後 クリープ試験 (地震荷重 を受けた後 長期軸力を受 けた試験)		
H2 クリープ試験 (長期軸力 を受けた 試験体)		
H3 乾燥収縮 試験 (無損傷の 試験体)		

図-3 破壊状況の一例

Hシリーズ試験体の包絡線の相互比較を示す。縦軸は作用せん断力 $Q$  (ton)を、横軸は部材角 $(\times 10^{-3} \text{rad})$ 及び相対変位 $\delta$  (mm)を表す。実線及び一点鎖線は、(3)既往の計算式との比較で後述するe関数法による計算値(e関数 $Q_{my}$ )、略算式による計算値(略算 $Q_{my}$ )を示す。また、(5)変形性能で述べる最大耐力時の部材角( $R_{max}$ )及び限界部材角( $R_u$ )も同時に示しておく。コンクリートの種類の影響では、高軸力比のL2試験体の履歴曲線は、紡錘型を示しエネルギー消費能力の大きい履歴曲線を示しているが、-7cycle途中で主筋が座屈したため脆性的な履歴曲線を示している。それに対しN2試験体は、最大耐力以後の耐力低下も少なく靱性のある履歴曲線を示し、コンクリートの種類による影響が見られた。また低軸力比のN1,L1試験体の履歴曲線は示していないが、コンクリートの種類による影響は見られずほぼ同様な履歴曲線を示した。次に、事前の荷重履歴の影響では、主筋降伏以前の剛性は、損傷を受けているH1試験体が、H2,H3試験体に比べやや剛性が低く事前の荷重履歴の影響が見られたものの、最大耐力および最大耐力時の変形は、H1,H2,H3試験体ともほぼ同様な値を示した。また最大耐力以後の耐力も、急激な耐力低下も見られずほぼ同様な性状を示し、事前の荷重履歴の影響は見られなかった。

(3)既往の計算式との比較 図-6, 図-7に正荷重時の曲げ耐力実験値( $Q_{max}$ )とe関数法による計算値(e関数 $Q_{my}$ )、略算式による計算値(略算 $Q_{my}$ )との比較を示す[5],[6]。なお曲げ耐力算定にあたっては材令1年のコンクリート強度を使用した。e関数法との比較では、比較値は0.80~1.08の範囲にあり比較的良い適合性を示した。高強度コンクリートのHシリーズは、比較値が0.92~0.95の範囲にあり、普通コンクリート

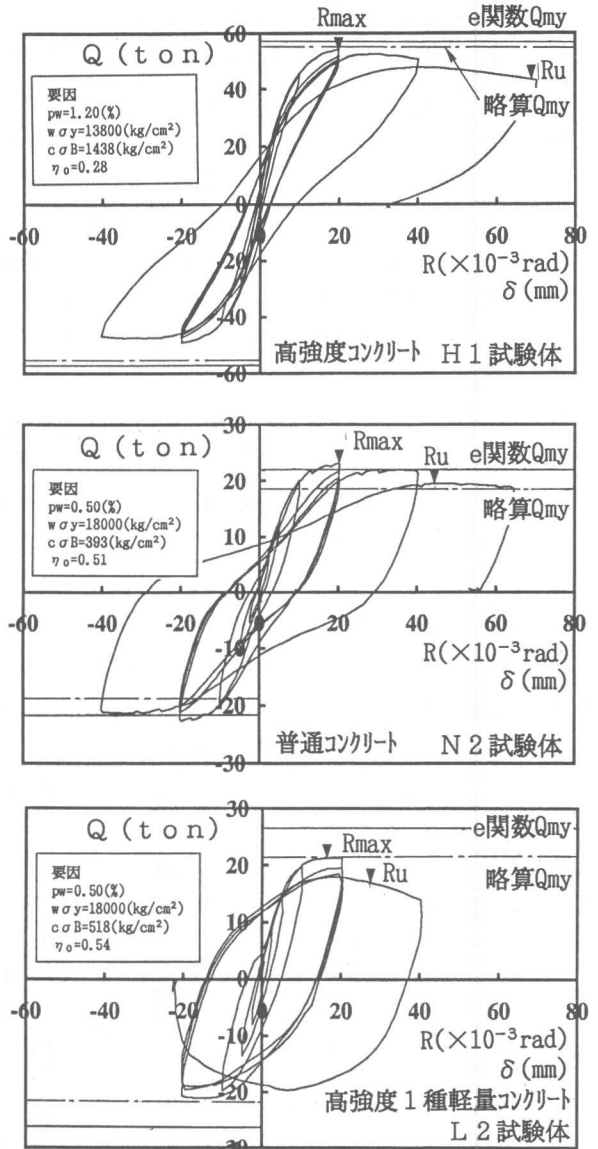


図-4 履歴曲線の一例

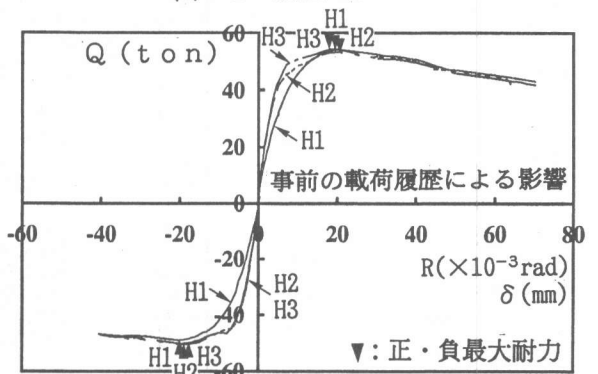


図-5 Hシリーズ試験体の包絡線の相互比較

のNシリーズの比較値は、N1 試験体で 1.08、N2 試験体で 1.05であった。高強度1種軽量コンクリートのLシリーズでは、L1 試験体が 1.01、L2 試験体が 0.80となった。また略算式との比較では、比較値は 0.94~1.23の範囲にあり比較的良い適合性を示した。高強度コンクリートのHシリーズは、比較値が 0.94~0.97、普通コンクリートのNシリーズの比較値は、N1 試験体で 1.16、N2 試験体で 1.23であった。高強度1種軽量コンクリートのLシリーズでは、L1 試験体が 1.06、L2 試験体が 0.99となった。

**(4)耐力** 図-8に正載荷時の曲げ耐力実験値の相互比較を示す。事前の載荷履歴による影響では、H1、H2、H3 試験体はほぼ同様な耐力を示し載荷履歴の影響は見られなかった。次に、コンクリートの種類による影響であるが、低軸力比の N1、L1 試験体の比較では、若干 L1 試験体の耐力が大きいものの、ほぼ同様な耐力を示した。また高軸力比の N2、L2 試験体は、脆性的な破壊性状を示した L2試験体の耐力が、若干低いものの、ほぼ同様な耐力を示し、耐力においては、コンクリートの種類による影響は見られなかった。

**(5)変形性能** 変形性能を評価するに当たって、各試験体の限界部材角として第1サイクル目の包絡線において最大耐力( $Q_{max}$ )の80%に耐力低下した時点限界部材角  $R_u(\times 10^{-3} \text{rad})$ と定義し検討を行った。図-9に限界部材角の相互比較を示す。縦軸は部材角  $R$ を、横軸は各試験体を示し、限界部材角  $R_u$ を□、最大耐力時の部材角を■で表す。事前の載荷履歴の影響では、限界部材角は、62.7~69.2( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )の範囲にありほぼ同様な値を示し、事前の載荷履歴の影響は見られなかった。コンクリートの種類の影響では、低軸力比のN1、L1 試験体の限界部材角は、72.6( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )、70.1( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )とほぼ同様な値を示しコンクリート種類の影響は見られなかった。高軸力比の N2、L2 試験体の限界部材角は、44.6( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )、27.0( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )となり低軸力比の N1、L1 試験体に比べ低い値を示した。特に、L2 試験体の限界部材角は、27.0( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )とかなり低い、これは破壊性状において、L2 試験体は曲げ破壊しておらず主筋が座屈し脆性的な破壊を示したためと思われる。

**(6)エネルギー消費能力** 繰り返し載荷実験の履歴曲線から得られた各試験体の1サイクル毎のエネルギー消費能力を

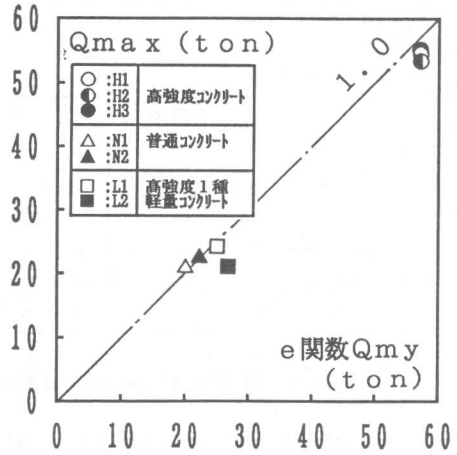


図-6 正載荷時の曲げ耐力実験値とe関数法による計算値との比較

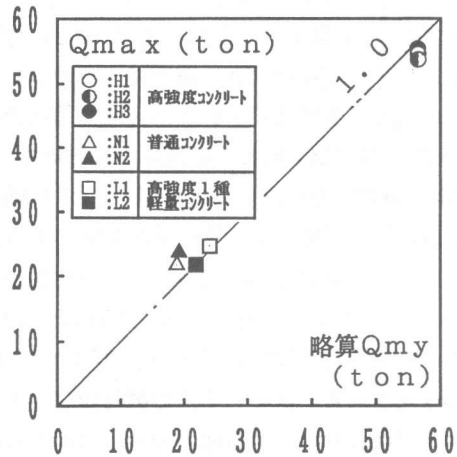


図-7 正載荷時の曲げ耐力実験値と略算式による計算値との比較

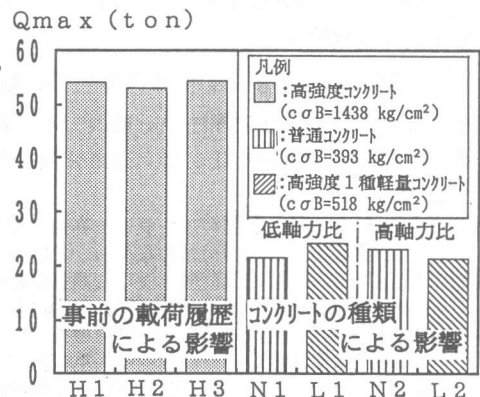


図-8 正載荷時の曲げ耐力実験値の相互比較

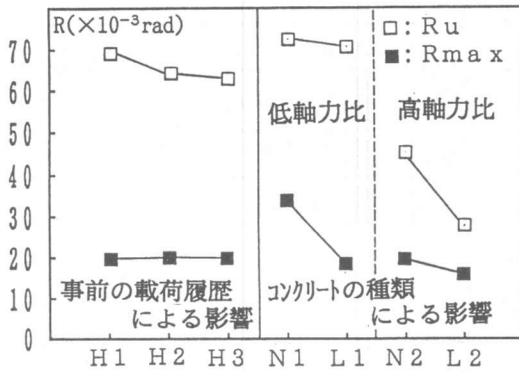


図-9 限界部材角の相互比較

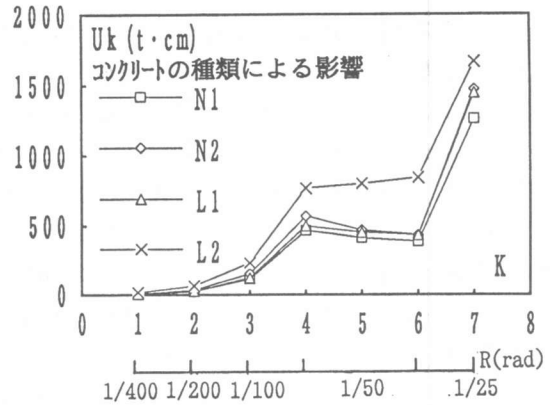


図-10 エネルギー消費能力と繰り返し回数および部材角の関係

図-10, 図-11に示す。縦軸は、1サイクル毎のエネルギー消費能力 $U_k$ 、横軸は各変位振幅における繰り返し回数 $K$ 及び部材角 $R$ を示す。ただし、 $K$ は±1サイクルを1としている。コンクリートの種類の影響では、低軸力比の $N1, L1$ 試験体は、ほぼ同様なエネルギー消費能力を示しコンクリートの種類の影響は見られなかった。高軸力比の $N2$ 試験体は、 $N1, L1$ 試験体とほぼ同様なエネルギー消費能力を示したのに対し、 $L2$ 試験体のエネルギー消費能力は、他の試験体比べ大きく、エネルギー消費能力に優れているが $R=1/25(\text{rad})$ 、

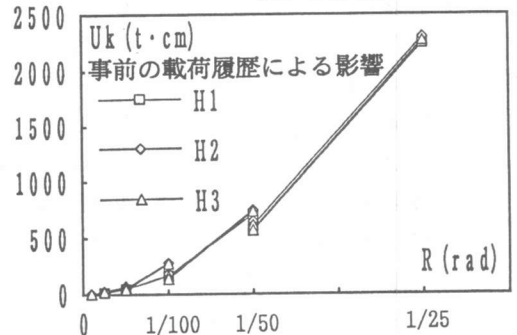


図-11 エネルギー消費能力と部材角の関係

-7cycleにおいて主筋が座屈、補強筋が破断したため脆性的な履歴曲線を描いている。そのため、さらに荷重を続けて行けば、 $L2$ 試験体のエネルギー消費能力は、 $N1, L1, N2$ 試験体よりも低下する事が予想される。次に、事前の荷重履歴による影響であるが、高強度コンクリートの $H1, H2, H3$ 試験体は、ほぼ同様なエネルギー消費能力を示し事前の荷重履歴の影響は見られなかった。

#### 4. まとめ

- (1)高軸力比の高強度1種軽量コンクリート柱の変形性状、破壊性状は普通コンクリート柱に比べ靱性能に劣り脆性的な破壊性状を示した。
- (2)高強度コンクリートを用いたRC柱において、部材角 $R=1/100(\text{rad})$ の損傷を与えた $H1$ 試験体は、変形性状で主筋降伏以前の剛性が、地震力を受けていない試験体 $H2, H3$ に比べ低かったものの、その他の変形性状、破壊性状、耐力はほぼ同様な性状を示し事前の荷重履歴の影響は見られなかった。

#### [参考文献]

- [1]山本俊彦・大滝健:地震荷重を受けた高強度鉄筋コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮特性 (その1-実験概要と地震荷重の荷重-)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.813-814、1990.10
- [2]山本俊彦・大滝健:地震荷重を受けた高強度鉄筋コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮特性 (その2-クリープおよび乾燥収縮実験-)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.815-816、1990.10
- [3]山本俊彦・岩倉知行・大滝健:地震荷重を受けた高強度鉄筋コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮特性 (その3-高強度軽量コンクリート柱の地震荷重荷重-)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.557-558、1992.8
- [4]山本俊彦・岩倉知行・大滝健:地震荷重を受けた高強度鉄筋コンクリート柱のクリープおよび乾燥収縮特性 (その4-高強度軽量コンクリートのクリープおよび乾燥収縮-)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-560、1992.8
- [5]武藤 清:耐震設計シリーズ 2 鉄筋コンクリート構造物の塑性設計、丸善、pp.53-65、1974
- [6]日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、日本建築学会、pp.36、1987