

論文 高強度材料を用いた RC 柱の曲げせん断実験

張愛暉*¹・青木雅*²・町田興弘*²・吉岡智和*¹

要旨：本実験は高層RC造における柱部材の曲げせん断性状の把握及び既往の耐力設計式や解析モデルの妥当性を確認するため行ったものである。本実験と既往の設計式及びモデルによる解析を比較検討した結果、①柱のせん断耐力および付着強度設計に対する「鉄筋コンクリート強度型終局設計指針・同解説」の提案式による評価は安全側である。②従来の剛性遞減形履歴モデルによる繰り返し変形解析結果は実験結果をほぼ評価できるが、変動軸力柱の場合では、差異があることが分かった。

キーワード：柱, 高強度コンクリート, 高強度鉄筋, 終局耐力, 復元力特性解析

1. はじめに

本研究は30階建て程度のRC造建物を想定した高強度コンクリート及び高強度鉄筋(主筋：SD390, 横補強筋：SD785)を用いた柱部材の曲げせん断実験である。研究目的は柱部材の曲げせん断性状の把握及び既往の耐力設計式や解析モデルとの適合性の確認である。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の試験体一覧を表-1に、形状及び配筋例を図-1に示す。試験体は高層RC造建物の下層階柱を想定し、約1/3に縮尺したものの6体(内柱試験体2体, 外柱試験体4体)である。実験要因は横補強筋比, 軸力, 加力方向及び芯鉄筋強度である。柱のせん断スパン比(M/QD)は内柱では1.29(クリアスパン750mm), 外柱では1.21(クリアスパン700mm)である。F_cは48N/mm²とした。横補強筋は溶接閉鎖型横筋を用い、もち網形式とした。

表-1 試験体一覧表

試験体	主筋及び芯筋	軸力	横筋	備考
C-2	主筋： 12D13(SD390)	0.28cNu =1107KN	4S6070 P _w =0.63%	内柱曲げ性状
C-3	芯筋： なし		4S60120 P _w =0.37%	内柱せん断性状
C-4	主筋： 16D13(SD390)	変動軸力で 加力, 加力 M-N履歴 は図-3を 参照	4DS040 P _w =1.10%	外柱曲げ性状
C-5	芯筋： 8D13(SD390)			45度方向加力
C-6	主筋： 16D13(SD390) 芯筋： 8D13(SD685)			高強度芯筋

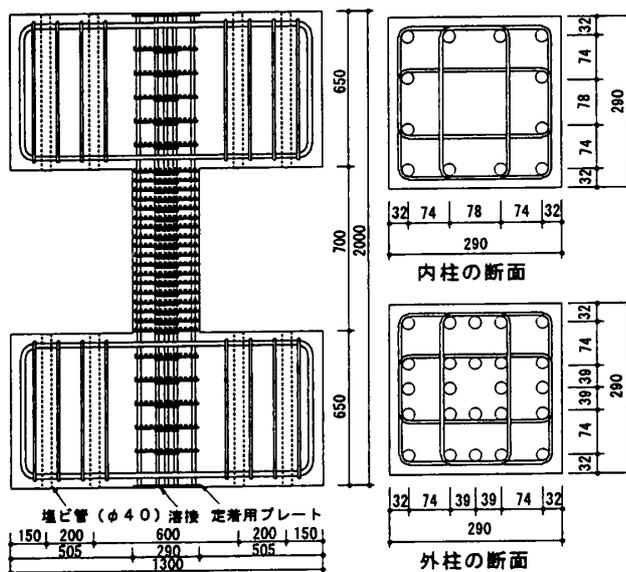


図-1 試験体形状及び配筋例

*1 東洋建設(株)美浦研究所 構造研究室 研究員 (正会員)

*2 東洋建設(株)美浦研究所 構造研究室 主任研究員

2.2 製作及び使用材料

試験体コンクリートの打設は、実施工に近い状態で行うため、柱を立てた状態で、打設を二回に分けて行った。本実験で使用した鉄筋の機械的性質を表-2に、コンクリートの材料試験結果を表-3に示す。主筋は、焼入れにより降伏点を高くしたものであり、目標とするSD390の降伏点より高くなった。また、閉鎖型横筋の溶接部についても実験を行い、母材破断であることを確認した。

2.3 実験方法

加力装置を図-2に示す。柱の下部スタブを固定し、上部スタブに油圧ジャッキ1台とアクチュエータ2台で柱スタブを水平に保ちながら、軸力を導入後、水平アクチュエータ1台でせん断力を载荷した。表-4にその加力手順を示す。変動軸力試験体では、長期軸力程度である0.18cNu (823KN)の圧縮軸力を作用させた後、せん断力に応じて軸力を変動させながら载荷した。変動軸力は図-3に示す折れ線の関係で加力した。

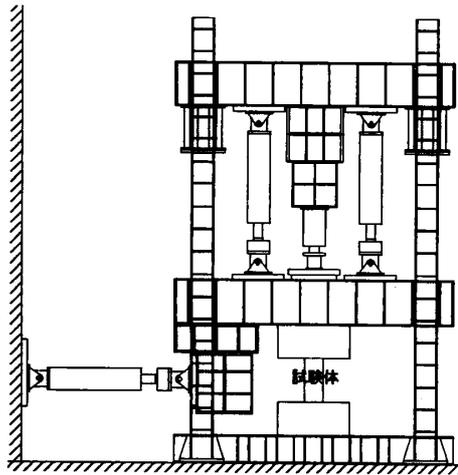


図-2 加力装置

3. 実験経過及び破壊性状

試験体の1/50rad時ひび割れ状況を図-4に、荷重-変形関係を図-5に示す。

定軸力で、曲げ破壊と計画したC-2では、1/400radのサイクルで曲げひび割れ、1/200radのサイクルで曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れの順に生じた。1/100radのサイクルで、先に主筋が圧縮降伏し、1/100rad^tの手前で主筋が引張降伏し、ACI曲げ耐

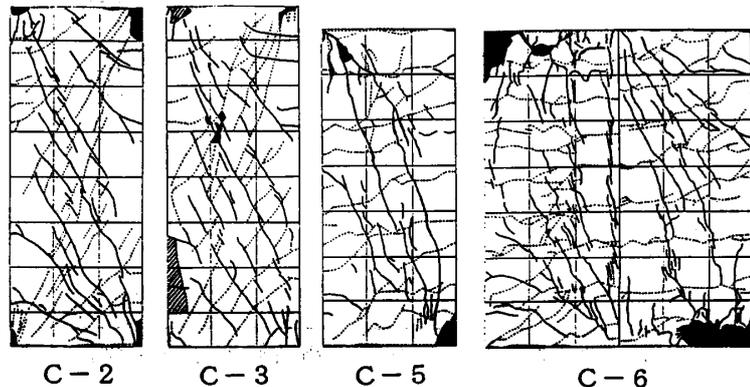


図-4 1/50rad時ひび割れ性状

表-2 鉄筋の機械的性質

径	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_{max} (N/mm ²)	降伏比 Y_r σ_y/σ_{max}	降伏歪 ϵ_y (μ)	伸び率 (%)
D13	530.2	651.7	0.81	2480	13.3
D13	794.8	843.8	0.94	4240	7.5
S6	914.3	1071.1	—	6850* 4830	12.3

注*: 0.2%セットオフ法による降伏点及びひずみ

表-3 コンクリートの材料試験結果

	材令 (日)	養生	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング率 E 1/3 (10 ⁴ N/mm ²)
C-2	56	現封	56.2	3.39	3.90
C-3	41	"	48.3	—	3.47
C-4	48	"	49.5	3.16	3.43
C-5	55	"	49.7	4.20	3.53
C-6	61	"	51.3	—	3.62
C-7	68	"	51.3	3.57	3.62

表-4 加力手順

サイクルNo.	±1	±2 ±3	±4 ±5	±6 ±7	±8 ±9
R (rad)	1/400	1/200	1/100	1/50	1/25
繰り返し数	1	2	2	2	2

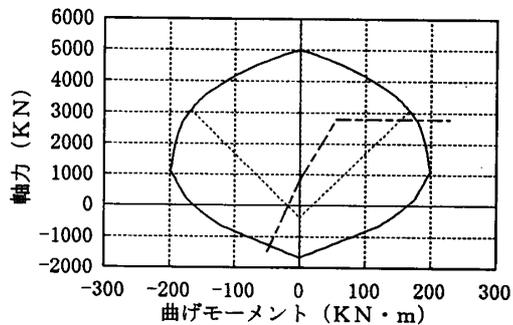


図-3 M-N 載荷曲線

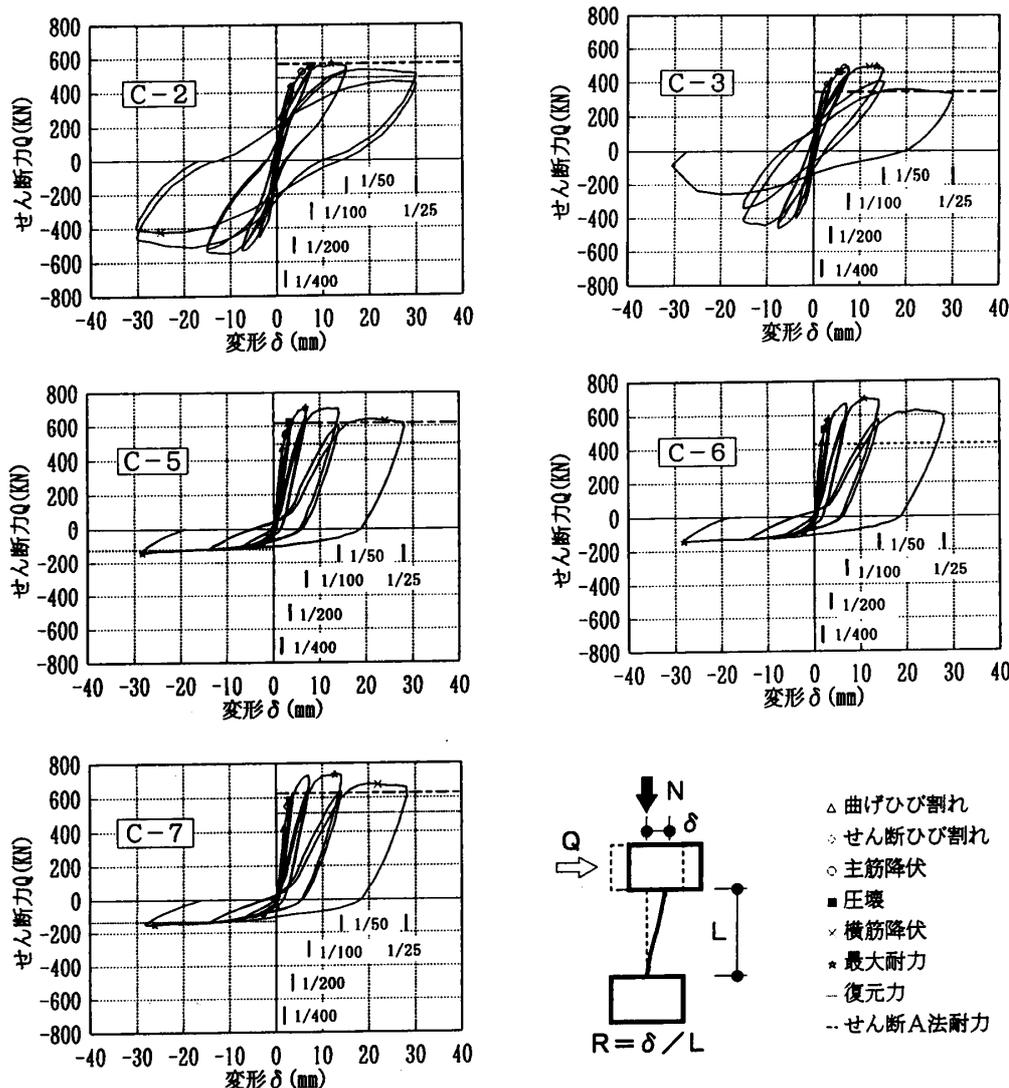


図-5 荷重-変形関係

力計算値に達した。1/100radのピーク時にコンクリートの圧壊が生じた。1/50rad時のピークに達する前に、最大耐力を示した後、若干耐力が低下した。1/50radの耐力維持率（1/50radにおける1サイクル目に対する2サイクル目の耐力比）は95%以上であり、安定したループを示した。その後の1/25rad加力では、1回目のピーク時荷重は最大耐力の95%以上を維持できたが、2サイクル目の荷重はACI曲げ耐力をわずかに下回った。破壊モードは曲げ破壊（F）となった。

定軸力で、せん断破壊と計画したC-3では、1/100radまでは、C-2とほぼ同様な性状を示した。1/50radのピークに達する前に、横補強筋が降伏し、1/50radピーク直前に耐力が若干低下した。1/50radの繰り返しサイクルのピーク時荷重はACI曲げ耐力を大きく下回り、耐力維持率は80%を下回った。その後の加力では、せん断劣化が顕著に進み、1/25radの負加力で横筋の破断（母材部）が生じ、急激に耐力低下した。破壊性状は主筋降伏後のせん断破壊（FS）と判断した。

変動軸力を受けるC-5では、1/400radの正加力（圧縮軸力）では、ひび割れが生じず、ほぼ弾性性状を示すが、1/400rad負加力（引張軸力）では、曲げひび割れ後剛性が急激に低下した。1/200radの正加力では、負加力時のひび割れが完全に閉じ、ほぼ弾性性状に戻り、ピーク付近でコンクリートの圧壊が生じた。1/100radの正加力で剛性低下が生じたが、ピーク時荷重はACI曲げ耐力を大きく上回った。1/50radのピーク付近で最大耐力を示した後、耐力が若干低下した。1/50

radの繰り返しの正加力では、耐力維持率は86%であるが、ACI曲げ耐力を約2割上回っている。1/25radの正加力ピーク時荷重は最大耐力の8割以上を維持でき、ACI曲げ耐力を下回ることにはなかった。1/100rad以後の負加力では、試験体の剛性は非常に低いが、耐力はACI曲げ耐力を維持できた。破壊モードは曲げ破壊（F）となった。

45°方向から加力したC-6では、1/200radの正加力（圧縮軸力）で、隅角部コンクリートの圧壊及び隅の鉄筋の圧縮降伏が生じた。その後の加力で、隅角部主筋に沿う付着割裂ひび割れ（R=50rad）が生じたものの、1/25radまで顕著な耐力低下がなく、安定したμ=7°を示した。破壊モードは曲げ破壊（F）となった。

C-4及びC-7はC-5とほぼ同様な性状を示し、曲げ破壊となった。

4 耐力に関する検討

各試験体の最大耐力実験値と各種計算値との比較を表-5に示す。

定軸力で曲げ破壊となったC-2では、実験最大耐力はACI曲げ耐力、AIJ曲げ耐力略算値及び平面保持と仮定した精算解析値のいずれよりも大きい。精算解析値はACI式及びAIJ式に比べ、実験値に近いが、実験値より約1割小さい。

変動軸力のC-4、C-5、C-7の正加力（圧縮軸力）では、実験最大耐力はコンクリートの拘束効果を考慮していないACI曲げ耐力を大きく上回る。負加力（引張軸力）では、引張主筋がすべて降伏すると仮定するAIJ曲げ耐力略算値は実験値と比較的良好な対応を示した。

精算解析値はACI式に比べ、良好な対応を示すが、実験値より約2割小さい。負加力（引張軸力）では、実験最大耐力はACI曲げ耐力と良好な対応を示す。

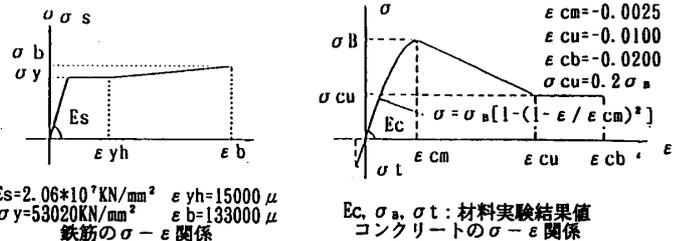
45°方向加力のC-6の曲げ耐力はC-5とほぼ同等であり、ACI曲げ耐力も精算解析値も実験値を安全側に評価する。

曲げ降伏後せん断破壊となったC-3では、実験最大耐力はRC終局指針せん断A法による耐

表-5 最大耐力実験値と計算値の比較

試験体	加力方向	実験値 (KN)	耐力算定用軸力 (KN)	計算値及び比較								破壊モード
				曲げ耐力						せん断耐力		
				計1 (KN)	実計1	計2 (KN)	実計2	計3 (KN)	実計3	計4 (KN)	実計4	
C-2	正	566	1107	483	1.17	518	1.09	495	1.14	566	1.00	F
	負	-547	1107	-483	1.13	-518	1.05	-495	1.10	-566	0.97	
C-3	正	496	1107	460	1.08	492	1.01	478	1.04	345	1.44	FS
	負	-462	1107	-460	1.01	-492	0.94	-478	0.97	-345	1.34	
C-4	正	695	2744	493	1.41	564	1.23	637	1.09	617	1.13	F
	負	-263	-911	-245	1.07	-252	1.04	—	—	-617	0.43	
C-5	正	712	2744	495	1.44	566	1.26	639	1.11	618	1.15	F
	負	-141	-1272	-123	1.14	—	—	—	—	-618	0.23	
C-6	正	695	2744	429	1.51	560	1.24	—	—	—	—	F
	負	-141	-1302	-135	1.04	—	—	—	—	—	—	
C-7	正	732	2744	511	1.43	585	1.25	652	1.12	626	1.17	F
	負	-152	-1444	-134	1.13	—	—	—	—	-626	0.24	

注：1) 変動軸力を受ける柱の曲げ耐力を算定用軸力は、加力履歴曲線とM-N曲線との交点の軸力とする。
 計1：ACI曲げ耐力計算値（平面保持を仮定し、圧縮縁コンクリートのひずみが3000μに達した時の曲げ耐力）
 計2：平面保持による精算解析値（鉄筋及びコンクリートの応力-ひずみ関係を下図の関数と仮定した。）



計3：AIJ曲げ耐力略算値
 $Q_{bu} = M_u / a$ $M_u = 0.8 a t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 N D [1 - N / (b D \sigma_a)]$
 at: 引張主筋断面積 σ_y : 主筋降伏強度 D: 柱せい N: 軸力
 b: 柱幅 σ_a : コンクリート圧縮強度
 計4：RC終局型設計指針のせん断A法による計算値 (Rp=1/100radとした)
 $Q_u = b \cdot j_t \cdot P_{vy} \cdot \sigma_{vy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot \nu \sigma_a / 2$
 j_t: 主筋重心間距離 P_{vy} : 横筋比 σ_{vy} : 横筋降伏強度
 $\nu \sigma_a$: コンクリート有効圧縮強度

力に比べ、約4割大きく、せん断A法は柱のせん断耐力を安全側に評価する。

1/50rad時(最大耐力の近傍)

の主筋付着応力度、及び主筋降伏時平均付着応力度(設計付着応力度)及び付着割裂強度を比較検討した結果を表-6に示す。付着余裕度(τ_{bu}/τ_f)が1.0以上のC-2では、1/50rad時主筋平均付着応力度は付着割裂強度に達さなかったが、それ以外の試験体では付着割裂強度に達した。付着割裂強度に達しても付着割裂破壊していないことから、付着設計にはRC終局指針による付着割裂強度を用いるのは安全側と考えられる。

図-6に近年報告された柱試験体及び本実験試験体の余裕度(せん断余裕度=RC終局指針せん断A法によるせん断耐力/ACI曲げ耐力、付着余裕度=RC終局指針による主筋付着割裂強度 τ_{bu} /主筋降伏時平均付着応力 τ_f)と破壊モードの関係を示す。図に示すように、従来の実験結果では、せん断余裕度及び付着余裕度がともに1.0以上の試験体は靱性のある曲げ破壊或いは曲げ降伏後のせん断破壊となっている。本実験結果からも既往の実験結果と同様なことが言える。

5 復元力特性解析

荷重-変形の包絡線と復元力特性解析値の比較例を図-7に示す。復元力特性解析には「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」²⁾に示すRC部材のモーメント回転角関係の解析法を準用し、柱の初期剛性に部材のせん断剛性を考慮し、柱の降伏耐力をACI式による計算値とした。なお、解析時には下記の仮定を設けて算定した。

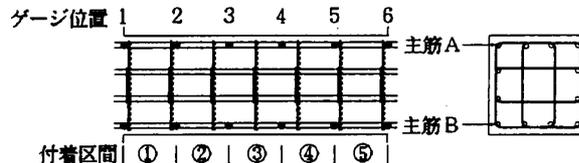
- ①曲げひび割れ耐力は、軸力載荷履歴曲線とひび割れ曲線($M=1.8\sqrt{\sigma_b \cdot Z+ND/6}$)との交点とする。
- ②降伏耐力は、軸力載荷履歴曲線とACI式によるM-N曲線との交点とする。
- ③変動軸力を受ける試験体の降伏時剛性低下率の算定用軸力は、常時軸力相当点とひび割れ点を結ぶ直線を延長し、M-N曲線との交点の軸力とする。(図-3を参照)

図-7に示すように、定軸力を受けるC-2では、初期剛性及び曲げひび割れについては、計算

表-6 主筋付着応力の検討

試験体	主筋位置	R=1/50rad時の平均付着応力度 $\tau_{1/50}$ ¹⁾ (KN/mm ²)	主筋降伏時平均付着応力度 τ_f ²⁾ (KN/mm ²)	主筋付着割裂強度 τ_{bu} ³⁾ (KN/mm ²)	$\frac{\tau_{1/50}}{\tau_f}$	$\frac{\tau_{1/50}}{\tau_{bu}}$	$\frac{\tau_{bu}}{\tau_f}$
C-2	主筋A	574	700	753	0.82	0.76	1.07
	主筋B	569			0.81	0.76	
	平均	572			0.82	0.76	
C-3	主筋A	604	700	618	0.86	0.98	0.88
	主筋B	637			0.91	1.03	
	平均	620			0.89	1.00	
C-4	主筋A	733	780	713	0.94	1.03	0.91
	主筋B	719			0.92	1.01	
	平均	726			0.93	1.02	
C-5	主筋A	733	780	714	0.94	1.03	0.92
	主筋B	733			0.94	1.03	
	平均	733			0.94	1.03	
C-7	主筋A	733	780	726	0.94	1.01	0.93
	主筋B	720			0.92	0.99	
	平均	727			0.93	1.00	

注 1) 下図の付着区間②、③、④の1/50rad時(最大耐力の近傍)平均付着応力度を(L-d)の区間で平均化した値



- 2) RC終局型設計指針により求めた主筋の設計付着応力度
 $\tau_f = d_s \Delta \sigma / 4(L-d)$
 $\Delta \sigma = 2\sigma_y$, d_s : 主筋呼び径, σ_y : 主筋降伏応力度
 L : 柱スパン, d : 柱有効せい
- 3) RC終局型設計指針により求めた主筋の付着割裂強度

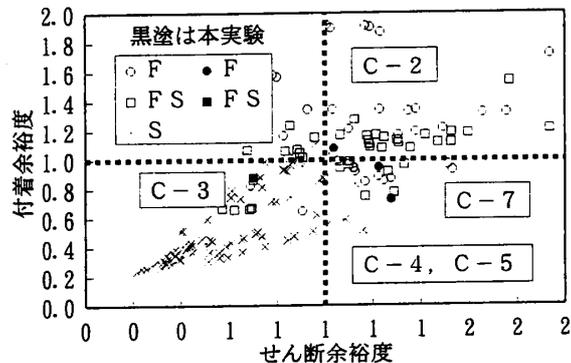


図-6 余裕度と破壊モードの関係

値は実験値と良い対応を示しているが、降伏耐力の計算値は実験値を過小評価する。変動軸力を受けるC-5の正加力（圧縮軸力）では、定軸力試験体に比べ、解析値と実験値との差は大きい。C-5の負加力（引張軸力）の場合では、曲げ降伏後まで解析値は実験値と良好な対応を示す。

上記の復元力特性が剛性遞減形履歴モデル（武田モデル³⁾）に従うと仮定した繰り返し解析結果例を図-8に示す。定軸力試験体の場合では、解析結果は実験結果と比較的良好な対応を示す。変動軸力の場合では、解析結果は定性的に実験の傾向を示すが、両者の間に差異はある。

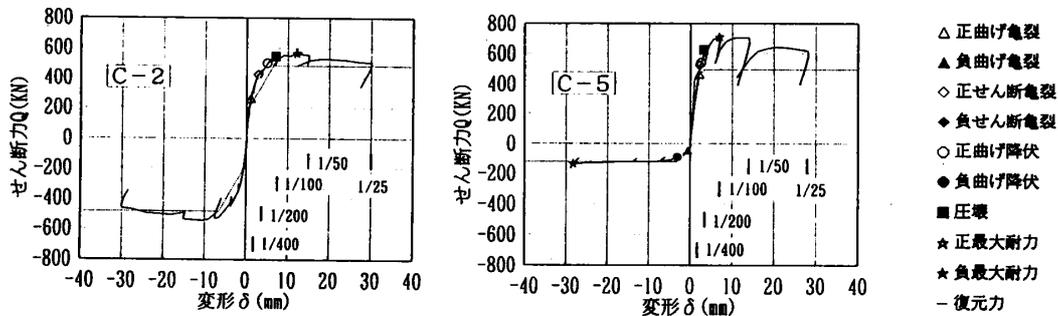


図-7 復元力特性解析結果例

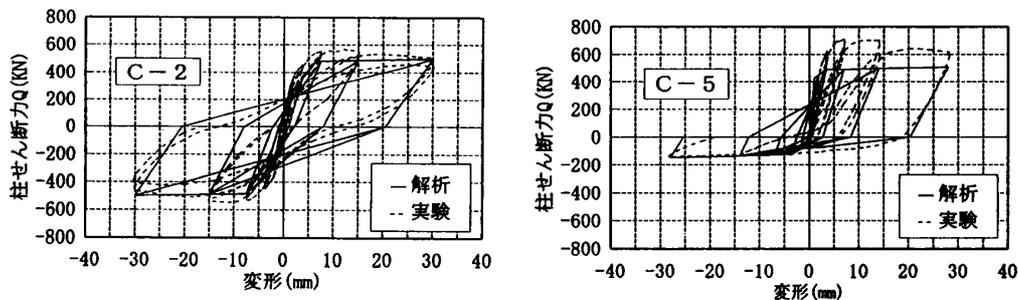


図-8 繰り返し解析結果例

6. まとめ

本実験より、以下の知見が得られた。

- 柱の破壊モードは、RC終局指針式によるせん断余裕度及び付着余裕度からほぼ推定できる。
- 柱の曲げ耐力については、ACI式による評価は安全側であるが、高軸力を受ける柱では、曲げ耐力はACI曲げ耐力を大きく上回り、降伏ヒンジを許容する柱においては、柱のせん断余裕度を低下させる恐れがある。
- RC終局指針せん断A法によるせん断耐力は実験結果を安全側に評価する。
- 降伏ヒンジを計画する柱の主筋の付着割裂に対する設計では、RC終局指針による指標は安全側である。
- 45°方向加力柱の曲げ耐力は主軸方向の曲げ耐力とほぼ同等であり、ACI仮定による曲げ耐力を大きく上回る。
- 高強度芯筋は高引張軸力を受ける柱には有効である。
- 従来の剛性遞減形履歴モデルによる繰り返し変形解析結果は実験結果をほぼ評価できる。

変動軸力柱の場合では、定性的には実験の傾向を示すが、両者の間に差異はある。

- 参考文献
- 日本建築学会：「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震指針・同解説」
 - 日本建築学会：「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」
 - 武田寿一：鉄筋コンクリート梁の繰り返し履歴に関する研究，日本建築学会論文報告集，No. 76，1962. 9，P 98.