

論文 変動軸力を受ける曲げ柱の地震後の残存軸耐力と損傷修復性

渡辺 篤史^{*1}・田才 晃^{*2}

要旨: 損傷修復性限界を明らかにすることを目的とし、変動軸力を受ける曲げ柱の残存軸耐力と損傷修復性についてファイバーモデルによる解析と漸増繰返し実験によって検討した。試験体は形状、配筋を同一とする4体とし、パラメーターは損傷程度と補修方法(カバーコンクリートの置換, エポキシ注入)とした。試験体は水平力載荷後に軸方向載荷を行い、残存軸耐力を調べた。実験結果と解析結果から残存軸耐力率が低下した部材を補修(カバーコンクリートの置換)した場合、剛性・最大耐力の低下が起こる。また、この率が低下していない場合であっても剛性低下は起こることが判った。

キーワード: 残存軸耐力, 損傷修復性, 曲げ卓越型柱, ファイバーモデル, 変動軸力

1. はじめに

耐震設計における性能評価では、地震のレベルに応じた損傷程度の推定と損傷修復の可否が重要な評価項目の1つとなる。構造物の塑性変形能力に期待した耐震設計において一部の柱の塑性変形を許容する場合、柱の損傷程度と水平および鉛直荷重に対する耐荷能力の劣化との関係、および劣化した耐荷能力の修復性(補修により元の性能に回復できること)を明確にし、設計に利用できるようにする必要がある。曲げ卓越型の一定軸力を受ける柱を対象とし、地震後の残存軸耐力と損傷の修復性に着目した筆者らの研究¹⁾では、潜在的な軸耐荷能力は損傷の進行とともに損傷を受ける前の軸耐力から徐々に低下すること、軸耐荷能力が低下した柱の水平力に対する修復性は芳しくないことが明らかとなった。本研究では引き続き、柱の損傷修復限界の設定に資するように、変動軸力を受ける

曲げ卓越型の柱を対象とし、地震による軸耐荷能力の低下と損傷修復性について実験的に、解析的に検討する。

2. 断面解析による軸耐力低下と損傷修復性

水平力と変動軸力を受ける柱の軸耐力の低下と、補修による修復性を断面の曲げ塑性解析により調べた。解析対象は3.で述べる柱試験体の断面と同一とし、コンクリートの1軸圧縮特性は柱の実験とあわせて行ったプリズム試験体の中心軸圧縮試験結果に基づいて定めた。

2.1 コンクリートの1軸圧縮特性

中心軸圧縮実験を行ったプリズム試験体の諸元を表-1に示す。試験体は3体で、使用材料は3.で述べる柱試験体と同一である。実験により得られた軸方向荷重と軸変位関係を図-1に示す。試験体C2とC3の結果を比較するとカバーコンクリートの有無による最大耐力に大きな差はなく、カバーコンクリートとコアコンクリートが最大耐力を発現する軸変位は異なる。両試験体の同一軸変位における荷重差をカバーコンクリートの断面積で除して、カバーコンクリートの応力-歪関係を求めた。また、カバーコン

表-1 プリズム試験体諸元

名称	断面寸法 (cm)	高さ (cm)	主筋	せん断補強筋	カバー
C1	30×30	80	なし	なし	—
C2	26×26		8-D16	3-D10@60 (上下端13cmは@40)	有
C3				無	

*1 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 大阪工業大学助教授 工学部建築学科 博(工) (正会員)

クリートのない試験体C3の各変位における軸方向荷重から主筋の軸方向力を除いて、コアコンクリートの応力-歪関係を求めた。それぞれの結果を図-2に細線で示す。

2.2 断面解析の方法

変動軸力を受ける断面の曲率繰り返し載荷後における軸耐力の低下と、損傷カバーコンクリートを置換する補修による復元力特性の回復性を平面保持を仮定したファイバーモデルにより検討した。解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-歪関係は青山らのモデル¹⁾²⁾を用いた。なお、コアコンクリートおよびカバーコンクリートの応力-歪関係の包絡線はプリズム試験体の実験結果に基づき式(1)によった。

$$\sigma_B \text{までは} \frac{\sigma_B - \sigma}{\sigma_B} = \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon}{\varepsilon_B} \right)^\alpha \quad \alpha = \frac{E_c \varepsilon_B}{\sigma_B} \quad (1)$$

σ_B 以降はEnegの勾配の直線

ここで、カバコンクリートの σ_B 、Eneg、 ε_B は実験で得られたカバコンクリートの応力-歪関係から定め、コアコンクリートは実験で得られたコアコンクリートの最大応力 σ_B を用い中塚らの提案³⁾に従いEneg、 ε_B を定めた。モデル化したコンクリートの応力-歪関係の包絡線を図-2中に太線で示す。また解析対象断面と解析に用いたコンクリートの特性を表-2に示す。

変動軸力は曲率振幅に比例させて与え、所定の曲率振幅(ここでは、 $\pm 0.352 \times 10^{-4}/\text{mm}$)以上は一定とした。変動軸力の範囲はコンクリートの材料試験による圧縮強度 $\sigma_B = 37.4 (\text{N}/\text{mm}^2)$ に対して $0 \sim 0.5 \sigma_B$ (長期荷重による定軸力を $0.25 \sigma_B$ に想定)とした。繰り返し載荷後の軸

耐力(残存軸耐力)は、所定の曲率振幅を与えた後、モーメントと曲率をゼロに収束させ、全断面均等に軸方向歪を漸増させて求めた。残存軸耐力と損傷修復性の関係をみるため、オリジナル断面に対する繰り返し載荷後、損傷カバコンクリートを元のコンクリートと同一特性のコンクリートに置換する補修を想定し、オリジナル載荷から補修後の載荷まで連続した解析も行った。このとき、補修後のコアコンクリートには歪が残留し、カバーコンクリートの歪は0という応力状態の違いを考慮し、補修後の解析では歪増分が断面内で直線分布すると仮定した。

2.3 解析結果

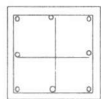
所定の曲率振幅を変えた解析により求めた残存軸耐力を、定軸力の大きさが柱軸耐力に対して持っている余裕度の低下程度を表す指標とし、式(2)で定義した残存軸耐力率として表す。

$$\text{残存軸耐力率} = \frac{N_{\max}' - N_L}{N_{\max} - N_L} \quad (2)$$

$N_{\max}$: 初期の柱軸耐力 $N_{\max}'$: 水平載荷後の柱軸耐力 N_L : 定軸力

残存軸耐力率と最大曲率振幅(繰り返し回数正負各1回)の関係を図-3に示す。この断面の残存軸耐力は曲率振幅 $0.712 \times 10^{-4}/\text{mm}$ 以上で低下しており、この振幅でコアコンクリートの一

表-2 解析値諸元

コアコンクリート	
$E_c=23235\text{N/mm}^2$ $\sigma_B=36.62\text{N/mm}^2$ $\varepsilon_B=0.00922$ $E_{\text{neg}}=-577\text{N/mm}^2$	
カバーコンクリート	
$E_c=23235\text{N/mm}^2$ $\sigma=21.07\text{N/mm}^2$ $\varepsilon_B=0.00187$ $E_{\text{neg}}=-9020\text{N/mm}^2$	
全断面=30×30 コア部断面=26×26 主筋：8-D16(SD345) 帯筋：3-D10@60(SD295)	

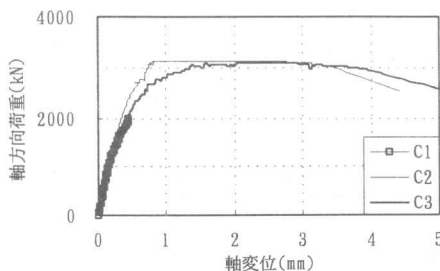


図-1 プリズム試験結果

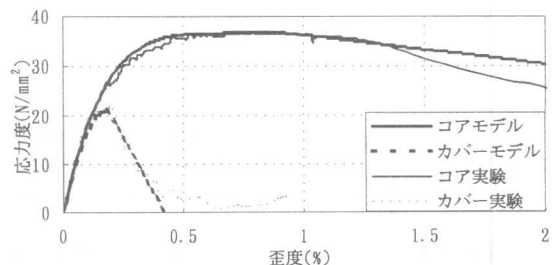


図-2 応力度-歪度

部が軟化域に入る。

オリジナル载荷の最大曲率振幅を ± 0.176 , ± 0.352 , ± 0.536 , $\pm 1.064 \times 10^{-4}/\text{mm}$ とし, それぞれの補修後のモーメント-曲率関係と比較した結果を図-4に示す。曲率振幅 $\pm 0.176 \times 10^{-4}/\text{mm}$ の载荷後の補修では, 剛性・耐力とも元の断面と同等に回復する。曲率振幅 $\pm 0.352 \times 10^{-4}/\text{mm}$ 以上の载荷後の補修では, 圧縮変動軸力側で剛性が回復しないが, オリジナル载荷によって残存軸耐力率の低下がない $\pm 0.536 \times 10^{-4}/\text{mm}$ の振幅までは, 最大振幅時の耐力は回復している。残存軸耐力率が低下する曲率振幅 $\pm 1.064 \times 10^{-4}/\text{mm}$ 後の補修では, 剛性・最大耐力とも回復しない。また, 引張り変動軸力側では各変形とも劣化はみられない。以上のことから, ここで想定した補修では, 残存軸耐力率が低下した柱部材は, 圧縮変動軸力側で剛性・最大耐力ともに修復できず, 残存軸

耐力が低下していない場合でも, ある大きさの振幅以上の履歴を受けているとやはり圧縮変動軸力側で剛性が回復しない。

実験によりこのような現象の確認を行った。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

柱試験体概要を表-3および図-5に示す。柱試験体は曲げ卓越型となるように設計し, 形状, 配筋を同一とする4体とした。断面寸法=30×30cm, 内法高さ=120cm, シアスパン比=2.0, 全鉄筋比=1.77%である。主筋をD16(SD345), 帯筋をD10(SD295)とし, コンクリートの設計基準強度は $F_c=24\text{N}/\text{mm}^2$ とした。損傷修復性を知るためA5, A7, A8は補修を行った(補修後はA5R, A7R, A8Rとする)。A5, A8の補修は水平荷重を0kNにし, 定軸力(843kN)を保持したまま行い, カバーコンクリートの圧壊部分をはつり取り, ひび割れ箇所にエポキシ注入を行って一日保温養生した後, 断面修復を超速硬モルタルで行った。A7ではカバーコンクリート圧壊部分の置換のみを行った。なお通常, エポキシ注入後

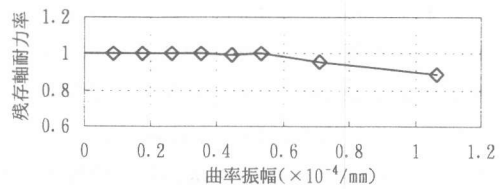


図-3 残存軸耐力率 - 曲率振幅

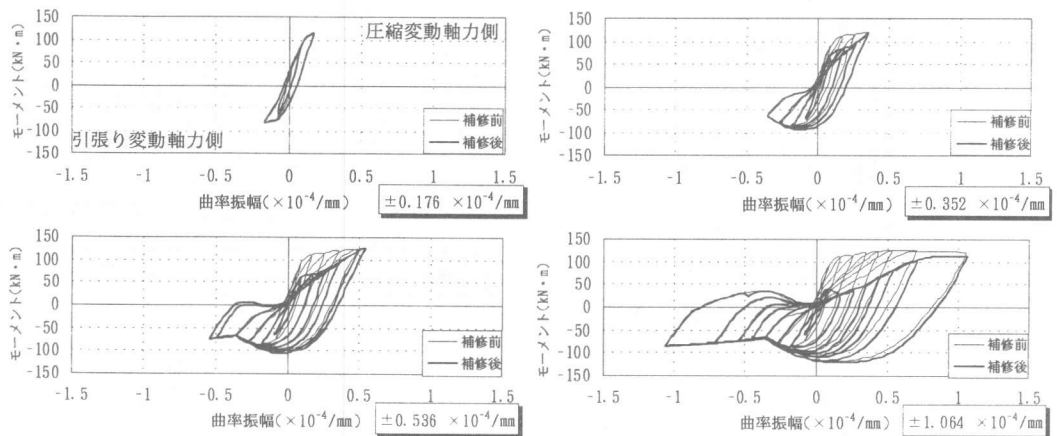


図-4 モーメント-曲率変形関係

表-3 柱試験体主要諸元

名称	主筋	せん断補強筋	Pw (%)	Vu ^{*1} (kN)	QMu ^{*2} (kN)	変動軸力 (定軸力0.25σ _B)	最大変形角(rad.)		補修方法	
							補修前	補修後	カバー置換	エポキシ注入
A5・A5R	8-D16	3-D10 @60	1.19	327	263	0.05σ _B ~ 0.50σ _B	1/33	1/100	○	○
A6							1/100	-	-	-
A7・A7R							1/100	1/100	○	×
A8・A8R							1/100	1/33	○	○

*1 日本建築学会「終局強度型耐震設計指針」による

*2 軸応力σ₀=0.50σ_B

の養生は常温で数日間行うが、本実験では油圧装置を操作しながら養生中でも定軸力を保持することとしたので、エポキシの硬化を早め再載荷までの時間を短縮した。材料試験結果を表-4に示す。

3.2 加力方法

柱試験体の載荷にはパンタグラフ式の逆対称加力装置¹⁾を使用した。水平方向の載荷履歴は部材変形角 1/400, 1/200, 1/133, 1/100rad. とし A5, A8R はさらに 1/80, 1/67, 1/50, 1/33rad. の漸増繰り返しとした。

変動軸力は図-6に示すように制御した。すなわち、変形角 1/100rad. まで水平変形に比例変動させ、それ以上の変形では一定とした。また、水平荷重除荷時においては水平荷重が 0kN になる時点で定軸力になるように水平荷重に比例変動させた。その後、逆方向の変形に入るまでは定軸力で一定とした。本実験の変動軸力は軸力比で $0.05 \sigma_B \sim 0.50 \sigma_B$ (定軸力時は $0.25 \sigma_B$) とし、正方向載荷時に増加、負方向載荷時に減少とした。

残存軸耐力率検討を行うために軸方向載荷も行った。A6 はオリジナル載荷後に、A5, A7, A8

はオリジナル載荷後、補修を行い復元力特性の回復性を確認した後、軸方向載荷を行った。

4. 実験結果

4.1 破壊性状

全ての試験体は、ほぼ同様の変動軸力を受ける曲げ卓越型の破壊経過を示した。試験体 A5 の 1/100rad. (A6, A7, A8 の最大振幅), 1/33rad. 終了時のひび割れ状況を図-7に示す。部材角 1/100rad. 終了時の破壊状況は、曲げおよび曲げせん断ひび割れが部材端約 D の範囲に生じており、ひび割れ幅は 0.04mm 程度であった。また、変動軸力増加時、圧縮側で圧壊・剥離が部材端約 D/2 の範囲に生じた。主筋の降伏は変動軸力増加時、圧縮側で確認された。部材角 1/33rad. 終了時の破壊状況は、圧壊・剥離が変動軸力増加時、圧縮側で部材端約 D の範囲に、引張り側で D/2 の範囲に生じた。曲げおよび曲げせん断ひび割れの幅が 0.06mm 程度に広がっていた。主筋の降伏は変動軸力増加時引張り側でも確認された。これらの試験体を補修し再び載荷を行った。補修後の破壊経過は初期載荷時の破壊

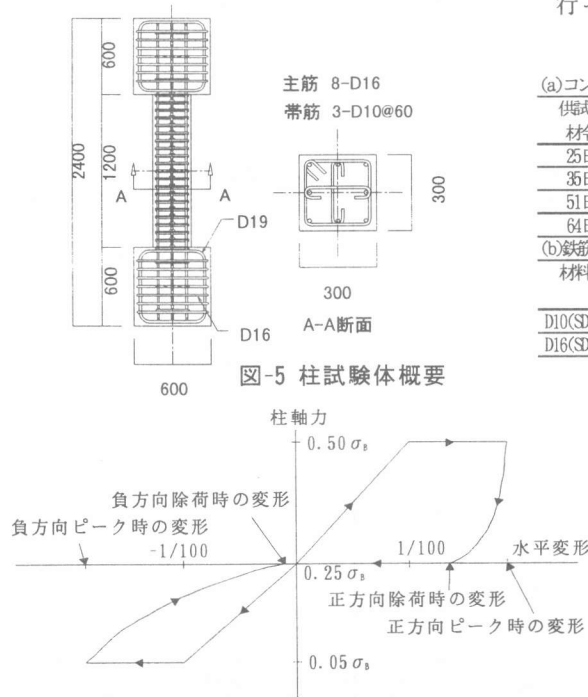


図-5 柱試験体概要

図-6 変動軸力の履歴

表-4 材料試験結果

(a)コンクリート(10φ×20cm)			(c)補修モルタル		
供試体 材名	最大荷重 (kN)	応力度 (N/mm ²)	試験体名 (材名)	最大荷重 (kN)	応力度 (N/mm ²)
25日	294	37.4	A5R(1日)	320	41.8
36日	275	35.1	A7R(5時間)	237	29.8
51日	286	36.4	A8R(1日)	368	46.9
64日	264	33.9			
(b)鉄筋			(d)エポキシ		
材料名	降伏応力度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ⁶ (N/mm ²)	試験体名 (材名)	最大荷重 (kN)	応力度 (N/mm ²)
D10(SD295)	379	1.91	A5R(2日)	1358	27.9
D16(SD345)	387	1.85	A8R(2日)	1219	25.1

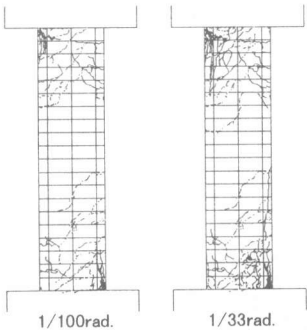


図-7 A5 ひび割れ状況図

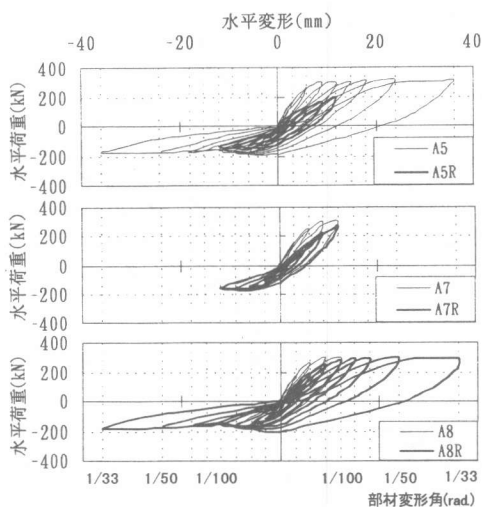


図-8 荷重-変形関係実験結果

経過とほぼ同様であった。ひび割れにエポキシ注入を行った箇所では、注入箇所が再び開くか、元のひび割れ沿いに新しいひび割れが生じた。

4.2 水平荷重-変形関係

補修を行った試験体のP- Δ 効果を補正した水平荷重-変形関係を図-8に示す。正方向載荷時において補修後、剛性が低下しているのがわかる。特にA5Rの剛性低下は著しかった。負方向載荷時においてはA5Rのみに耐力低下がみられA7R, A8Rにはみられなかった。

4.3 水平耐力低下率

補修試験体 A5R, A7R, A8R について、各ピークでのオリジナル試験体に対する耐力低下の関係を図-9に示す。図にはA5+5サイクル(A7R, A8Rの補修を行わなかった場合の履歴と等価)とA5+8サイクルの各変形時の耐力低下率も示す。正方向載荷時のA7R, A8R, A5+5サイクルの耐力低下率を比較する。A7R(カバーコンクリートの置換)の回復性は、変形が小さいときのみ認められ、変形の増加とともに補修したカバーは耐力を失ない、1/100rad.での耐力の回復はほとんどない。A8R(カバーコンクリートの置換とエポキシ注入)の回復性は、各サイクルで耐力の回復が認められるが、もとの性能に回復するのは難しいといえる。A8Rと同様の補修を行ったA5Rでは補修の効果は認められるが、オリジナル載荷に

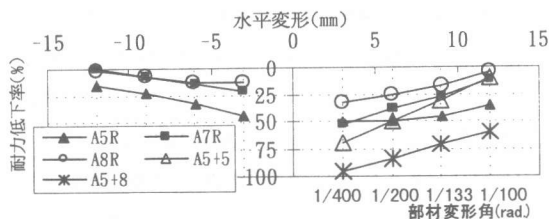


図-9 各ピークでの耐力低下率

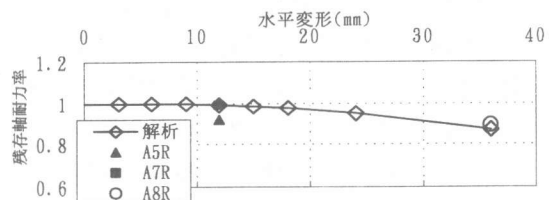


図-10 残存軸耐力率-変形

おける損傷が大きいため回復は難しく各サイクルでの耐力低下は著しい。また、A5Rでは負方向においても耐力が低下している。

4.4 残存軸耐力

試験体A6は断面解析の残存軸耐力率の結果と、試験体に埋め込まれたモールドゲージの歪の値から軸耐力は低下していないと判断した。そこで、A6の軸耐力(3400kN)を柱の初期の軸耐力とし各試験体の残存軸耐力率は、A5R(3195kN)では0.92, A7R(3368kN)では0.99, A8R(3117kN)では0.89である。また、以下にA5のオリジナル載荷後の残存軸耐力率を考える。A7, A8のオリジナル載荷終了後については、A6同様、軸耐力は低下していないので残存軸耐力率は1である。さらにA7Rの残存軸耐力率の結果より、オリジナル載荷履歴が等しいA8Rの1/100rad.でも軸耐力は低下していないといえる。A8Rの1/33rad.で残存軸耐力率が0.89と低下していることと、A5とA8Rが載荷履歴が等しいことよりA5のオリジナル載荷後の残存軸耐力率は低下していたといえる。つまり、残存軸耐力率が低下するほどの損傷を受けた場合、元の性能に回復するのは非常に困難であったといえる。

5. 解析的検討

2.で述べた解析と同様の方法で実験結果に対して解析を行った。A6の軸耐力を柱試験体の初

期軸耐力(コア部分の最大耐力)とし、2.2で述べた方法でコアコンクリートの特性を推定した。カバーコンクリートの特性はプリズム試験結果で得られたものを用いた。曲率の繰り返し振幅は、曲げ破壊が部材端約Dの範囲に集中したことに対応させて、実験から得られた部材回転角をDの範囲の平均の曲率に読み替えて決めた。解析で得られた残存軸耐力率低下過程と実験結果を図-10に示す。解析結果は実験結果とほぼ同じ傾向を示し、残存軸耐力率の低下過程をよく再現できているといえる。補修前、補修後の荷重-変形関係の解析結果(カバーコンクリートの置換補修)を図-11に示す。補修後のカバーコンクリートの特性は、補修材料の材料強度が試験体のものとあまり差がないことから同様の特性を用いた。解析結果は補修後の剛性、耐力低下をよく再現しており、特に1/33rad.の回復性は実験結果同様、非常に悪い。正方向載荷時、圧縮側のコアコンクリート最外縁の応力-歪の応答を図-12に示す。オリジナル載荷により補修後は剛性が低下した状態となっている。これが部材の剛性低下を引き起こしたといえる。これらのことから損傷修復性(補修による剛性・耐力の回復程度)は、コア部分の損傷程度に依存しているといえる。

6. まとめ

変動軸力を受ける曲げ卓越型柱の残存軸耐力と損傷修復性について実験的・解析的検討を行った結果、以下のような結論を得た。

(1)せん断補強筋量の多い柱の軸耐力はコアコンクリートの部分の耐力に依存しており、残存軸耐力率はコアコンクリートの一部が軟化域にはいと低下し始める。

(2)残存軸耐力率の低下した部材の損傷修復性は芳しくなく、圧縮変動軸力側で剛性・最大耐力の低下が起こる。また、この率が低下していない場合であっても剛性低下は起こりうる。実験ではエポキシ注入も行ったが、水平力に対する性能を完全に元の状態に回復するのは困難であった。

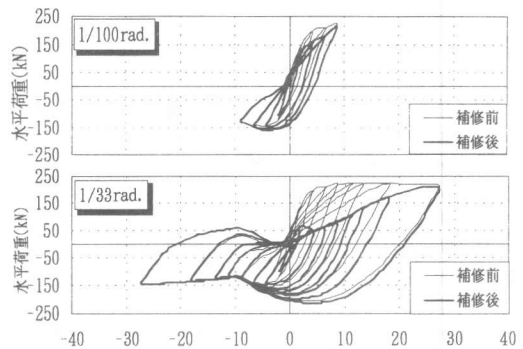


図-11 荷重-変形関係解析結果

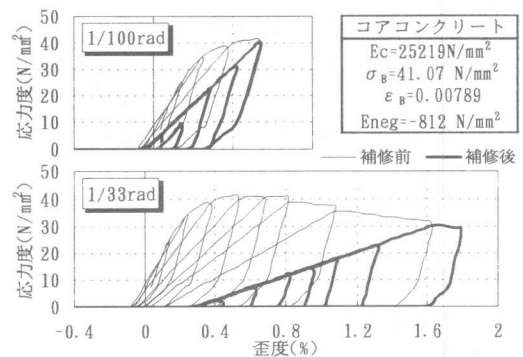


図-12 コアコンクリート応力-歪関係

(3)圧縮変動軸力側では(2)で述べたような部材劣化を生じたが、引張変動軸力側での補修後の部材劣化は小さかった。

参考文献

- 1)北田朋子・田才晃:曲げ柱の地震後の残存軸耐力と損傷修復性に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,PP433-438,1998
 - 2)藤井俊二・青山博之・梅村魁:材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係,日本建築学会大会学術講演梗概集,PP1261-1262,1973.10
 - 3)鈴木計夫・中塚信・菅田昌宏:角形横補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性,コンクリート工学年次論文報告集,PP449-454,1989
- 謝辞:本研究は平成9年度文部省科学研究費(A)(1)(課題番号08305022研究者代表 小谷俊介東京大学教授)の分担研究として行った。本研究を実施するにあたり、矢作建設工業株式会社・建築技術部 伴幸雄氏,ショーボンド建設株式会社・建築事業本部技術部長 松井雅明氏,大阪工業大学建築学科・田才研究室学生諸氏に多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表す。