

論文 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

北田 朋子*1 ・ 田 才 晃*2

要旨: 水平力を受ける曲げ卓越型の柱部材を対象とし、終局限界に達する以前の軸耐力低下の捕捉および、軸耐力の低下レベルと簡易な補修(損傷コンクリートの置換のみ)による損傷修復性との関係を把握することを目的とし、実験的・解析的検討を行った。その結果、限界状態(定軸力支持能力喪失)以前にも軸耐力が低下し、同一最大振幅の繰り返しでは定軸力レベルが高いほど残存軸耐力率は低下することがわかった。また、簡易な補修方法では、残存軸耐力率が1以下となった場合、もとの性能に回復させることは難しく、この比が小さいほど回復性はよくないといえる。

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

1. はじめに

柱の終局限界については、長期荷重に対する耐荷能力の限界点として定義することが多くの研究者から提案されている(例えば1)。柱の潜在的な軸方向耐荷能力は損傷の進行とともに設計時の最大軸力から徐々に低下するはずであるが、この現象を明確にとらえた研究は少なく、かつ損傷の修復性との関係も明らかになっていない。そこで本研究ではまず、ファイバーモデルにより断面の繰り返し载荷後の保有軸方向耐力を算定する予備解析を行った。そして、解析結果を参考に水平力を受ける曲げ卓越型の柱部材を対象とし、終局限界に達する以前の軸耐力低下の捕捉および、軸耐力の低下レベルと簡易な補修(損傷コンクリートの置換のみ)による損傷修復性との関係を把握することを目的とし、実験的・解析的検討を行った。

2. 残存軸耐力に関する予備解析

2.1 解析手法

部材解析の初等的手法であるファイバーモデルにより、繰り返し载荷後における柱軸耐力の低下の様子を検討した。すなわち、RC柱断面を中立軸に平行な線でいくつかの Fiber-Segment に分割し、各要素内のひずみは一定とし、あらかじめ仮定した応力-

ひずみ関係にもとづいて応力度を算出し、断面でのモーメント-曲率関係を求める方法である。せん断変形は考慮せず、鉄筋とコンクリート間の付着を完全と考え、ひび割れ後も平面保持を仮定した。

コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-1に示すように青山らのモデル²⁾を用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係の包絡線および繰り返しルールは、最大耐力までは高次の曲線、それ以後は直線とし、もどりは2本の折れ線、再加力は1本の直線で表されるモデルとした。ただし、コアコンクリートとカバーコンクリートの最大強度点と除荷勾配は六車らの提案³⁾に従った。また、最大強度点を過ぎた後は、繰り返しによる再载荷時に任意の強度低下を生じるようにモデルを修正した。

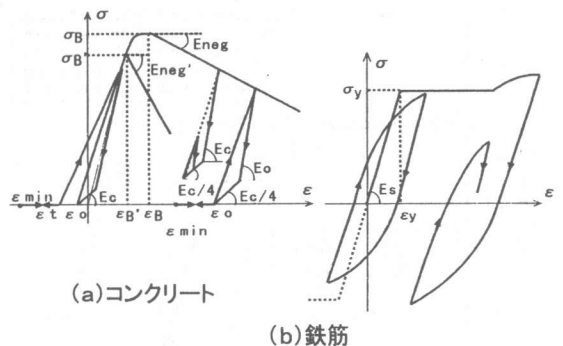


図-1 材料の応力-ひずみ関係のモデル

*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)

鉄筋はひずみ硬化と Bauschinger 効果を考慮した Ramberg-Osgood モデルを用いた。

解析対象は、終局強度型耐震設計法で設計された12階建てフレーム構造の1階柱とし、一定軸力下で任意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、さらに全断面均等に軸方向ひずみを漸増させて求めた最大軸力を保有軸耐力とした。

2.2 解析結果

解析によると、軸方向ひずみが急増し始めると断面耐力の明確な低下が始まり、直ちに長期軸力の保持が不能となる。これは、例えば境らの実験結果⁴⁾と一致する。一定振幅の繰り返しによる軸耐力の低下が軸力比によってどう変化するかを、変位振幅の大きさと繰り返し回数を変化させて検討した結果を図-2に示す。縦軸の残存軸耐力率は、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ものとして、次式で定義した。

$$\text{残存軸耐力率} = \frac{N_{\max}' - N_L}{N_{\max} - N_L} \quad (1)$$

ここに、 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(長期軸力)

この率がゼロになるとき、柱は定軸力を支える能力を失う。図の結果より、以下のことが読みとれる。

ある軸力比以上になると、同一変位振幅の繰り返しで保有軸耐力の低下、すなわち残存軸耐力率

が低下し始める。これは、変位振幅の大きさに依存し、地震時を想定した程度の繰り返し回数(図中:n)には依存しない。この軸力比は同一振幅において、終局限界(残存軸耐力率がゼロになるとき)に達する軸力比よりもかなり小さい。また、一定振幅下の保有軸耐力は、ある軸力比より急激に低下し、これは釣り合い軸力比以下でも起こり、繰り返し回数が多いほど小さい。このような軸耐力の低下は、コアコンクリートの応力が最大強度点を超えるかどうかと概ね対応している。以上のような柱軸耐力の潜在的な低下を捕捉する目的で実験を行い、残存軸耐力率の低下程度と損傷修復性を検討した。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

試験体は繰り返し載荷実験を行った柱試験体と、一軸中心圧縮実験を行ったプリズム試験体の2種類である。概要図を図-3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、材料を同一とする4体とした。主要諸元を表-1に示す。軸力比のみ2種類とした。断面寸法=30×30cm、内法高さ=150 cm、シアスパン比=2.5、全鉄筋比=1.77%である。プリズム試験体(2体)は形状、配筋、材料を柱コア部分に対応するように設定し、カバーコンクリートを取り除いたものとした。断面寸法=26×26cm、高さ=60 cmの角柱である。

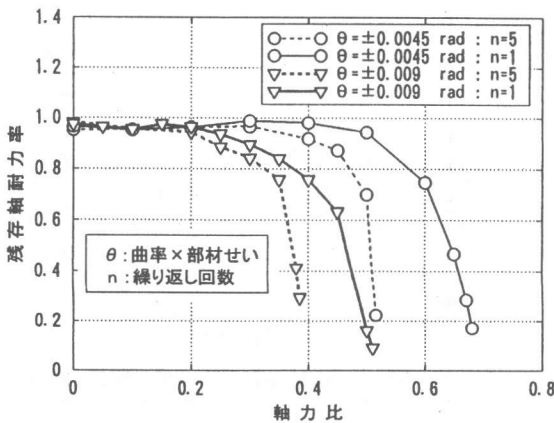


図-2 軸力比による残存軸耐力率の変化

解析値諸元	
■ コアコンクリート	■ プロトタイプ柱断面
$E_c = 30400\text{N/mm}^2$	950×950mm
$\sigma_B = 41.48\text{N/mm}^2$	
$\epsilon_B = 0.00457$	
$E_{\text{neg}} = -25900\text{N/mm}^2$	主筋: 20-D32 帯筋: 5-D16@100
■ カバーコンクリート	
$E_c = 30400\text{N/mm}^2$	
$\sigma_{B'} = 35.30\text{N/mm}^2$	
$\epsilon_{B'} = 0.00177$	
$E_{\text{neg}'} = -5990\text{N/mm}^2$	

表-1 試験体諸元

試験体名	主筋	軸応力度 σ_o (N/mm ²)	せん断補強筋	Pw (%)	$w \sigma_y$ (N/mm ²)	$Pw \cdot w \sigma_y$ (N/mm ²)
A1	8-D16	0.2 σ_B	2-D10 @60	0.79	365	2.88
A2		0.35 σ_B				
A3		0.2 σ_B				
A4		0.35 σ_B				

Pw:せん断補強筋比 $w \sigma_y$:鉄筋降伏強度
 σ_B :コンクリート圧縮強度 $Pw \cdot w \sigma_y$:せん断補強筋量

3.2 材料特性

コンクリートは呼び強度を25N/mm²,セメントは早強ポルトランドセメント,粗骨材の最大寸法は15mm,スランブは18.5cmとし,ミキサ車による生コンを使用した。鉄筋の材質はすべてSD295相当で,鉄筋径は主筋D16,せん断補強筋D10を使用した。柱試験体実験に先立って行ったシリンダー供試体の圧縮試験結果および,鉄筋の引張試験結果を表-2に示す。

3.3 加力方法

柱の加力装置は図-4に示すように,パンタグラフ式の逆対称加力装置を使用した。鉛直方向油圧ジャッキにより,一定軸力をかけた状態で上下スタブの平行を維持し,試験体高さの1/2の位置にある水平方向油圧ジャッキで正負繰返し加力を行った。鉛直方向油圧ジャッキは荷重で,水平方向油圧ジャッキは変位で制御した。各試験体の加力方法を以下に述べる。

- ①試験体A1:一定軸力=785kN(約 0.2 σ_B)で初期加力後軸載荷
- ②試験体A2:一定軸力=1323kN(約 0.35 σ_B)で初期加力後軸載荷
- ③試験体A3:一定軸力=785kN(約 0.2 σ_B)で初期加力後補修を行い再載荷(補修後をA3R)再載荷終了後軸載荷
- ④試験体A4:一定軸力=1323kN(約 0.35 σ_B)で初期加力後補修を行い再載荷(補修後をA4R)すなわち,軸力レベルを2水準とし,1体は初期載荷後,変形・力を原点に戻し軸方向載荷を行い軸耐力低下程度を調べた。また,軸力レベルを同じくする他の1体づつは,同様の載荷を行った後簡易な補修を行い,再加力し復元力特性の回復性を調べた。図-5に水平方向の加力履歴を示す。

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート

供試体材令	最大荷重 (kN)	応力度 (N/mm ²)
20日	290	37.1
31日*	363	46.2
41日*	354	45.4

*柱試験体加力時に対応

(b) 鉄筋

材料名	降伏応力度 (N/mm ²)	ヤング係数 $\times 10^5$ (N/mm ²)
D10(SD295)	365	1.95
D16(SD295)	328	1.86

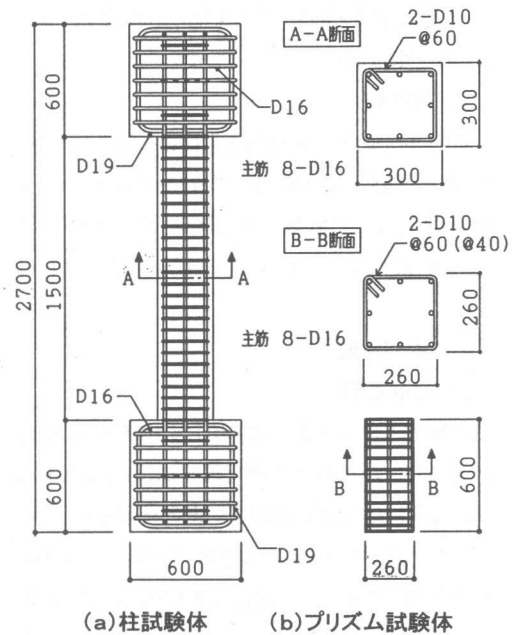


図-3 試験体概要図

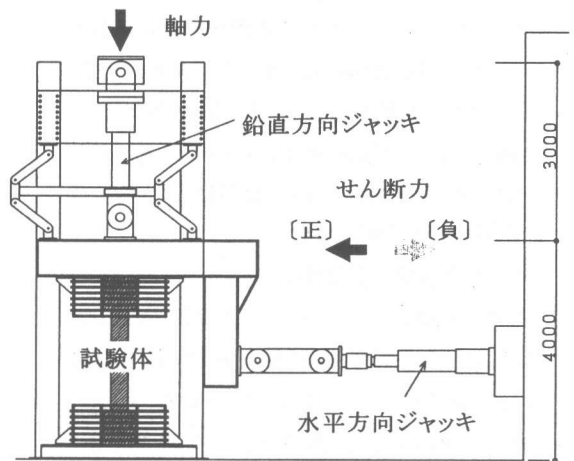


図-4 加力装置図

1方向の変位振幅が部材変形角で、試験体 A1 および A3 の初期荷重については $1/400 \sim 1/33 \text{rad}$ まで各2サイクルずつ、試験体 A2, A3R, A4, A4R については各1サイクルずつの漸増繰り返しとした。

3.4 測定方法

柱に作用する軸力およびせん断力をロードセルによって測定した。柱の水平変形、軸変形および端部の回転角は試験体に埋め込んだボルトに取り付けた変位計により測定した。また、主に塑性ヒンジ領域D(:柱の全せい)の主筋、帯筋ひずみおよびコアコンクリートのひずみ(埋め込み式ゲージを使用)を測定した。

3.5 補修概要

補修は初期加力後定軸力を保持したまま、部材端部Dの領域の圧壊を生じたカバーコンクリートを超速硬セメントで置換した。補修材のシリンダー圧縮強度は、材令4時間で 35.5N/mm^2 であった。

4. 実験結果

4.1 破壊性状

試験体 A3・A4 および A3R・A4R の変形角 $1/33 \text{rad}$ のひび割れ状況を図-6に示す。A3・A4の両試験体ともほぼ同様の破壊経過を示し、曲げ卓越型の性状を示した。柱頭・柱脚に $1/400 \text{rad}$ のサイクルで曲げひび割れが発生し、 $1/133 \text{rad}$ のサイクルで柱脚にカバーコンクリートの圧壊が生じた。ひび割れは部材端部Dの範囲に生じ、カバーコンクリートの剥落は部材端部D/2の範囲に集中していたが、コアコンクリートの損傷は見られなかった。また、両試験体とも主筋は引張降伏したが、柱頭・柱脚の危険断面から遠ざかるほど降伏しにくい傾向がある。帯筋の降伏はA3では見られなかったが、軸力の大きなA4では部材端DからD/2の範囲で降伏が見られた。

4.2 水平荷重-変形関係

補修試験体 A3R・A4R のP- Δ 効果を補正した水平荷重-水平変形関係を図-7に示す。両試験体とも剛性耐力の回復性は芳しくないが、A4Rの方は耐力低下が著しく最終サイクルで限界状態に達した。すなわち、本実験で扱ったような簡易な補

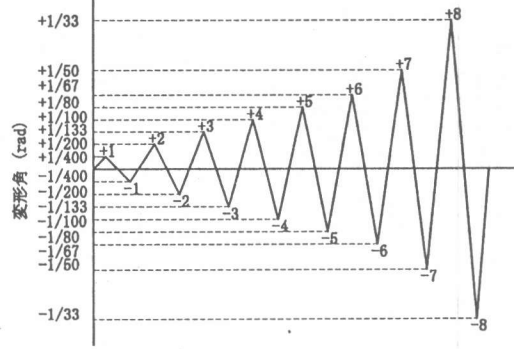
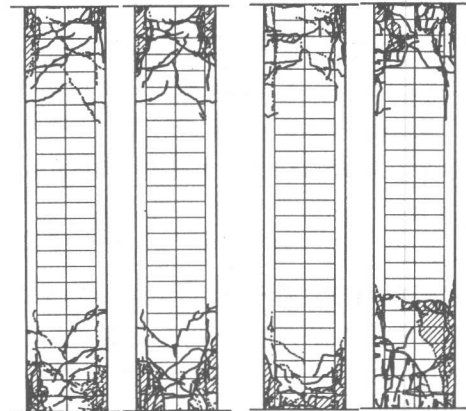


図-5 水平加力履歴



(a) A3 (b) A3R (c) A4 (d) A4R

図-6 ひび割れ状況

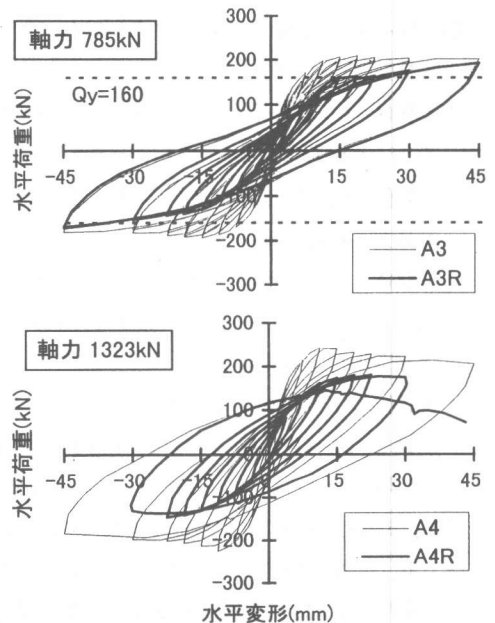


図-7 荷重-水平変形関係

修方法では、残存軸耐力率が1以下となった(コアコンクリートの一部が軟化域に入った)場合、もとの性能に回復させることは難しく、この率が小さいほど回復性が悪い。

4.3 軸耐力-軸ひずみ関係

初期載荷後および補修試験体の軸耐力-軸ひずみ関係を図-8に示す。各試験体の N_{max} = 3530kN (推定) に対して、試験体A1の残存耐力比は 0.70、試験体A2では 0.42 であり、限界状態(定軸力支持能力喪失)以前にも潜在的な軸耐力が低下し、同一最大振幅の繰り返しでは定軸力レベルが高いほど残存軸耐力率は低下する。これは、予備解析で予測された傾向と同じである。

4.4 水平耐力低下率

補修試験体A3R・A4R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率の関係を図-9に示す。軸力の大きいA4Rの方が耐力低下率は大きい、正負とも 1/67rad まで大差はない。しかし、1/50 rad ではA4Rの方が急激に耐力低下を起し破壊に至っている。

5. 解析的検討

プリズム試験体の一軸中心圧縮実験から得られた、コアコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて予備解析と同様の解析を行った。カバーコンクリートの特性は、六車モデルにより推定した。解析結果より得られた、残存軸耐力率-軸力比の関係を図-10に示す。曲率の繰り返し振幅は、試験体の最終軸圧縮破壊が部材端Dの区間に集中したこと

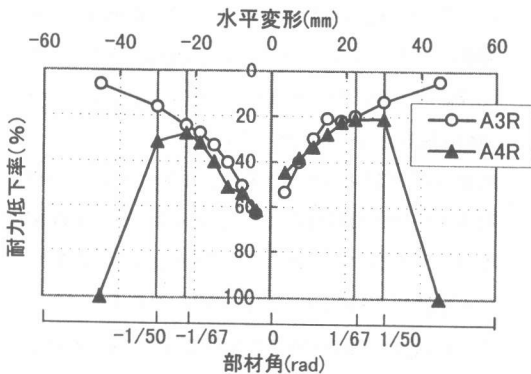


図-9 各ピークでの耐力低下率

に対応させて、実験から得られた端部回転角をDの範囲の平均曲率に読み替えて決めた。解析結果の方が、軸力比の増大に伴い残存軸耐力の低下が著しいが、軸力比の増加により残存軸耐力率が低下する傾向は実験でも確認された。

補修による荷重-変形関係の劣化性状について、ファイバーモデルによる解析で再現することを試験体A3・A3Rを対象に試みた。補修は定軸力を保った状態でカバーコンクリートのみを置換するよう行ったので、コアコンクリートには応力が生じたままであった。それに対して、修復されたカバーコンクリートに応力は生じていないはずで、補修後の曲げ応答ではひずみの直線分布が仮定できない。そこで、ひずみ増分のみが断面内で直線分布すると仮定して、初期加力終了後のカバーコンクリートの特性を変更・初期化することで、初期加力から補修後加力終了まで連続的に解析した。補修後のカバーコンクリートの特性は、強度にあまり差がない

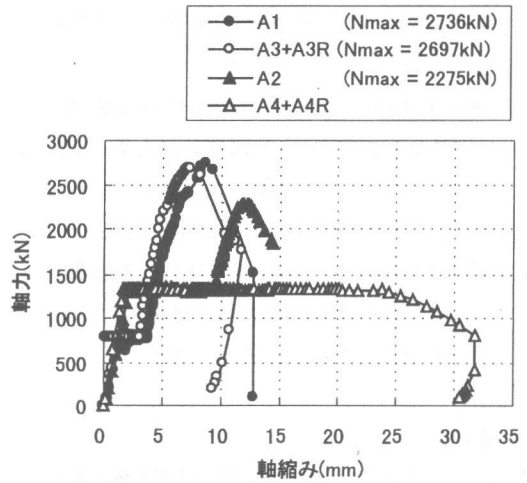


図-8 軸耐力-軸ひずみ関係

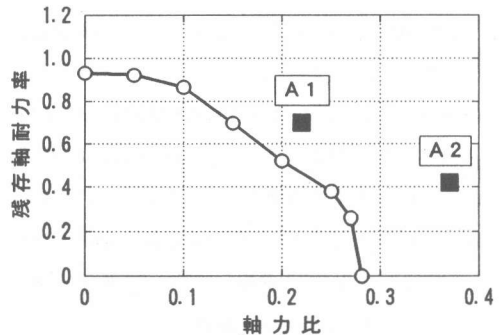


図-10 残存軸耐力率-軸力比

ことからオリジナル試験体と同一とした。解析結果を図-11に示す。変位振幅が実験よりやや小さいのは、実験における部材端の回転変形のみを解析と対応させたためである。補修後(図中太実線)の各変位振幅における耐力が、初期加力時(図中細実線)より小さくなる傾向は実験と同様である。ただし、解析の方がこの劣化程度は小さかった。断面最外縁のカバーおよびコアコンクリートにおける、応力-ひずみの応答を図-12に示す。コアコンクリートが初期加力(図中細実線)により軟化域に入っており補修後の剛性、強度は著しく低下している(図中太実線)。

6. まとめ

水平力を受ける曲げ卓越型の柱部材を対象として正負繰り返し加力を行い、以下の結論を得た。

- (1) 限界状態(定軸力支持能力喪失)以前にも軸耐力が低下し、同一最大振幅の繰り返しでは定軸力レベルが高いほど残存軸耐力率は低下する。
- (2) 本研究で扱ったカバーコンクリートの置換のみの簡易な補修方法では、残存軸耐力率が1以下となった場合、もとの性能に回復させることは難しく、この比が小さいほど回復性が悪い。
- (3) 補修前後の荷重-変形関係を解析した結果、コアコンクリートが初期加力により軟化域に入ったことが補修後部材の劣化をもたらす。

参考文献

- 1) 平石久廣・稲井栄一・勅使川原正臣: 変形機構に基づくR/C柱の曲げ靱性能に関する研究, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集, pp II 217-II 228, 1988.3
- 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) 六車 照・渡辺史夫・勝田庄二・田中仁史: 横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報, Vol.34, pp429-432, 1980

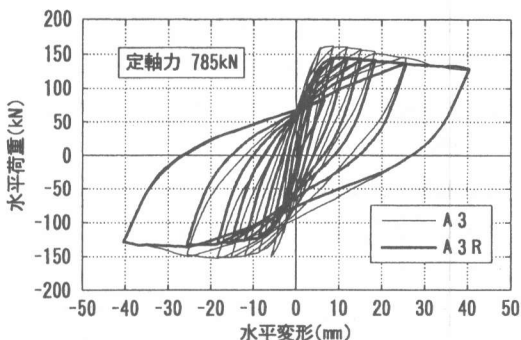
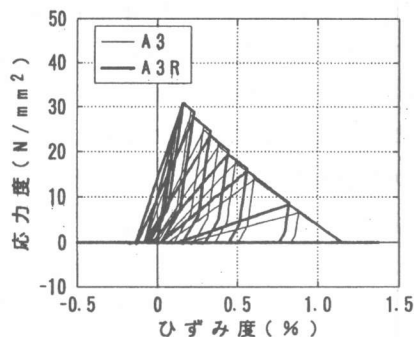
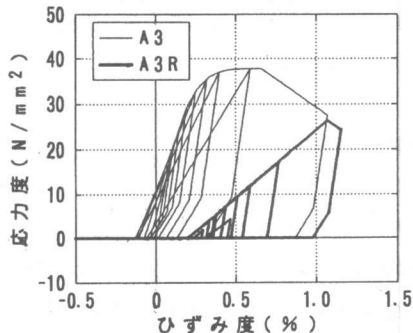


図-11 荷重-水平変形関係



(a) カバーコンクリート



(b) コアコンクリート

図-12 応力-ひずみ関係の応答

- 4) 小谷俊介・境 有紀・青山博之: 曲げ圧縮破壊する高強度コンクリートを用いたRC柱の変形性能(その1) 曲げ圧縮破壊するRC柱の限界変形, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp205-206, 1991.9

謝辞: 本研究は平成8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・田才研究室卒論生諸氏に多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表す。