

# 常時偏心軸力が作用する鉄筋コンクリート 柱の多軸曲げ挙動と非線形解析

土屋智史<sup>1</sup>・小笠原政文<sup>2</sup>・津野和宏<sup>3</sup>・市川衡<sup>4</sup>・前川宏一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

<sup>2</sup>正会員 首都高速道路公団 湾岸線建設局 (〒211-0006 神奈川県川崎市川崎区砂子一丁目 1-10)

<sup>3</sup>正会員 工修 首都高速道路公団 工務部工務企画課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関一丁目 4-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関一丁目 4-1)

<sup>5</sup>正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

偏心軸力によるモーメントが作用するRC橋脚に、そのモーメントと直交方向に正負交番による水平力を加えると、偏心軸力によるモーメントが作用する方向に、残留変形が蓄積されていく挙動を実験にらびに三次元有限解析によって捉え、その機構について考察を行った。偏心軸力が作用するRC橋脚の残留変位を評価する際には、二方向の主軸を独立にチェックすることでは非弾性挙動を精度良く追跡することは難しく、残留変形の予測には両者の連成を考慮することが必要であることを示した。

**Key Words:** *eccentric axial forces, reversed cyclic loading, residual displacement, 3D FEM analysis*

## 1. 序論

二次災害を防ぎ救援活動を円滑に行うために、高速道路など主要な交通機関は、巨大地震発生直後からでも使用できるように配慮して設計されなければならない。兵庫県南部地震以降、重要度の高いRC橋脚に対して、せん断破壊による倒壊を防ぐと同時に、残留変位を小さく抑えなければならないという命題が課せられることになった。これは、緊急車両を通行させるだけの残存性能は備えていても、震災以前の元の位置に橋脚を戻すことが困難である、という理由で撤去・再構築された橋脚が多数存在していたことに由来する<sup>1)</sup>。せん断破壊の防止は横拘束筋の適切な配置などによって達成可能であるが、残留変位に関しては一般化された予測法が確立されておらず、緊急の研究課題となっている。地震動が入力された時に常時偏心軸力によりもたらされるモーメント作用方向に残留変位が蓄積されていくことが予想されるからである<sup>1),2),3)</sup>。

偏心軸力が作用する柱については、十分な知見を得るまでには至っておらず、地震時の挙動も良

く分かっていないのが現状である。本研究は、偏心軸力が作用するRC柱に偏心軸力によるモーメントが作用する方向と直交方向に水平力が入力された時の非線形挙動について、実験ならびに解析による検討を試みたものである。

「コンクリート標準示方書耐震設計編<sup>4)</sup>」に見られるように構造設計法は、限界状態設計法から性能照査型設計基準へと移行しつつある<sup>5),6)</sup>。構造諸元を決定するプロセスと要求性能の確認作業を明確に位置付ける性能照査型基準では、動的非線形応答の役割が明確となる<sup>7)</sup>。性能判定の材料を与える数値解析シミュレーションの適用範囲の拡大と精度向上は、当面の大きな課題の一つであると言える。陸好・町田ら<sup>24)</sup>により一軸の曲げ載荷に対しては、静的と動的な復元力特性に及ぼすひずみ速度の影響は、ほとんどないことが実証されている。本論文は、二軸の静的曲げ載荷実験について述べたものであるが、二軸曲げ動的作用についても同様に、ひずみ速度の影響はほとんどないものと期待される。従って、多軸曲げの静的挙動を解析的に追跡することは、地震時の耐震性能を照査することと密接に関連する事象である。本研究では、

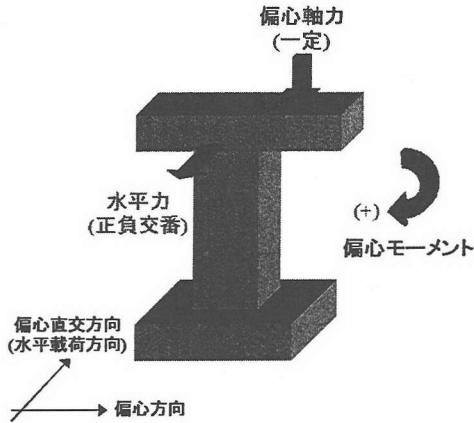


図-1 偏心モーメントとその方向

Fiber Modelに基づく3次元非線形有限要素解析もあわせて行い、その精度を確認するとともに、有効性についても検証を行うものである。

本文では、偏心軸力が作用する橋脚を「偏心橋脚」とし、図-1に示すように偏心軸力によりもたらされるモーメントを「偏心モーメント」、その作用する方向を「偏心方向」と定義する。一般には、偏心方向は橋軸直角方向に一致し、偏心直交方向は橋軸方向に一致する。また、研究対象とするRC柱は、現行の示方書<sup>9)</sup>が定めるだけの横拘束筋を備えた曲げ破壊先行型のものとし、せん断破壊に関しては、特に考慮しなくても良い部材を残留変位に関する検討の対象とした。なお、本研究は第2、第3、第4著者が実験の計画実施と結果の分析応用を担当し、第5著者が数値解析手法の開発を主導し、第1著者が本実験の解析と非線形機構の解明を専ら担ったものである。

## 2. 偏心軸力を受けるRC柱の多方向曲げせん断

### (1) 実験対象柱と実験供試体

常時に作用する偏心モーメントが比較的大きいと思われる逆L字型RC柱をモデルとした縮小供試体を作成し、静的に偏心直交方向に水平力を加える正負交番載荷を行うこととした。本実験の速報は参考文献<sup>9)</sup>で報告した。この実験は、当初、偏心軸力が偏心直交方向の耐震性能にどのような影響を与えるのかを調べると同時に、ねじりの影響を確認するために行われた一連の実験の一部である。

実験供試体は、橋軸直角方向の張り出し部を想定したRC柱をおよそ1/5にスケールで縮小したモ

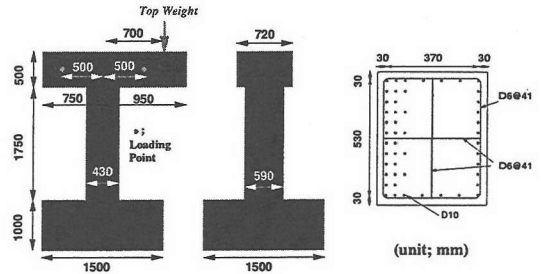


図-2 実験供試体の概要

表-1 想定柱と供試体の諸元<sup>9)</sup>

項目	実橋脚	供試体	相似比
断面寸法 (cm*cm)	220*300	43.0*59.0	5.09
上部構造鉛直反力(kN)	1990	140	
柱基部軸力 (kN)	4270	165	
圧縮応力 (MPa)	0.648	0.648	1.00
コンクリート設計基準強度 (MPa)	29.4	29.4	
かぶり厚 (mm)	100	30.0	3.33
粗骨材径 (mm)	20.0	10.0	2.00
主鉄筋総断面積 (cm <sup>2</sup> )	D32*112 = 890	D10*48 = 34.2	
軸方向鉄筋比	1.35	1.35	1.00
偏心方向横拘束筋体積比(%)	1.10	1.10	1.00
偏心直交方向横拘束筋体積比(%)	1.54	1.54	1.00

表-2 材料試験結果<sup>9)</sup>

コンクリート	圧縮強度 (MPa)	38.5
	弾性係数 (*10 <sup>4</sup> MPa)	2.63
	引張強度 (MPa)	3.47
	ポアソン比	0.164
D10	降伏強度 (MPa)	409
	弾性係数 (*10 <sup>5</sup> MPa)	1.97
D6	降伏強度 (MPa)	396
	弾性係数 (*10 <sup>5</sup> MPa)	1.98

デルであり、寸法ならびに柱の断面諸元は図-2に示す通りである。柱の主鉄筋にはD6を、帯鉄筋と中間鉄筋にはD4を用いている。鉄筋の定着やコンクリートの充填等を考慮した上で、できる限り断面寸法比を統一し、忠実な諸元の再現に努めたものである。

実験供試体を作成するにあたり想定した実物大

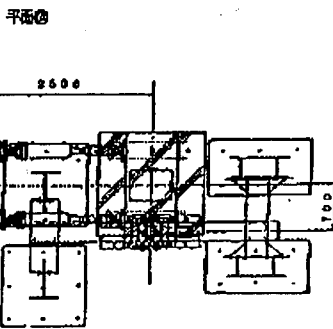
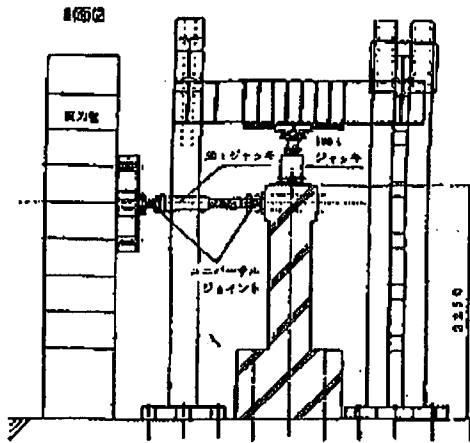


図-3 載荷装置の概要<sup>9)</sup>

の RC 柱は、表-1 に示す通り、十分に横拘束筋を備えたもので、現在の道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づく地震時保有水平耐力法の照査に合格する橋脚である。なお、横拘束筋間隔は、41[mm]である。実物大の想定柱と実験供試体の諸元の比較および相似比を表-1 に、供試体の作成に用いた使用材料の試験結果を表-2 に示す<sup>9)</sup>。

## (2) 載荷方法

初期荷重として、想定柱の柱付け根部分の発生圧縮応力度と同レベルとなるように、鉛直荷重を140[kN]とし、死荷重による主鉄筋の応力度が118[MPa]となるように偏心距離を70[cm]とした。従って、この供試体には、死荷重により常時103[kN\*m]の偏心モーメントが作用している。偏心距離とは、柱上端の断面中心部から軸力作用位置までの距離を指す。

水平力は偏心モーメントの作用方向と直交方向(橋軸方向)に変位制御により正負交番で加えた。その際、降伏変位 $\delta_y$ の整数倍を2回ずつ繰り返す方法を採用している。同一振幅で繰り返し載荷する場合、1回目と2回目では特に鉄筋のひずみ経路が大きく異なるために構造物としての履歴曲線も変

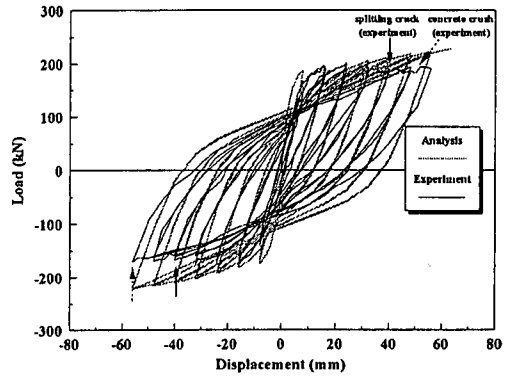


図-4 水平載荷方向荷重-変位関係 (実験と解析)

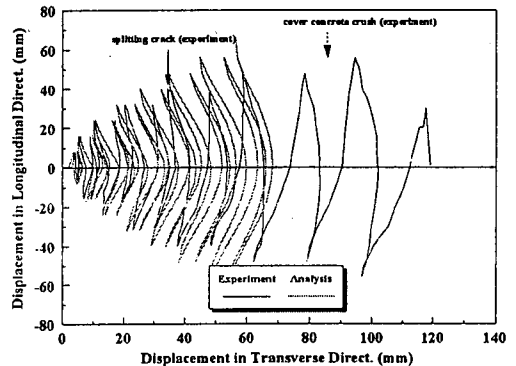


図-5-1 偏心方向変位-水平載荷方向変位関係全体図 (実験と解析)

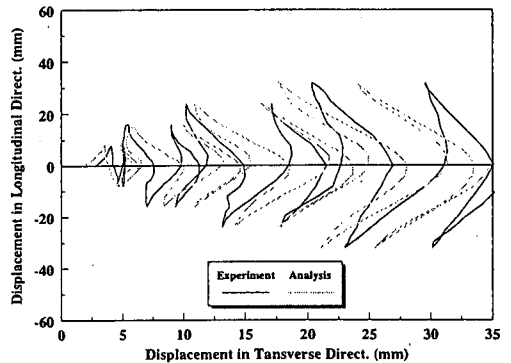


図-5-2 偏心方向変位-水平載荷方向変位関係鉛直ひびわれ発生前までの拡大図

化するが、それ以降ではほとんど同じ経路をとることが確認されており<sup>10)</sup>、繰り返し回数をこれ以上増やすと鉄筋の低サイクル疲労に伴う破断を招き、本実験の主たる目的を達成できなくなるものと考えたからである。ここでは降伏変位として、道路橋示方書における地震時保有水平耐力法に基づき算出された値である8.0[mm]を用いている。

水平荷重は反力壁を介して 2 基の油圧ジャッキを橋脚張り出し部に取り付け、変位制御により加力した。この時、橋脚にねじり変形が加わらないようにし、加力と直交方向の拘束を解くため、ジャッキの両端にはユニバーサルジョイントを配置した。鉛直荷重は供試体の上部の外部フレーム梁を介して 1 基の油圧ジャッキにより加えたが、摩擦係数が  $1.0 \times 10^{-3}$  以下のガイドレールを設けることで水平拘束力を極力除くようにした。実験装置の概要を図-3 に示す。

### (3) 実験結果

実験結果を図-4 と図-5-1, 5-2 に示す。図-4 は、水平載荷方向の荷重-変位曲線であるが、これによりこの方向ではエネルギー吸収が高く、優れた耐震性能を有していることが分かる。ところが、図-5-1 に示すように、水平載荷方向に正負交番で水平力を加えると、偏心方向に随時変形が蓄積されていく現象が観測された。最終的には、偏心方向の残留変位は 120[mm]に達している。ここで載荷装置の限界に達したために、7 $\delta$ y-1 サイクルで水平載荷方向への載荷を終了した。水平載荷方向には強制変位として、最大応答でも 56[mm]しか与えていないにも拘わらず、偏心方向には倍以上の 120[mm]という大きな残留変位を記録した。この実験結果は、偏心直交方向の地震入力に対して、偏心軸力が作用する方向の残存性能を確認する必要があることを意味している。道路橋示方書<sup>9)</sup>における許容残留変位は、橋脚下端から上部構造重心位置までの高さの 1/100 と定められており、その許容値は本実験供試体の諸元では約 25[mm]である。

実験では 5 $\delta$ y サイクルで、柱基部の偏心モーメントにより圧縮を受ける側のかぶりコンクリートに鉛直方向ひびわれが発生し、6~7 $\delta$ y サイクルで圧壊したことが、観測されている。柱基部での主鉄筋の明確なはらみだしは、見られなかった。載荷実験終了時の様子を写真-1, 2 に示す。

続いて、大きな損傷を受けた後の RC 柱の残存耐力を調べるために、軸力をとり除いて偏心方向に水平力を静的に与えた。図-6 に示したように、偏心方向の荷重-増分変位関係は既に加力直交方向に大きな応答を経験し、加力方向に傾斜していたにもかかわらず、安定した曲げ応答性状を備えており、十分な残存安全性を有していることが窺える。

偏心直交方向に正負交番で水平力を加えると、偏心方向に随時変形が蓄積されていく現象は、偏心軸力の存在によりもたらされると考えられる。

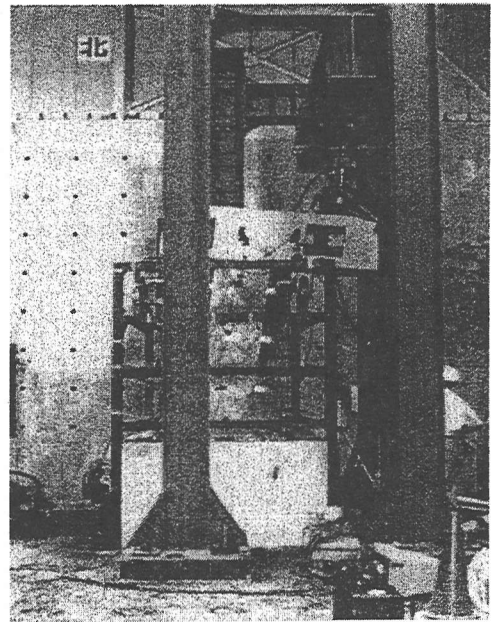


写真-1 載荷終了後の様子(全景)

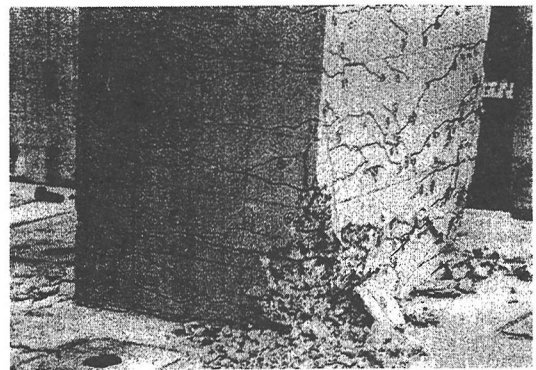


写真-2 載荷終了後の様子(基部拡大)

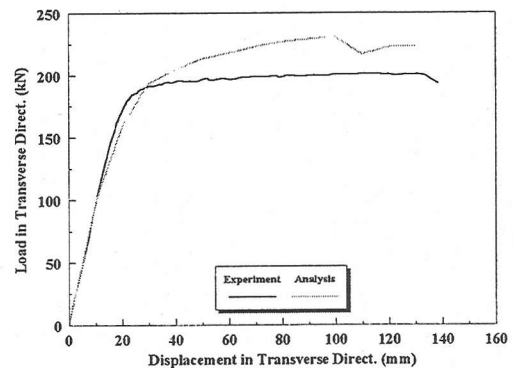


図-6 偏心方向荷重-変位関係 (実験と解析)

この機構を実験のみから解明するには限界がある。残留変位に関わる 3 次元挙動を把握するために、次章において数値解析を行い、作用力と直交方向に残留変位が加速される機構の検討を加えることとした。

### 3. 非主軸方向への残留変位蓄積の機構

#### (1) 解析手法の概要<sup>11),15)</sup>

残留変位と主たる水平加力方向が直交した本ケースは、まさに 3 次元非線形挙動であり、2 次元に置き換えた議論は意味をなさない。そこで、数値解析による検討では、Fiber Model に基づく 3 次元立体骨組み解析法<sup>7),15)</sup>を採用した。この解析手法では、材料モデルとして、鉄筋コンクリートの他、弾塑性体や異なる材料間の接合部の境界要素などが考慮されている。3 次元鉄筋コンクリート構成則に基づく数値解析法<sup>12),13),14)</sup>により構造物の挙動を検討することも可能であるが、せん断破壊を対象としないので、本研究ではその利用を避けることとした。Fiber Model では平面保持の仮定を基に、平均軸ひずみと 2 方向曲率から断面軸力と 2 方向モーメントを求める。自由度を縮退しているので収束性・安定性に優れた解析法を組み合わせることが可能である。適切な材料モデルを組み込めば RC 構造物の曲げ非線形を予測するための有効な手段とすることができ、計算時間も大幅に減少させることができる<sup>7),15),22)</sup>。

コンクリートと鉄筋の材料構成則は、**図-7, 8**に示す除荷・再載荷を含む経路依存型の平均ひずみ-平均応力の関係で与えられる分散ひびわれモデルを採用している<sup>11)</sup>。なお、既往の 3 次元鉄筋コンクリート構成則と整合性をとるように以下のモデルを組み込んでいる。すなわち、① 載荷履歴に応じたひびわれ発生基準の採用② コンクリートの圧縮域に弾塑性破壊型構成則<sup>11),16)</sup>を採用して、除荷剛性の低下を考慮したこと③ 付着を代表する引張剛性を考慮し、圧縮と引張のスムーズな連結を図っていること<sup>11),17)</sup>④ 付着の及ぶ領域と及ばない領域のゾーニング<sup>18)</sup>を行い、ひびわれ発生以降の剛性の精度を高めることを考慮したこと、の 4 つである。

ゾーニングとは、構造物断面を付着作用が及ぶ領域(RC Zone)と、付着作用が及ばない領域(PL Zone)とに分割する手法を指し、ひびわれ発生以降の剛性の精度を高めるために行うものである。RC Zone では、鉄筋周りに付着ひびわれが分散して導入され、主たる曲げひびわれ間のコンクリートも

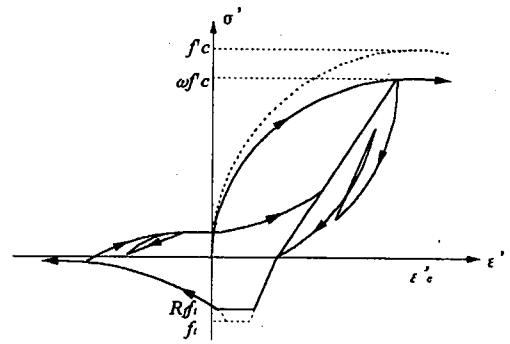


図-7 コンクリートの材料構成モデル<sup>16),17)</sup>

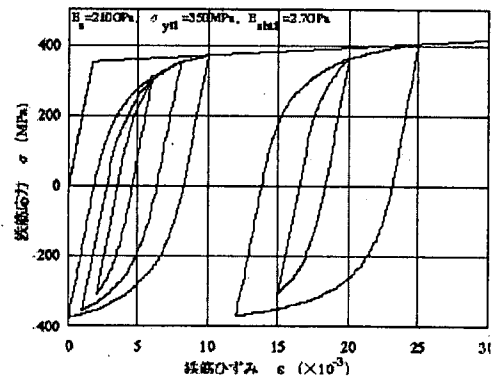


図-8 鉄筋の材料構成モデル<sup>17),19)</sup>

なお鉄筋の自由のびを拘束する。その際には、引張応力がひびわれ間のコンクリート中に展開している。一方、鉄筋が配置されておらず、付着作用の及ばない PL Zone や、ひびわれと鉄筋の方向が平行に近い場合には、鉄筋とコンクリートとの付着作用による引張応力伝達効果を期待できず、ひびわれ発生後に、応力は急速に開放され、引張力を十分には負担できない(Tension Softening)(**図-9**)。これを解析的に取り込むために、安は限界鉄筋比の考え方を基本として Zoning 法<sup>18)</sup>を提案しており、本解析でもこの手法を採用した。また、せん断変形を許容する Timoshenko はり理論を用い、せん断剛性は十分大きい値を仮定した。従って、変位に及ぼすせん断変形をここでは実質的には無視している。解析対象となる実験供試体は曲げ破壊卓越型であるため、このような条件で解析を行っても精度上は問題とならないと判断した。

主鉄筋のフーチングからの抜け出しを本解析では考慮していない。鉄筋径と断面寸法をできる限り同一の縮小率で作成した実験供試体では、部材全体の変形量に占める主筋の抜け出し量が、高々十数%(実橋脚相当)であることが確認されている<sup>21)</sup>。なお、実験結果における変位量は、主筋の抜け出

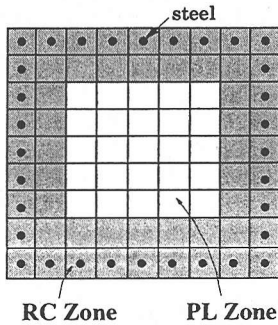
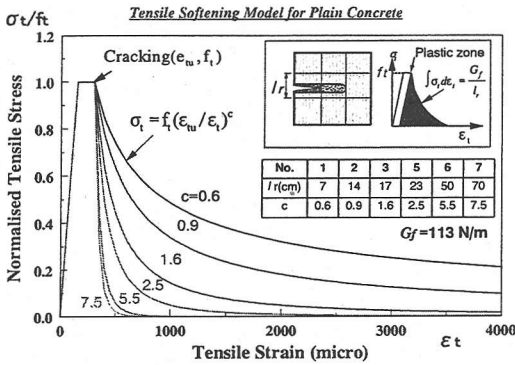


図-9 Tension Softening とゾーニング<sup>15),18)</sup>

しも含めた部材全体のものとなっている。

かぶりコンクリートの剥離および主鉄筋の座屈といった部材が大きく損傷を受けた以後の構成則は採用されていない。従って、かぶりの剥離以降は、実験における残留変位が、解析結果よりも大きくなるのが妥当な結果である。ただし、これらの構成則の構築に向けた研究は別途行う必要がある<sup>23)</sup>。精度検証が十分なされているモデルであれば、解析に取り入れることも可能であるが、材料非線形に伴う残留変位蓄積の機構に焦点を当てるため、本文では不確定要因を意識的に省き、検討を行った。

鉄筋挙動は、塑性の局所化と破断までを含めて高精度化を行ったバイリニアールモデル<sup>19)</sup>を採用した(図-8)。幾何学的非線形を考慮して P-δ 効果の影響を取り込んでいる。

図-7, 8 に示したように、繰り返し载荷に伴う材料の剛性劣化は、モデル化を行っていない<sup>10)</sup>。すなわち、過去に経験した最大ひずみ値に到達した時には、繰り返し回数に依らず、元の応力値に戻る。モデル化を行わなかった理由は、かぶりの剥離や鉄筋の座屈と同じく、十分な精度を有するモデルが確立されていないことから不確定要因を省き、材料非線形に伴う残留変位蓄積の機構に焦点

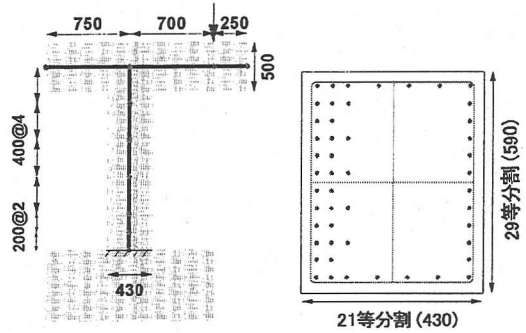


図-10 要素分割の概要

を当てるためである。また、本解析手法における構成モデルは、静的に载荷を行った実験より求められている。従って、本実験において発生している短期クリープは、自然に包含された解析結果となっている。

## (2) 解析結果

前章で述べた実験を対象とした解析<sup>20)</sup>を行った。要素分割は、図-10 に示す通りである。実験と同様にねじりが加わらないようにし、静的に変位制御により正負交番载荷を行っている。解析により導かれた水平载荷方向の荷重-変位関係を図-4 に、水平载荷方向変位と偏心方向変位の変化の様子を図-5-1, 5-2 に、実験結果とあわせて示した。図-5-2 は、柱基部に鉛直ひびわれが発生する前までを拡大した図である。

図-4 を比較すると、柱の降伏時までは良好な精度で一致しているが、解析結果では降伏以降に耐力がわずかに上昇し続け、実験結果から徐々に乖離していく。これは、解析ではかぶりコンクリートの剥離、主鉄筋の座屈およびそれによってもたらされる付着の喪失をモデルで考慮していないことが主たる原因である。耐力力がわずかに上昇し続ける理由は、鉄筋モデルに単純化したバイリニアール型を採用していることが第一の要因である。ただし、エネルギー吸収の高い優れた耐震性能を有していることに変わりはない。

一方、図-5-1, 5-2 に示すように、偏心直交方向に静的に正負交番で水平力を加えた時に偏心方向に変形が加速的に蓄積されていく現象は、解析においても明確に現れている。本解析では、構成モデルのレベルでは繰り返しによる劣化を考慮していない。つまり、この挙動は繰り返しによる材料劣化機構によるものではなく、異なる履歴特性を有する材料で構成される部材システムの機構に起

因する事象である<sup>10)</sup>。実験結果と解析結果を比較すると、 $4\delta y$  サイクルまでは両者間で、高い精度で一致していることが確認できる(図-5-2)。 $5\delta y$  サイクル以降においては、実験結果では、偏心方向への残留変位が加速度的に増大していくのに対し、解析結果では、この残留変位を小さめに見積もっている。降伏以降の塑性域における付着力の低下やかぶりコンクリートの剥離、主鉄筋の座屈をモデル化に取り入れていないからである。精度向上には、これらの要因のモデル化が必要である。なお、実験において明白な主鉄筋のはらみだしは見られなかったものの、横方向への膨らみは徐々に進展していく現象であり、急激に座屈するものではない。従って、鉄筋の大変形時の挙動も精度向上のためにモデル化されなければならない要因として挙げることができる。

また、実験と同じ条件で偏心直交方向への水平力载荷が終了した後、軸力を取り除いて偏心方向に水平力を加える解析も行った。図-6 に示すように、若干耐力を高めに評価しているが、解析でも同様に、安定的な曲げ応答性状を有しており、十分な残存安全性能を備えている。耐力を高めに評価している理由として、かぶりコンクリートの剥離が挙げられる。鉄筋とコンクリートの付着を考慮した構成則に基づき解析を行っているのに対し、実験では既に偏心直交方向への载荷により、かぶりが剥離しており、これが両者の差異となって現れている。

なお本解析は、変形の自由度を曲げ主体に対して力学的観点から低減させたものであるため、実験で目視されるひび割れやかぶりコンクリートの損傷状態などと、解析において算定される物理量とを対応付けることが、必ずしも容易ではない。これに対しては、著者らは別途、自由度の縮退を考慮せず、3次元空間に導入されるあらゆるひび割れと圧縮塑性・破壊を陽に取り扱う解析法を提案している。実験における局所的なひび割れ分布や鉄筋の状態などは、完全3次元非線形解析結果との照合で検討を行っている。

以上より、定性的な非線形挙動に対しては、おおむね解析結果と実験結果は良好に符号しており、解析的に実現現象のメカニズムを考察できるものと判断した。また、解析と実現現象の差異から、考慮されていない構成モデルを逆に考察することも可能である。加力と直交方向に変形が蓄積されていく現象の非線形性を解明するために、水平载荷の同一振幅での繰り返し回数を4回とした解析と、偏心軸力を作用させない状態で水平力を $+8\delta y$ ま

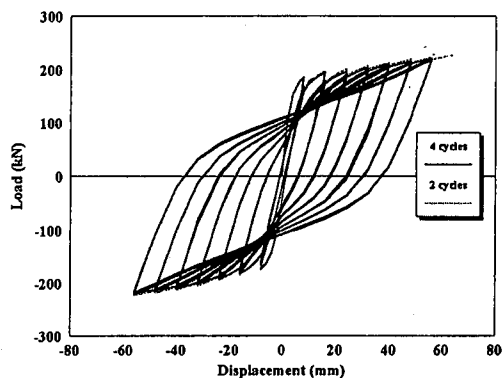


図-11 水平载荷方向荷重-変位関係(繰り返し4回)

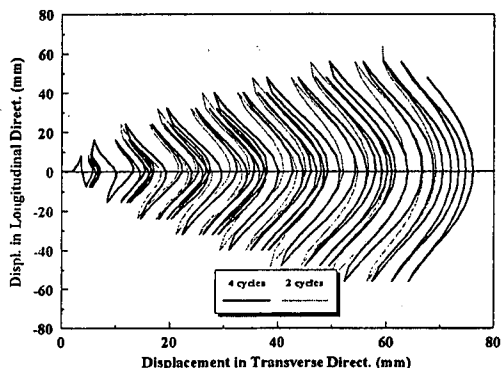


図-12 偏心方向-水平载荷方向変位関係(繰り返し4回)

で加えた後、偏心軸力を作用させる解析を行い、それぞれのひずみ履歴と応力分布を調べることとした。

### (3) 比較解析の結果と考察

水平载荷の同一振幅での繰り返し回数を4回として行った解析結果を、繰り返し回数2回の場合の結果とあわせて、図-11～図-12に示した。繰り返し回数を増加させても、水平载荷方向での荷重-変位関係には変化が見られない(図-11)。

ところが、偏心方向への変形は、繰り返し回数が増加するに従って随時蓄積されていくことが分かる(図-12)。3回以上の繰り返し回数に応じて変形が進展していく現象は、図心位置に軸力が作用するRC柱では解析上起こらない。材料レベルでの繰り返し劣化モデルを考慮しなくとも、構造物レベルで繰り返し载荷の影響が出るのである。これは、構造物を構成している異なる非線形履歴経路を有する材料特性が組み合わせることによってもたらされる。この解析結果は、実験より得られた現象の機構解明に向け、1つのヒントとなる。ただし、繰り返し回数の影響についての具体的な



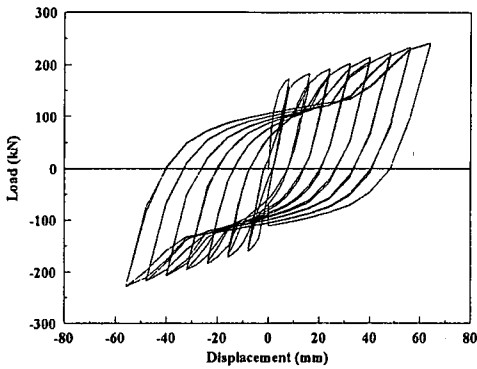


図-13 水平載荷方向荷重-変位関係(水平力のみ)

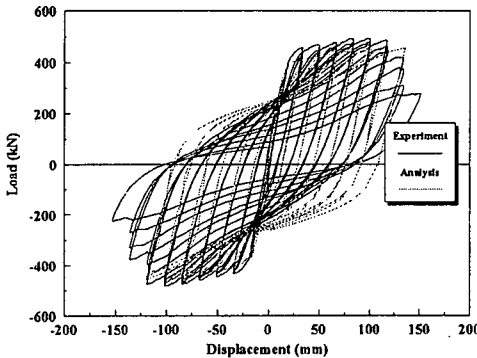


図-14 図心軸力作用柱の荷重-変位関係<sup>21)</sup>

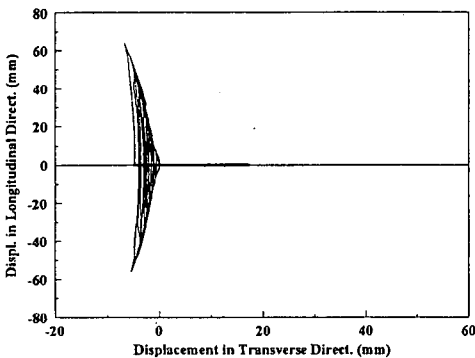


図-15 偏心方向変位-水平載荷方向変位関係  
(水平力のみ→偏心軸力載荷)

考察は、次節において、偏心方向への残留変形発生機構に関する考察とあわせて行う。

次に、偏心軸力を作用させない状態で水平力を正負交番で $+8\delta y$ まで加えた後、偏心軸力を加える解析を行った。載荷経路の違いが構造物全体の挙動に及ぼす影響を評価するためである。また同時に、偏心軸力と水平載荷を個別に独立照査することを意識したのもでもある。図-13に示したように、偏心軸力を加えない状態で水平力を加えると、水平載荷方向での復元力特性が、主鉄筋降伏以後

に逆 S 型のループを示した。通常、図心位置に軸力が作用する RC 柱の荷重-変位関係も逆 S 型のループを示す。本実験とほぼ同じ諸元を有する RC 柱の実験でも、このことが確認されている<sup>21)</sup>。この実験結果と参考までに行った解析結果を図-14に併せて示す。

これは、曲げ圧縮力が主に鉄筋によって負担される状況が発生するからである。両方向の鉄筋が交番繰り返し載荷により、開口ひびわれ部において局部的に鉄筋が高塑性化される。その結果、荷重が小さい場合には、貫通曲げひびわれが、全断面にわたって浮き上がり、鉄筋のみで曲げに抵抗する形態をとる。この時、部材の剛性も小さい。さらに相対的に大きな強制変位を受け、ひびわれ部のコンクリートが接触するようになると、圧縮力をコンクリートでも受け持つようになり、剛性が急激に上昇する。これが、逆 S 型復元力特性を示す解析結果の概要である。図心位置に軸力が作用する RC 柱<sup>21)</sup>でも同様のことが言える。

ところが、偏心軸力が作用する RC 柱では、偏心モーメントの存在により、常にいずれかの縁でひびわれたコンクリートが接触している。そのため、曲げ圧縮力をすべて鉄筋で受け持つ状況は、解析においても発生しておらず、一部でもコンクリートが負担に寄与している。その結果、図-13と図-4を比較すれば明らかなように、偏心直交方向の荷重-変位関係は紡錘型のループを示し、優れたエネルギー吸収を発揮している。

偏心方向への変形を見てみると、水平力のみを作用させると RC 柱は負側へ変形した後、偏心軸力を作用させた段階で正側へ変形する(図-15)。しかし、この値は極めて小さく、図-5-1と比較すれば $1/3$ 以下である。偏心軸力を作用させずに水平力を加えると、非対称配筋であるため、鉄筋量の少ない端部から降伏が開始される。そのため、偏心負方向へ断面曲率を持ち、図-15に見られる変形経路をたどる。水平曲げ載荷を付加したのみでは、側方筋の大部分は降伏しない。同時載荷では、逆に全側方筋は降伏していたこととは極めて対照的である。載荷経路の違いが構造物を構成している材料の塑性や応力・ひずみに大きく影響することを明確に示すものである。

#### (4) 機構の考察と検証

偏心 RC 橋脚に対して、偏心直交方向に正負交番で水平力を加えると、偏心方向に変形が非可逆的に進展していく。この現象は、曲げによる引張/圧縮と偏心軸力による引張/圧縮が、相互作用を呈



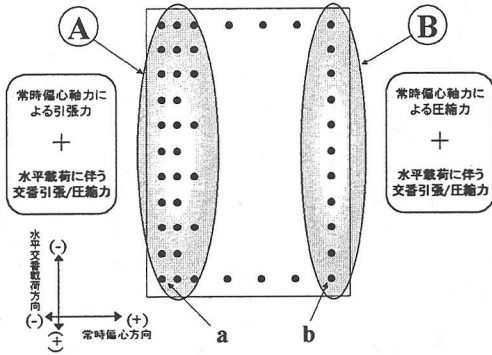


図-16 柱断面基部の鉄筋群

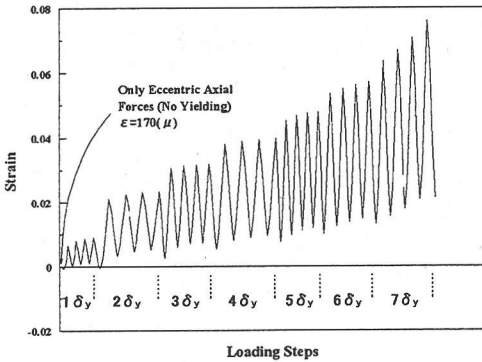


図-17-1 柱断面基部 a 点の鉄筋ひずみ履歴

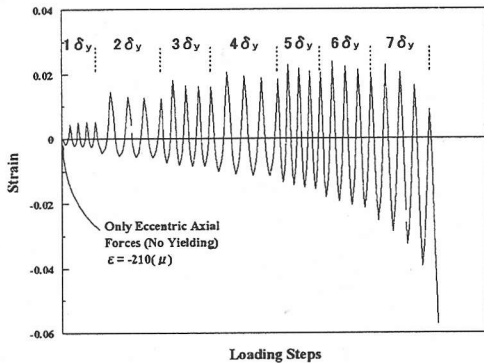


図-17-2 柱断面基部 b 点の鉄筋ひずみ履歴

しながら加わることと密接に関連していることが解析より分かった。以下に、実験と解析から得られた機構についての考察を述べる。

常時偏心モーメントにより引張力を受ける鉄筋群に着目する(図-16 の A)。偏心モーメントのみ加わる場合には降伏しない。ここに偏心直交方向に水平力を受けると、A 群の一部は曲げ圧縮され、また一部は更に引張を受ける。その結果、偏心モーメントを支える引張側の鉄筋の一部は、強制的に塑性変形を受ける。従って、直交水平力により

引き延ばされた鉄筋群は、偏心方向に回転を生むことになる。

図-16 B 群の、偏心モーメントにより一様に圧縮力を受ける鉄筋群でも、同様に更に圧縮される鉄筋と引張られる鉄筋が存在する。直交水平力により引張塑性を受けた鉄筋に偏心モーメントによる圧縮力が作用しても、コンクリートのひびわれ面が接触するまでは B 群の鉄筋のみで圧縮力を受け持つことになり、剛性は相当に小さい。

以上より、偏心直交方向に水平力を受けると、偏心モーメントのみでは降伏しない鉄筋がほとんどすべて塑性履歴を受けることとなり、それが偏心方向の断面剛性を著しく低下させることが解析的に示された。

繰り返し回数を 4 回とした解析での、図-16 における代表的な 2 点 a, b の鉄筋の平均ひずみ履歴を図-17-1, 17-2 に示す。各鉄筋に発生するひずみ(絶対値)は、同一振幅であっても漸増している。そのため、繰り返し回数の増加にともなって、偏心方向への変形が蓄積されていく。偏心モーメントが作用しない場合には、このような履歴は一般には見られない。

B 群の鉄筋は、直交水平力により強制的に引張塑性を受けた後、水平力がゼロに戻る段階で偏心モーメントにより圧縮塑性を経験する。その結果、図-18-1~図-18-8 にある通り、コンクリートの圧縮力を受け持つ領域は漸減していく。そのために A 群の鉄筋ひずみ履歴にも影響が及び、ひいては直交水平加力時に発生するひずみも偏心モーメントの影響が現れる。この相乗効果により、鉄筋の塑性変形はなかなか収束に至らず、コンクリートが 2 方向に曲げを受けた際に圧縮を受け持つ領域も漸減する結果をもたらす。なお、図-18-1~図-18-8 は、1~4 回目までの橋軸方向 $\pm 2\delta y$  サイクルにおける、最大変位時の柱基部コンクリート応力の分布状態を鉄筋位置とともに示している。 $\pm 2\delta y$  以外の他の水平載荷サイクルにおいても同様の傾向を示している。また、柱断面中央部において環状の応力分布が見られるのは、断面隅角部に応力流れが生じた名残である。曲げ載荷時には、圧縮応力は、載荷方向に一様には分布せず、矩形断面の隅角部に向かって流れを生じる。

図-5-1, 5-2, 12, 15 のように、偏心方向-水平載荷方向の変形関係は、弓形で進行していく現象が見られる。作用水平力が小さい場合に偏心方向の変位が大きくなり、水平力が大きい場合に偏心方向の変位が小さくなる。これは、偏心モーメントと直交水平力との組み合わせによって、塑性

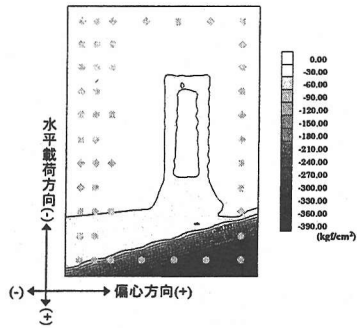


図-18-1  $+2\delta y(1)$ のコンクリート応力分布

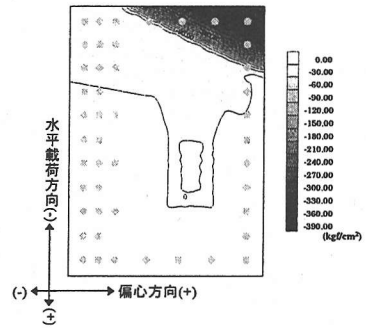


図-18-5  $-2\delta y(1)$ のコンクリート応力分布

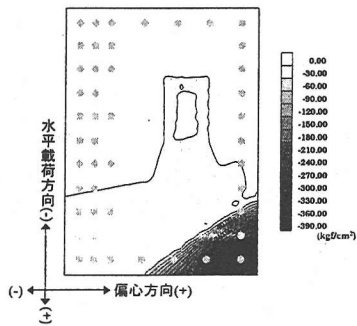


図-18-2  $+2\delta y(2)$ のコンクリート応力分布

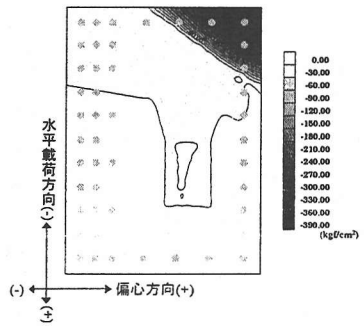


図-18-6  $-2\delta y(2)$ のコンクリート応力分布

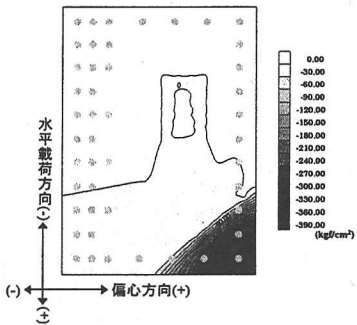


図-18-3  $+2\delta y(3)$ のコンクリート応力分布

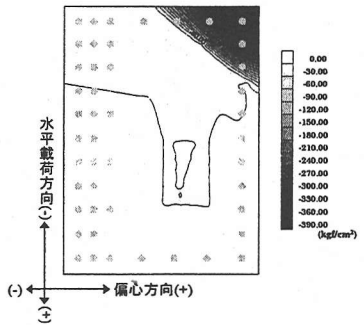


図-18-7  $-2\delta y(3)$ のコンクリート応力分布

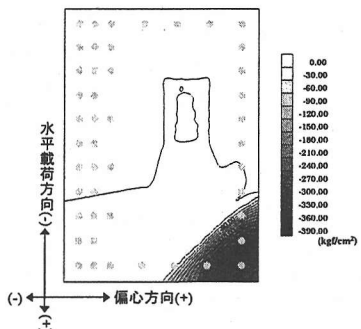


図-18-4  $+2\delta y(4)$ のコンクリート応力分布

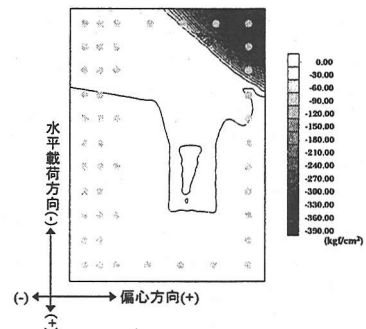


図-18-8  $-2\delta y(4)$ のコンクリート応力分布

化される鉄筋位置と密接に関連する。

直交水平力が大きく作用した際には、偏心モーメントにより圧縮側にあった B 群の鉄筋の大部分は、引張側に転ずる。この鉄筋が大きくなることにより、偏心モーメント方向の曲率が小さくなる。そのために、水平力が大きい場合に偏心方向の変位が小さくなる。

ここで、水平力をゼロ付近に戻すと、大部分が引張側にあった B 群の鉄筋が、すべて圧縮側に戻される。その鉄筋が縮むことによって、偏心モーメント方向の曲率が大きくなるのである。その結果、偏心方向の変位が大きくなる。

水平力が逆方向に進展した場合にも、同様の現象が反対方向に起き、偏心方向の変位が小さくなる。弓形の履歴を呈するのは、以上の理由からである。

偏心 RC 橋脚では、降伏レベルを超えて、偏心直交方向に繰り返し入力を受けると、偏心方向に変形が蓄積されていく現象が明らかとなった。実際の地震動入力時に、構造物は多方向入力による相乗効果を受ける。多方向入力時には、曲げ破壊先行型の偏心モーメントが作用しない RC 橋脚でも、1 方向の入力から算出される計算値より、最大応答値および残留変位が大きくなるのが 3 次元応答解析からも示されている<sup>15)</sup>。特に残留変位に着目した、多方向入力下での偏心 RC 橋脚の動的挙動について検討する必要があるが、この問題については、次報に譲る。

#### 4. 残留変位照査法

兵庫県南部地震以降、希にしか起こらない非常に大きなレベルⅡ地震動に対して、RC 橋脚は靱性設計を行う重要性が再認識された。一方、重要度の高い構造物の残留変位を制御する必要性もまた明確となった。RC 橋脚を設計・照査する場合、一般に橋軸と橋軸直角の 2 方向に分けて、それぞれ独立に耐震性能を照査している。この手法では多方向入力による相互作用を本来考慮することが難しい。本研究で対象とした非対称な構造諸元で偏心荷重が作用するような場合には直交 2 方向に分けた個別照査は難しく、特に残留変位の評価では、合理性を主張することは難しいと思われる。なぜならば、常時の偏心軸力のみでは約 30[mm]程度の変位が生じるのに対し(図-5-2)、偏心軸力を受けた状態で直交方向に交番曲げ载荷を受けると 120[mm]もの残留変位を生じるからである。1 オーダーの異なる残留変位は、2 方向に分けた個別照査

では、直接導出することができない。むしろ Fiber Model などに基づく 3 次元動的解析の利点を生かした、3 次元形状と入力をそのまま用いる性能照査は、等価な 2 次元モデルに置き換える必要がない。性能照査は一般に自動化が可能であり、現在では骨組みの 3 次元動的非線形解析も特に難しいものではなくなっている。ただし、性能照査をパスする構造物の諸元の決定や使用材料の決定を行うレベルでは、設計者の個性と選択の自由度を優先することが大切であり、設計における「意思決定」のレベルでの自動化は性能設計の目指すところでは決していない。

多方向入力を受ける RC 橋脚の動的非線形応答の精度向上に向け、橋桁と橋脚間の支承のモデル化、連続する複数本の橋脚での連成効果、地盤と杭との相互作用をも考慮に入れた動的解析手法を今後、確立する必要がある。鉄筋座屈後の繰り返し特性は、多方向入力下での残留応答解析の精度向上に欠かせない要素であることが再確認された。

#### 5. まとめ

偏心軸力が作用する RC 橋脚に対し、偏心軸力よりもたらされるモーメントと直交方向に正負交番で水平力を静的に加えると、偏心軸力によるモーメントが作用する方向に残留変位が蓄積されていく現象が実験により明らかとなった。さらに、Fiber Model に基づく 3 次元解析で機構を説明することができた。また、感度解析の実施により、載荷繰り返し回数を増加させるに依り、加力と直交方向の残留変形も漸増することが示された。

偏心軸力が作用する RC 橋脚の残留変位を評価する際には、直交 2 方向の主軸を独立に評価し足しあわせるという検討では非線形挙動を精度良く追跡することは困難であり、合理性を主張することは難しい。3 次元形状と入力をそのまま用いた性能照査の方が、等価な 2 次元モデルに置き換える必要もなく合理的である。

本研究で使用した Fiber Model に基づく 3 次元立体骨組み解析法は、かぶりコンクリートの剥離や主鉄筋の座屈といった構造物の終局時のモデル化に課題を残しているものの、RC 橋脚の耐力および(残留)変位の算出にあたり妥当な解析精度が得られていることも、実験結果と解析結果を比較することにより実証することができた。現在モデル化できていない上記の要因は、寸法の大きい実構造物ではその影響度が相対的に小さくなることから、当面は応答を過小評価することを念頭におくこと

で解析結果を評価できると考えられる。

**謝辞**：実験および解析的検討を行うにあたり、適切な御助言を頂いた「首都高速道路の橋梁に関する調査研究コンクリート構造物分科会」の委員各位、ならびに岡村甫高知工科大学副学長に深く感謝いたします。また、積極的に議論に参加頂いた東京大学大学院生阿部哲子嬢にも感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 林秀侃, 幸左賢二, 山村清, 中田恒和, 谷沢公樹: RC 橋脚の残留変形に関する検討, 「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集, pp.69-76, 1997.4.
- 2) 川島一彦, 運上茂樹, 長島博之, 飯田寛之, 向秀毅: RC 橋脚の動的耐力に関する実験的研究(その 5) 偏心曲げを受ける RC 橋脚の動的耐力・変形性能, 土木研究所資料第 3319 号, 1995.1.
- 3) Tsuchiya, S., Salem, H. and Maekawa, K.: Nonlinear Seismic Response of RC Piers Subjected to Eccentric Axial Forces, Proc. of the Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Vol. 1, pp.549-554, Jan. 1998.
- 4) コンクリート標準示方書「耐震設計編」, 土木学会, 1996.7.
- 5) 前川宏一, 岸利治, 岡村甫: セメント・コンクリートの要求性能と設計法の変遷, セメント・コンクリート, No.594, pp.2-9, 1996.8.
- 6) 前川宏一, 宮本幸始: 土木構造物における性能照査型基準の方向, コンクリート工学, Vol.35, No.11, pp.14-18, 1997.11.
- 7) Okamura, H., Maekawa, K. and Kim, I. H.: Next-Generation Design Method of Concrete Structure Concrete under Severe Condition2, -Environment and Loading-, Vol.1, pp.3-16, 1998.6.
- 8) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 社団法人日本道路協会, 1996.12.
- 9) 小坂寛巳, 小笠原政文, 津野和宏, 市川衡, 福田暁: ねじりモーメントが作用する RC 橋脚の耐震性能確認実験, 第 1 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 1998.1.
- 10) 三島徹也, 山田一字, 前川宏一: 正負交番載荷下における鉄筋コンクリートひびわれ面の局所的挙動, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.161-170, 1992.2.
- 11) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成測, 技報堂出版, 1991.5.
- 12) Irawan, P. and Maekawa, K.: Path-Dependent Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells, Proc. of JSCE, No.557/V-34, pp.121-134, 1997.2.
- 13) Hauke, B. and Maekawa, K.: Strengthen of RC Columns - A Three Dimensional Computation Approach, Proc. of the Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Vol. 3, pp.2105-2110, Jan. 1998.
- 14) Hauke, B. and Maekawa, K.: Three-Dimensional RC-Model with Multi-directional Cracking, Computational modelling of concrete structures, Balkema, Rotterdam and Brookfield, pp.93-102, 1998.
- 15) 土屋智史, 福浦尚之, 前川宏一: Fiber Model を用いた 3 次元有限要素動的解析による多方向入力を受ける RC 橋脚の応答, 「塑性域の繰返し劣化性状」に関するシンポジウム論文集, pp.359-368, 1998.8.
- 16) 前川宏一, 岡村甫: 弾塑性破壊モデルに基づくコンクリートの平面応力構成則, コンクリート工学論文 No.83.5-1, pp.87-99, 1983.5.
- 17) 出雲淳一, 申鉉穆, 前川宏一, 岡村甫: 正負繰返し応力下における RC 板要素の解析モデル, 土木学会論文集, No.408/V-11, pp.51-60, 1989.8.
- 18) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Proc. of JSCE, No.564/V-35, pp.297-316, 1997.5.
- 19) 福浦尚之, 前川宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5.
- 20) 土屋智史, 小笠原政文, 市川衡, 細田暁: 偏心軸力が作用する RC 橋脚の非線形解析, 第 53 回年次学術講演会講演概要集, V-516, pp.1032-1033, 1998.10.
- 21) 小坂寛巳, 小笠原政文, 佐々木一哉, 津野和宏, 渡辺英夫, 田中樹由, 坂田英一: 横拘束筋の定着方法の相違による RC 橋脚の耐震性能の確認実験, 「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集, pp. 87-96, 1997.4.
- 22) 前川宏一, 土屋智史, 福浦尚之: 鉄筋コンクリートの非線形解析の現状と耐震性能照査法の構築に向けた今後の取り組み, 第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 1998.11.
- 23) 須田久美子, 村山八洲雄, 一宮利通, 新保弘: 交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16/2, pp.467-472, 1994.
- 24) 睦好宏史, 町田篤彦, 鶴田和久: ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリート部材の動的非線形形変応答解析, 土木学会論文集, No.366/V-4, pp.113-122, 1986.2.

(1999. 5. 24 受付)

## MULTI-AXIS FLEXURE BEHAVIOR AND NONLINEAR ANALYSIS OF RC COLUMNS SUBJECTED TO ECCENTRIC AXIAL FORCES

Satoshi TSUCHIYA, Masafumi OGASAWARA, Kazuhiro TSUNO,  
Hitoshi ICHIKAWA and Koichi MAEKAWA

It has been observed that RC column subjected to reversed cyclic loading in orthogonal direction to eccentric moment accumulates large deformation in the direction of eccentric permanent moment through experimental work. This deformation exceeded the allowable value in design code. Analytical investigation based on 3D-fiber model has been performed to grasp the mechanism of this matter. It is verified that this behavior derives from advanced strain hardening of steel by eccentric axial forces and strongly relates to complex nonsymmetrical loading pass. This fact indicates 3D-dimensional approach is inevitable to check the residual displacement of RC piers. Moreover, it is also suggested the present design method can't possess accurate predictive value for seismic performance.