

ファイバーモデルによるRC橋脚交番載荷解析

大阪第一建設部
神戸線復旧建設部 工事課
工務部 設計課

前川 義男
幸左 賢二
西岡 勉

要 約

RC橋脚の地震時の荷重変形挙動を評価するために、1/3スケールの試験体を用いた交番載荷実験を行った。本実験にあわせて、ファイバーモデルを採用したRC非線形解析プログラムを用いて実験のシミュレーション解析を実施した。ファイバーモデルは、一般に曲げが卓越したRC骨組構造物の解析モデルとして高い適用性があり、本論文で報告する解析モデルでは、基部に鉄筋の抜け出しと基礎の剛性を評価するための非線形回転バネ（武藤モデル）と線形回転バネを設定した。その結果、解析した結果と実験結果との良い一致が得られた。

キーワード：RC、ファイバーモデル、非線形、鉄筋抜け出し

まえがき

都市内の高架道路の橋脚は、用地の制約などから通常の橋脚に比べて高強度、多段配筋構造となっており、変位じん性率の変化や柱筋抜け出し量の増加などが懸念される。

そこで、できるだけ実橋脚の配筋を詳細に模擬した大型柱基部破壊型試験体（1/3縮尺）と同鉄筋比の小型試験体（1/10縮尺）に対する正負交番載荷実験を実施し、これらの影響を定量的に評価した。その結果、大型試験体の変位じん性率は5.5と、小型試験体とほぼ同じであり顕著な低下は認められなかったが、柱筋の抜け出し量は多段配筋の影響により小型試験体の約3倍の値となり、実橋レベルでも柱筋抜け出しの影響が比較的大きいことが明らかとなった。

そこで、正負交番載荷時の柱筋抜け出し解析により得られたモーメント-回転角の関係を用いて、柱筋抜け出しの影響を非線形の回転バネとし

て考慮したRC非線形解析を実施した。

1 実験概要

実験対象とした橋脚の主要諸元は以下の通りである。

上部工形式：3径間連続鋼桁（ $3 \times 35.0 = 105.0\text{m}$ 、2脚固定形式）

下部工形式：鉄筋コンクリートT型橋脚（固定橋脚）

橋脚全高：16.0m（柱高：13.0m）

柱断面寸法：3.0m（橋軸方向） \times 3.5m（橋軸直角方向）

使用材料：コンクリート $\alpha_{ck} = 270$ (kgf/cm²)

鉄筋 $\alpha_{sy} = 3500$ (kgf/cm²)

試験体は、1/10縮尺モデル（No.1試験体）、1/3縮尺モデル（段落し無し、No.2試験体）および1/3縮尺モデル（段落し有り、No.3試験体）の3

つである。図-1に今回解析対象としたNo.2試験体の概要を示した。荷重は橋軸方向に水平荷重を、加力位置を橋脚天端として、押し引きジャッキで交番加力した。弾性域で荷重制御、塑性域で変位制御を行い、鉄筋初期降伏変位 (δy) を1振幅として、5振幅まで、各振幅10サイクルの交番加力を行った。軸力はPC鋼棒を介してジャッキにより実験中一定の力を導入した。導入軸応力度は $15.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ である。

2 解析概要

(1) 解析方法

構造解析は梁理論に基づくフレーム解析で行い、梁要素のモデル化には断面をファイバーと呼ばれる線素に分けるファイバーモデルを採用した。ファイバーモデルは1970年代後半にその解析手法が提案され^{1) 2) 3)}、1980年代には汎用プログラムも発表されている。

山田らは仮動的実験の復元力特性算定にファイバーモデルを用いて、非線形動的解析プログラムを開発している⁴⁾。

ファイバーモデルは、物性の一軸特性のみを評価、断面の平面保持を仮定する方法で、コンクリートと鉄筋の付着効果を評価できない、せん断の非線形特性を評価できない、といった限界を有しているが、曲げが卓越したRC骨組構造物には高い適用性がある。またコンクリートと鉄筋の付着効果を評価した報告や、せん断の非線形特性を評価した報告もあり、有限要素法とフレーム解析の利点を併せ持った解析手法である。以下に1計算ステップ内での解析手順を略述する。

- 1) 前ステップで求められた剛性を用いて解析を行い、得られた断面力を用いて、要素内で軸力が一定、曲げモーメントが一次変化する、と仮定して断面でのひずみ分布 (軸ひずみと曲率) を算定する。
- 2) 各ファイバーでのひずみを算定し、履歴ルールに従って各ファイバーでの接線剛性を算出する。

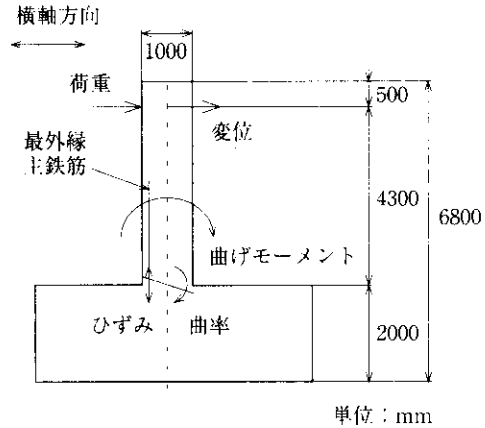


図-1 試験体概要 (No.2試験体)

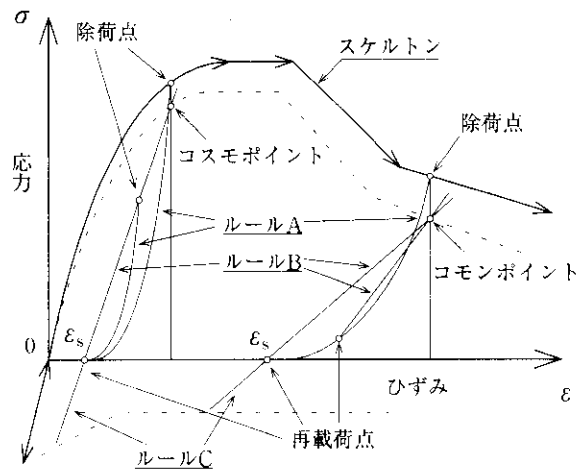


図-2 コンクリート履歴モデル

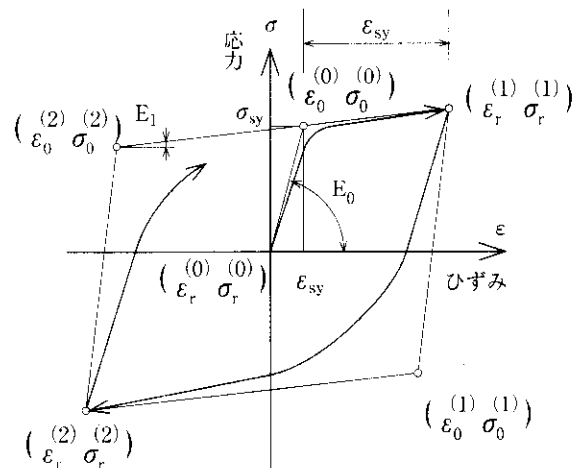


図-3 鉄筋履歴モデル

$$\sigma^* = b \cdot \varepsilon^* + \frac{(1-b) \varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^* R)^R}$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r}$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$$

$$b = \frac{E_1}{E_0}$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \cdot \xi}{a_2 \cdot \xi}$$

- 3) 各ファイバーの剛性を積分して断面の剛性を算定する。
- 4) 要素長に添って断面の剛性を積分することで、最終的な要素剛性を算定し、求められた劣化剛性を用いて次ステップの解析へ進む。

(2) コンクリート、鉄筋の応力-ひずみ履歴モデル

コンクリートの応力-ひずみ履歴モデルには、図-2に示した履歴モデル（六車・渡部のルールを一部改良）を採用した。この履歴モデルは、コンクリートの拘束レベル、引張り破壊、塑性ひずみ、圧縮破壊、剛性劣化等を表現することができる。スケルトン引張域では直線、圧縮域では2次曲線-直線（水平）-直線-直線の5つの部分から成る。

鉄筋の応力-ひずみ履歴モデルには、図-3に示したGMPモデルを採用した。この履歴モデルでは、応力がひずみの関数として陽に与えられており、実用性に優れているとともに、多くの研究報告でその有効性が報告されているモデルである。このモデルでは、パウシンガー効果、塑性ひずみ、等方硬化等を表現することができる。図に示したパラメータの中で、パウシンガー効果を評価するパラメータ R_0 の値は、20.0が推奨されている。

3 実験シミュレーション解析

(1) 解析条件

図-4に解析モデルの概要を示した。柱基部に基礎の剛性をモデル化した線形の回転バネ($2.2 \times 10^5 \text{ tfm/rad}$)と鉄筋の抜け出しをモデル化した非線形の回転バネを入れた。非線形の回転バネには武藤の履歴ルールを採用した。それぞれバネ値は

実験で得られた荷重-変位曲線の初期勾配が解析結果と一致するように設定した。解析モデルは、高さ4.3m、断面1.0m×1.167mの矩形断面を有する柱構造である。要素分割は図-4に示す通りで、要素数19、節点数20とした。柱下端から1.0mの範囲を非線形要素(10要素)でモデル化した。断面のモデル化の概要を図-5に示した。断面のファイバ-分割数は50とした。鉄筋は3段複鉄筋で側鉄筋

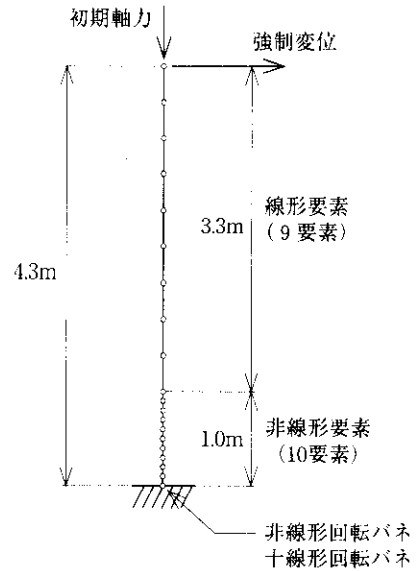


図-4 解析モデル

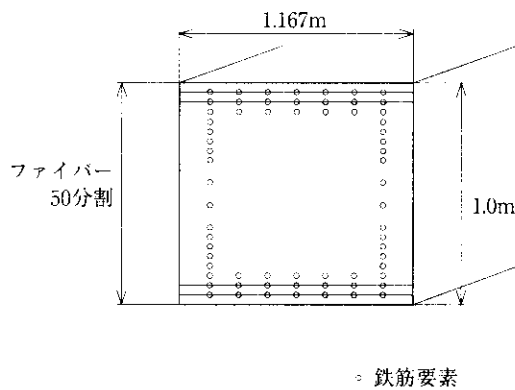


図-5 断面のモデル化

表-1 物性値一覧

コンクリート		鉄筋		基部非線形回転バネ	
初期ヤング率	$2.83 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$	初期ヤング率	$2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$	第一勾配	$4.7 \times 10^5 \text{ tf} \cdot \text{m/rad}$
降伏強度	2830.0 tf/m^2	降伏強度	38300.0 tf/m^2	第二勾配	$2.1 \times 10^5 \text{ tf} \cdot \text{m/rad}$
降伏ひずみ	2000×10^{-6}	第二勾配	$4.2 \times 10^5 \text{ tf/m}^2$	第三勾配	$1.8 \times 10^3 \text{ tf} \cdot \text{m/rad}$
引張強度	24.0 tf/m^2	全断面積	0.0266 m^2	第一変曲点	$6 \times 10^{-4} \text{ rad}$
				第二変曲点	$1.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$

12段を全てモデル化した。主な物性値を表-1にまとめた。鉄筋の第2勾配は初期勾配の2%とした。なお、鉄筋履歴モデルでのパラメータ R_0 の値は、別途パラメータスタディーを行い $R_0=10.0$ とした。

(2) 交番加力解析結果

実験同様に 15.4kgf/cm^2 の初期軸力を与えた状態で、図-6に示した繰り返しの強制変位を載荷点に与えた。鉄筋初期降伏変位(δy)を 2.6cm として、 $5\delta y$ までの交番载荷を行った。解析では自動荷重変位制御を行っていることから、全解析ステップ数は320ステップであった。

以下に荷重-変位曲線、曲げモーメント-曲率関係、荷重-軸ひずみ関係、鉄筋の抜け出しについて解析結果と実験結果との比較を示した。

(a) 荷重-変位曲線

図-7に強制変位を載荷した橋脚天端における荷重-変位曲線を示す。実験では各振幅で10サイクルの繰り返しを行ったが、図-7には各振幅における最初のサイクルでの荷重-変位曲線を示す。

(b) 曲げモーメント-曲率関係

図-8に試験体基部断面における曲げモーメント-曲率関係を示す。実験では $2\delta y$ (第2振幅)までの結果が離散的に得られており、ここでは第2振幅までの各サイクルの様子を示した。解析結果は第3振幅前半までを表示した。

(c) 荷重-軸ひずみ関係

図-9に試験体基部断面における荷重と初期引張側最外縁鉄筋の軸ひずみの関係を示す。

この値も実験では $2\delta y$ (第2振幅)までの結果が離散的に得られており、ここでは第2振幅ま

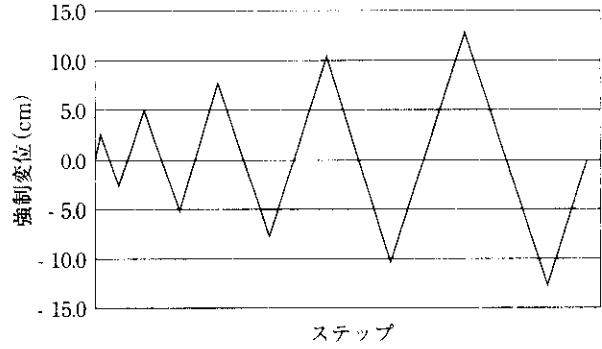


図-6 ステップ別強制変位時刻歴

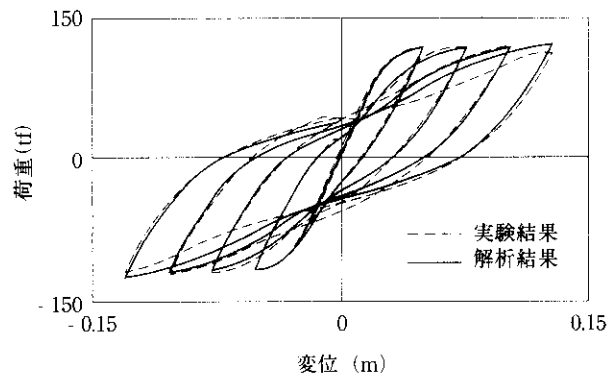


図-7 載荷点での荷重-変位曲線

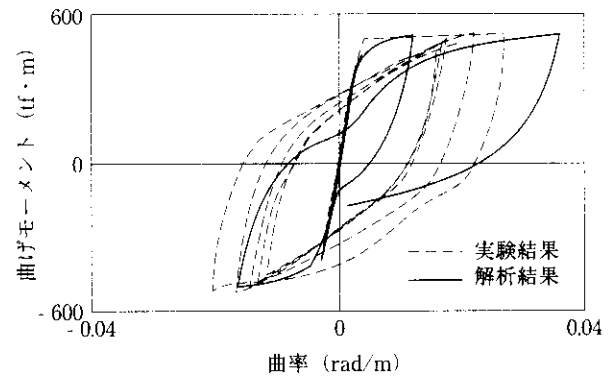


図-8 基部での曲げモーメントと曲率の関係

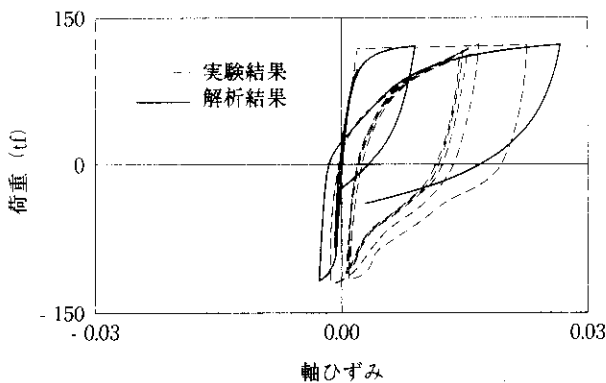


図-9 基部での荷重と軸ひずみの関係

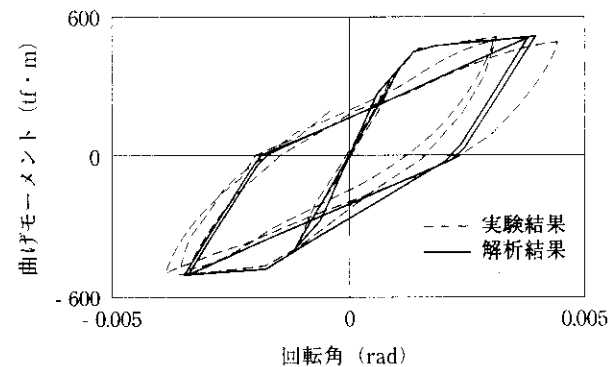


図-10 曲げモーメントと回転角の関係

での各サイクルの様子を示した。解析結果は第3振幅前半までを表示した。

(d) 鉄筋の抜け出し

図-10に鉄筋の抜け出しをモデル化した非線形回転バネの曲げモーメントと回転角の関係を示した。実験値は3 δy （第3振幅）までの結果が離散的に得られており、ここでは第3振幅までの各サイクルの様子を示した。解析結果も第3振幅までを表示した。

4 考察

(1) 鉄筋の履歴ルールに関する検討

今回採用した鉄筋の履歴ルールには数種のパラメータがある。本報告では履歴のエネルギー吸収量を規定するパラメータ R_0 に着目し、 $R_0=10.0$ として解析を行い、図-7に示したように実験結果との良い一致が得られた。これは、実験では各振幅で10サイクルの繰り返し載荷を行っており、このためのバウシinger効果が R_0 の低減に対応していると考えられる。

(2) 実験結果と解析結果の比較

載荷点での荷重-変位曲線は実験結果および解析結果において、比較的良い一致を示した。特に、第4振幅までは良く一致している。第5振幅では実験で圧縮鉄筋の座屈等が起こり解析結果と異なっている。

基部での曲げモーメント-曲率関係では、第2振幅前半は解析結果の曲率が小さめであるが、第2振幅後半では実験結果と解析結果とは、良い一致を示している。第2振幅以降、実験値と解析値が一致していない理由としては、実験では曲げモーメントによる曲率測定が縦方向に連続していないこと、梁理論の解析仮定である断面内での平面保持が成り立っていないことなど、解析仮定と異なる要因がある。

基部での荷重-鉄筋ひずみ関係でも、第2振幅前半は解析結果の鉄筋ひずみが小さめである。実験結果では第2振幅前半に鉄筋ひずみにスリップが生じており、その後のサイクルで鉄筋ひずみの

値が減少している。また、第2振幅後半以降圧縮ひずみが計測されていないことなど、計測結果は採用した解析仮定では表現できない現象を示している。

鉄筋の抜け出しでは、実験結果と解析結果で良い一致を示した。本報告では、鉄筋の抜け出しをモデル化した非線形の回転バネのスケルトン（トリリニア）に実験値から求めた値を採用したが、基本的な鉄筋の抜け出し挙動は武藤の履歴ルールによる非線形バネでモデル化が可能であることが示された。

(3) 要素分割依存性など

解析モデルでは、実験結果を参考にして下部1.0mの範囲を非線形要素としてモデル化し、解析結果でのコンクリートの塑性領域が実験結果と良い一致を示した。また、別途全要素を非線形要素とした解析を行い、今回の解析モデルによる結果と工学的に差の無いことを確認した。また今回の解析モデルおよび解析条件では顕著な軟化挙動は示さず、比較的安定した解が得られた。

要素分割に関しては下部1.0mの範囲を数要素から20要素程度に分割した解析を行って検討したが、得られた載荷点での荷重-変位曲線は工学的に差の無い結果が得られた。

あとがき

阪神高速道路公団の標準的なRC橋脚を対象とした大型試験体（1/3縮尺モデル）による交番載荷実験を、ファイバーモデルを採用したRC非線形解析プログラムを用いて実験シミュレーション解析を行った。鉄筋の履歴モデルパラメータを見直すとともに、解析モデル基部に鉄筋の抜け出しをモデル化した非線形回転バネを設定した。その解析結果は実験結果と良い一致を示した。今後は、本シミュレーション解析で得られた工学的知見を、耐震解析時に非線形特性を評価する簡易なモデル（M- ϕ モデル）等の提案に役立てていきたい。

参考文献

- [1] Ristic,D., Yamada,Y. and Iemura. H.;"Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads", Research Report No. 86-ST-01. School of Engineering, Kyoto University, March 1986.
- [2] Bazant, Z.P. and Bhat, P.D.; Prediction of Hysteresis of Reinforced Concrete Members", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, No. ST 1, pp. 153-167, January 1977.
- [3] Hays, C. O. and Santhanam, T. K. ; Inelastic Section Response by Tangent Stiffness", Journal of the Structural Division,ASCE, Vol. 105, No. ST7, pp. 1241-1259, July 1979.