

# 論文 RC 標準橋脚のファイバーモデルによる交番载荷実験 シミュレーション解析

右近八郎\*1、幸左賢二\*2、井上 晋\*3、吉澤義夫\*4

要旨：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、標準的なRC橋脚の交番载荷実験の強制変位による交番载荷シミュレーション解析を実施した。コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ履歴特性には、それぞれ六車・渡部モデルとGMP（Giuffrè-Menegotto-Pinto）モデルを採用した。鉄筋の履歴モデルのパラメータを見直し、解析モデル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と線形回転バネを設定することで、解析結果と実験結果との良い一致が得られた。

キーワード：交番载荷解析、ファイバーモデル、RC橋脚、鉄筋の抜け出し

## 1. はじめに

阪神高速道路公団の「RCのダクティリティに関する調査研究会」では、標準的なRC橋脚を対象として大型試験体（1/3縮尺モデル）による交番载荷実験を行った。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シミュレーション解析を実施した[1]。ファイバーモデルは、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るが[2]、本論文では、解析モデル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[3]）と線形回転バネを設定し、解析結果と実験結果との良い一致が得られた。

## 2. 実験概要

実験対象となった橋脚の主要諸元は以下のとおりである。

- ・ 上部工形式 : 3 径間連続版橋  
(3 × 35.0 = 105.0m、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)  
× 3.5m (橋軸直角方向)
- ・ 使用材料 : コンクリート 設計基準強度

$$\sigma_{CK} = 270 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{鉄筋降伏強度 } \sigma_{SY} = 3500 \text{ kgf/cm}^2$$

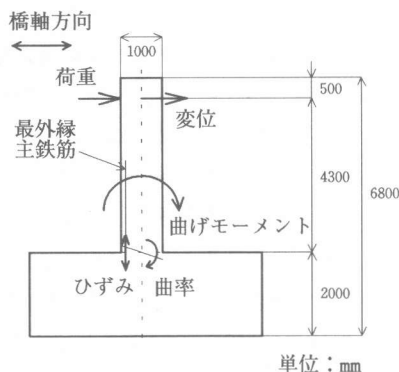


図-1 試験体概要 (No. 2試験体)

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 に今回解析対象となったNo.2試験体の概要と主な計測項目を示す。载荷は橋軸方向に水平荷重を、加力位置を橋脚天端位置として、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 ( $\delta_y$ ) 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 kgf/cm<sup>2</sup>である。

- \* 1 鹿島 情報システム部 工修 (正会員)
- \* 2 阪神高速道路公団 工務部 Ph.D. (正会員)
- \* 3 京都大学 土木工学教室 工修 (正会員)
- \* 4 建設技術研究所 (正会員)

### 3. 解析概要[4]

#### (1) 解析概要

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[5][6]、1980年代には汎用プログラムも発表されている[7]。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[8]。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、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[9]や、せん断の非線形特性を評価した報告[10]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であり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。
- 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に示す履歴モデル（六車・渡部モデルで除荷ルールを直線から2次曲線に変更）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、圧壊、圧縮破壊、剛性劣化などを表現することができる。スケルトンは引張り域では直線、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に示す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用性が報告されているモデルである。このモデルでは、バウシinger効果、塑性ひずみ、等方硬化などを表現することができる。図に示すパラメータの中で、バウシinger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。

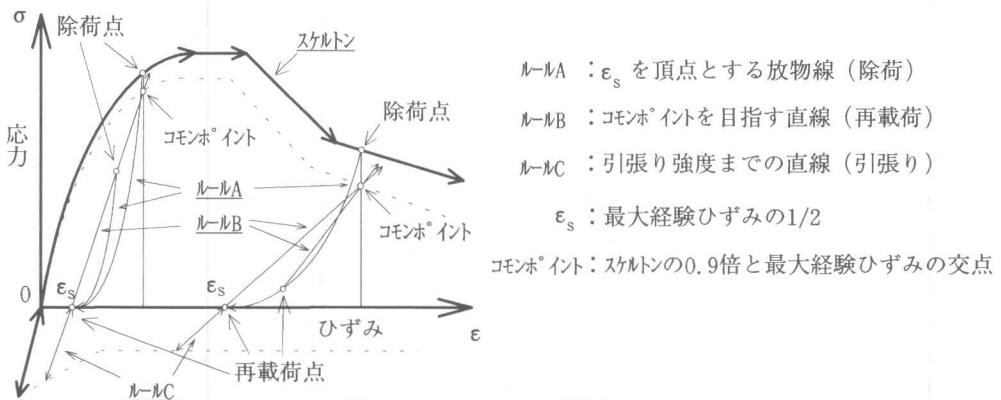
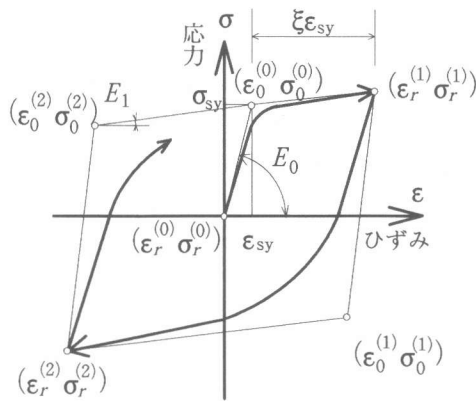


図-2 コンクリート履歴モデル



応力-ひずみ関係: 
$$\sigma^* = b \cdot \sigma^* + \frac{(1-b)\epsilon^*}{(1+\epsilon^*R)^{1/R}}$$

換算ひずみ: 
$$\epsilon^* = \frac{\epsilon - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r}$$

換算応力: 
$$\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$$

剛性比: 
$$b = \frac{E_1}{E_0}$$

パラメータ: 
$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$$

図-3 鉄筋履歴モデル

#### 4. 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す。柱基部に基礎の剛性をモデル化した線形の回転バネ ( $2.2 \times 10^5$  tf·m/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直列結合で入れた。非線形の回転バネには武藤の履歴ルールを採用した。それぞれの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。要素分割は図に示すとおりで、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。断面のファイバー分割数は50とした。鉄筋は3段複鉄筋で側鉄筋12段をすべてモデル化した。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。

表-1 物性一覧

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

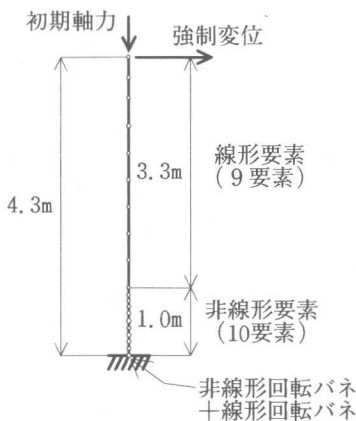


図-4 解析モデル

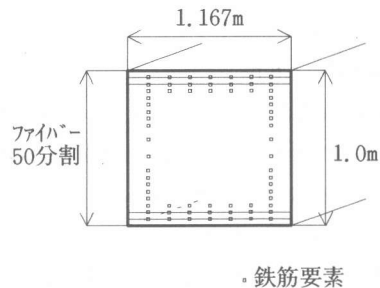


図-5 断面のモデル化

(2) 交番加力解析結果

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 ( $\delta_y$ ) を2.6cmとして、 $5\delta_y$ までの交番载荷を行った。実験同様に15.4kgf/cm<sup>2</sup>の初期軸力を与えた。解析では自動荷重変位制御[2]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(a) 荷重-変位曲線、(b) 曲げモーメント-曲率関係、(c) 荷重-軸ひずみ関係、(d) 鉄筋の抜け出し、について解析結果と実験結果の比較を示す。

(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-変位曲線を示した。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-変位曲線を示した。

(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-曲率関係を示した。実験では第2振幅 ( $2\delta_y$ ) 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。実験での曲率は橋脚側面のひずみ差を橋脚幅で割った値である。

(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り側最外縁鉄筋の軸ひずみの関係を示した。この値も実験では第2振幅 ( $2\delta_y$ ) 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。

(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。実験値は第3振幅 ( $3\delta_y$ ) 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。実験での回転角は主鉄筋の抜け出し量を橋脚幅で割った値である。

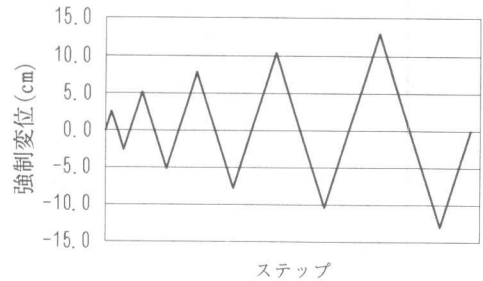


図-6 強制変位時刻歴

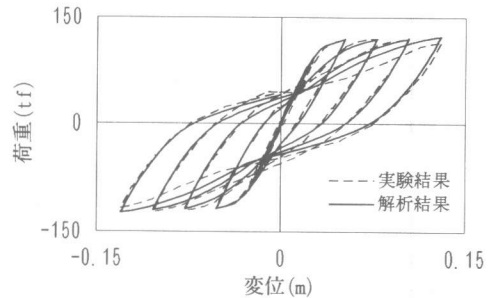


図-7 載荷点での荷重-変位曲線

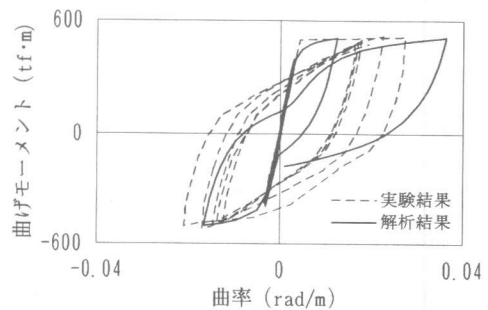


図-8 基部での曲げモーメント-曲率関係

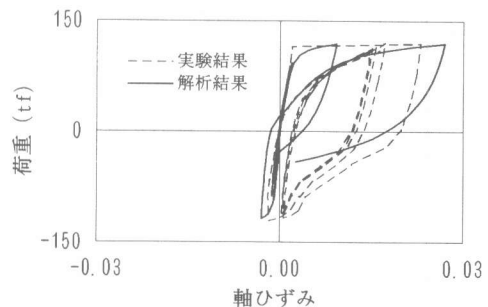


図-9 基部での荷重-軸ひずみ関係

## 5. 考察

以下の検討では、実験での荷重方法（鉄筋初期降伏変位  $\delta_y = 2.6\text{cm}$  を1振幅として、5振幅まで、各振幅で10サイクルの交番荷重）のとおり、「振幅」と「サイクル」を区別して使用している。

### (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剛性比  $b$  と、履歴のエネルギー吸収能を規定する  $R_0$  の2つのパラメータがある。 $b$  は耐力の漸近挙動に影響するのに対して、 $R_0$  は履歴挙動に大きな影響を与える。本報告では交番荷重による履歴挙動が主な検討項目で

あることから、 $R_0$  に着目し  $R_0 = 10.0$  として解析を行い、図-7に示す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荷重を行っており、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

荷重点での荷重-変位曲線は実験結果と解析結果で良い一致を示した。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など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で良い一致を示している。しかし、実験では曲げモーメントによる曲率が縦方向に連続していないので、計測位置がクラックを含むかどうかで計測値が大きく変動するので定量的検討は難しい。

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、比較的安定した解析解が得られた。

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、得られた荷重点での荷重-変位曲線は工学的に差の無い結果が得られた。

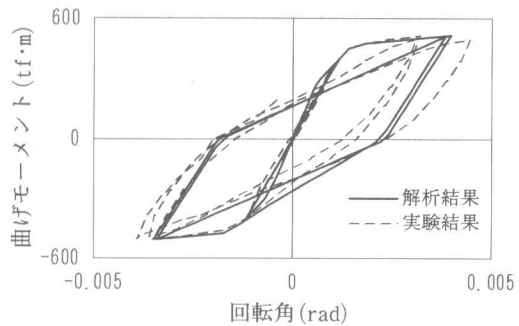


図-10 曲げモーメント-回転角関係

## 6. おわりに

阪神高速道路公団の「RCのダクティリティーに関する調査研究会」で行った、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のために、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、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結果を、耐震解析時に簡便に利用できる曲げモーメント曲率関係式で非線形特性を評価する簡易なモデル(M- $\phi$ モデル)などの提案に役立てて行きたい。

## 参考文献

- [1] 前川義男、井上晋、幸左賢二、右近八郎 ; "標準橋脚交番載荷実験のためのRC非線形解析", 土木学会年次学術講演会, V-423, pp.846-847, 1994
- [2] 沖見芳秀、右近八郎 ; "複合非線形フレーム解析システムの開発", 土木学会誌「技術最前線」, Vol.80, pp.14-17, 1995.1
- [3] 武藤清 ; "構造物の動的設計", 耐震設計シリーズ/応用編, 丸善, 1977
- [4] Ristic, D., Yamada, Y. and Iemura, H. ; "Stress-Strain Based Modeling of Hysteretic Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads", Reseach Report No.86-ST-01, School of Engineering, Kyoto University, March 1986
- [5] Bazant, Z. P. and Bhat, P. D. ; "Prediction of Hysteresis of Reinforced Concrete Members", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.103, No. ST1, pp.153-167, January 1977
- [6] 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
- [7] Kaba, S. A. and Mahin, S. A. ; "Interactive Computer Analysis Methods for Predicting the Inelastic Cyclic Behaviour of Structural Sections", Report No. UCB/EERC-83/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, July 1983
- [8] Yamada, Y., Iemura, H., Matsumoto, T., Ristic, D. and Ukon, H. ; "Stress-Strain Based Inelastic Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures", Proc. of IABSE International Symposium, Delft, pp.599-608, 1987
- [9] Gilbert, R. I. and Warner, R. F. ; "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Slabs", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No. ST12, pp.1885-1899, December 1978
- [10] 鈴木紀雄、井上範夫、森川博司 ; "ファイバーモデルによるRC短柱と十字型部分骨組の解析", コンクリート工学年次論文報告集, 第15巻, 第2号, 論文[2097], pp.577-582, 1993