

## II-21 レベル2地震を対象とした橋梁構造物の耐震性能評価システム

齋藤 信行\*      青戸 拡起\*      安部 慶一郎\*      金 徳印\*  
Nobuyuki SAITOU      Hiroki AOTO      Keiichirou ABE      De-Yin JIN

【抄録】現在、各機関で技術基準の性能規定化が進められ、動的非線形解析が実務においても積極的に活用される傾向にある。例えば、道路橋示方書耐震設計編では、地震時挙動をより精度よく推定可能として動的照査法を推奨している。しかし、Takedaモデルなどの部材非線形履歴モデルを用いた現在一般的な動的非線形解析手法は、適用可能な橋梁形式が制限される。近年、より高精度で汎用性の高い解析手法として、材料非線形履歴モデルを用いたファイバーモデルに基づく3次元動的非線形解析手法が注目されており、今回この手法を導入した橋梁全体系の耐震性能評価システムを構築した。本論では、このシステムの道路橋への適用事例を紹介する。

【キーワード】レベル2地震動、ファイバーモデル、3次元動的非線形解析、耐震性能評価システム、ひずみ

### 1. はじめに

現在、動的非線形解析が実務においても積極的に活用される傾向にある。例えば、改訂された道路橋示方書耐震設計編<sup>1)</sup>では、地震時挙動をより精度よく推定可能として動的照査法を推奨している。しかし、レベル2地震動を対象とした現在一般的な動的非線形解析法は、Takedaモデル<sup>2)</sup>やBi-Linearモデルなど、“部材非線形履歴モデル”を用いた骨組による解析手法である。この手法は、梁柱部材の実験結果に基づき荷重変位履歴を折れ線で近似したモデルを用いるため、その実験条件から外れる部材（例えば軸力変動の大きい部材、2軸曲げを受ける部材、新しい形式の部材）をもつ橋に対しては適用が制限され、汎用性に欠けることになる。今後、構造物に対する性能規定化および合理性の追求により、動的非線形解析法の高精度化・汎用性向上が望まれている。

近年、“材料非線形履歴モデル”を用いた骨組による解析手法として、「ファイバーモデルに基づく3次元動的非線形解析手法<sup>3) 4)</sup>」が注目されており、特に橋梁構造物を対象として実用的な動的非線形解析手法として確立されつつある<sup>5) 6)</sup>。この手法は、特に梁柱部材において、軸力の変動、2軸曲げなど、あらゆる荷重状態を正しく考慮でき、さらに新しい形式の部材にも柔軟に対応が可能な、高精度化・汎用性向上を両立した骨組による3次元動的非線形解析手法である。

今回、この優れた動的非線形解析手法を導入した橋梁全体系の耐震性能評価システムを構築した。本論では、

このシステムの概要と、道路橋に適用した解析事例を紹介する。

### 2. 耐震性能評価システムの概要

本耐震性能評価システムは、「ファイバーモデルに基づく3次元動的非線形解析」機能と、性能評価機能から構成されている。それぞれの概要を次に示す。

#### 2.1 3次元動的非線形解析手法

実験を忠実に再現できる、前川らの経路依存型の非線形履歴RC構成則を用いた<sup>7)</sup>、ファイバーモデルに基づく3次元非線形解析手法である。この手法は阪神・淡路大震災の被害分析<sup>8)</sup>にも適用された実績を持つ。さらに、偏心RC橋脚の静的実験<sup>3)</sup>・振動実験<sup>4)</sup>による荷重変位履歴および残留変位も忠実に再現可能な、十分に精度検証された非線形解析手法である。

#### 2.2 耐震性能の定義と性能評価機能

一般に、耐震性能の照査は、各部材の応答がある限界状態に収まっていることを照査する。例えば道示V<sup>1)</sup>は、各耐震性能に対し、一般的な橋における橋脚と上部構造の限界状態を表-1のように解説している。その際、“部材非線形履歴モデル”を用いると曲率あるいは回転角に基づいて照査するが、“材料非線形履歴モデル”を用いるとひずみに基づいて照査することができる<sup>9)</sup>。

ひずみは、断面に作用する荷重状態に関わらず、構成材料の損傷を直接的に表現することができる。さらに、ファイバーモデルとの組み合わせにより断面内の損傷領域も考慮可能で、より明確に部材の限界状態を表現できる利点がある。そこで、本システムはひずみに基づき、

\* (株)フォーラムエイト 宮崎支社 開発第6グループ  
宮崎県宮崎市学園木花台西2-1-1 TEL: 0985-58-1888

式(1)~(3)によって照査を行う。なお、地震後の残留変形も照査すべきであるが、紙面の都合上、本論ではRC橋脚の最大損傷に対する照査についてのみ述べる。

表-1 橋の耐震性能と部材の限界状態<sup>1)</sup>

	レベル1地震動		レベル2地震動	
	耐震性能1	耐震性能2	耐震性能2	耐震性能3
耐震性能	地震によって橋としての耐震性能を損なわない性能	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能回復が速やかに行ない得る性能	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能回復が速やかに行ない得る性能	地震による損傷が橋として致命的とならない性能
橋脚	力学特性が弾性域を超えない限界状態	損傷の修復を容易に行ない得る限界状態	損傷の修復を容易に行ない得る限界状態	橋脚の水平耐力が大きく低下しはじめる状態
上部構造		力学特性が弾性域を超えない限界状態、または副次的な塑性化にとどまる限界の状態		

耐震性能1:  $\epsilon_s \leq \epsilon_{ya}$  and  $\epsilon_{ca}' \leq \epsilon_{ca}'$  ... (1)

耐震性能2: ( $\epsilon_s \geq \epsilon_y$  and)  $\epsilon_{ca}' \leq \epsilon_{ca2}'$  ... (2)

耐震性能3: ( $\epsilon_s \geq \epsilon_y$  and)  $\epsilon_{cb}' \leq \epsilon_{ca2}'$  ... (3)

ここで

$\epsilon_s$  : 鉄筋引張ひずみ

$\epsilon_y$  : 鉄筋引張降伏ひずみ

(=許容応力度に相当する鉄筋の圧縮ひずみ)

$\epsilon_{ca}'$  : 被りコンクリート位置における圧縮ひずみ

$\epsilon_{cb}'$  : 最外縁軸方向鉄筋位置における圧縮ひずみ

$\epsilon_{ya}$  : レベル1地震動用・鉄筋許容ひずみ

$\epsilon_{ca}'$  : レベル1地震動用・コンクリートの許容圧縮ひずみ

(=許容応力度に相当するコンクリートの圧縮ひずみ)

$\epsilon_{ca2}'$  : レベル2地震動用・コンクリートの許容圧縮ひずみ

(=  $\epsilon_{peak}'$  : コンクリート圧縮応力のピーク時ひずみ)

コンクリートは圧縮応力ピークを超えると損傷が大きく進行することから、今回はRC橋脚の限界状態を耐震性能2: 被りコンクリートが損傷する限界の状態、耐震性能3: コアコンクリートが損傷する限界の状態と設定した。

なお、本システムでは許容値は任意に設定可能であり、橋の耐震性能および部材の限界状態に応じて、柔軟に対応することが可能である。

そして、本システムは各断面に発生した最大ひずみをもとに、式(1)~(3)によって断面毎に照査を行い、その照査結果を図化する。この図をもとに橋梁全体の耐震性能評価が可能である。図-1に本耐震性能評価システムのフローを示す。

### 3. 適用事例

#### 3.1 解析モデル

対象としたのは、橋長200m、橋脚高さ20~30mの

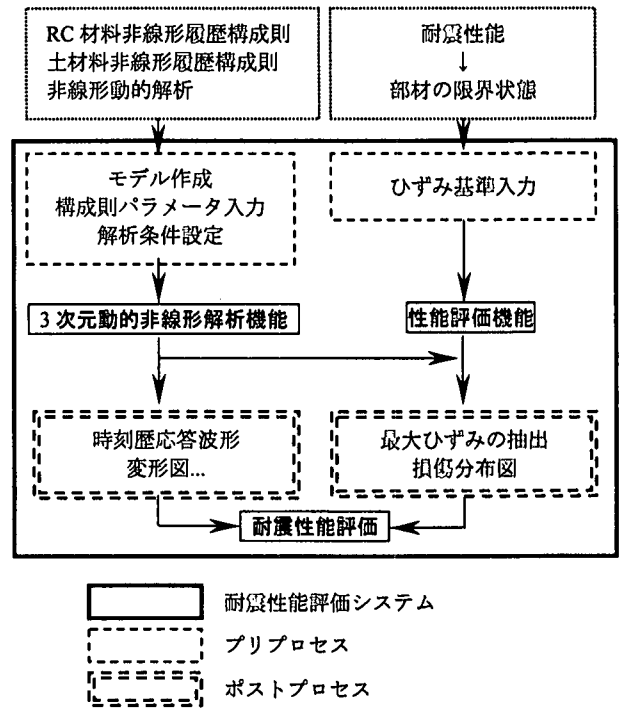


図-1 耐震性能評価システムのフロー

不等橋脚を有する曲線ラーメン橋であり、一般的な動的非線形解析手法の適用が制限される橋である。図-2に、解析対象の平面図、橋脚と上部構造断面図を示す。

また、橋脚とフーチング間には3次元解析にも適用可能な接合要素を用い、フーチング内からの主鉄筋拔出しを考慮した。

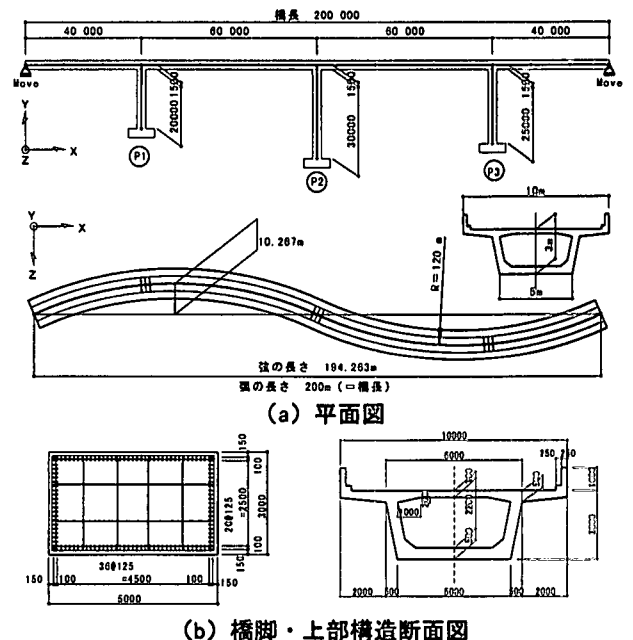


図-2 4径間連続曲線ラーメン橋モデル

#### 3.2 解析条件

本事例では、レベル2地震動に対し耐震性能2の照

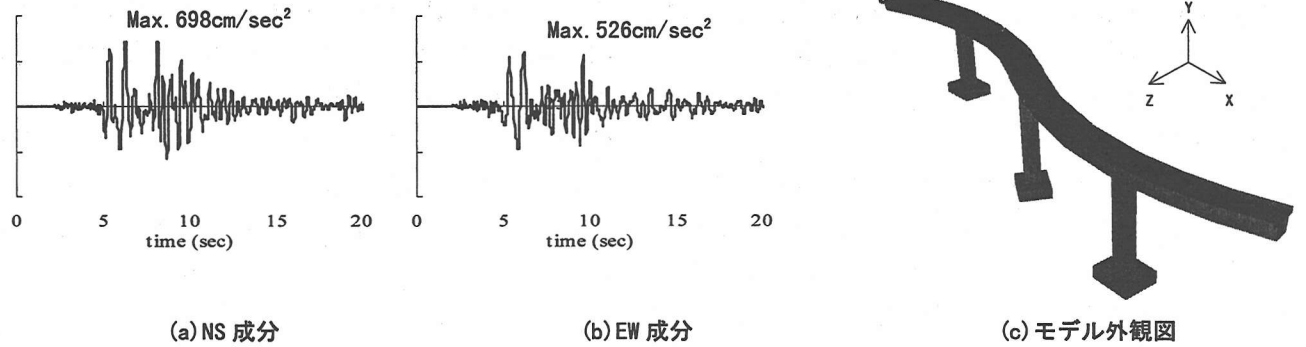


図-3 入力加速度波形とモデル外観図

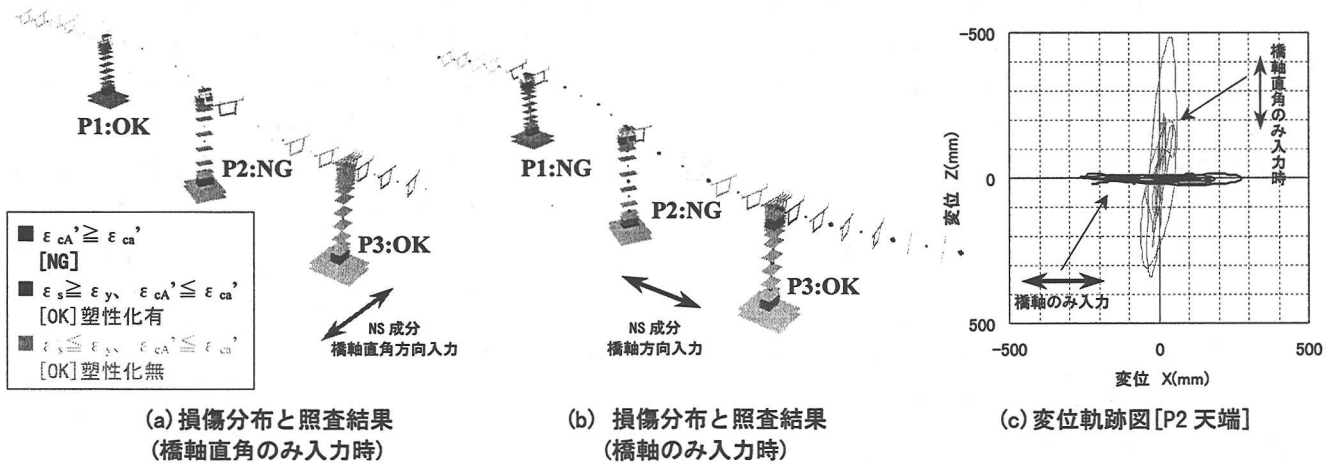


図-4 1方向入力時の結果

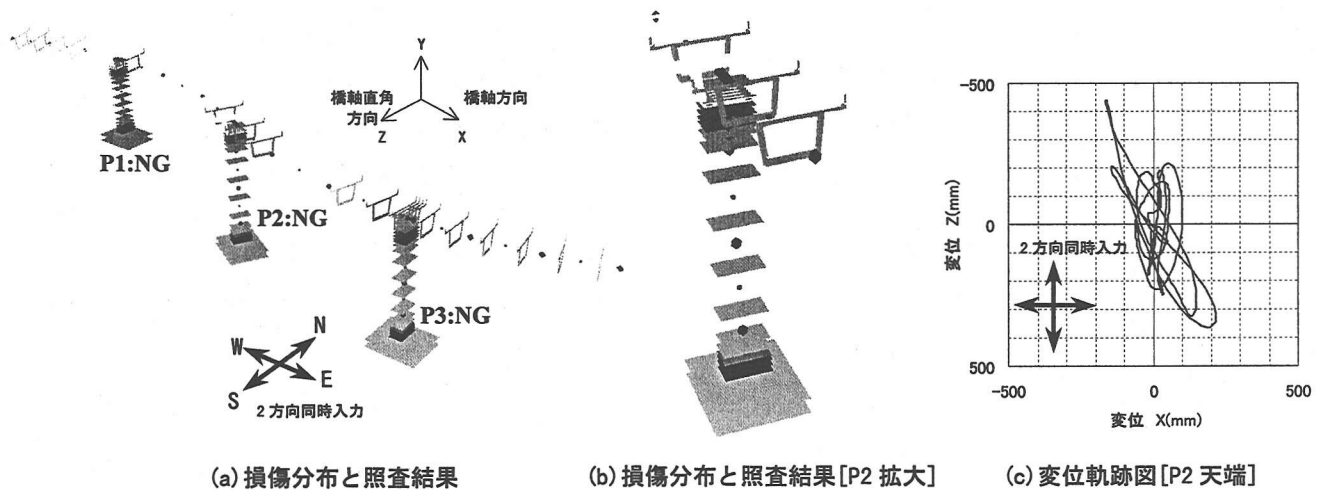


図-5 2方向同時入力時の結果

査を行った。入力加速度波形は、兵庫県南部地震での観測波を振幅のみ 85%にして使用した(図-3(a) (b))。本事例では、NS 成分を橋軸方向あるいは橋軸直角方向の単独 1 方向に入力した解析と、EW・NS 成分を橋軸・橋軸直角 2 方向同時入力した解析を行った。

なお、直接基礎のためフーチング下端部の条件は固

定、そして桁両端部は単純支持条件とした。

### 3.3 解析結果

#### (a) 照査結果

本システムは動的非線形解析終了後、図-4・5 (a) (b) に示す損傷分布と照査結果が即座に確認できる。■色

の断面は照査を満足しなかった断面である。■色の断面は照査を満足するが塑性化した断面を示しており、橋梁全体系の耐震性能評価に必要な塑性ヒンジの発生箇所も同時に確認できる。

また、1方向入力時は照査を満足した橋脚が見られる(図-4(a)(b))。一方、2方向同時入力時は全ての橋脚の基部が照査を満足せず(図-5(a))、さらに基部塑性ヒンジ全域に渡る大きな損傷が生じた。これは、図-4(c)・5(c)に示すように、2方向同時入力によって最大振幅方向が変化したためと考えられる。耐震設計実務においては1方向入力による動的照査を行なうことが多いが、2方向同時入力時は損傷がより大きくなることもあり注意が必要である。

**(b) その他の解析結果**

本システムは損傷分布と照査結果だけでなく、詳細な解析結果を即座に確認することができる。

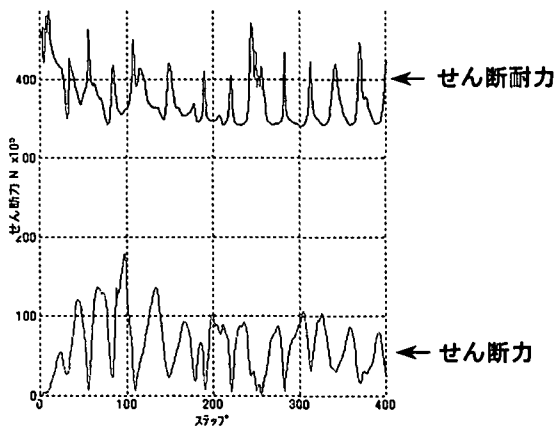


図-6 せん断耐力/せん断力比較図(時刻歴)

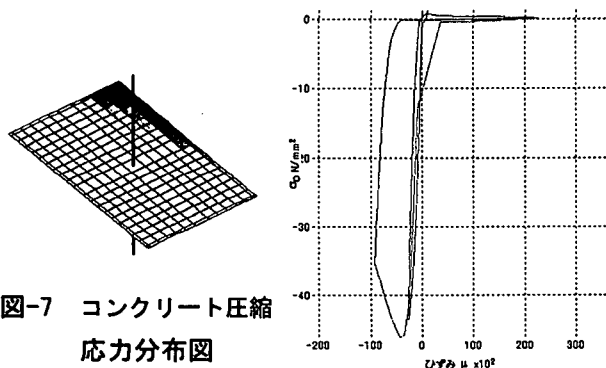


図-7 コンクリート圧縮応力分布図

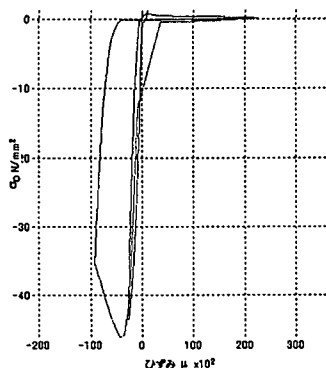


図-8 コンクリート応力-ひずみ履歴

ここに示したのは、2方向同時入力時のP2橋脚基部断面の結果である。図-6はせん断耐力/せん断力の比較図である。せん断耐力がせん断力を常に上回ってお

り、せん断破壊が回避されていることが確認できる。図-7は断面に生じたコンクリート応力の分布図である。これを利用することで損傷方向の特定が可能となる。図-8はコアコンクリート最外縁位置でのコンクリートの応力-ひずみ履歴である。最大圧縮ひずみは圧縮応力のピークを超えており、コアコンクリートに損傷が進行したことが確認できる。

**4. まとめ**

本耐震性能評価システムの特徴をまとめる。

- ・ファイバーモデルに基づく3次元動的非線形解析手法の導入により、RC材料の“材料非線形履歴モデル”を用いた精度の良い解析が可能だけでなく、一般的な動的非線形解析手法では制限される荷重・変形状態を正しく考慮できる。
- ・耐震性能に応じ部材の限界状態をひずみで表現できるため、部材の限界状態をより明確に表現できる。
- ・各部材の照査だけでなく、橋梁全体系の耐震性能評価も可能である。また、必要に応じて詳細な解析結果を即座に確認できる。

**参考文献**

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編 平成14年3月
- 2) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.1.96, No. ST12, pp.2557-2573, 1970.12
- 3) 土屋智史, 津野和宏, 前川宏一: 常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合载荷した RC 柱の非線形三次元有限要素立体解析, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.131-143, 2001.8
- 4) 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, 「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, pp.359-368, 1998.8
- 5) 森下邦宏, 宇佐美勉, 阪野崇人, 葛西昭: 鋼製橋脚の動的耐震照査法に関する検討, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.181-190, 2002.7
- 6) 川島一彦, 永井政伸: 塑性ヒンジ領域にゴム層を有する鉄筋コンクリート橋脚の開発, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.113-128, 2002.4
- 7) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂, 1991.5
- 8) 土木学会: 阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証-検討課題と将来像-, コンクリート技術シリーズ 36, 土木学会, 2000.5