

II-12 骨組み構造を対象とした非線形構造物の耐震性能評価システム

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION SYSTEM BASED ON THREE-DIMENSIONAL DYNAMIC NONLINEAR FRAME ANALYSIS

青戸 拓起¹・安部 慶一郎²・金 徳印³

Hiroki AOTO, Keiichirou ABE and De-Yin JIN

抄録：近年、道路橋示方書などを例に性能規定型設計体系への移行が進められ、特に動的非線形解析などの高度解析技術を利用した設計の合理化、高精度化が求められている。しかし、現在普及している非線形解析ツールの多くは、2次元の非線形解析とそれを前提とした照査方法に基づいているため、実地震による挙動やそれによる3次元挙動を十分に反映した設計が行えない。そこで、これをより精度よく評価できるファイバーモデルを利用した材料非線形モデルによる非線形解析手法を導入した。そして、国内設計基準に対応した設計機能と結合することにより、高度非線形解析機能と設計機能を結合した骨組み構造の耐震性能評価システムを構築した。また、2次元および3次元の非線形解析の結果を比較し、3次元解析の有効性を紹介している。

キーワード： ファイバーモデル、3次元非線形解析、性能規定、高度化、耐震性能

Keywords : Fiber model, 3-Dimensional nonlinear analysis, Performance based design, Integration, Seismic performance

1. はじめに

構造物の設計は「性能規定型設計」への移行が進みつつあり、高度解析技術を利用した合理化設計が求められている。例えば、土木構造物の耐震設計において、道路橋示方書耐震設計編¹⁾、土木学会コンクリート標準示方書²⁾、鉄道構造物等設計標準³⁾などで、動的照査法の積極的な利用が薦められている。特に橋梁構造については、巨大地震に対して橋脚の塑性化や免震支承の非線形性を期待するため、非線形動的解析を利用した設計ソフトウェアが広く整備されてきている。

また、近年、材料非線形履歴モデルを活用したより高度な非線形解析技術を、構造設計に応用する動きが盛んになってきている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。こうした材料非線形履歴モデルに基づく解析技術は既に確立されているが、十分に普及しているとはいえない。理由として、快適な計算機環境が無かった、プリ・ポストプロセッサ・解析・設計それぞれの機能が独立していた、解析結果の整理と設計計算の処理が効率よく連携していなかったことなどがあげられる。

そこで、本システムは、材料非線形履歴モデルを利用したファイバーモデルによる非線形解析に加え、任意形状断面作成機能・任意形立体骨組みモデル作成機能、そして国内設計基準による設計機能を結合している。従来の設計ソフトウェアで苦手としていた立体構造の3次元非線形動的解析が手軽に高精度に実行でき、さらにその結果

を簡単に設計に反映できるようになった。現在、橋梁技術者を中心に実務に広く普及し始めている。

本論は、そのシステムの概要を紹介するとともに、材料非線形モデルを利用した3次元解析の活用方法および耐震性能評価方法を紹介する。

2. 耐震性能評価システムの概要

(1) 骨組み構造の3次元動的非線形解析手法

本システムは、橋梁のモデル化方法の主流である、骨組み構造を対象としている。将来は、タンク・壁など面材を持つ構造へも拡張する。非線形解析は、古くから利用されている部材非線形履歴モデルだけでなく、材料非線形履歴モデルに基づくファイバーモデルが利用できる。

部材非線形履歴モデルは、鉄筋コンクリート柱部材を対象とした Takeda モデル⁷⁾、鋼製橋脚を対象とした Bi-Linear モデルが代表的であるが、ある条件下で行われた梁柱部材の力学特性に基づき近似された経験則で、ほとんどが2次元解析に適用が限定されてしまう。一方、材料非線形履歴モデルに基づく手法は、材料レベルの実験結果を精密に表現できる履歴モデルを用い、これに基づいて部材の力学特性を求める。2軸曲げを受ける柱など様々な実験結果を極めて精度よく再現できる⁸⁾⁹⁾。これを棒部材に限定したのがファイバーモデルで、理論的にも厳密な棒部材用のモデルである。ファイバーモデルは従

1： 非会員 工修 (株)フォーラムエイト 宮崎支社

(〒889-2155 宮崎県宮崎市学園木花台西 2-1-1、Tel : 0985-58-1888、E-mail : h_aoto@forum8.co.jp)

2： 非会員 同上 (E-mail : kei@forum8.co.jp)

3： 非会員 工博 同上 (E-mail : kin@forum8.co.jp)

来の部材非線形履歴モデルが対象としていた2次元の非線形解析を高精度化するだけでなく、3次元解析に適用ができることが最大の利点である。特に長大橋梁を中心に積極的な活用が始まっている⁵⁾。材料非線形モデルに基づく棒部材の解析のノウハウも、その要素寸法に関する注意など知見が整理されつつある²⁾。

また、本システムは、前川らの高精度な経路依存型のコンクリートおよび鉄筋の材料非線形履歴モデル²⁾⁸⁾、そして横拘束筋の影響を考慮したコンクリート¹⁾の材料非線形履歴モデルを用いることができる。

(2) 耐震性能評価機能

a) 国内基準に準拠した設計機能

橋梁の設計を対象とした道路橋示方書（Ⅲコンクリート橋編、Ⅳ下部構造編、Ⅴ耐震設計編）、ならびにコンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹⁰⁾が適用できる。また、部材や荷重レベル毎に許容値を設定することができ、非常に柔軟な設計機能を有する。これによって、レベル1地震動およびレベル2地震動に対する動的照査、さらには使用・疲労・終局限界を想定した限界状態設計にまで幅広く対応する（表-1）。

表-1 A社製品との機能比較

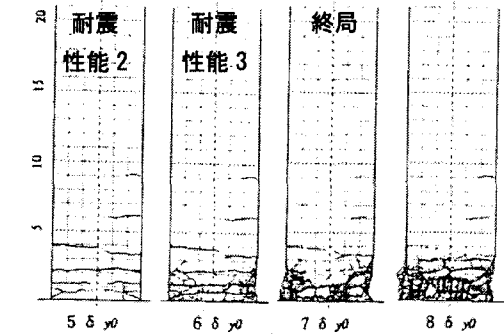
	本システム	A社 動的解析製品
本体価格比	1	2.5
解析対象	任意形 立体骨組み	連続桁橋 平面骨組み
橋脚形式	任意	単柱限定
静的解析	◎	×
影響線・活荷重解析	◎	×
幾何学的非線形	◎	×
地震入力方向	3方向	1方向
材料非線形モデル	◎ ファイバーモデル	×
適用可能な 設計基準	道路橋示方書 (Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ) および JSCE 構造性能 照査編	道路橋示方書 Ⅴ
3波平均機能	◎	◎

b) 材料非線形モデルの結果による損傷評価機能

a)に加えて、ファイバーモデルを用いた解析ではひずみに基づく断面の損傷状況を評価することができる。

例えば道路橋示方書Ⅴ¹⁾は、一般的な橋の橋脚の各耐震性能に対し、図-1の損傷を限界の目安としている。部材非線形履歴モデルによる解析では、曲率あるいは回転角に置き換えて照査してしまうため、解析の結果どの程度の損傷が生じているか評価しにくい。一方、材料非線形履歴モデルに基づく解析は、鉄筋の降伏や座屈、コンクリートの圧縮破壊や終局状態などを直接表現したモデルを用いるので、地震時に生じる損

傷が評価しやすい。



耐震性能2：主鉄筋の降伏、被りコンクリートのひび割れ
耐震性能3：主鉄筋の降伏、かぶりコンクリートの圧縮破壊
終局：主鉄筋座屈、かぶりコンクリートの剥落

図-1 鉄筋コンクリート柱の損傷状態¹⁾

(3) プリ・ポストシステム

より高度で柔軟な構造設計に対応するためには、立体骨組みモデルを容易に構築できると同時に、断面情報をいかに正確にモデル化できるかが重要である。「任意形骨組み編集機能(FRAME)」に加え、新たに「任意形断面編集機能(Section)」を開発した。よって、あらゆる橋梁形式、断面形状・配筋状態に対応した、立体骨組みモデルの構築が可能になっている。また、入力編集および結果表示にOpenGLを多用したGUIを積極的に活用し、3次元解析結果をわかり易く表示する。従来の製品はテキストベースの出力情報が主で、膨大な3次元解析の結果が把握しにくかったため、この点を大きく解消した。また、プリ・ポストプロセッサ一体のため、入力編集操作と結果表示が同じ操作性で実現しているのも大きな特徴である。

3. 解析事例-1

(1) 解析対象と解析条件

a) 諸元

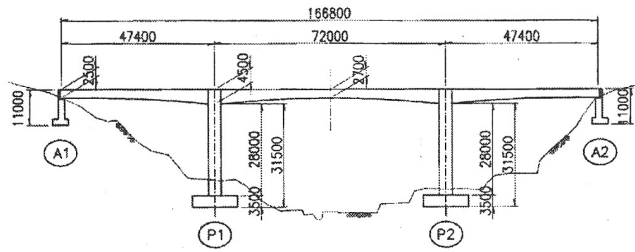
平成8年の道示で設計された、3径間PC直線ラーメン橋¹¹⁾を対象とした。橋脚の断面寸法は4.0m×6.0m、で主鉄筋はD38〔SD345、p=1.1%〕である。

b) 解析モデルと条件

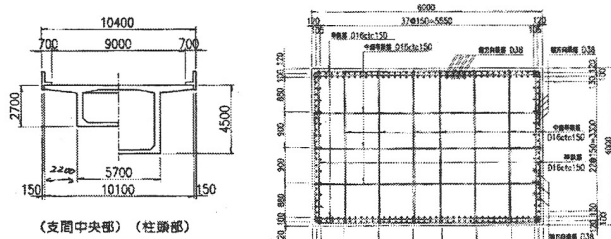
橋脚を非線形部材とし、上部構造は線形部材でモデル化した。非線形部材を、部材非線形履歴モデルのTakedaM-φモデルとした場合と、材料非線形履歴モデルに基づくファイバーモデルとした場合とを比較検討した。入力地震動は、兵庫県南部地震で観測された加速度波形(図-3)を使用し、NS成分を橋軸方向に入力する1方向入力(=2次元解析)と、ファイバーモデルではNSを橋軸方向、EWを橋軸直角方向に入力した2方向同時入力(=3次元解析)も行った。

(2) 解析結果

a) 一般的な解析結果

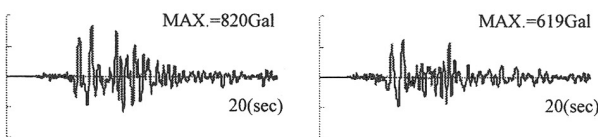


(a) 平面図



(b) 上部構造と橋脚の断面図

図-2 解析対象



(a) NS 成分

(b) EW 成分

図-3 入力地震動波形

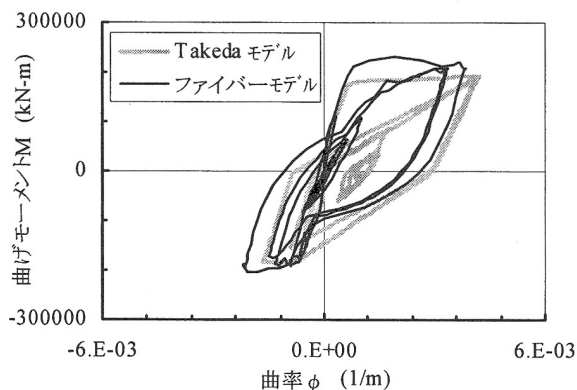


図-4 曲げモーメント-曲率の履歴(1方向入力)

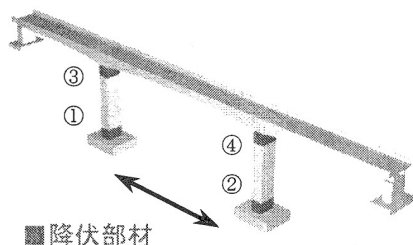


図-5 鉄筋の塑性化と発生順序(1方向入力)

解析結果として、変形図、断面力図、非線形部材の曲げモーメント-曲率の履歴、各節点の変位と各部材の断面力の時刻歴結果を確認することができるが、こ

こでは紙面の都合上割愛する。

図-4 は、1 方向入力時の P1 柱基部の曲げモーメント-曲率の履歴を比較したものである。とりわけ大きな差は見られず、1 方向入力であれば、部材非線形履歴モデルによる解析でも材料非線形履歴モデルによる解析でも、ほぼ同等な最大変形量が得られる。また図-5 は、塑性化の状況を表し、塑性化を想定していない領域で塑性化が生じていないかの確認に利用できる。

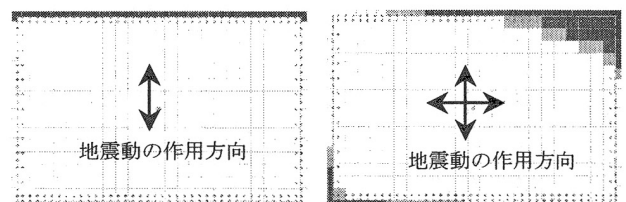
b) 設計機能との連携

橋脚などの梁部材については、設計基準で定められた許容値（許容応力度、許容曲率、曲げ耐力、せん断耐力、支承変位）に収まっているかどうか（OK or NG）を、一目で確認することができる（図-6）。

NG 1/4	曲げ耐力		せん断耐力	
	$M_c < M_u$ (kNm)	$M_{max} < M_u$ (kNm)	$S < P_u$ (kN)	
P1 部材27	56884.8 < 214297.8 OK	-196029.4 < 194962.6 < 196029.5 OK	14281.0 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 0.000	56884.8 < 214297.8 OK	-202709.9 < 152579.7 < 202709.7 OK	14281.0 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 4.000	54495.1 < 212231.8 OK	-196029.4 < 194962.6 < 196029.5 OK	14281.0 < 19151.1 OK (yp)	
P1 部材33	56860.5 < 216032.0 OK	-267000.8 < 258582.2 < 267000.5 OK	16181.1 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 0.000	57170.1 < 220493.0 OK	-267000.8 < 258582.2 < 267000.5 OK	16181.1 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 4.000	56860.5 < 216032.0 OK	-277267.1 < 214295.1 < 277267.2 OK	16181.1 < 19151.1 OK (yp)	
P2 部材35	61683.1 < 226081.2 OK	-186736.9 < 188141.6 < 186737.1 NG	13998.3 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 0.000	61683.1 < 226081.2 OK	-191998.6 < 142281.7 < 191998.9 OK	13998.3 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 4.000	46126.3 < 192774.7 OK	-186736.9 < 188141.6 < 186737.1 NG	13998.3 < 19151.1 OK (yp)	
P2 部材41	62567.0 < 236336.1 OK	-274230.8 < 262088.8 < 274230.0 OK	16166.5 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 0.000	62567.0 < 236336.1 OK	-274230.8 < 262088.8 < 274230.0 OK	16166.5 < 19151.1 OK (yp)	
由 X = 4.000	55621.5 < 220413.9 OK	-267654.8 < 210809.4 < 267654.8 OK	16166.5 < 19151.1 OK (yp)	

図-6 照査結果の表示例

c) ファイバーモデルによる解析結果



(a) 1 方向入力時

(b) 2 方向同時入力時

■剥落 ■圧縮破壊 ■軽微 □ひび割れ

図-7 断面の損傷状態(P1 柱基部)

ファイバーモデルではさらに図-7 の結果が得られる。コンクリートに着目し、ひび割れ、圧縮破壊（圧縮強度点を越える）、剥落（圧縮強度点を越え圧縮応力が 0 となる点を越える）の状況を示したものである。道示 V では、橋脚のかぶりコンクリートが剥落しないような状態に収める必要があり（図-1）、1 方向入力時はそれを満足しているが、実際により近い 2 方向同時入力時は断面角部でかぶりコンクリートが剥落しており、許容される損傷より大きな損傷が発生している。

4. 解析事例-2

(1) 解析対象と解析条件

a) 諸元

図-8 に示す偏心橋脚を例にした。柱基部から上部

構造の重心位置までの高さは15.5m、柱中心から4.5mの位置に400tfの質量が載っている。断面寸法は3.0m×2.0mで、主鉄筋はD38〔SD295、 $p=1.9\%$ 〕である。

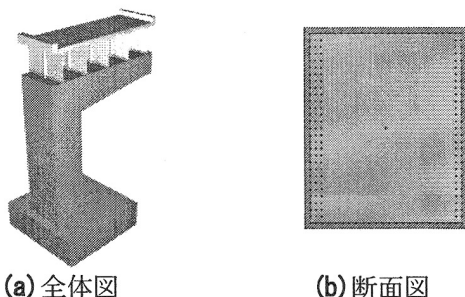


図-8 解析対象

b) 解析モデルと条件

3と同様、橋脚を非線形部材とし、Takedaモデルとファイバーモデルの結果を比較検討した。地震動は図-3(a)に示した加速度波形を、橋軸方向のみに入力するが、死荷重による面内曲げが付加されているため、2軸曲げ状態となり、特に柱基部では断面角部に損傷が集中する構造となる(図-9)。

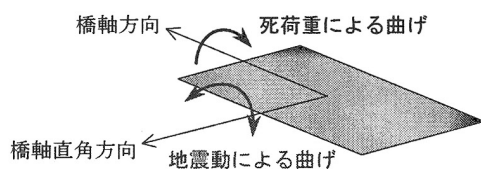


図-9 偏心橋脚の断面

(2) 解析結果

図-10は橋脚天端の橋軸直角方向の変位の時刻歴で、すなわち橋脚の傾斜の変化と同意である。Takedaモデルによる解析は、2軸間の連成作用や相関関係を考慮していないので、地震動作用中に傾斜は増減しない。しかし、ファイバーモデルによる解析は地震動の作用に伴い断面角部が損傷して傾斜が増加する。実験でも同様の現象が観察されている⁸⁾。図-11は橋軸直角軸回りの曲げモーメント-曲率の履歴で、2軸曲げ作用の影響によりファイバーモデルによる解析のほうが最大変形が大きい。

4. まとめ

本論の耐震性能評価システムの特徴をまとめる。

- ・材料非線形履歴モデルによる精度の良い解析が可能だけでなく、部材非線形履歴モデルが苦手な3次元非線形解析に正しく適用できる。3次元解析は2次元解析より大きな損傷を評価する可能性がある。
- ・材料非線形履歴モデルによる高度な解析手法、任意形状骨組みおよび断面作成機能、そして国内設計基準による設計機能の結合により、より高度な解析の

結果を簡単に設計に反映できる。

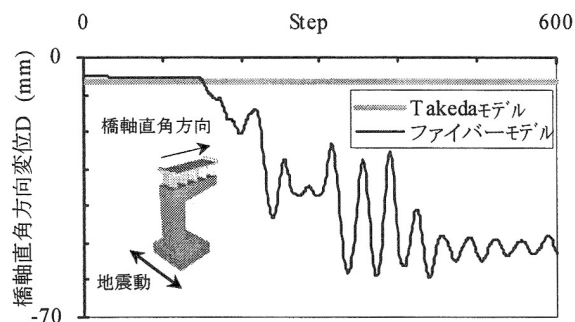


図-10 変位の時刻歴応答

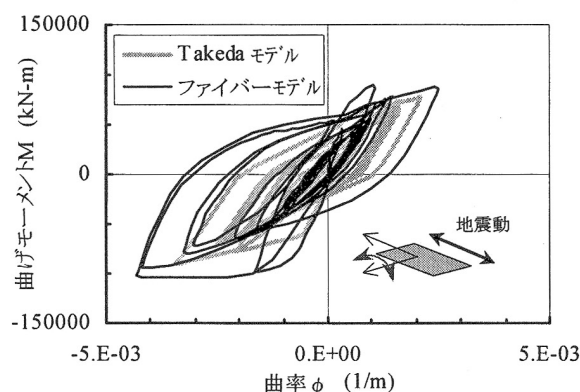


図-11 曲げモーメント-曲率の履歴

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,2002.3.
- 2) 土木学会:2002 年制定コンクリート標準示方書[耐震性能照査編], 土木学会, 2002.12.
- 3) 鉄道総合研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.12.
- 4) 土木学会原子力土木委員会:原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針, 土木学会, 2002.5.
- 5) 土木学会:橋の動的耐震設計, 土木学会, 2003.6.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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/せん断力を複合載荷した 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.
- 9) 早川涼二, 川島一彦, 渡辺学歩:水平 2 方向地震力を受ける単柱式単柱式 RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.79-98, 2004.4.
- 10) 土木学会:2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2002.3.
- 11) 日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料 平成 10 年 1 月, 日本道路協会, 1998.1