

鉄筋コンクリート単柱破壊実験の 各種解析法によるシミュレーション

白子 将則¹・古屋 知真²・貞松 昌憲³・藤田 亮一⁴

¹日本技術開発(株)リサーチエンジニアリング事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: shirako-ma@jecc.co.jp

²日本技術開発(株)リサーチエンジニアリング事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: furuya-to@jecc.co.jp

³日本技術開発(株)リサーチエンジニアリング事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: sadamatsu-ma@jecc.co.jp

⁴日本技術開発(株)リサーチエンジニアリング事業部西日本室 (〒531-0072 大阪市北区豊崎5-6-10)

E-mail: fujitary@jecc.co.jp

本報告は、振動台を用いた鉄筋コンクリート単柱の破壊実験を複数の解析法によりシミュレーションした結果と、各解析法の適用性に関する考察を報告するものである。曲げ破壊型とせん断破壊型の2つの異なる模型実験結果に対して、M-φモデル、ファイバーモデル、有限要素モデルによる動的解析法を適用してシミュレーションした結果、M-φモデルとファイバーモデルは曲げ破壊型供試体の振動特性を一定の精度で再現できたが、せん断破壊型の供試体の変形状態を再現するのは困難であった。有限要素モデルではせん断破壊後の挙動もおおむね再現できており、これらのシミュレーション結果から各モデルの適用性が明らかになった。

Key Words : shaking table, fiber model, FEM, simulation, E-Defense

1. はじめに

土木構造物で広く用いられている鉄筋コンクリート柱構造については、各種の破壊実験が多数実施されてきており、その結果に基づいた解析手法も数多く提案されている。中でも梁モデルに曲げ非線形特性(M-φ特性)として武田モデルを組み合わせる方法は、土木構造物の耐震解析においては最も広く採用されているものである。また、昨今では電子計算機の能力が飛躍的に向上したことから、材料レベルでの非線形特性を考慮したファイバーモデルや有限要素モデルの採用例も多くなっており、実務においても選択の幅が広がってきている。

本報告は、上述の代表的な3手法を用いて鉄筋コンクリート単柱の破壊実験のシミュレーションを実施した結果と、各解析法の適用性に関する考察を報告するものである。曲げ破壊型とせん断破壊型の2つの異なる模型実験結果に対して、M-φモデル、ファイバーモデル、有限要素モデルによる動的解析を実施した。シミュレーションにあたっては、供試体の変形と最終的な破壊状態に着目して解析法の対比を行った。

2. 実験概要

(1) 対象とした実験

シミュレーションの対象とした実験は、(独)防災科学技術研究所の実大三次元振動破壊実験施設(E-Defense)を用いた橋梁耐震実験研究¹⁾の一環として、(独)土木研究所が行った鉄筋コンクリート円柱の振動台実験²⁾である。実験供試体は実構造の約1/3の大きさであり、兵庫県南部地震におけるJR鷹取駅での観測波を調整して入力している。実験の詳細については参考文献2)を参照されたい。以下では要点を述べるにとどめる。

(2) 実験供試体

実験供試体は直径600mmの円形断面を有するRC単柱であり、曲げ破壊型(PWRI01)とせん断破壊型(PWRI02)の2種類である。供試体の形状と配筋を図-1に示す。前者はレベル2地震動に対して基部で曲げ損傷するような配筋になっており、後者は2カ所ある段落とし部での破壊が基部の破壊に先行して最終的にせん断破壊となるような配筋になっている。コンクリートの設計基準強度は

27N/mm², 鉄筋はPWRI02の主筋のみSD345で, それ以外はSD295である.

(3) 実験結果概要

曲げ破壊型のPWRI01は, 基部の被りコンクリートが剥落し, 最終的には主鉄筋が座屈して曲げ破壊した. セン断破壊型のPWRI02は, 上側の段落とし部で曲げ損傷後, 大きなせん断ひび割れを生じて破壊に至った.

3. 解析モデルと条件

本報告では, 異なる3種の解析モデルを用いてシミュレーションを行い, 実験結果との整合に着目して比較を行った. それぞれの解析モデルについて以下に示す.

(1) M-φモデル

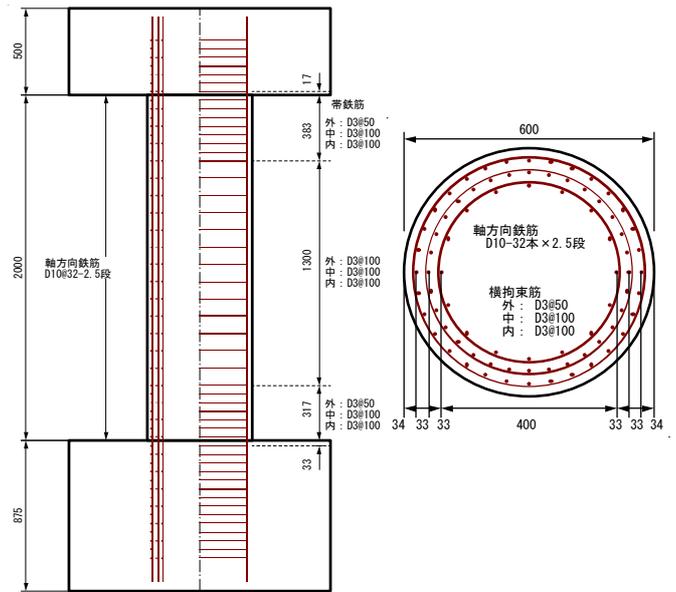
M-φモデルは, 梁要素の曲げ非線形特性に修正武田モデルを適用したものをを用いた. 骨格曲線の計算に用いたコンクリートと鉄筋の材料特性はいずれも道路橋示方書V耐震設計編³⁾に準じた.

曲げ変形にのみ非線形を考慮した梁要素を用いているため, せん断に関しては線型モデルであり, せん断破壊型のPWRI02に対しては弾性応答範囲までしか再現できないと考えられる. 曲げ挙動に関しては, 骨格曲線をトリリニアで定義しているが, 終局点到達以降も剛性と耐力が低下しないモデルになっているため, モデルの精度としては終局点手前までが信頼できる範囲である. ここでの終局点は, 被りコンクリートが剥落して水平耐力が低下し始める前と定義し, これをコアコンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみに達した時として求めている. このため, 本モデルの適用範囲としては, 被りコンクリートが剥落する前までが対象となる. なお, 主鉄筋の座屈と基部からの伸び出しは考慮していない.

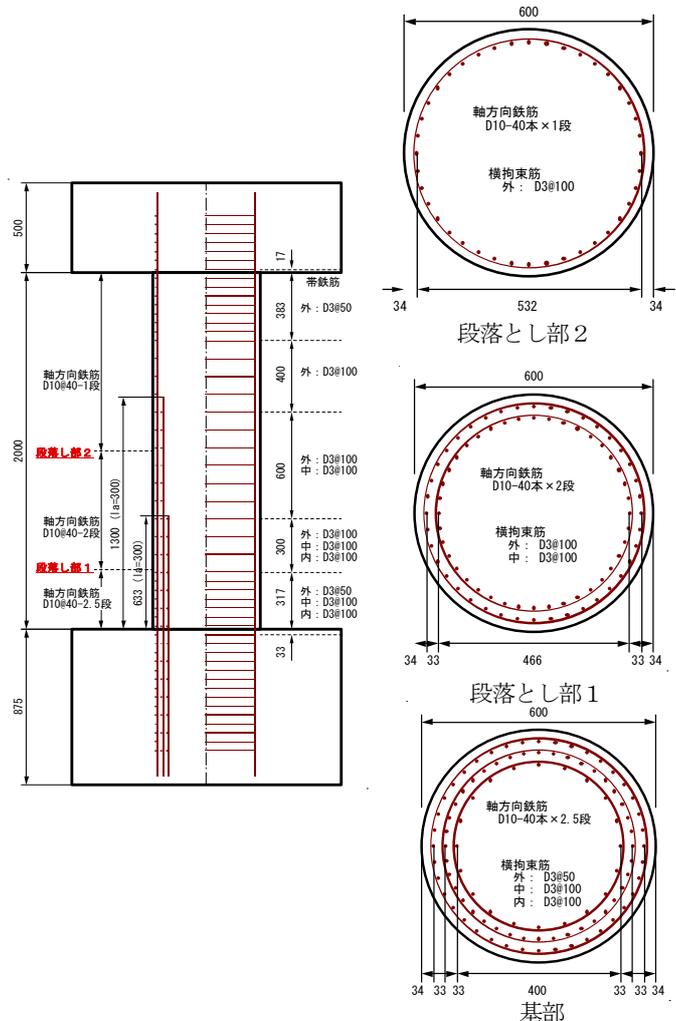
(2) ファイバーモデル

ファイバーモデルは, 梁要素の断面を複数のファイバーに分割して各ファイバーに材料非線形特性を設定した. コンクリートは道路橋示方書V耐震設計編の構成則を適用し, 鉄筋についてはバイリニアモデル (二次勾配は初期勾配の1/100) を用いた.

M-φモデルと同様の梁要素を用いているため, せん断に関しては弾性範囲までしか信頼性は無いといえる. 曲げ挙動に関しては, コンクリートが終局ひずみを越えると剛性・応力が0になる設定であるため, 被りコンクリート剥落後の状態まで再現できる. ただし, 主鉄筋の座屈と基部からの伸び出しは考慮していないため, 主鉄筋座屈後の挙動に対しては精度が低くなると考えられる.



①曲げ破壊型供試体 (PWRI01)



②せん断破壊型供試体 (PWRI02)

図-1 実験供試体²⁾

表-1 解析条件

解析モデル	M-φモデル	ファイバーモデル	有限要素モデル
モデル図			
材料構成則	修正武田モデル コンクリート：道示V（タイプII） 鉄筋：道示V	コンクリート：道示V（タイプII） 鉄筋：バイリニアモデル (2次剛性は初期剛性の1/100)	前川モデル
主な解析条件	使用ソフト：DYNA2E $\Delta t=0.005$ Newmark- β 法($\beta=1/3$) 剛性比例減衰($\beta=0.00142$) 収束計算を行わない 不平衡力は次ステップに持ち越さない 幾何学的非線形は考慮しない 地震動3方向同時入力(2軸曲げは無視)	使用ソフト：Midas/Civil $\Delta t=0.002$ Newmark- β 法($\beta=1/4$) 剛性比例減衰($\beta=0.00195$) Runge-Kutta法 不平衡力は次ステップに持ち越し 幾何学的非線形は考慮しない 地震動3方向同時入力	使用ソフト：WCOMD $\Delta t=0.005$ 基部ジョイント考慮(鉄筋伸び出し) 地震動2方向同時入力(鉛直、水平)
適用範囲	曲げ破壊：被りコンクリート剥落前まで 剪断破壊：弾性応答範囲	曲げ破壊：主鉄筋座屈前まで 剪断破壊：弾性応答範囲	曲げ破壊：被りコンクリート剥落前まで 剪断破壊：剪断塑性ひずみが大きくなるまで

(3) 有限要素モデル (FEM)

有限要素モデルは8節点平面要素に非線形材料特性を付与したものを用いた。構成則は、前川らによる多方向ひび割れを考慮した非線形RC構成則を有する分散ひび割れモデル⁴⁾⁵⁾である。分散ひび割れモデルは、コンクリートの構成則と鉄筋の構成則を重ね合わせるにより表現され、平均応力と平均ひずみの関係と与えられる。コンクリートの構成モデルとして、ひび割れ平行方向の圧縮剛性モデル、ひび割れ直行方向の引張剛性モデル、ひび割れ界面のせん断伝達モデルが用いられる。

材料構成則として被りコンクリートの剥落や主鉄筋の座屈の影響は考慮されていないため、曲げ挙動に関しては被りコンクリート剥落の手前まで精度が高いと考えられる。せん断挙動については、ひび割れ面でのずれを含む非線形挙動を高精度に再現できる構成則を適用しているため、せん断ひび割れが貫通してずれ変形が大きくなり始めるまでの信頼性はあるといえる。

(4) その他の解析条件

モデル以外の解析条件について、表-1にまとめて示す。解析に用いたソフトウェアは、M-φモデルが伊藤忠テクノソリューションズ(株)の「DYNA2E」、フ

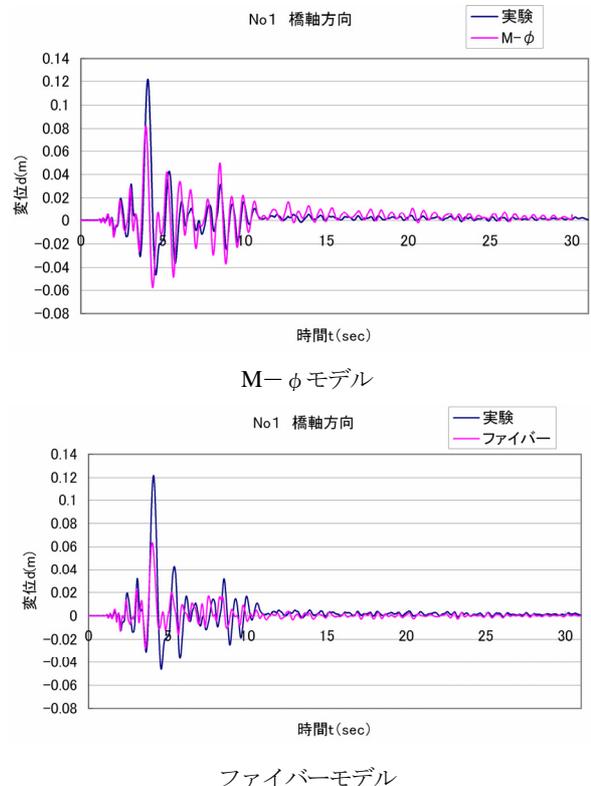


図-2 天端変位の比較(曲げ破壊型供試体)

ファイバーモデルが同社の「MIDAS/Civil」，有限要素モデルが(株)フォーラムエイトの「WCOMD」である。

4. 解析結果と評価

3.に示した解析手法を用いて実験のシミュレーションを行い，実験結果と対比するとともに，解析手法間の違いについて考察した。

(1) 変位に着目した評価

図-2～図-3に橋脚天端の応答変位について実験値と解析結果を比較したものを示す。同図より，曲げ破壊型のPWRI01については，最大値の違いはあるものの，供試体の振動特性をM-φモデルとファイバーモデルでおおむね再現できているといえる。最大値が異なる要因としては，主鉄筋の座屈と基部からの伸び出しをモデルに組み込んでいないために解析値が小さくなった可能性が考えられる。また，動的解析であるため減衰の設定も応答値を大きく左右する。幾何学的非線形効果を考慮していないことも原因の一つである可能性がある。

一方，せん断破壊型のPWRI02については，実験供試体は最大変位到達後に振動の中心が正側に大きくずれるような挙動を示している(残留変位を生じている)のに対し，M-φモデルとファイバーモデルでは最後まで振動の中心が原点付近にとどまっており，十分に実現を再現できているとはいえない。実験時の状況から，供試体の振動中心のずれはせん断破壊に伴うずれが原因であると考えられ，この挙動を解析的に表現できていないといえる。M-φモデルとファイバーモデルは曲げ梁要素であるため，挙動を曲げ変形でしか表現できていないことから，このような結果になったと考えられる。

せん断挙動については有限要素モデルでは大幅に改善されており，完全に一致するレベルではないものの，最大変位以降の振動中心のずれをおおむね再現できている。曲げ主体の梁要素とは異なり，8節点要素はせん断変形を表現するのに適していることと，鉄筋コンクリートのせん断変形に関して精度の高い構成則が組み込まれていることがこのような結果につながったと考えられる。

(2) 加速度に着目した評価

図-4～図-5に橋脚天端の応答加速度について実験値と解析結果を比較したものを示す。同図より，実験結果にパルスが入っているため最大値は乖離しているものの，曲げ破壊型のPWRI01に関しては振動周期や

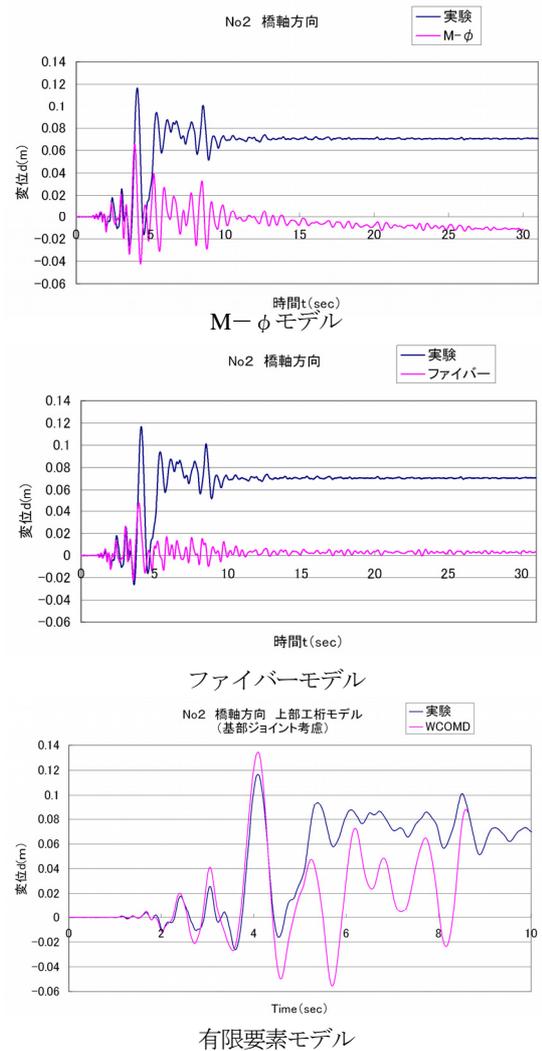


図-3 天端変位の比較 (せん断破壊型供試体)

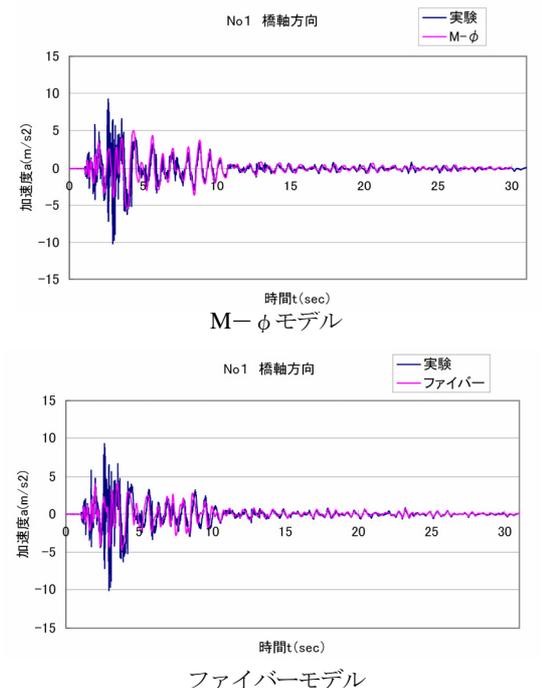


図-4 天端加速度の比較 (曲げ破壊型供試体)

位相特性はおおむね解析で再現できていると思われる。せん断破壊型のPWRI02については、振幅の大きな3秒付近では実験と解析の差が大きいが、振幅の小さい部分ではおおむね一致している。これは、振幅の小さいところで構造物の応答よりも強制加振の影響の方が大きくなっているためではないかと推定される。

(3) 断面力に着目した評価

前述のとおり、M-φモデルとファイバーモデルではせん断破壊型であるPWRI02の変形特性を表現できていなかったが、断面力に着目した場合にも同様であるか確認した。図-6は上側の段落とし部に相当する位置での時刻歴せん断力を示しており、赤線は同じ位置でのせん断耐力を表している。同図に示すとおり、2秒から3秒付近にかけて発生せん断力がせん断耐力を超過しており、特に大きな破壊を生じた3秒付近で超過の程度が激しい。この結果は実現象と整合がとれているといえ、梁要素を用いた解析ではせん断破壊時の変形を表現できないが、せん断破壊に対する安全性の確認は可能であると考えられる。

同様な観点から、曲げ破壊型のPWRI01についても基部の曲げモーメントと曲げ耐力の関係を確認した(図-7)。その結果、2秒から3秒付近で曲げモーメントが曲げ耐力に達しており、被りコンクリートが剥落したタイミングとおおむね一致している。したがって、曲げについても曲げ破壊に対する安全性の確認は可能であると考えられる。

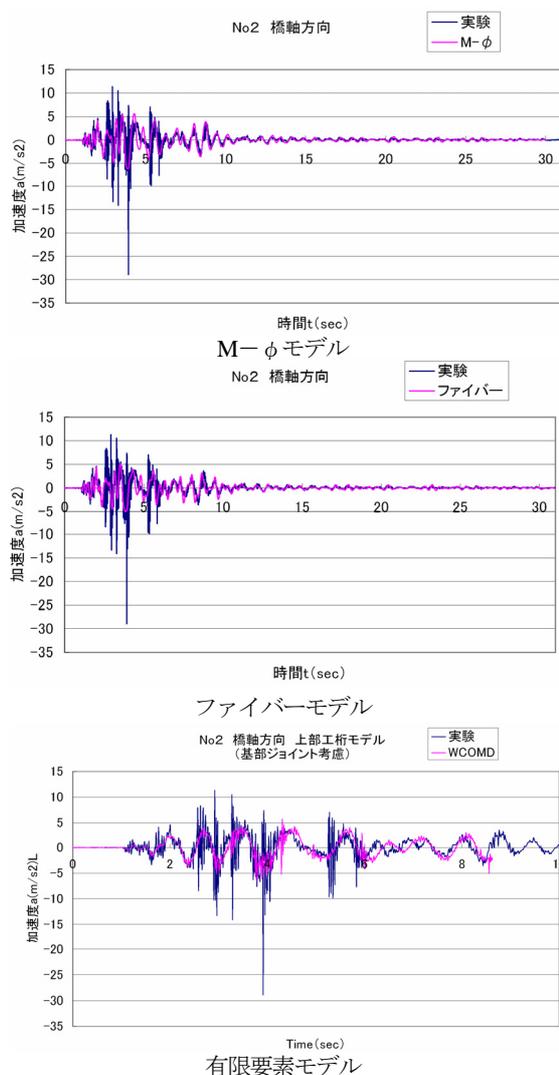


図-5 天端加速度の比較 (せん断破壊型供試体)

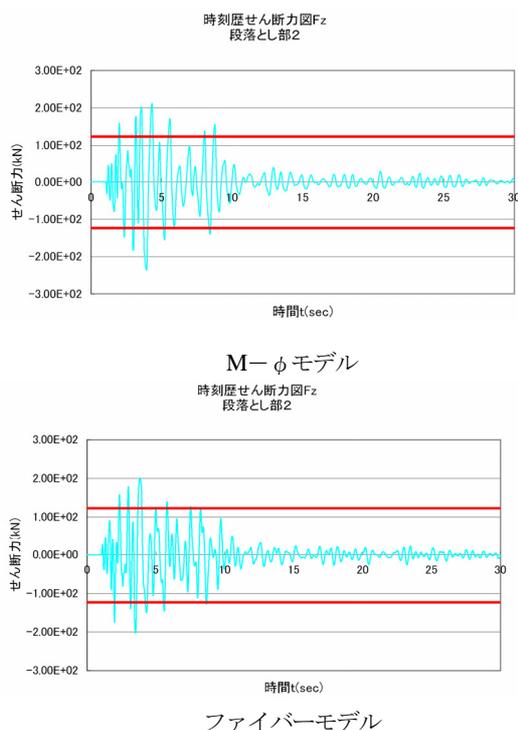


図-6 段落とし部せん断力の比較 (せん断破壊型供試体)

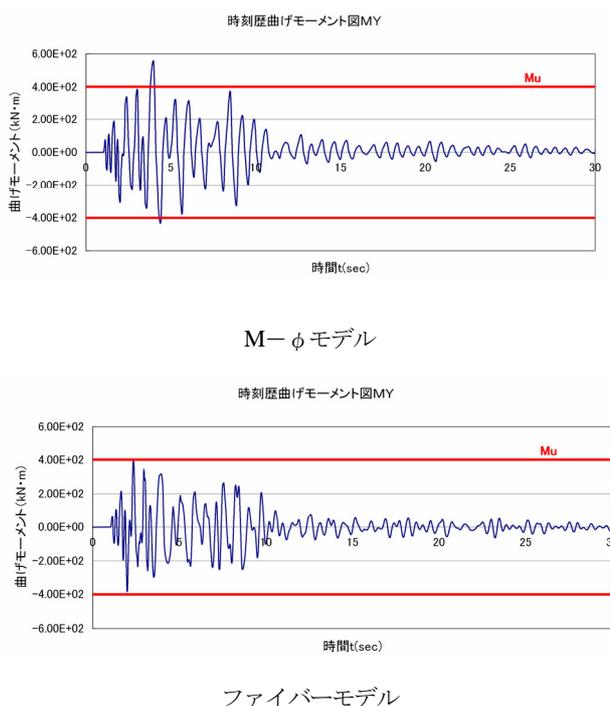


図-7 基部曲げモーメントの比較 (曲げ破壊型供試体)

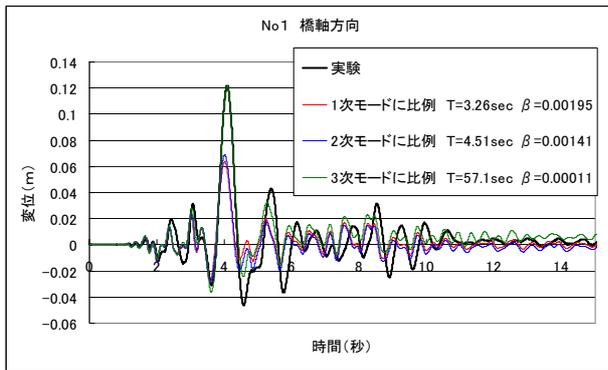


図-8 天端変位の比較 (曲げ破壊型供試体, ファイバーモデル)

(4) 減衰に着目した評価

梁要素を用いたモデルの最大変位が実験値と異なっている原因の一つとして、減衰の影響が考えられることは既に述べたが、その感度を確認するために減衰をパラメータとして試算を行った。ファイバーモデルの減衰を3通りに変化させた結果を図-8に示す。同図より、減衰を最も小さくしたケースでは実験値と解析結果がよく一致しており、当初設定した減衰がやや過大であったと考えられる。ただし、最も一致したケースでも、最大値以降は実験値と解析結果にずれが生じており、減衰だけでは挙動の違いを表現できていない(他にも要因がある)こともあわせて確認できた。

5. まとめと課題

本報告では、RC単柱の振動台実験結果を対象に複数の解析モデルを用いてシミュレーションした結果と、各解析法の適用性に関して考察した結果を示した。試算の結果、梁要素を用いる方法では曲げ破壊する供試体の変形や破壊状態を一定の精度で再現できること、せん断破壊する供試体については有限要素法のようなやや精度の高いモデルを使わなければ変形状態を再現できないことが確認できた。シミュレーション結果が示すとおり、解析方法にはそれぞれ適用範囲があり、再現しようとする現象にあった手法を選定することが重要であると考えられた。

以上、現状で一般的に用いられる解析手法を用いて破壊実験の再現解析を実施したが、各モデルで前提としている範囲ではおおむね精度良く実験を再現できていたと考えられる。今回対象とした実験は最終的に供試体の破壊がかなり進行しており、最終状態を解析で忠実に再現するには至っていないが、今後、被りコンクリートの剥落や主鉄筋の座屈、せん断破壊後の大きなずれ変形を再現できるような高精度な構成則が開発

されれば、それらを組み込むことで解析的に実現現象を再現できる範囲が広がってくると思われる。性能設計が主流になってきている現状を鑑みると、より破壊に近い状態を解析的に再現する重要性は高いといえ、より高精度な構成則や解析法の開発が望まれる。

謝辞：本報告は、E-Defense橋梁耐震実験研究実行部会内の解析WGにおける活動の一部をとりまとめたものであり、関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 梶原浩一, 右近大道, 川島一彦: E-Defenseを用いた大型橋梁実験の目的と概要, 第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.23-28, 2007.
- 2) 堺淳一, 運上茂樹, 右近大道: 兵庫県南部地震におけるRC橋脚の被災再現のための振動台実験, 地震工学論文集, Vol.29, 2007. (投稿中)
- 3) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.
- 4) 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
- 5) K. MAEKAWA, A. Pimanmas, and H. OKAMURA: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.

(2007.6.29 受付)