土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など 解析技術適用の事例とその効果

ファイバーモデルによる鉄筋コンクリート柱の 解析精度の検証例

(株)フォーラムエイト 大阪支社 支社長 青戸 拡起

1. はじめに

実際の地震と同様に、3次元地震動を考慮した非 線形挙動を検討する場合や、1方向を加振する場合 でも立体構造における非線形挙動を検討する場合 は、ファイバーモデルに基づく非線形要素(=ファ イバー要素)を用いた解析が望ましい。

今回は、鉄筋コンクリート柱の3次元振動台実験 の結果を利用して、ファイバー要素による解析の精 度検証を実施するとともに、現状の照査技術を考察 する。なお、ここでは、UC-win/FRAME(3D)を用い て検証を実施する。

2. 鉄筋コンクリート柱の振動台実験 1) 実験概要^{1) 2) 3) 4)}

断面形状の異なる3体の試験体を対象にした、水 平2方向加振による鉄筋コンクリート柱の振動台実 験を紹介する。

実験で対象とする鉄筋コンクリート柱は、それぞ れ図-1に示す正方形(600mm×600mm)、円形(直 径600mm)、長方形(800mm×450mm)の断面を有 している。また、柱基部での応力が1.0N/mm²にな るよう、ウェイトが調整されている。諸元を表-1 に整理する。いずれの供試体も、せん断スパン比は 5である。そして、1995年の兵庫県南部地震におい てJR鷹取駅で観測された波形を利用して、X方向 にEW成分、Y方向にNS成分を入力する。鉛直動 は無視する。ただし、時間軸は50%に圧縮し、振幅 は表-2に示す割合で調整して、Run1、Run2を続



表-1

	Case①	Case2	Case3	
断面寸法	600mm×600mm	直径600mm	800mm×450mm	
主鉄筋	D10×48本	D10×48本	D10×48本	
帯鉄筋	D6@75mm	D6@75mm	D6@75mm	
材料特性				
コンクリート <i>σ</i> ′ _c (N/mm²)	34.1	33.7	30.4	
コンクリートE _c (kN/mm²)	32.7	33.0	26.3	
鉄筋σ _{sy} (N/mm²)	384(主) 350(帯)	372(主) 340(帯)	373(主) 316(帯)	
鉄筋E _{sy} (kN/mm²)	183(主) 185(帯)	179(主) 180(帯)	175(主) 164(帯)	

表-2 入力地震動の振幅(原波に対する割合)

	Case①	Case	Case ³
Run1	20%	15%	15%
Run2	100%	80%	90%

けて加振する。

2)実験結果^{1)2) 3) 4)}

加振終了後の損傷図を図-2に示す。いずれの供 試体も、柱基部から400~500mm程度の高さまで、 被りコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が生じ ているが、軸方向鉄筋の破断までには至っていな い。また、被りコンクリートの剥落している箇所が 柱の基部ではなく、柱基部からやや上側の位置を中 心に広がっている。これは、被りコンクリートの剥



(a)正方形断面



(b)円形断面



図-2 最終損傷状況¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

落が、主に主鉄筋座屈によって生じたためと推察される。

ファイバー要素を用いた解析との比較 1) 解析モデル

図-3に、解析モデルを示す。0.5D(D断面高さ) を要素長さにもち、要素中央において剛性変化を評 価するファイバー要素を、柱部分全域に用いてい る。フーチング、ウェイト部分は剛域、梁部分は弾 性梁要素として扱う。



図-3 解析モデル

ファイバー要素の断面は、50分割程の微小要素 に分け、被りコンクリート、コアコンクリート、そ して鉄筋に、それぞれの応力ひずみ履歴を与える。 コンクリートの応力ひずみ曲線は、骨格曲線を道示 Vの鉄筋コンクリート橋脚に用いるモデルを基本と し、履歴則を堺ー川島らの提案するモデルで与える (図-4a)。被りコンクリートについては、圧縮抵抗 が0(=応力が0)となるよう、軟化直線をのばして いる。また、鉄筋の応力ひずみ曲線は、降伏後の勾 配をEs/100とするバイリニア型の骨格とし、履歴 則は堺ー川島らの修正方法を取り入れたMenegotto-Pintoモデルで与える(図-4b)。よって、座屈は考 慮していない。



(a)コンクリート



(b)鉄筋 図-4 応力ひずみモデル

動的解析の解法は、Newmark β 法($\beta = 1/4$)に よる時刻歴解法とする。減衰については各部材とも 2%の粘性減衰を与え、瞬間剛性に比例させる要素 別剛性比例型を用いる。ただし、ファイバー要素に ついては、履歴減衰が支配的になるよう、粘性減衰 は鉄筋剛性のみに比例させるモデルとしている。幾 何学的非線形を考慮し、幾何剛性については逐次更 新する。また、収束計算を全Stepで行う。なお、本 検証の結果は全て、全Stepで 0.1(kN)および 0.1(kNm)未満の不平衡力であることを確認している。

2)解析結果

3つの供試体の解析結果を、図-5、6に示す。これは、慣性力作用位置(=柱基部から3mの位置)の 応答変位を示したものである。

なお、実験概要に示した入力地震動の条件は、加 振装置に入力する条件となるものであり、実際に再 現される揺れは加振装置の性能に依存するため、



(c)長方形断面

図-5 解析結果と実験結果の比較(変位時刻歴波形)

フーチング上で観測された加速度波形と加振装置の 入力波形は一致しないことが多い。そこで、この種 の解析にあたっては、フーチング上で観測された加 速度波形を入力して解析することが望ましいのであ るが、そのデータが公開されていないため、加速度 波形の原波を加振装置の入力波形と同条件(**表**-2)で調整して、解析にも用いることとしている。 よって、解析結果は、荷重条件を忠実に再現できて いないので、結果を考察する際には注意が必要であ る。



(b)円形断面

a. 正方形断面

図-5を見ると、7秒付近で大きな振幅が生じ、その後、最大変位が生じる。最大変位は実験よりも解析結果のほうがやや小さい。ただし、最大値が生じ





る付近までの時刻歴波形は、実験結果を非常によく 再現できており、その後の挙動が大きくずれる傾向 にある。また、解析結果の方が振動の周期が短いこ とから、実験では主鉄筋に座屈が生じたのに対し解 析でこれを考慮していないこと、また、主鉄筋の フーチングからの抜け出しを考慮していないことな どにより、剛性の低下を十分に捉えていないためこ の差が生じていると推察される。

図-7に、軸方向の変位波形(解析結果のみ)を 示す。鉄筋が降伏するような非線形領域の振動で は、単柱構造の場合でも、その中立軸の移動量が大 きく、それに伴い柱軸方向にも振動が発生する。こ の現象は実験でも確認されており、実験では最大で 28mmの軸方向変位が観測されている。

b. 円形断面

図-5を見ると、正方形断面と同様、7秒付近で 大きな振幅が生じ、その後、最大変位が生じる。最 大変位は実験よりも解析結果のほうがやや小さいの



図-7 正方形断面供試体における鉛直軸方向の応答変位波形(解析結果のみ)

は、正方形断面と同様である。ただし、円形断面の 場合は、最大値が生じた後の時刻歴波形も、実験結 果を非常によく再現できている。図-2を見ると、 円形断面の場合は、主鉄筋座屈やそれに伴う被りコ ンクリートの剥落が他の供試体よりも非常に狭いた め、主鉄筋座屈などによる剛性低下の影響がやや小 さかったことが推察される。よって、解析結果は実 験結果とよい一致を示したものと考えられる。

図-8に、柱基部の要素における最大圧縮ひずみ 分布(解析結果のみ)と、実験における座屈した鉄 筋位置を示す。図aにおいて、断面外周の黒く塗り つぶされている箇所は、コンクリート応力が最低応 力(被りコンクリートは0、コアコンクリートは 0.2・o'cc)に達している箇所を表している。図aよ り、左上方向に最も大きな変形が生じたことが予想 されるが、これは、座屈した主鉄筋が集まる方向に 一致している。よって、損傷の方向については、十 分に推定できている。



(a)円形断面の最大圧縮ひずみ分布(解析結果)





c. 長方形断面

正方形断面と、ほぼ同様の傾向である。 図-5を

見ると、7秒付近で大きな振幅が生じ、その後、最 大変位が生じる。最大変位は実験よりも解析結果の ほうがやや小さい。ただし、最大値が生じる付近ま での時刻歴波形は、実験結果を非常によく再現でき ており、その後の挙動が大きくずれる傾向にある。

また、解析結果の方が振動の周期が短いことか ら、この差の原因は、正方形断面と同様と推察され る。

4. まとめ

同じせん断スパン比である、正方形断面、円形断 面、長方形断面をもつ各鉄筋コンクリート柱を対象 とした水平二方向加振振動台実験をもとに、ファイ バー要素を用いた解析の精度検証を行った。

解析に利用した入力地震動が厳密ではないもの の、比較の結果、主鉄筋の座屈が発生する付近ま で、すなわち設計上の終局状態に相当する損傷レベ ルまでであれば、三次元挙動が解析でも十分に追え ることが確認できた。主鉄筋の座屈時期を評価する ことはまだ研究の途上にあるが、それが確立されれ ば、解析精度のさらなる向上が期待できることも、 改めて確認できた。

このような、終局状態付近、あるいはそれを考慮 できる動的解析手法が確立されることで、想定をこ える地震が作用した際の既設構造物の損傷状態を適 切に把握できるとともに、より合理的な補強工法検 討が可能になることが考えられる。そして、今後、 実際の地震と同様の三次元挙動を反映した耐震設計 の普及につながるものと期待される。

参考文献

- 1)(独)土木研究所耐震研究グループ耐震チーム:正方形断 面を有する鉄筋コンクリート柱の水平二方向加振振動台 実験、土木研究所資料、第3871号、2003.7
- 2)西田秀明、運上茂樹:水平2方向を受ける鉄筋コンク リート柱の応答挙動に対するファイバーモデル解析の適 用性、第8回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁構造の 耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2005.2
- 3) 西田秀明、運上茂樹:円形鉄筋コンクリート柱の水平 二方向加振振動台実験、第5回地震時保有水平耐力法に 基づく橋梁構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論 文集、2002.1
- 4) 西田秀明、運上茂樹:鉄筋コンクリート構造物の水平 二方向加振振動台実験、土木技術資料、No.45-1、2003