

水平二方向入力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

西田 秀明¹・運上 茂樹²

¹正会員 修(工) 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム 研究員(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム 上席研究員(同上)

1. はじめに

構造物の地震時応答は、地震動と同様三次元挙動となるが、設計や照査は一般に一方向毎に行われている¹⁾。しかし、特に、曲線橋や斜橋、偏心橋脚などのような幾何学的形状が非対称な場合、二軸曲げの影響が顕著になる可能性があるため、その影響の定量的な評価とともに、必要に応じて設計、照査に反映させる必要がある。二方向入力を受ける構造物の応答特性については、建築分野において主に外柱を対象として20年以上前から多数の実験および解析的検討が行われており、静的載荷状態でのFEM解析やファイバーモデル解析、金属の塑性論を応用した二軸曲げモデル解析²⁾の適用性については検証がなされている。土木構造物についても、偏心橋脚³⁾や鋼製橋脚⁴⁾を対象として近年研究事例が増加しており、解析の適用性についても、建築分野と同様に耐力劣化が生じる付近までは良く追跡できるという結論を得ている。しかし、既往の研究のほとんどは静的載荷実験を対象としており、実地震時のような動的応答に対する解析手法の適用性についての検証は、実験事例も少なく十分とはいえない。

本研究では、動的応答に対する実験として、著者らがこれまでに行ってきた断面形状の異なる鉄筋コンクリート(RC)柱3体の水平二方向加振振動台実験⁵⁾⁶⁾のシミュレーション解析を行い、動的応答に対する解析手法の適用性について検証した。ここでの解析手法としては、近年実務設計でも用いられるケースが増えつつあるファイバーモデル解析を対象とした。

2. 振動台実験の概略

断面形状を正方形(600×600mm)、円形(直径600mm)、長方形(800×450mm)としたRC柱に対して水平二方向に地震波を入力した振動台実験を行った(写真-1)。

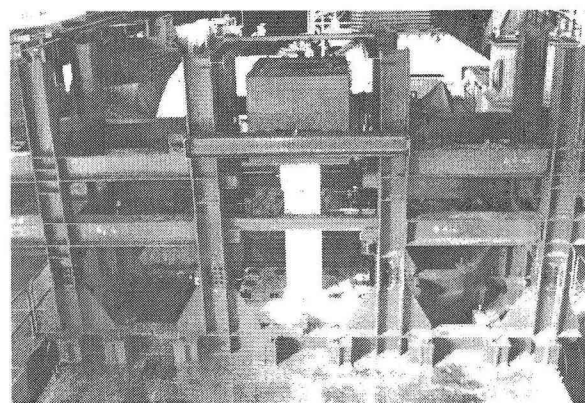


写真-1 振動台実験の状況

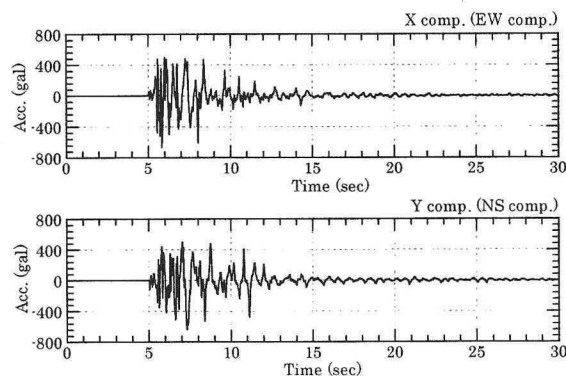


図-1 入力波形 (JR 鷹取駅波)

表-1 振動台入力波の原波に対する加速度振幅の割合

	Run1	Run2
正方形	20%	100%
円形	15%	80%
長方形	15%	90%

入力波は、1995年兵庫県南部地震におけるJR鷹取駅観測波(図-1)⁸⁾を用いた。模型の縮尺を考慮し、時刻歴を50%に圧縮したうえ、軸方向鉄筋が降伏に達しないレベル(Run1)と部材が明らかに非線形応答するレベル(Run2)となるように加速度振幅を調整した2ケース(表-1)でそれぞれ加振した。

供試体は、柱基部から慣性力の作用中心位置までの高さ3,000mm、柱基部の軸応力度1.0N/mm²、コンクリー

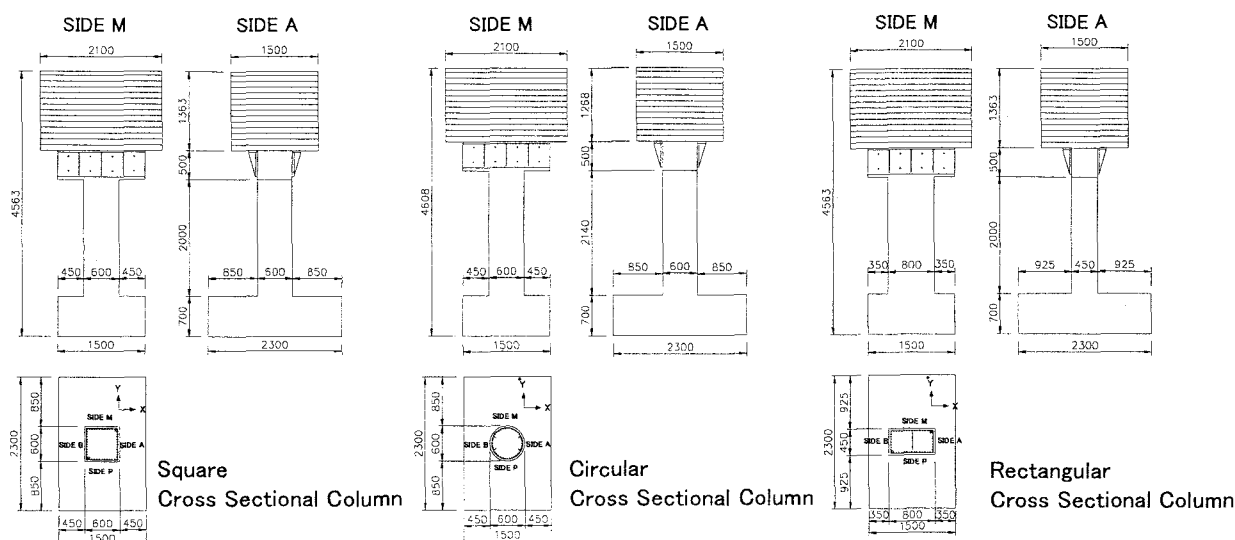


図-2 供試体諸元

ト設計基準強度 27MPa、鉄筋 SD295 (軸方向鉄筋 D10、帯鉄筋 D6)、軸方向鉄筋比約 1%、帯鉄筋間隔 75mm については同一となるように設計した。

最終損傷図を図-3 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、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が生じたが、軸方向鉄筋の破断までには至らなかった。応答特性については、解析結果との比較のなかで示す。

3. 解析方法

(1) 解析コード

ファイバーモデルの解析コードには COM3Fiber をアレンジしたもの⁹⁾を用いた。このコードでは、鉄筋やひびわれによる局所的な応力分布を空間平均化した平均応力-平均ひずみ関係でモデル化し、部材全体の応答を追跡する分散ひび割れモデルを採用しているが、本解析ではさらに帯鉄筋の拘束効果や軸方向鉄筋の座屈を考慮している。

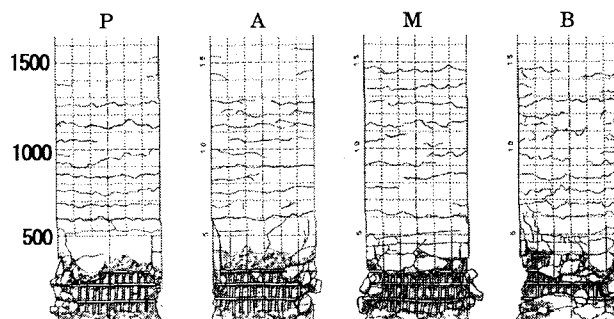
(3) コンクリートの材料構成則

コンクリートの圧縮領域には、弾塑性破壊モデルを採用し、過去に経験した最大ひずみを履歴変数とした、除荷・再載荷を含む経路依存型の構成則としている。

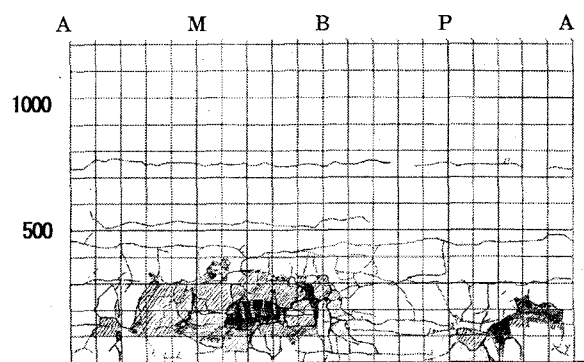
コンクリートのひび割れ発生後の引張挙動モデルは、ひび割れ後も鉄筋との付着作用によりコンクリートが引張力を伝達することを考慮した Tension Stiffening モデルとしている。ただし、軸方向鉄筋から離れた無筋コンクリート領域では、Tension Softening を考慮し、ひび割れ後の剛性低下を大きくしている。以上のコンクリートのモデルを図-4 に示す。

(4) 鉄筋の材料構成則と座屈のモデル化

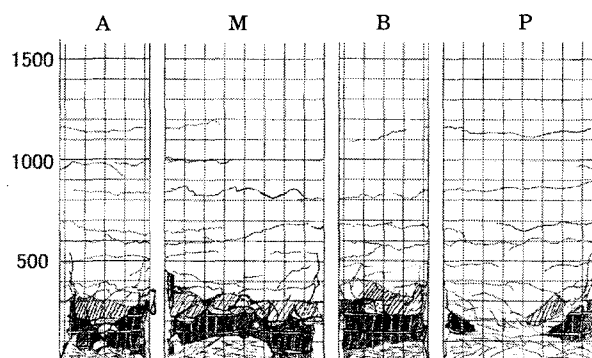
座屈判定は、座屈した軸方向鉄筋がかぶりコンクリー



(1) 正方形断面



(2) 円形断面



(3) 長方形断面

図-3 最終損傷図

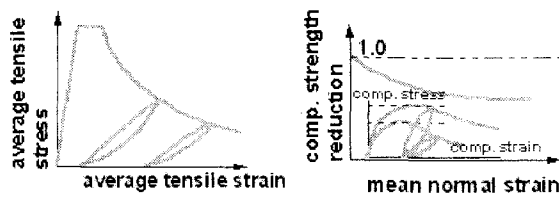


図-4 コンクリートの材料構成則モデル
(左：引張 右：圧縮)

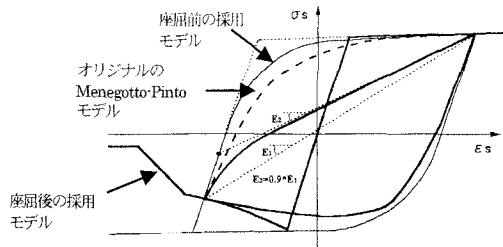


図-5 軸方向鉄筋のモデル

トを押し出す作用によって生じるかぶりコンクリートのひびわれ幅が限界値に達すると剥落が生じ、これを超えるとかぶりコンクリートは応力を完全に負担しないとするMaekawaらの提案によった⁹⁾。軸方向鉄筋モデルは、図-5のようなMenegotto-Pintoモデルを修正したモデルとし、座屈曲線はDhakalらによった¹⁰⁾。また、座屈長 L はDhakalらの細長比 (L/D) と鉄筋降伏強度をパラメータとしたもので、座屈後の鉄筋形状を $\cos$ 関数と仮定し、軸力と帯鉄筋による横拘束力に関するエネルギーの釣り合いを考慮して決定するモデルとした¹⁰⁾。

(5) 解析モデルと解析条件

柱部の柱軸方向の要素分割は、正方形および長方形は、柱基部から225、375、400、400、600mm(図-6)、円形は225、375、400、400、740mmとし、フーチング、横梁、重錘をそれぞれ一要素とした。ここで、柱部はファイバー要素、フーチング、横梁、重錘は弾塑性要素とした。ファイバー要素は、せん断変形を許容するTimoshenkoはりとして扱うがせん断剛性は十分大きいと仮定し非線形性はモデル化していない。断面は、正方形では 15×15 、円形では15(半径方向) $\times$ 20(回転方向)、長方形では 11×15 等分割とした。材料強度は、表-2に示す実験における材料強度をそのまま入力した。重量はRC部分の単位体積重量を 24.5 kN/m^3 として算出した。フーチング下面を完全固定として、ここに振動台上で記録された加速度を作用させた。応答解析は、Newmark β 法による直接積分法(積分時間間隔1/1000秒)により行った。この際、粘性減衰は考慮しなかった。解析はRun2の主要動付近の10秒間を対象とした。

4. 解析結果

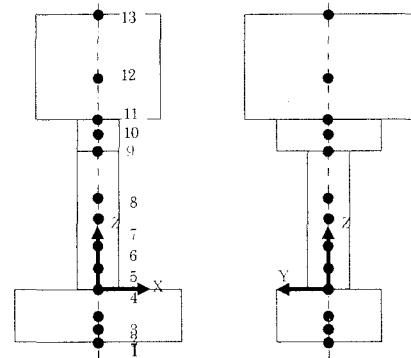


図-6 各供試体の解析モデル(正方形断面の場合)

表-2 供試体材料特性(N/mm²)

断面形状	コンクリート		鉄筋	
	σ_{ck}	$E_c (\times 10^4)$	σ_{sy}	$E_s (\times 10^5)$
正方形	34.1	3.27	384	1.83
			350	1.85
円形	33.7	3.30	372	1.79
			340	1.80
長方形	30.4	2.63	373	1.75
			316	1.64

鉄筋欄 上段：軸方向鉄筋 下段：帯鉄筋

表-3 固有値解析結果

(1) 正方形断面

次数	固有周期(秒)	有効質量比(%)		
		X	Y	Z(鉛直)
1	0.205	78.5	0.0	0.0
2	0.204	0.0	78.6	0.0
3	0.017	5.3	0.0	0.0
4	0.016	0.0	0.0	84.1
5	0.016	0.0	5.3	0.0

(2) 円形断面

次数	固有周期(秒)	有効質量比(%)		
		X	Y	Z(鉛直)
1	0.245	75.6	0.0	0.0
2	0.245	0.0	75.7	0.0
3	0.019	5.2	0.0	0.0
4	0.018	0.0	5.2	0.0
5	0.017	0.0	0.0	81.0

(3) 長方形断面

次数	固有周期(秒)	有効質量比(%)		
		X	Y	Z(鉛直)
1	0.189	0.0	77.0	0.0
2	0.108	77.1	0.0	0.0
3	0.015	0.0	0.0	80.3
4	0.013	0.0	3.3	0.0
5	0.008	3.3	0.0	0.0

(1) 固有値解析結果

固有値解析の結果を表-3に示す。正方形および円形断面では、鋼板ウエイトの影響で近接した周期にモードが存在しているが、1次モード(水平)は正方形0.20秒、円形0.25秒である。長方形は、長辺方向0.19秒、短辺方向0.11秒である。実験前の微動測定から推定した固有周期は、順番に0.24秒、0.26秒、0.31秒、0.21秒であり、円形を除き解析の方が剛性を高めに評価する

結果となった。

(2) 慣性力作用中心位置における軌跡と応答波形

慣性力作用中心位置における軌跡の比較を図-7に示す。ここで、実験値は20Hz以上を除去するハイカットフィルターをかけたものを示している。軌跡の比較では、応答加速度、応答変位共に最大応答の方向や全体的な形状は類似しているものの、解析の応答値が実験に比べて小さくなっている。特に、正方形の場合で顕著であるが、これは他の2ケースに比べ相対的に入力が大きいかつ損傷も大きかったため、このような損傷が進展する領域までは解析で十分に追跡できなかったことが原因である可能性がある。

慣性力作用中心位置における応答波形の比較を図-8に示す。正方形断面の場合では、応答変位は最大応答となる7.5秒付近まで、応答加速度は8秒付近まで実験結果をよく再現している。これ以降は、実験では周期の長い波が卓越しているが、解析ではそこまで周期の変化は顕著ではない。また、残留変位は、実験では各方向10~20mm程度なのに対し、解析ではX方向120mm、Y方向80mm程度と大きくなった。

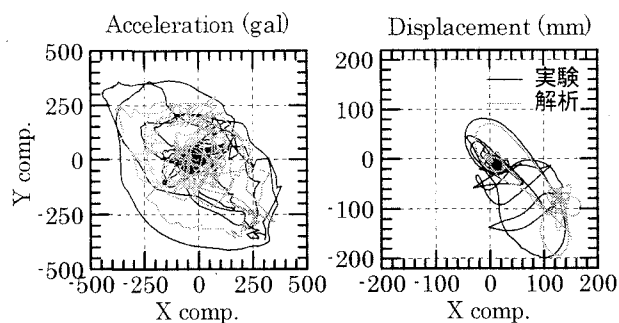
円形断面の場合では、応答変位は最大応答を超えて8.5秒付近まで、応答加速度は7.5秒付近以降若干解析のピーク値が小さいものの15秒付近まで実験結果をよく再現している。しかし、残留変位については、正方形の場合と同様、実験では各方向10mm程度に対し、解析ではX方向40mm、Y方向80mm程度生じており実験とは異なった。

長方形断面の場合では、応答変位は最大応答を超えて9秒付近まで、応答加速度は10秒付近まで実験結果をよく再現している。残留変位は、X方向については解析でも10mm程度と小さいが、Y方向では実験では10mm程度に対して解析では100mm程度と大きく異なった。

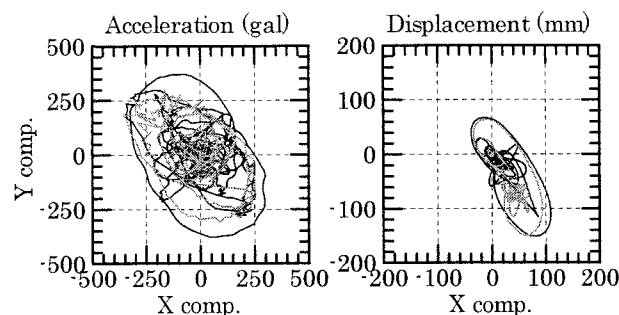
以上より、断面形状によらず、最大応答を過ぎまではファイバーモデル解析により応答加速度、応答変位とも追跡できること、ただし、残留変位については実験に比べて大きくなり解析による推定は困難であるといえる。

(3) 周波数特性

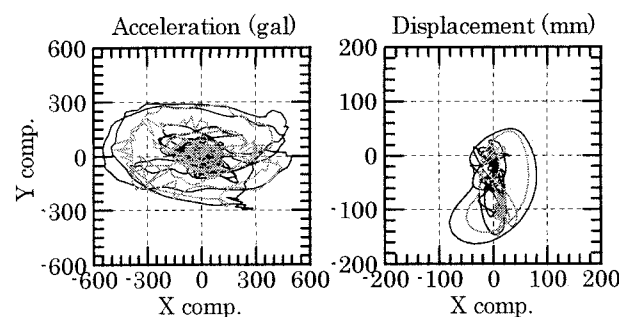
周波数特性を検討するために、フーリエ振幅スペクトルおよび周波数増幅関数を求めた。実験と解析の慣性力作用位置における応答変位のフーリエ振幅スペクトルの比較を図-9に示す。いずれの方向もピーク周期の位置はほぼ同じであり、周期0.5~1.0秒付近のY方向では振幅の絶対値も近い値になっている。しかし、これより短周期では解析における振幅が実験のそれよりも大きくなっている。また、ここには示していないが、円形および長方形断面でも、ピーク周期の位置はほぼ同じであるが絶対値については必ずしもよく対応してない結果となった。



(1) 正方形断面



(2) 円形断面



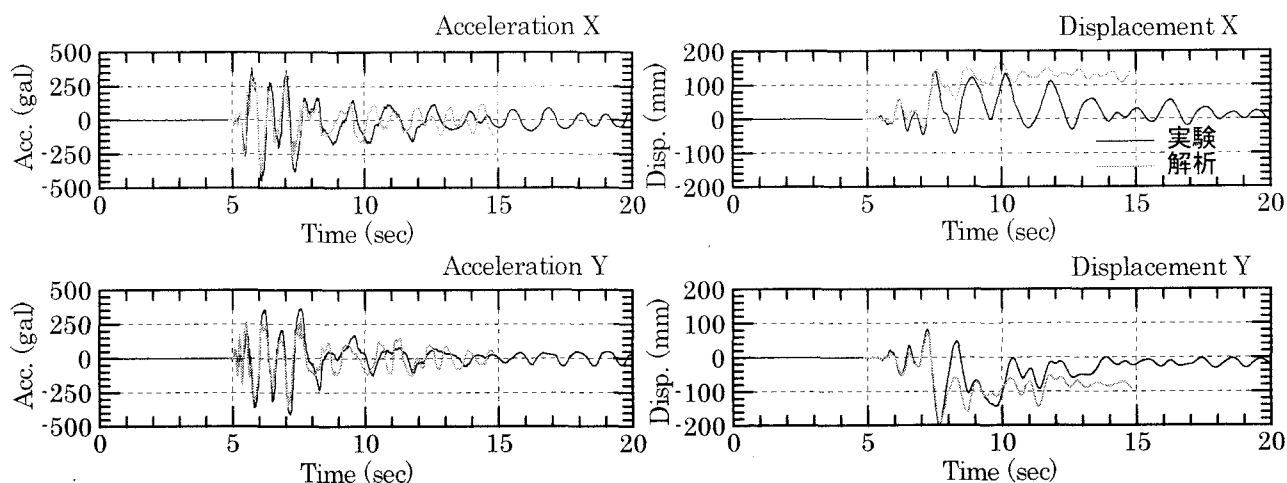
(3) 長方形断面

図-7 慣性力作用中心位置における実験と解析の応答加速度および応答変位軌跡の比較

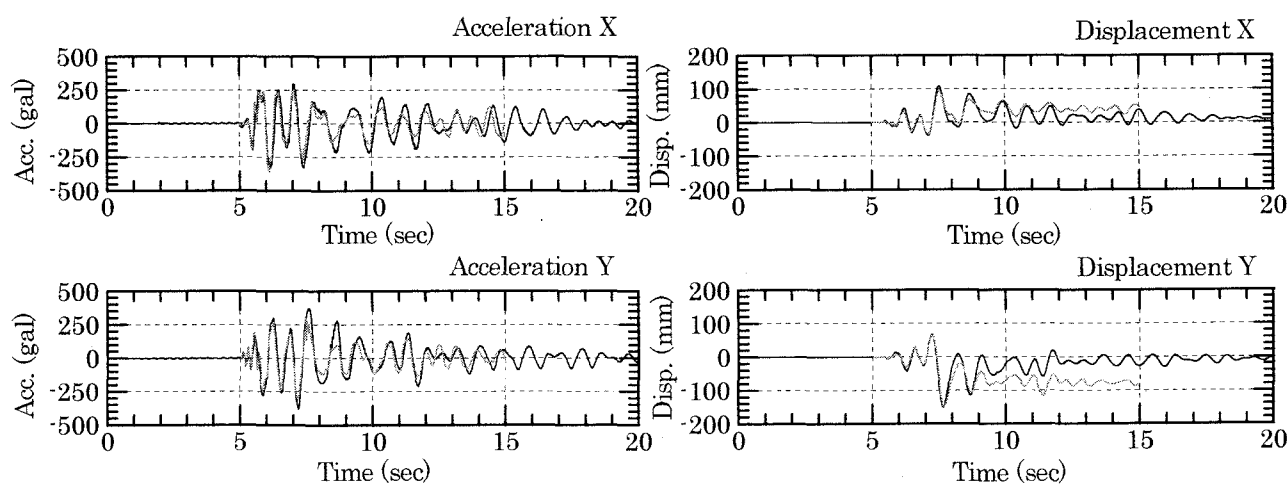
振動台上に対する慣性力作用位置の加速度振幅スペクトルの比(周波数応答関数)を図-10に示す。フーリエ振幅スペクトルと同様に、全体的な傾向は解析でとらえているが、ピーク値の絶対値は解析における固有周期付近を除いて実験値の方がおおむね大きくなっている。このことは、図-7、図-8において解析の応答値が小さいことと調和的である。

(4) 解析による各要素の発生応力と損傷状況の比較

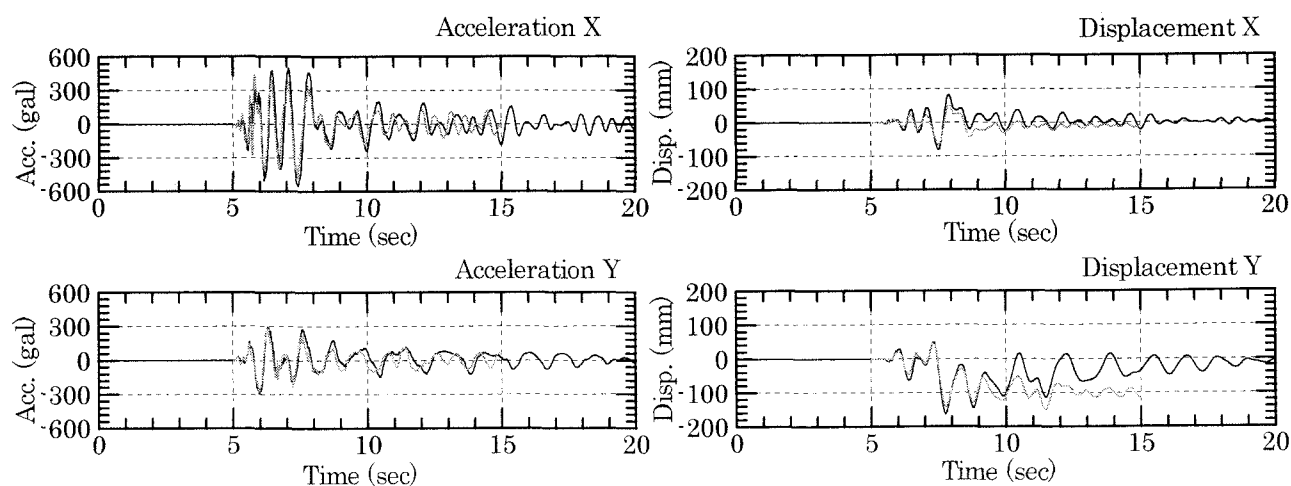
正方形断面の場合の、柱基部の角部に位置する軸方向鉄筋の発生応力波形を図-11に示す。また、解析上かぶりコンクリートが剥落と判定された位置(6.205秒)を●で併せて示す。かぶりコンクリートの剥落が生じたと判定された時刻は、最大応答変位が生じる前である。実験において厳密にかぶりコンクリートが剥落し始めた時刻を特定することは困難であるが、ビデオ記録を見る限



(1) 正方形断面



(2) 円形断面



(3) 長方形断面

図-8 慣性力作用中心位置における実験と解析の応答加速度および応答変位波形の比較

り最大応答変位が生じた時刻付近から損傷が始まっており、解析結果と1.5秒程度ずれている。これは、解析における柱基部の要素長が短いことや軸方向鉄筋の伸び出しをモデル化していないことにより、解析上柱基部の要

素に実際より大きなひずみが発生する（変形が狭い範囲に集中する）ことが影響していると考えられる。これらが全体の応答特性に及ぼす影響はそれほど顕著ではないが、損傷時期の特定を考慮する場合は注意する必要がある

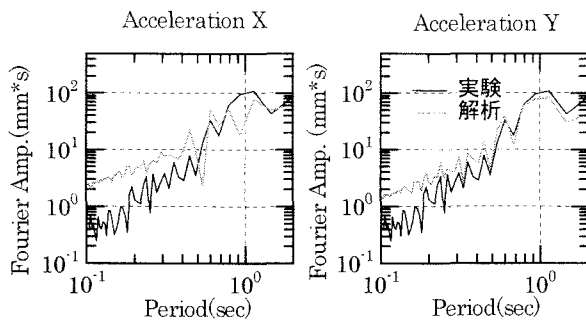


図-9 慣性力作用位置における応答変位のフーリエ振幅スペクトルの比較 (正方形断面)

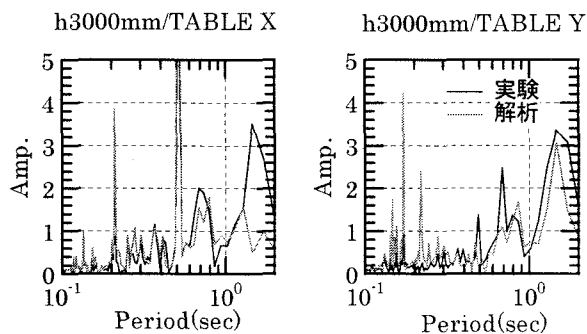


図-10 振動台上に対する慣性力作用位置の応答加速度のフーリエ振幅スペクトル比の比較 (正方形断面)

ることがわかる。

この傾向は、ここには示していないが、円形断面、矩形断面の場合も同様であった。

5. 結論

水平二方向入力した断面形状の異なる鉄筋コンクリート柱の振動台実験に対して、ファイバーモデルによりシミュレーション解析を実施し、応答特性や損傷状況を比較した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 慣性力作用中心位置における応答特性 (応答加速度、応答変位) を比較した結果、断面形状によらず、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈のような断面損傷が生じる最大応答を過ぎたあたりまでファイバーモデル解析により実験結果をほぼ追跡できる。
- (2) ただし、残留変位については、解析の方が大きくなり推定精度は良くない。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編」，2002.3
- 2) Takizawa H. and Aoyama H. "Biaxial Effects in Modeling Earthquake Response of R/C Structures." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.4, 1976: 523-552.
- 3) 川島ら：逆L字型鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する研究,土木

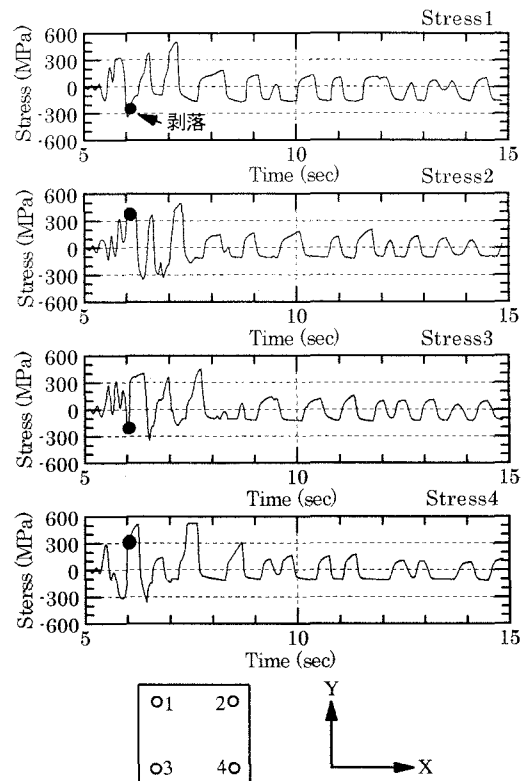


図-11 解析により得られた柱基部位置における角部軸方向鉄筋の発生応力波形 (正方形断面)

学会論文集, No.745/I-65, pp.171-189, 2003

- 4) 杉浦ら：繰返し水平2方向力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 第3回鋼構造の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.97-104
- 5) 西田ら：正方形RC柱の水平二方向非線形領域加振振動台実験, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.917-920, 2001.
- 6) 西田・運上：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の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.259-264, 2002.
- 7) 西田・運上：長方形断面を有する鉄筋コンクリート橋脚の水平二方向加振振動台実験, 第6回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.71-74, 2003
- 8) Nakamura Y. "Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information." No.23c, RTRI, 1995.
- 9) K. Maekawa, A. Pimans and H. Okamura: Nonlinear mechanics of reinforced concrete, Spon Press, 2003.
- 10) 土屋ら：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効要素立体解析, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.131-143, 2001.
- 11) R. DHAKAL: Enhanced Fiber Model in Highly Inelastic range and Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete, 東京大学博士論文, 2000