

三次元入力を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐震性評価

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 14～平 18
担当チーム：耐震研究グループ（耐震）
研究担当者：運上茂樹、西田秀明

【要旨】

現在の道路橋を始めとした我が国の耐震設計では、一般に、地震力は橋軸方向及び橋軸直角方向に別々に作用するものとしている。しかし、実際には地震力は三次元的に作用することから、構造物は複雑な挙動を示す。本研究では、鉄筋コンクリート柱を対象に、水平二方向及び鉛直方向の三次元入力を受けた場合の耐力、変形性能、破壊特性等を把握するとともに、水平一方向入力を受けた場合との挙動特性の相違を明らかにした。さらに、三次元入力を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐震設計法を提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート構造物、三次元入力、振動台実験、ファイバー解析

1. はじめに

現在の道路橋を始めとした我が国の耐震設計では、一般に、地震力は橋軸方向および橋軸直角方向に別々に作用するものと仮定している。しかし、実際には地震力は三次元的に作用することから構造物は複雑な挙動を示す。この影響を考慮するために、海外の耐震基準や ISO の耐震基準（案）では、水平二方向或いは鉛直方向を加えた三方向の地震力を合成させて耐震設計する方法が採用されている。しかし、合成の方法は基準によって異なる上、その根拠が明確でない。このようなことから、水平二方向のみならず鉛直方向入力の影響も含めた地震力が構造物の挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、必要に応じて我が国においても耐震設計基準へ反映していくことが必要とされる。

以上のような背景から、鉄筋コンクリート単柱を対象として、水平二方向及び鉛直方向の三次元入力を受けた場合の耐力、変形性能、破壊特性を把握するとともに、水平一方向入力を受けた場合との挙動特性の相違を明らかにすることを目的として検討を行った。さらに、三次元入力を受ける鉄筋コンクリート構造物の地震時挙動を追跡可能な解析モデルの提案並びに検証を行い、耐震設計法の提案を行った。

2. 振動台実験による三次元入力を受ける鉄筋コンクリート柱の応答特性の把握

2.1 振動台実験の概要

耐震設計で一般に考慮している水平一方向加振時における構造物の耐力、変形性能や応答特性、破壊特性については、実構造物における計測値や、正負交番

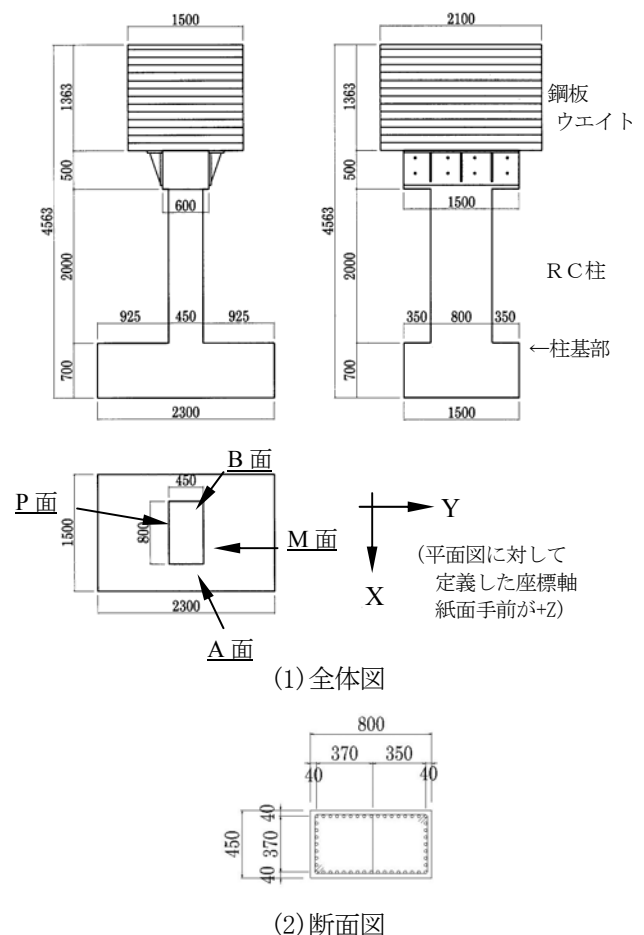


図-1 実験供試体(単位 mm)

載荷実験や振動台実験などが多数行われている。これに対し、水平二方向或いは三次元入力を受ける場合については、実構造物の計測値や実験データが非常に少ないため十分に把握されていない。そこで、水平二方



写真-1 セットアップの状況

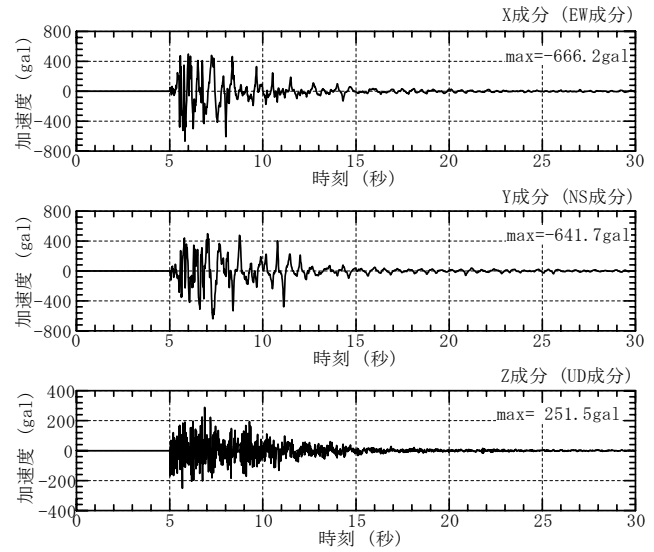
向或いは三次元入力を受ける鉄筋コンクリート構造物の振動台実験を実施し、このような入力を受けた場合の応答特性や破壊特性の把握を行った。

鉄筋コンクリート構造物としては、道路橋橋脚を想定した長方形断面を有する鉄筋コンクリート単柱(以下、RC柱)を対象とした。実験供試体図を図-1、セットアップの状況を写真-1に示す。RC柱は、断面寸法800×450mm、柱部の高さ2,000mmで、軸方向鉄筋比0.95%、帯鉄筋体積比は有効長が異なるため断面軸方向により若干異なるが、小さい断面軸方向に対して0.46%である。コンクリートは設計基準強度27MPa、軸方向鉄筋及び帯鉄筋はともにSD295Aを用いた。RC柱の上部には、RC横梁を介して鋼板ウェイトを載せており、水平方向の慣性力を得るとともに、柱基部での軸応力度が1MPa(軸力比0.037)、柱基部から慣性力作用中心位置までの高さが3,000mmとなるように調整している。実験では、同一諸元の供試体3体に対して、入力波形や加振成分(一方向加振、水平二方向加振及び三方向加振)及び加速度振幅レベルを変えた加振を行った。

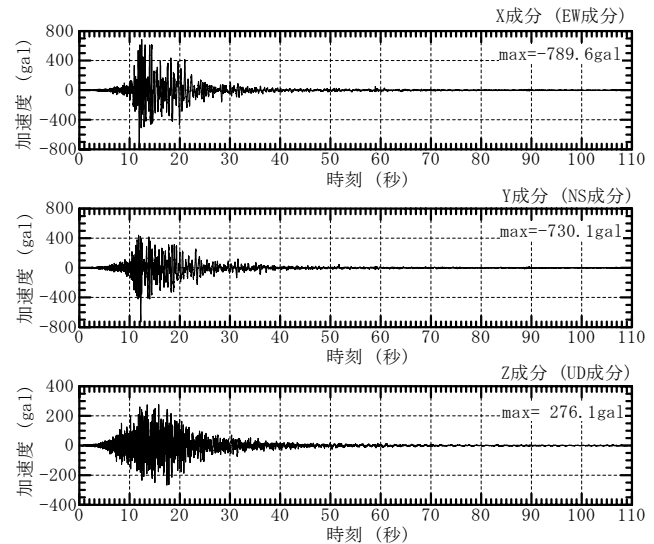
実験におけるパラメータは、加速度振幅レベル(以下、加振レベル)、加振成分及び入力波とした。

入力波は、内陸直下型の地震動(タイプII地震動)と海溝型の地震動(タイプI地震動)を想定した地震波とした。具体的には、タイプII地震動として兵庫県南部地震におけるJR鷹取駅波¹⁾、タイプI地震動として2003年十勝沖地震におけるK-NET直別波(0.2Hz以下をカットした修正波)とした。このうち、K-NET直別波については、地震計位置で液化が生じ、地震記録にもこの影響が含まれていることが指摘されているが²⁾、大きな振幅が比較的長時間続くタイプI地震動の特性を有することに重点をおいて選択したものであり、フィルタリング以外の補正は行っていない。

入力は、原波に対して、時間軸を50%に圧縮(圧縮



(1) JR 鷹取駅観測波



(2) K-NET 直別修正波

図-2 振動台実験に使用した入力波

後の入力波の継続時間は、JR 鷹取駅波 30 秒、K-NET 直別波 110 秒、図-2) するとともに、原波に対して加速度の振幅倍率を変えて加振レベルを調整した。

加振ケースの一覧を表-1に示す。なお、この表には加振後の損傷状況も合わせて示している。ケース1、3、6、7は軸方向鉄筋が弾性範囲にとどまる状態、ケース2、4、9は非線形応答挙動が顕著となる状態、ケース8は部材が若干塑性化する状態、ケース5は顕著な損傷が生じた後に中程度の地震動を受けた状態、をそれぞれ想定して加振レベルを設定した。

2.2 振動台実験結果

2.2.1 損傷状況

各加振後の損傷状況を表-1に示す。ケース2、4及び8を除いたケースでは水平クラックの発生程度であ

表-1 振動台実験の加振ケースと損傷状況

加振ケース	供試体	入力波	加速度 振幅倍率	入力成分	損傷状況	
1	1	JR 鷹取駅 (1995年 兵庫県南部)	0.15	水平二方向	目立った損傷無し	
2			0.90	水平二方向	柱基部から300mm程度の高さまでかぶりコンクリートの剥落と軸方向鉄筋の座屈	
3	2		0.15	三方向	目立った損傷無し	
4			0.90	三方向	柱基部から300mm程度の高さまでかぶりコンクリートの剥落と軸方向鉄筋の座屈	
6	3		K-NET 直別 (2003年 十勝沖)	0.15	一方向 (X方向)	目立った損傷無し
7				0.15	三方向	水平ひびわれ
8				0.40	三方向	水平ひびわれ
9				1.70	三方向	柱基部から300mm程度の高さまでかぶりコンクリートの剥落と軸方向鉄筋の座屈、破断

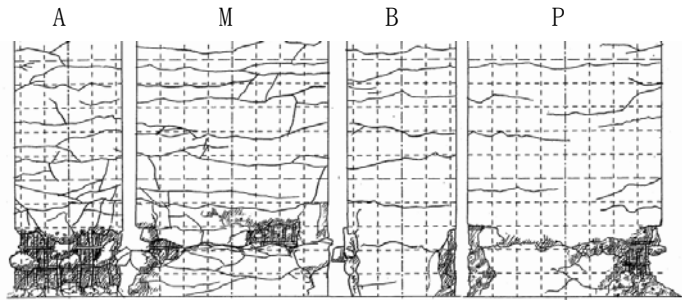


図-3 ケース4加振後の損傷状況



写真-2 ケース8加振後の状況 (MB角部)

った。この際の軸方向鉄筋の柱基部付近でのひずみは、ケース6において目標より大きくなり降伏ひずみを若干超えたものの、ケース1、3及び5では降伏前にとどまっておき、概ね目標通りであった。部材が塑性化することを想定したケース7では降伏ひずみを超えた。

さらに大きな加振レベルであるケース2及び4では柱基部から300mm程度の高さまでかぶりコンクリートの剥落と軸方向鉄筋の座屈、ケース8ではケース4の損傷(図-3)に加え、軸方向鉄筋の破断が生じた(写真-2)。さらに損傷状況を詳細に見ると、かぶりコンクリートの剥落高さや軸方向鉄筋の座屈長が断面位置によって異なっている。例えば、写真-2において、MB角部付近の座屈長に着目すると、短辺方向の面の座屈長が帯鉄筋間隔の2倍程度(約150mm)であるのに対して、長辺方向では帯鉄筋間隔の3倍程度(約225mm)となり、短辺方向と豹変方向における拘束効果の容易が現れている。また、同一の面内でも位置によって座屈の程度(位置や鉄筋のはらみだし具合)には差があることがわかる。このような現象は、一方向加振では顕著には見られず、多方向入力の特徴の一つであるといえる。

2. 2. 2 加振成分の違いと応答特性の関係

一方向加振、水平二方向加振、及び三方向加振と入

力条件を変えた場合の、水平成分の応答特性について比較した。比較は、軸方向鉄筋が降伏以前にとどまる加振レベルであるケース5、1、3、及び顕著な非線形応答を示すとともに損傷が大きくなるケース2と4を対象とした。

軸方向鉄筋が降伏以前にとどまる加振レベルにおける慣性力作用中心位置での加速度及び水平変位の波形を図-4及び5に、また、各最大値を表-2に示す。なお、観測記録には、変位計を設置している剛体フレームの振動やフーチングの回転の影響等が含まれるが、その影響はごくわずかであることから、ごく一部の変位記録に含まれていた高振動数のノイズを除去した以外はフィルター処理等行っていない。

諸元は同じであるが実験時の材料強度等が若干異なるので数値自体の傾向は明瞭でないが、波形を見ると、一方向入力と二方向入力時の変位はあまり差が無い。三方向入力時にはX成分の10秒付近以降で自由振動のような応答が見られ、加速度、変位ともに大きくなっている。ここで、X成分の10~15秒付近における応答波形から求まる振動数は3.2Hzであり、本加振前に微動測定より推定したY軸の固有振動数とほぼ一致していることから、共振の可能性がある。

これに対し、非線形挙動が顕著になる加振レベルで

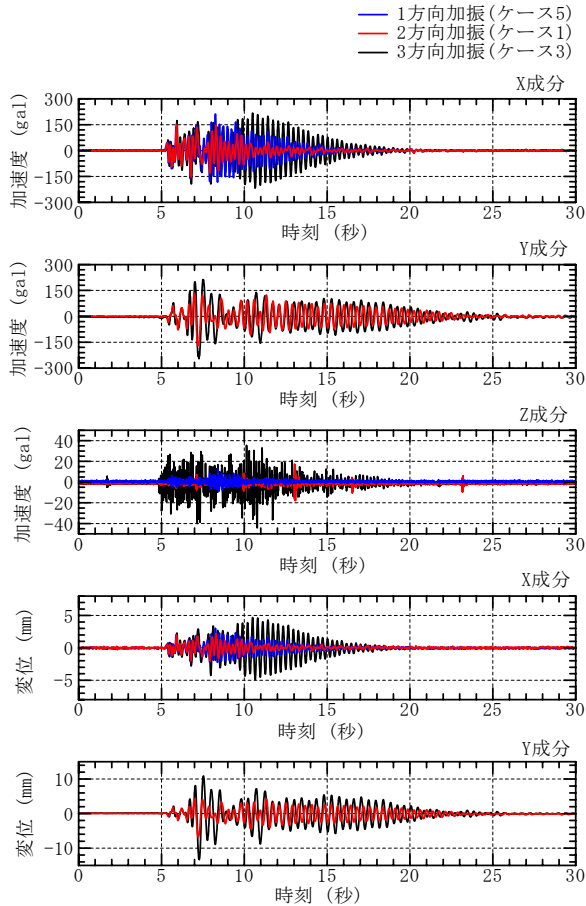


図-4 慣性力作用中心位置における加速度及び変位波形
(軸方向鉄筋が降伏以前にとどまる加振レベル)

は、三方向入力時(ケース 4)と二方向入力時(ケース 2)の最大値は、Y 成分で若干差があるものの、ほぼ同程度であるとともに、全時刻にわたり水平面内の時刻歴波形もよく類似している。なお、本実験では、回転慣性の影響があるため水平二方向加振でも鉛直加速度が発生するが、この時の最大加速度は三方向入力時の鉛直加速度の半分程度である。以上より、三方向入力時は RC 柱に作用している外力は大きくなっているものの、非線形挙動が顕著になる加振レベルでは、軸方向鉄筋が降伏に達しない加振レベルとは異なり、鉛直動が水平面内の応答特性にはほとんど影響しないことがわかる。ただし、初期軸力が比較的大きい場合や、ラーメン構造の柱部のように構造的に大きく軸力が変動する場合については本研究では検証していないため、別途検討が必要である。

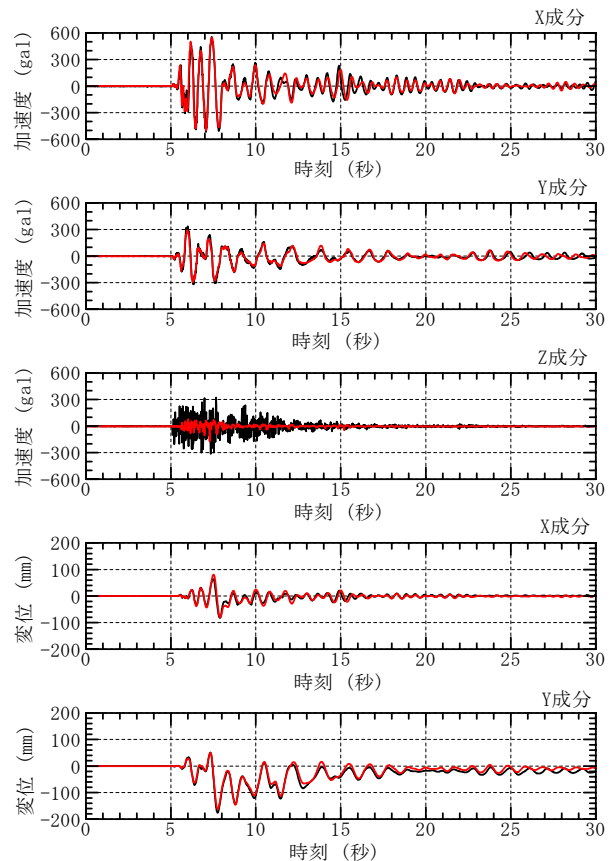


図-5 慣性力作用中心位置における加速度及び変位波形
(非線形挙動が顕著になる加振レベル)

表-2 慣性力作用位置における最大応答値の比較

		軸方向鉄筋 弾性レベル		非線形応答 レベル	
方向	加振 タイプ	加速度 (gal)	変位 (mm)	加速度 (gal)	変位 (mm)
X	1 方向	212	3.1	—	—
	2 方向	154	2.2	550	80
	3 方向	217	4.9	556	82
Y	2 方向	170	6.9	294	163
	3 方向	245	13	337	176

3. ファイバー解析による実験のシミュレーション

3.1 ファイバー解析の概要

多方向入力を受ける構造物の応答特性を評価できる解析方法には FEM 解析をはじめいくつか考えられるが、本研究では比較的簡便に取り扱うことが可能なファイバー解析による検討を行った。

実験供試体の解析モデルを図-6 に示す。フーチングは、フーチング上及び振動台上の加速度記録から、振動台と一体と見なせると判断し、柱基部を固定とし

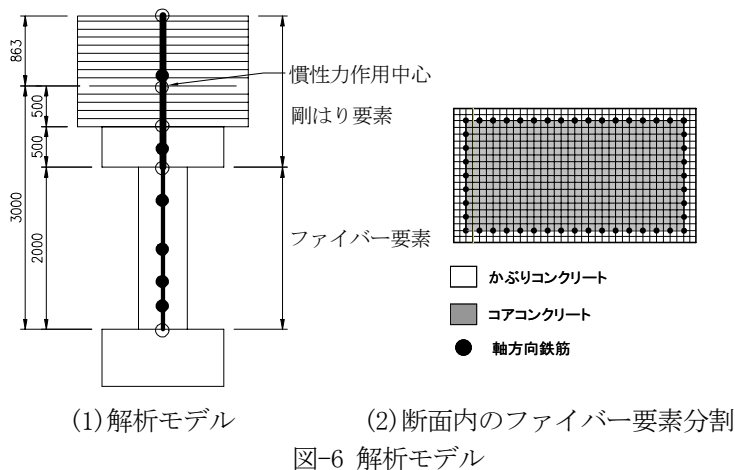


図-6 解析モデル

てモデル化した。鋼板ウエイトおよび横梁部を十分剛な梁要素、RC 柱部をファイバー要素とし、柱断面内は図-6(2)のように 768 本のファイバーに分割した。

ファイバー解析では、材料の応力度-ひずみ関係や部材軸方向の要素分割が解析結果に影響を及ぼす。そこで、あらかじめ既往の RC 単柱に対する正負交番載荷実験(一方向載荷)に対してシミュレーション解析を行い、これらの影響の評価を行った。この結果、水平荷重-水平変位関係に部材軸の要素分割の違いが及ぼす影響は少ないこと、塑性ヒンジができる柱基部の要素長を短くすると局所的な変形の影響が大きくなること、コンクリートの応力度-ひずみ関係の違いは RC 柱の最大荷重付近まではほとんど無いが、最大荷重以降はコンクリートの応力度-ひずみ関係の下降勾配が応答値の評価に影響を及ぼすことがわかった。このうち、コンクリートの応力度-ひずみ関係は、道路橋示方書耐震設計編³⁾のモデルと Mander モデル⁴⁾を比較検討し、道路橋示方書のモデルでは下降勾配が大きく、小さい変位で実験値と乖離するのに対し、Mander モデルではかぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が生じる程度までほぼ挙動を追跡できる結果が得られた。

これらの結果を踏まえて、塑性ヒンジができる柱基部の要素長は、断面長辺方向と短辺方向に対して道路橋示方書に基づいて算定される塑性ヒンジ長(本供試体ではいずれも断面軸に対しても断面高さの 0.5 倍)の平均的な値でかつ帯鉄筋間隔(75mm)の整数倍である 300mm とした。この長さは最終的に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領域とほぼ対応している。これより上方の柱部分の要素長は、300、400、600、400mm とした。軸方向鉄筋及びコンクリートの応力度-ひずみ関係を図-7 に示す。軸方向鉄筋には、堺・川島の修正 Menegotto-Pinto モデル⁵⁾、コアコン

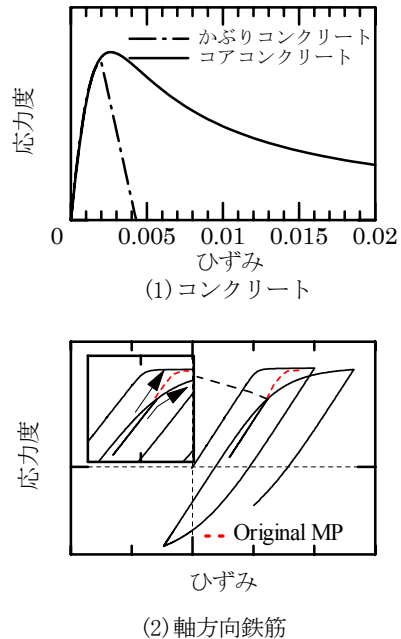


図-7 軸方向鉄筋及びコンクリートの応力度-ひずみ関係

クリートは、骨格曲線を Mander モデル、履歴則を堺・川島のモデル⁶⁾とした。また、かぶりコンクリートは、骨格曲線を Kent&Park モデル⁷⁾、履歴則を使用した解析ソフトに組み込まれている Ristec の修正六車モデル⁸⁾によった。コンクリートはかぶり部については引張応力を考慮したがコア部については考慮しなかった。解析コードは TDAP3 である。

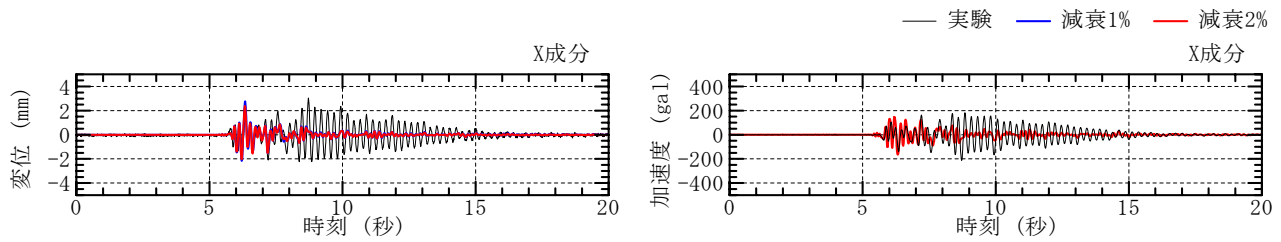
減衰は、1 次モードと 4 次モードからなる初期剛性比例型 Rayleigh 減衰とした。この際、柱部材の減衰定数は 2% と 1% の場合で計算を行った。この他、初期軸力による幾何剛性、鋼板ウエイト部及び横梁部の回転慣性の影響を考慮した。

数値解析は、Newmark β 法 ($\beta=0.25$) による直接積分法により行い、積分時間間隔は 1/2000 秒(実験におけるデータサンプリング時間間隔の 1/10)とした。入力には、振動台上で観測された加速度波形を用いた。

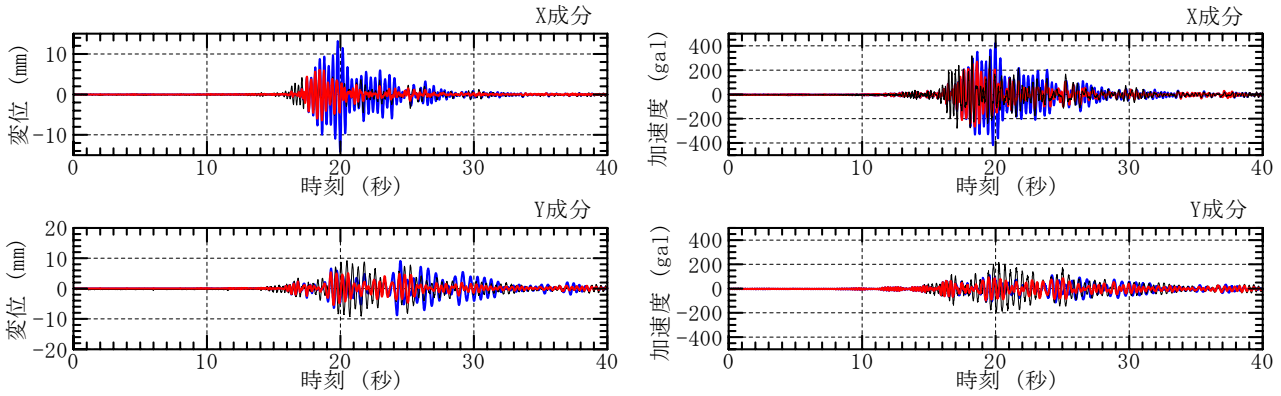
3. 2 シミュレーション解析結果

加振ケース 5~8 の慣性力作用中心位置における実験と解析による加速度及び変位の波形を図-8 に示す。

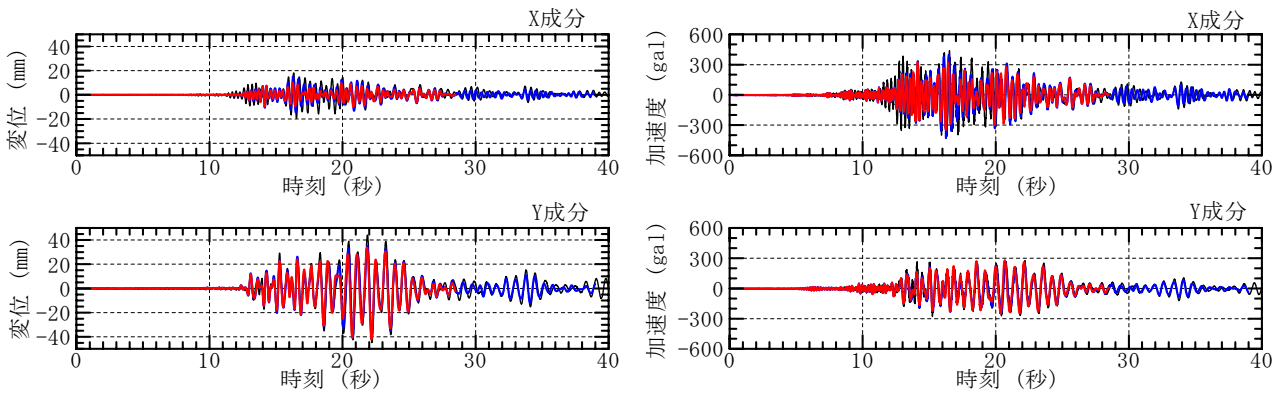
軸方向鉄筋が降伏する以前にとどまる程度の加振レベルに対しては、主要動の開始から数秒は比較的一致しているが、これ以降は変位についていえば解析値の方が X 成分に対しては大きめ、Y 成分に対しては小さめの評価となっている。この程度の加振レベルでは、コンクリートのひびわれの状況が応答特性に支配的になると考えられるが、本解析では、コアコンクリート



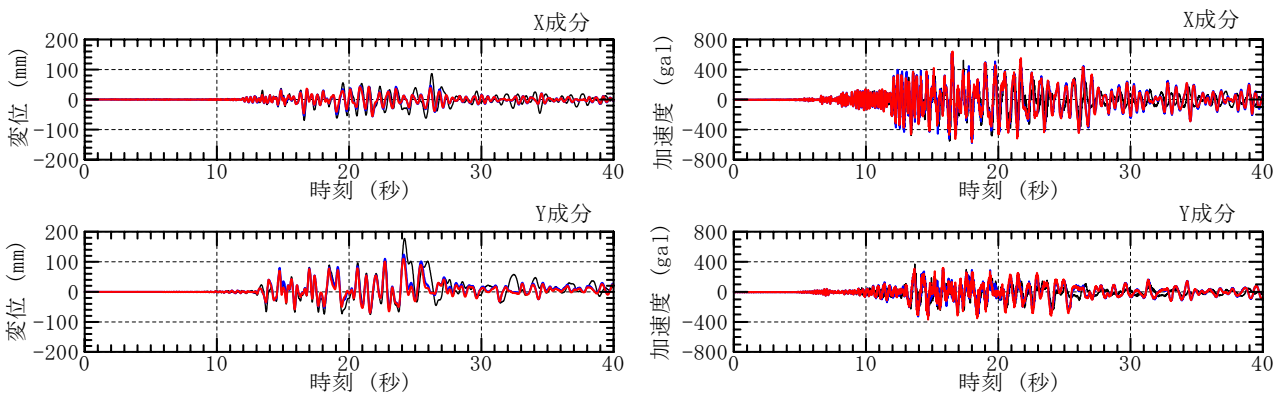
(1) ケース 5



(2) ケース 6



(3) ケース 7



(4) ケース 8

図-8 慣性力作用中心位置における実験と解析結果の比較

の引張力を見込んでいないことが原因の一つと考えられる。減衰特性については、2%とした場合の方が実験値に近くなっている。これに対して、やや部材が塑性化した加振ケース7の場合は、特に減衰を1%とした場合に断面軸方向によらず実験結果を再現できている。

さらに塑性化が進んだケース8では、24秒程度まではケース7同様、実験結果を再現できている。しかし、それ以降については、実験ではやや波長が長い波となっているが、解析では追跡できていない。このような乖離が生じた原因としては、かぶりコンクリートの剥

落や軸方向鉄筋の座屈といった断面損傷が生じたことがあげられる。ケース8の場合は、厳密に乖離が生じた時刻の損傷状況を把握することはできなかったが、同様の状況はケース2や4でも起こっており、これらでは確認ができています。なお、ケース2及び4は、入力波形や加振成分が異なるが、ケース8と同程度の精度で再現できた。また、鉛直加速度については、いずれも加振ケースでもある程度実験と類似した波形となっている。しかし、ファイバー解析特有の問題として、鉛直動を作用させなくても鉛直方向に加速度が生じることがある。従って、鉛直方向についてはシミュレーションの精度を議論することは難しいと考えられるため、ここでは考慮しなかった。

以上より、本解析モデルを用いることで、二方向や三方向入力を受ける場合でも、入力波形の特性によらず、塑性化が生じ、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈を生じるレベルまでは比較的良く再現できるといえる。なお、これよりさらに大きな変形を推定するために軸方向鉄筋に座屈モデルを考慮する必要がある。しかし、ファイバーモデルでは平面保持を仮定していることや、座屈の判定法、多方向入力を受ける長方形断面の場合の座屈長の設定法等、不確定な要素が多いことから、現段階では多方向入力時に座屈モデルを組み込むことは難しいと考えられる。ただ、耐震設計では、一般に、軸方向鉄筋の座屈が生じる前の状態にとどめることから、本解析で適用性が検証できたレベルまで評価できれば実務上十分であると判断できる。

4. パラメトリック解析による多方向入力を受けるRC構造物の応答特性の評価

4.1 パラメトリック解析の概要と多方向入力を受けるRC構造物の応答特性評価方法

耐震設計上考慮するレベルまで適用性が検証されたファイバー解析を用いて、通常設計で考慮する一方向入力時と多方向入力時の応答特性について、青戸らの検討9)を参考に、構造物に対する地震動の入力方向の影響を含めて検討した。ここでの検討は、耐震設計で重要となる顕著な塑性化が生じるレベルを対象とした。このレベルでは前述のように鉛直動の影響が少ないことから、この影響を無視することとした。

解析対象とした構造物は、断面寸法が2.2×5.0m、柱高さ10m(横梁部含む)の鉄筋コンクリート橋脚であり、橋脚天端から2.5mの高さに上部構造重心を考慮したものである。解析モデルは、実験のシミュレーショ

表-3 解析に使用した観測記録

観測地点	地震名
釧路気象台	1993年釧路沖地震
シルマー	1994年ノースリッジ地震
JR鷹取駅	1995年兵庫県南部地震
Kik-NET 豊頃	2003年十勝沖地震
K-NET 小千谷	2004年新潟県中越地震

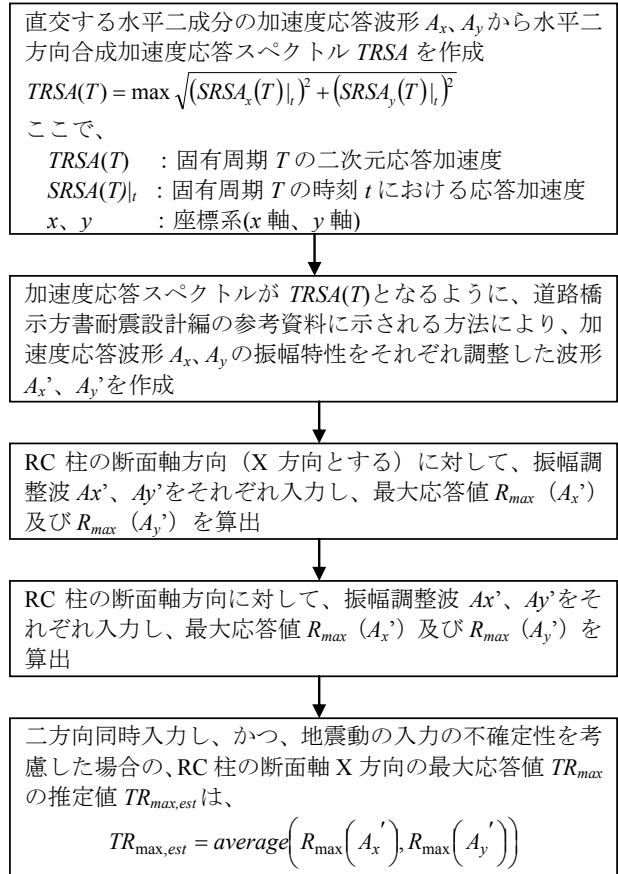
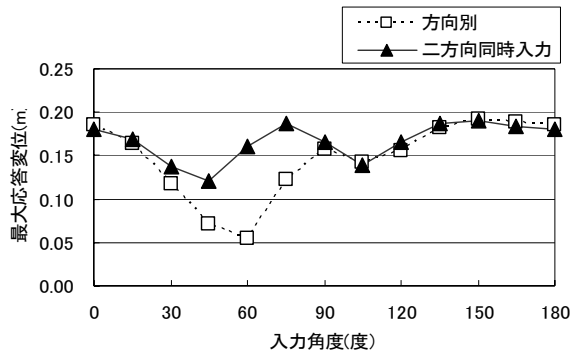


図-9 二方向同時入力時の最大応答値の推定方法

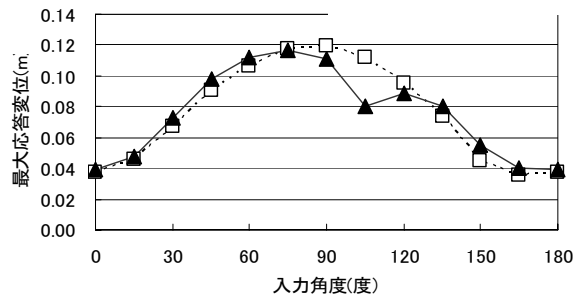
ン解析と同様に柱部をファイバー要素でモデル化した。また、柱基部は固定とした。

入力波は、表-3に示す観測波5波を用いた。これらを、断面軸方向に別々に入力する場合(以下、方向別入力)と、水平二方向同時に入力した場合(以下、二方向同時入力)の応答を比較することで二軸曲げによる影響を評価した。さらに、入力波の作用方向を橋脚に対して15度ずつ回転させて同様の解析を行うことで、地震動の入力方向の不確実性に関する影響について評価をした。

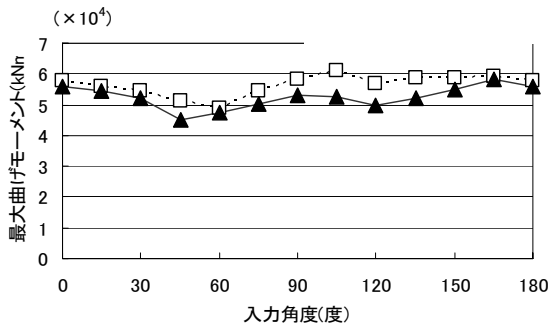
次に、二方向同時入力の解析を、入力波の方向を変えて何度も行うことは実務設計の観点からは煩雑であるため、方向別の解析から、二方向同時入力がかつ入力角度を変えた解析により得られる最大値を推定する



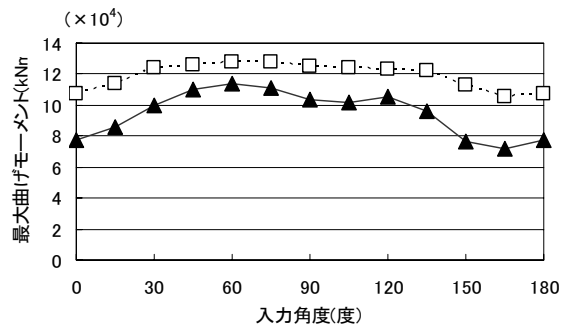
(1)上部構造重心位置の最大応答変位(短辺方向)



(2)上部構造重心位置の最大応答変位(長辺方向)



(3)柱基部の最大曲げモーメント(長辺軸周り)



(4)柱基部の最大曲げモーメント(短辺軸周り)

図-10 方向別入力時と二方向同時入力時の最大応答値の比較

方法を検討した。方向別の解析には、直交する2成分の観測波を用いて水平二方向合成の加速度応答スペクトル¹⁰⁾を求め、これに合致するように、合成に用いた2成分の波形を振幅調整した波形を用いた。この振幅調整波をそれぞれ同一の断面軸方向に入力して応答値を算出し、その2波平均(以下、振幅調整波応答平均)を求めた。この一連の流れを図-9に示す。これと、二方向同時入力がかつ入力角度を変えた解析により得られた最大値の比の分析し、二軸曲げと入力角度の影響を方向別の解析から評価できるようにした。

4.2 パラメトリック解析結果と多方向入力を受けるRC構造物の応答特性評価法の提案

シルマー波を用いた解析による、上部構造慣性力作用中心位置における最大応答変位及び柱基部の最大曲げモーメントについて、方向別入力した場合と二方向同時入力した場合の応答値を入力角度とともに図-10に示す。

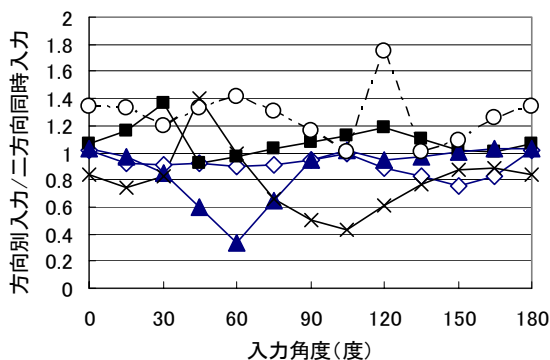
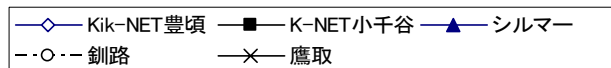
最大応答変位について同一入力角度で比較すると、短辺方向(橋軸方向)では入力角度が30~75度の時に、長辺方向(橋軸直角方向)では入力角度が75~90度の時に方向別に入力した場合より二方向同時入力した時の値が大きくなっている。しかし、入力角度が異なる

とこの関係が逆転しているところもある。これに対して、最大曲げモーメントは方向別に入力した場合大きく評価されている。

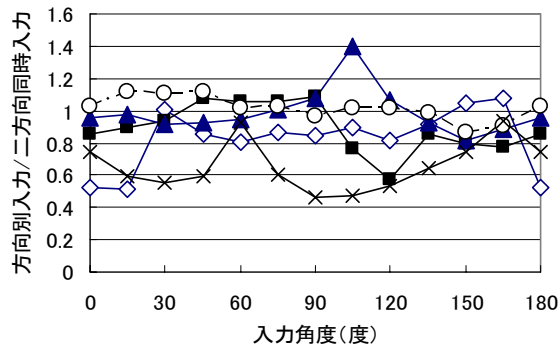
入力角度による応答の違いについては、シルマー波の例では、特に長辺方向の場合に顕著であり、最も大きな入力角度90度の時の応答は、最も小さい165度の時の3.3倍(二方向同時入力時)となっている。これに対して、最大曲げモーメントは入力角度による差はそれほどない。

二方向同時入力時に対する方向別入力時の応答値の比を図-11に示す。最大曲げモーメントについては、入力波によらず比が1~1.4程度に収まっているが、最大応答変位は、入力波や入力角度によるばらつきが相対的に大きい。以上より、設計への反映の観点からすると、曲げモーメントについては方向別に求めた値を基本とすればよいが、応答変位は二軸曲げと地震波の入力方向の影響の両方考慮する必要があるといえる。

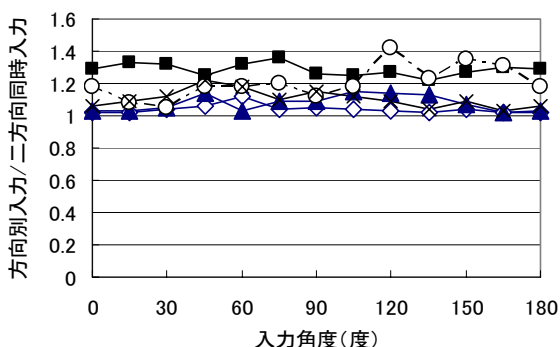
二方向同時入力解析がかつ地震波の入力方向の影響も加味した最大応答値に対する振幅調整波応答平均の比を、入力波毎に表-4に示す。入力波により多少ばらつきはあるが、応答変位でも両者の比は1前後に収まっている。従って、二方向同時入力時における地震



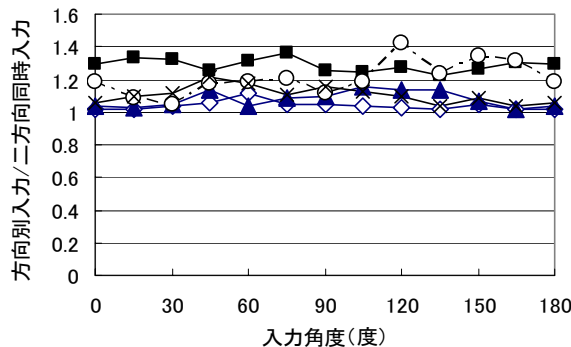
(1)上部構造重心位置の最大応答変位(短辺方向)



(2)上部構造重心位置の最大応答変位(長辺方向)



(3)柱基部の最大曲げモーメント(長辺軸周り)



(4)柱基部の最大曲げモーメント(短辺軸周り)

図-11 二方向同時入力時に対する方向別入力時の応答値の比

波の入力方向の不確実性も考慮した最大応答変位は、平均的には、二方向合成加速度応答スペクトルの振幅調整波2波を用いて求めた最大応答変位の平均から評価できるといえる。また、最大曲げモーメントも、平均的には振幅調整波2波の応答値とほぼ同程度であり、最大応答変位と同様に評価可能である。

5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物を対象として、水平二方向及び鉛直方向の三方向の地震力を受けた場合の耐力、変形性能、破壊特性の把握、並びに、三次元入力を受ける鉄筋コンクリート構造物の地震時挙動を追跡可能な解析モデルの検証及び耐震設計法の提案を行った。

本研究により得られた成果をまとめると以下の通りである。

- 1) 長方形断面を有する鉄筋コンクリート柱に対して、一方向、水平二方向及び三方向入力した振動台実験を行った。この結果、軸方向鉄筋が降伏しない加振レベルにおける慣性力作用中心位置における応答値は、一方向入力と水平二方向入力による差は顕著でないものの三方向入力では応答が大きく

表-4 二方向同時入力時最大値に対する振幅調整波入力した方向別解析による応答値2波平均の比

	上部構造重心位置 最大変位		柱基部 最大曲げモーメント	
	短辺 方向	長辺 方向	短辺 方向	長辺 方向
釧路気象台	1.478	1.104	1.102	1.097
シルマー	1.015	0.918	1.051	1.107
JR鷹取駅	0.838	0.626	1.066	1.057
Kik-NET豊頃	0.859	1.129	1.046	1.259
K-NET小千谷	1.184	1.137	1.240	1.043
平均	1.021	1.133	1.143	1.151
標準偏差	0.230	0.006	0.137	0.153
変動係数	0.225	0.005	0.120	0.133

なった。ただし、本比較の根拠となった三方向入力の実験では共振によると思われる影響が含まれる可能性がある。

- 2) 非線形挙動が顕著となる加振レベルにおける慣性力作用中心位置における応答値は、水平二方向加振と三方向加振で加速度及び変位共に顕著な差は見られなかった。このことから、軸力が小さく、かつほとんど変動しない場合は、鉛直動が水平面内の応答特性に及ぼす影響は小さいといえる。

- 3) 振動台実験の結果をファイバー解析によりシミュレーションし、軸方向鉄筋の座屈やかぶりコンクリートの剥落が生じるような損傷レベルまでは、入力波の違いによらず、ファイバー解析により多方向入力を受ける鉄筋コンクリートの動的な応答特性を再現できることを確認した。
- 4) 二軸曲げと地震動の入力方向の不確定性の影響を考慮した鉄筋コンクリート単柱橋脚のパラメトリック解析を行った。入力波を二方向同時入力した場合と、断面軸方向別に入力した場合の上部構造慣性力作用中心位置における最大応答変位及び柱基部の最大曲げモーメントを比較した結果、最大曲げモーメントは入力波によらず二方向同時入力時と方向別入力時の値のばらつきは小さいが、最大応答変位は入力波や入力角度によりばらつきが相対的に大きいことがわかった。
- 5) ある断面軸方向に対する二軸曲げや地震波の入力方向の不確定性の影響を考慮した二方向同時入力時における最大応答変位や最大曲げモーメントは、平均的には、二方向合成加速度応答スペクトルの振幅調整波 2 波を用いて求めた最大応答変位の平均として評価できることを提案した。

最後に、本研究では防災科学技術研究所 K-NET 及び Kik-NET、並びに気象庁の地震波形を使用させていただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Nakamura, Y.: “Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information”,

- No.23c, RTRI, 1995.
- 2) http://www.kyoshin.bosai.go.jp/k-net/news/HKD086/index_hkd086.html
- 3) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」、2002.
- 4) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R:” Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.114, No,ST8,1988.
- 5) 堺淳一、川島一彦：「部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案」、土木学会論文集、No. 738/I-64、pp. 159-169、2003.
- 6) 堺淳一、川島一彦、庄司学：「横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化」、土木学会論文集、No. 6548/I-52、pp. 297-316、2000.
- 7) Kent, D.C. and Park, R: “Flexural Members with Confined Concrete”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No,ST7, 1971.
- 8) Ristic D., Yamada Y., Iemura H. and Petrovski J. “Nonlinear Behavior and Stress-strain Based Modeling of Reinforced Concrete Structures under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Load.” Research Report No.88-St-01, School of Civil Engineering, Kyoto University, 1988.
- 9) 青戸拓起、牧原成樹、吉川弘道：「水平 2 方向地震動を受ける鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形と損傷に関する検討」、第 9 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. 311-318、2006.
- 10) 西田秀明、運上茂樹：「地震動の入力方向の不確定性を考慮した加速度応答スペクトル特性」、第 11 回日本地震工学シンポジウム、pp. 627-632、2002. (CD-ROM)

A RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE SUBJECTED TO 3-DIMENTIONAL EXCITATION

The objective of this study is to evaluate the structural response characteristics subjected to 3-dimentional earthquake ground motion and to propose the seismic design method of the Reinforced concrete structures. Main results of this study are summarized as follows; 1)The effect of vertical excitation is not dominated for the lateral response behavior in case of applying low constant axial force, 2)Fiber element model analysis could simulate the tested dynamic response behaviors well until the spalling of the cover concrete and buckling of the longitudinal rebar. 3)Maximum lateral displacement of the pier considering bilateral bending effect and uncertainty of directivity of input ground motion could be estimated well based on unidirectional response analysis.

Key words : reinforced concrete structure, 3-dimentional excitation, shaking table test, fiber element model analysis