

正方形断面 RC 柱の水平二方向 非線形領域加振振動台実験

西田 秀明¹・運上 茂樹²・長屋 和宏³

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ研究員 (〒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上席研究員 (同 上)

³正会員 国土交通省総合政策局国際建設課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

RC 柱が水平二方向の地震入力を受ける際の非線形領域における耐力・変形特性を検討するために、RC 柱モデルの水平二方向加振振動台実験を行った。供試体は 600×600mm の正方形断面、柱基部から慣性力作用位置までの高さ 3000mm、柱基部での軸応力が 1.0MPa になるようにし、平成 7 年兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された地震波の水平二成分を時間軸 50% に圧縮して加振した。その結果として、水平二方向地震を受けた場合には全周面にわたってかぶりコンクリートが剥離するという破壊特性と共に、非線形領域において加速度や変位の軌跡が水平二方向に対して長周期化しながら描くという地震応答特性などが確認できた。

Keywords: shaking table test, RC column, bilateral excitation

1. はじめに

我が国における現行の橋梁の設計設計では、一般に慣性力は方向別に独立に作用させて照査を行っている。しかし、実際の地震動は三次元的な挙動を示すことから、橋梁には慣性力が複雑に作用し二軸曲げなどが生じる。多方向入力時における構造物の耐震性に関する検討は、建築構造物を中心として 20 年以上前から行われており、静的強制載荷時の挙動が解析によりある程度追跡できることがわかっている¹⁾。しかし、橋梁のような土木構造物を対象とした検討事例は少なく、また、実験的検討は強制加力による静的載荷実験がほとんどであり、振動台実験のような動的加振実験は数例²⁾しか行われていない。そのため、多方向入力が橋梁の耐震性に及ぼす影響を検討するためには、既往の研究成果に加えて動的加振実験によるデータの蓄積と解析手法の適用性についての検討が必要となる。そこで、動的加振実験による基礎的なデータの蓄積を目的として鉄筋コンクリート柱 (以下、RC 柱) モデルを用いた水平二方向同時加振振動台実験を行った。

2. 実験概要

実験供試体を図-1 に示す。柱部は 600×600mm の正方形断面、軸方向鉄筋は SD295、D10 を 48 本、(軸方向鉄筋比 0.95%)、帯鉄筋は SD295、D6 を 75mm 間隔で配筋した。供試体および供試体に作用する死荷重を模擬する鋼板ウエイトは、柱基部での軸応力が 1.0MPa になるように、また、供試体高さは断面寸法と柱基部から慣性力作用中心までの比が 5.0 になるように設計した。実験時のコンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-1 に示す。

主要な測定項目は、慣性力作用位置 (柱基部から 3000mm) における相対変位、絶対加速度および軸方向鉄筋ひずみとした。慣性力作用位置における相対変位は、供試体の周りに組んだ剛体フレーム上にレーザー式変位計を設置し、絶対加速度は、柱中央部位置の鋼板ウエイト内に設けた隙間にひずみ式加速度計を設置して測定した。また、ひずみゲージを角部に位置する軸方向鉄筋の柱基部から 920mm の高さまで、さらに MA (M 面と A 面)、PB (P 面と B 面) 角部にはフーチング内 200mm の深さまで貼り付けた。

加振波形は、1995 年兵庫県南部地震の際に JR 鷹

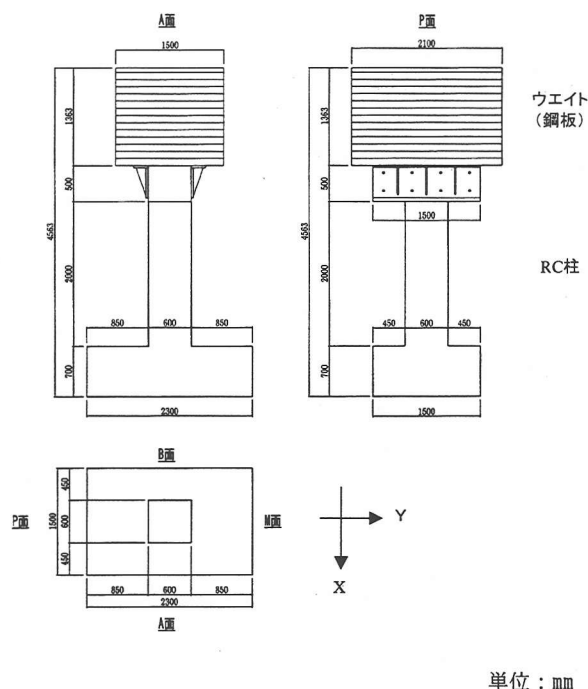


図-1 実験供試体図

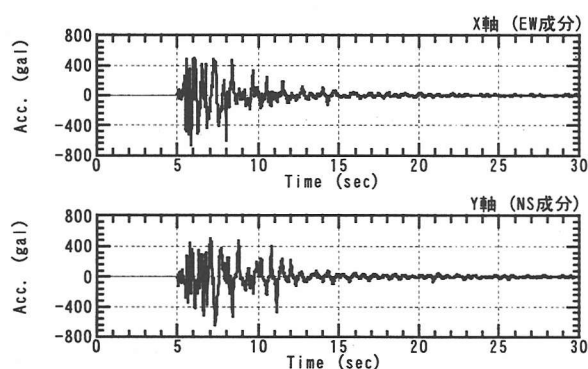


図-2 入力波形

取駅で観測された水平二成分を、時間軸を 50%に圧縮したもの（30 秒間）を用いた（図-2）。なお、供試体の弾性挙動把握のため、最初に加速度振幅を 20%に圧縮した波形で加振した。この際の振幅は、軸方向鉄筋が降伏しないレベルが 1 回目加振、RC 柱が明らかに降伏を超えるレベルが 2 回目加振となるように事前に解析を行って決定した。サンプリング周波数は 200Hz とした。なお、本稿では以後 2 回目の加振時の結果のみを示す。

3. 実験結果

(1) 損傷の進展状況

損傷の進展状況を時系列で示す。これは、実験時に撮影した VTR と RC 柱の応答との関係から観察したものである。大きく断面の損傷が進むのは慣性力作用位置における相対変位軌跡の振幅が最大となる

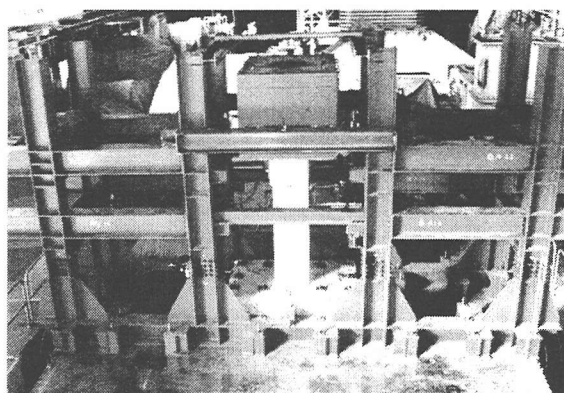


写真-1 供試体設置状況

表-1 供試体の実験時材料強度（単位 N/mm^2 ）

	強度	ヤング係数
コンクリート	34.1	3.27×10^4
軸方向鉄筋	515	1.83×10^5
帯鉄筋	480	1.85×10^5

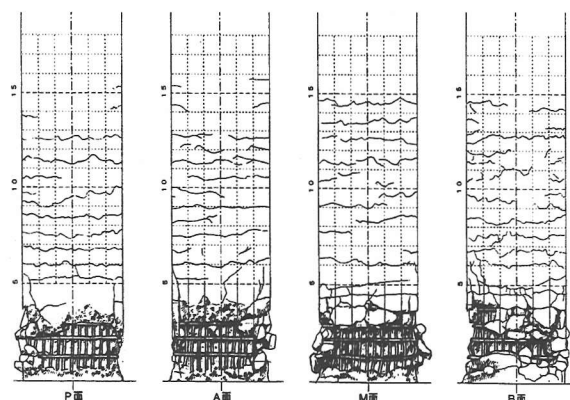


図-3 最終損傷図

時である。この時、MB 角部方向へ振れた際に、引張側に位置する PA 角部のかぶりコンクリートが柱基部から 450mm 程の高さまで縦に剥離し、この後 PA 角部方向に振れた際にそれが剥落した。また、PB 角部付近の柱基部から 250mm 程の高さ位置で大きな水平クラックが生じた。さらにこれから 3 秒程度後の大振幅時には、PB 角部へのひびわれ、P 面全体にわたるかぶりコンクリートの剥離の進行、A 面柱基部から 150mm 程の高さ位置での水平クラックと続き、B 面、PB 角部の剥落が生じた後、全断面にわたるコンクリートの剥落が一気に生じた。

最終損傷図を図-3 に示す。全断面とも基部から 500mm 程の高さまでのかぶりコンクリートが剥落した。軸方向鉄筋は全て座屈し外側にはらみだしていたものの破断までには至らなかった。座屈の程度は場所により異なり、かぶりコンクリート剥落領域全体にわたるものから、その中でさらに局所的にも

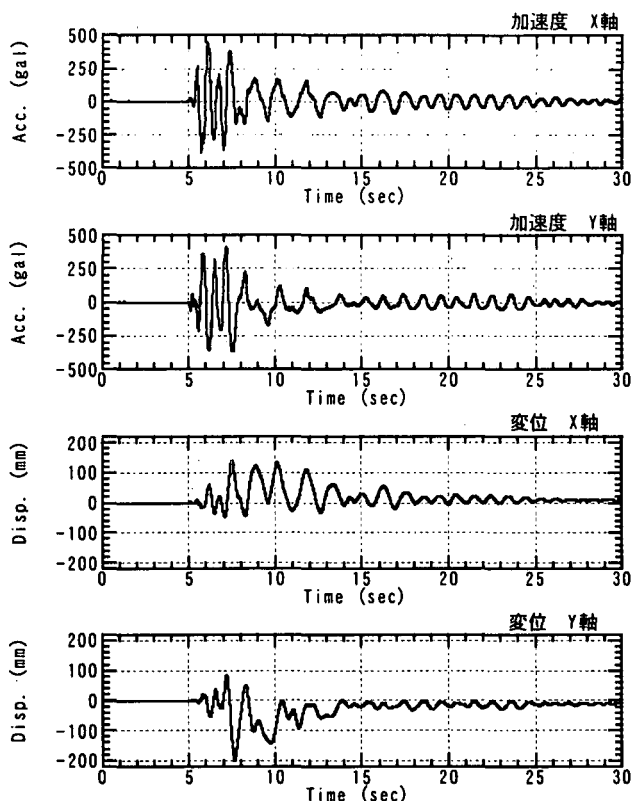


図-4 慣性力作用位置における時刻歴応答波形

座屈しているものまで見られた。また、MA 角部の柱基部から 150mm の高さ位置と PB 角部 225mm の高さ位置にある帯鉄筋のフック (135° フック、定着長 60mm) がはずれていた。これは、この付近を中心として軸方向鉄筋が座屈したためと考えられる。

(2) 慣性力作用位置における変位－加速度関係

慣性力作用位置における相対変位および絶対加速度の時刻歴波形を図-4 に示す。ここで、変位計を剛体フレーム上に設置していることから、フレーム自体の振動により相対変位が生じる可能性があるが、変位計位置に加速度計も設置し振動台上の加速度と比較し、ほとんど影響がないことを確認している。また、供試体自体のスウェイおよびロッキングの影響もほとんどないことを確認した。以上より、これらの影響による補正は行っていない。

慣性力作用位置での最大応答加速度はいずれの方向でも 400gal 程度であり入力波に比べると小さくなっている。また、最大相対変位は X 方向 140mm、Y 方向 200mm であるが、この時の時刻は最大加速度のピークより若干遅くなっている。残留変位はいずれの方向にも 10mm 程度生じている。また、加速度、変位共に 7 秒付近から周期が長くなっていることがわかる。

加速度および変位の軌跡を図-5 に示す。7 秒付近

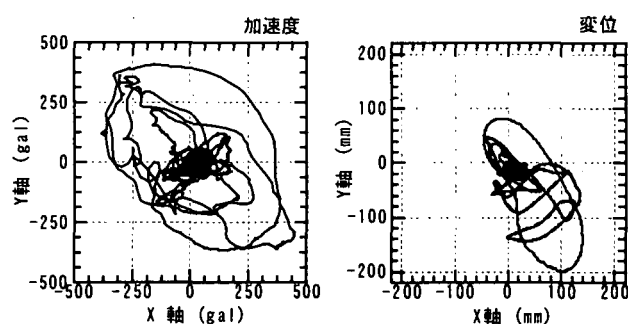


図-5 加速度および変位軌跡

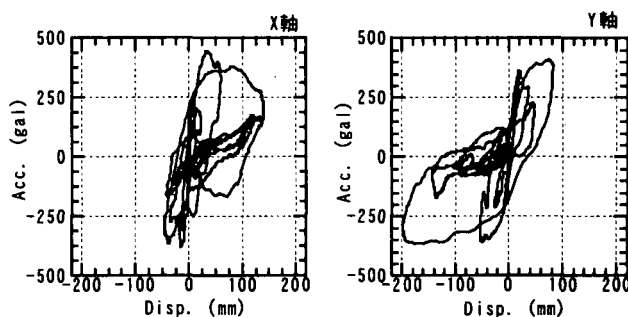


図-6 加速度－変位関係

までは両者が似たような軌跡を描いているが、それ以降は加速度が円弧を描くような軌跡を示すのに対して、変位はそれに追従することなく大きくなっている。この時刻はちょうどかぶりコンクリートの剥落が急激に進んだ時期と対応していることから、部材が非線形領域に入ったことによるものと考えられる。

方向別の加速度－変位関係を図-6 に示す。いずれも全体的な形状は通常の強制載荷実験と同様である。7 秒付近の変位大振幅時のループ前後で傾きが変化しており剛性が低下していることがわかる。

部材としての二方向入力時の耐力、変形特性を検討するために、合慣性力－合変位関係を求める。ここで、合慣性力および合変位は、同時刻における X 軸、Y 軸の各応答値をベクトル合成したもの (合慣性力はさらに柱基部に作用している質量 (36t) をかけあわせたもの) とした。これを図-7 に示す。さらに、柱基部での軸応力、せん断支間比、断面寸法が本実験と同一のものに対し地震時保有水平耐力法により算出した荷重－変位関係もあわせて示す。算出式の根拠となっている実験と本実験では加振条件 (強制載荷と振動台加振) 等が異なるため一概に比較はできないものの、最大荷重および最大変位ともに本実験では算出値より大きくなっていることがわかる。これは一方向変位強制載荷でも載荷方向によっては最大荷重が計算値よりも大きくなる場合がある³⁾ことと同様な影響によるものと考えられる。

ことから、この時に部材としての剛性劣化が進展したことがわかる。

(3)固有周波数の算出

RC 柱の非線形化による固有周波数の変化を検討した。固有周波数の算出は文献 4)に従い、慣性力作用位置と振動台上の加速度計により微動を測定して推定した。その結果を表-2 に示す。加振前および 1 回目加振後はいずれの方向ともほとんど固有周波数の変化はなかった。しかし、2 回目加振後はいずれも固有周波数は低周波になっており、この点から剛性が 1/4～1/5 程度に低下したことがわかる。

4. まとめ

部材が非線形領域に達するレベルにおける多方向入力の影響を検討するために、正方形断面を有する RC 柱を対象とした水平二方向加振振動台実験を行った。1995 年兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された波形を時間軸 50%に圧縮して入力した結果、次のようなことが確認できた。

- ・全周面にわたり、基部から 500mm 程度の高さ位置までかぶりコンクリートの剥離、剥落および軸方向鉄筋の座屈を生じた。しかし、軸方向鉄筋の破断にまでは至らなかった。
- ・慣性力作用位置における加速度軌跡は非線形領域に入ると円弧状の挙動を示した。また、この際の変位は加速度に追従せず増大した。
- ・部材の耐力・変形特性に相当する合慣性力-合変位関係は、地震時保有水平耐力法による荷重-変位関係と比べて、最大荷重、最大変位共に大きくなったことから、二方向入力の影響が含まれると考えられる。
- ・微動を用いて推定した RC 柱の固有周波数は、2 回目加振後に低周波になり、これから剛性が 1/4～1/5 程度に低下したことがわかった。

参考文献

- 1)例えば、平石ほか：二方向変形を受ける鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の構造的性状、日本建築学会構造系論文集第 454 号、1993.12
- 2)Stephen Mahin and Mahmoud Hachem:Bi-directional Seismic Response of Reinforced Concrete Bridges、International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures、2000.7
- 3)西田、運上、長屋：正方形断面を有する RC 柱を斜め載

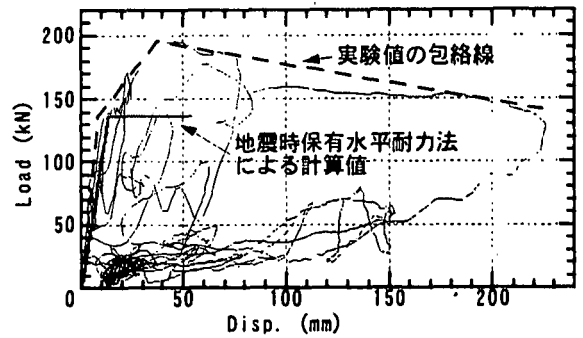


図-7 合慣性力-合変位関係

表-2 加振前後での固有周波数の変化 (単位: Hz)

	加振前	1 回目加振後	2 回目加振後
X 方向	3.96	3.71	2.00
Y 方向	4.30	4.10	1.86

荷した場合の動的耐力・変形特性、第 4 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、2000.12

- 4)近藤、運上、足立：固有振動数による鉄筋コンクリート橋脚の損傷度評価、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集、1999.8