

論文

[2020] 2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の応答性状に関する研究

正会員 安達 洋 (日本大学理工学部)

同 上 中西 三和 (日本大学理工学部)

同 上 北嶋 圭二 (日大大学院、青木建設研究所)

小泉 達也 (日大大学院)

1. はじめに

近年、2方向外力を受ける鉄筋コンクリート（以下RC）柱の挙動に関する実験的研究〔1〕、〔2〕等）が盛んに行われている。これらの実験の多くは、軸力を負荷した静的2方向載荷によるものであり、2軸曲げ相互作用の影響を受けたRC柱の復元力特性の評価や、耐力および靱性の評価に着目している。また、2方向入力を受けたRC柱の動的な応答性状の把握を目的として、載荷方法は静的であるがオンライン応答実験〔3〕も行われている。これら既往の研究より、2方向外力下でのRC柱の特徴的な挙動として、1方向外力下に比べ破壊が激しく、耐力・剛性の低下が著しいこと等が指摘されている。しかし、動的な外力下でこのような2軸曲げを受けるRC部材の性能を確認した例は少ない。

本研究は、実地震外乱を再現できる2軸振動台を用いて、地震時におけるRC柱の応答性状を実験的に把握することを目的とする。ここでは、曲げ破壊するRC柱を対象に2方向で観測された実地震加速度波形を用い、各1方向入力の加振と両方向同時加振の振動台実験を行い、両実験結果の比較から2方向入力を受けた場合の弾性及び弾塑性域での部材挙動の変化を調べた。また、実験における最大せん断力とファイバー法による2軸曲げ解析結果との比較検討も行った。

2. 実験概要

2.1 試験体及び使用材料 試験体の形状を図1、構造諸元を表1に示す。試験体は実物に対し約1/9の縮尺模型とし、安定した履歴挙動が得られる曲げ破壊先行型として設計した。

柱の断面寸法は8cm×8cm、主筋量は4-D6($P_g=2.0\%$)、帯筋量は $2.6\phi-\#30$ ($P_w=0.44\%$)、シアスパン比は3.0である。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大寸法10.0mmの豆砂利を用いた。使用した主筋およびコンクリートの材料試験結果を表2に示す。

2.2 実験装置 本実験では、2方向の地震波が入力可能な水平2軸振動台を使用した。実験装置概念図を図2に、また、装置立面図及び平面図を図3に示す。試験体は1質点系の水平2方向にのみ変形の自由度を持つモデルとして想定した。試験体の基部を振動台に設置し、

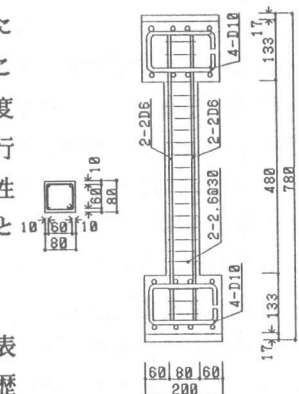


図1 試験体形状

表1 構造諸元

主筋	帯筋		シアパン比	軸力比
	$n-D$	$P_g(\%)$	M/QD	N/BDF_c
4-D6	2.0	$2.6\phi-\#30$	0.44	3.0

表2 材料試験結果

鉄筋	降伏強度 (Kg/cm^2)	降伏歪 (μ)	コンクリートの 圧縮強度(Kg/cm^2)
D6	4333	2083	264

頂部には質点とする鋼製の重り（重量2330Kg）を取り付けた。この重りの水平面内での回転による、部材のねじれを防ぐため、振動台上に設置した鉄骨フレームと重りの両側にパンタグラフを水平に取り付けた。また、部材変形にともなう重りの上下動に追従できるよう、パンタグラフ端部に上下動を許容するピンを設けた。さらに、試験体の変形状態を逆対称とするために、重りの四隅にピンサポートを設置し、加振方向に対する重りの上下方向の回転を拘束した。ただし、軸変形は拘束される。NS方向1軸加振時には、EW方向のピンサポート間に、またEW方向1軸加振時にはNS方向のサポート間にブレースを設け、加振方向と直交する方向の変形を拘束した。

測定項目及び測定方法を以下に示す。

- 部材の相対変位：非接触型レーザー変位計（図4）
- 柱頭・柱脚のモーメント及び軸力：荷重変換器
- 質点加速度：3軸加速度計
- 振動台各方向加速度：1軸加速度計
- 柱頭・柱脚の主筋のひずみ：ひずみゲージ

各測定値に対する計測は加振前後を含め 1/200秒のサンプリング時間で20秒間行った。以後の実験値におけるせん断力の数値は、柱頭・柱脚の曲げモーメント測定値より計算したものである。

2. 3 実験名及び入力地震波 入力地震波諸元を表3に示す。実験は同一形状・配筋の試験体6体に対して入力レベルを弾性と弾塑性の2つのレベルについて、入力パターンをNS、EW各々の1方向入力と同時2方向入力の3つのパターンについて、合計6実験行った。

表3 実験変数及び入力地震波

入力地震波：十勝沖地震波（八戸湾）

実験名	入力レベル	入力パターン	入力成分及び最大加速度
EDX	弾性	1方向入力	NS成分：69.0gal
EDY	弾性	1方向入力	EW成分：57.0gal
EDXY	弾性	2方向入力	NS成分：69.0gal EW成分：57.0gal
DX	弾塑性	1方向入力	NS成分：344.4gal
DY	弾塑性	1方向入力	EW成分：283.3gal
DXY	弾塑性	2方向入力	NS成分：344.4gal EW成分：283.3gal

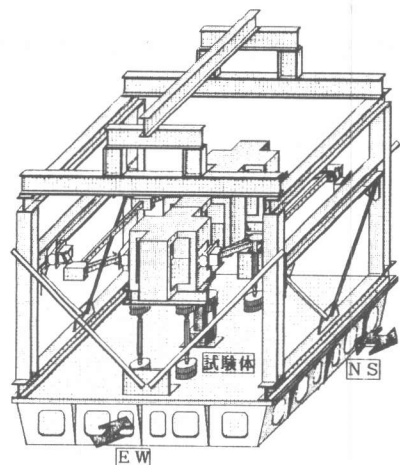


図2 実験装置概念図

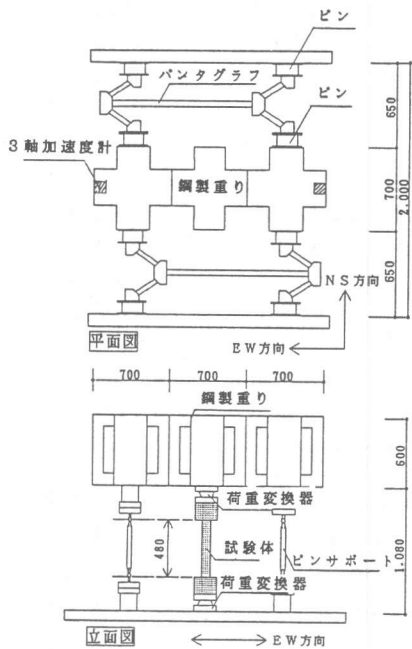


図3 装置立面・平面図

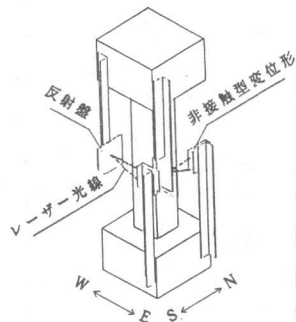


図4 相対変位測定方法

実験名は、弾性実験ではEDX、EDY、EDXY、弾塑性実験ではDX、DY、DXYとした。

入力地震波は、1968年十勝沖地震（八戸港湾：地震継続時間 30sec）EW方向成分及びNS方向成分を使用した。入力加速度は、弾性レベルで実記録波のNS成分の速度がほぼ10cm/secとなるよう、NS方向69.0gal、EW方向57.0galに、弾塑性レベルではほぼ50cm/secとなるよう、NS方向344.4gal、EW方向283.0galに補正した。入力波の時間軸は、加速度と応力度を合わせる模型則に従って試験体の縮尺率 $\lambda=1/9$ から $\sqrt{\lambda}=1/3$ とした。なお、各1方向入力及び2方向入力時におけるNS方向振動台実測加速度波形を図5に示した。両波形は非常によく一致しており、EW方向でも同様この整合性が確認された。

3. 弾性振動実験結果

1方向加振（NS方向：EDX、EW方向：EDY）及び同時加振（EDXY）時の、最大応答値を比較し表4に示した。また、各方向時刻歴応答変位及び応答履歴曲線を比較し、それぞれ図6、図7に示した。NS、EW各方向とも1方向入力時の応答値と2方向入力時の応答値はその最大値に若干の差がみられるものの時刻歴全体にわたって良く一致しており、弾性範囲内では各方向の応答値の重ね合わせが成立することが確認された。なお、応答履歴曲線にやや履歴を囲む傾向がみられるが、これはパンタグラフやピンサポートによる摩擦が原因と思われる。

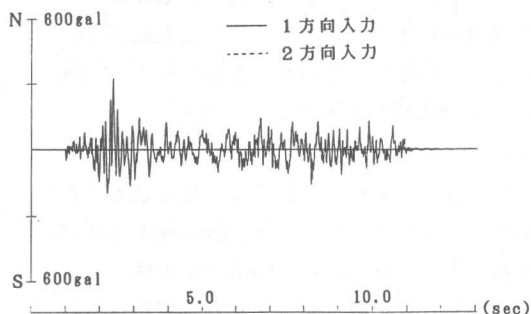


図5 振動台実測加速度（NS方向）

表4 最大応答値

実験名	EDX	EDY	EDXY	
方向	NS	EW	NS	EW
最大入力加速度 (gal)	67.2	50.0	72.7	52.1
最大応答加速度 (gal)	127.7	111.2	103.5	107.9
最大応答変位 (mm)	0.56	0.50	0.45	0.55
最大せん断力 (kg)	258.51	266.8	235.0	264.3

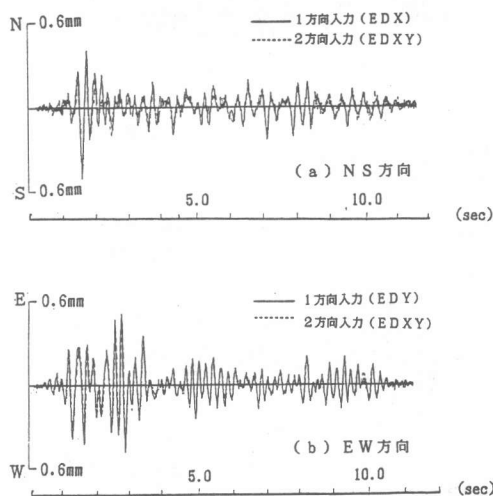


図6 時刻歴応答変位

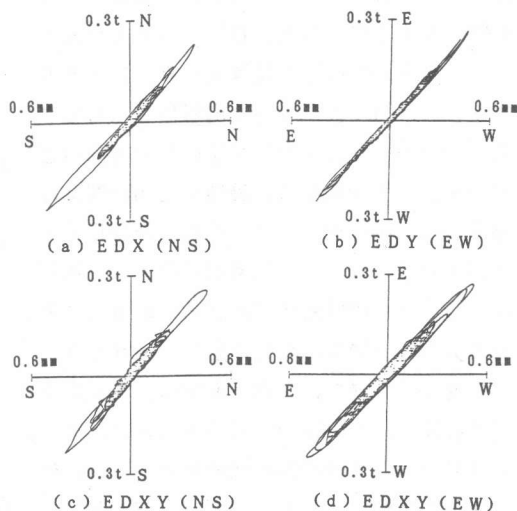


図7 応答履歴曲線

4. 弾塑性実験結果

4. 1 破壊状況 最終破壊状況を図8に示す。破壊状況は、DY、DXYともに柱頭及び柱脚部に曲げひび割れが発生している。DXYでの破壊状況は激しく、特に動きの卓越した南東-北西方向に大きなダメージを受け端部で圧壊を生じた。また、NS側には曲げせん断ひび割れが生じ、特にS側には付着割裂破壊が生じた。なお、DXは主筋が降伏に近い応答を受けているにも関わらず、加振終了後ひび割れが確認できなかった。

4. 2 最大応答値

各実験の振動台実測加速度の最大値と最大応答値を表5に示した。各実験の最大応答加速度や最大応答せん断力の値は同程度であるが、応答変位の最大値にかなり差異がみられる。これは弾性実験において応答値の重ね合わせが成立したことは非常に異なる挙動であり部材が塑性化する過程において、2軸曲げ相互作用の影響を受けていることが分かる。

4. 3 時刻歴応答変位及び応答履歴曲線

DX、DYおよびDXYの時刻歴応答変位及び応答履歴曲線をそれぞれ比較して図9および図10に示した。また、DXYのNSおよびEW方向で測定されたせん断力と変位の軌跡を図11に示した。DX、DYとDXYでは、明らかに応答性状は異なり、DXYの方がDX、DYより大きな応答値を示している。すなわち、DYとDXYのEW方向の応答変位(b)を比較すると最初の2.0秒間はほぼ同じ様な挙動を示すが、それ以降はDXYの方がDYより大きな応答変位を生じ、加振終了後かなりの残留変形が認められる。一方、NS方向(a)でも、DXの応答とは異なり、加力初期の段階で、S側へ非常に大きな応答値を経験し、その後の変形量も大きい。また、いずれの方向の時刻歴の比較においても、最大変位を経験した後の周期が延びており、1方向入力に比べ、部材の剛性低下がかなり大きいことが分かる。この傾向は、応答履歴

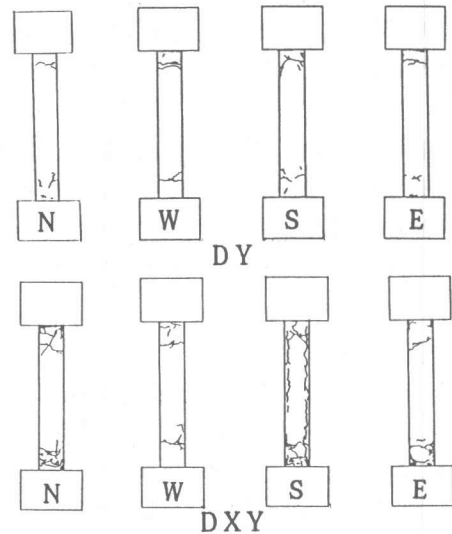


図8 最終破壊図

表5 最大応答値

実験名	DX	DY	DXY	
方角	NS	EW	NS	EW
最大入力加速度 (gal)	323.1	239.0	325.2	239.0
最大応答加速度 (gal)	501.9	545.2	529.6	503.8
最大応答変位 (cm)	0.48	0.66	1.01	0.94
最大せん断力 (kg)	1139.3	1259.6	1140.5	1203.2

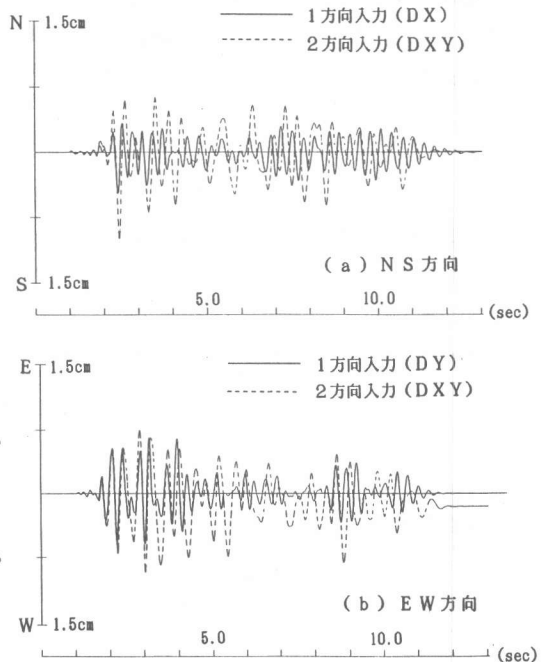


図9 時刻歴応答変位

曲線の比較からも明らかである。すなわち、DXYではEW方向の塑性化によってNS方向の剛性も低下し、応答変位の急激な増加とともに最大応答せん断力を経験している。また、EW方向では、最大応答せん断力経験後、耐力低下が起きていることが確認できる。この各方向の最大応答せん断力時の変位は、いずれもDX、DYに比べ大きくなる傾向がみられる。1方向加力下での部材の変形性能を確認していないので変形性能が低下したか向上したかは、今後、同一試験体に対する静的実験結果によって判断したい。せん断力と変位の軌跡を示した図11から、部材の挙動は、SE-NW方向に卓越した動きであることが分かる。これは破壊の状況に一致する。

また、各方向での最大応答せん断力近傍での詳細な挙動を把握するため、図11(b)の図中A~D点の変位軌跡に沿った、応答せん断力の合力の変化を3次元的に表現し図12に示した。各方向の応答履歴曲線では変位の塑性流れが起きるような現象は観察されないが、図12(b)のC~Dの動きに示されるように、NS方向への変位の軌跡の沿ったせん断力の合力は一定値を示す傾向が見られ、耐力の限界曲線を類推させる。

5. 実験値と解析の比較

5.1 ファイバー法による二軸曲げ解析[4] 2軸外力下での試験体柱断面の耐力を求めるため、ファイバー法による二軸曲げ解析を行った。図13に示すように断面の1辺を8分割(断面を64分割)し、コンクリートファイバーの応力-ひずみ関係と鉄筋断面の応力-ひずみ関係より断面の荷重-変形(曲げ-曲率)関係を求めた。コンクリートの応力-ひずみ関係はe関数法を用い、鉄筋は完全弾塑性モデルとした。モデルの特性値は、試験体を使用した材料試験結果の値を用いた。解析は荷重増分法によった。はじめに目標軸力まで軸荷重を増分させた後、2軸の曲げ荷重をコンクリートの圧縮縁が0.3%または、全ての引張り鉄筋が降伏するまで徐々に増分し、その時の荷重を断面の終局モーメントとした。EW方向とNS方向の増分曲げ荷重は、各方向の比率を1:0から1:1まで5分割し、合計

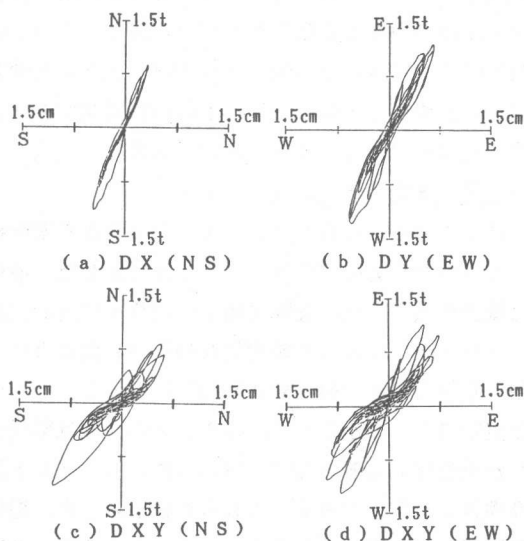


図10 応答履歴曲線

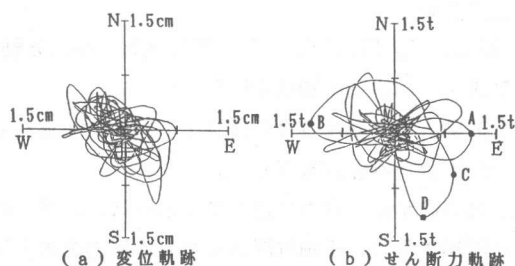


図11 せん断力及び変位の軌跡

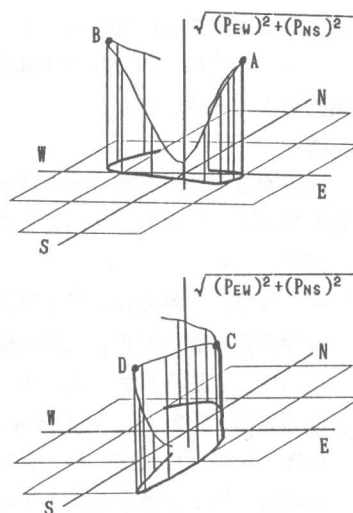


図12 合せん断力-変位軌跡

6通りの組合せで解析を行った。軸力を断面の引張り耐力から圧縮耐力まで変動したときの終局モーメントの限界曲線を図14に示した。軸力比が0.4のときに2軸曲げ相互作用の影響が最大値を示し、1軸の終局曲げモーメントの約8割に耐力が低下することが分かる。

5. 2 実験値との比較

図11に示したDXYのせん断力の軌跡を本解析法を用いて求めた耐力曲線と比較し図15に示した。解析に用いた軸力の大きさは、実験に用いた重り重量 ($N=2330\text{kg}$) と、ピンサポートによって軸変位が拘束されたことによって変動した軸力の最大値 ($N=4667\text{kg}$) に対応し、それぞれ破線と実線によって示される。なお、この曲線は部材の応力状態が逆対称であるとして、材端の終局モーメント計算値より換算したものである。これら比較から、先に指摘した実験結果の最大応答値近傍でのせん断力の軌跡はほぼ計算値と一致することがわかった。

5. まとめ

以上、2方向実地震外乱を受けるRC柱の2軸振動実験結果より、以下の知見を得た。

- 2方向入力を受けるRC柱は1方向入力に比べて、部材の耐力及び剛性が低下した。
- 主軸方向が降伏耐力に達している時に、直交方向の変形が増加すると、主軸は降伏したまま耐力曲線上に沿って移動する塑性流れがおき、著しい変形の増加が生じた。
- 2軸曲げの効果により、部材の周期は伸び、1方向入力とは異なった応答性状を示した。
- ファイバー法による2軸曲げ解析結果は、本実験結果の耐力とよく一致した。

謝 辞

本研究は平成1年度日本大学学術助成金「繰返し荷重に対する鉄筋コンクリート構造物の応答性状に関する研究」(代表者: 日本大学教授 色部 誠) によるものである。

参考文献

- 1) 辰巳佳裕、小谷俊介、青山博之: 2方向水平力と大きな軸力を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演概要集、1989、pp.523~pp.524
- 2) 滝口克己、黒正清治、岡田謙二: 鉄筋コンクリート断面の二軸曲げ実験、日本建築学会論文報告集、第229号、昭和50年3月、pp.25~pp.33
- 3) 岡田恒男、関松太郎、朴 永周、岡田健良: 2方向地震入力に対する鉄筋コンクリート建物の応答、日本建築学会大会学術概要集、1977~1981
- 4) 梅村 魁 編著: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続(中層編)、技報堂出版、pp.351~pp.353

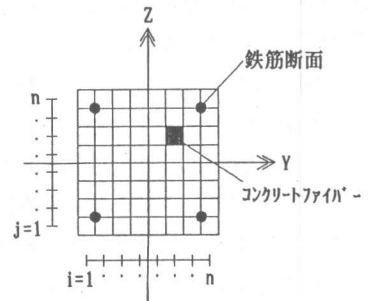


図13 断面の要素分割

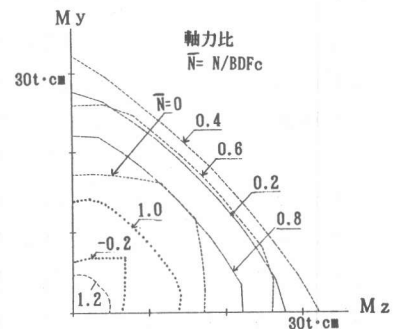


図14 My-Mz終局モーメント

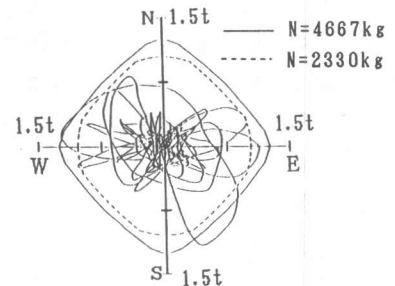


図15 実験結果と解析結果の比較
(せん断力軌跡)