

論文

[2148] 2方向入力を受ける曲げ破壊型鉄筋コンクリート柱の応答性状に関する研究

正会員○小泉 達也 (日大大学院)
 同上 北嶋 圭二 (日大大学院、青木建設研究所)
 同上 中西 三和 (日本大学理工学部海洋建築工学科)
 同上 安達 洋 (日本大学理工学部海洋建築工学科)

1. はじめに

筆者らは、2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱(以下、RC柱)の応答性状を調べるために、2軸曲げ・せん断応力下での静的載荷実験と2軸振動台実験を行ってきた[1][2]。また、解析的にはファイバー法を用いた2軸曲げ弾塑性解析を行い、静的な部材挙動に及ぼす2軸効果の影響について調べている[3]。さらに、詳細な応答性状を把握するためには2方向入力下での地震応答解析による検討が有効であり、望まれるところである。

RC部材に限らず、一般的な質点系の地震応答解析では、部材に対して単純な復元力モデルを仮定することが多い。しかし、2方向入力を受けるRC柱においては、RC特有の種々の非線形性状のほか、2軸効果を含む部材挙動を再現し得る単純な復元力特性モデルの設定ができないことが解析的な扱いを困難にしている。

本論文では、ファイバー法を用いた静的2軸曲げ弾塑性解析による部材復元力の評価と、陽なNewMark-β法による質点系の応答計算とを組み合わせた、2方向入力に対するRC柱の地震応答解析手法を示すとともに、曲げ挙動が支配的なRC柱を対象とした、静的載荷実験と振動台実験を行い、解析結果と実験結果の比較から2方向入力下におけるRC柱の応答性状の把握と本解析手法の有効性の確認を行った。

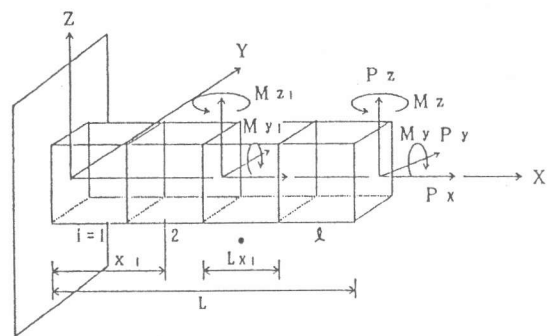


図1 部材の要素分割

2. ファイバー法による2軸曲げ解析と応答解析法

2.1 ファイバー法による2軸曲げ解析

ファイバー法を用いたRC部材の2軸曲げ解析法については、すでに文献[3]に詳細に述べている。ここでは、その概略のみを記す。

本解析法は、曲げ挙動が支配的な部材の解析に有効な1次元有限要素法による1軸曲げ弾塑性解析を2軸曲げ弾塑性解析に拡張したものである。すなわち、解析の対象とする部材を図1に示すように材軸方向に l 領域に離散化する。さらに、各要素の断面は図2に示すようにY方向に m 個、Z方向に n 個に分割したモデルとし

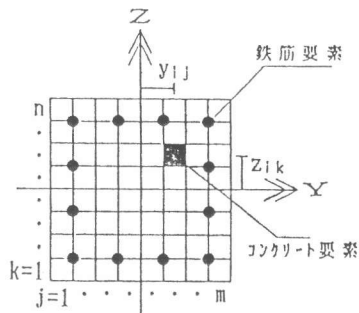


図2 断面の要素分割

て考える。このモデルは断面の平面保持が成立することを前提とし、各要素は剛性が一定の1次元材とする。また各要素の応力-ひずみ関係は非線形な構成則に従う。コンクリートの構成則にエンドクロニク理論[4]を、鉄筋の構成則にCiampiのモデル[5]をそれぞれ用いた。せん断変形は、弾性のせん断ばねを水平2方向に各々独立に考慮する。

2.2 2方向地震応答解析

ここで提案する手法は、陽なNewMark- β 法($\beta=0$)による応答計算と、前節のファイバー法を用いた静的2軸曲げ弾塑性解析による部材復元力の評価を組み合わせたものである。応答解析は、図3に示すような1質点2自由度系のモデルを対象として行った。2軸相互作用の影響を含んだ各主軸方向の復元力が直接評価できるとすれば、この解析モデルの振動方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_y \\ \ddot{X}_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} D_y \\ D_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Y}_y \\ \ddot{Y}_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 M :質量、 D_i : i 方向の減衰力、 Q_i : 2軸相互作用を含んだ i 方向の復元力、 X_i : i 方向の応答加速度、 Y_i : i 方向の地動加速度、 $i=y, z$, をそれぞれ表す。

解析の流れを図4に示す。すなわち陽なNewMark- β 法により計算された応答変位を、変位増分型の静的弾塑性解析に強制変位として与え復元力を得る。この復元力を式(1)の振動方程式中の Q_i にフィードバックし、その時刻における応答加速度と応答速度を計算する。応答解析は、この過程を地震継続時間全体にわたって繰り返し計算することにより行われる。ただし、第1ステップのみは陰なNewMark- β 法($\beta=1/6$)により計算する。

3. 解析手法の検証実験

3.1 試験体及び使用材料

試験体: 前章に述べた解析手法の有効性を検証するために、曲げ挙動が支配的になるようなRC柱模型試験体を作製し、1軸および2軸の静的載荷実験と、2軸の弾塑性振動台実験を行った。

試験体の配筋詳細を図5に、構造諸元を表1に示

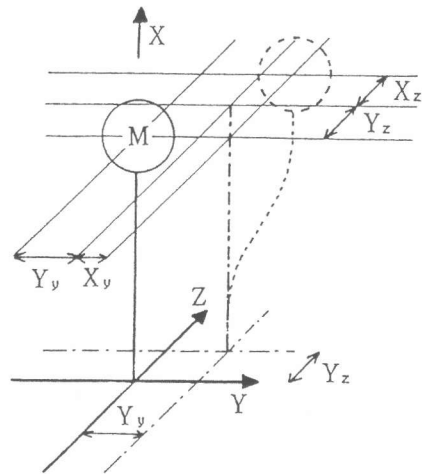


図3 解析モデル

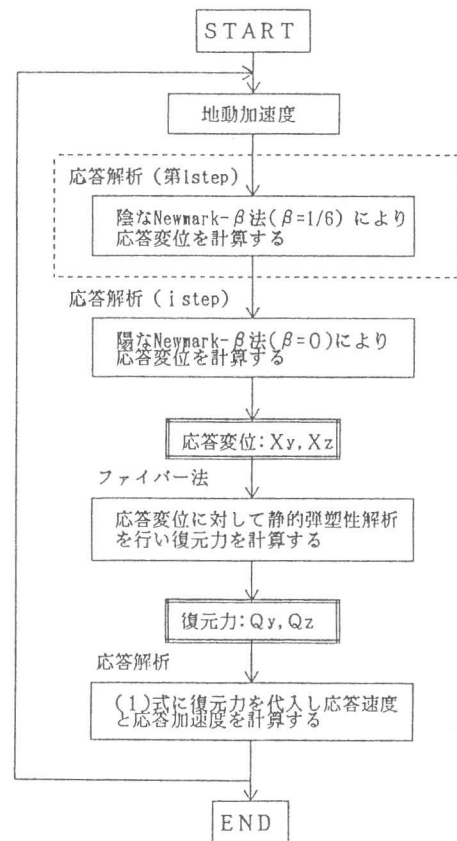


図4 解析の概念図

した。各実験とも試験体の形状・寸法等は共通である。試験体の断面寸法は8CM角としたが、これは実部材の1/9模型を想定している。

使用材料：可能な限り試験体の縮尺に合わせた材料の選定を行った。使用したモデルコンクリートの調合を表2に、コンクリートの材料試験結果を表3に示した。コンクリートは、普通ポルトランドセメント、骨材に土木学会のふるい分け方法に適合した砂を用い、粒径が1.2mm以上5.0mm以下を粗骨材、1.2mm以下を細骨材として使用した。

コンクリートと同様に、鉄筋についても縮小化して製作したD3の異型鉄筋および1.4φの丸鋼を用いた。いずれも冷間加工ののち焼き入れ焼きなましを行っている。鉄筋の材料試験結果を表4に示した。明瞭な降伏現象が得られなかったため、降伏点強度は残留ひずみが0.2%時の応力として定義した。

3.2 実験装置

図6に2軸振動台上に設置した実験装置の詳細を、図7 a)にその概念図を示した。また、図7 b)には、文献[1][2]で使用した装置の概念図も示した。この従来の装置は、質点とした鋼製のおもりを直接試験体に負荷し、さらにおもりが回転しないようピンサポートを設けたため、試験体の鉛直変位が

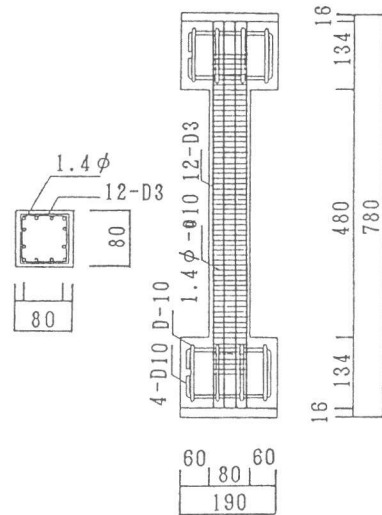


図5 試験体形状

表1 構造諸元

主筋	帯筋	固有周期
12-D3	2-φ1.4φ10	8.9 Hz
$P_o = 1.33\%$	$P_w = 0.4\%$	

表2 コンクリートの調合

設計強度 (kg/cm ²)	W / C (%)	単位重量 (kg/m ³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
210	65	318.3	207.2	869.52	579.68

表3 コンクリートの材料試験結果

* UNIT = Kg / cm ²		
圧縮強度	引張強度	ヤング係数
207	22.5	2.0 x 10 ⁵

表4 鉄筋の材料試験結果

* UNIT kg / cm ²		
降伏強度	引張強度	ヤング係数
2644	2989	1.95 x 10 ⁶

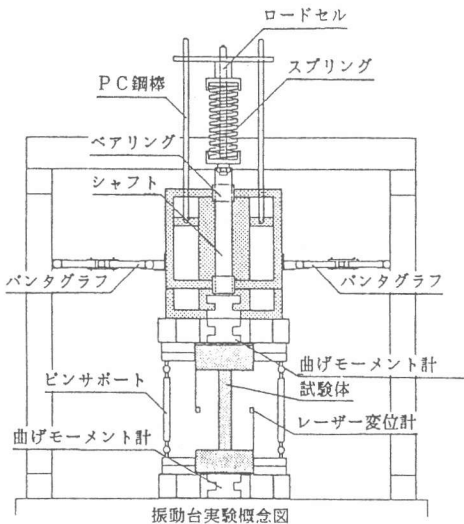


図6 実験装置詳細図

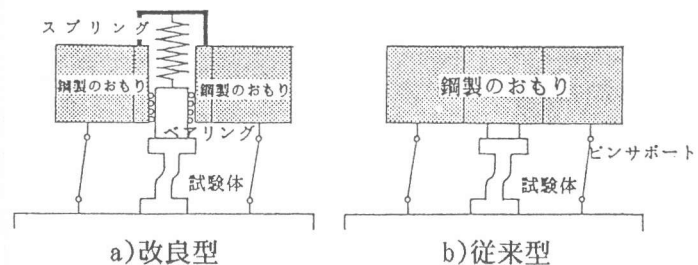


図7 実験装置概念図

拘束され水平変位にともない軸力の変動が起こった。これは、部材挙動の評価を複雑にした。本装置は、これを改良したものである。すなわち、おもりを直接試験体に負荷せずに、スプリングを介して重量を試験体に載荷するものである。この装置によれば、試験体の軸変形によるスプリングの伸縮に比例した（バネ定数：11 kg/cm）わずかな軸力の変動しか起こらないことになる。

3.3 実験方法

静的載荷実験 1方向正負繰り返し載荷実験と、図8に示すような四葉型の2方向繰り返し載荷実験を行った。試験体名をそれぞれSTX91B、STCL91Bとする。振動台上の装置をそのまま使用し、各方向とも油圧ジャッキにより水平加力を行った。各実験における載荷則を表5に示した。四葉載荷では、図中①～⑧の変位経路を完了すると1サイクル、⑨～⑯の経路を完了すると2サイクルの繰り返しを行ったことになる。

振動台実験 2方向振動台実験を行った試験体名を DXY91B とする。地震波は、1968年十勝沖地震（八戸港湾）NS、EW各成分の加速度、波形を相似則に従って時間軸を1/3に圧縮して入力した。入力地震波諸元を表6に示す。

各実験とも、主要な計測項目は、共通である。柱頭・柱脚の曲げモーメントを曲げモーメント計、各方向柱頭・柱脚間の相対変位をレーザー変位計、軸力の変動を鉛直加力用スプリングの先端に取り付けたロードセルによってそれぞれ計測した。特に静的載荷実験では、曲げ変形成分をクリップゲージにより計測した。

4. 解析結果と実験結果の比較

4.1 静的な1軸及び2軸曲げを受けた場合

本解析手法では、応答解析の前

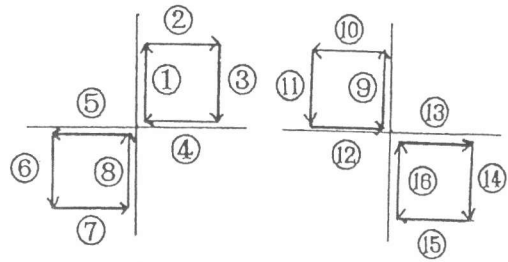


図8 変位履歴

表5 載荷則

部材角	サイクル数	
	STX91B	STCL91
1/500 (0.96mm)	2	1
1/200 (2.4mm)	2	2
1/100 (4.8mm)	2	2
1/75 (6.4mm)	2	2
1/50 (9.6mm)	2	

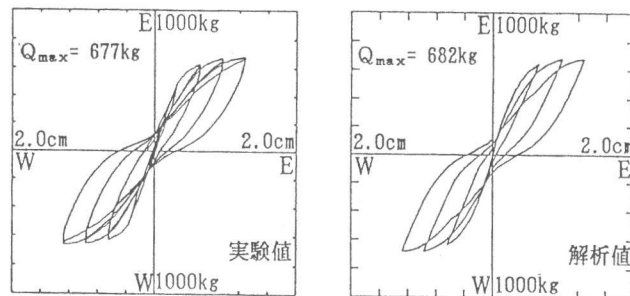
表6 入力地震波諸元

* UNIT=Kg/cm²

入力地震波	方向	最大加速度*
1968年 十勝沖地震 (八戸港湾)	NS	168.4
	EW	182.9

表7 要素分割数

要素分割		軸力 (kg)
材軸方向	断面	
3	8 x 8	2390



実験結果

解析結果

図9 荷重変形曲線 (STX91B)

提としてファイバー法を用いた弾塑性解析結果が実際の部材挙動を適切に再現できるかどうかを確かめる必要がある。ここでは、1軸および2軸曲げ実験として行ったSTX91B、STCL91B、2体の実験結果と解析結果の比較を行った。表7に解析に用いた要素分割数を示す。解析での柱材軸方向のモデル化は、部材の応力状態が逆対称であるから、スパン中央の反曲点位置に集中荷重を加えた片持ち柱形式とした。また、せん断剛性は、実験により計測された全体剛性と曲げ剛性の差より定めた。

図9にSTX91Bの荷重-変形曲線を解析結果と比較して示した。図10には四葉载荷を行ったSTCL91Bの各主軸方向に対する荷重-変形曲線を、図11にはSTCL91Bのせん断力の軌跡を示した。図11における破線は、ファイバー法を用いて断面解析した終局モーメントにより求めた耐力曲線である。

STX91Bは、初期剛性、最大耐力、履歴形状など良好に近似した結果が得られている。STCL91Bでは、同一部材角を繰り返した時の耐力低下が幾分大きい、履歴形状は類似しており、実験結果と同様に2軸曲げ相互作用も再現されている。

4.2 2方向入力を受けた場合の応答性状

解析に用いた入力地震波は、振動台実験で計測された振動台上の加速度波形とした。解析は、減衰係数を初期剛性比例型、減衰定数を2%、時間刻みを1/200秒として行った。

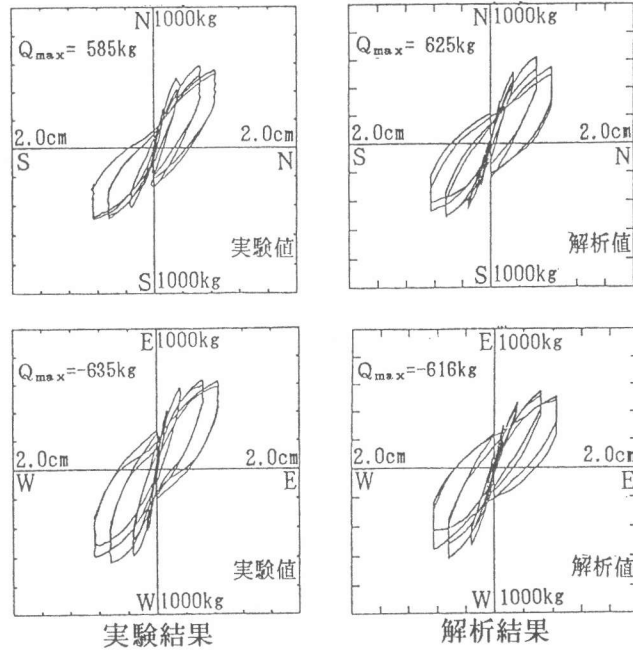


図10 荷重変形曲線 (STCL91B)

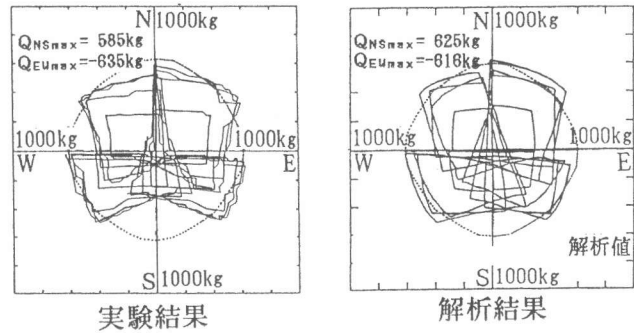


図11 せん断力の軌跡

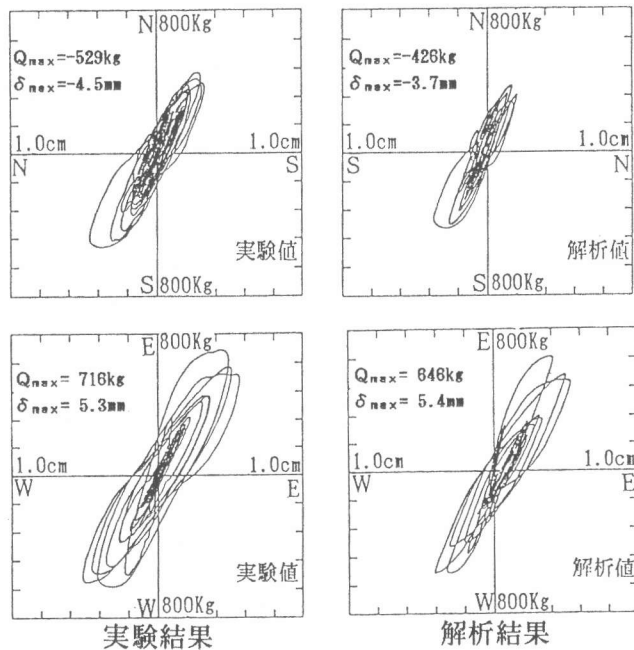


図12 応答履歴曲線 (DXY91)

図12に DXY91 の各主軸方向における応答履歴曲線を、また、図13には応答のせん断力と変位の軌跡をそれぞれ解析結果と比較して示した。最大耐力、最大変形は実験の方がやや大きく、またループの膨らみが大きいのが、履歴形状及び、2軸相互作用を含んだ応答変位の軌跡はほぼ類似していることがわかる。

5. まとめ

以上、解析結果と実験結果の比較から本解析手法は曲げ挙動が支配的なRC柱の2方向入力時における応答性状を把握する上で有効であることがわかった。

謝辞

本研究の一部は平成3年度日本大学学術助成金「鉄筋コンクリート部材の挙動に及ぼす寸法効果と載荷速度の影響」(代表者:日本大学専任講師 中西 三和)によるものである。本研究を行うにあたり終始適切な助言をいただいた日本大学生産工学部神田亮先生に謝意を表します。また、実験に際しコンクリートの材料提供並びに試験体製作にご協力いただいた藤沢薬品工業(株)の各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 安達 洋・中西 三和: 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
コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.2、pp.131-136、1990
- 2) 安達 洋・中西 三和: 2方向入力を受ける鉄筋コンクリート造柱の実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.345-350、1991
- 3) 北嶋 圭二・安達 洋: 2方向入力を受ける鉄筋コンクリート造柱の弾塑性解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.103-108、1991
- 4) Bazant, z.p.etal,: Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete,
Proe. of the ASCE vol 102, No EM4 August, 1976
- 5) Ciampi, V.etal,: Analytical Model for Concrete Anchorages of reinforcing Bars under Generalized Excitation, Report No. UBC/EERC-82/23. University of California, Berkeley, Nov/1982

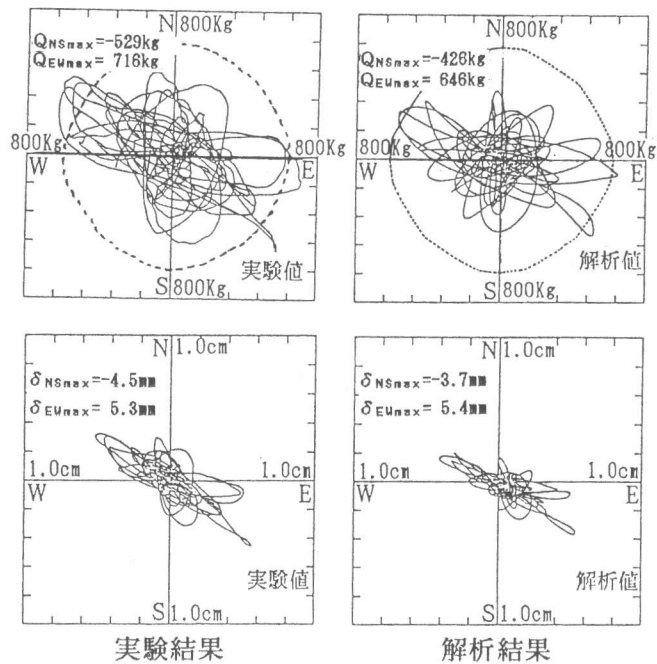


図13 せん断力の軌跡と応答変位の軌跡