

特集 8

2方向繰返し曲げ・せん断力と定軸力を受ける  
鉄筋コンクリート柱の復元力Response of Reinforced Concrete Columns to Bi-directional  
Horizontal Force and Constant Axial Force\*\*

岡田 恒男\*・関 松太郎\*・浅井 敏司\*

Tsuneo OKADA, Matsutaro SEKI and Satoshi ASAI

## 概 要

水平2方向成分を持った地震動に対する鉄筋コンクリート建物の地震応答に関する研究の第1段階として、鉄筋コンクリート柱に一定軸力の下で、水平2方向成分を持つ水平変位を繰返し与える実験とコンクリートと鉄筋の非線形応力・ひずみ関係に基づく計算機シミュレーションを行なった。本報告は、主に水平2方向成分を持つ変位履歴が、鉄筋コンクリート部材の終局強度とじん性能に及ぼす影響について述べたものである。

## ま え が き

最近、地震時における建物の水平2方向応答の重要性が認識され、2方向地震動に対する地震応答や2方向曲げあるいは曲げせん断を受ける柱の非線形性状に関する研究が行なわれるようになった。<sup>文献1)~7)</sup> これらの結果あるいは過去の震害例をみると、現在の設計法では通常考慮されていない水平2方向成分をもつ地震動を受けた時の建物の地震応答は、1方向の地震動に対する応答より苛酷であることが予想されるが、問題の複雑さのゆえに、未知の点が多く、これを耐震設計に応用するためには、実験データの集積ならびに適切な解析モデルの開発が特に必要であると思われる。本報告は、種々の水平2方向変位履歴を構造物に強制するために新しく試作した3方向繰返し加力試験装置を用いて、変位履歴の鉄筋コンクリート柱の強度と変形能に及ぼす影響を調べるために行なった実験結果と、その計算機シミュレーションの結果について述べたものである。

## 実験装置ならびに試験体

図1に、実験装置を示す。試験体の上端は、加力用鉄骨フレームに、また、下端は、軸方向変形に追従可能な固定治具に、それぞれ高張力ボルトにて固定した。2方向水平変位は、水平面に直交して配置された2台の電気油圧式ア

クチュエータによって、試験体の中央に加えられた。これらのアクチュエータの変位を制御するために、各アクチュエータの反対側にアンバースチールを介してインダクタンス式変位計を設置した。また、コンクリート強度の約1割に相当する軸力が、もう1台のアクチュエータによって加えられ、実験中は一定となるよう制御された。

図2に、試験体の詳細を示す。試験体は、上下別々の柱から成り、中央の治具とともに一体となるようにボルト締めされている。試験体は、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準(1975)に則って、1方向曲げ・せん断力を受けたときの曲げ降伏時強度とせん断強度とがほぼ等しくなるように設計された。

## 実験方法

2台の低周波発振器より、振幅と位相の異なる種々の正弦波を水平加力用のアクチュエータに与えることによって、試験体に表1に示す6種の2方向成分をもつ変位履歴を強制した。これらの変位履歴は、建物の水平2方向地震応答変位を模して単純化したものである。実験においては、前記変位計により測定された試験体の実測変位により制御した。変位振幅、位相差および繰返し数等も表1に示されている。Run IIの変位振幅(片振幅)7mmが、ほぼ柱の曲げ降伏時の変位に相当する。

## 実験結果

1方向繰返し加力下における荷重・変位曲線の代表例を図3に示した。試験体BC-1は、断面の主軸方向に、また、BC-3は、ななめ45°方向に、それぞれ繰返し加力を受けたものである。試験体BC-1は、図にみられるように一定変位振幅の繰返しによる耐力低下は生じたが、Run IVにおける30回の繰返しに耐えた。試験体BC-3もBC-1と同様な挙動を示したが、Run IVの25回で崩壊した。これは、通算繰返し数の63回目に対応する。図4は、実験で得られた、Run IIIとIVにおける試験体BC-4, 5, 6の復元力履歴曲線を示している。これらの復元力履歴曲線は、表1に示した変位履歴曲線とはほぼ同じ形状を示したが、繰返しによる耐力低下のために、いわゆるクロソイド曲線状となった。また、変位履歴曲線と復元力履歴曲線の主軸のずれが観察された。

\* 東京大学生産技術研究所 第1部

\*\* English version appears in the Bulletin of ERS, No. 10, 1976, Earthquake Resistant Structure Research Center, Institute of Industrial Science, University of Tokyo.

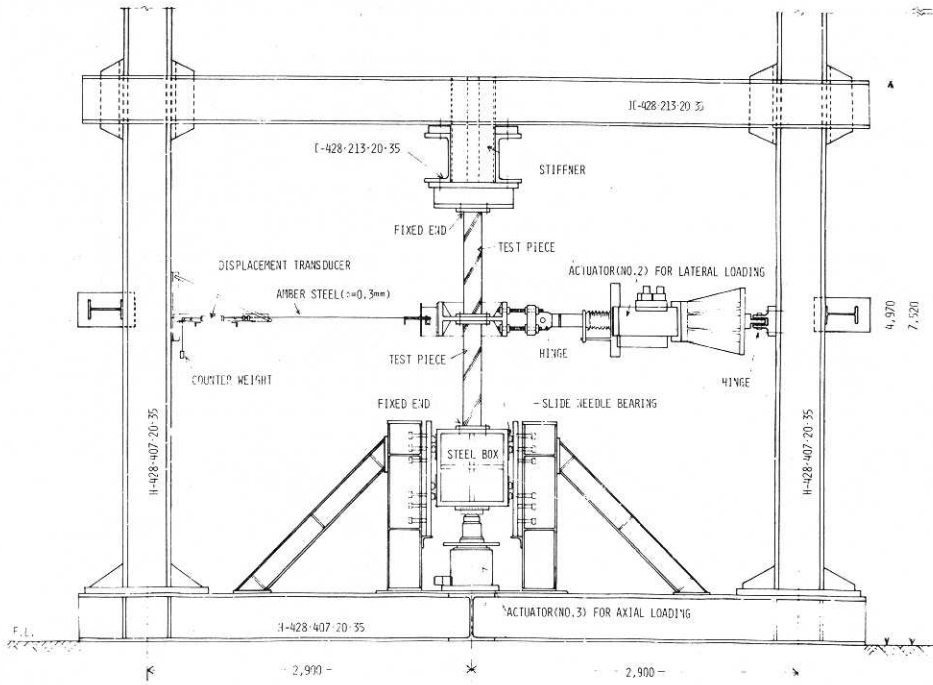


Fig. 1 Test Setup

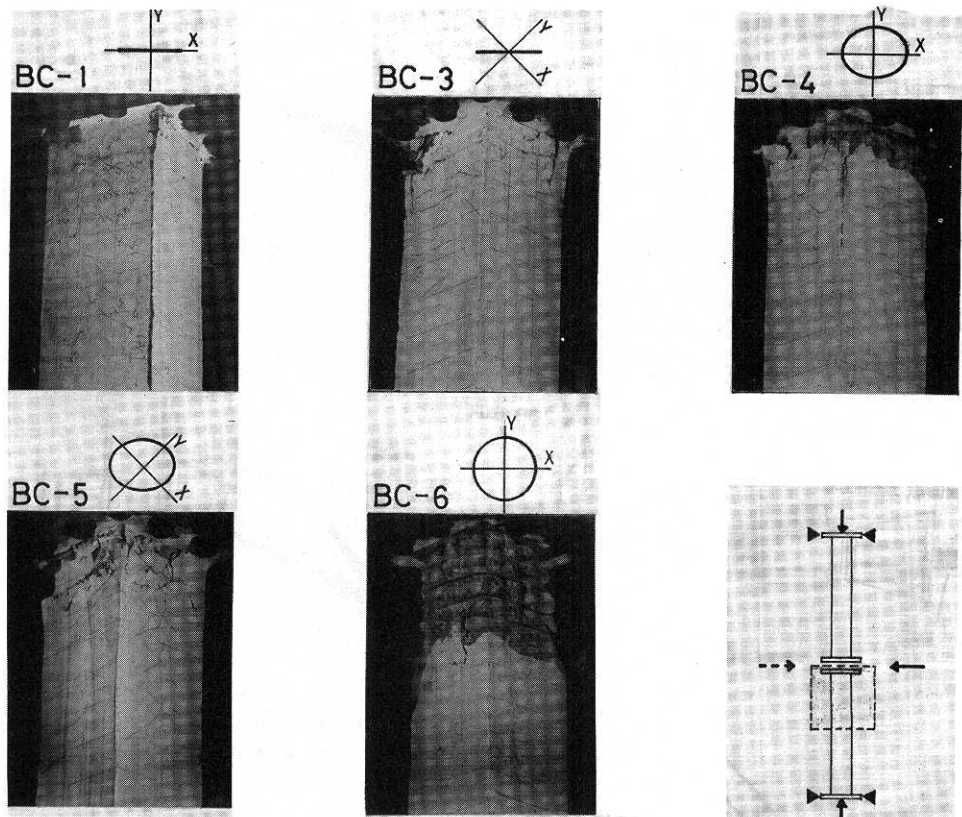
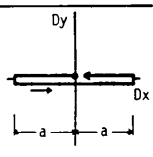
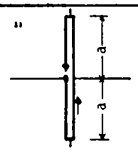
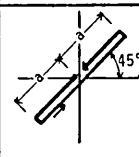
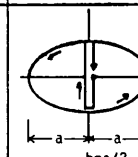
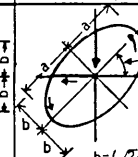
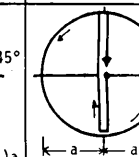


Photo 1 Crack Patterns at the 14-th Cycle of RUN-III

Table 1 Displacement Traces and Number of Cyclic Loading

TEST PIECE	BC - 1	BC - 2	BC - 3	BC - 4	BC - 5	BC - 6
DISPLACEMENT HISTORY $D_x = A \cdot \sin(\omega t + \phi)$ $D_y = B \cdot \sin(\omega t)$						
A	a	0	$a/\sqrt{2}$	a	$\sqrt{2-\sqrt{2}} a$	a
B	0	a	$a/\sqrt{2}$	a/2	$\sqrt{2-\sqrt{2}} a$	a
c	-	-	0°	90°	45°	90°
RUN	a (RADIAN)	CYCLES NUMBER (SUM)	CYCLES NUMBER (SUM)	CYCLES NUMBER (SUM)	CYCLES NUMBER (SUM)	CYCLES NUMBER (SUM)
I	3 mm. (1/300)	1	1	1	1	1
II	7 mm. (1/125)	6 (7)	7 (8)	6 (7)	6 (7)	6 (7)
III	14 mm. (1/60)	31 (38)	11 (19)	31 (38)	31 (38)	31 (38)
IV	20 mm. (1/45)	30 (68)	STOP TESTING FOR UNSTABLE CONDITION OF CONTROL SYSTEM	25 (63) COLLAPSE	7 (45) COLLAPSE	4 (42) COLLAPSE
						14 (21) COLLAPSE

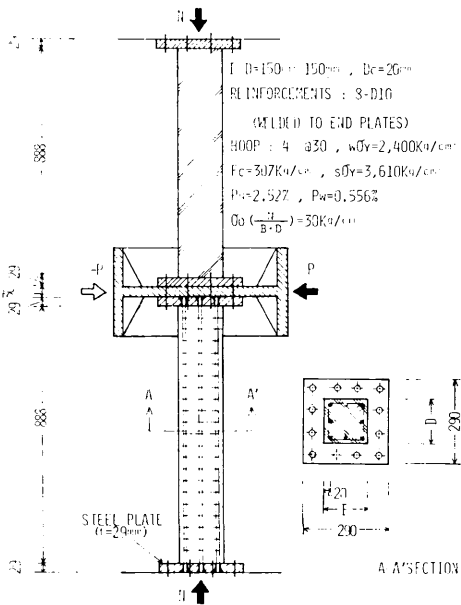
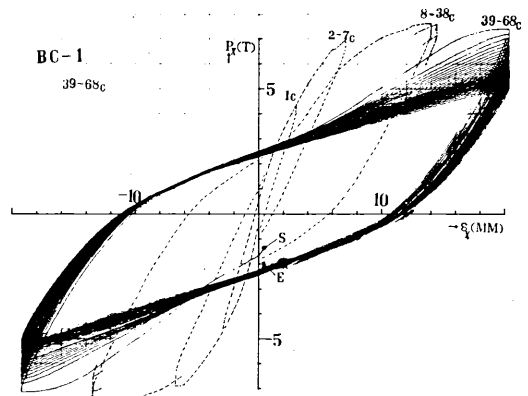
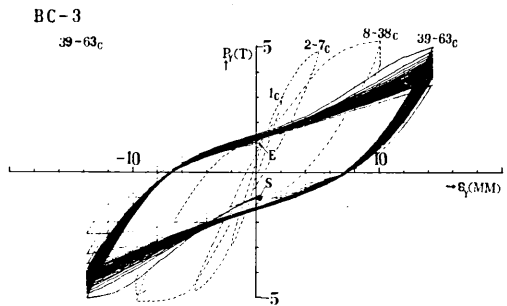


Fig. 2 Detail of Test Column



a) Column BC-1



b) Column BC-3

Fig. 3 Measured Force Displacement Under Uni-Directional Loading

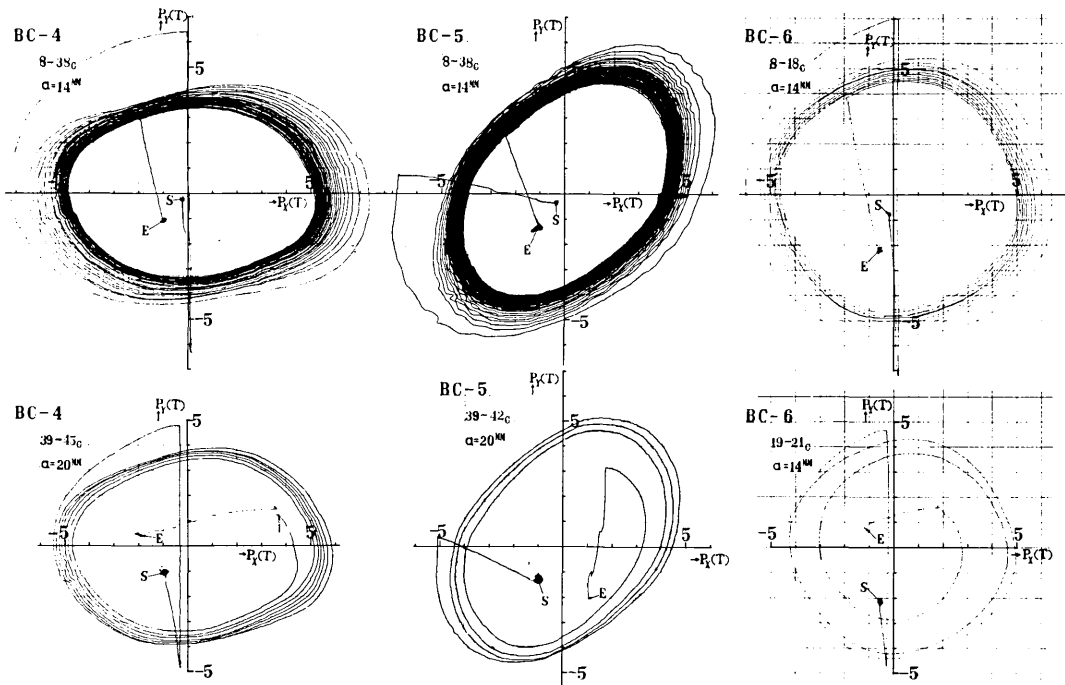


Fig. 4 Measured Restoring Force Traces at RUN-III and RUN-IV

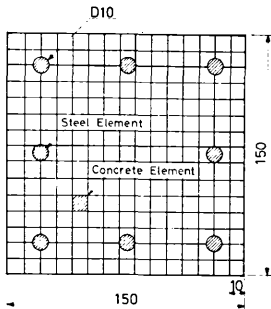


Fig. 5 Finite Elements of Cross Section

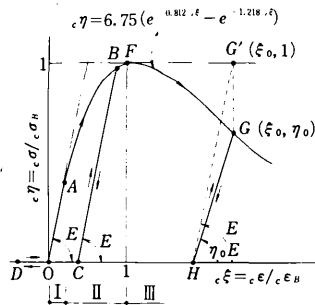


Fig. 6 Stress-Strain of Concrete

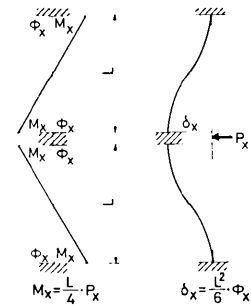


Fig. 7 Assumed Moment and Curvature Distribution

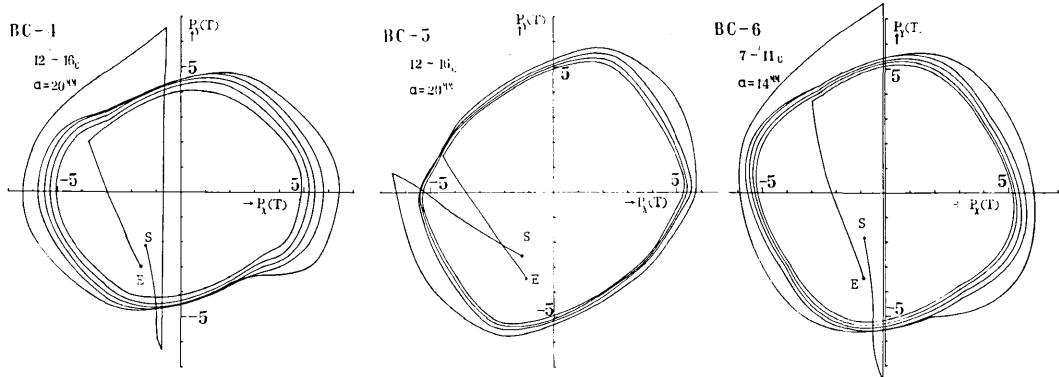


Fig. 8 Examples of Computed Restoring Force Traces

だ円の変位履歴を受けた試験体BC-4と5は、Run IVの初期に崩壊した。円の変位履歴を受けた試験体BC-6は、最もじん性に乏しく、片振幅が降伏点変位の約2倍(塑性率 $\approx 2$ )であるRun IIIの14サイクル目で崩壊に至った。これは、通算21サイクル目に相当し、この時点における各試験体のきれつパターンを写真1に示した。1方向加力を受けた試験体BC-1の場合と違って、円の変位履歴を受けた試験体BC-6においては、コンクリートが大きく剝離し、変形能を早く失うなど変位履歴による破壊性状の明らかな差が観察された。

### 計算機シミュレーション

実験結果とのシミュレーションを行なうために、計算機プログラム「OS-2S」を開発作成した。基本理念は、コンクリートと鉄筋の非線型応力ひずみ関係に基づいて1方向地震応答解析用に開発されたプログラム「OS-1D」と同様である。<sup>文献8)</sup>すなわちコンクリートには、図6の応力・ひずみ関係を、また、鉄筋の応力ひずみ関係には、Ramberg-Osgood関数を用いた。柱危険断面(柱の上下端の断面)は、図5に示すように、225個のコンクリート分割要素と8本の鉄筋要素に分割され、各要素のひずみが仮定した適合条件(平面保持)を満たし、かつ各要素の応力が、非線型応力・ひずみ関係と軸方向の釣合い条件を満足するモーメント・曲率関係を収れん計算により求めた。このようにして得られた危険断面でのモーメント・曲率関係より試験体の材軸方向に、図7に示したような曲率分布を仮定して、2方向水平力・変位関係を計算した。図8に、計算結果の代表例を示した。ただし、演算時間の都合上、繰り返し回数は、実験のそれより少なくなっている。2方向繰り返し加力を受けたときの終局耐力、耐力低下および主軸の傾き具合を含めた復元力履歴曲線の特性などに関して、実験と解析は良い対応を示した。しかし、終局崩壊点に関してはまだ、計算には再現されていない。

### む す び

地震応答を模した種々の水平2方向変位履歴による鉄筋コンクリート柱の破壊試験に関し、今回得られた結論の概要は次の通りである。

1) 新しく開発した実験システムは、この種の実験に非常に適しているものと思われる。特に、任意の変位履歴の制御を精度よく行なうことができた点は、今後この種の研究を進展させるために有益な結論であると言え

う。

2) 水平2方向変位履歴のパターンにより鉄筋コンクリート柱の変形能が大きく影響をうけ、変位履歴が円の軌跡に近づくほど、変形能の劣化が著しいことが明らかにされた。

3) 開発した計算機プログラム「OS-2S」による解析結果は、終局崩壊点を除き実験結果をかなり良く説明した。

なお、以上の結果に基づき、本プロジェクトは電算機・アクチュエータオンライン実験による2方向地動に対する応答シミュレーションへと進展し、現在、実験を終わりデータの解析を進めている段階である。

### 謝 辞

本研究は、昭和50年ならびに51年の文部省の科学研究費によった。実験遂行に当たっては岡田健良技官と朴永周大学院生の協力を得た。また、実験装置の設計に際して、高梨晃一助教授、宇田川邦明助手、嶋脇与助技官の協力を得た。ここに記して、謝意を表す。

(1977年3月10日受理)

### 参 考 文 献

- 1) Okada, T. et al : Analysis of the Hachinohe Library Damaged by '68 Tokachi-oki Earthquake : Bulletin of ERS, No.3, Earthquake Resistant Structure Research Center, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1969
- 2) 芳村他 : 2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の研究(その2, その3) : 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 昭和49年(1974)10月
- 3) Takizawa, H and Aoyama, H. : Biaxial Effects in Modeling Earthquake Response of R/C Structures : Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, 1976
- 4) 岡田他 : 多方向繰り返し偏心圧縮力をうける鉄筋コンクリート柱の復元力 : 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 昭和45年(1970)9月
- 5) 滝口他 : 鉄筋コンクリート柱の2軸曲げ実験 : 日本建築学会論文報告集第229号, 昭和50年(1975)3月
- 6) Aktan, A.E. et al : Response of A Reinforced Concrete Section to Two Dimensional Curvature Histories : ACI Journal, 1974
- 7) 岡田他 : 定軸力と繰り返し2方向曲げ・せん断力を受ける鉄筋コンクリート柱の復元力 : 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 昭和51年(1976)10月
- 8) Okada, T. and Seki, M. : A Simulation of Earthquake Response of R/C Buildings : A paper presented to the VI-WCEE, New Delhi, India, 1977