

## [114] 2軸曲げと軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動

正会員 ○ 鈴木 紀雄 (東京大学大学院)

正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

正会員 小谷 俊介 (東京大学工学部)

## 1. 序

水平2方向地震動を受ける建築構造物の挙動を解析的に知るためには、2方向のせん断力を受ける柱部材の復元力特性モデルが必要である。従来用いられてきた2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の復元力モデルでは、いわゆる降伏曲面の概念が重要であるにもかかわらず、既往の実験的研究では、降伏曲面の形状や履歴による降伏曲面の変化が十分に把握されていない。さらに、建築骨組の外柱や隅柱では、転倒モーメントによる軸力の変動が降伏曲面に影響を及ぼすと予想されるが、変動軸力と2軸曲げを同時に受ける鉄筋コンクリート柱を対象とした研究は行われていない。そこで本研究では、定軸力または変動軸力下での降伏曲面を実験的に把握、その形状や変化を既往の復元力モデルで説明できるかを検討することを目的とした。

## 2. 実験概要

試験体は図1に示す様に、断面が $20 \times 20 \text{ cm}$ の正方形で、危険断面から加力中心までの高さが $60 \text{ cm}$ の、曲げ破壊型の柱2体である。材料の性質を表1に示す。

加力方法は、図2に示す様に、試験体を反力床に固定し、3基のサーボアクチュエータにより、柱頭に軸力と水平2方向の強制変位を加えた。鉛直方向は荷重制御、水平方向は変位制御とした。

試験体2体のうち、中柱を想定したICでは、定軸力として $12 \text{ ton}$  (平均軸応力度 $30 \text{ kg/cm}^2$ )を加え、外柱を想定したECでは、軸力を $12 \text{ ton}$ を中心にx方向の水平力 $P_x$ に比例して変動させた(y方向水平力に関しては変動しない)。従って軸力とx方向水平力の関係は、図3に示す様に、軸力-水平力の終局相互作用図内では直線として表わされる。これらの試験体の柱頭の変位履歴は同じである。

従来の2軸曲げ実験における変位履歴の多くは、円形、あるいは四角形であったが、円形履歴では、直交2方向のいずれかで常に減力が起こるので、水平力の軌跡は降伏曲面の内側を動くことになるし、また図4(a)の様な⑩から出発する四角形の変位履歴では、水平力の軌跡は④～⑩で降伏曲面をたどっても、⑩～④では除荷となるので降伏曲面の内側に入ってしまう、④～⑩で再加力されて降伏曲面に⑩で達しても、⑩～④では除荷になってしまうため、円形履歴の場合と同様、降伏曲面を明らかにすることは難しい。図4(b)に、四角形の変位履歴を与えた実験の水平力の軌跡を示す<sup>1)</sup>。④～⑩の間と⑩、④、⑩点の近傍で降伏曲面が現われているものと考えられる。

そこで本実験では、図5に示した「四つ葉型」の変位履歴を加えて、降伏

表1 材料の性質

|        |                                          |
|--------|------------------------------------------|
| コンクリート |                                          |
| 圧縮強度   | $f_c = 155 \text{ kg/cm}^2$              |
| 強度時歪   | $\epsilon_s = 0.002$                     |
| 初期剛性   | $E_c = 1.92 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ |
| 鉄筋     |                                          |
| 降伏強度   | $f_y = 3300 \text{ kg/cm}^2$             |
| 最大強度   | $f_t = 4000 \text{ kg/cm}^2$             |
| 降伏時歪   | $\epsilon_s = 0.0018$                    |

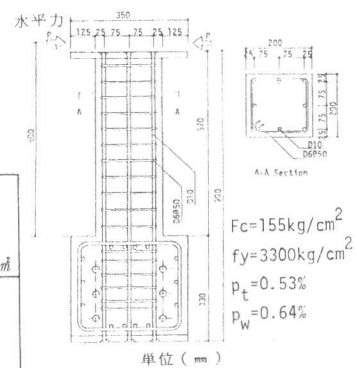


図1 試験体

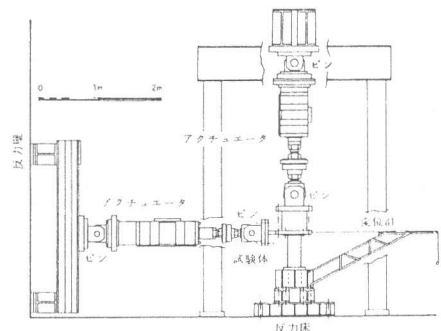
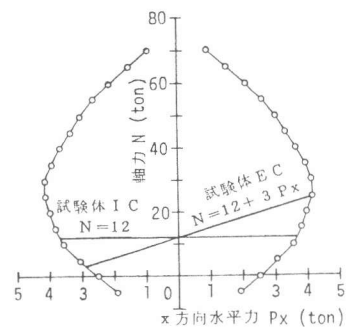


図2 加力装置

図3 軸力-水平力  
終局強度相互作用図

曲面の形状を明らかにすることを試みた。この履歴によると、例えば順方向加力の③～⑤の間についてみると、③～⑤の加力によって降伏曲面に達した後、さらに④～⑤の加力により、水平力の軌跡は降伏曲面の上をたどると予想できる。従って、順方向加力では図5の実線で示す部分で、逆方向加力では図5の破線で示す部分で降伏曲面が現われると期待できる。本実験では表2に示す様に、振幅の値を変えて、順方向と逆方向の加力を交互に行なった。ただし2サイクルは、③～⑤の対角方向加力である。なお、1・2サイクルの8mmの変位は、軸力12 ton の場合の1軸曲げ降伏変位の約2倍に相当する。

### 3 実験の結果と考察

中柱試験体 I C では、①～④の間に変位4mmで引張鉄筋が降伏したが、外柱試験体 E C では変位4mmで引張鉄筋と圧縮鉄筋がほぼ同時に降伏した。両試験体とも、1サイクル③付近で隅角部のコンクリートが圧壊し始めた。その後の破壊は柱脚部分に集中し、両試験体とも4サイクルの④付近で、コンクリートの圧壊と鉄筋の座屈により軸力を保持し得なくなった。

中柱試験体 I C の1サイクルと3サイクルの柱頭の水平力の軌跡を図6に示す。降伏曲面が現われていると考えられる部分を太線で、それ以外の部分を細線で示した。降伏曲面の形状や大きさの目安として、図6(a)に1軸曲げ降伏強度の計算値を半径とする円を破線で示す。水平力が④から③へ変化すると、その軌跡は初めは計算降伏円上をたどるが、しだいにこの円の外側へ出てゆく。その後の降伏曲面が現われていると考えられる部分(例えば④～③、①～④)では、水平力の軌跡は計算降伏円の外を移動する。これは、柱の復元力平面上を降伏曲面が移動、膨張するためだと定性的な説明ができる。そこで図7に示す降伏曲面の移動と膨張を取り入れた「金属塑性論アナロジーモデル<sup>2)</sup>」(以後「2軸曲げモデル」と呼ぶ)を使って定量的な説明を試みる。このモデルの諸定数は、1方向水平加力時の復元力特性で定められるが、危険断

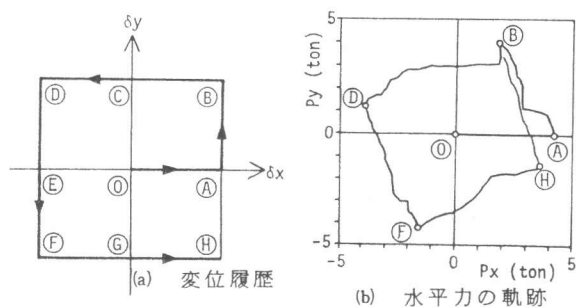


図4 四角形の変位履歴と水平力の軌跡

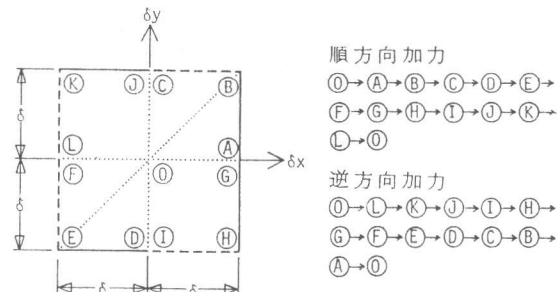


図5 四つ葉型変位履歴

表2 加力プログラム

| サイクル | 振幅    | 加力方向        |
|------|-------|-------------|
| 1    | 8 mm  | 順方向         |
| 2    | 8 mm  | ① ③ ⑤ ④ ② ① |
| 3    | 16 mm | 逆方向         |
| 4    | 32 mm | 順方向         |

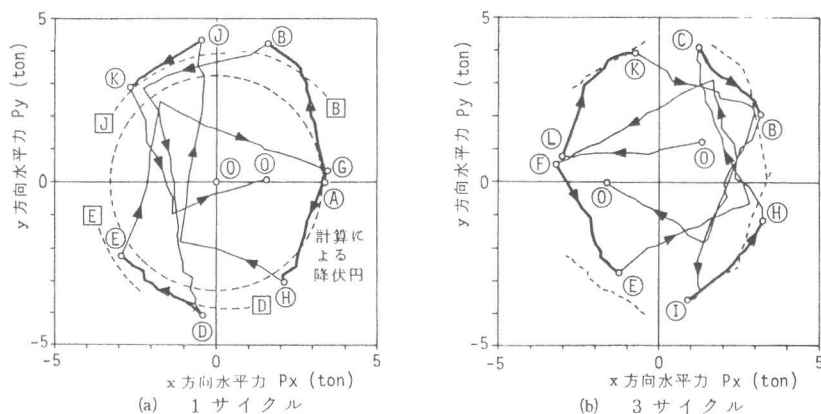


図6 中柱 I C の水平力の軌跡

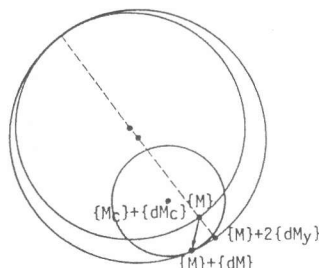


図7 2軸曲げモデル

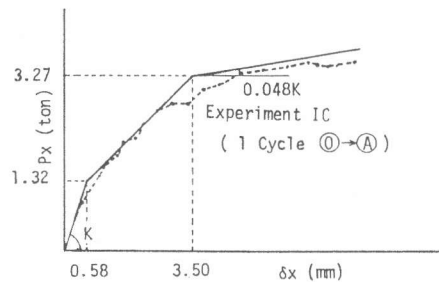


図8 1軸特性

面の曲率と柱頭の水平変位の間に比例関係を仮定し、ファイバーモデル<sup>3)</sup>によって図8の様に定めた。これは、1方向加力の生ずる1サイクルの⑨～④間の復元力特性と良く合っている。2軸曲げモデルを用いて実験の⑧、⑩、⑪における降伏曲面を計算すると、それぞれ図6(a)の破線[B]、[D]、[E]、[J]のような円弧となり、実験で得られた水平力の軌跡と良い対応が得られた。図6(b)では、3サイクルの水平力の軌跡に加えて、1サイクルの降伏曲面が現われていると思われる部分を破線で示したが、3サイクルの降伏曲面部分はほぼこの破線内に入っている。これは、降伏曲面の膨張に限界があることを示している。

外柱ECでは、x方向水平力 $P_x$ に比例して軸力が増減するが、その場合の1・3サイクルの水平力の軌跡を図9に示す。軸力の最大値は23 ton（軸方向応力度 $57.5 \text{ kg/cm}^2$ ）、最小値は0 tonであった。1サイクルに現われた降伏曲面の動き（図9(a)）を、2軸曲げモデルで解析する方法を考察する。

軸力と水平2方向の水平力の降伏時相関曲面は、図10の様な軸力と1方向水平力の相関曲線を、軸力を表わす鉛直軸のまわりに回転させたものとする。これを3次元降伏曲面と呼ぶ。本実験では軸力はx方向の水平力にのみ比例させているから、3次元降伏曲面上の水平力の軌跡を2方向水平力の $P_x$ - $P_y$ 平面へ写影すると、図10に示した様に中心が原点から $P_x$ 方向へずれた楕円形に近いものとなる。

これを2次元降伏曲面と呼ぶ。3次元降伏曲面の移動や膨張に伴って、2次元降伏曲面も移動、膨張する。3次元降伏曲面の移動、膨張則はい

まだ定式化されていないので、ここではその写影である2次元降伏曲面が楕円であり、2軸曲げモデルに従って変化すると仮定する。2次元降伏曲面の初期降伏水平力は、軸力の最大値が24.5 ton、最小値が4.5 tonの場合として計算できる。これらの軸力の値を、正負方向の定軸力とする1軸曲げ特性は、図11(a)のようになるが、これがx方向の1軸曲げ特性を表わすと仮定する。ただし2軸曲げモデルは、正負両方向の1軸曲げ特性が同一でないと利用できないので、図11(b)の様に、x方向の特性を定めた。すなわち、(1)初期剛性は全断面有効の値とする、(2)ひびわれ強度、降伏強度、降伏変位は、軸力4.5 tonと24.5 tonそれぞれの場合の値の平均値とする、(3)第3剛性は軸力12 tonの場合の1軸の値に等しい、とした。初期状態における降伏曲面の原点からのずれを表わすために、図11(b)に示した様にあらかじめ⑨→④という変位を与え、以後の計算では⑨が原点となる様に水平力と変位を変換した。この結果、図11(b)の1軸特性は、図11(a)の1軸特性と初期剛性、降伏強度、降伏変位が同一となる。y方向の1軸特性は、軸力が $14.5 \text{ ton} (= (24.5 + 4.5) / 2)$ のときのものとした。計算した降伏曲面のうち、⑧、⑩、⑪、⑫に対応する位置を[B]、[D]、[E]、[J]として図9(a)に示す。実験値はこれらの曲面に近く、良い対応が得られた。図9(b)には、3サイクルの水平力の軌跡に加えて1サイクルの降伏曲面と思われ

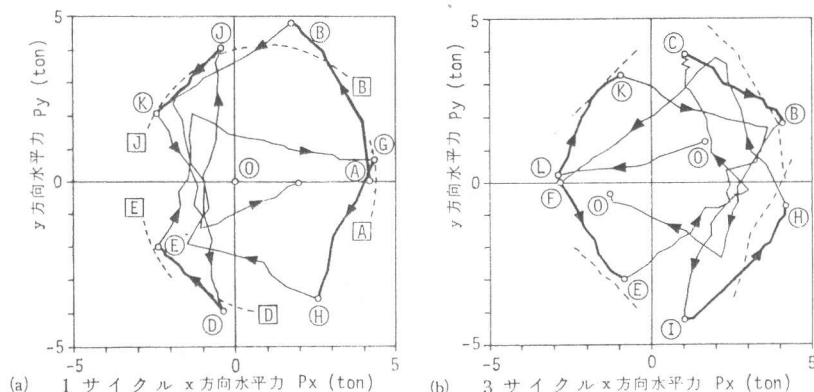


図9 外柱ECの水平力の軌跡

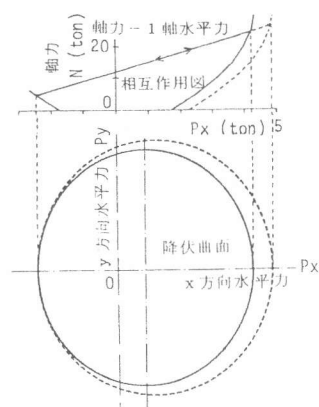


図10 降伏時の軸力・水平力の相関曲面

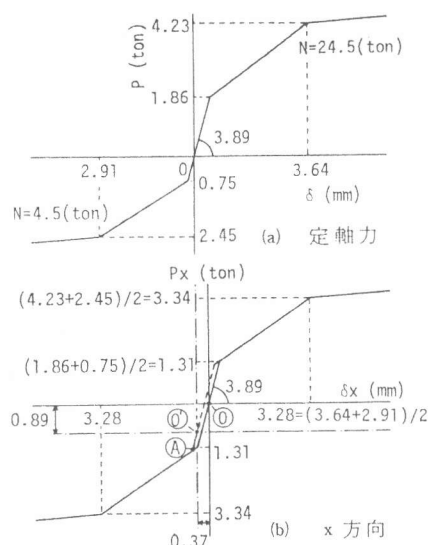


図11 2軸曲げモデルの特性の決め方

る部分を破線で示した。3サイクルの水平力の軌跡はほぼこの破線内に入っており、降伏曲面の膨張の限界を表わしている。本実験の様に、軸力の変動が1方向の水平力に比例するといった単純な場合には、定軸力を対象としている2軸曲げモデルを利用した説明が可能である。

#### 4. 解析

2軸曲げモデル(図7)によって計算した中柱ICの1サイクルの水平力の軌跡を図12に示す。図中に破線で示した実験結果と比較すると、全体的には良く一致していることがわかる。ただし、⑥~⑩と①~⑤の間では降伏曲面が現われると予想したが、解析では水平力の軌跡は降伏曲面の内側を動いている。このうち、⑥~⑩は実験結果と良く一致しており、実験結果に降伏曲面が現われていない可能性も考えられる。一方①以降では、解析結果と実験結果の対応が悪くなっており、解析モデルの検討が必要と思われる。

また、危険断面を図13(a)の様に分割し、図13(b)(c)の材料の応力度-歪度関係から断面のモーメント-曲率関係を計算し、さらに曲率と柱頭の水平変位が比例すると仮定して、中柱ICと外柱ECの実験結果を解析した。計算結果は図14に示

す様に、実験結果の傾向を定性的に良く表わしているが、定量的にはy方向の荷重が小さくなっている。

#### 5. まとめ

定軸力、または変動軸力と2軸曲げを鉄筋コンクリート柱に加える実験を行なった。その結果、(1)四つ葉型変位履歴により、降伏曲面の移動、

膨張が実験でも認められた。(2)定軸力と2軸曲げを受ける柱の降伏曲面の動きは、降伏曲面を楕円と仮定して、その移動と膨張を考慮した2軸曲げモデルで説明ができた。(3)2軸曲げと1方向水平力に比例して変動する軸力を受ける柱の降伏曲面

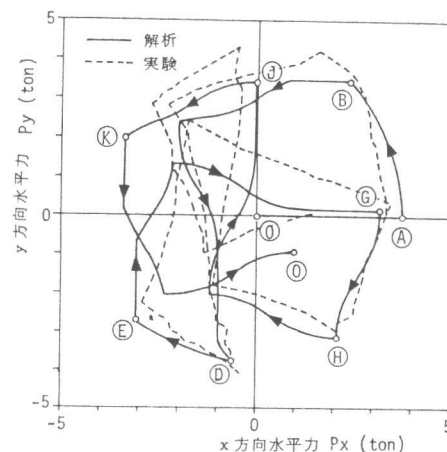


図12 2軸曲げモデルによる解析  
(中柱IC)

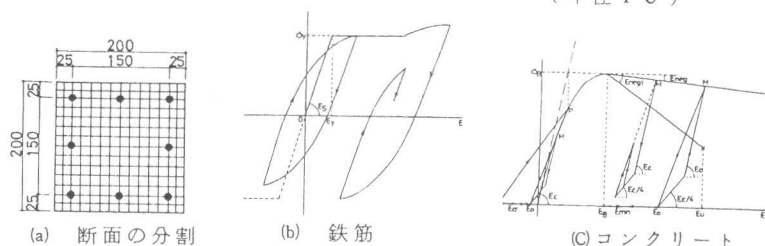


図13 ファイバーモデル

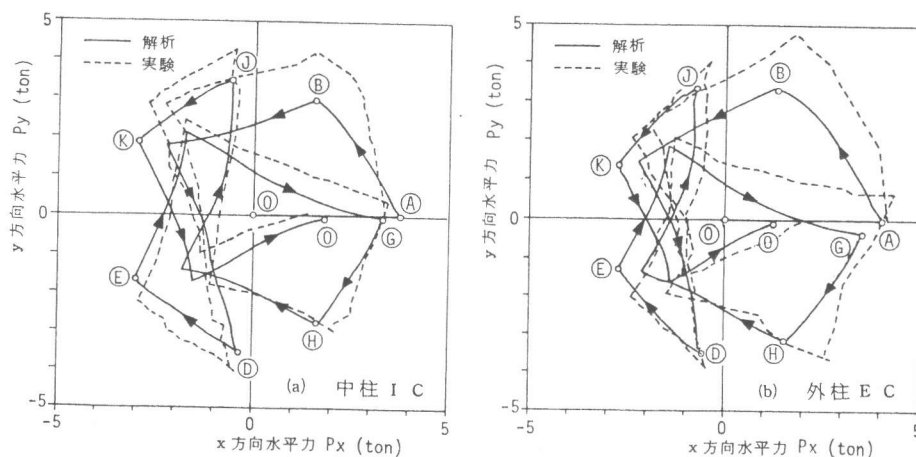


図14 ファイバーモデルによる解析

の動きも、定軸力下を対象とする2軸曲げモデルを応用して説明できた。

#### 参考文献

- 1) 藤井・伊藤・梅村・青山「二軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の実験的研究」建築学会関東支部研究発表会 S.48
- 2) 滝沢「Tri-linear Modelの二軸曲げ問題への拡張」建築学会学術講演梗概集 S.48
- 3) 藤井・青山・梅村「材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係」建築学会学術講演梗概集 S.48