

論文

[2036] 繰返し2方向曲げ・せん断を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状

正会員 ○ 上原 広 (大阪工業大学大学院)

正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)

1. 序論

通常の設計では、地震力は、骨組に対して1方向のみから作用すると考え、その耐震性を検討している。しかしながら、地震時の骨組は、2方向からの外力を同時に受ける。1方向外力に対して、梁降伏型のメカニズムが保証されても、同時に2方向から外力を受けると、骨組は柱降伏型となる可能性がある。これは柱の塑性化の進行によるものであり、2方向外力を受けるRC柱の弾塑性性状を解明することは急務である。さらに、設計における実用性を考えれば、設計用地震力の取扱いは、2方向外力の同時性を十分考慮して、構造物の主たる1方向の耐震性を検討することに帰結する。そこで、本研究では、サーボ・アクチュエーター・システムによる、2方向曲げ・せん断を受けるRC柱の実験手法の開発を行い、このシステムを合理的に運用し、RC柱の水平2方向に任意の強制変位を与え、その主たる方向の弾塑性性状を実験的に解明する。

2. 実験

2.1 実験計画 実験変数は、試験体頭部に強制的に与えた水平変位の形状とした。変位経路の基本形状は、十字型、8字型、L字型の3種類である。さらに、2主軸に各々与えられた強制変位の比率、 $D_y/D_x$  ( $D_x=const.$ ) を変化させ、主たる方向の弾塑性性状に与える影響を検討する。入力比  $D_y/D_x$  は、0、0.5、1.0と変化させた。これらを組み合わせ、計6体の試験体を計画した。図1に、実験変数の組合せを示す。十字型の経路では、両主軸方向に交互に載荷する。これより、1軸曲げと2軸曲げの比較を行う。2方向外力を同時に載荷される、8字型、L字型などの矩形の経路を与えれば、水平変位の増加区間では、直交する2方向の何れの方向でも減力が生じない。すなわち、復元力の軌跡は、破壊曲面に沿って移動し、破壊曲面の推移状況を明らかにする

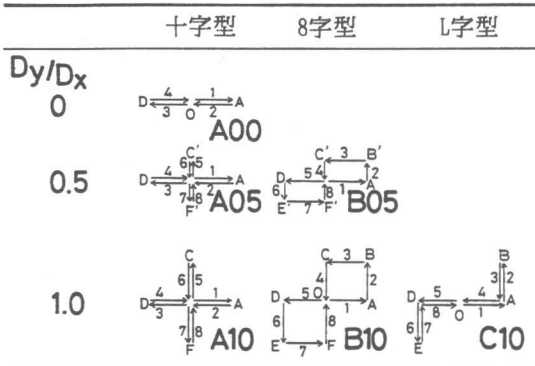


図1 実験変数

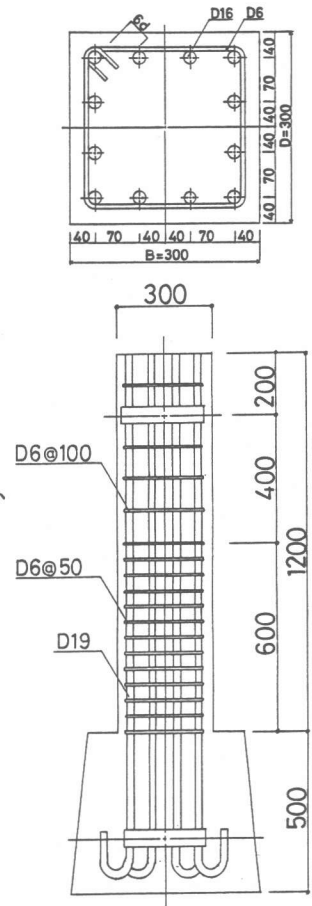


図2 試験体の形状寸法、断面形状

ことができる。図2に、試験体の形状寸法、断面構成を示す。断面寸法は、 $B \times D = 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ である。試験体の形状寸法は、共通であり、片持ち柱形式である。柱主筋には、D16(引張側主筋比 $p_t = 1.33\%$ 、降伏点応力 $\sigma_y = 3750\text{kgf/cm}^2$ )を用いた。せん断補強筋には、D6(せん断補強筋比 $p_w = 0.38\%$ 、降伏点応力 $\sigma_{wy} = 3276\text{kgf/cm}^2$ )を用い、曲げ破壊が卓越するように配筋した。実験時のコンクリートの圧縮強度は、 $F_c = 250\text{kgf/cm}^2$ であり、コンクリートの材令は、打設後、4週間であった。

なお、何れの試験体とも、軸力として $0.2 \cdot BD \cdot F_c$ を作用させた。図3に、実験装置の概要を示す。载荷は、3基のアクチュエーターを、互いに直交する方向に配置し、試験体頭部の载荷治具を介して行った。3基のアクチュエーターは、それぞれ、制御する2方向の水平力と一定の軸方向力に相当している。各々のアクチュエーターは、軸方向力に相当するものは、荷重制御、2方向の水平力に相当するものは、変位制御とした。全試験体に対して、

相対部材角  $R (=D/h \text{ } D:\text{柱頭での水平変位、} h:\text{柱高さ})$ を、制御基準値とし、初期値を $0.005\text{rad.}$ 、最終値を $0.03\text{rad.}$ とする漸増変位制御法により、繰返し载荷を行った。また、同一変位振幅で、2回の繰返し载荷を行った。初期値を $0.005\text{rad.}$ としたのは、RC柱の弾性範囲内の挙動を調べるためである。これは、降伏変位のおよそ $1/2$ に相当する。

## 2.2 破壊状況

図4に、各試験体の最終破壊状況を示す。何れの試験体とも、初期曲げひびわれは、 $R = 0.005\text{rad.}$ に達するまでに形成された。以後、変位振幅の増大にともない、柱脚部分に集中し、曲げひびわれが卓越して進展する。最大耐力時には、柱脚部分でコンクリートの圧壊が生じる。最大耐力時以後、ひびわれの進展は見られない。これは、破壊が、柱脚部分に形成されたヒンジに集約されるためである。

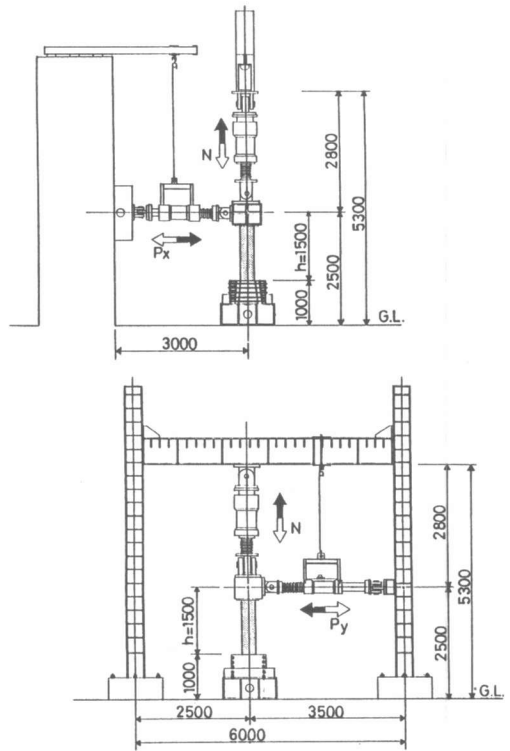


図3 実験装置

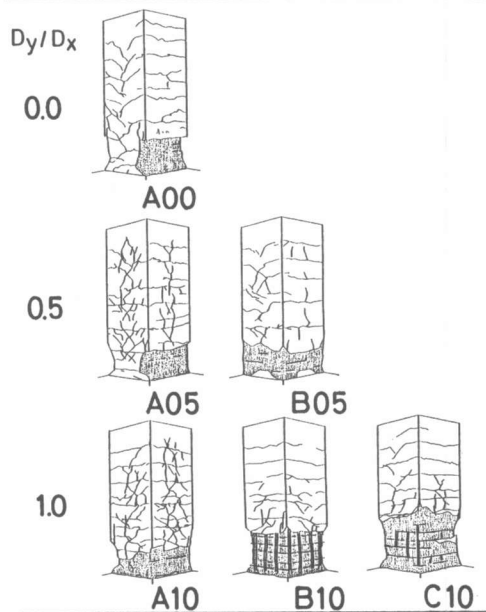


図4 最終破壊状況

最終的な破壊モードは、曲げ引張破壊である。十字載荷と、2方向外力が同時に与えられる、8字載荷、L字載荷との破壊性状を比較すると、2方向外力の同時性は、部材の破壊に関する重要な因子であると推察される。すなわち、十字載荷では、 $R=0.02\text{rad.}$ で最大耐力に達し、コンクリートの圧壊が生じる。ここで、 $Dy/Dx=0, 0.5, 1.0$ と変化させると、その損傷は顕著となる。十字載荷において、1軸曲げ ( $Dy/Dx=0$ ) と、 $Dy/Dx=0.5, 1.0$  の場合を比較すれば、直交方向の載荷の有無による影響が明らかに見られる。 $Dy/Dx=1.0$ であれば、柱脚部分の周囲の4面でコンクリートが剥落する。だが、直交方向の載荷が、主たる方向の50%程度であれば、1軸曲げを受ける場合の破壊状況と差はない。対して、2方向の外力が同時に作用する、8字載荷、L字載荷では、 $R=0.01\text{rad.}$ のループで最大耐力を示し、コンクリートの圧壊が生じた。以後、変位振幅の増大にしたがい、部材の破壊は顕著に進行し、柱脚部分で主筋の座屈が生じた。これらの結果より、RC柱が2方向の外力を同時に受ける場合、1方向のみから外力を受ける場合と比べ、より小さな変位振幅でコンクリートの圧壊が生じ、破壊が顕著に進展すると推察される。

### 2.3 履歴特性

図5に、各試験体の水平2方向のPx-Py関係、および、X、Y方向の履歴曲線を示す。図中、一点鎖線は、転倒モーメントの影響を排除した理論終局曲げ耐力を与える荷重 $P_u$ である。図6に、各試験体のX方向の固有ループを示す。図中、実線は、転倒モーメントの影響を排除した理論終局曲げ耐力を与える荷重 $P_u$ である。X方向の履歴曲線に着目すると、2主軸に対して、外力が、独立かつ交互に載荷される、十字載荷では、入力比の差異に拘らず有意差は認められず、直交方向の載荷は、主たる方向の弾塑性性状に対する主な構成要素ではない。これは、各変位振幅に

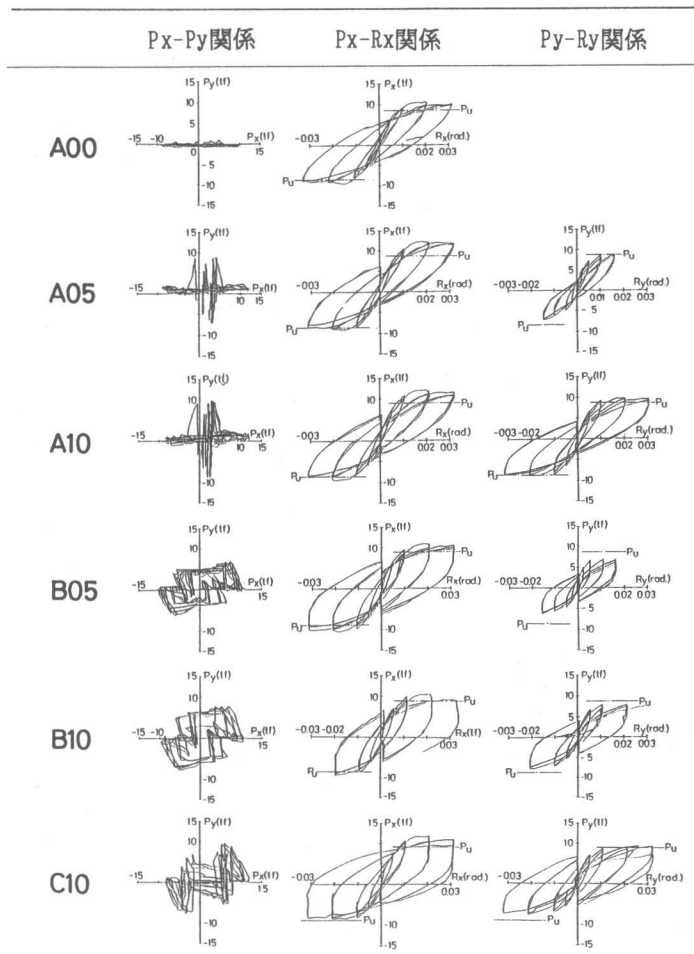


図5 実験結果

共通して、Aシリーズの各試験体の固有ループに顕著に現れている。2方向の外力が同時に与えられると、主たる方向の履歴曲線には、変位振幅が小さくとも、2軸効果は明らかに現れる。すなわち、X方向の変形が一定のまま、Y方向の変形が制御されると、X方向の荷重が増減する。これは、塑性変形の残留によるものである。最大変位点までの経路が等しく、除荷経路が異なる、試験体B10、C10では、その固有ループの形状を比較すれば、試験体C10は、相対的に、より優れたエネルギー消費能力を示す。これは、除荷経路の差異がもたらすものであり、直交方向から入力する外力の特性が異なることにより、主たる方向の弾塑性性状は影響を受ける証左である。さらに、試験体B05、B10の主たる方向の弾塑性性状を比較するとき、両者には、著しい差異はみられない。したがって、本実験での結果からは、主たる方向の弾塑性性状に対する、直交方向に入力する外力の影響を検討するとき、その入力比よりも、直交方向の外力が主方向の外力に対して有する相関性が重要な因子であると考えられる。

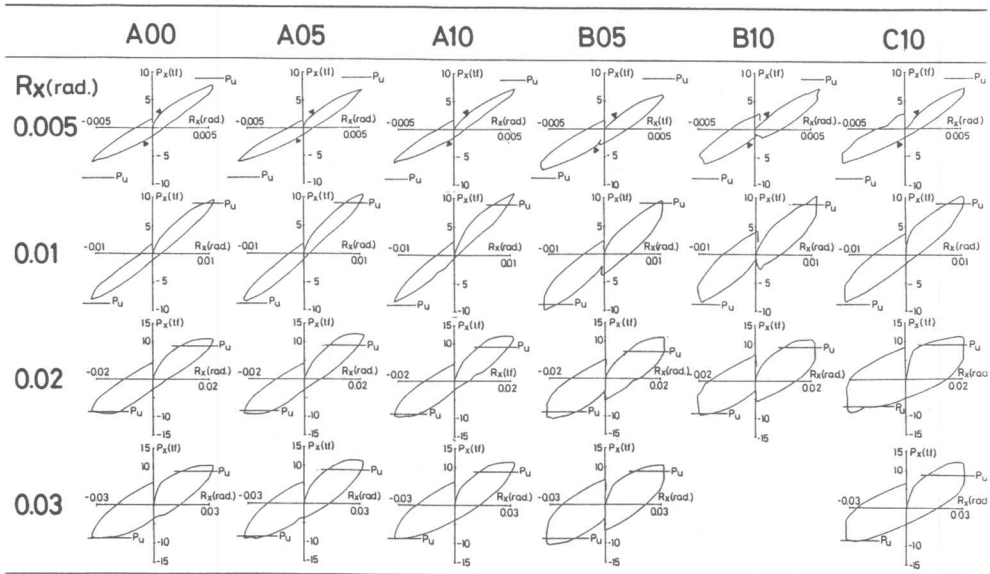


図6 各変位振幅時の固有ループ

### 3. 終局曲げ強度解析

図7に、Pragerの移動硬化則を図示する。Pragerの移動硬化則では、塑性変形にしたがって、破壊曲面が、応力空間内を剛体的に移動すると仮定する。これより、2方向外力を受けるRC部材の復元力の軌跡を説明する。図8に、理論的な一考察として、変位座標系の原点よりB点を経由し、C点へ至る変位経路を与えられる、試験体B10の復元力の軌跡を模式的に示す。ここで、破壊曲面は、曲げ終局強度式による精算値を、MeeKの近似法を用いて簡略化している。横軸は、X方向の復元力、縦軸は、Y方向の復元力を示す。弾性範囲、すなわち、復元

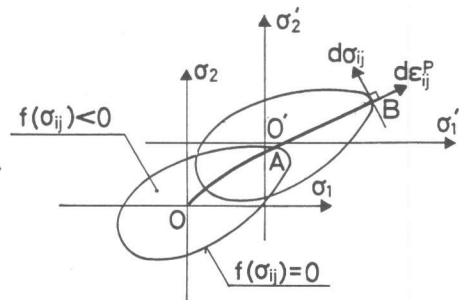


図7 Pragerの移動硬化則

力の軌跡が破壊曲面に接するまで、 $P_x$ - $P_y$ 座標系に変化はない。だが、部材の降伏とともに、塑性流れが生じ、 $P_x$ - $P_y$ 座標系は移動する。A→B区間では、X、Yの2方向で同時に降伏変位に達し、復元力の軌跡は、破壊曲面に沿って移動する。このため、X方向の復元力は、Y方向の载荷の影響を受ける。C点では、X方向の変位は零だが、X方向の復元力は零にならない。これは、破壊曲面の移動硬化に基づく。さらに、C→O区間で、変位点が原点に達しても、 $P'_x$ - $P'_y$ 座標は、原点に戻らない。これより、復元力の軌跡が $-P_y$ 側にずれ込む現象が説明できる。これらの結果より、実験結果に理論的な考察を与える。図9に、各変位振幅時の復元力の軌道を示す。図中の英文字は変位経路中の特定点を示す。図中、1点鎖線は、Meekの手法を用いて、解析的に求めた破壊曲面を示す。 $R=0.005\text{rad.}$ では、復元力の軌跡は、2方向で同時に载荷される区間を除いて、その形状は、概ね変位経路に線形的に対応している。これらの区間では、部材が降伏しないためである。 $R=0.01\text{rad.}$ に達し、部材が降伏すると、復元力の軌跡は、曲線化する。この円弧状の軌跡は、破壊曲面の形状そのものに対応する。すなわち、この区間が、直交する2方向の外力が、互いに密に相関関係を有している区間である。この傾向は、変位振幅が大きくなるほど顕著になる。これは、与えられる変位が大きくなることにより、塑性化の進行がより顕著に進展するためである。したがって、2方向外力の同時性が強調されるほど、その復元力の軌跡に2軸効果が顕著に現れる。

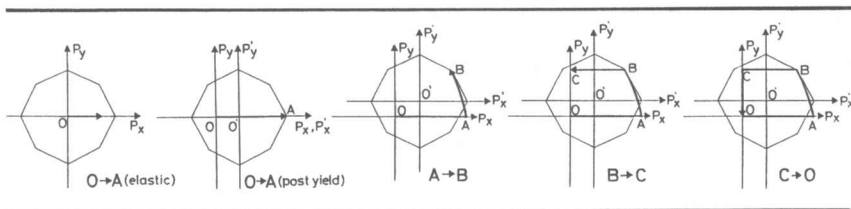


図8 復元力の軌跡 ( 試験体B10 )

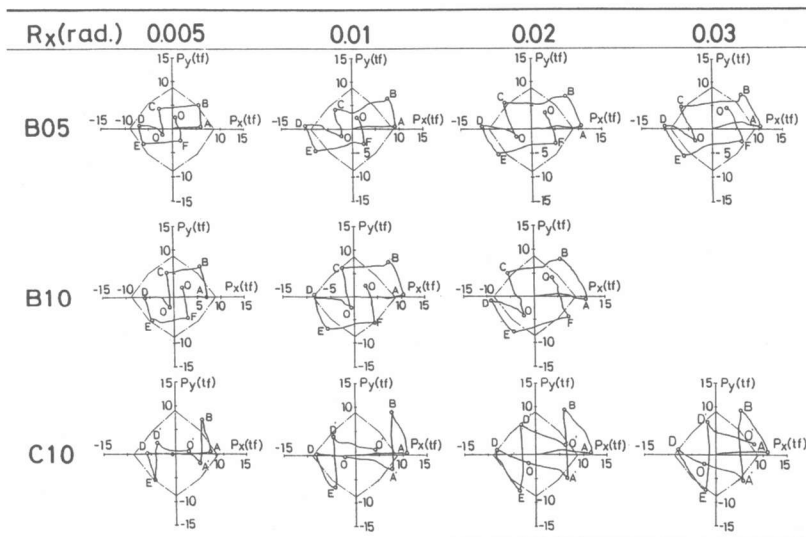


図9 各変位振幅時の復元力の軌跡

#### 4. 変形解析

近年提案されたRC建造物の実用的な解析モデルである、MSモデル(Multi-Spring model)<sup>1) 2)</sup>を用いて、1軸曲げを受けるRC柱の解析を行った。MSモデルでは、RC部材を、弾性要素と塑性要素に大別し考える。塑性変形は、材端部の塑性バネから構成される塑性要素に集約される。ここで、塑性バネの復元力特性モデルに関して、鉄筋バネの繰返し履歴則には、Takeda Bilinearモデル、コンクリートバネには、Laiの用いたBilinearモデル<sup>1)</sup>を用いた。図10に、MSモデルを用いた、 $P_u$ - $N_u$ 相関曲線を示す。釣合破壊以下の軸力では、曲げ終局強度式による理論値と、MSモデルによる計算値の適合性はよい。図11に、変形解析結果を示す。試験体A00の履歴特性を実線で、試験体A10の履歴特性を一点鎖線で示す。解析結果と実験値はよく一致している。したがって、十字載荷時の主たる方向の弾塑性性状は、直交方向の載荷の影響をあまり受けず、1軸曲げ時の主たる方向の履歴特性と有意差を持たないことが分かる。

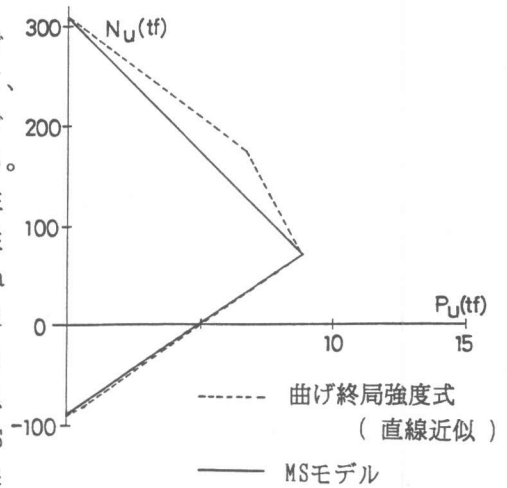


図10  $P_u$ - $N_u$ 相関曲線

#### 5. 結論

2方向外力を受けるRC柱において、十字載荷時には、2主軸に交互に載荷されるため、主たる方向の弾塑性性状に、直交方向の載荷の影響はほとんど現れない。この傾向は、直交方向への入力変位の大きさを変数としても変わらない。しかしながら、2主軸で同時に載荷される、8字載荷、L字載荷では、主たる方向の弾塑性性状と、直交方向の外力の特徴は密な相関性を持ち、十字載荷と比べ、部材の塑性化の進行は早い。したがって、設計用地震力の取扱いについて、従来の2主軸方向に交互に載荷し、その耐震性を検討するためには、直交方向の外力の特徴を十分に考慮し、耐震設計を行う必要がある。

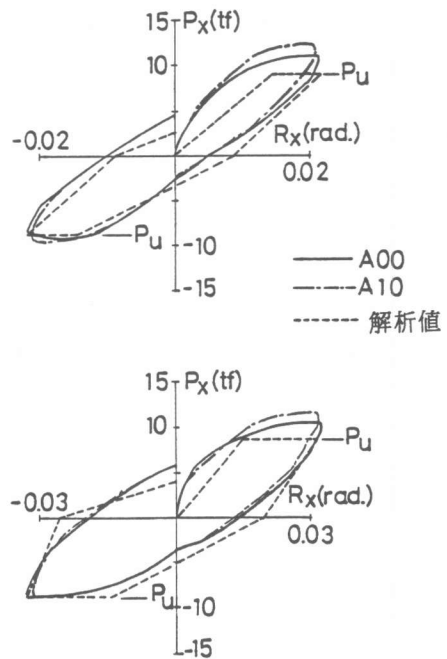


図11 変形解析結果

#### 6. 参考文献

- 1) Lai, S. S., Will, G. T., and Otani, S., "Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members," J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 2563-2584, Nov. 1984.
- 2) 李康寧・小谷俊介・青山博之：3軸変動力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析モデル，構造工学論文集 vol.33B, pp.169-178, 昭和62年3月.