

論 文

[2062] 繰返し 2 方向の曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の復元力特性

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

近年の RC構造物の設計法では、2方向外力の取り扱いは、梁降伏型の全体降伏機構の形成を保証するという観点に立ち、主たる方向の設計用地震力に割増し係数を導入するという便宜的な手法を用いている。¹⁾ しかしながら、RC構造物の地震応答解析例では、入力地震波の特性の差異は、その応答結果に有意差を生じさせる傾向にあることを示している。また、筆者らは、2方向外力を受ける RC柱の載荷経路は、その破壊モード、最大耐力以後の変形性状に有意差をもたらすことを実験的に明らかにしている。²⁾

そこで本報では、変位経路の差異に着目し、2方向外力を受ける RC柱の主たる方向の弾塑性性状、破壊曲面の推移状況を合理的な曲げ変形解析モデルを用いて解析的に検討し、2方向外力の同時性の影響を明らかにする。

2. 解析モデルの構成

RC部材の曲げ変形解析モデルとして、Multi-Spring モデル（MSモデル）を用いた。MSモデルでは、RC部材を弾性要素と塑性要素に区別し曲げ変形を評価する。以下で議論の中心となるのは2方向外力を受ける RC部材の復元力特性であり、その塑性要素での塑性変形の評価が重要な問題となる。そのため解析モデルにおいて、その降伏変形が合理的に決定されねばならない。以下では、RC部材の降伏時の変形を解析的に評価し、MSモデルでの降伏変形の定義を行う。

Lai・小谷らにより提案された MSモデル³⁾では、接合部からの柱主筋の抜け出しによる変形を評価するため、その模擬のため物理的な長さがない塑性要素を考え、その塑性要素に存する塑性バネの変形－復元力関係により RC部材の荷重－変形関係の評価を行った。また、李は、RC部材の降伏変形の評価のため、その適合性を重視し菅野式⁴⁾を用いて降伏変形を評価し、その降伏変形を塑性バネにより表現した。⁵⁾ しかしながら、RC部材の降伏変形には、接合部からの主筋の抜け出し⁶⁾⁷⁾、危険断面の曲げ圧縮域で生ずる部材の接合部へのめり込み等が含まれるが、その解析的な評価法は確立されておらず、塑性バネによりそれらの変形を模擬するためには、未だ未解決な点が多い。そこで、本報では、既往の曲げ理論に基づき、その曲げ降伏時の変形を評価する。降伏変形 δ_y は、せん断変形成分を無視し得るものとすれば、

$$\delta_y = R_y \cdot h \quad (1)$$

で求められる。本式は片持ち柱を想定しており、図 1に

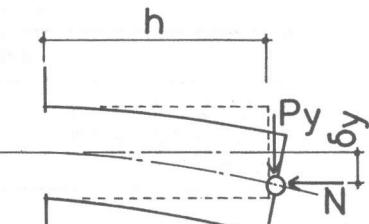


図 1 降伏変形のモデル化

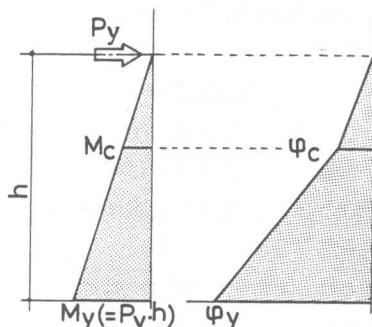


図 2 假定した降伏時の曲率分布

(1)式を模式的に示す。降伏部材角 R_y は、部材の軸方向の曲率分布を直線的に仮定して求められる。図 2 に仮定した曲率分布を示す。すなわち、この曲率分布は、降伏時の曲げモーメントが直線分布すると仮定し、その曲げモーメントに対応した曲率を曲げ理論により求める。

すなわち、曲げ降伏時の部材角 R_y は、

$$R_y = \int_0^{M_y} \phi(z) \cdot dz \quad (2)$$

である。表 1 に、(2)式による降伏変形角と、菅野式による降伏回転角の比較を示す。図 3 に実験値（後述する試験体 A00 の履歴曲線の包絡線）と、(2)式による解析値の比較を示す。破線は実験値であり、実線は(2)式による解析値である。降伏変形は(2)式により良好に評価されている。なお、軸変形の評価については、現今の MS モデルでは塑性要素が長さを持たないため、その評価ができない。本報では、2 方向外力時の RC 柱の復元力特性に問題を限定するため、軸変形は無視する。

3. モデルのパラメーター

MS モデルを用いて RC 部材の曲げ変形解析を行うには、各塑性バネの耐力特性、復元力特性モデルが合理的に決定されなければならない。その耐力特性の決定には、Lai・小谷の方法を用いた。塑性バネの復元力特性モデルは、実験結果を考慮して決定した。図 4 に、各塑性バネの復元力特性モデルを示す。表 2 に塑性バネの諸元を示す。

表 2 各塑性バネのパラメーター

	支配面積 (cm^2)	降伏荷重 P_{sy} (tf)	降伏変位 d_{sy} (cm)
隅角部コンクリートバネ	185.3	39.4	0.0869
中央部コンクリートバネ	134.8	28.6	0.0869
鉄筋バネ	6.0	22.5	0.0869

a) 鉄筋バネ 鉄筋バネ (S バネ) の復元力特性モデルに、鉄筋の材料特性を表すバイリニア型モデルを用いると、部材の除荷剛性が良好に評価できない。そこで、実験値を勘案して、S バネの復元力特性モデルには、柱主筋のピンチ効果を表現する武田モデルを用いた。また、本解析では、2 方向外力時の RC 柱の基礎的性状に着目するため、鉄筋のひずみ硬化を考慮しない。

表 1 降伏変形の評価

	曲げ解析値	菅野式
$R_y (x10^{-2} \text{ rad.})$	1.021	1.290

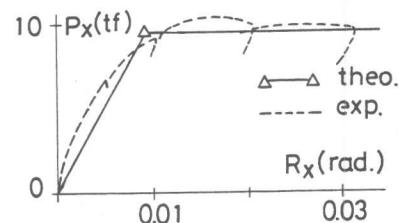
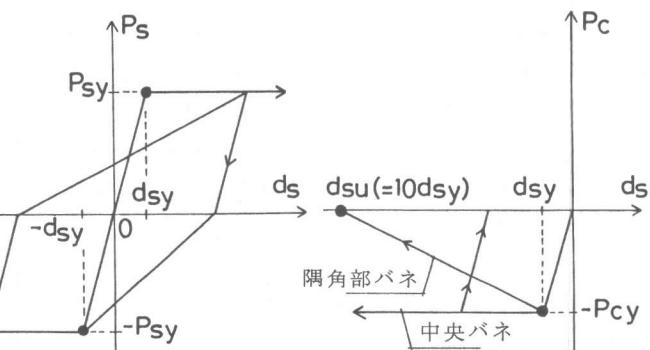


図 3 実験値と解析値の比較
(試験体 A00)



(a) 鉄筋バネ (b) コンクリートバネ
図 4 塑性バネの復元力特性モデル

b) コンクリートバネ コンクリートバネ (Cバネ) の復元力特性に曲線モデルを用いれば、プログラム化が複雑になり長い解析時間を要する。したがって、簡便な直線式により Cバネの復元力特性モデルを規定する。なお、Cバネの除荷時の剛性は弾性剛性と等しいものとする。また、Cバネの耐力低下性状については、議論を待たねばならない点が多い。そこで本報では、コア・コンクリートに相当する中央バネでは耐力低下は生じず、隅角部のCバネのみで耐力低下が生じるものとし、その圧壊変形は降伏変形の10倍とした。これは2方向外力時のRC部材において顕在化する復元力平面での2軸効果、大変形時での耐力劣化性状などが、MSモデルのCバネの復元力特性モデルに耐力低下性状を含むことにより表現できると考えたためである。

4. 解析結果

4.1 解析対象とする試験体の形状

解析対象とする試験体の形状寸法を図5に示す。その実験結果は、昨年度報告した。²⁾ 各試験体とも形状寸法は等しく、片持ち柱形式である。作用軸力は、 $N_u = 0.2 \cdot BDF_c$ であり、何れも曲げ引張破壊した。柱主筋には、D16 ($p_t = 1.33\%$ 、 $\sigma_y = 3750 \text{ kgf/cm}^2$) を用い、せん断補強筋には、D6 ($p_w = 0.38\%$ 、降伏点応力 $\sigma_{wy} = 3276 \text{ kgf/cm}^2$) を用いた。実験時のコンクリートの圧縮強度は、 $F_c = 250 \text{ kgf/cm}^2$ であった。図6に実験変数を示す。実験変数は載荷経路である。A00は1方向曲げ、A10は十字載荷である。A10では主軸に交互に載荷が行われる。これにより、各主軸方向に独立して載荷される場合の2方向外力の相関性を検討する。B10、C10は、2方向外力を同時に受け、目標変位達成後の除荷経路が異なる。矩形の変位経路は円形の変位経路と異なり、破壊曲面に接しても減力が生じないため、復元力の軌跡は破壊曲面の形状を現す。これより復元力曲面の推移状況を検討する。

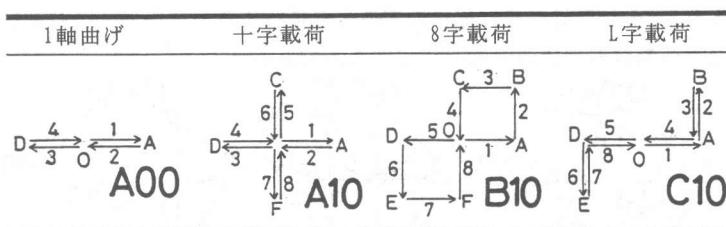
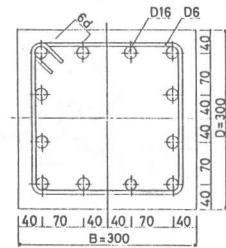


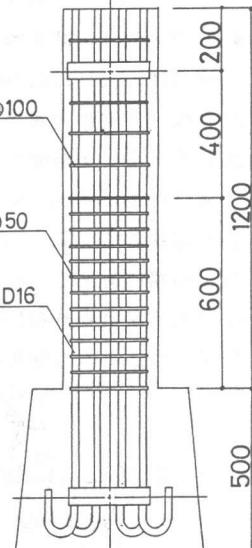
図6 実験変数

4.2 主たる方向の荷重変形曲線

図7に各試験体の主たる方向の荷重変形曲線を示す。縦軸は主たる方向(X方向)の作用せん断力 P_x (tf) であり、横軸は相対部材角 R_x (rad.) である。図中 P_u は、一般化累加強度理論による終局曲げ耐力値を示す。なお、上段が実験結果であり、下段がMSモデルによる解析結果である。解析値は実験値の特徴を良好に模擬している。解析値の最大耐力は実験値に比べて低いが、Sバネの降伏後の剛性を零としているためである。また、除荷時の剛性低下も良好に模擬されている。2方向から同時に外力を受けるB10、C10では、変位振幅が $R=0.03 \text{ rad.}$ において繰返し載荷による耐力低下が見られる。これはCバネで耐力低下が生じているためと考えられる。



(a) 断面構成



(b) 形状寸法

図5 解析対象

解析結果より、主たる方向の弾塑性性状には、1方向外力時と十字載荷時との有意差は生じない。したがって、主軸に交互に外力を与えた場合、直交方向の載荷による主たる方向の弾塑性性状への影響は無視できる。それに対して2方向から同時に載荷される場合、直交方向の載荷、除荷により主たる方向の荷重は増減する。この現象は、2方向外力の同時性に起因するものである。以下では部材の復元力平面に着目し、その影響について述べる。

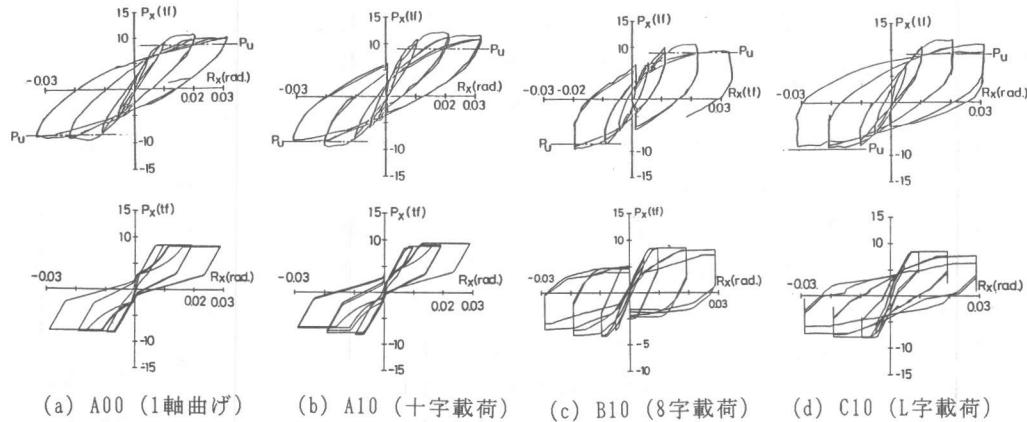


図 7 主たる方向の荷重変形曲線 (P_x - R_x 関係 : 上段 - 実験値、下段 - 解析値)

4.3 2方向外力時の復元力平面

図 8 に、B10、C10 の各変位振幅時の復元力の軌跡を示す。横軸は X 方向の荷重 P_x (tf) であり、縦軸は Y 方向の荷重 P_y (tf) である。なお、上段が実験結果であり、下段が MS モデルによる解析結果である。実験値中に、一点鎖線により示される 8 角形は、近似された終局強度曲面である。

破壊曲面の内側に復元力の軌跡が停留する弾性変形範囲内では、復元力曲面には 2 方向外力の影響は現れず、直交方向の載荷とは独立した軌跡を示す。すなわち、復元力の軌跡は与えられる変位経路に対応し、X、Y の直交する 2 軸に平行である。塑性バネの変形が弾性変位内にある時には 2 軸効果は現れないと言える。それに対して、部材の塑性化が進行すると、復元力の軌跡は曲線化する。この曲線化は復元力の軌跡が破壊曲面に対応するためである。

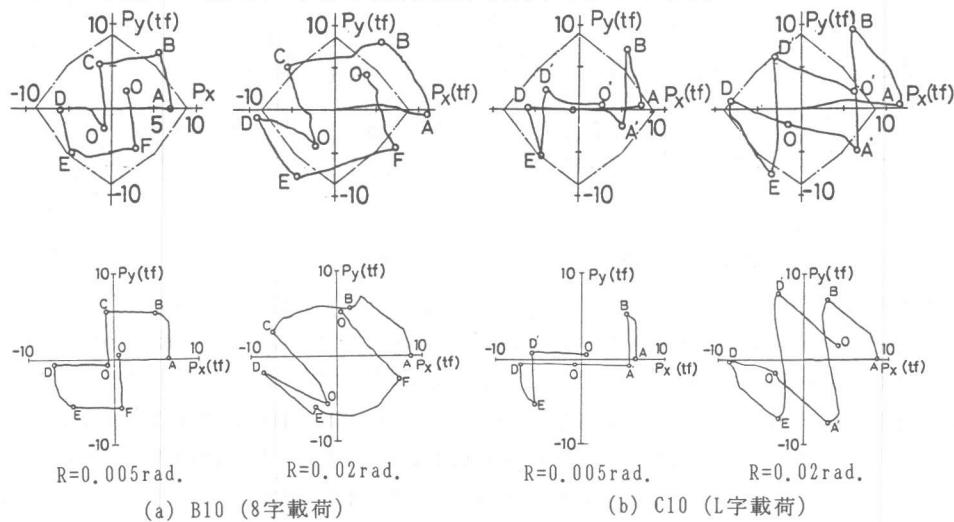


図 8 復元力平面の推移状況 (B10、C10)

すなわち、2方向外力の同時性による影響は部材の曲げ降伏後に顕在化し、その復元力特性の主要な因子となる。破壊曲面に復元力の軌跡が接する時、直交方向の載荷は、主たる方向の復元力の軌跡に関連し、直交方向の復元力に対する因子になる。したがって、2方向の同時外力を考慮するとき、直交方向の影響を無視することができなくなる。そこで、そのメカニズムの解明には、復元力の軌跡が破壊曲面に接する塑性流れ域での部材の塑性変形性状に着目することが不可欠である。このため、塑性バネの復元力特性モデルの定義、特に、Cバネの耐力低下を合理的に表現することが必要である。

また、復元力平面の推移状況は、周知のようにその変位経路により著しく異なる。²⁾ 解析結果では、変位経路の差異による復元力平面の形状の有意差は、部材の塑性化の進展にしたがって顕在化する。B10とC10では、正荷重時の原点から出発し、最大変位に至り、その後除荷され原点に再び回帰するという過程を経ると、その復元力の軌跡はそれぞれの変位経路に対応して異なる形状を呈する。さらに、塑性変形の残留により回帰後の原点は負荷重側に大きくずれ込む。B10ではC10と比べて、復元力の軌跡が破壊曲面に接し続けるため、その塑性化は著しく、復元力平面は収縮する傾向を呈する。このように2方向外力の同時性の影響は、変位経路の差異、言い換えれば、破壊曲面に接する時の塑性変形性状により有意差を持つと考えられる。

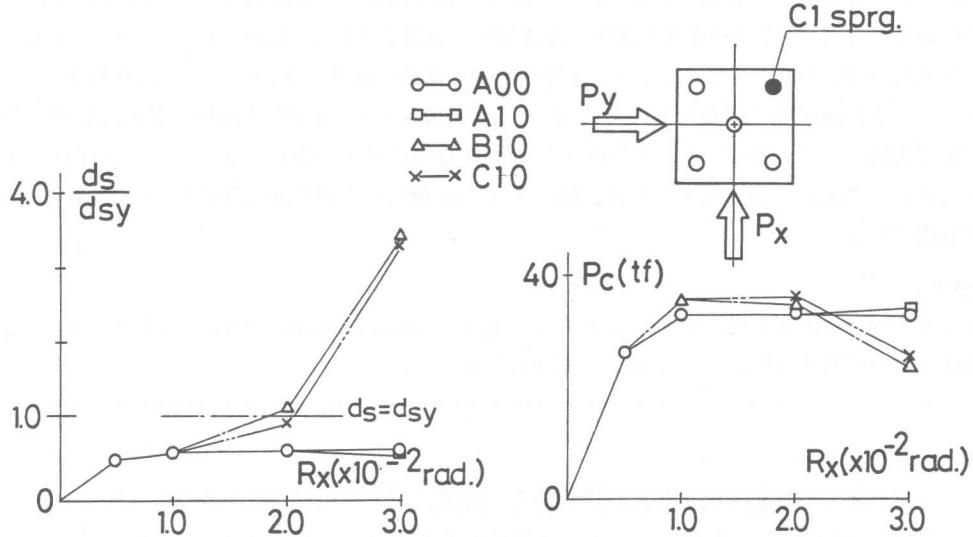


図 9 Cバネの変形の推移状況

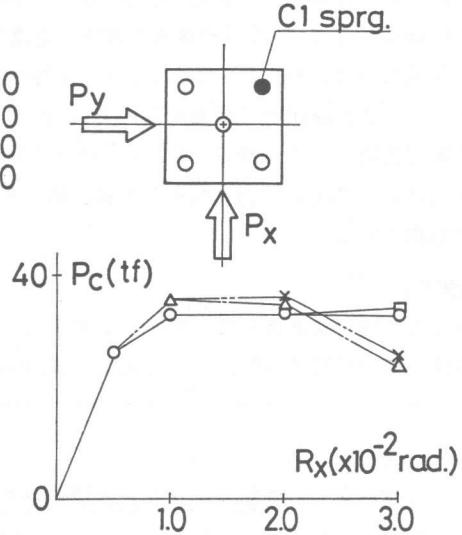


図 10 Cバネの復元力の推移状況

4.4 コンクリート・バネの挙動

図9に、各試験体の代表的なCバネの変位の推移状況を示す。また、図10には各試験体の代表的なCバネの復元力の推移状況を示す。図中の縦軸のCバネの変位および復元力は、各変位振幅での処女載荷時の変位経路中A点での値であり、横軸はX方向の部材角Rx(rad.)を示す。

Cバネの復元力-変位振幅関係より、1方向外力、十字載荷時には、Cバネは耐力低下を生じないことが分かる。これは、Cバネの変形量があまり大きくなく、その耐力低下が顕著ではないためである。それに対して、2方向外力を同時に受けるB10、C10では、R=0.003rad.付近でCバネの復元力は低下する。これは、2方向外力時のCバネの変形-変位振幅関係に見られるバネの著しい塑性変形の進行に対応する。すなわち、2方向外力時の隅角部のCバネは、X方向の載荷で変位が増大し、さらに重ねてY方向の載荷でも変位が増大するためである。実験では、B10のR=0.003

rad.のループで軸力の維持が不可能になり、主筋の座屈が生じ終局状態に至ったが、本解析では、この座屈を伴う破壊は十分表現できなかった。実験でのRC柱のコンクリートの圧縮破壊性状を鑑みて、MSモデルのCバネの圧壊変形はやや過大であるという推測が成り立つ。これは、今後の議論の余地が必要な問題である。

変位経路の差異が与えるRC柱の復元力特性への影響は、その2方向外力の同時性によるものであり、直交方向の載荷により主たる方向の復元力が規定される。これにはCバネの復元力特性モデルが大きく寄与するものと考えられ、2方向外力を受けるRC部材の塑性変形の定量的評価のためには、Cバネの耐力低下性状の評価が急務である。

5. 結論

MSモデルを用いた曲げ変形解析により、実験値に現れる2方向外力の影響は良好に模擬できた。その結果、主軸に対して交互に載荷される十字載荷時は、2方向外力時と比し部材の塑性化は軽微であり、直交方向の載荷の影響は無視できることが明かにされた。2方向外力時には、コンクリートの塑性化は、1方向外力時に比べて顕著に進行し、変位経路の差異は、その復元力特性に有意差をもたらす。これはRC部材の曲げ降伏後、変形の増大にしたがって、復元力の軌跡が破壊曲面に接して移動し、復元力特性が規定されるためである。したがって、柱の曲げ降伏を許容しない前提に立てば、2方向外力の同時性を勘案する必要はない。しかしながら、梁降伏型の全体降伏機構の形成を保証するためには、1階の柱脚には曲げ降伏を許容しなければならない。したがって、その規定する保証変形内でのRC柱の復元力特性が、2方向外力時の変位経路の差異による影響を踏まえて一般化され、合理的に評価されなければならない。さらには、RC部材の塑性変形性状が合理的に評価されるために、MSモデルでの塑性バネの復元力特性モデルの評価法の確立が急務である。

〔謝辞〕

本研究の遂行にあたって、解析プログラムの実行、DATA整理には、大阪工業大学卒論生・冠野充広氏の協力を得ました。ここに記して深謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造物の終局強度型設計指針(案)・同解説、1988年。
- 2) 上原広・南宏一：繰返し2方向の曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状、コンクリート工学年次論文報告集 第11号 第2巻、1989年、pp.223-228。
- 3) 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, Nov. 1984, pp. 2563-2584.
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1982年。
- 5) 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、1987年3月、pp.169-178。
- 6) 森田司郎・角徹三・土橋洋：鉄筋コンクリートはりの柱・はり接合部近傍における塑性変形性状に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、昭和46年5月、pp.191-194。
- 7) 森田司郎・角徹三：鉄筋コンクリート柱・はり接合部におけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和47年10月、pp.1099-1100。