

## 論文 RC 柱部材の復元力特性モデルの検討

加藤大介<sup>\*1</sup>・鈴木広孝<sup>\*2</sup>・芝讓<sup>\*3</sup>・松田壮史<sup>\*2</sup>

**要旨：**本研究の目的は、既往の実験データを用い、比較的高軸力を受けるRC柱部材の復元力モデルをエネルギー吸収能に着目して提案することである。実験結果の包絡線は靱性限界点までなるべく忠実に4つの折れ線でモデル化し、この包絡線を用い、エネルギー吸収能をよく表す繰り返し履歴ルールを検討した。

**キーワード：**鉄筋コンクリート柱、復元力モデル、エネルギー吸収能、靱性、変動軸力

## 1. 序

RC建物の耐震設計法は終局強度型設計法へと移行しつつあるが、今後、設計レベルでの地震応答解析の必要性が高まってくることが予想される。解析に用いる部材の復元力モデルに関していえば、そのエネルギー吸収性能をより現実的に表現するモデルの開発が重要な問題点といえる。本研究の目的は、既往の実験データを用い、RC柱部材の復元力モデルをエネルギー吸収能に着目して提案することである。エネルギーの吸収能は直接的には繰り返し履歴ルールに依存するが、包絡線の設定方法にも大きく影響を受ける。そこで、実験結果の包絡線を靱性限界点までなるべく忠実に4つの折れ線でモデル化した。また、これらの評価方法についても併せて検討している。次に、エネルギー吸収能をよく表す繰り返し履歴ルールを検討した。ここでは、曲げで靱性が決まるエネルギー吸収能が良好な試験体、付着で靱性が決まる吸収能が悪い試験体、および、履歴ループが著しく異なる変動軸力を受ける試験体、の3つに分類して評価した。なお、対象は変動軸力も含めた比較的高軸力を受ける柱試験体で、材料強度は高強度までを含むものとした。

## 2. 評価方法の概要

図-1に想定した復元力特性の包絡線と実験値のモデル化の方法を示す。図-1(a)は包絡線であるが、正負の各方向で、曲げひび割れ点、降伏点、最大耐力点、靱性限界点の4点を結ぶ折れ線とした。実験値は図-1(b)に示す方法でモデル化した。ひび割れ点は、主筋を考慮した断面から求めた弾性曲げ剛性計算値と曲げひび割れ強度計算値より定めた。降伏点はひび割れ点を通る直線と最大点とその前のステップを通る直線の交点であるが、モデルと実験値の最大点までの吸収エネルギーが等しくなる点とした。靱性限界点は復元力が最大強度の80%に低下した点とした。3章ではこれらの点を評価する既往の提案式を示し、実験値との対応を検討する。

図-2(a)は一定軸力を受ける柱部材の復元力特性の繰り返しループであるが〔1〕、断面の曲げ圧壊で靱性が決定される部材は除荷時の剛性として初期剛性を剛性低下係数 $\alpha$ で低減しエネルギー吸収性能を一致させる。付着劣化が生じエネルギー吸収能が劣る部材は $\alpha$ に加えて剛性低下係数 $\beta$ 、 $\gamma$ を用いて各剛性を低減させる。一方、図-2(b)は変動軸力を受ける柱部材の復元力特性の繰り返しループであるが、実験では軸力増大での除荷時(図-2(b)の第3象限)に大きく剛性が低下する。この効果を剛性低下係数 $\kappa$ で表現した。4章ではこれらの係数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\kappa$ を実験結

\*1 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博(正会員)

\*2 新潟大学大学院 工学部建設学科

\*3 同(正会員)

果より定めた。なお、実験結果の*i*サイクルのエネルギー吸収量は横方向荷重が負から正に変わる点を起点として計算した。表-1に各検討項目に使用した試験体の数と実験変数の一覧を示す。エネルギー吸収性能検討には文献[2~6]で報告した20体を、包絡線検討には主に文献[7]で引用した111体の試験体を用いた。

### 3. 包絡線の評価

本章では曲げひび割れ点以外の図-1(a)に示した各点を評価する既往の提案式を示し、2章で示した実験値との対応を検討する。図-3は降伏点を実験値と計算値で比較したものである。ここで使用したデータは表-1の係数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\kappa$ 検討用試験体20体で、正負両方向の計40ケースである。図-3(a)は降伏強度であるが、降伏強度の計算値はコンクリートを日本建築学会のRC構造計算規準（以下RC規準）の付録に示されているストレスブロックに置換した平面保持解析において、主筋が降伏した点の強度とした。計算値は概ね良好に実験値を推定している。一方、降伏時部材角は従来よりよく用いられている菅野による降伏剛性低下率を用いて比較した。図-3(b)が

表-1 検討試験体の実験変数一覧表

検討対象	数	文献番号	コンクリート強度 (MPa)	主筋強度 (MPa)	帯筋強度 (MPa)	最大軸力比
$\alpha$	8	2, 3, 5, 6	26.5 - 80.4	341 - 963	388 - 904	0.30 - 0.45
$\beta, \gamma$	6	3, 4	27.9 - 80.0	349 - 999	390 - 813	0.20 - 0.45
$\kappa$	6	5, 6	32.2 - 62.2	341 - 963	388 - 761	0.30 - 0.43(*2)
包絡線(*1)	111	7に掲載	22.6 - 122	338 - 998	273 - 1764	0.11 - 1.10

(\*1)  $\alpha, \beta, \gamma, \kappa$  検討試験体の内の13体を含む (\*2) いずれも最小軸力比は0

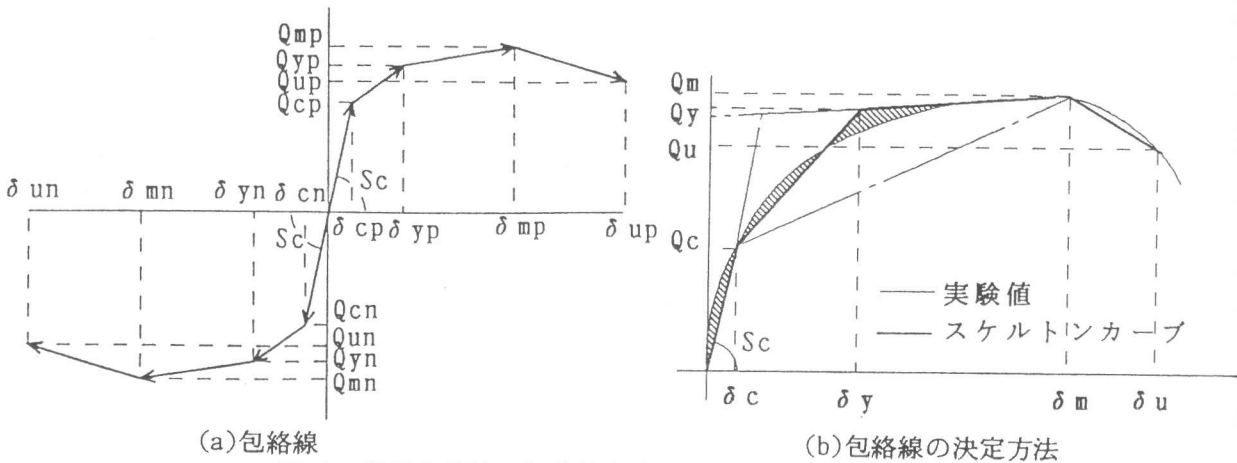


図-1 復元力特性の包絡線と実験値のモデル化の方法

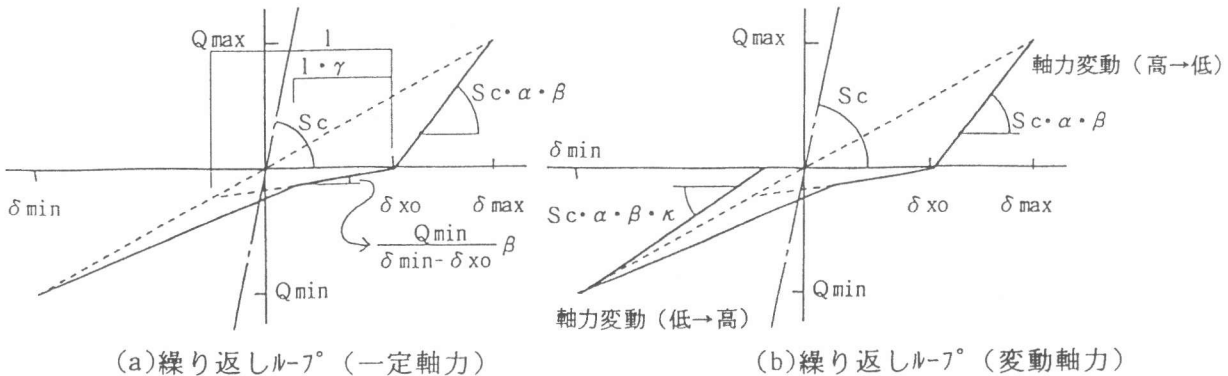


図-2 復元力特性の繰返しループと実験値のモデル化の方法

結果であるが、精度は悪く、計算値は普通強度試験体で実験値を過小評価し、高強度試験体で過大評価する傾向がある。

図-4は最大強度の実験値と計算値を比較したものである。ここで使用したデータは表-1の包絡線検討用試験体111体である。最大強度の計算値はRC規準の付録に示されている柱の終局強度の略算式を用いた。計算値は概ね良好に実験値を推定している。一方、最大強度時の変形は最大強度時のヒンジ領域の曲率で評価した。手法は筆者らの既報[7]を参考にした。文献[7]では、部材の靱性能評価式を提案することを目的に、最大耐力以降の数点（最大強度の95~70%に耐力が低下した点）のヒンジ領域の曲率と軸力比との関係を実験結果を用いて評価している。このとき、変動軸力を受ける試験体はその最大軸力が同じである一定軸力を受ける試験体よりも靱性能が良くなる事実を反映させるために、等価軸力という概念を導入している。本論文ではこの考え方を延長し、最大強度の100%に低下した点、すなわち最大強度点、を同様に評価し最大強度時の変形とした。図-5は最大強度時のコア断面軸力比と限界曲率基準値の関係であるが、ここで用いたデータは表-1の包絡線検討用試験体111体の中で、曲げ圧縮により靱性が決定された試験体のみとした。図-5(a)が等価軸力を適用しない場合で、評価式は図中の実線と破線で示すように一定軸力と変動軸力では異なったものとなり、最大強度時の変形も軸力載荷法に影響を受けることがわかる。図-5(b)が等価軸力を適用した場合の図であるが、両試験体とも実線で表現でき、等価軸力を適用することにより一定軸力と等価軸力の試験体を同一に扱えることがわかる。ここで、柱危険断面

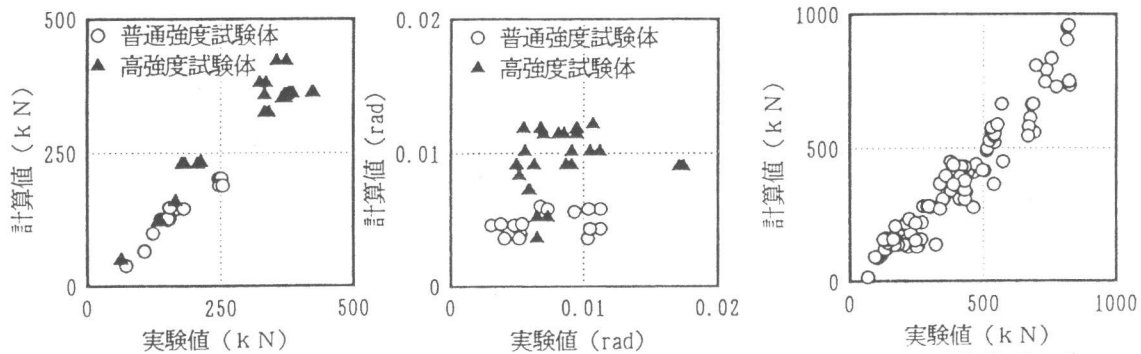


図-4 最大強度の実験値と計算値の比較

○一定軸力  
●変動軸力

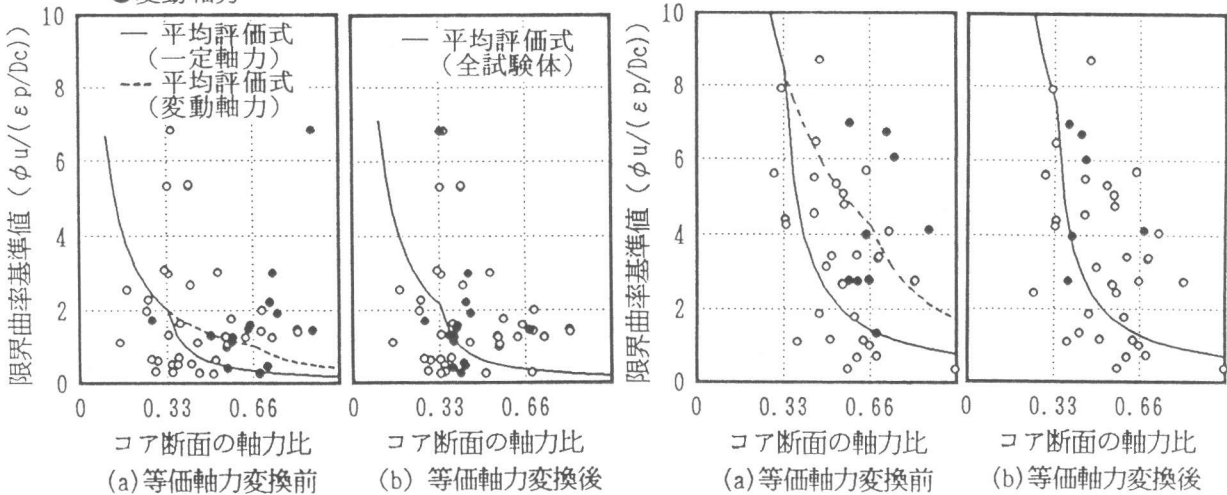


図-5 最大強度時変形の実験値と計算値の比較  
(コア断面軸力比と限界曲率基準値の関係)

図-6 限界点変形の実験値と計算値の比較  
(コア断面軸力比と限界曲率基準値の関係)

だけで塑性変形が生じるとし、最大強度時の部材角は図-5(b)の  $\eta = 0.33$  の実線より式(1)(2)で表した。

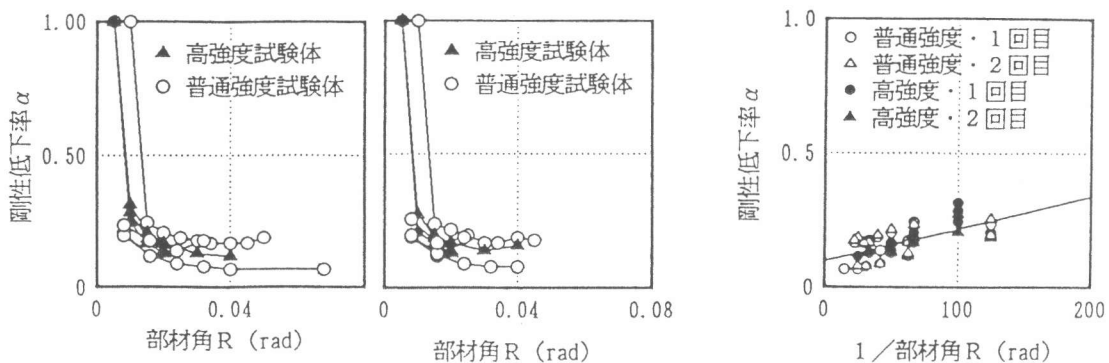
$$R = R_y + \phi \cdot D \quad (1)$$

$$\phi = 2 \cdot m \cdot \varepsilon_p / D_c / (15 \cdot e \eta - 4) \quad (m=1.1(\text{最大強度時}), m=3.8(\text{限界変形時})) \quad (2)$$

ただし、 $R_y$ は前述した降伏時部材角、 $D$ は柱せい、 $H$ は柱全高さ、 $D_c$ はコア断面のせいである。 $e \eta$ は文献[7]で示した等価軸力比 ( $1/3 < e \eta < 2/3$ )で、コア断面のみを対象にし、その際用いるコアコンクリートの最大応力度とそのときの歪度  $\sigma_p$ 、 $\varepsilon_p$ は同じく文献[7]に示したNewRC式を用いる。最後に、限界変形時の変形であるが、図-6に図-5と同じ形式で、最大強度の80%に強度が低下した点のコア断面軸力比と限界曲率基準値の関係を示す。最大強度点と同様の手順で、限界変形時の部材角は式(1)(2)で表される。

#### 4. 繰り返しループの評価

本章では図-2に示した係数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\kappa$ を実験結果を用いて評価する。付着破壊しない試験体の繰り返し履歴は、除荷剛性として弾性剛性を低下率  $\alpha$  で低減して用いる。 $\alpha$  検討用試験体を用いて、各サイクルのエネルギーがモデルと実験結果で一致する  $\alpha$  を逆算し、それをそのサイクルの部材角と比較して示したものが図-7である。同一部材角で1回目の繰り返しと2回目の繰り返しに分けて示したが、両者とも右下がりの傾向があり、差は無かった。部材角  $1/50 \text{ rad}$  時の  $\alpha$  を用いて、軸力比、コンクリート強度、主筋強度、主筋比、の4つの要因の  $\alpha$  に対する影響をみたものが図-8(a)-(d)であるが、いずれも顕著な影響は見られず、除荷剛性は主筋も考慮した弾性剛性計算値に部材角からのみ定まる  $\alpha$  により評価しようと考えられる。そこで、図-9に示すように、



(a) 同一部材角で1回目の繰り返し (b) 2回目の繰り返し  
図-7 剛性低下率  $\alpha$  と繰り返し部材角  $R$  の関係

図-9 剛性低下率  $\alpha$  と繰り返し部材角  $R$  の逆数の関係

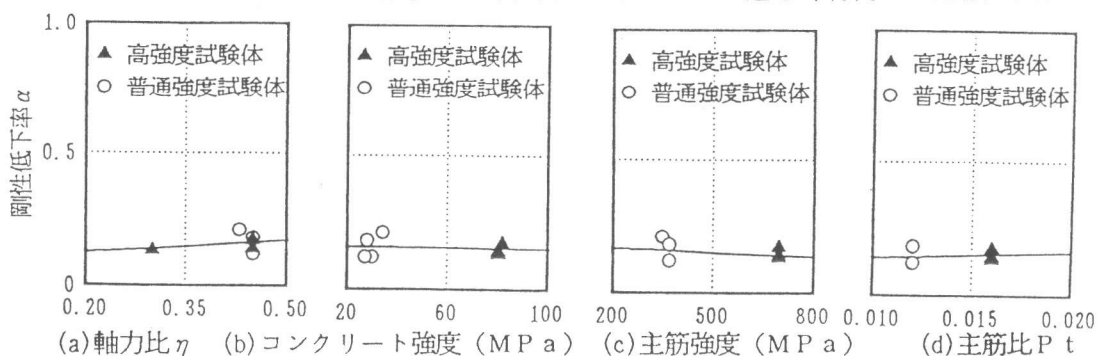


図-8 剛性低下率  $\alpha$  に対する軸力比、コンクリート強度、主筋強度、主筋比の影響 (部材角  $R=1/50 \text{ rad}$ )

1回目と2回目のサイクルを合わせて、剛性低下率 $\alpha$ と繰り返し部材角 $R$ の逆数の関係を直線にモデル化した。式(3)に得られた $\alpha$ の評価式を示す。

次に、付着性能の悪い試験体のエネルギー吸収能を低減させる剛性低下率 $\beta$ 、 $\gamma$ の検討を行う。前述した $\alpha$ の検討と同様に、各サイクルのエネルギーがモデルと実験結果で一致する係数を逆算し、それをそのサイクルの部材角と比較して示したものが図-10である。ただし、同一部材角では1回目と2回目で差はなかったため、同一部材角のサイクルのエネルギーの総和がモデルと実験値と等しくなる係数を求めた。なお、 $\beta$ は除荷時および再載荷時の剛性を低減させる係数、 $\gamma$ は再載荷時のスリップ区間を決める係数であり、 $\beta$ は小さいほどエネルギー吸収能が小さくなり、 $\gamma$ は大きいほどエネルギー吸収能が小さくなるものである。いずれも付着性能の劣化によるエネルギー吸収能の低下を表現する係数であるため、ここでは、自由度を減らすために $\gamma = 1$ 、 $\beta$ の条件をつけた。結果は部材角が増えるに従い $\beta$ も小さくなる傾向が

いずれの試験体にも見られたが、試験体によってややばらつきがあった。そこで、試験体の付着指標による影響を検討したのが図-11である。図-11の縦軸は、図-10の各試験体のデータを横軸0、縦軸1を通る直線にモデル化したときの傾きをとり、横軸の付着指標 $I_B$ は文献[8]によった。この付着指標は付着応力度を付着強度で除したものであるため、1を越えると付着性能が悪くなる。図-11は付着指標が高くなると図-10における $\beta$ の勾配が急になることを示しており、本報告では式(4)で示した図中の直線を $\beta$ の評価式として提案する。な

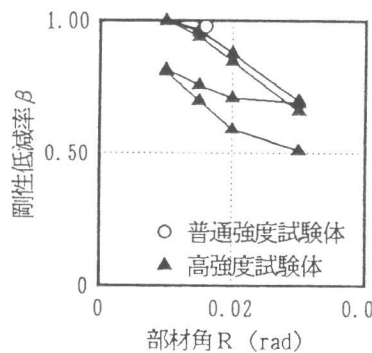


図-10 剛性低下率 $\beta$ と繰り返し部材角 $R$ の関係

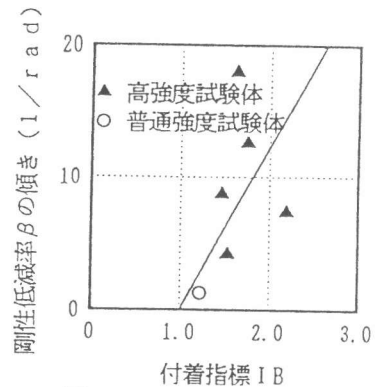


図-11 付着指標と剛性低下率 $\beta$ の傾きの関係

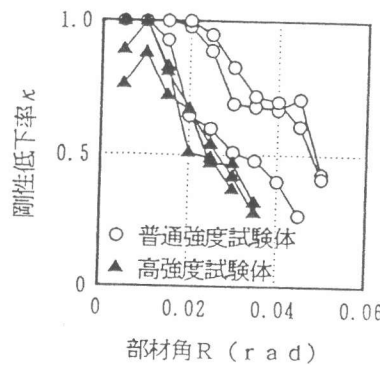


図-12 剛性低下率 $\kappa$ と繰り返し部材角 $R$ の関係

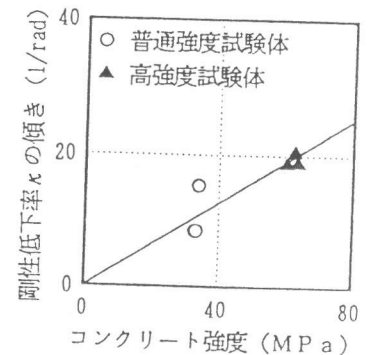


図-13 コンクリート強度と剛性低下率 $\kappa$ の傾きの関係

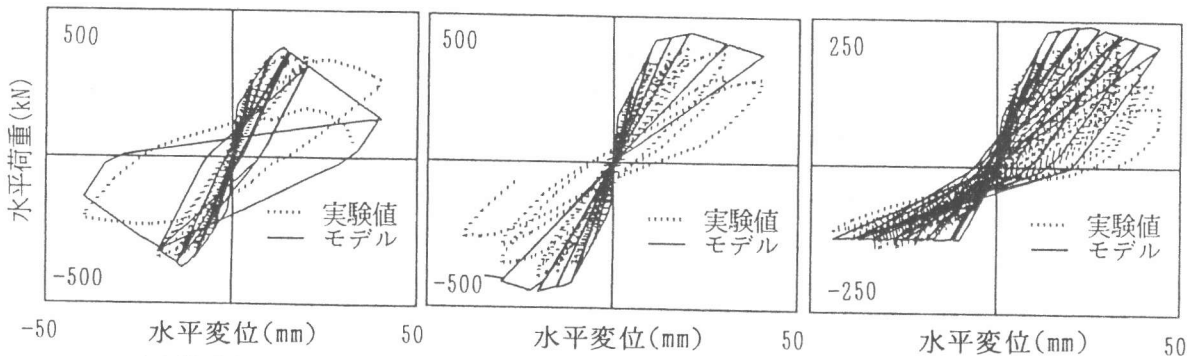


図-14 試験体の履歴の実験値とモデルとの比較

お、式(4)は  $I_B=1$  のとき縦軸が0となる点を通る直線を用いて最小自乗法により近似したものである。ただし、ばらつきが大きいので、今後試験体数を増やした検討が必要である。なお、 $\gamma$  は式(5)による。

変動軸力を受ける試験体の除荷剛性低下率  $\kappa$  の検討手法は前述した  $\beta$  の検討と同一である。吸収エネルギーがモデルと実験結果で一致する係数  $\kappa$  とそのサイクルの部材角とを比較して示したものが図-12である。結果は部材角が増えるに従い  $\kappa$  も小さくなる傾向が見られたが、コンクリート強度による影響が顕著に見られた。そこで、コンクリート強度による影響を検討したのが図-13である。図-13の縦軸は、図-12の各試験体のデータを横軸0、縦軸1を通る直線にモデル化したときの傾きであるが、コンクリート強度  $\sigma_B$  が高くなると図-12における  $\kappa$  の勾配が急になることを示しており、本報告では式(6)で示した図中の直線を  $\kappa$  の評価式として提案する。なお、式(6)は原点を通る直線を用いて最小自乗法により近似したものである。

$$\alpha = 0.1 + 0.0012/R \quad (3) \qquad \beta = 1 - 12(I_B - 1)R \quad (I_B > 1) \quad (4)$$

$$\gamma = 1 - \beta \quad (5) \qquad \kappa = 1 - 0.3 \cdot \sigma_B \cdot R \quad (\sigma_B : \text{MPa}) \quad (6)$$

なお、以上の方法による除荷時剛性は除荷開始点と原点を結んだ剛性（原点指向剛性）より小さくなる場合があるが、このときは原点指向剛性をとるものとする。

最後に評価式による復元力特性と実験値を比較して図-14(a)～(c)に示す。図(a)は一定軸力を受け曲げ圧縮コンクリートで靱性が決まる試験体、図(b)が一定軸力を受け付着破壊で靱性が決まる試験体、図(c)が変動軸力を受け主筋の座屈で靱性が決まる試験体である。本報告では付着破壊と主筋の付着で靱性が決まる試験体の靱性能も式(1)で評価したので、やや実験値を過大評価する結果となっているが、モデルはいずれも全体の挙動をよく表現している。

## 5. まとめ

比較的高軸力を受けるRC柱の復元力特性のモデルをエネルギー吸収性能に着目して提案した。今後、各評価式の精度を高める必要があるが、実験データおよびその適用範囲を増やすとともに、より力学的なモデルでの裏付けが必要である。

### [参考文献]

- [1] 加藤大介、勝俣英雄、青山博之、小谷俊介：基礎に浮き上がりを生じる耐震壁を含む骨組に関する研究、第6回日本地震工学シンポジウム（1982）講演集、pp.1265-1272、1982.12
- [2] 石崎元子、羽廣重夫、加藤大介：高軸力を受けるRC造柱の曲げせん断加力実験、日本建築学会北陸支部研究報告集、pp.107-110、1990
- [3] 加藤大介：高強度材料を用いたRC柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究、第13回コンクリート工学年次論文報告集13-2、pp.415-420、1991
- [4] 加藤大介、菊池政智：高強度材料を用いたRC柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究、第14回コンクリート工学年次論文報告集14-2、pp.541-546、1992
- [5] 本多良政、加藤大介：主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受けるRC柱の静加力実験、第16回コンクリート工学年次論文報告集16-2、pp.455-460、1994
- [6] 加藤大介、鈴木広孝、本多良政：主筋の座屈挙動に着目した変動軸力を受ける高強度RC柱の静加力実験、第17回コンクリート工学年次論文報告集17-2、pp.351-356、1995
- [7] 加藤大介、芝讓：変動軸力を考慮したRC部材の変形能の評価法（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2構造IV、pp.385-388、1995
- [8] 菊池政智、加藤大介：高強度材料を用いたRC部材の変形能評価に関する研究、第15回コンクリート工学年次論文報告集15-2、pp.743-748、1993