

## 論文 プレストレスト鉄筋コンクリート造部材の履歴復元力特性

杉本訓祥\*1・伊藤 央\*2・塩原 等\*3・小谷俊介\*4

要旨：プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）部材には，導入するプレストレス量によりその特性が鉄筋コンクリート（RC）に近いものやプレストレストコンクリート（PC）に近いものが存在する．これらの PRC 造部材，PC 造，および RC 造部材の履歴特性に及ぼすプレストレス導入量の違いの影響を検討した実験結果によく適合する，RC 造から PRC 造，PC 造に連続的に適用できる履歴モデルを提案する．また，履歴特性のモデルによる計算値と実験値を比較し精度について検討する．

キーワード：プレストレストコンクリート，履歴モデル，曲げ耐力比

## 1 はじめに

プレストレストコンクリート（PC）部材の荷重・変形関係は，鉄筋コンクリート（RC）部材に比べ，曲げ降伏時の急激な剛性の変化が見られず曲線状で，繰返し载荷による履歴特性は，降伏後の履歴エネルギー消費が少ないという特徴を有する．また，RC 部材に PC 鋼材をいれてプレストレスを導入したプレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）部材は，プレストレスの量により PC 造に近いものから RC 造に近いものへと復元力特性が変化する．RC，PRC および PC 部材を含む骨組の耐震性能を精度よく推定するためには，部材の復元力特性を RC から PC 部材まで連続的に表現できるモデルが必要である．

PRC 及び PC 部材の履歴モデルには，林ら(文献[1])，西山ら(文献[2])による S 字型に表現するモデル，岡田ら(文献[3])による除荷剛性を RC 部材より低く評価するモデルがある．本研究では，RC，PRC 及び PC 部材に対して行った梁の静的繰返し载荷実験結果をもとに，PC 造から RC 造までの特性の変化をより忠実に連続的に表現する履歴復元力モデルを提案し実験結果と比較・検討する．

## 2 PC 造梁部材の履歴モデル

## 2.1 実験結果の概要

文献[4]の実験は，部材の曲げ耐力に対する PC 鋼棒が寄与する耐力の比（以下，曲げ耐力比： $\lambda$ ）を変数としており，降伏後の履歴では，以下に示すような特徴が見られ，本研究では，特にこれらの点に留意して履歴モデルのルールを定めた．

1. 純 PC 造部材では S 字のカーブを描く．
2. 普通鉄筋が存在する試験体はいずれの試験体でも，除荷開始直後は RC 造部材と同様に高い剛性を持ち，その後の剛性変化は曲げ耐力比によって異なる．
3. 2.項の剛性変化は曲げ耐力比の大きな試験体ほど復元力の高い段階で起こり，一旦剛性が下がりはじめ，残留変形の小さな高復元性を示すが，荷重が小さくなると再び剛性は高くなる．
4. プレストレスの導入された試験体でも曲げ耐力比の小さな試験体では，ほぼ同じ耐力を持つ RC 造試験体と同程度の履歴エネルギー消費が見られた．

\*1 株式会社大林組 修士（工学）（正会員）

\*2 東京大学大学院工学系研究科建築学先行 修士課程（正会員）

\*3 東京大学大学院工学系研究科 助教授 工博（正会員）

\*4 東京大学大学院工学系研究科 教授 Ph. D.・工博（正会員）

## 2.2 スケルトンカーブ

スケルトンカーブは一方向荷重時の応力と変形の関係を表すもので、ひび割れ点と降伏点の二つを折れ点とした3本の直線を用いることにする。折れ点は次のように定義する。

ひび割れ点は、文献[5]の(66.9)式により計算する。

PCあるいはPRC部材は、RC部材に比べて荷重-変形関係において明瞭な降伏点を持たないことが多い。しかし、ここでは普通鉄筋とPC鋼棒がいずれも降伏した時の点を曲げ解析によって求め折れ点とする。曲げ解析に用いる材料の応力度-歪度関係は、普通鉄筋は3本の折れ線により、PC鋼棒およびコンクリートは文献[6]に従ってモデル化し、モーメント-曲率関係を求め、危険断面位置のモーメントが終局強度の時(断面の圧縮縁歪度が0.3%に達した時)の曲率分布をバイリニアに簡略化して部材軸に沿って積分して部材端の変形を求める。

文献[4]の $\lambda = 0.2$ および $0.6$ の試験体について、定義したスケルトンカーブと実験による荷重-変形関係の包絡線を比較して図-1に示す。概ねよい対応が得られている。

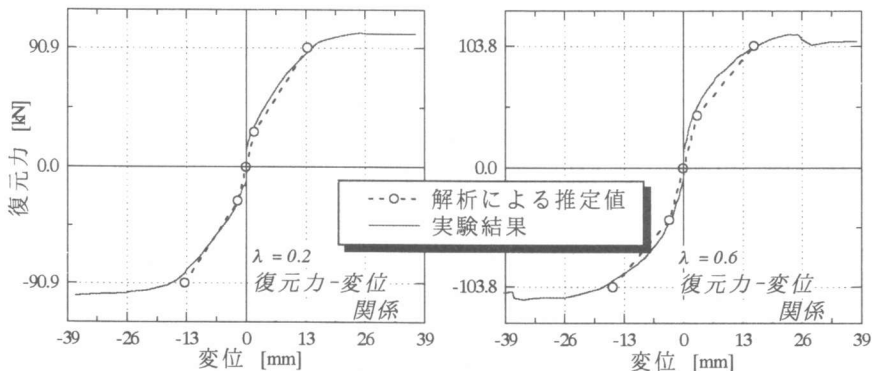


図-1 スケルトンカーブの比較

## 2.3 履歴ルール

履歴ルールは、2.2で定めたスケルトンカーブを骨格として、繰り返し荷重時の応力と変形の関係を表すもので、RC部材とPC部材との連続性を保つために、RC部材に対してはTAKEDAモデル(文献[7])を用いることとした。以下に履歴のルールを概説する。履歴ルールを降伏前と後に分けて図-2に示す。以下の記述においては、履歴の荷重・変形の進む方向について、荷重・除荷・再荷重を次のように定義する。また、除荷時剛性は文献[1], [7]の方法を参考にして決定した。

「荷重」：荷重ゼロの状態から正荷重側または負荷重側に向かって荷重が増加するとき。

「除荷」：荷重の途中で、荷重ゼロ(変位軸)に向かって荷重が減少していくとき。

「再荷重」：除荷の途中で、荷重がゼロに達する前に荷重が増加していくとき。

図-2に示す除荷時の折れ点を決める直線( $l_{d1}^+$ ,  $l_{d1}^-$ ,  $l_{d2}^+$ ,  $l_{d2}^-$ )は正負の荷重方向に対してそれぞれあらかじめ決めておく。履歴のルールは、ひび割れ発生前は初期剛性( $K_0$ )の直線上を進むものとし、(A)片方ひび割れ発生前かつ他方ひび割れ発生後、(B)両方ともひび割れ発生後降伏以前および(C)片方降伏後かつ他方降伏前・後の3つの状態に対して規定する。

(A-1)片方ひび割れ以前、かつ他方ひび割れ後降伏以前

スケルトンカーブ上からひび割れ後に除荷が始まるとき(他方はひび割れ以前)は、除荷剛性 $K_{d1}$ で除荷が進み、直線 $l_{d1}$ を超えた後はひび割れ点を目指す。ひび割れ点を過ぎてからはスケルトンカーブ上を進む。(図-2(a)の2-3-4)

(A-2) 片方ひび割れ以前又はひび割れ後降伏以前, 他方降伏後

スケルトンカーブ上から降伏後に除荷が始まる時は, 除荷剛性  $K_{rd}$  で除荷が進み, 直線  $l_{d1}$  を超えた後は剛性  $K_{dd}$  でひび割れ荷重まで進む。ひび割れ荷重を超えた後は降伏点を旨指す。降伏点を過ぎてからはスケルトンカーブ上を進む。(図-2(a)中 3'4'5'6')

(B) 両方ともにひび割れ後, 降伏以前

スケルトンカーブ上からひび割れ後に除荷が始まる時(他方はひび割れ後降伏以前)は, 除荷剛性  $K_{rd}$  で除荷が進み, 直線  $l_{d1}$  を超えた後はひび割れ点を旨指す。ひび割れ点を過ぎてからはスケルトンカーブ上を進む。

(C) 両側ともにひび割れ点を超えどちらか一方が降伏したとき

除荷開始から反対側への荷重によりピークに向かう時3個所で剛性を変える。それぞれを, 除荷開始後から点 Re ( $D_{re}, Q_{re}$ ), 点 D1 ( $D_{d1}, Q_{d1}$ ), 点 D2 ( $D_{d2}, Q_{d2}$ ) と呼ぶ。除荷開始点  $P^+$  ( $D_p^+, Q_p^+$ ), 点 D2 以後の指向点は過去の最大点 P とする。また, 点  $P^+$  から点 Re, 点 Re から点 D1, 点 D1 から点 D2 の間の剛性をそれぞれ  $K_d, K_{rd}, K_{dd}$  とする。以下に, ピークから反対側ピークに向かう場合と, その途中, ピークに達する前に除荷・再荷重が起こる場合に分けてルールを示す。

・除荷および荷重(片側ピークから反対側ピークまで。図-2(b)中 1-2-3-4-5)

C.1 最大点( $P: (D_p, Q_p)$ )から, 除荷によりスケルトンカーブを離れるとき

剛性  $K_d$  で, 荷重が ( $Q_p - P_{ld}$ ) に達するまで進む。指向点は Re : ( $D_{re}, Q_{re}$ )。ただし, 指向点が荷重がゼロの軸(変位軸)を超える場合は, 荷重がゼロとなる点を指向点とする。

$$Q_{re} = Q_p - P_{ld} \quad (1)$$

$$P_{ld} = 2 \cdot (1 - \lambda_4) \cdot (1 - \mu^{-\alpha}) \cdot Q_p \quad (2)$$

$$K_d = K_{ay} \cdot \mu^{-\alpha} \quad (3)$$

ただし,  $P_{ld}$  は除荷直後の低減荷重,  $\mu$ : 除荷開始点の塑性率,  $\alpha$ : 剛性低下係数(=0.4),  $K_{ay} = (Q_y^+ - Q_c^-) / (D_y^+ - D_c^-)$ , ( $D_y^+, Q_y^+$ ): 除荷開始側の降伏点, ( $D_c^-, Q_c^-$ ): 除荷開始側と反対側のひび割れ点。

C.2 第1折れ点 Re : ( $D_{re}, Q_{re}$ )を過ぎて除荷が進むとき(変位軸を超えれば荷重)

除荷時第2剛性  $K_{rd}$  で, 直線  $l_{d1}$  と交わるまで進む。指向点は直線  $l_{d1}$  との交点 D1 : ( $D_{d1}, Q_{d1}$ )

$$K_{rd} = \{K_{gy} + (1 - \lambda_1) \cdot (K_{ay} - K_{gy})\} \cdot \mu^{-\alpha_2} \quad (4)$$

$$l_{d1}^+ : q = (1 - \lambda_2) \cdot K_e \cdot d + \lambda_2 Q_g^+ \quad (5)$$

ただし,  $K_e$ : 初期剛性,  $K_{gy} = (Q_y^+ - Q_g^+) / (D_y^+ - D_g^+)$ , ( $D_g^+, Q_g^+$ ): 断面のディコンプレッションモーメントに相当する変形と荷重,  $D_g = Q_g / K_e$ .  $\alpha_2$ : 除荷剛性低下係数,  $\mu$ : 除荷開始点の塑性率。

C.3 第2折れ点 D1 : ( $D_{d1}, Q_{d1}$ )を過ぎて除荷が進むとき(変位軸を超えれば荷重)

除荷時第3剛性  $K_{dd}$  で, 直線  $l_{d2}$  と交わるまで進む。指向点は直線  $l_{d2}$  との交点 D2 : ( $D_{d2}, Q_{d2}$ )

$$K_{dd} = \{K_e + (1 - \lambda_1) \cdot (K_{ay} - K_e)\} \cdot \mu(+)^{-\alpha_3} \cdot \mu(-)^{-\alpha_3} \quad (6)$$

$$l_{d2}^+ : q = (1 - \lambda_2) \cdot K_e \cdot d + Q_g^- / \lambda_3 \quad (7)$$

ただし,  $\mu(+)$ ,  $\mu(-)$ : 正側(除荷開始側)の除荷開始点の塑性率およびその反対側の経験最大点(指向するピーク)の塑性率。

C.4 第3折れ点 D2 : ( $D_{d2}$ ,  $Q_{d2}$ )を過ぎて荷が進むとき。

過去の最大変位を指向する。

- ・再荷重およびピーク以前の除荷 (図中 Reload1, 2, Unload1, 2が再荷重, 除荷の開始点) 再荷重および最大点以前の除荷が開始する点を R0 : ( $D_{r0}$ ,  $Q_{r0}$ )とする。

C.5 反対側荷重方向で規定する直線  $l_{d2}$  を過ぎる前に再荷重するとき (図中 Reload1 から)。

最大点を狙う。ただし, 除荷時第1折れ点以前であれば除荷時の直線上をたどる。

C.6 反対側荷重方向で規定する直線  $l_{d2}$  を過ぎて再荷重又は除荷するとき (図中 Reload2 から)。

剛性  $K_{dd}$  で進み  $l_{d2}$  との交点で折れ, 最大点に向かう。(C.3~C.4と同様。)

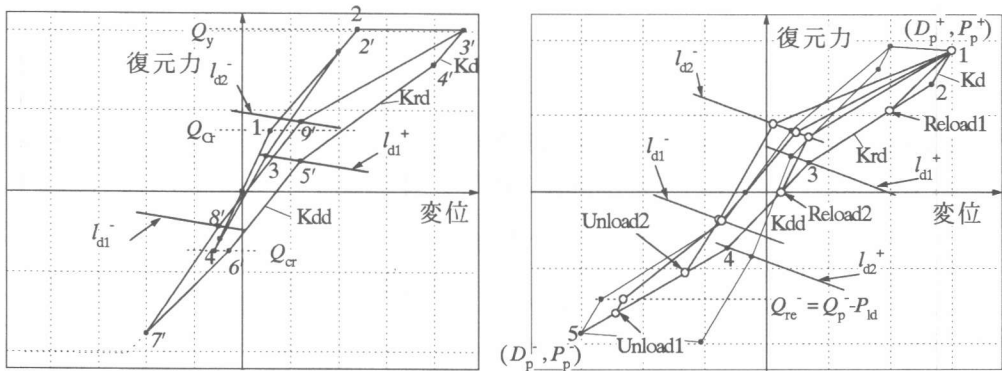
C.7 直線  $l_{d1}$  を過ぎた後, 指向点の低減荷重  $Q_{re}$  に達する前に除荷するとき (図中 Unload2 から)。

除荷時第2剛性  $K_{rd}$  で進み  $l_{d1}$  との交点で折れ, 続いて除荷時第3剛性  $K_{dd}$  で進み  $l_{d2}$  との交点で折れ, 最大点を狙う。(C.2~C.4と同様。)

C.8 反対側荷重方向の指向点の低減荷重  $Q_{re}$  に達した後に除荷するとき (図中 Unload1 から)。

除荷時第1剛性  $K_d$  で進み低減荷重  $Q_{re}$  で折れ, 続いて除荷時第2剛性  $K_{rd}$  で進み  $l_{d1}$  との交点で折れ, さらに除荷時第3剛性  $K_{dd}$  で進み  $l_{d2}$  との交点で折れ, 最大点を狙う。(C.1~C.4と同様。)

以上 C.5 ~ C.8 のルールで剛性を決定するための塑性率( $\mu$ )は, 除荷開始点変位の塑性率を用いる。ただし,  $\mu < 1$  のときは  $\mu = 1$  とする。また,  $K_d$ ,  $K_{rd}$ ,  $K_{dd}$  の計算式は除荷・荷重の場合と同じで, 塑性率のみによって変化する。式(1)~式(7)中の係数  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  は実験によって得られた荷重変形関係の概形が適合するように, また,  $\lambda$  の増加関数となるように与えた。



(a) ひび割れ前後・降伏以前のルール

(b) 降伏後のルール (除荷および再荷重)

図-2 履歴ルールの概形

表-1 ルールを決める係数

曲げ耐力比	$\lambda$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
降伏後の剛性 (= $(0.025 - 0.055\lambda) \cdot K_c$ )	$K_0$	0.025 $K_c$	0.014 $K_c$	0.003 $K_c$	-0.008 $K_c$	-0.019 $K_c$	-0.03 $K_c$
除荷時第2剛性低下係数	$\alpha_2$	0.4	0.7	0.75	0.85	1.1	1.1
除荷時第3剛性低下係数	$\alpha_3$	---	0.5	0.6	0.62	0.63	0.65
除荷剛性を決める係数	$\lambda_1$	0.0	0.0	0.15	0.5	1.0	1.0
直線 $l_{d1}$ , $l_{d2}$ を決める係数	$\lambda_2$	1.0	1.024	1.048	1.072	1.096	1.12
直線 $l_{d2}$ を決める係数	$\lambda_3$	0.1	0.22	0.34	0.46	0.58	0.7
除荷直後低減荷重を決める係数	$\lambda_4$	0.16	0.28	0.4	0.52	0.64	0.76

### 3 実験結果との比較・検討

#### 3.1 荷重-変形関係

文献[4]の実験データを対象として実験結果に適合する様に選んだ各係数の値を表-1に示す。スケルトンカーブの降伏後の剛性は表-1中の式で与えた。この場合の実験結果とモデルによる計算結果とを比較した。計算は実験の加力と同じ制御方法で行った。塑性率2~7の大変形時の各サイクルについて比較した例を図-3に示す。また、定変位振幅の正負および正方向または負方向に複数回繰返し载荷したときの結果について比較した例を図-4に示す。 $\lambda=0.4$ ,  $\lambda=0.8$ の対照的な履歴ループの概形を概ね一致させることができている。一方方向繰返し载荷時にも、 $\lambda=0.2$ では履歴面積を小さく、 $\lambda=0.6$ では大きく描いており、特性の違いが表現できている。また、振幅が小さい時の履歴に対しても概形はよく対応させることができている。

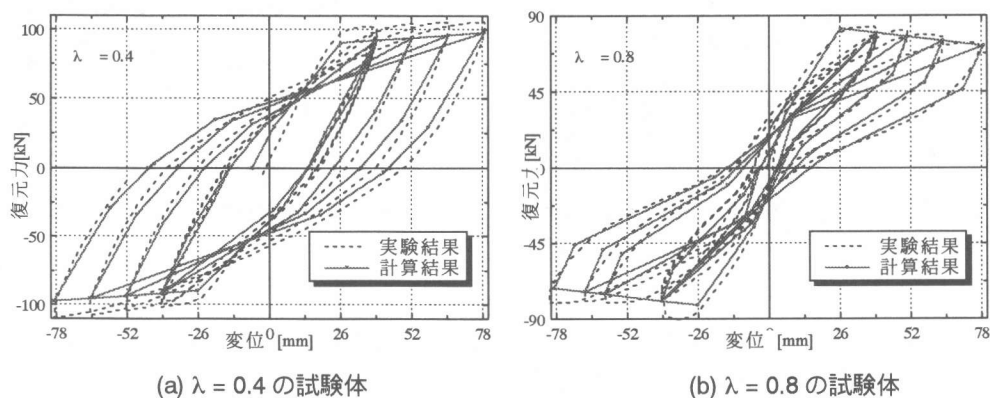


図-3 大変形時の履歴特性（塑性率3~6）

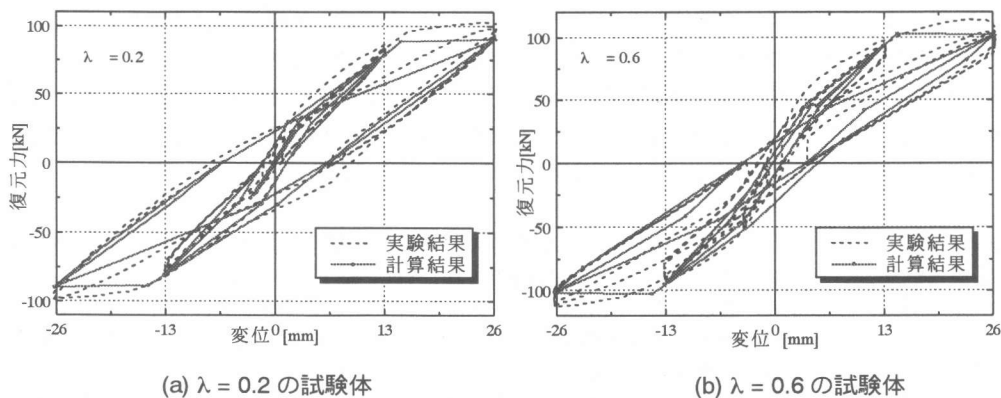


図-4 定変位振幅での履歴特性（塑性率1及び2）

各サイクルの除荷後の残留変形のサイクルの最大変形に対する割合を計算結果と実験結果を比較して図-5に示す。図は、曲げ耐力比に対してプロットし、塑性率1, 2, 3, 5, 7について示した。計算結果を白抜きの記号で、実験結果は同じ記号を塗りつぶした記号でそれぞれ表現した。曲げ耐力比が大きくなると残留変形の割合が小さくなる傾向は、モデルによる計算でも表せており、特に、 $\lambda=0.6, 0.8, 1.0$ と増えていくと急に残留変形が小さくなる傾向もモデルで表現できている。

### 3.2 等価粘性減衰定数

各サイクルの等価粘性減衰定数 ( $h_{eq}$ ) を実験結果と計算結果を比較して図-6に示す。図-5と同様に、曲げ耐力比に対して、計算値を白抜き、実験値を塗りつぶした記号で示した。曲げ耐力比が大きくなるにつれて徐々に  $h_{eq}$  が小さくなる傾向がモデルによる計算でもよく表現されている。しかし、塑性率1では値に大きな違いがあり、等価粘性減衰定数に関しては必ずしも小さな変形では実験結果との対応をよくすることができていない。

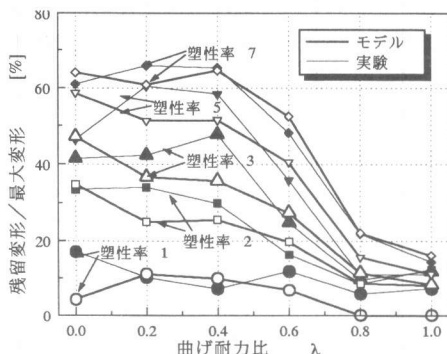


図-5 降伏以後の各サイクルの残留変形

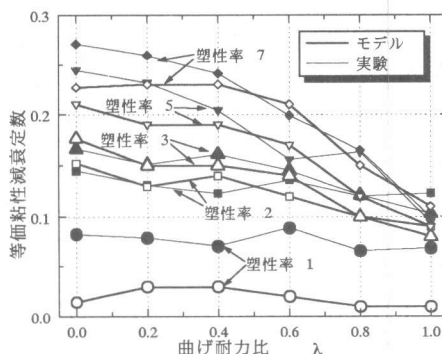


図-6 等価粘性減衰定数の比較

### 4 まとめ

RC から PC までプレストレス量を変えた実験結果によく適合するように、PRC 造および PC 造部材の復元力の履歴モデルを提案した。履歴特性を決める係数を変化させることにより、同じルールで履歴面積の大きい部材から小さい部材まで表現できるようにした。

提案したモデルによる計算結果と既往の実験結果との比較を行ったところ、降伏前後の小さな変形の範囲では、計算結果の実験値との対応がよくなかったものの、等価粘性減衰定数、サイクル毎の加力後の残留変形についても実験結果とよく一致させることができた。

本研究では6体の試験体の実験結果のみから曲げ耐力比を変数として係数を決定したが、今後は、別の条件（鋼材の種類、部材の形状等）を変えた場合に曲げ耐力比を変数としてモデルを規定できるかどうかの検討が必要である。また、係数を関数として定式化する必要もある。

- 参考文献 [1] 林三雄, 岡本伸, 小谷俊介, 加藤博人, 傅金華: PC 部材の履歴特性と PC 造建物の地震応答性状, プレストレストコンクリート技術協会誌, Vol. 34, No.4, pp.57~67, 1995.7
- [2] 太田義弘, 西山峰広, 渡辺史夫, 六車熙: プレストレストコンクリート梁柱骨組の地震応答性状 (その1: Thompson and Park モデルの修正, その2: PC 骨組と RC 骨組の地震応答性状の比較), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.1101~1104, 1992.8
- [3] 岡田満, 浜原正行, 末次宏光, 本岡順二郎: プレストレストコンクリート曲げ部材の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 410, pp.63~69, 1990.4
- [4] 伊藤央, 杉本訓祥, 塩原等, 小谷俊介: プレストレスト鉄筋コンクリート造梁部材の繰返し載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, 1997
- [5] プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 日本建築学会, 1987
- [6] Michael P. Collins & Denis Mitchell: *PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES*, PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991
- [7] Toshikazu Takeda, Mate A. Sozen & N. Norby Nielsen: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ST12, Vol.96, pp.2557 ~ 2573, 1970