

# 交番載荷実験に基づくPC箱桁の復元力特性の提案

大塚 久哲\*1・岡田 稔規\*2・石原 眞一\*3・角本 周\*4・堤 忠彦\*5

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、道路橋の設計地震力が大幅に引き上げられたことにより、PC橋においては橋脚のみならず、従来は弾性部材として扱われていた上部構造も非線形領域の挙動を考慮することが必要となった。また、地震時の挙動が複雑な橋梁に関しては動的解析により設計・審査を行うこととなったが、その際非線形履歴モデルの選択が、非線形動的解析における部材の応答評価に与える影響は大きく<sup>1)</sup>、したがって上部構造の的確な履歴モデルを用いることが橋全体の耐震安全性の評価にとって重要である。

PC部材の履歴モデルに関する既往の研究においてはRC部材によく用いられる武田モデル<sup>2)</sup>をもとにしたPC部材やPC橋脚の復元力特性が提案されている<sup>3)~7)</sup>。これらのモデルでは主に除荷時の剛性の変化に着目し、PC鋼材量や鉄筋量で決定される終局時の鋼材の耐力分担率などをパラメータにその剛性の変化を表現しようというのが主である。また、PC橋脚に関する研究においては残留変位についても着目しており、RC部材に比べエネルギー吸収能は低い<sup>8)</sup>、残留変形が小さく変形性能に優れているといったPC部材の特徴を表現するものとなっている<sup>6)</sup>。

本研究で対象とするPC桁では、断面形状やPC鋼材の配置が対称であるPC橋脚とは異なり、支間中央部付近や支点部付近で鋼材が偏心配置されることや、張出し床版を有する形状の影響により骨格曲線が正負非対称となる特徴がある。

本論文は、PC箱桁模型供試体の正負交番載荷実験の結果<sup>8)~10)</sup>とPC部材に関する既往の研究成果をもとにPC箱桁の復元力特性を提案し、その検証を行ったものである。

## 2. 既往研究のレビュー

ここではまず、PC部材の復元力特性に関する既往の研究<sup>3)~7)</sup>についてレビューを行う。

既往の研究で提案されているPC部材の復元力特性のほとんどが、RC部材に対する武田モデルを基本にしているが、同モデルでは除荷時の剛性を曲げモーメント(あるいは復元力)が0となるまで一定としているのに対し、提案されたモデルではPC部材の履歴ループの特徴である除荷時の剛性の変化に着目し、PC鋼材量や鉄筋量で決定される終局時の鋼材の耐力分担率などをパラメータにその剛性の変化を表現している。PC橋脚に関する研究においてはさらに残留変位についても着目している<sup>6)</sup>。また、前述の鋼材の耐力分担

率を0~1.0まで変化させることでRC部材から純PC部材までを包括できるようなモデルを提案している。

PC部材に関する岡本らの研究<sup>3)</sup>や、林らの研究<sup>7)</sup>では、ひび割れから降伏までの挙動については精度よく表現できるものの、降伏以降の除荷時における剛性の低下を一定ないしはバイリニアとしており、本研究でのPC桁の実験結果<sup>8)~10)</sup>(除荷曲線が緩やかな曲線を呈する)とは異なっている。また、PC橋脚に関する陸好らの研究<sup>5)</sup>や、池田らの研究<sup>6)</sup>においては、モデルが対称断面の橋脚であることから鋼材の偏心や非対称断面による偏心プレストレス力が履歴ループ形状や残留変位に与える影響を表現できない。保坂らの研究<sup>4)</sup>で提案されるPC桁の復元力特性では、プレストレス量による除荷時の剛性の低下を一定としており、除荷時の剛性の変化を考慮できない。

このような既往の研究で提案されている復元力特性に対し、本研究では、鋼材の耐力分担率と塑性率により減衰定数および残留曲率を規定し、除荷曲線を決定するPC箱桁の新たな復元力特性を提案した。

## 3. 実験概要<sup>8)~10)</sup>

### 3.1 検討ケースおよび実験方法

供試体は、1室箱桁断面とし、載荷装置の能力を考慮して1/8.5程度の外形寸法とした。ただし、かぶりやウェブ厚等は、使用するコンクリートの最大骨材径や製作上の制約から設定した。

使用材料は、 $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートとSD295(D6, D13)の鉄筋を用い、PC鋼材は現在PC橋で一般に使用されているPC鋼より線とし、1S15.2Aを使用した。

検討ケースは、鋼材の偏心量、PC鋼材の付着の有無(内・外ケーブル)、支間中央鉄筋の重ね継手の影響および横拘束筋の効果に着目し、比較のためのRC供試体を含め12ケースについて実験を行った。表-1に検討ケースを示す。これら全ケースの実験結果については、文献<sup>10)</sup>に詳しく述べている。

本論文では、これらの供試体のうちRC供試体であるL01(0.0MPa)とPC鋼材を軸力配置とし、プレストレス量を変化させたL10(2.4MPa)、L02(3.6MPa)、L11(4.8MPa)、L05(6.0MPa)について考察、検討した。図-1に各供試体の断面図と鋼材配置を示す( $\lambda$ については後述)。

載荷方法は、等曲げ載荷(2点載荷)の正負交番漸増載荷とし、押し引き980kNの油圧ジャッキを用いて、軸方向鉄筋初

\*1 Hisanori OTSUKA:九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授

\*2 Toshiki OKADA:八千代エンジニアリング(株) 橋梁・構造部 (九州大学大学院 建設システム工学専攻 博士課程)

\*3 Shin-ichi ISHIIHARA:(株)構造計画研究所 熊本構造計画研究所 応用力学室

\*4 Meguru TSUNOMOTO:オリエンタル建設(株) 技術部

\*5 Tadahiko TSUTSUMI:(株)富士ビー・エス 東京支店 技術部

表-1 検討ケース

供試体名	構造	プレストレス (MPa)	PC鋼材の本数と位置	PC鋼材の配置	備考
L01	RC構造	—	—	—	L02と終局耐力を同等に設定
L02	PC構造	3.6	6本 (全内ケーブル)	軸力配置	標準モデル
L03	〃	〃	〃	下縁配置	上下終局耐力比 3 : 1
L04	〃	〃	〃	上縁配置	上下終局耐力比 1 : 3
L05	〃	6.0	10本 (全内ケーブル)	軸力配置	プレストレス量をL02の5/3倍
L06	〃	3.6	6本 (4本外ケーブル)	下縁配置	L03と鋼材偏心を同等に設定
L07	〃	〃	〃	上縁配置	L04と鋼材偏心を同等に設定
L08	〃	〃	6本 (全内ケーブル)	軸力配置	L02の軸方向鉄筋を重ね継手に
L09	〃	〃	〃	〃	L02の上下フランジに拘束鉄筋配置
L10	〃	2.4	4本 (全内ケーブル)	〃	プレストレス量をL02の2/3倍
L11	〃	4.8	8本 (全内ケーブル)	〃	プレストレス量をL02の4/3倍
L12	〃	3.6	6本 (全外ケーブル)	下縁配置	L03と鋼材偏心を同等に設定

\* 「軸力配置」とは、張出し床版を無視した断面に対してケーブル配置が上下対称に配置された供試体

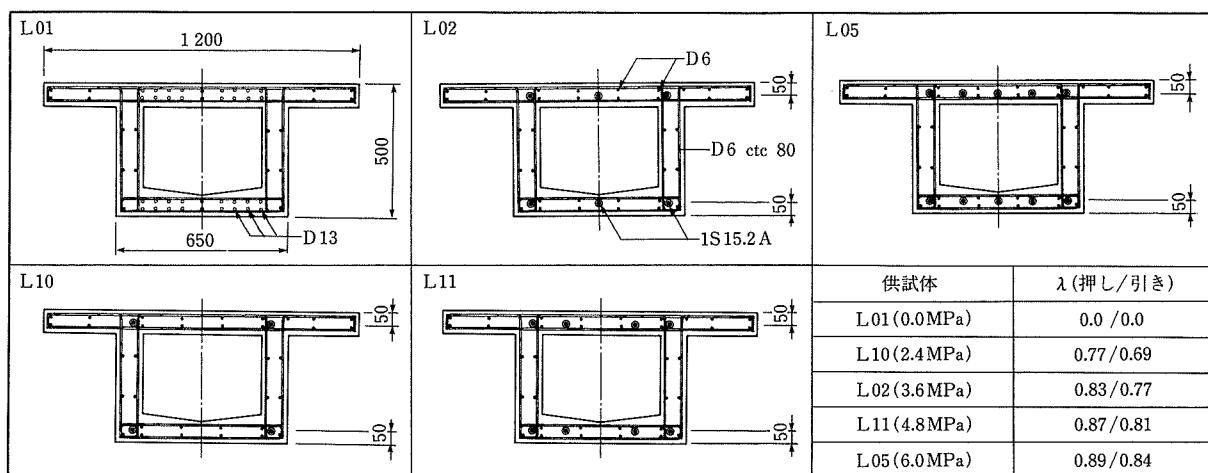


図-1 供試体断面図 (単位: mm) および λ

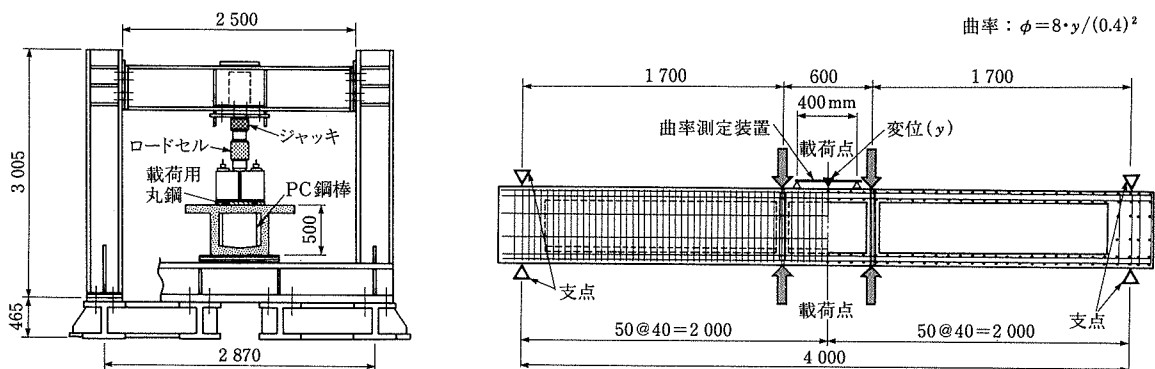


図-2 荷重装置および供試体設置状況 (単位: mm)

降伏時の変位  $\delta_{y0}$ までは荷重制御, その後は $\delta_{y0}$ の整数倍を片振幅とした両振り交番荷重 ( $\pm 2\delta_{y0}$ ,  $\pm 3\delta_{y0}$ ,  $\pm 4\delta_{y0}$  ……) を, 最大荷重以下に荷重が低下するまでを目標に行った。荷重スパン長は中央部 600mmとし, 桁中央点から左右 300mmの位置に荷重用丸鋼 (直径 60mm) をフランジ上下面にセットし, PC鋼棒で締めた。

本実験で用いた荷重装置および供試体設置状況を図-2に示す。

### 3.2 曲げモーメント-曲率 ( $M-\phi$ ) 関係

実験で得られた各供試体の  $M-\phi$  履歴曲線を図-3に示す。

す。曲げモーメントおよび曲率の符号は, 荷重ジャッキを押し下げたときに発生する方を正, 引き上げたときに発生する方を負としている。曲率は供試体中央の 400mmの区間 (これは, 荷重スパンの等曲げ区間内にあたる) で測定したたわみから算出した (図-2)。RC供試体 (L01) は, 軸方向鉄筋降伏後の剛性低下が著しく, 除荷時の剛性はほぼ一定で残留曲率が大きい典型的な紡錘型の履歴を示した。一方, PC供試体では, 除荷時に剛性が低下し平行四辺形型のループを描く。プレストレス導入量の増加に伴い, 除荷時の勾配が緩やかになることにより, 残留曲率は小さくなり

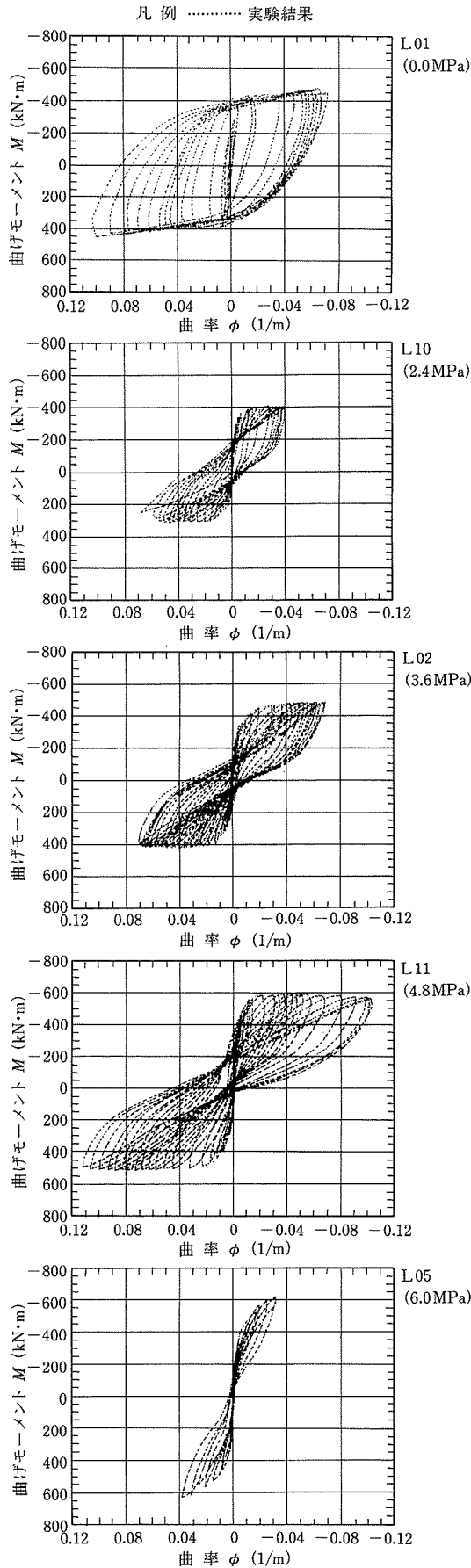


図-3 曲げモーメント-曲率関係(実験)

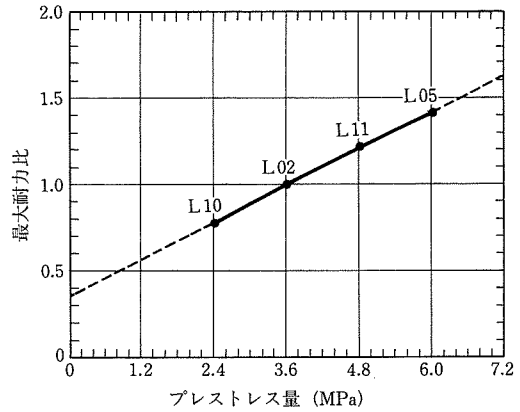


図-4 プレストレス量と最大耐力の関係

原点指向性が強くなる傾向にあることが分かる。

また、図-4のようにL02(3.6MPa)の最大耐力を1.0とした場合の各供試体の最大耐力比もプレストレス導入量に比例することが分かる。

#### 4. PC箱桁履歴特性の提案

##### 4.1 提案履歴ループの特徴

本実験で得られた以上のような結果をもとに、その特性を踏まえた提案履歴モデルの概要をここで述べる。

まず、既往の研究成果からPC部材の復元力特性に影響を与えると考えられるPC鋼材量と鉄筋量に関するパラメータとして耐力分担率 $\lambda$ を定める。ここに、耐力分担率とは終局時(ここでは平成8年度「道路橋示方書V耐震設計編」の、9.4コンクリートの応力度-ひずみ曲線において、横拘束筋の効果を見捨てた場合のコンクリートの終局ひずみが $2000\mu$ であることから、最外縁コンクリートひずみが $2000\mu$ となったとき)においてPC鋼材が負担する曲げ耐力と鉄筋が負担する曲げ耐力の比率とし、次式で表される。

$$\lambda = \frac{M_{pu}}{M_{su} + M_{pu}}$$

ここに、 $M_{pu}$ は引張り側PC鋼材が負担する曲げ耐力、 $M_{su}$ は引張り側鉄筋が負担する曲げ耐力であり、RC部材では $\lambda = 0$ 、純PC部材では $\lambda = 1.0$ となる。図-1には、本論文で対象とした5つの供試体の $\lambda$ 値を併記している。

本提案モデルでは、減衰定数および残留曲率をこの耐力分担率 $\lambda$ と塑性率 $\mu$ (後述)の関数として実験結果より決定した。軸力配置供試体のループ形状をもとに除荷曲線の近似関数を求めるが、この近似関数は、耐力分担率 $\lambda$ および除荷開始時の塑性率 $\mu$ から得られた減衰定数 $h$ で決定されたループ形状とし、かつ規定した残留曲率 $\phi_r$ を通るものとする。また、履歴カーブのうち、近似関数で規定する範囲は $M=0$ までとし、その後は過去の最大経験点を目指して直線を進むこととする。提案する履歴ループの概念図を図-5に示す。

##### 4.2 除荷曲線

履歴カーブの関数近似については、降伏時付近、実験の最大変形点付近、その中間付近の履歴カーブを抽出し、それらを正規化した除荷曲線を $Y$ とし、式(1)で近似できるもの

とした。

$$Y = C \cdot y_1 + (1 - C) \cdot y_2 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

$$y_1 = 1 - e^{-px}$$

$$y_2 = 1 - (1 - x)^q$$

$p, q$  は実験定数で、ここでは実験結果から  $p = 26, q = 0.9$  に設定した。図-6 に  $y_1$  および  $y_2$  の曲線形状と、除荷曲線関数  $Y$  の形状の例を示す。

本研究では上の2関数  $y_1, y_2$  の配分比を減衰定数  $h$  にて決定することとした。履歴ループを規定する係数  $C$  と等価減衰定数  $h$  の関係を以下に求める。

履歴ループを無次元化した復元力特性を考え、式(2), (3) に示す関数  $F_1, F_2$  を設定した。図-7 に関数  $F_1, F_2$  の概念図を示す。

$$F_1 = Y(x) = C \cdot (1 - e^{-px}) + (1 - C) \{1 - (1 - x)^q\} \dots\dots\dots(2)$$

$$F_2 = 1 - Y(1 - x) = 1 - [C \cdot (1 - e^{-p(1-x)}) + (1 - C) (1 - x)^q] \dots\dots(3)$$

減衰定数  $h$  は式(4)により求められる。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\Delta W = \int_0^1 F_1 dx - \int_0^1 F_2 dx$  として求められることより

$$\int_0^1 F_1 dx = C \left(1 - \frac{1}{p}\right) + C \frac{e^{-p}}{p} + (1 - C) \left(1 - \frac{1}{q+1}\right)$$

$$\int_0^1 F_2 dx = 1 - C \left(1 - \frac{1}{p}\right) - C \frac{e^{-p}}{p} - (1 - C) \left(1 - \frac{1}{q+1}\right)$$

を考慮して

$$\Delta W = 2C \left\{1 - \frac{1}{p} + \frac{1}{p} e^{-p} - \left(\frac{q}{q+1}\right)\right\} - 1 + \frac{2q}{q+1} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

$$\alpha_1 = -1 + \frac{2q}{q+1}$$

$$\alpha_2 = \left\{1 - \frac{1}{p} + \frac{1}{p} e^{-p} - \left(\frac{q}{q+1}\right)\right\}$$

とおくと、式(4)より

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 \cdot C}{0.5^2}$$

$$\therefore C = \frac{0.5 \cdot \pi \cdot h - \alpha_1}{2 \cdot \alpha_2} \dots\dots\dots(6)$$

### 4.3 残留曲率

鈴木・池田らのPC橋脚に関する研究<sup>6)</sup>によれば、残留曲率  $\phi_r$  は武田モデルの除荷剛性  $K_r$  により決定される残留曲率  $\phi_{rc}$  と耐力分担率  $\lambda$  を用いて、式(7)で求められることが示されている。

$$\phi_r = (1 - \lambda) \cdot \phi_{rc} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、

$$\phi_{rc} = \phi_m - \frac{M_m}{K_r}$$

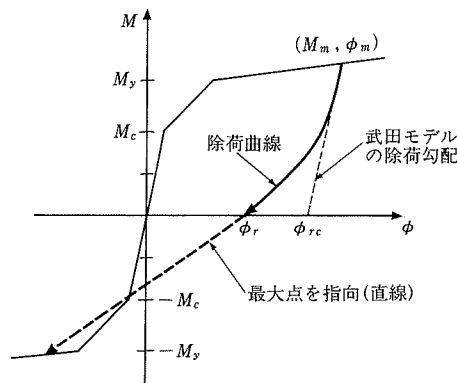


図-5 履歴ループの概念図

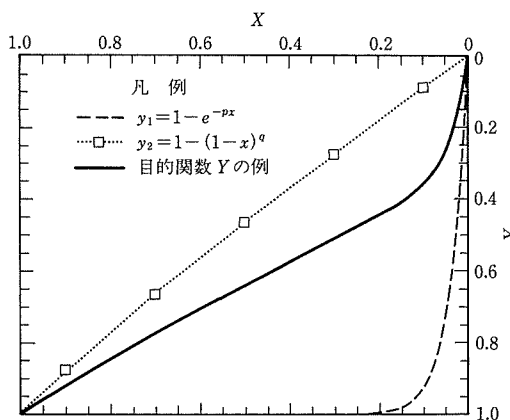


図-6 除荷曲線関数

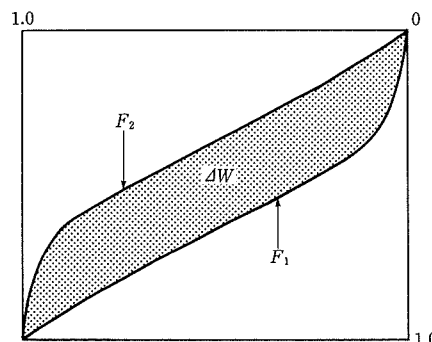


図-7 関数  $F_1, F_2$  の概念図

$$K_r = \frac{M_y - (-M_c)}{\phi_y - (-\phi_c)} \cdot \mu^{-0.4}$$

$$\mu = \frac{\phi_m}{\phi_y} \text{ (塑性率)}$$

$M_c, M_y, M_m$  および  $\phi_c, \phi_y, \phi_m$  はそれぞれ、ひび割れ時、降伏時、最大時の曲げモーメントおよび曲率である。

しかしながら、本研究での実験結果によれば式(7)は、塑性率が小さい範囲 ( $\mu = 4$  程度以下) では合うものの、塑性率が大きくなるとその精度は十分ではないと考えられるため、PC桁の残留曲率を求める式として補正係数  $\alpha$  を含む式(8)を新たに提案する。実験より得られた  $\phi_r$  を表現するためには、 $\mu$  によってこの  $\alpha$  の値が図-8の○印のように変化している。ここで  $\alpha$  を式(9)のように  $\mu$  の関数で表すこととした。図-8の実線は、この関数を描いたものである。

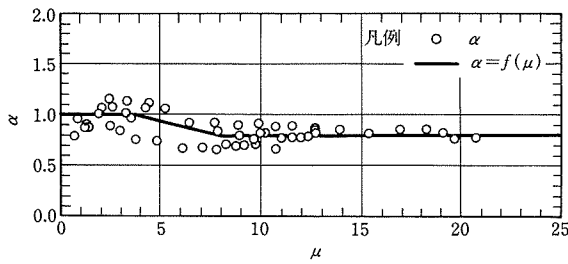


図-8 補正係数  $\alpha$

$$\phi_r = (1 - \alpha \cdot \lambda) \cdot \phi_{rc} \dots\dots\dots(8)$$

$$\alpha = f(\mu) = \begin{cases} 1.0 & (\lambda \leq 4) \\ -0.05 \cdot \mu + 1.2 & (4 \leq \lambda \leq 8) \dots\dots(9) \\ 0.8 & (8 \leq \lambda) \end{cases}$$

これらの式を用いて算出した残留曲率  $\phi_r$  と実験結果で得られた各供試体の残留曲率の比較を図-9に示す。

この図よりL11 (4.8MPa)以外の供試体に関しては、 $\phi_r$ が精度よく表現できていると言える。実験結果が計算結果に対して全体的に押し側にシフトしている傾向にあるが、これは実験における供試体の設置の仕方と載荷方向の関係により、初期状態で自重によるたわみが生じており、その影響で実験値が押し側にシフトしているためと考えられる。ここで、残留変位間隔（押し側の曲率と引き側での曲率の差）に着目するとL11供試体を含めおおむね一致している。

4.4 等価減衰定数

塑性率が大きくなると、部材の損傷が進み残留変形も大きくなることから、履歴ループの面積が大きくなり減衰定数も増加する。また、プレストレス導入量が増加すると、原点指向性が強くなり、残留変位が小さくなることで履歴曲線により囲まれる面積が小さくなるため、等価減衰定数は小さくなる。これらのことから、等価減衰定数  $h$  を塑性率  $\mu$  と耐力分担率  $\lambda$  の関数として式(10)で表現することとした。

$$h = A \cdot (1 - e^{-B \cdot \mu}) \dots\dots\dots(10)$$

式(10)を用いて算出した等価減衰定数と実験結果から求めた等価減衰定数が一致するように、L01 (0.0MPa), L10 (2.4MPa), L02 (3.6MPa), L11 (4.8MPa), L05 (6.0MPa)の5つの供試体に対し係数  $A$ ,  $B$  を求めると、図-10を得る。ここに実験による等価減衰定数  $h$  は式(4)を用いた。この図から、係数  $A$ ,  $B$  はともに  $\lambda$  を変数とする関数で表せると判断できよう。そこで、 $A$ ,  $B$  として以下の式を用いることとした。

$$\left. \begin{aligned} A &= -0.54 \cdot \lambda^2 + 0.165 \cdot \lambda + 0.35 \\ B &= 1.446 \cdot \lambda - 0.577 \quad (B \leq 0.4 \text{ のとき } B = 0.4) \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

上の式(10), (11)を用いて算出した等価減衰定数(線)と実験結果から求めた等価減衰定数(プロット)との比較を図-11に示す。この図から、提案式と実験値による等価減衰定数はほぼ一致していると言える。

4.5 提案履歴ループの形状

以上により求められた等価減衰定数  $h$  と先に示した関数分配率  $C$  の関係から除荷曲線を決定し、曲げモーメントが

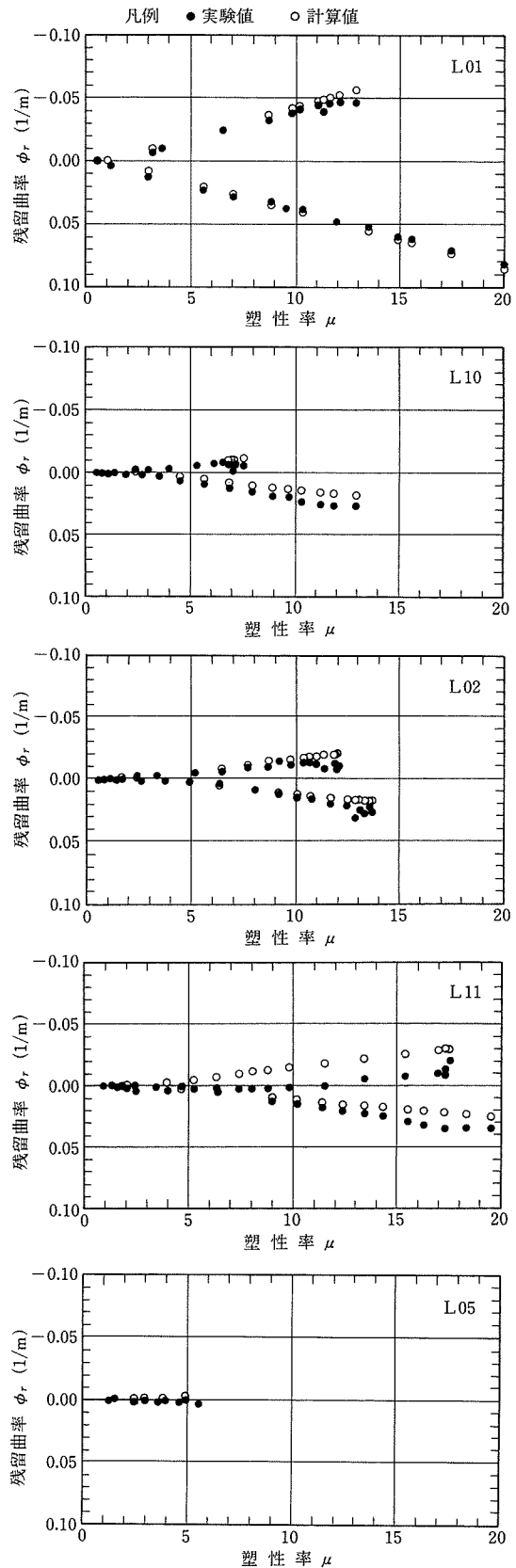


図-9 実験と提案式による残留曲率  $\phi_r$  の比較

0となるところで規定した残留曲率を通過するように履歴カーブを設定した。また、それ以降は最大経験点を直線で指向するものとする。

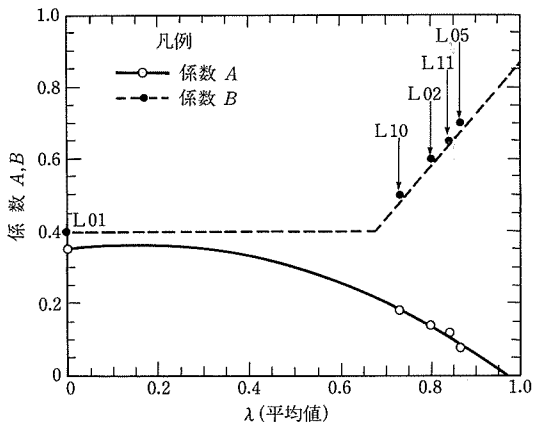


図-10 各供試体におけるA, Bの値と提案直線

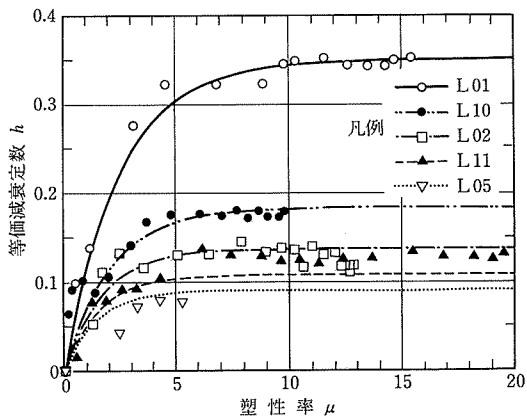


図-11 提案式と実験値による等価減衰定数の比較

これらの履歴法則に従い、対象供試体に対して提案モデルを適用した結果を図-12に示す。図-13はL02供試体(3.6MPa)について提案モデルと実験での履歴ループを同一の図に併記し、比較したものである。これより除荷曲線および残留曲率は実験結果とよく一致していることが分かる。他の供試体についても図-3の実験結果と比較するとL05供試体では実験結果の方が提案モデルに比べ原点指向性が強い形状となり、残留曲率が小さく、曲げモーメント0付近でくびれた形状となっているが、その他のPC供試体についてはよく表現できている。

提案モデルと実験値による等価減衰定数の比較を図-14に示す。PC供試体についてはほぼ一致しているが、RC供試体であるL01(0.0MPa)に関しては、提案モデルの履歴ループから求めた等価減衰定数の方が実験値から求めた等価減衰定数に比べ小さい値を示した。これは提案モデルと実験値の履歴ループ形状を比較した場合、両者は曲げモーメント0までの除荷時の曲線や残留曲率はかなりよく一致しているものの、提案モデルでは曲げモーメント0のところから最大点を直線で指向するため、実験での履歴ループの膨らみを表現できず、これによりループ面積を過小評価するためである。

## 5. まとめ

本論文では、張出し床版を有するPC箱桁の橋軸方向交番載荷実験により得られた結果をもとに、PC鋼材を軸力配置

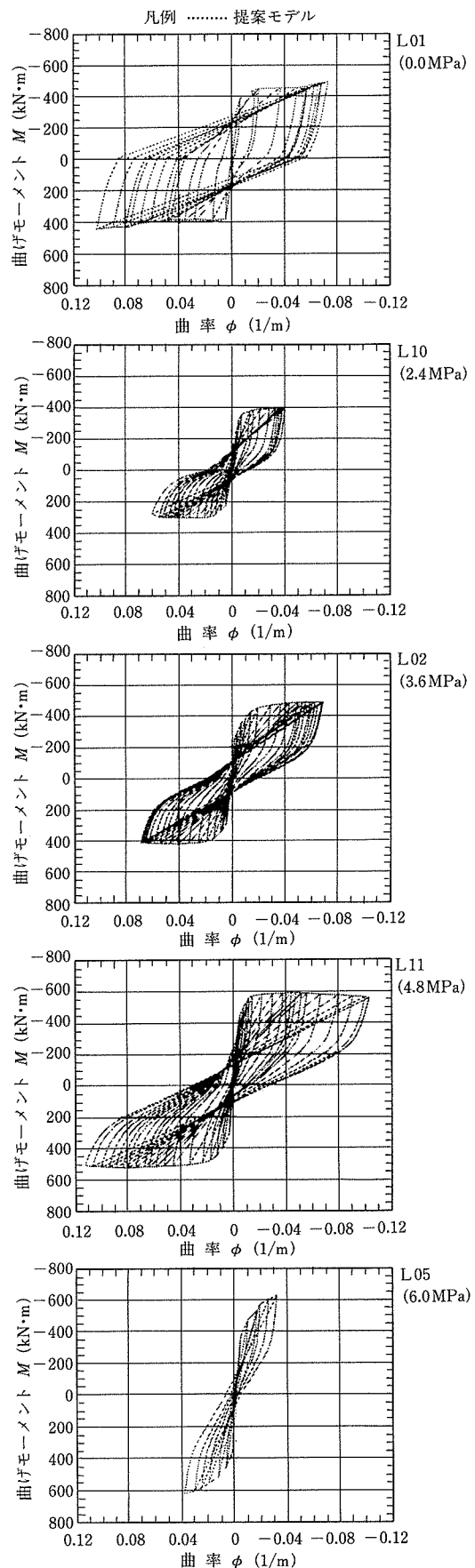


図-12 曲げモーメント-曲率関係(提案モデル)

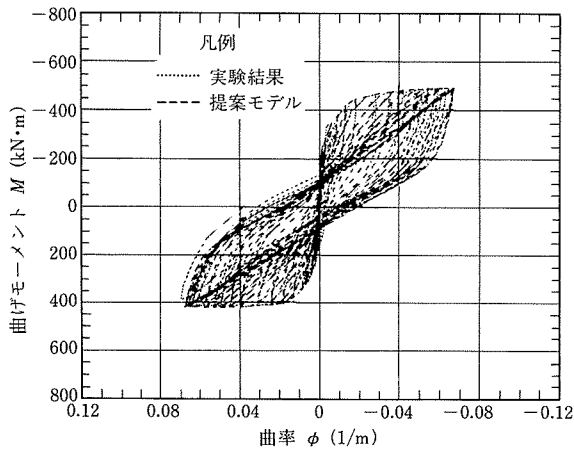


図-13 提案モデルと実験値による曲げモーメント-曲率関係の比較 (L02)

した場合のPC箱桁の復元力特性を提案した。

本研究で提案した復元力特性の特徴についてまとめると以下のようである。

- 鋼材の耐力分担率  $\lambda$  と塑性率  $\mu$  により等価減衰定数  $h$  と残留曲率  $\phi_r$  を規定した。
- 規定した等価減衰定数によりループの膨らみなどの形状を定め、除荷曲線を決定した。
- 除荷曲線の適用範囲は曲げモーメントが0となるころまでとし、そこで残留曲率  $\phi_r$  を通過し、その後は最大点を指向する。

これらの履歴特性は、RC部材の履歴復元力特性として設計で多用される武田モデルとは除荷時の挙動の特性が異なる。本提案モデルと実験結果の比較による検証の結果、PC供試体に関しては、その履歴復元力特性をほぼ再現できることが分かった。RC供試体に関しては、曲げモーメント0のところまでの除荷曲線や残留変位は提案モデルは実験結果とよく一致するが、その後の最大点を指向する部分で実験結果と異なる形状を示す。

本論文では、軸力配置供試体のみでの提案を行ったが、PC鋼材を偏心配置した場合、押し側と引き側で終局耐力やループの形状、残留曲率が変わってくる。これらを考慮した履歴則は、偏心配置供試体の追加実験を実施して、内部ループのモデル化も含め、改めて検討したい。

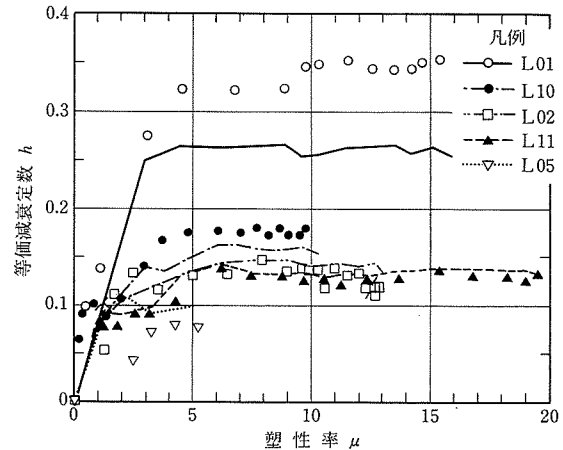


図-14 提案モデルと実験値による減衰定数の比較

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、矢葺 亘氏 (九州大学 大学院助手) および浦川洋介氏 (九州大学 大学院修士課程) には多大のご協力を賜った。記して謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) 大塚, 根井, 矢葺, 堤, 岡田: 上部構造の非線形性を考慮したPCラーメン橋の耐震性照査, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.967~974, 1999.3
- 2) Takeda, T. et al: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ST12, ASCE, pp.2 557~2 573, 1970.12
- 3) 岡本, 加藤: PC造建物の地震応答性状, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.4, pp.52~63, 1991
- 4) 保坂, 睦好ほか: プレストレストコンクリート高架橋におけるPC桁の地震応答性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 5) Zatar, Mutsuyoshi. et al: A Restoring Force Model for Partially Prestressed Concrete Piers, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.889~894, 1999
- 6) 鈴木, 森, 山口, 池田: プレストレストコンクリート橋脚の復元力モデル, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.673~678, 1999.10
- 7) 林, 岡本, 小谷, 加藤, 傳: 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, Vol.37, No.4, pp.57~67, 1995
- 8) 大塚, 矢葺ほか: 交番載荷実験によるPC箱桁の履歴特性, 地震工学研究発表会講演論文集, pp.697~700, 1999.7
- 9) 大塚, 矢葺ほか: 交番載荷実験によるPC箱桁の履歴復元力特性, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.1B, pp.354~355, 1999.9
- 10) 大塚, 岡田ほか: PC箱桁の交番載荷実験による復元力特性, プレストレストコンクリート, Vol.42, No.2, pp.90~97, 2000

【2000年5月2日受付】