

(11) 交番載荷実験によるPC箱桁の復元力特性の提案

九州大学大学院 ○ 浦川 洋介
 九州大学大学院教授 正会員 大塚 久哲
 八千代エンジニアリング(株) 正会員 岡田 稔規
 オリエンタル建設(株) 正会員 角本 周

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に入る可能性を考慮することが必要となった。また、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¹⁾、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²⁾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^{3)~5)}。これらのモデルでは主に除荷時の剛性の変化に着目し、RC部材に比べエネルギー吸収能は低いが、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。

本研究で対象とするPC桁では、断面形状やPC鋼材の配置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実験結果⁶⁾とPC部材に関する既往の研究成果を基に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。

表-1 検討ケース

供試体名	プレストレス (MPa)	PC鋼材の本数と位置	PC鋼材の配置	備考	λ (押/引)
L01	-	-	-	RC部材	0.0/0.0
L02	3.6	6本(全内ケーブル)	軸力配置	-	0.83/0.77
L03	3.6	〃	下縁配置	-	-
L04	3.6	〃	上縁配置	-	-
L05	6.0	10本(全内ケーブル)	軸力配置	-	0.89/0.84
L06	3.6	6本(4本外ケーブル)	下縁配置	-	-
L07	3.6	〃	上縁配置	-	-
L08	3.6	6本(全内ケーブル)	軸力配置	重ね継手	-
L10	2.4	4本(全内ケーブル)	軸力配置	-	0.77/0.69
L11	4.8	8本(全内ケーブル)	軸力配置	-	0.87/0.81
L12	3.6	6本(全外ケーブル)	下縁配置	-	-

2. 実験概要⁶⁾

2.1 検討ケースおよび実験方法

供試体は、1室箱桁断面形状とし、載荷装置の能力から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鋼材径等の材料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。

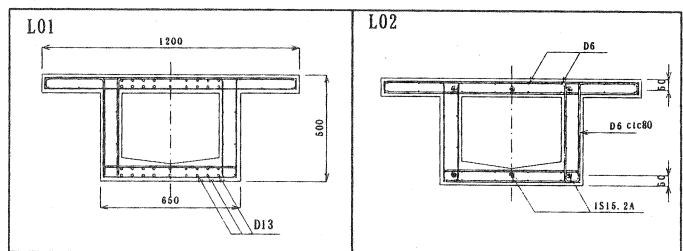


図-1 供試体断面図 (単位 mm)

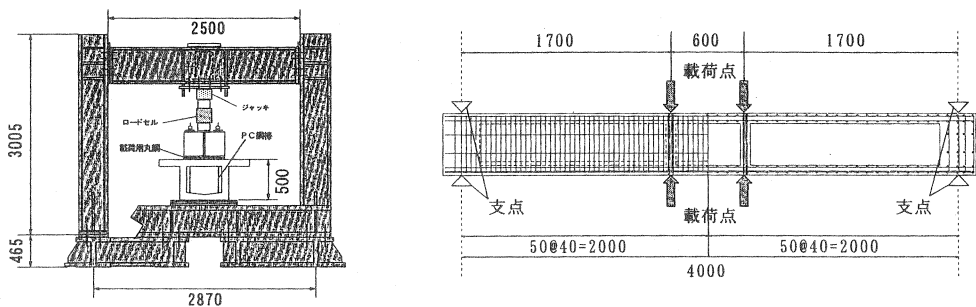


図-2 載荷装置および供試体設置状況 (単位 mm)

検討ケースは、プレストレス導入度、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6)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L01, L02供試体の断面図と鋼材配置を示す。

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、軸方向鉄筋初降伏時の変位 δ_{y0} までは荷重制御、その後は δ_{y0} の整数倍を片振幅とした両振り交番載荷($\pm 2\delta_{y0}$, $\pm 3\delta_{y0}$, $\pm 4\delta_{y0}$...)を、最大荷重以下に低下するまでを目標に行った。載荷スパン長は中央部600mmとし、桁中央点から左右300mmの位置に載荷用丸鋼(直径60mm)をフランジ上下面にセットし、PC鋼棒で締めた。本実験で用いた実験装置および供試体設置状況を図-2に示す。

2.2 曲げモーメント-曲率(M- ϕ)関係

実験で得られた各供試体のM- ϕ 履歴曲線を図-3に示す。曲げモーメントおよび曲率の符号は、上縁圧縮時を正、下縁圧縮時を負としている。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変位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ともない、最大耐力は増加し、また除荷時の勾配が低くなることにより、残留曲率は小さくなり原点指向性が強くなる傾向にあることが分かる。

3. PC箱桁履歴特性の提案

3.1 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 λ を定める。ここに、耐力分担率は終局時(ここでは最外縁コンクリートひずみが2000 μ となった時)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。表-1には、本論文で対象とした5つの供試体の λ 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 λ と塑

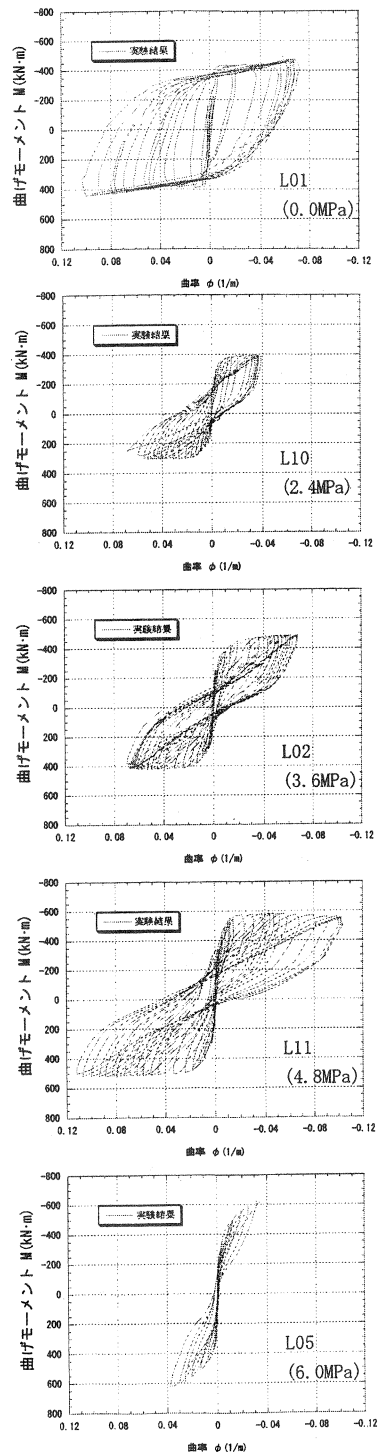


図-3 曲げモーメント-曲率関係(実験)

性率 μ (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 λ および除荷開始時の塑性率 μ 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 ϕ_r を通るものとする. また, 履歴ループのうち, 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で進むこととする. 提案する履歴ループの概念図を図-4 に示す.

3.2 除荷曲線

履歴ループ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ループを抽出し, それらを無次元化した除荷曲線 Y とし式(1)で近似できるものとした.

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

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-5 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-6 に関数 F_1, F_2 の概念図を示す.

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

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

減衰定数 h は式(4)により求められる.

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

ここで, $\Delta W = \int_0^1 F_1 dx - \int_0^1 F_2 dx$ より

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

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

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 \cdot C}{0.5^2} \\ \therefore C = -\frac{0.5 \cdot \pi \cdot h - \alpha_1}{2 \cdot \alpha_2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

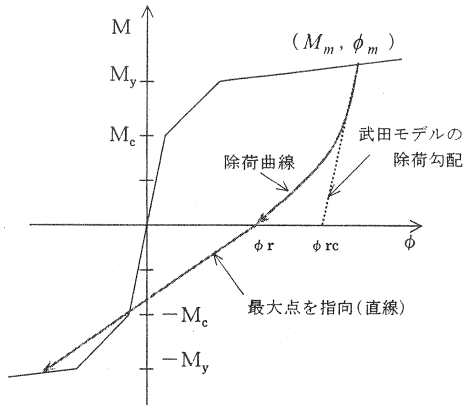


図-4 履歴ループの概念図

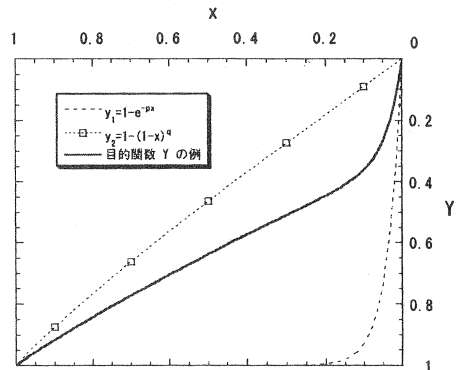


図-5 除荷曲線関数

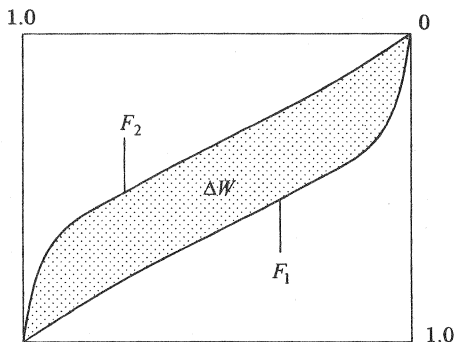


図-6 関数 F_1, F_2 の概念図

3.3 残留曲率

鈴木・池田らのPC橋脚に関する研究⁴⁾によれば、残留曲率 ϕ_r は武田モデルでの除荷剛性 K_r により決定される残留曲率 ϕ_{rc} と耐力分担率 λ を用いて、式(7)で求められることが示されている。

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

ここに、 $\phi_{rc} = \phi_m - \frac{M_m}{K_r}$, $K_r = \frac{M_y - (-M_c)}{\phi_y - (-\phi_c)} \cdot \mu^{-0.4}$

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

M_c , M_y , M_m および ϕ_c , ϕ_y , ϕ_m はそれぞれ、ひびわれ時、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 α を含む式(8)を新たに提案する。実験より得られた ϕ_r を表現するためには、 μ によってこの α の値が図-7の○印のように変化している。ここで α を式(9)のように μ の関数で表すこととした。図-7の実線は、この関数を描いたものである。

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

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

これらの式を用いて算出した残留曲率 ϕ_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-8に示す。

この図よりL11(4.8MPa)以外の供試体に関しては、 ϕ_r が精度良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供試体を含め概ね一致している。

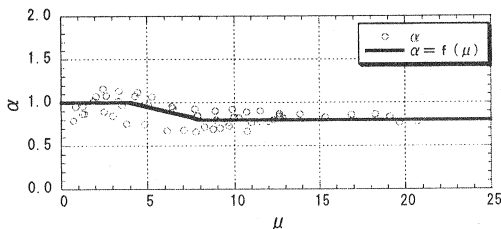


図-7 補正係数 α

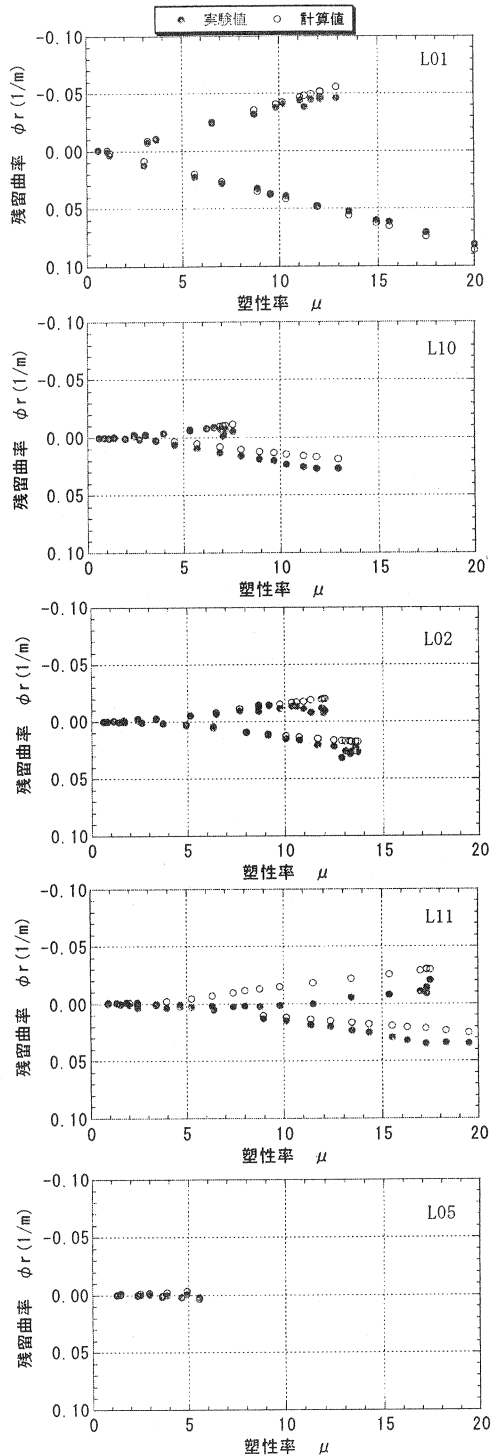


図-8 実験と提案式による残留曲率 ϕ_r の比較

3.4 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 μ と耐力分担率 λ の関数として式(10)で表現することとした。

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

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、対象としたの供試体に対し係数 A, B を求めると、図-9 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 λ を変数とする関数で表せると判断できる。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-10 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。

3.5 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 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。

これらの履歴法則にしたがい、L02 供試体 (3.6MPa) に対して提案モデルでの結果と実験での履歴ループとを同一の図に併記し、比較したものを図-11 に示す。また、図-12 は対象供試体について提案モデルを適用した場合の結果である。これより除荷曲線および残留曲率は実験結果と良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 供試体については良く表現できている。

4. 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

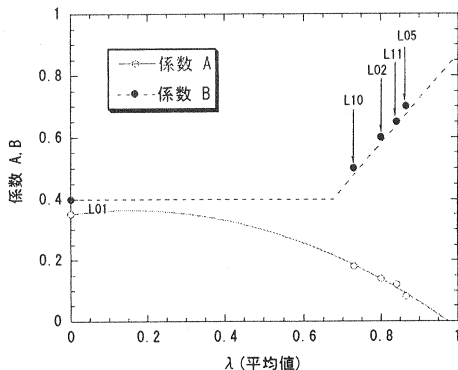


図-9 各供試体における A, B の値と提案関数

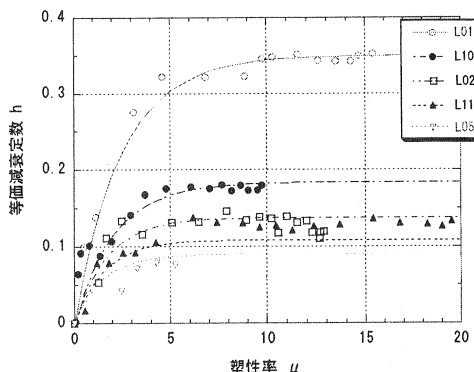


図-10 提案式と実験値による等価減衰定数の比較

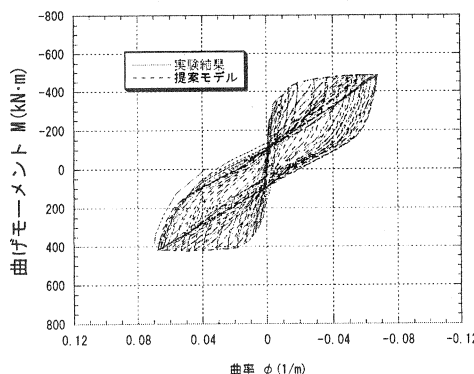


図-11 提案モデルと実験値による曲げモーメント-曲率関係の比較 (L02)

以下のようなである。

- ・鋼材の耐力分担率 λ と塑性率 μ により等価減衰定数 h および残留曲率 ϕ_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となるところまでとし、そこで残留曲率 ϕ_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、除荷時の勾配が変化するという点でRC部材の履歴復元力特性として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良く一致するが、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。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学大学院助手 矢葺亘氏および(株)構造計画研究所 石原真一氏には多大の御協力を賜った。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, Vol145A, pp. 967-974, 1999. 3
- 2)Takeda. T. et al: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ST12, ASCE, pp. 2557-2573, 1970, 12.
- 3)W. ZATAR, H. 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, Vol121, No. 3, pp. 889-894, 1999.
- 4)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.
- 5)林, 岡本, 小谷, 加藤, 傅: 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, 7.
- 6)大塚, 岡田他: 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, pp90-97, 2000. 4

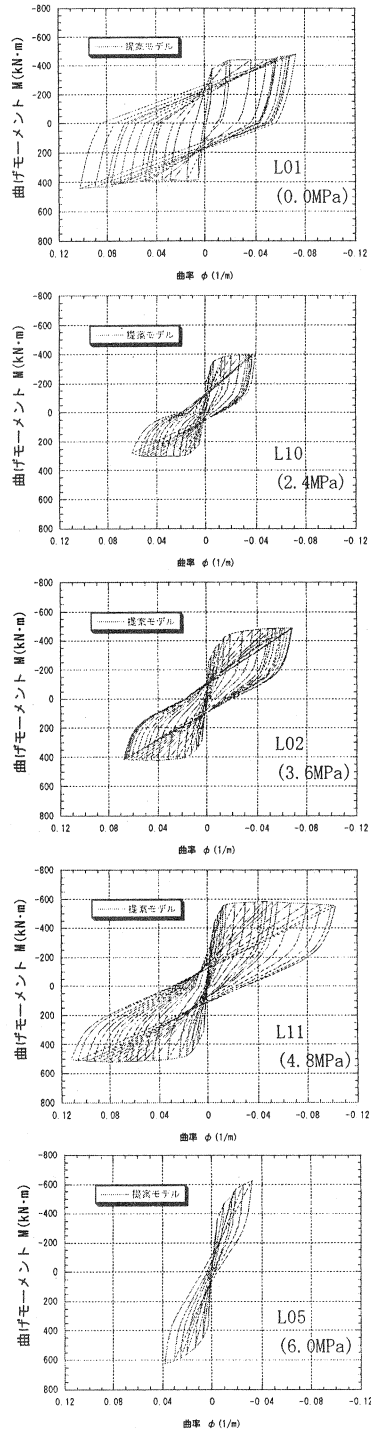


図-12 曲げモーメント-曲率関係 (提案モデル)