

PC鋼材が偏心配置される PC箱桁の復元力特性に関する研究

大塚 久哲*1・矢葺 亘*2・石原 眞一*3・浦川 洋介*4・角本 周*5

1. はじめに

設計地震力の増大に伴い、橋梁の非線形時刻歴応答解析において、上部構造の精度の良い履歴復元力モデルが不可欠となってきた。これは、上部構造の履歴特性が橋梁全体の非線形応答に与える影響が少なくないためである¹⁾。しかしながら、PC箱桁のように鋼材が偏心配置され、かつ桁断面が非対称な部材に対するPC部材の復元力モデルは提案されていない。

本研究では、PC連続ラーメン橋やPC斜張橋に多用されるPC箱桁の耐震性能および履歴復元力特性を把握するとともに、動的解析において必要とされる復元力モデルを提案することを目的としている。

まず、一般的なPC連続ラーメンの上部構造を想定した縮尺模型供試体をPC鋼材の偏心度とプレストレス導入量をパラメータとして製作し、その正負交番載荷実験を行って履歴曲線を得た。次いで、その実験結果に基づき、PC箱桁の復元力モデルを提案し、その妥当性の検証を行った。

2. 実験概要

本実験は、著者らがこれまで行ってきた一連の研究^{2), 3)}の一部である。以下に簡単に概要を示す。

2.1 供試体概要

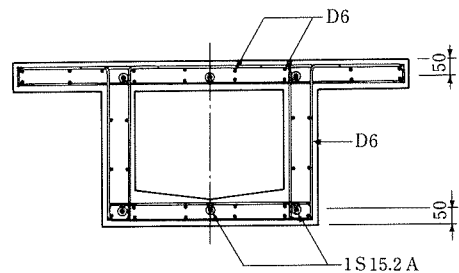
供試体は、①有効幅員9.0mの1室箱桁断面形、②80m~140m程度の中央径間を有するラーメン橋のインフレクションポイント付近の桁高を想定し、載荷装置の能力を考慮して1/8.5程度の外形寸法とした。ただし、使用するコンクリートの最大骨材径や鋼材径等の材料や製作上の制約から、かぶりやウェブ厚等の相似則は必ずしも一致していない。使用材料として、 $\sigma_{ck}=40\text{ N/mm}^2$ のコンクリートとSD295の鉄筋を用いた。PC鋼材は現在PC箱桁橋で一般に使用されているPC鋼より線とし、1S15.2Aを用いた。鉛直方向載荷実験においては、プレストレス導入量、PC鋼材の偏心度等をパラメータとし、エネルギー吸収能力、等価減衰定数、残留変位などに着目して結果を整理した。表-1に検討ケース、図-1に標準供試体の断面形状を示す。載荷方法は、単純曲げ載荷(2点載荷)の正負交番漸増載荷とした。

2.2 実験結果

図-2に橋軸方向載荷実験の曲げモーメント-曲率($M-\phi$)関係および「道路橋示方書V耐震設計編」(以下、道

表-1 検討ケース

供試体	構造	プレストレス (MPa)	PC鋼材の配置	備考
L02	PC	3.6	軸力配置	標準モデル
L03	PC	3.6	下縁配置	上下終局耐力比3:1
L04	PC	3.6	上縁配置	上下終局耐力比1:3
L23	PC	3.6	下縁中間配置	鋼材偏心をL02とL03の中間に設定



○ : 主鉄筋 SD295 (D13)
● : PC鋼材 SWPR7A15.2

図-1 供試体断面図 L02 (単位: mm)

示V)に規定された手法により算出した骨格曲線を示す。PC鋼材の偏心によって正負の耐力が増減し、除荷曲線も正曲げ側と負曲げ側で非対称な形状となる結果を得た。

$M-\phi$ 骨格曲線に関しては、道示Vに規定される手法でほぼ再現できることが確認できたが、コンクリートの終局圧縮ひずみを、道示Vの帯鉄筋を考慮可能な応力-ひずみ関係において最も危険側に考えた(帯鉄筋を考慮しない) $\epsilon_{cu}=2000\mu$ とした場合、ほとんどの供試体で実験値はこの終局を上回る結果となった。

3. PC箱桁復元力モデルの提案

3.1 提案モデルの特徴

本研究で想定したPCラーメン橋上部構造は、一般に偏心配置されたPC鋼材による骨格曲線の非対称性と、プレストレスによる原点指向性により、モーメント0付近でくびれを生じる特徴的な復元力特性を示す。そのためPC部材の復元力特性に影響を及ぼす要因として、プレストレス量、PC鋼材の偏心度および塑性率の3つを提案モデルのパラメータとして設定する。PC鋼材(プレストレス)の偏心度を表すパラメータとして正曲げ側と負曲げ側の終局耐力の比 γ を用いる。正曲げ側と負曲げ側の耐力の割合をそれぞれ、

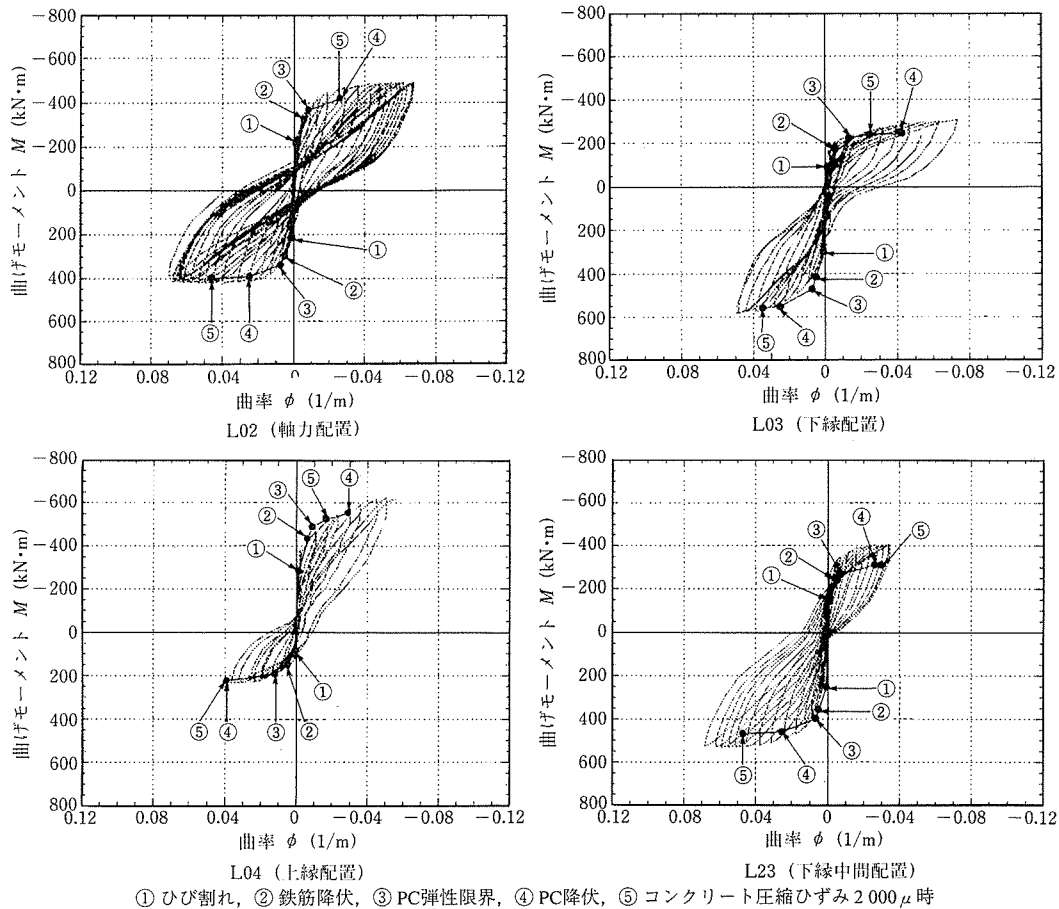
*1 Hisanori OHTSUKA:九州大学大学院 建設デザイン部門 教授

*2 Wataru YABUKI:九州大学大学院 建設デザイン部門 助手

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

*4 Yosuke URAKAWA: オリエンタル建設(株) 技術部

*5 Meguru TSUNOMOTO: オリエンタル建設(株) 技術部



① ひび割れ, ② 鉄筋降伏, ③ PC弾性限界, ④ PC降伏, ⑤ コンクリート圧縮ひずみ 2000 μ
 図-2 曲げモーメント-曲率関係

γ_1, γ_2 ($\gamma_1 + \gamma_2 = 1.0$) とする。対称断面では $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.5$, $\gamma = 1.0$ となり, PC 鋼材の偏心度が大きくなると γ は 1 より小さくなる (γ は γ_1 と γ_2 の小さい方を分子とする)。

表-2 に各供試体の偏心パラメーターを示す。L03, L04 はプレストレス量が L02 と同等 (3.6MPa) でそれぞれ下縁配置, 上縁配置であり, 終局耐力比 $\gamma = 0.4$ 程度である。このように PC 鋼材の偏心の程度も部材としての非対称性を表す指標であると考え終局耐力比を設定し, また γ_1, γ_2 で正曲げ側, 負曲げ側どちらに偏心しているのかが分かる。

さらに, 減衰定数 (h) をプレストレス量 (P_p) および終局耐力比 (γ) と塑性率 (μ) の関数として実験結果より決定した。また, 偏心供試体ループ特有のくびれを表現するために除荷曲線関数を新たに規定し, 偏心度によりループ形状が変化するものとした。

この除荷曲線は実験をもとに, ループ形状が安定してくる塑性率が 4~10 程度の除荷曲線を無次元化抽出したものに適合するように規定し, 終局耐力比および除荷開始時の塑性率 μ から得られた減衰定数 h で決定される。提案する復元力モデルの概念図を図-3 に示す。

3.2 除荷曲線

除荷曲線の関数近似については, 実験結果から除荷曲線を無次元化して抽出し, 形状が安定してくる塑性率 μ が 4~10 程度の形状を式(1)で近似できるものとした。

表-2 各供試体の偏心パラメーター

	最大耐力 (kNm) (骨格曲線: 終局)			γ_1	γ_2	γ
	押し	引き	合計			
L02 (3.6MPa)	399.96	-419.39	819.36	0.49	0.51	0.95
L03 (3.6MPa)	558.70	-240.10	798.80	0.70	0.30	0.43
L04 (3.6MPa)	223.65	-527.31	750.96	0.30	0.70	0.42
L23 (3.6MPa)	469.02	-310.13	779.15	0.60	0.40	0.66

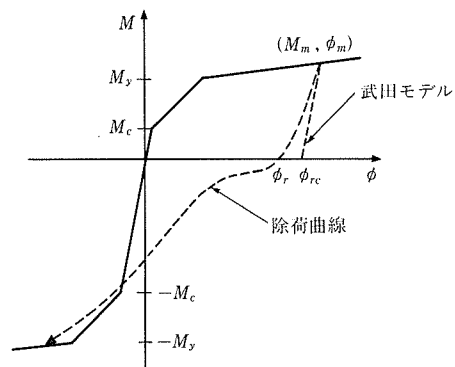


図-3 履歴ループの概念図

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

ここに,

$$y_1 = \sin(-1.5\pi \cdot x^p) \dots\dots\dots(1) - a$$

$$y_2 = 1 - e^{-qx} \dots\dots\dots(1) - b$$

である。

p, q は変数で、ここでは偏心量により変化するものとした。図-4に y_1 および y_2 の曲線形状と、関数の形状 Y の例を示す。

偏心配置供試体では正曲げ側と負曲げ側でループ形状が異なるため、除荷曲線も正曲げ側と負曲げ側それぞれで p, q を設定し、関数を求める必要がある。ここで除荷曲線関数が実験でのループ形状に適合するように定めた p, q と正曲げ側、負曲げ側の偏心量 γ_1, γ_2 の関係を図-5, 6に示す(p_1, p_2, q_1, q_2 の添え字1, 2はそれぞれ正曲げ側、負曲げ側を表す)。さらに、それぞれ p_1, p_2 , および q_1, q_2 の和と比に着目し、終局耐力比を横軸にプロットすると、図-7~10に示す関係が得られた。これにより p, q と偏心パラメーターの関係を規定することができる。この規定式を以下に示す。

p_1, p_2 の和を A , 比を $a (\leq 1.0)$, q_1, q_2 の和を B , 比を $b (\leq 1.0)$ とすると、 $\gamma_1 \leq \gamma_2$ のとき、 $\gamma = \gamma_1 / \gamma_2$, また、 $a = p_2 / p_1, b = q_1 / q_2$ より、

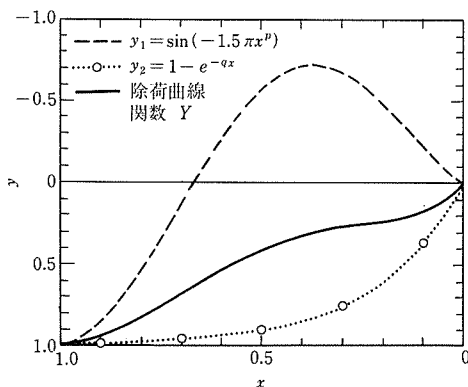


図-4 除荷曲線関数(偏心配置)

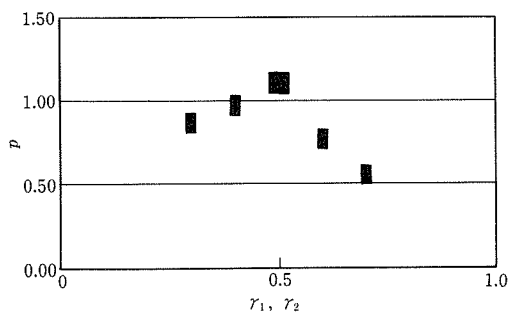


図-5 p_1, p_2 と γ_1, γ_2 の関係

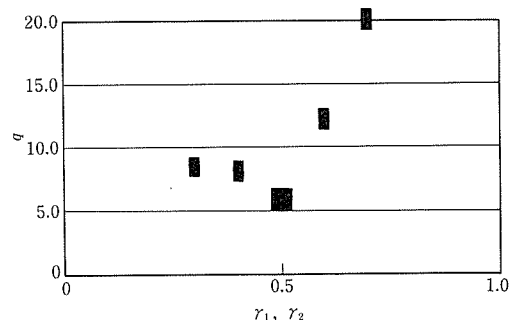


図-6 q_1, q_2 と γ_1, γ_2 の関係

$$\begin{aligned} p_1 &= A / (1+a) & p_2 &= A \cdot a / (1+a) \\ q_1 &= B \cdot b / (1+b) & q_2 &= B / (1+b) \end{aligned} \dots\dots(2)$$

となる。

$\gamma_1 \geq \gamma_2$ のとき、 $\gamma = \gamma_2 / \gamma_1$, また、 $a = p_1 / p_2, b = q_2 / q_1$ より、

$$\begin{aligned} p_1 &= A \cdot a / (1+a) & p_2 &= A / (1+a) \\ q_1 &= B / (1+b) & q_2 &= B \cdot b / (1+b) \end{aligned} \dots\dots(2)'$$

である。

ここで A, B および a, b は、図-7~10の関係から以下の式で表される。

$$\begin{aligned} A &= 1.5 \cdot \gamma + 0.75 & a &= 0.63 \cdot \gamma + 0.37 \\ B &= -29 \cdot \gamma + 40 & b &= \gamma \end{aligned} \dots\dots(3)$$

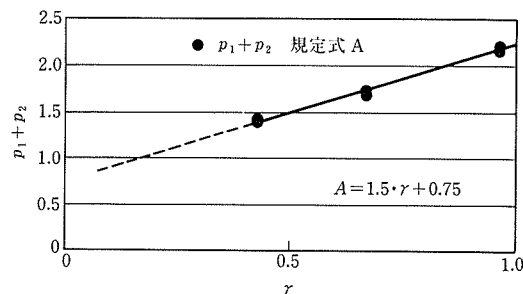


図-7 p_1, p_2 の和と γ の関係

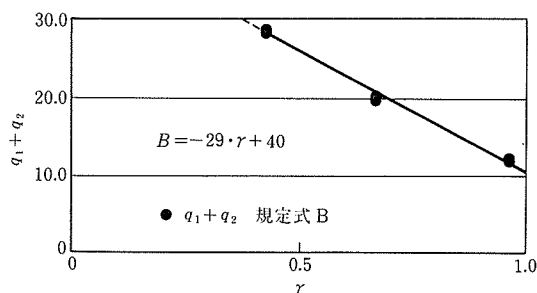


図-8 q_1, q_2 の和と γ の関係

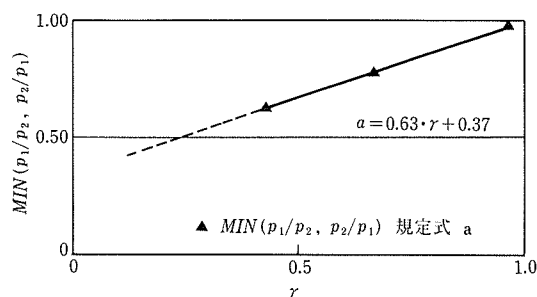


図-9 p_1, p_2 の比と γ の関係

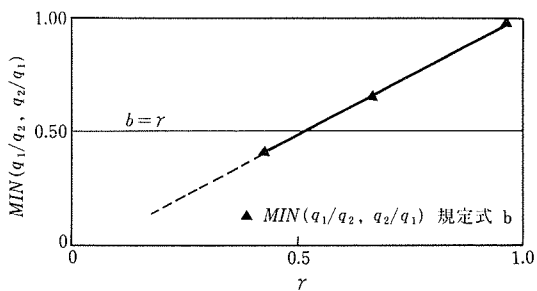


図-10 q_1, q_2 の比と γ の関係

以上により得られた各供試体の p_1, p_2, q_1, q_2 を表-3に示す。

表-3 各供試体の偏心パラメーターおよび p, q

		γ_1, γ_2	γ (比)	p	q
L02	押し	0.49	0.95	1.11	6.0
	引き	0.51		1.07	6.3
L03	押し	0.70	0.43	0.54	19.3
	引き	0.30		0.85	8.3
L04	押し	0.30	0.42	0.85	8.2
	引き	0.70		0.54	19.5
L23	押し	0.60	0.66	0.77	12.5
	引き	0.40		0.97	8.3

履歴ループを規定する分配係数 C と等価減衰定数 h の関係は以下の式から求まる。

式(1)における無次元化した除荷曲線を考え、式(4), (5)に示す関数 G_1, G_2 とした。図-11に関数 G_1, G_2 の概念図を示す。

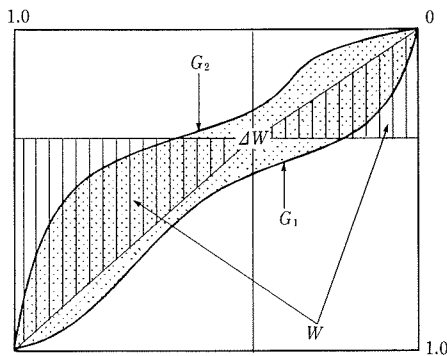


図-11 関数 G_1, G_2 の概念図

$$G_1 = Y_1(x) = C \cdot \sin(-1.5\pi \cdot x^{p_1}) + (1-C)(1 - e^{-q_1 x}) \dots\dots\dots(4)$$

$$G_2 = 1 - Y_2(1-x) = 1 - [C \cdot \sin\{-1.5\pi \cdot (1-x)^{p_2}\} + (1-C)|1 - e^{-q_2(1-x)}|] \dots\dots\dots(5)$$

G_1, G_2 によって囲まれる面積 ΔW を、等価剛性による弾性エネルギーを表す三角形の面積を W とする。式(6)~(8)から分配係数 C と減衰定数 h の関係式として式(9)が導かれる。

$$\Delta W = \int_0^1 G_1 dx - \int_0^1 G_2 dx \dots\dots\dots(6)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots(7)$$

$$W = \frac{1}{2} (\gamma_1^2 + \gamma_2^2) \dots\dots\dots(8)$$

より、

$$C = \frac{\beta_1 + \beta_2 + 1 - \pi \cdot h \cdot (\gamma_1^2 + \gamma_2^2)}{\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1 + \beta_2 + 2} \dots\dots\dots(9)$$

となる。ここで、

$$\alpha_1 = \frac{1}{p_1 (1.5\pi)^{1/p_1}} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ (-1)^m \frac{(1.5\pi)^{1/p_1 + 2m + 1}}{(2m+1)! (1/p_1 + 2m + 1)} \right\}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{p_2 (1.5\pi)^{1/p_2}} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ (-1)^m \frac{(1.5\pi)^{1/p_2 + 2m + 1}}{(2m+1)! (1/p_2 + 2m + 1)} \right\}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{q_1} (e^{-q_1} - 1) \quad \beta_2 = \frac{1}{q_2} (e^{-q_2} - 1)$$

と表される。

3.3 等価減衰定数

本提案モデルでは、除荷曲線で囲まれる面積を ΔW とし等価減衰定数を求めた。得られた各供試体の減衰定数を図-12, 13に示す。この図から、プレストレス量が大きくなるにつれて減衰定数は小さくなることが確認できる。また、プレストレス量の違いによる減衰定数の変化に比べるとその差は小さいものの、同プレストレス量におけるPC鋼材の配置の違いによっても偏心度の大きいL03, L04で減衰定数は若干小さい値を示した。これはループ形状のくびれにより囲まれる面積 ΔW が小さくなったためと考えられる。

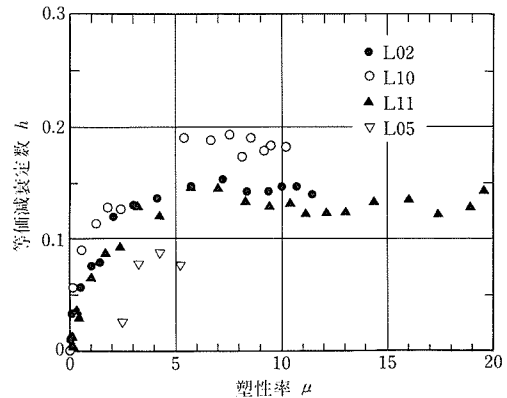


図-12 プレストレス量の違いによる減衰定数の比較

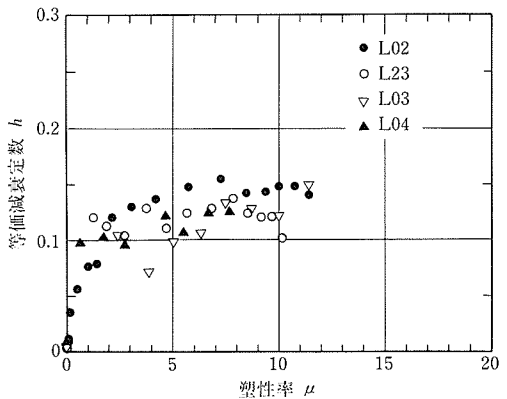


図-13 鋼材偏心度の違いによる減衰定数の比較

これまでの検討に加え本研究ではさらに、実験結果より1ループの減衰定数 h をプレストレス量 P_p と終局耐力比 γ 、塑性率 μ (応答塑性率 $\phi /$ 降伏曲率塑性率 ϕ_y) をパラメーターとした以下の式で提案した。

$$\mu = \frac{\phi}{\phi_y} \dots\dots\dots(10)$$

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

$$g(\gamma) = 0.577 \cdot \gamma + 0.452$$

$$B = -0.0417 \cdot P_p + 0.80$$

図-14は、各供試体の係数A, Bの値と提案式を、図-15, 16は、式(1)で規定した減衰定数式と実験値との比較をプレストレス量および鋼材の偏心によって比較したものである。これらの図から、式(1)が実験による減衰定数を適切に表していると言える。

3.4 実験値と提案モデルの比較

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係数Cの関係から除荷曲線を決定し、除荷開始点から過去の経験最大点を指向するように履歴曲線を設定した。

(1) 形状

これらの履歴法則に従い、図-17は、各供試体について提案モデルと実験での履歴ループとを同一の図に併記し、比較したものである。これよりL03(負曲げ側)とL23(正曲げ側)からの除荷曲線は実験値と提案モデルで形状に違いがあるものの、その他の偏心配置供試体に関してはおおむね表現できており、残留曲率もよく一致している。

また、軸力配置供試体²⁾に対して、提案モデルと実験の履歴ループとを比較したものを図-18に示す。軸力配置供試体に対して、L05以外ではおおむね表現できている。プレストレス量の大きいL05(6.0 MPa)では今回の提案モデルに対して、実験値の除荷曲線の方が原点指向性が強い

形状となったが、これはL05供試体が他の供試体に比べ塑性率の小さい範囲で測定不能となっており、本提案モデルがターゲットとした塑性率の範囲ではなかったためと考えられる。

(2) 残留曲率

各供試体における本提案モデルによる履歴曲線での残留曲率と実験での残留曲率の比較を図-19, 20に示す。どのPC供試体に関しても提案モデルの減衰定数と実験での減衰定数がよく一致している。既存の復元力モデルを含め、従来は片側の塑性率(損傷度)によってのみ残留曲率は決定されるが、本提案モデルでは除荷曲線の領域を除荷開始点から過去の最大経験点までとしたため、反対側の塑性率の進展具合(損傷度)の情報も考慮できるようになったためと考えられる。

(3) 等価減衰定数

本提案モデルより描かれた履歴曲線と実験で得られた履歴曲線による等価減衰定数の比較を図-21, 22に示す。どのPC供試体に関しても提案モデルの減衰定数と実験での減衰定数がよく一致している。

4. まとめ

- ① プレストレスの偏心度を表すパラメーターとして正曲げ側と負曲げ側の終局耐力の比 γ を用い、この γ とプレストレス量 P_p 、塑性率 μ により等価減衰定数 h を規定した。

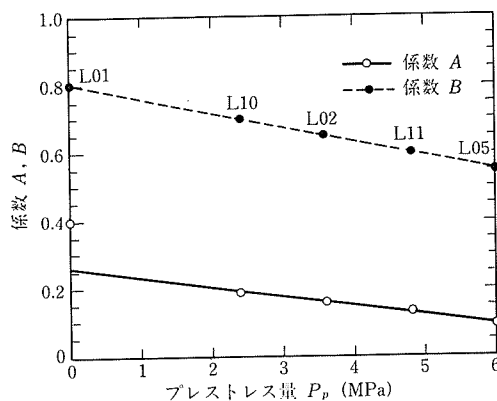


図-14 係数A, Bの値と提案式

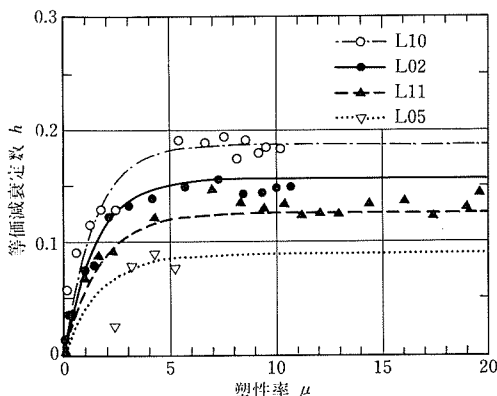
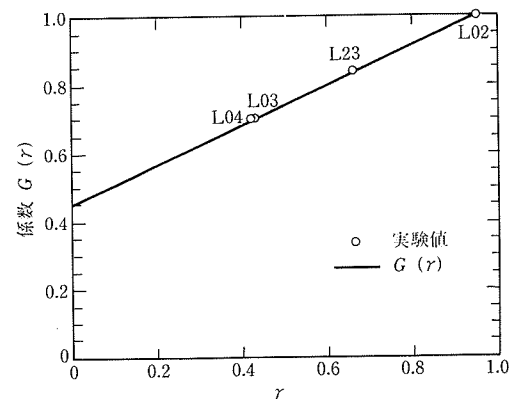


図-15 等価減衰定数の比較(プレストレス量の違い)

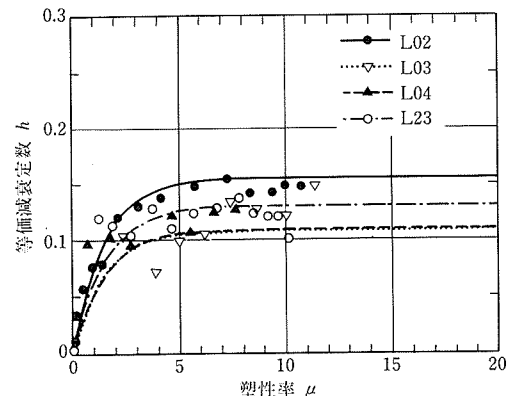


図-16 等価減衰定数の比較(鋼材偏心度の違い)

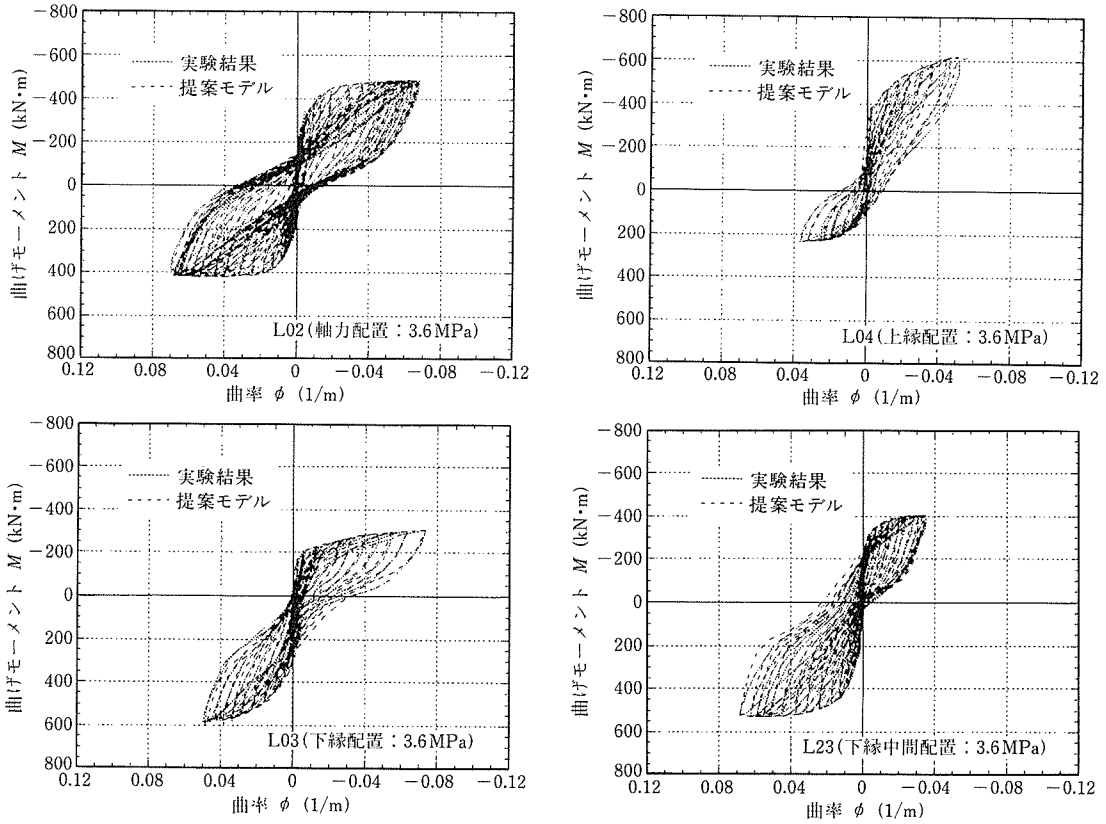


図-17 提案モデルと実験値による曲げモーメント-曲率関係の比較
(偏心配置供試体)

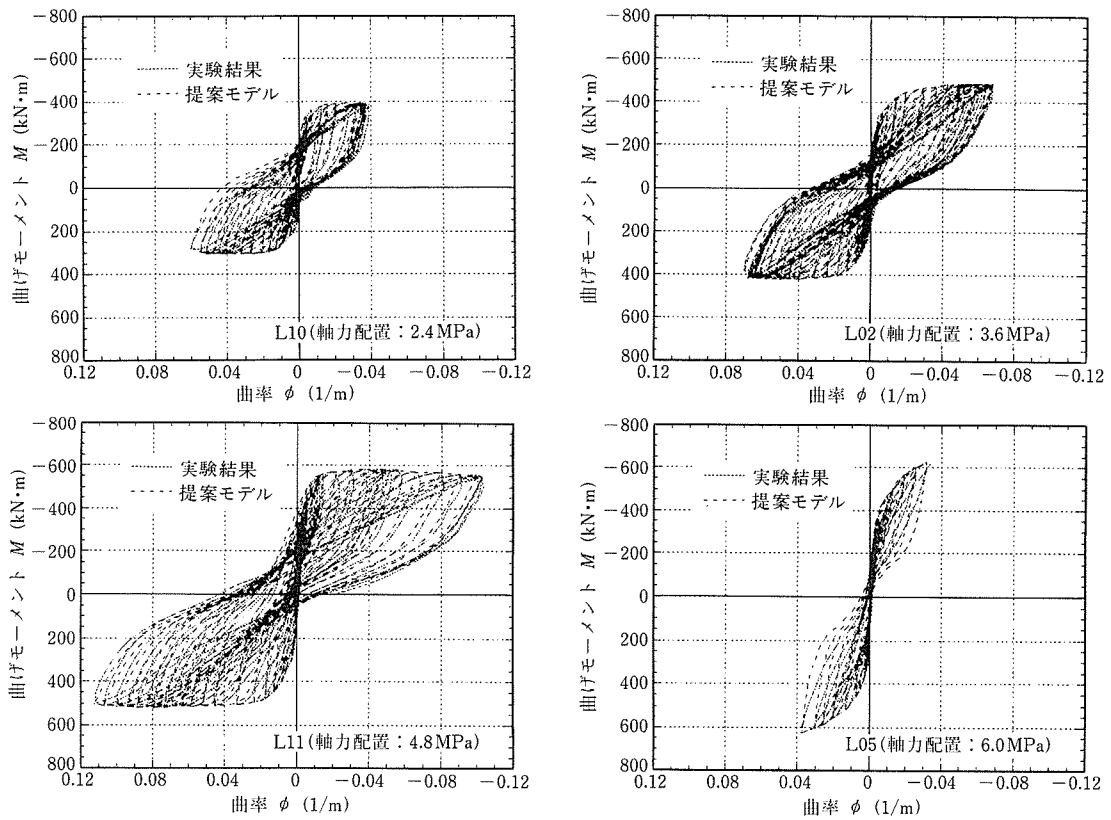


図-18 提案モデルと実験値による曲げモーメント-曲率関係の比較
(軸力配置供試体)

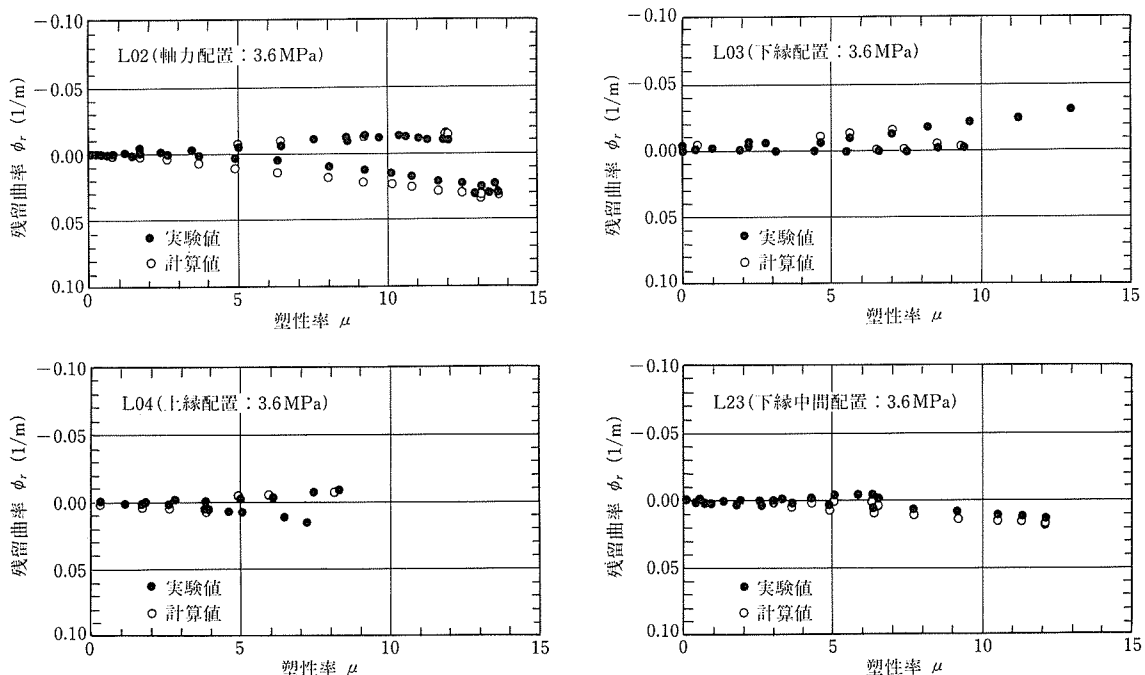


図-19 提案モデルと実験値による残留曲率の比較
(偏心配置供試体)

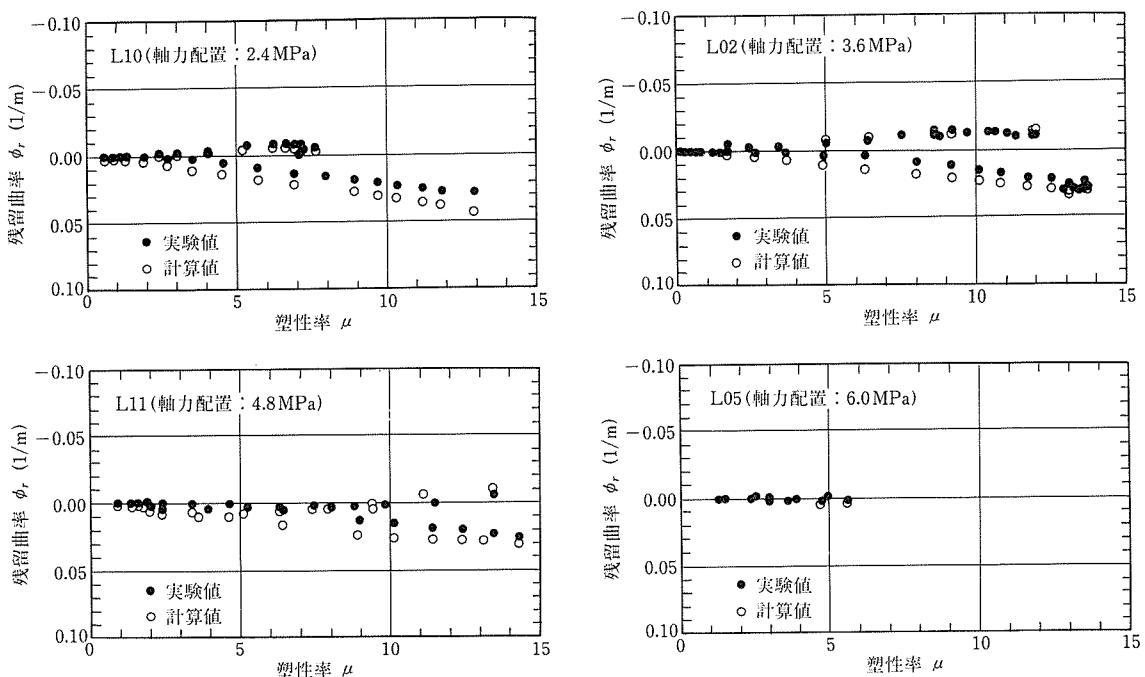


図-20 提案モデルと実験値による残留曲率の比較
(軸力配置供試体)

- ② 除荷曲線関数は終局耐力比 γ により形状が変化し、PC鋼材偏心配置供試体のループで生じる特有のくびれを表現できるように規定した。
- ③ 除荷曲線の適用範囲は除荷開始点から過去の最大実験最大点までとした。

- ④ 提案モデルと各供試体の実験結果との比較により、ループ形状は供試体によっては提案モデルと実験値で異なるものもあるが、偏心配置供試体、軸力配置供試体の両者に対しておおむね表現可能であることが確認された。

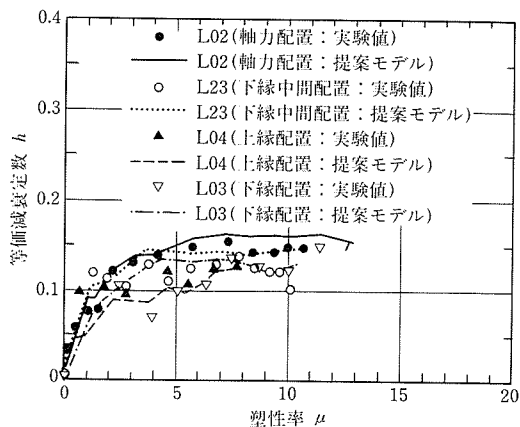


図-21 提案モデルと実験値による等価減衰定数の比較 (偏心配置供試体)

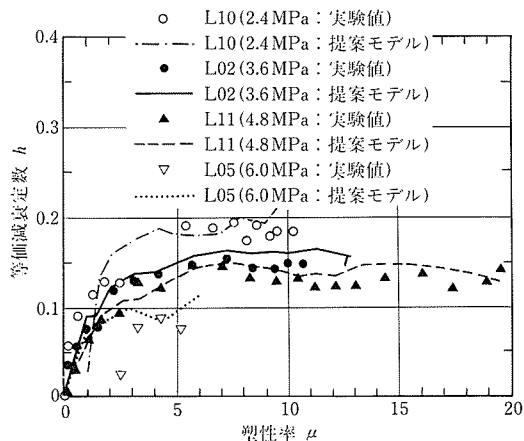


図-22 提案モデルと実験値による等価減衰定数の比較 (軸力配置供試体)

- ⑤ 動的解析や耐震性能の面で重要となる等価減衰定数および残留曲率についても、精度よく一致しており、本提案モデルの妥当性が確認できた。

なお、本研究はオリエンタル建設(株)、(株)富士ピーエス、(株)八千代エンジニアリング、(株)構造計画研究所、および九州大学との共同研究により行ったものである。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) 大塚・岡田・角本・堤：PC箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.2，pp.90～97，2000
- 3) 大塚・岡田・石原・角本・堤：交番載荷実験に基づくPC箱桁の復元力特性の提案，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.5，pp.18～24，2000

【2001年9月4日受付】