

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

矢葺 亘¹・大塚久哲²・浦川洋介³・石原眞一⁴・堤 忠彦⁵・角本 周⁶

¹正会員 修(工) 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 オリエンタル建設(株) 技術部 (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-2)

⁴正会員 (株)構造計画研究所CAD技術部 (〒869-1235 熊本県菊池郡大津町室1315)

⁵正会員 (株)富士ビー・エス 技術本部設計部 (〒105-0004 東京都港区新橋4-24-8 第二東洋海事ビル)

⁶正会員 オリエンタル建設(株) 福岡支店工務部 (〒810-0001 福岡市中央区天神4-2-31 第2サンビル)

橋梁の性能規定型設計に向け、上部構造非線形性を考慮した照査・設計を確立するための適切なPC部材の履歴モデルの整備が急務となっている。しかしながら既存のモデルは、塑性率が大きい領域での挙動を精度良く表現できておらず、さらに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履歴モデルは提案されていない。

本研究では、PC箱桁の履歴復元力特性を把握するために、正負交番載荷実験を行い、耐震性の検討に必要となる動的解析に有効なPC箱桁履歴モデルを提案、検証した。

Key Words: *PC box girder with eccentric strand, Cyclic loading test, Hysteresis loop*

1. はじめに

限界状態設計法や性能照査型の設計への展開を念頭に置いて、上部構造非線形性を考慮した照査・設計を確立するための適切なPC部材の履歴モデルの整備が急務となっている。

上部構造の非線形履歴復元力モデルの選定が、部材の最大応答や残留変位に与える影響は大きく、上部構造の非線形性を精度よく表現することは非常に重要である。しかしながら、既存のPC部材の復元力モデルには、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の挙動を的確に表現できるモデルは存在しない。

本研究では、PC連続ラーメン橋に代表されるPC箱桁上部構造の耐震性能および履歴復元力特性を把握するとともに、耐震性の検討に必要な動的解析に有効なPC箱桁の復元力モデルを提案することを目的とした。まず、一般的な実橋梁PC上部構造を想定した縮尺模型供試体を製作し、正負交番載荷実験を行った。さらに、その実験結果に基づき、PC箱桁の復元力モデルを提案、検証を行った。

の1/8.5の外形寸法で設計した。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SWPR7A1S15.2を用いた。橋軸方向載荷実験においては、プレストレス導入量、PC鋼材の偏心量等をパラメーターとし、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検討した。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) 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、除荷曲線も押し引き非対称な形状となることが確認できる。 $M-\phi$ 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 $\varepsilon_{cu} = 2000\mu$ とした場合、ほとんどの供試体で実験値がこの終局を上回る結果となった。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

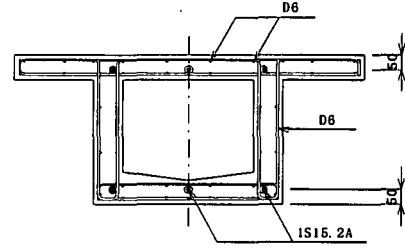
供試体は1室箱桁断面形状とし、一般的な実橋梁

3. PC 箱桁復元力モデルの提案

(1) 提案モデルの特徴

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
L01	RC	-	-	L02と終局耐力を同等に設定
L02	PC	3.6	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	軸力配置	プレストレス量をL02の5/3倍
L06	"	3.6	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	"	"	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	"	プレストレス量をL02の2/3倍
L11	"	4.8	"	プレストレス量をL02の4/3倍
L12	"	3.6	下縁配置	L03と鋼材偏心を同等に設定
L23	"	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 SWPR7A (15.2)

図-1 供試体断面図L02 (単位mm)

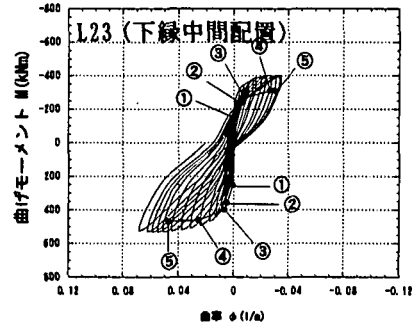
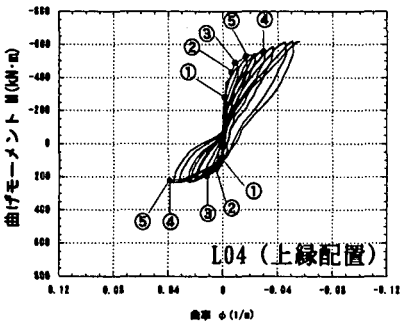
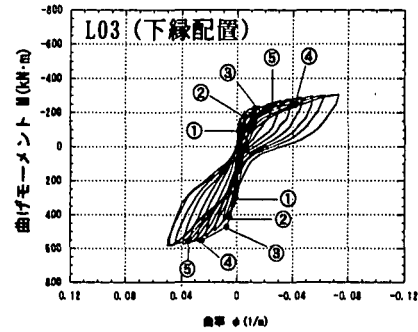
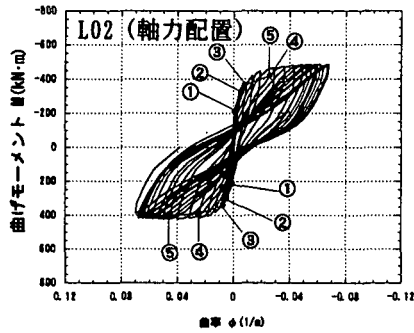


図-2 曲げモーメント-曲率関係 ①ひびわれ ②鉄筋降伏 ③PC弾性限界 ④PC降伏 ⑤コンクリートの圧壊

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に着目し、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押し引きの終局耐力比 γ を用いる。終局耐力比は終局時の押し引きの耐力の比を示し、押し引きそれぞれの耐力の割合を γ_1, γ_2 、その比を γ とする。ここで、 $\gamma_1 + \gamma_2 = 1.0$ 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 は小さくなる。

表-2に各供試体の偏心パラメータを示す。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、終局耐力比 γ はPC鋼材(プレストレス)がどの程度偏心しているかを示し、 γ_1, γ_2 で押し側、引き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(Pp)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

表-2 各供試体の偏心パラメータ

	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

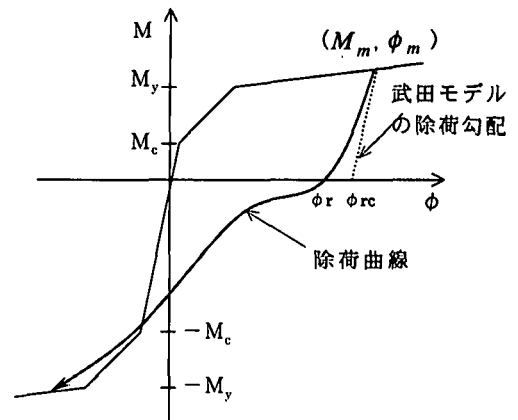


図-3 履歴ループの概念図

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、偏心率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 γ 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。新たに提案する復元力モデルの概念図を図-3に示す。

(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。

$$Y' = C \cdot y_1' + (1 - C) \cdot y_2' \tag{1}$$

ここに

$$y_1' = \sin(-1.5\pi \cdot x^{p'}) \tag{1a}$$

$$y_2' = 1 - e^{-q'x} \tag{1b}$$

p', q' は変数で、ここでは押し引きの偏心率により変化するものとした。図-5に y_1' および y_2' の曲線形状と、関数 Y' の形状の例を示す。

偏心配置供試体では押し引きでループ形状が異なるため、除荷曲線も押し引きそれぞれで p', q' を

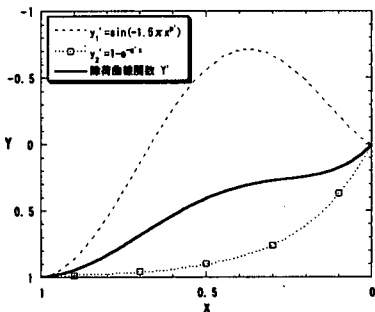


図-5 除荷曲線関数 (偏心配置)

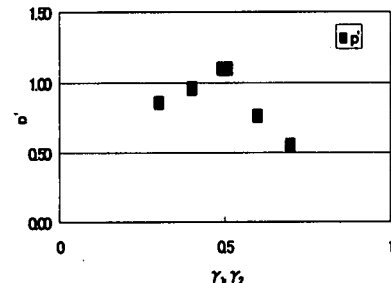


図-6 p_1', p_2' と γ_1, γ_2 の関係

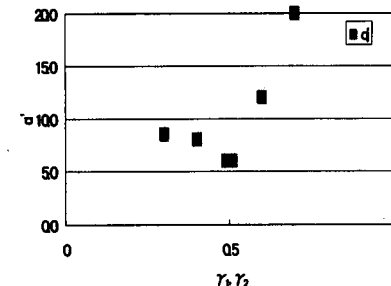


図-7 q_1', q_2' と γ_1, γ_2 の関係

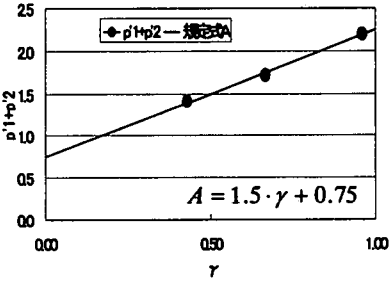


図-8 p_1', p_2' の和と γ の関係

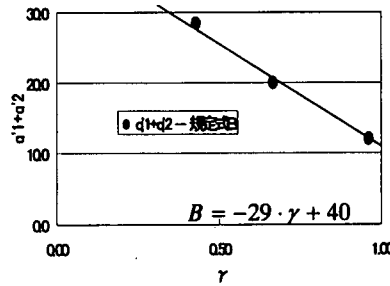


図-9 q_1', q_2' の和と γ の関係

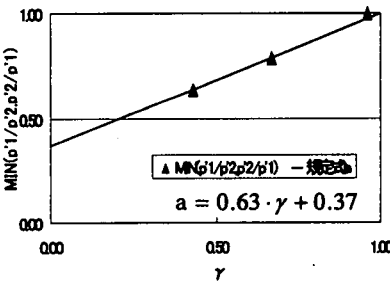


図-10 p_1', p_2' の比と γ の関係

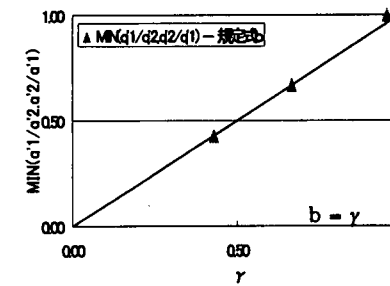


図-11 q_1', q_2' の比と γ の関係

設定し、関数を求める必要がある。ここで p', q' と偏心パラメータ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma$)の関係式を規定するために、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' と押し引きの偏心率 γ_1, γ_2 の関係を図-6および図-7に示す(p_1', p_2', q_1', q_2' の添え字1, 2はそれぞれ押し、引きを表す)。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-8、図-9および図-10、図-11に示す関係が得られた。

これにより、 p', q' と偏心パラメータの関係式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 (≤ 1.0)、 q_1', q_2' の和を B 、比を b (≤ 1.0)とすると、

$$\gamma_1 \leq \gamma_2 \text{ のとき, } \gamma = \gamma_1 / \gamma_2$$

$$a = p_2' / p_1', \quad b = q_1' / q_2' \text{ より}$$

$$p_1' = A / (1 + a), \quad p_2' = A \cdot a / (1 + a) \tag{2}$$

$$q_1' = B \cdot b / (1 + b), \quad q_2' = B / (1 + b)$$

以上によって得られた各供試体の p_1', p_2', q_1', q_2' を表-3に示す。

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(3)、(4)に示す関数 G_1, G_2 とした。

表-3 各供試体の偏心パラメータおよび p', q'

		γ_1, γ_2	γ (比)	p'	q'
L02	押し	0.48	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

$$G_1 = Y'_1(x) \quad (3)$$

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

$$G_2 = 1 - Y'_2(1-x) \quad (4)$$

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

G_1 , G_2 によって囲まれる面積を ΔW , 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(5), 式(6), 式(7)から分配係数 C と減衰定数の関係式として式(8)が導かれる.

$$\Delta W = \int_0^1 G_1 dx - \int_0^1 G_2 dx \quad (5)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{2}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2) \quad (7)$$

より

$$C = \frac{\beta_1 + \beta_2 + 1 - \pi \cdot h \cdot (\gamma_1^2 + \gamma_2^2)}{\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1 + \beta_2 + 2} \quad (8)$$

ここで

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

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

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

(3) 等価減衰定数

これまでの検討に加え本研究ではさらに, 実験

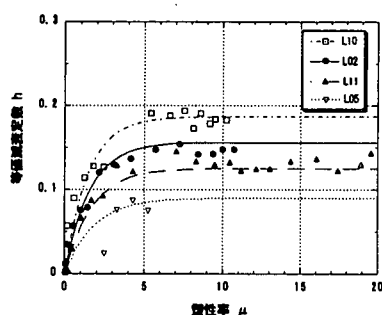


図-12 等価減衰定数の比較
プレストレス量の違い

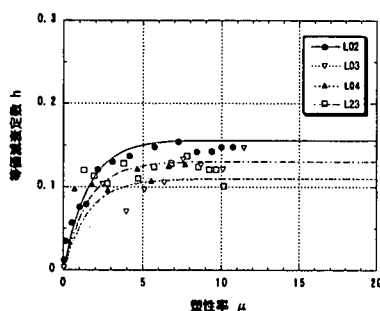


図-13 等価減衰定数の比較
鋼材偏心度の違い

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 をパラメータとした以下の式で提案した.

$$h = A \cdot (1 - e^{-B \cdot \mu}) \quad (9)$$

ここで,

$$A = (-0.0275 \cdot P_p + 0.256) \cdot g(\gamma),$$

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

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

図-12 および図-13 は式(9)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(9)が実験による減衰定数を適切に表していると言える.

(4) 実験値と提案モデルの比較

以上の履歴側に基づき得られた提案モデルと実験結果の比較を図-14に示す. 偏心供試体に対して除荷時の曲線を概ね表現しており, 残留曲率もよく一致している.

4. まとめ

- ・プレストレスの導入量, 鋼材の偏心度および塑性率 μ により等価減衰定数 h 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等の形状を決め, 除荷曲線を関数として表現した.
- ・偏心配置供試体では, 除荷時の曲線にくびれが生じ, 押し引きで非対称なループ形状を示した. このように偏心度により異なるループ形状を表現できるような除荷曲線関数を提案した.

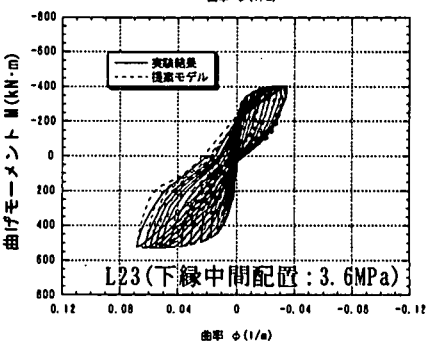
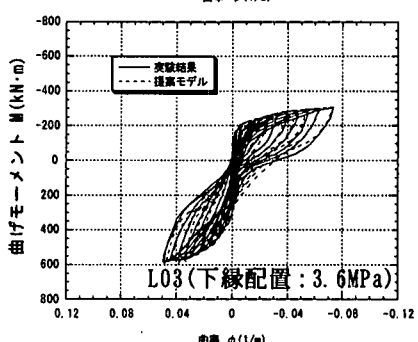
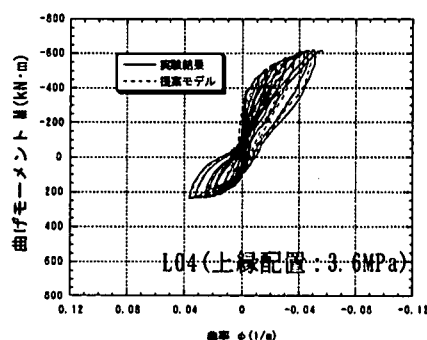
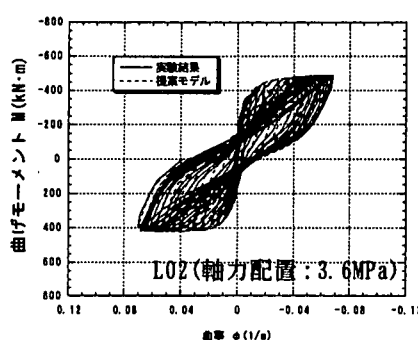


図-14 提案モデルと実験値による曲げモーメント-曲率関係の比較