

## 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

九州大学大学院工学研究院 正会員 ○大塚 久 哲  
 同上 矢 葺 亘  
 オリエンタル建設(株) 浦川 洋 介  
 (株) 構造計画研究所 石原 眞 一

### 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ている。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。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に製作して、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

#### (1) 供試体概要

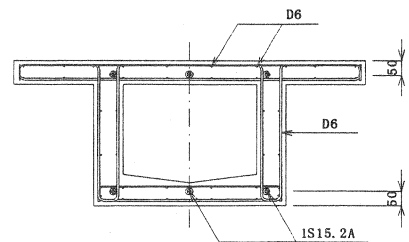
供試体は1室箱桁断面形状とし、一般的な実橋梁の1/8.5縮尺の外形寸法で設計した。使用材料として、 $\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$ のコンクリートとSD295の鉄筋を用いた。PC鋼材は現在PC箱桁橋で一般に使用されているPC鋼より線SWPR7A1S15.2を用いた。鉛直方向載荷実験においては、プレストレス導入量、PC鋼材の偏心度等をパラメータとし、エネルギー吸収能力、等価減衰定数、残留変位などに着目して結果を整理した。表-1に検討ケース、図-1に標準供試体の断面形状を示す。載荷方法は、単純曲げ載荷(2点載荷)の正負交番漸増載荷とした。

#### (2) 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

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 SWPR7A15.2)

図-1 供試体断面図L02 (単位:mm)

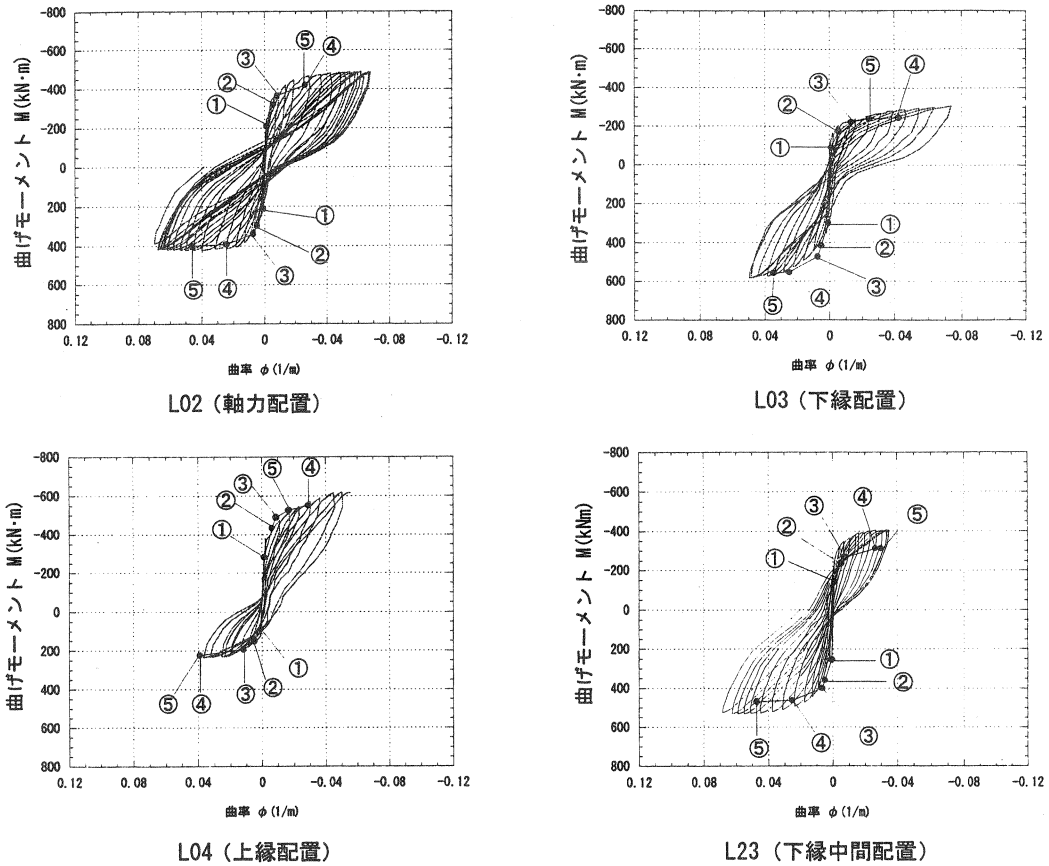


図-2 曲げモーメント-曲率関係 ①ひびわれ ②鉄筋降伏 ③PC弾性限界 ④PC降伏 ⑤コンクリートの圧壊

曲線も押し側と引き側で非対称な形状となる結果を得た。

M-φ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  $\epsilon_{cu}=2000 \mu$  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

#### (1) 提案モデルの特徴

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押し側と引き側の終局耐力の比 $\gamma$ を用いる。押し側と引き側の耐力の割合をそれぞれ、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  ( $\gamma_1 + \gamma_2 = 1.0$ ) 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 $\gamma$ は1より小さくなる ( $\gamma$ は $\gamma_1$ と $\gamma_2$ 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、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 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( $\gamma$ )と塑性率( $\mu$ )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。

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)			$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma$
	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

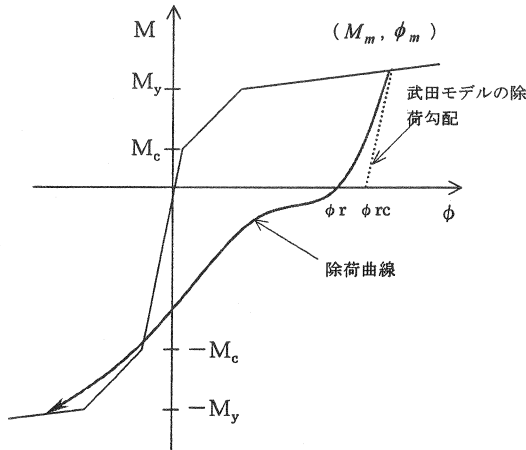


図-3 履歴ループの概念図

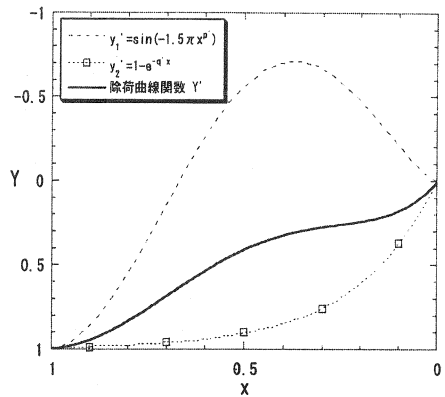


図-4 除荷曲線関数(偏心配置)

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 $\gamma$ 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 $\mu$ 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、  $y_1' = \sin(-1.5\pi \cdot x^p)$  ,  $y_2' = 1 - e^{-q \cdot x}$  (1a), (1b)

$p, q$ は変数で、ここでは押し引きの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 $Y'$ の形状の例を示す。

偏心配置供試体では押し側と引き側でループ形状が異なるため、除荷曲線も押し側と引き側それぞれで $p, q$ 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 $p, q$ と押し側引き側の偏心量 $\gamma_1, \gamma_2$ の関係を図-5および図-6に示す( $p_1, p_2, q_1, q_2$ の添え字1, 2はそれぞれ押し側, 引き側を表す)。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, 図-8および図-9, 図-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。

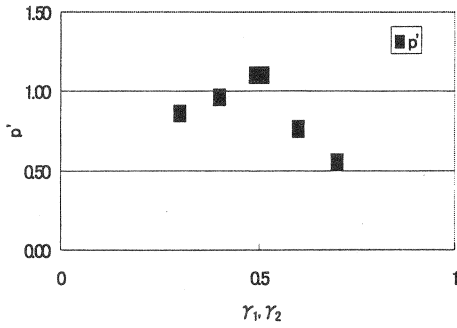


図-5  $p'_1, p'_2$  と  $\gamma_1, \gamma_2$  の関係

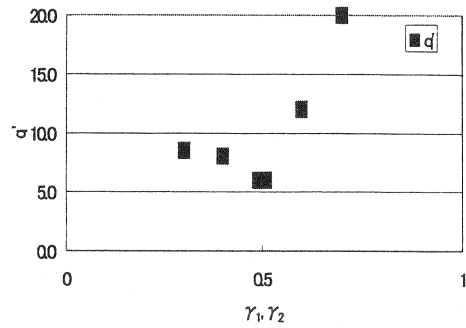


図-6  $q'_1, q'_2$  と  $\gamma_1, \gamma_2$  の関係

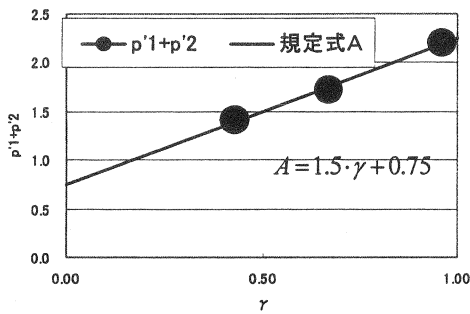


図-7  $p'_1, p'_2$  の和と  $\gamma$  の関係

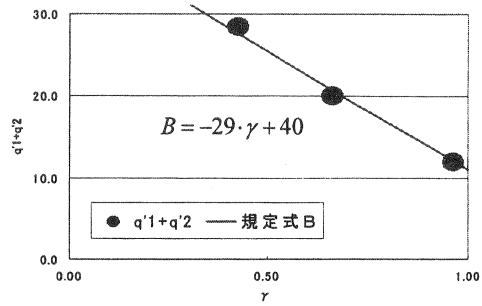


図-8  $q'_1, q'_2$  の和と  $\gamma$  の関係

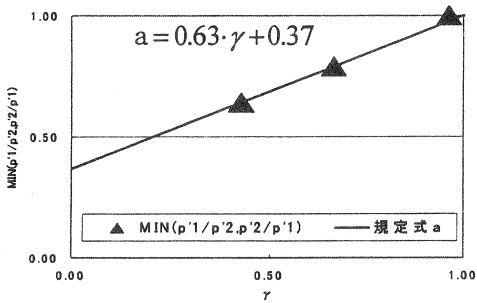


図-9  $p'_1, p'_2$  の比と  $\gamma$  の関係

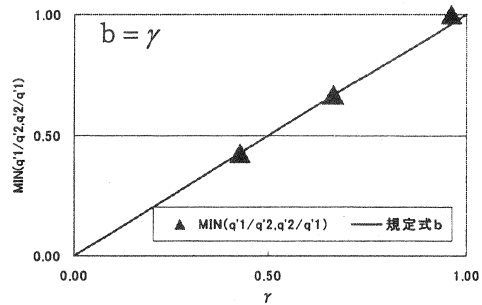


図-10  $q'_1, q'_2$  の比と  $\gamma$  の関係

$p'_1, p'_2$  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

$$p'_1 = A / (1 + a), \quad p'_2 = A \cdot a / (1 + a)$$

$$q'_1 = B \cdot b / (1 + b), \quad q'_2 = B / (1 + b)$$

(2)

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める。  
 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。

$$G_1 = Y'_1(x) = C \cdot \sin(-1.5\pi \cdot x^{p'_1}) + (1 - C)(1 - e^{-q'_1 x})$$

(3)

$$G_2 = 1 - Y'_2(1 - x) = 1 - [C \cdot \sin\{-1.5\pi \cdot (1 - x)^{p'_2}\} + (1 - C)\{1 - e^{-q'_2(1-x)}\}]$$

(4)

表-3 各供試体の偏心パラメータおよび  $p'$ ,  $q'$

		$\gamma_1, \gamma_2$	$\gamma$ (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

$G_1, G_2$  によって囲まれる面積を  $\Delta W$ , 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.

$$\Delta W = \int_0^L G_1 dx - \int_0^L G_2 dx \quad h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}, \quad W = \frac{1}{2}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2) \quad (5), (6), (7)$$

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

$$\alpha_1 = \frac{1}{p_1 (1.5\pi)^{1/p_1}} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ (-1)^m \frac{(1.5\pi)^{1/p_1 + 2m+1}}{(2m+1)! (1/p_1 + 2m+1)} \right\}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{p_2 (1.5\pi)^{1/p_2}} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ (-1)^m \frac{(1.5\pi)^{1/p_2 + 2m+1}}{(2m+1)! (1/p_2 + 2m+1)} \right\}$$

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

### (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  $\gamma$ , 塑性率  $\mu$  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,

$$A = (-0.0275 \cdot P_p + 0.256) \cdot g(\gamma), \quad g(\gamma) = 0.577 \cdot \gamma + 0.452$$

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

図-11 および図-12 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-13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

本研究では, 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に対する履歴モデルを検討した. 鋼材偏心配置の模型供試体では, 除荷時の曲線にくびれが生じ, 押し側と引き側で非対称なループ形状

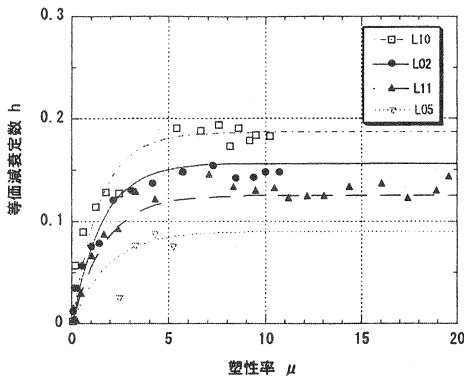


図-11 等価減衰定数の比較 (プレストレス量の違い)

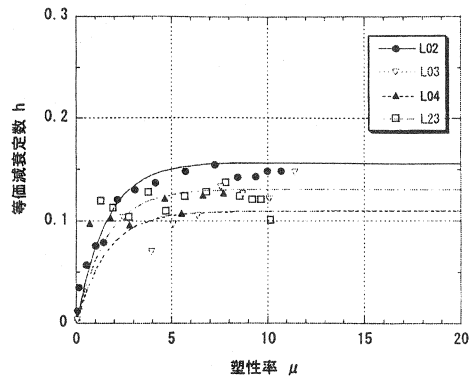


図-12 等価減衰定数の比較 (鋼材偏心度の違い)

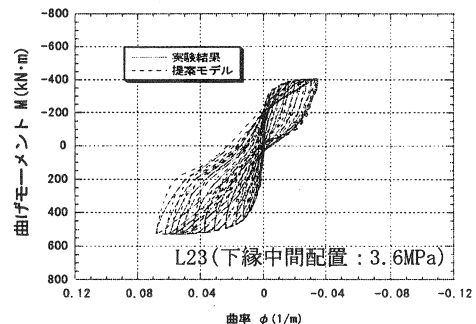
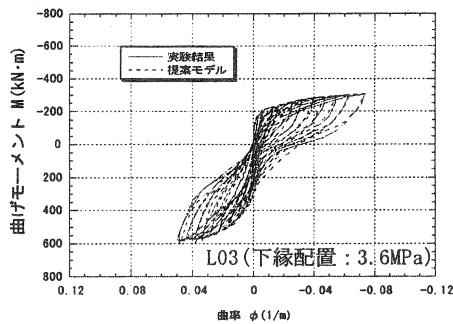
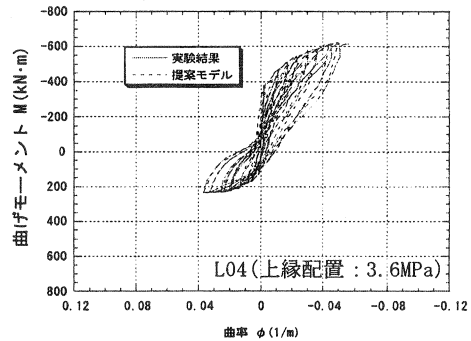
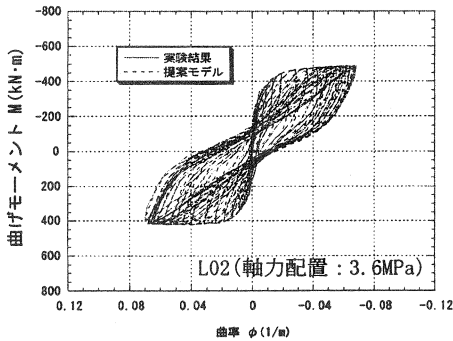


図-13 提案モデルと実験値による曲げモーメント-曲率関係の比較

を示したが、プレストレスの導入量、鋼材の偏心度および塑性率 $\mu$ により等価減衰定数 $h$ を規定し、この等価減衰定数によりループの膨らみ等の形状を決めることによって、偏心度により異なるループ形状を的確に表現できる除荷曲線関数を提案することができた。

なお、本研究は、オリエンタル建設(株)、(株)富士ピーエスと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・岡田・角本・堤：P C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
- 2) 大塚・岡田・石原・角本・堤：交番載荷実験に基づくP C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. 9