

RC, PC および PRC 部材のモーメント-曲率 の関係とその応用

MOMENT-CURVATURE RELATIONSHIP OF RC, PC AND
PRC MEMBERS AND ITS APPLICATION

松 本 公 典*

By *Kiminori MATSUMOTO*

1. まえがき

コンクリート構造物（鉄筋コンクリート、以下 RC プレストレストコンクリート、以下 PC）の耐震性、耐久性検討を目的として、PC, RC 部材の動的挙動を供試体に正・反繰返し載荷することにより実験的に解析した例は過去多くの実例をみるが、理論数値解析を取り扱ったものについてはあまり試みられていない。しばしば曲げモーメントと曲率の関係 ($M-\phi$) が耐震計算上利用される。

著者は PC, RC 構造物の耐震性検討の用に供するため、部材を構成する材料（コンクリート、鉄筋、PC 鋼材）の応力挙動の実験的結果をふまえ、種々の材料からなる PC, RC 任意断面部材の正・反繰返し曲げを受ける場合のモーメント-曲率 ($M-\phi$) ヒステレシススケルトン曲線を数値解析するプログラムを開発した。

PC, RC 構造物の耐震性検討の基礎資料に資するため、種々の材料の組合せ比率より成る矩形部材断面の ($M-\phi$) ヒステレシス挙動、断面ダクティリティー、エネルギー消散による履歴減衰特性を試算した。

PC 橋においては PC 鋼材を効率的な使用のために部材断面図心から偏心させて配置する場合が多い。そこで、PC 鋼材の偏心配置が ($M-\phi$) 履歴応答性状に及ぼす影響をみるために偏心量の相違する 3 つの PC 矩形部材断面の ($M-\phi$) 履歴応答曲線を計算し、その特性を検討した。また、PC 長大実橋の主桁 2 断面の ($M-\phi$) 応答特性を解析し、今後の PC 長大橋の耐震性、耐久性検討のための資料とした。

材料の応力度-ひずみ関係の定量化は、コンクリートについては青山¹⁾、鉄筋・PC 鋼材については Blakeley and Park²⁾ の研究を参考にした猪股³⁾の試案によっている。また、数値解析結果と実験値とを対比し、数値解析

の妥当性を検証している。本プログラムは PC, RC 構造物の非線形動的応答解析のための PC, RC 部材剛性のモデル化、減衰性能の検討を目的とし、任意の形状たとえば PC 橋の主桁断面、橋脚断面等の $M-\phi$ ヒステレシス曲線の計算が可能にしてあり、文献⁴⁾のように矩形 PC 部材断面を対象にしたものとは異なり、また著者⁵⁾とはその後の検討により鉄筋の仮定応力-ひずみ曲線を完全弾塑性型から Bauschinger 効果を考慮した履歴特性モデルの方が実情によく合うため入れ換えた点で異なる。

2. 計算上の仮定と解析プログラム

(1) 計算上の仮定

モーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係のヒステレシス・ループ曲線を理論数値計算するにあたって、コンクリート、鉄筋、PC 鋼材の応力度-ひずみ関係に対して、以下の仮定を設けている。

〈仮定 I〉

すべての段階で部材断面のひずみは中立軸からの距離に比例する（平面保持の法則）。

〈仮定 II〉

コンクリートの引張応力度はこれを無視する。ただし、無荷重状態でプレストレスのみ作用する状態でのコンクリートの引張応力度は有効であるとする。

〈仮定 III〉

構成材料の応力度-ひずみ関係の機械的性質は以下のようである。

1) コンクリートの応力-ひずみスケルトン・カーブ

コンクリートの応力-ひずみスケルトン・カーブは、図-1 に示すように、圧縮応力域にあっては 2 次パラボラと応力降下直線の結合されたものとする。引張応力域にあっては圧縮応力区間スケルトン・カーブの原点にお

* 正会員 (株) 日本構造橋梁研究所

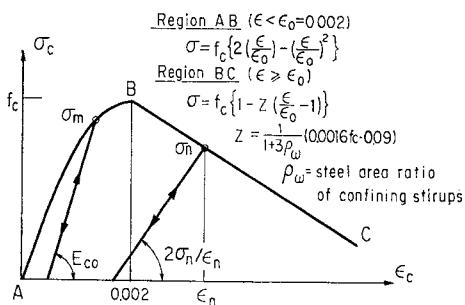


図-1 コンクリートの応力-ひずみスケルトン・カーブ

ける接線と同一傾斜 E_{c0} を有する直線と仮定する。引張応力度の最大値は引張強度 ($-f_t$) とする。ただし、コンクリートの引張応力はプレストレッシング作用のみの仮想応力状態に対してのみ考慮する。その後の載荷履歴にあたって圧縮応力状態から引張となる場合の引張応力は、これを無視するものとする。

ここに、 f_c ：コンクリート圧縮強度

$$f_t : \text{コンクリート引張強度 } (0.65^3 \sqrt{f_c})$$

$$\epsilon_{c0} = 0.002$$

$$E_{c0} = 2 f_c / \epsilon_{c0}$$

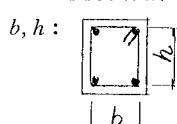
$$Z = (0.0016 f_c - 0.09) / (1 + 3 \rho_{sw})$$

ρ_{sw} ：圧縮コンクリート横方向拘束鉄筋
断面積比 $(\rho_{sw} (\%) = \frac{2 A_s (b+h)}{A_c \cdot s})$

A_c ：横方向拘束鉄筋で囲まれたコンクリート
断面積

A_s ：横方向拘束鉄筋の断面積

s ：横方向拘束鉄筋間隔



ひずみを減少させる場合、 $\epsilon_m < \epsilon_{c0}$ なる (σ_m, ϵ_m) の点よりひずみを減少させる場合には傾斜 E_{c0} なる直線に沿ってコンクリートの応力は変化するものとする。 $\epsilon_n > \epsilon_{c0}$ なる (σ_n, ϵ_n) の点よりひずみを減少させる場合には、スケルトン・カーブ上の点 (σ_n, ϵ_n) と ϵ_c 軸上の点 $(0, \epsilon_n/2)$ を結ぶ傾斜 $2\sigma_n/\epsilon_n$ なる直線に沿ってコンクリートの応力は変化するものと仮定する。すなわち、スケルトン・カーブ上の点 (σ_m, ϵ_m) より圧縮ひずみを減少させ $\epsilon_c (< \epsilon_m)$ となるときのコンクリート応力度は次のようにある。

$\epsilon_m < \epsilon_{c0}$ の場合

$$\sigma_c = \sigma_m + E_{c0}(\epsilon_c - \epsilon_m) \geq 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$\epsilon_n > \epsilon_{c0}$ の場合

$$\sigma_c = \sigma_n + 2 \frac{\sigma_n}{\epsilon_n} (\epsilon_c - \epsilon_n) = \sigma_n \left(2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_n} - 1 \right) \geq 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

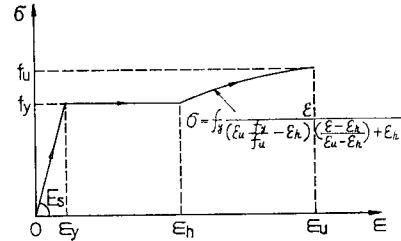


図-2 鉄筋の応力-ひずみ単調増加曲線

以上両式 (1), (2) で与えられるひずみ除荷途中より再びひずみを増加させる場合には、コンクリートの応力度は除荷時と同じ直線上で求められるものと仮定する。

2) 鉄筋の応力-ひずみスケルトン・カーブ

鉄筋の応力-ひずみ曲線については以下のように仮定する。鉄筋は完全弾塑性材料であり、降伏点応力およびヤング係数は圧縮、引張両域に対して同一であると仮定し、一方の単調増加荷重（引張荷重または圧縮荷重）に対しては図-2 のようにひずみ硬化特性を考慮した完全弾塑性挙動を示すものとし、適用式は式 (3) で与えられるものとする。

$$\left. \begin{aligned} 0 < \epsilon < \epsilon_y, \quad \sigma &= E_s \cdot \epsilon \\ \epsilon_y < \epsilon < \epsilon_h, \quad \sigma &= f_y \\ \epsilon_h < \epsilon < \epsilon_u, \quad \sigma &= f_y \frac{\epsilon}{(\epsilon_u f_y / \epsilon_u - \epsilon_h) \left(\frac{\epsilon - \epsilon_h}{\epsilon_u - \epsilon_h} \right) + \epsilon_h} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 f_y ：鉄筋の降伏点応力度

f_u ：鉄筋の最大引張応力度

ϵ_y ：鉄筋の降伏点ひずみ (f_y/E_s)

ϵ_h ：ひずみ硬化点ひずみ

ϵ_u ： f_u に対応するひずみ

E_s ：鉄筋のヤング係数

荷重増加後、減力する場合（引張（圧縮）側→圧縮（引張）側）で応力が逆転しない場合には以下の定義式に従うものとする。戻る点の応力、ひずみを (σ_i, ϵ_i) とすると、以下の式となる。

$$\left. \begin{aligned} 0 < \epsilon_i < \epsilon_y, \quad \sigma &= E_s \cdot \epsilon \\ \epsilon_i < \epsilon_i < \epsilon_u, \quad \sigma &= \sigma_i + E_s(\epsilon - \epsilon_i) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

次に引張（圧縮）降伏後、圧縮（引張）側へ減力し、再に圧縮（引張）側へ加力する場合、戻る点の応力、ひずみを (σ_i, ϵ_i) とすると、以下の直線と双曲線で与えられるものとする。

$$\epsilon_i - \frac{\sigma_i}{E_s} < \epsilon < \epsilon_i, \quad \sigma = \sigma_i + E_s(\epsilon - \epsilon_i) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\epsilon < \epsilon_i - \frac{\sigma_i}{E_s},$$

$$\sigma = -f_y \left[a - \frac{a(a-1)}{\left(-\frac{E_B}{f_y} \right) \left\{ \epsilon - \left(\epsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} \right) \right\} + (a-1)} \right] \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $E_B = -\frac{E_s}{6} \log 10(\varepsilon_i - \varepsilon_y)$ ；塑性ひずみ ε_{pl} ($\equiv \varepsilon_i - \varepsilon_y$) の関数 $a = E_s/(E_s - E_B)$

2回目以降の履歴載荷については、戻る点の応力、ひずみを $(\sigma_{i+1}, \epsilon_{i+1})$ とすると $(\sigma_{i+1}, \epsilon_{i+1})$ が圧縮降伏してからの戻りについては以下の定義式に従うものとする(図-3 参照).

$$\varepsilon_{i+1} \leq \varepsilon < \varepsilon_{i+1} - \frac{\sigma_{i+1}}{E_s}, \quad \sigma = \sigma_{i+1} + E_s(\varepsilon - \varepsilon_{i+1})$$

..... (3)

$$\varepsilon_{i+1} - \frac{\sigma_{i+1}}{E_s} < \varepsilon < \frac{\sigma_i}{E_B'} + \left(\varepsilon_{i+1} - \frac{\sigma_{i+1}}{E_s} \right),$$

$$\sigma = \sigma_i \left[a - \frac{a(a-1)}{\left(\frac{E_B'}{\sigma_i} \right) \left\{ \varepsilon - \left(\varepsilon_{i+1} - \frac{\sigma_{i+1}}{E_s} \right) \right\} + (a-1)} \right]$$

.....④

$$\frac{\sigma_i}{E_B'} + \left(\varepsilon_{i+1} - \frac{\sigma_{i+1}}{E_s} \right) < \varepsilon, \text{ 塑性ひずみ } \Delta\varepsilon_m = \left(\varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E_s} \right) - \left(\varepsilon_{i+1} - \frac{\sigma_{i+1}}{E_s} \right) \text{ とすると}$$

$\Delta \epsilon_m < \epsilon_h/2$ の場合……単調増加処女曲線上

$\Delta\varepsilon_m > \varepsilon_h/2$ の場合……曲線 ④ の延長上

また、 $(\sigma_{i+1}, \varepsilon_{i+1})$ が圧縮（引張）降伏しない前に戻る場合は、定義式は以下のようである（図-4 参照）。

$$\varepsilon_{i+1} \leq \varepsilon < \varepsilon_{i+1} + \frac{\sigma_i}{E_s}, \quad \sigma = \sigma_{i+1} + E_s(\varepsilon - \varepsilon_{i+1})$$

.....(3')

$$\varepsilon_{i+1} + \frac{\sigma_i}{E_s} < \varepsilon < \varepsilon_i,$$

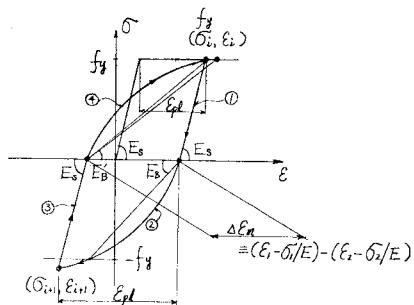


図-3 鉄筋の降伏後の応力-ひずみ
スケルトン・カーブ(1)

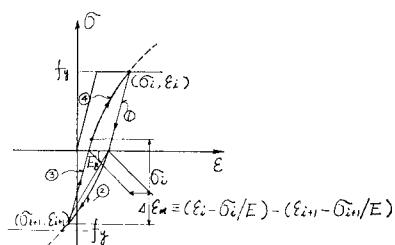


図-4 鉄筋の降伏後の応力-ひずみ
スケルトン・カーブ(2)

$$\varepsilon_i < \varepsilon,$$

$\Delta\varepsilon_m < \varepsilon_h/2$ の場合……単調増加処女曲線上

$\Delta\varepsilon_m > \varepsilon_h/2$ の場合……曲線④'の延長上

以上のように、降伏後の載荷履歴に関しては Baushinger effect を考慮したヒステレス・モデルとする(図-5 参照)。

3) PC 鋼材の応力-ひずみスケルトン・カーブ

PC 鋼材の応力-ひずみ曲線は 図-6 に示すように加力時はバイリニヤーの理想化曲線とし、降伏点を超えない応力状態からひずみが戻る場合は同一直線上を降下し、降伏点ひずみより戻る場合は式(7)に示すように最初の勾配と同じ勾配で ③ 点まで降下、さらに式(8)に示す曲線上を降下するものとする。減力時から再度加力

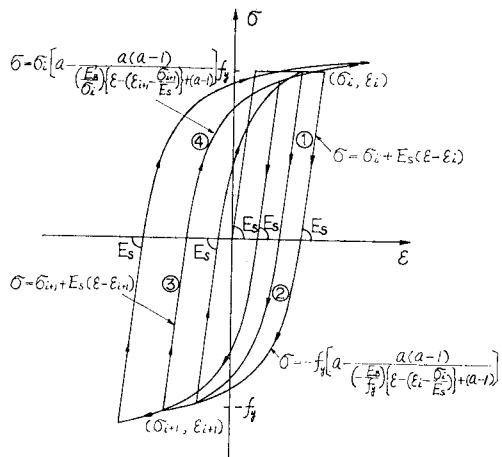


図-5 鋼材の応力-ひずみスケルトン・カーブ

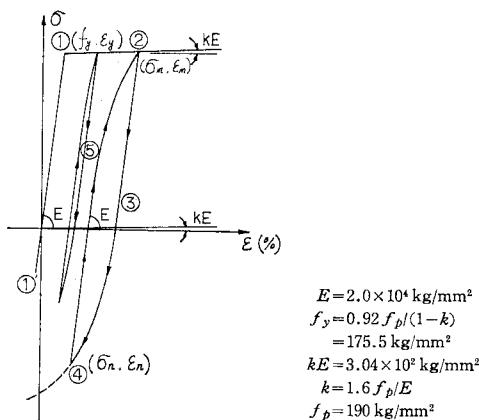


図-6 PC 鋼材の応力-ひずみスケルトン・カーブ
(SWPR-7 B の場合)

に転ずる場合は ⑤ 点まで式(9)に示す直線上を進み、さらに式(10)に示す曲線上を進んで元の降下した点に戻るものとする。

$$\begin{aligned} \text{①}' \sim \text{①} \quad \varepsilon_{-y} &< \varepsilon < \varepsilon_{+y} \\ \sigma &= E \cdot \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{①} \sim \text{②} \quad \varepsilon_m &< \varepsilon < \varepsilon_{-y} \\ \sigma &= f_{-y} + kE(\varepsilon - \varepsilon_{-y}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{②} \sim \text{③} \quad \varepsilon_m &< \varepsilon < (\varepsilon_m - \varepsilon_{-y}) \\ \sigma &= \sigma_m - E(\varepsilon_m - \varepsilon) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{③} \sim \text{④} \quad (\varepsilon_m - \varepsilon_{-y}) &< \varepsilon < \varepsilon_n \\ \sigma &= \sigma_m - f_{-y} + \frac{E(\varepsilon - \varepsilon_m + \varepsilon_{-y})}{1 - \left(\frac{E}{\sigma_m} - \frac{1}{\varepsilon_m} \right)(\varepsilon - \varepsilon_m + \varepsilon_{-y})} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{④} \sim \text{⑤} \quad (\varepsilon_n + \varepsilon_{-y}) &< \varepsilon < \varepsilon_n \\ \sigma &= \sigma_n + E(\varepsilon - \varepsilon_n) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{⑤} \sim \text{②} \quad \varepsilon_m &< \varepsilon < (\varepsilon_n + \varepsilon_{-y}) \\ \sigma &= \sigma_n + f_{-y} \\ &+ \frac{E(\varepsilon - \varepsilon_n - \varepsilon_y)}{1 + \left(\frac{E}{\sigma_m - \sigma_n - f_{-y}} - \frac{1}{\varepsilon_m - \varepsilon_n - \varepsilon_y} \right)(\varepsilon - \varepsilon_n - \varepsilon_y)} \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 数値計算プログラム

プログラムは図-7のようなPC橋の主桁断面を対象として作成し、それを応用することにより任意の形状断面、種々の鋼材配置による場合の解析が可能にしてある。計算は図-7に示すとく部材断面を面と直角に細分割し、細分割区間は断面応力は一定であるとし、軸力つり合い条件を満足するひずみ状態からモーメント-曲率($M-\phi$)関係を求めるものである。

PC部材の場合、まず、プレストレスのみの作用する無荷重状態(初期状態)を求め、次に初期状態ひずみより出発し、部材断面の上縁および下縁ひずみを増加あるいは減少させて正・反繰返し曲げを受けた状態の応力挙動を求めるものとする。初期状態を求めるには図-7においてPC鋼材重心が部材断面図心の上にあるか下にあるか判定を行い、上有る場合、コンクリート断面図心にPC鋼材が集した場合の軸圧縮ひずみ ε_c より上縁ひずみをstep by stepに少しづつ増加させ、以下のつり合い条件式を満足する部材断面ひずみ分布を求めればよ

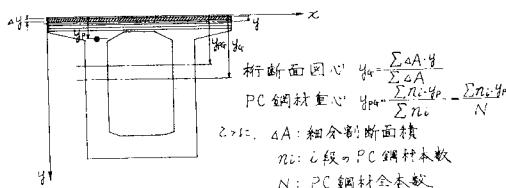


図-7 部材断面の細分割と図心

い。

〈断面応力つり合い条件式〉

1) 軸 力

$$\sum \Delta C + \sum C_n = \sum N \cdot P_e \quad (11)$$

2) モーメント

$$\sum \Delta C \cdot y + \sum C_n \cdot y_{sn} = y_{PG} \sum N \cdot P_e \quad (12)$$

ここに、 ΔC : 細分割されたコンクリートの応力

C_n : 鉄筋応力

P_e : 有効プレストレス(1本当たり)

N : PC鋼材本数

y : 細分割コンクリートの重心の上縁からの距離

y_{sn} : 鉄筋位置のコンクリート上縁からの距離

y_{PG} : プレストレスの重心の上縁からの距離

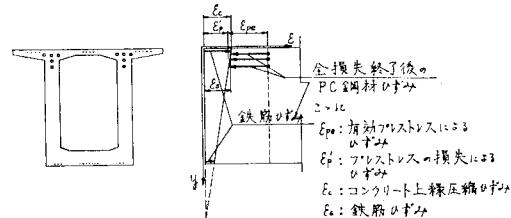


図-8 各材料初期ひずみ状態

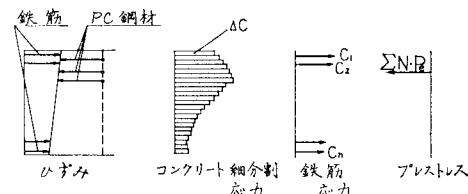


図-9 初期状態における材料のひずみと応力度

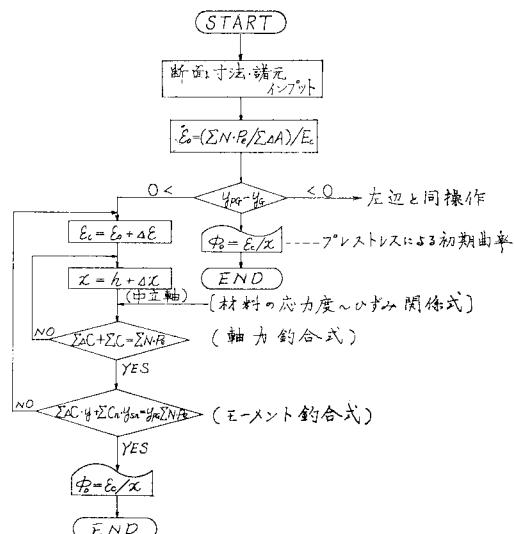
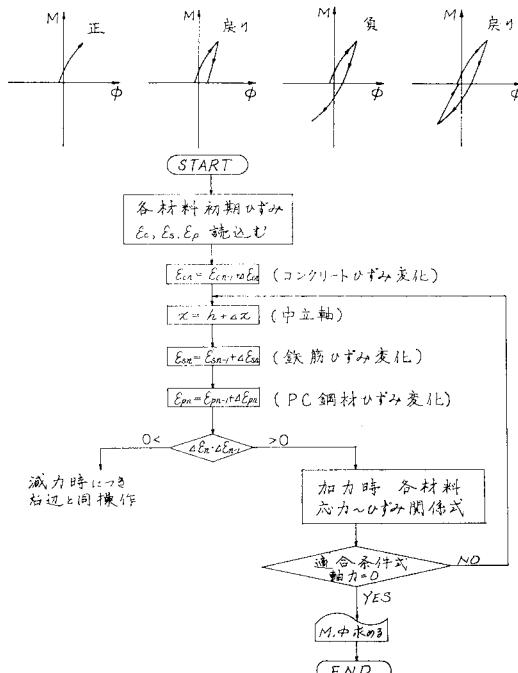


図-10 プレストレスによる初期ひずみ状態を求めるフロー図

図-11 正・反繰返し曲げを受ける部材断面の $M-\phi$ 関係を求めるフロー図

初期ひずみ分布状態、応力状態の一例を 図-8, 9 に示す。初期状態のひずみを求めた後、それを初期値として読み込み、コンクリート上縁ひずみ増加(正荷重)→減少(除荷)→下縁ひずみ増加(負荷重)→減少(除荷)のひずみ変動に対して式(11)の軸力のつり合い条件式を満足する断面ひずみ分布よりモーメント-曲率($M-\phi$)の関係を求めれば、正・反繰返し曲げを受けたときの部材断面の $M-\phi$ ヒステレシス曲線を求めることができる。以上の手順をフロー図に表わすと 図-10, 11 のようになる。

3. 計算結果と実験値との整合性

(1) 数値計算結果と実験結果およびその考察

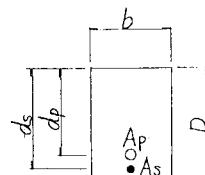
a) 理論数値計算結果

上記解析プログラムを用い、PC 鋼材、鉄筋量を種々変化させた4つの矩形断面の $M-\phi$ 載荷履歴数値計算を示す。ここで、PC 鋼材機械的比 W_p^* 、鉄筋機械的比 W_s^* を定義する。

$$W_p^* = \frac{A_p}{bd_p} \cdot \frac{f_p}{f_c'} \dots (13)$$

$$W_s^* = \frac{A_s}{bd_s} \cdot \frac{f_{sy}}{f_c'} \dots (14)$$

ここに、 f_p : PC 鋼材降伏点
 f_{sy} : 鉄筋降伏点



f_c' : コンクリート圧縮強度

b : 矩形幅

d_p, d_s : PC 鋼材、鉄筋有効高さ

プレストレッジング係数 r は PC 鋼材、鉄筋の総鋼材量に対する PC 鋼材の比率でプレストレスの導入レベルを示すもので、 $d_p=d_s$ の場合、以下のように表わされる。

$$r = \frac{W_p^*}{W_p^* + W_s^*} = \frac{A_p \cdot f_p}{A_p \cdot f_p + A_s \cdot f_{sy}} \dots (15)$$

$r=0.0$ は RC 部材、 $r=1.0$ は PC 部材を表わす。

コンクリート構造物は鉄筋、PC 鋼材をある比率で使用する合成構造である。図-12 は表-1、図-13 の4種のプレストレッジング係数による断面が正・反繰返し曲げを受けた場合の $M-\phi$ 応答履歴スケルトン曲線を数値計算し、プロッターにて打ち出したものであり、コンク

表-1 実験供試体鋼材種類

	PC 鋼材 SBPD 130/145	鉄筋 SD 30	緊張力 P_0^* (t)	初期プレ ストレス (kg/cm ²)	プレスト レッジ ング係数
3 P-0 R	(1φ 9.2) (2φ 7.2)	—	25.75	91.6	1.00
2 P-1 R	2φ 7.2	1D16	14.30	47.0	0.627
1 P-2 R	1φ 7.2	2D16	7.15	21.8	0.296
0 P-3 R	—	3D16	—	—	0.00

(×9.8 kN) (×98 kPa)

表-2 コンクリート圧縮強度

供試体	材令 28 日 (kg/cm ²)	プレストレ ス導入時 (kg/cm ²)	載荷時 (kg/cm ²)	供試体	載荷時 (kg/cm ²)
No. 1	502.5	590.4	574.2	No. 1	69.1
No. 2	486.8	555.0	569.5	No. 2	64.0
No. 3	447.4	541.2	567.2	No. 3	62.9
No. 4	466.9	476.9	505.6	平均	65.3
平均	476	541	551		

(×98 kPa)

表-4 鉄筋の機械的性質

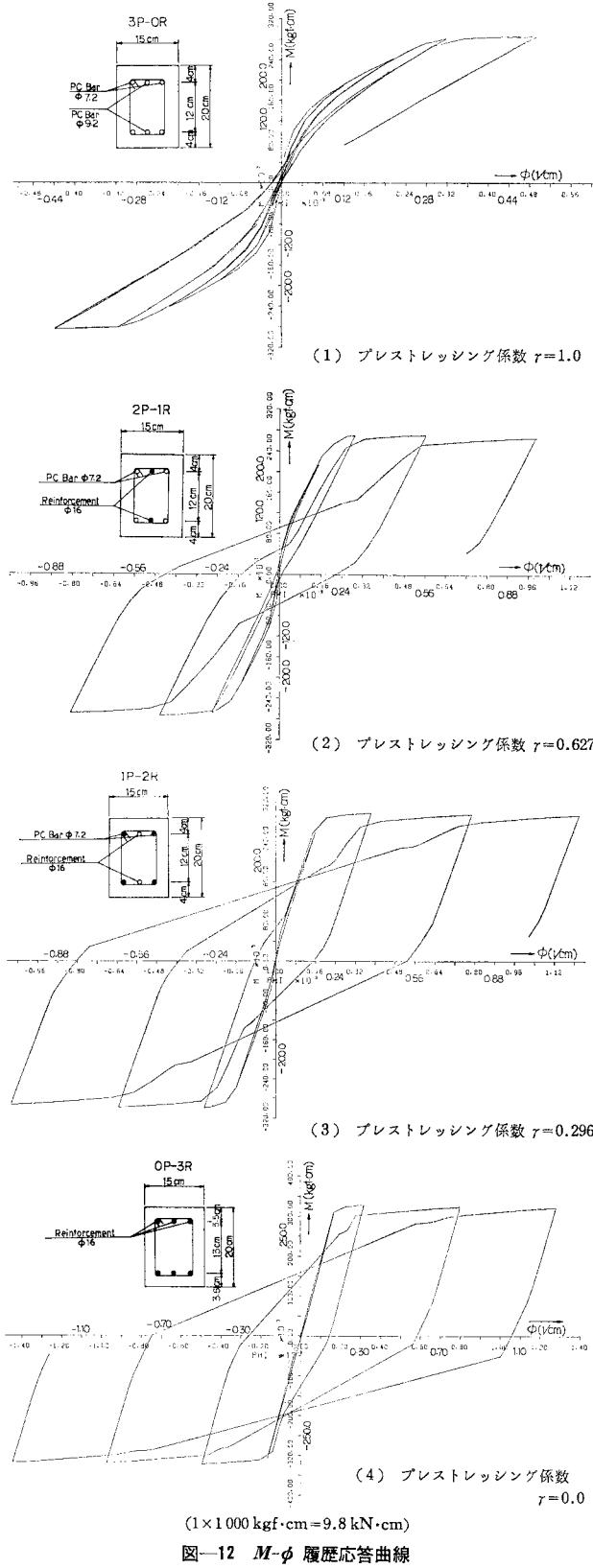
種別	供試体	降伏点 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)
D16 主鉄筋 (SD 30)	No. 1	38.3	59.2
	No. 2	38.5	59.0
	No. 3	38.4	59.2
	平均	38.4	59.1
$\phi 6$ スターラップ	No. 1	67.2	79.6
	No. 2	63.7	78.2
	No. 3	61.9	78.2
	平均	64.0	78.6

(×9.8 MPa)

表-5 PC 鋼材機械的性質

種別	公称径 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)	ヤング係数 (kg/mm ²)
SBPD 130/145	7.4	146.0	149.0	2.0×10^4
	9.2	143.0	151.0	2.06×10^4

(×9.8 MPa)



リートの上・下縁ひずみが $\epsilon_c=0.001, 0.0015, 0.0020, 0.0025$ となるまで繰返し載荷し、戻した状態を計算したものである。コンクリート縁維ひずみ $\epsilon_c=0.0035$ をもってコンクリート圧縮破壊とする。これらの断面は実験値との整合性を確かめるために製作した供試体と一致させたものであり、各材料の機械的性質は表-2, 3, 4, 5 のようである。

b) 載荷実験結果

前記4つのPC, RCおよびPRC矩形断面のうち、2P-1R, 0P-3Rの2断面の梁を正・反繰返し載荷実験した結果を以下に示す。

(イ) 供試体と載荷方法

供試体は前記図-13、表-1に示した矩形断面で図-14にその寸法、配筋、鋼材配置状態を示す。載荷方法は図-15に示すように単純梁の中央に2点載荷し、図-16の載荷プログラムにそって正・反繰返し載荷した。

(ロ) 曲率の測定方法

部材のモーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係を求めるために図-17に示すような装置を用い、各点間の変位ひずみ量を測定し、曲率を算定する。ここにおいて曲率は

$$\frac{1}{S} = \frac{\epsilon_c - \epsilon_t}{S \cdot H} \quad \dots \dots \dots (16)$$

で与えられる。ここで、

ϵ_c ：圧縮縁側のダイヤルゲージの読み

ϵ_t ：引張縁側のダイヤルゲージの読み

ひずみ制御により載荷を行ったが、圧縮縁ひずみは以下の式より推定した。

$$\begin{aligned} \text{圧縮縁ひずみ } \epsilon_{cx} &= \left\{ |\epsilon_c| - \frac{a}{H} (|\epsilon_c| + |\epsilon_t|) \right\} \\ &\times \frac{1}{S} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (17)$$

(ハ) 実験結果

2P-1R, 0P-3R部材の前記載荷プログラムにそって正・反繰返し載荷したときの $M-\phi$ 関係履歴曲線の実験結果をそれぞれ図-18、図-19に示す。図の実線が載荷実験によるものであり、破線は数値計算結果で対比したものである。供試体のひびわれ状況を写真-1, 2に示す。

c) 考察

④ 理論数値計算結果と実験値との整合性

理論数値計算結果と実験結果とは図-18、図-19に示すごとくよい一致をみた。2P-1R断面についていえば載荷履歴ごとに数値計算の方が実験結果より曲率変位が大きめの値となっているのは“ひびわれ”発生後の挙動で図-1(a)に示す

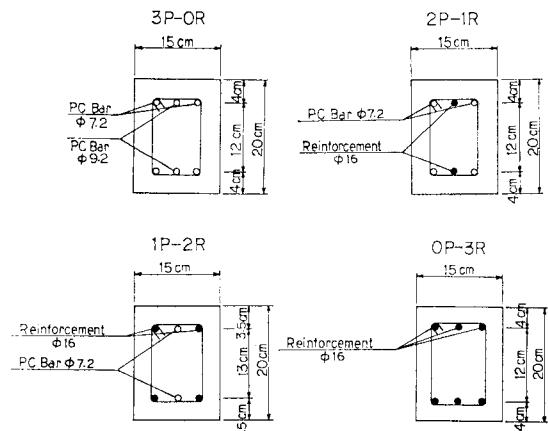


図-13 実験供試体

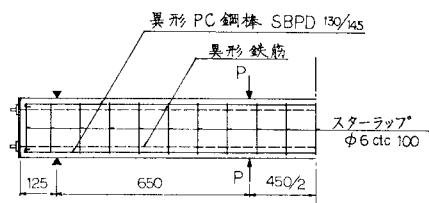


図-14 試験体寸法および鋼材配置

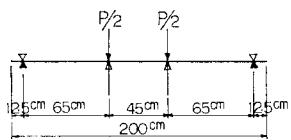


図-15 載荷方法

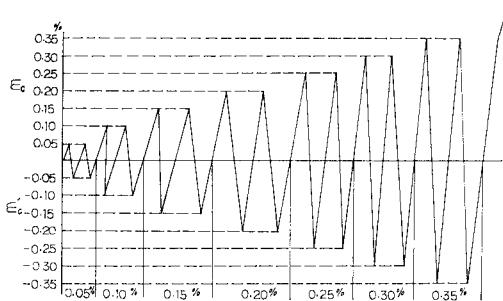


図-16 載荷試験プログラム

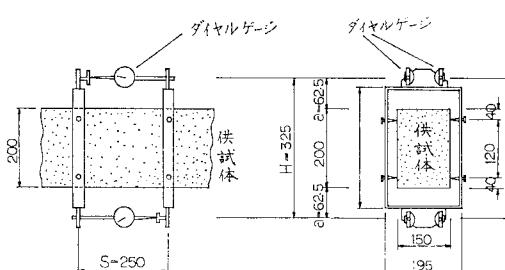


図-17 曲率測定装置

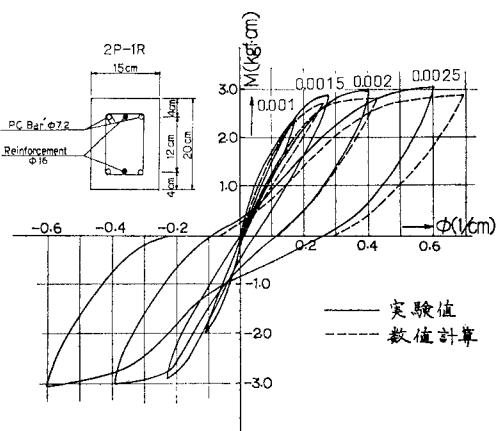
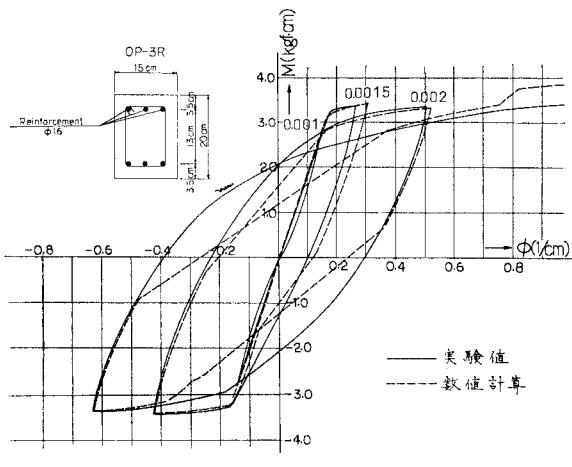
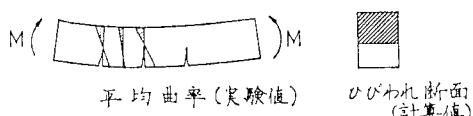
図-18 2P-1R 部材 $M-\phi$ スケルトン・カーブ
(実験と数値解析)図-19 0P-3R 部材 $M-\phi$ スケルトン・カーブ
(実験と数値解析)

図-20(a) 実験値と計算値

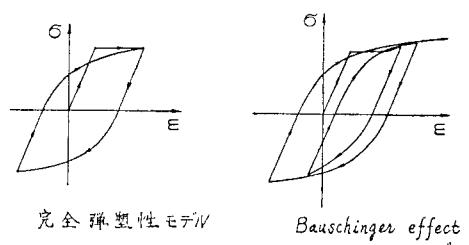


図-20(b) 鉄筋の応力-ひずみ曲線

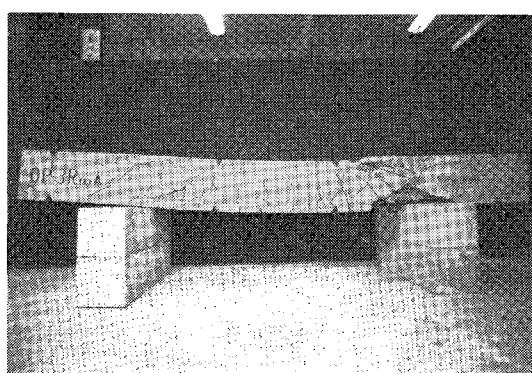
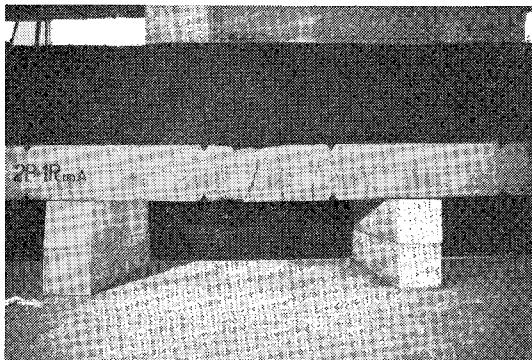
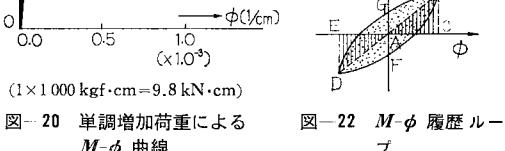
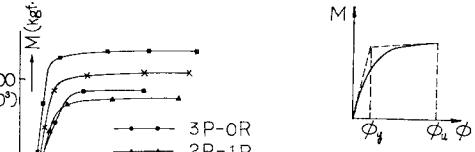
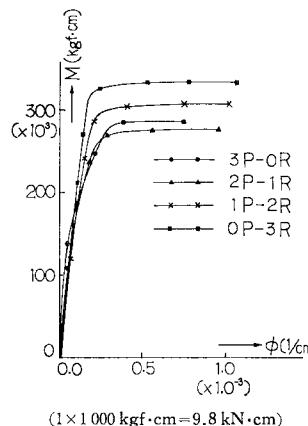


表-6 ダクティリティーと等価粘性減衰

	ダクティリティー	回転能 (ϕ_u) (1/cm)	等価粘性減衰
3P-0R	2.53	0.760×10^{-3}	0.015
2P-1R	4.57	0.966	0.050
1P-2R	5.42	1.029	0.127
0P-3R	6.00	1.074	0.217



して減衰性能を比較すると表-6、図-20 のようである。断面ダクティリティーについては降伏応力、変位が明確でない場合には図-21 のような手法で求めたものである。

正・反繰返し荷重下における断面のエネルギー吸収能力について検討すると、図-22 のように 1 サイクルの応力-変位(モーメント-曲率)関係の履歴ループにおいて導入エネルギー $W(\triangle ABC + \triangle ADE)$ に対する吸収エネルギー ΔW (ループが閉む面積 $BFDG$) から以下の式により計算される。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

以上のことから、RC 部材は PC 部材と比較してダクティリティーで 2.4 倍、断面の回転能力で 1.4 倍、減衰性能で 14.5 倍の能力をもち、PRC 部材(プレストレッシング係数 $r : 0 < r < 1$)については RC と PC との中間の性能をもつといえる。

次に RC 部材断面(0P-3R)、PC 部材断面(3P-0R)が大変形を受けたときの履歴ループ中で消費されるエネルギーのうち、それぞれ鉄筋、PC 鋼材が受けもつ分担率を試算した。上縁、下縁圧縮ひずみが $\epsilon_c = 0.002$ になるまで正・反加力した 1 サイクルの載荷履歴ループ中で材軸にそって単位長さ al 当たりの全ひずみエネルギー(ΔU)は、圧縮側コンクリートひずみエネルギー(ΔU_c)と鉄筋または PC 鋼材の全ひずみエネルギー(ΔU_s)との和で表わされる。すなわち、 $\Delta U = \Delta U_c + \Delta U_s$ が成り立つ。そこでいま、RC 部材断面(0P-3R)について

ように数値計算は“ひびわれ断面”について計算しているのに対して、実験結果は“ひびわれ発生断面”とまだ発生していない断面との平均的な値が曲率として生じているためと考えられる。0P-3R 断面については正→反あるいは反→正の載荷が逆転する箇所で数値計算結果が若干実験値に食い違いを生じているのは上縁の圧縮ひずみ変動→下縁圧縮ひずみ変動に移り変わる点で、数値計算のテクニック上生じた差異である。数値計算はその箇所での曲線の接線を表わしており、履歴応答モデル検討のために実用上は差し支えない。

鉄筋の応力-ひずみ曲線のモデル化にあたっては、1 サイクルの正・反加力においては図-1(b) の完全弾塑性型の履歴性状を示すが、正・反繰返し載荷状態では特に降伏応力以後の応力-ひずみ関係においてひずみ硬化特性による Bauschinger 効果を無視し得ない(図-1(b) 参照)。

⑥ 変形性能とエネルギー吸収について

PC、RC および PRC 部材のモーメント-曲率関係の一般的な特性を知るために耐震性能に大きな影響を与える断面の回転性能、断面ダクティリティーおよび減衰性能について考察する。

前記 4 断面について断面の回転性能、断面ダクティリティー、正・反 $\epsilon_c = 0.002$ の圧縮ひずみサイクルに対

図-23 のように 1 サイクルの $M-\phi$ 履歴ループで囲まれる吸収エネルギー (ΔU 合計) をループ面積から計算すると、面積は力量となり、単位長さ当たり、 $\Delta U = 0.463 \text{ t}$ となる。一方、同ループに対応する引張鉄筋、圧縮鉄筋の応力-ひずみ ($P-\epsilon$) 関係はそれぞれ図-24、

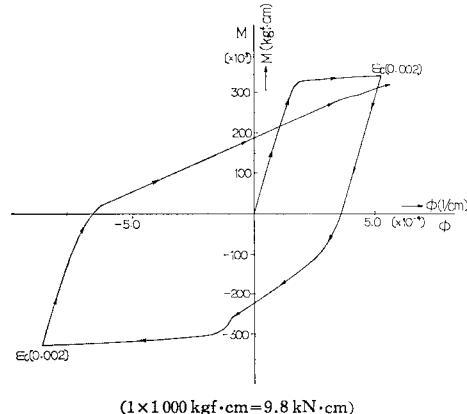


図-23 鉄筋コンクリート断面 1 サイクル
 $M-\phi$ 履歴性状

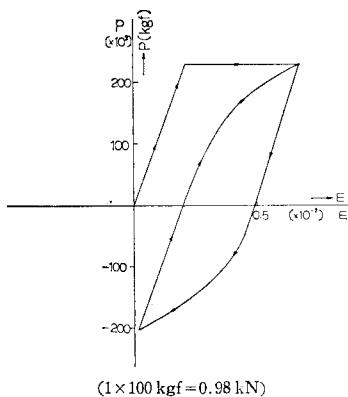


図-24 引張鉄筋の応力-ひずみ曲線

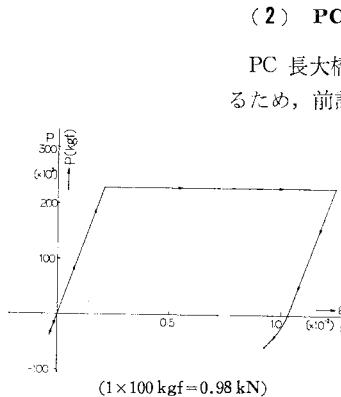


図-25 圧縮鉄筋の応力-ひずみ曲線

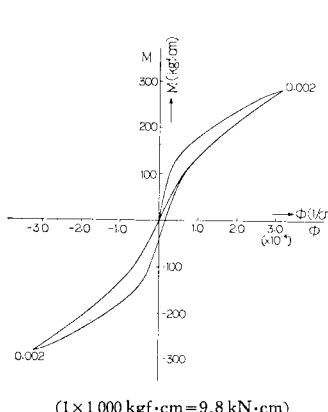


図-26 プレストレスコンクリート
断面 1 サイクル $M-\phi$ 履歴性
状

図-25 のようなループであり、これらから鉄筋の全ひずみ吸収エネルギーを計算すると $\Delta U_s = 0.325 \text{ t}$ となる。したがって、RC 部材断面 (0 P-3 R) の $M-\phi$ ループ中に吸収されるエネルギーのうち、鉄筋による消費分は $\Delta U_s / \Delta U = 0.702$ となり、降伏曲率以降に対して、約 2 倍の曲率振幅 (上線、下線ひずみ $\epsilon_c = 0.002$) をもつ定常ループでは、全吸収エネルギーの約 7 割が鉄筋によって費やされる。

同じ手法で PC 部材断面 (3 P-0 R) について 1 サイクルの載荷履歴中 (上線、下線ひずみが $\epsilon_c = 0.002$ になるまで載荷する) に吸収されるエネルギーのうち、PC 鋼材による消費分を計算する。図-26 より 1 サイクルの $M-\phi$ 履歴ループで囲まれる吸収エネルギーは単位長さ当たり、 ΔU (合計) = 24.1 kg であり、同ループに対応する上端、下端 PC 鋼材の全ひずみ吸収エネルギーは図-27、図-28 から $\Delta U_s = 5.89 \text{ kg}$ であることから、PC 部材断面 (3 P-0 R) の $M-\phi$ ループ中で吸収されるエネルギーのうち、PC 鋼材による消費分は $\Delta U_s / \Delta U = 0.244$ となる。

(2) PC 実長大橋主桁断面 $M-\phi$ 計算結果

PC 長大橋の耐震・耐久性検討のための一資料に資するため、前記プログラムを使用し、実橋 (H 橋) の主桁の $M-\phi$ 履歴応答特性を解析した。

H 橋は 3 径間 PC 有鉄ラーメン橋であり、概要は図-29 のようである。H 橋主要 2 断面、Section A (側径間断面)、Section B (橋脚付近断面) について $M-\phi$ 応答履歴特性を数値解析し、図に表わすと図-30, 31 のようであり、正・反応力が逆転する箇所で部材剛性 (EI) を表わす曲線接線勾配が大きく変化する。

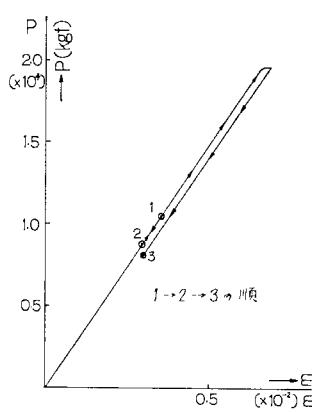


図-27 PC 鋼材応力-ひずみ曲線
(上側)

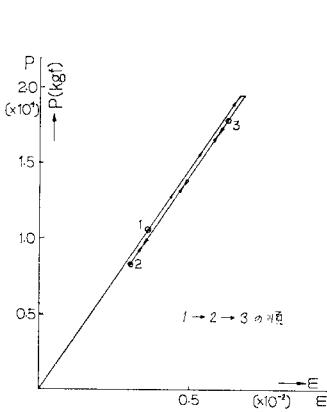


図-28 PC 鋼材応力-ひずみ曲線
(下側)

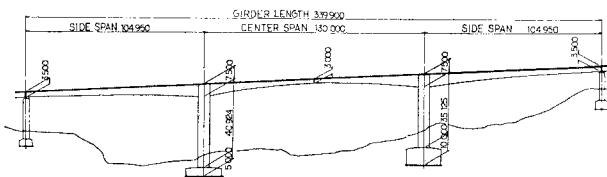
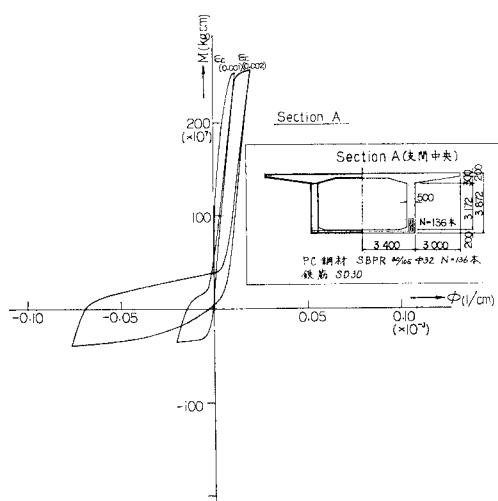


図-29 H 橋 概要図



PC 鋼材緊張力 $P_e = 40.8 \text{ t}$ (1 本当たり)
コンクリート圧縮強度 $F_c = 400 \text{ kgf/cm}^2$
PC 鋼材弾性係数 $E_p = 2.05 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
PC 鋼材降伏点強度 $f_p = 1.05 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$
鉄筋降伏点強度 $F_{s,y} = 3 000 \text{ kgf/cm}^2$
鉄筋弾性係数 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

($1 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2 = 9.8 \times 10 \text{ kPa}, 1 \times 10^7 \text{ kgf}\cdot\text{cm} = 9.8 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{cm}$)

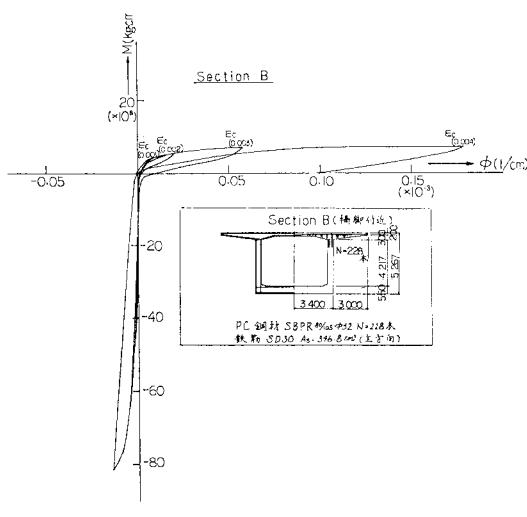
図-30 モーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係曲線
(H 橋 A Section)図-31 モーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係曲線
(H 橋 B Section)

図-30 は Section Aにおいて前記プログラムにて、上縁、下縁ひずみが $\epsilon_c=0.001, 0.002$ になるまで正・反繰返し応力を受けた状態を計算したものである。また、図-31 は Section Bにおいて同様に、上縁、下縁ひずみが $\epsilon_c=0.001, 0.002, 0.003, 0.004$ になるまで正・反繰返し応力を受けた状態の $M-\phi$ 履歴応答を数値計算し、図に表わしたものである。表-7 に Section A および Section B のモーメント耐力、部材曲げ剛性を示す。

Section A について側径間の正の曲げモーメントによって発生する引張応力を打ち消すように PC 鋼材が断面の下側に集中して配置されており、プレストレスによる曲げモーメントと同じ向きの曲げ応力に対しては断面耐力がきわめて小さく、すぐに降伏、圧縮破壊することを示している。ちなみに Section A については負の曲げモーメント耐力／正の曲げモーメント耐力＝1/6.5、Section B については正の曲げモーメント耐力／負の曲げモーメント耐力＝1/10.7 程度となっている。したがって、H橋の振動モードについて考察すると、面内 1 次モードは実際上は上部工では 図-32 の、破線または一点鎖線のようになり、線形解（実線）とは異なることが予想され、振動解析においてはこの点を考慮に入れる必要がある。以上のように、PC 部材では PC 鋼材の効率的な使用のために断面団心から偏心させて配置する場合が多い。

4. 結 論

(1) PC, RC 部材 $M-\phi$ 理論数値解析結果は実験値によく整合しており、実用の目算がたった。大ひずみ应力下のひびわれ以後の載荷履歴における数値計算においては曲率変位が実験値よりも大きめに出る傾向にあり、これは 図-1(a) に示すとおり、実験値では曲率変位が

表-7 H 橋主桁部材剛性とモーメント耐力

	Section A	Section B
部材剛性	$EI = 2.02 \times 10^{14} \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ $EI' = 7.86 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$	$EI = 5.26 \times 10^{12} \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ $EI' = 1.11 \times 10^{15} \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$
モーメント耐力	$M_{posi} = 2.6 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ $M_{negi} = 3.9 \times 10^4 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$	$M_{posi} = 7.02 \times 10^8 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ $M_{negi} = 8.07 \times 10^9 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$

($1 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2 = 9.8 \text{ N}\cdot\text{cm}^2, 1 \text{ kgf}\cdot\text{cm} = 9.8 \text{ N}\cdot\text{cm}$)

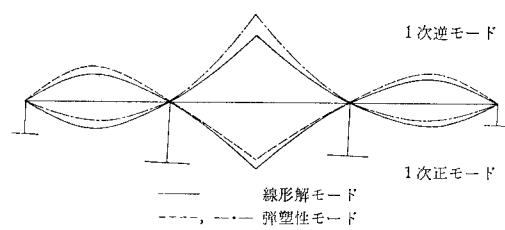


図-32 線形解振動モードと弾塑性モード

“ひびわれ断面”と“ひびわれなき断面”との平均値的なものが結果として測定されているのに対して、数値計算では“ひびわれ断面”について計算しているためであると考えられる。鉄筋の1サイクルの正・反加力における応力-ひずみスケルトン曲線は図一(b)の完全弾塑性履歴性状を示すが、正・反繰返し載荷状態では特に降伏応力以後のひずみ硬化による Bauschinger 効果を無視しない(図一(b)参照)。

(2) 試算断面検討の結果、RC 部材は PC 部材に比較して部材断面の回転能力で 1.4 倍、断面ダクティリティーは 2.4 倍、エネルギー吸収能力に起因する減衰性能は 14.5 倍であり、耐震性に優れている。中間の部材(プレストレス係数 $r : 0 < r < 1$)は上記の中間の性能を有する。しかし、その反面 PC 部材は復元力特性に優れ、 $M-\phi$ 履歴特性において、原点復帰性能がある。

(3) 上記断面検討の結果、RC 部材では載荷履歴の 1 サイクルに消費されるエネルギー中、鉄筋の分担する比率は 70%，また PC 部材では同様に PC 鋼材が分担する比率は 20% 程度で、鉄筋はエネルギー吸収に貢献する材料であるといえる。

(4) PC 長大実橋の主要 2 断面の $M-\phi$ 履歴応答特性を計算した結果、荷重が正→反あるいは反→正に逆転する時点で部材剛性が大きく変化するバイリニヤーの性状を示し、支点付近断面においては $M-\phi$ 関係曲線の勾配から正の曲げ応力時の曲げ剛性は負の曲げ応力時の 1/211 程度であり、 $\epsilon_c=0.004$ (コンクリート圧縮破壊)まで正・反載荷した状態を計算した $M-\phi$ 関係曲線より正の曲げモーメント耐力/負の曲げモーメント耐力 = 1/10 である。これは PC 鋼材の主筋断面団心からの偏心配置が原因であると考えられ、PC 鋼材配置側の曲げ応力に対して、きわめて耐力が小さく、すぐに部材降伏することを示している。

PC 長大橋の弾塑性応答解析上この影響を考慮に入れる必要がある。

5. あとがき

数値解析プログラムは当社所有の FACOM V を用いて計算したものであり、載荷実験結果は芝浦工業大学土木工学科で行った未発表の実験結果の一部を借用したものである。

この研究には終始、当社猪股副社長の懇切なご指導、ご教示を賜わり、また実験結果の一部の使用を許可下さい、ご指導を賜わった芝浦工業大学 加藤助教授には誌上を借りて御礼申し上げます。論文をまとめるにあたって名古屋大学土木工学科 島田教授の懇切なご指導をいただいたことを御礼申し上げます。研究の機会を与えて下さった(株)日本構造橋梁研究所の皆様方、数値計算にあたって当社酒井氏のご助力に感謝致します。なおこれは「第 2 回齊藤記念プレストレストコンクリート技術奨励金」授与研究の一環として行ったことを付記する。

参考文献

- 1) Aoyama, H. and N. Noguchi : Mechanical Properties of Concrete Under Load Cycles idealizing Seismic Actions, AICAP-CEB Symposium Rome, 1979.
- 2) Blakeley, R.W.G. : Ductility of Prestressed Concrete Frames Under Seismic Loadings, thesis presented to the University of Canterbury, at Christchurch, New Zealand, in 1971, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- 3) 猪股俊司 : FIP Calgary Symposia 1984 (予定).
- 4) Blakeley, R.W.G. and R. Park : Prestressed Concrete Sections With Cyclic Flexure, Journal of the Structural Division, Vol. 99, No. ST 8, August 1973.
- 5) 松本公典 : 正反繰返し荷重を受ける PC(RC) 部材のモーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係の理論数値解析について、プレストレストコンクリート, Vol. 23, No. 3, May 1981.

(1982.2.18・受付)