

## 材料特性を考慮した PC, RC 構造の非線形動的解析

松 本 公 典\*

## 1. ま え が き

前回<sup>1)</sup>の論文では PC, RC および PRC 部材のモーメント-曲率 ( $M-\phi$ ) 関係の理論数値解析プログラムの開発とその概要について述べた。実験値との整合性を確かめ、若干の数値計算例とともに PC, RC および PRC 部材の  $M-\phi$  履歴応答特性、変形性能を試算し、その応用性を示した。また、PC 長大実橋の主桁の主要 2 断面の  $M-\phi$  応答特性を計算し、PC 鋼材の断面図心からの偏心配置による正、反応答における部材剛性の非対称性を示し、非線形動的応答解析においてその点を考慮に入れなければならないことを指摘した。

ここでは、コンクリート部材の応力ヒステリシス挙動を観察することにより、構造物の地震時におけるコンクリート部材の非線形応答特性を考慮した非線形解析のための PC, RC 部材の応答挙動と部材剛性の適正なモデル化を検討し、基本的な問題として 1 自由度の構造系において、それぞれ鉄筋機械的比、PC 鋼材鉄筋機械的比の大小ともなう応答の相違を実記録地震波 (エルセントロ波, N-S 成分, 1940) を入力することにより解析研究した。

$M-\phi$  応答モデルに関する既応の研究では、RC 部材については武藤の Degrading Tri-linear Model やこれと多少法則性を異にする武田の提案するモデルなど直線で近似させるモデルのほかに、Blakeley and R. Park<sup>2)</sup>の提案する Ramberg-Osgood (R-O) Model を応用したものなど多数ある。本数値計算結果によると、RC 部材は軸力が無い場合、武藤モデルによく符号しており、非線形動的応答解析においてはこのモデルを採用した。PC 部材については Blakeley and R. Park<sup>3)</sup>の提案するモデルや Spencer, R.A.<sup>4)</sup>の提案するモデルのように定常状態では一定幅の 3 本の直線に置き換えるモデル等があるが、数値計算の結果、PC 部材は Spencer のモデルに近似されることが判明したので、簡便で合理的なこのモデルを採用した。

また、今後の PC 長大橋の非線形動的応答解析のための基礎資料に資するため、上記 PC 長大実橋において主橋脚主要 3 断面の  $M-\phi$  応答特性を試算し、その性状を検討した。その性状は RC 部材であるにもかかわらず

\* (株) 日本構造橋梁研究所

らず、上部工と躯体自重による軸力の存在のために PC 部材のごとく、 $M-\phi$  関係の正反繰返し性状は、応力逆転時に原点復帰の復元力特性があることを示している。

2. PC, RC 部材の  $M-\phi$  履歴応答モデルに関する既応の研究

近年、構造物の振動解析を実地震波加速度を入力することにより電子計算機を使用し、盛んになされているが、部材復元力特性はかなり理想化した線形関係であり、それなりに知見を与えてはいるが、昨今の研究により部材の線形的取扱いと非線形との間で応答の相違が指摘されている。特に前項で指摘したように、PC 部材の PC 鋼材偏心配置の原因による部材の  $M-\phi$  履歴の正反非対称挙動にもとづく応答の線形解との相違は顕著であると考えられる。

PC, RC 部材の応答履歴特性に関する実験・解析研究については過去、内外に多くの実例をみる。また、応答履歴にともなう部材剛性の理想化には種々のモデルが提案されているが、主なものをあげると以下のようである。

2.1 K.J. Thompson and R. Park のモデル<sup>2)</sup>

(図-1 参照)

## (1) PC 部材の理想化

Blakeley and R. Park は、履歴モデルの理想化に関して、次のように提案している。その法則性は次の 3 段階に分けられる。

## &lt;第 I 段階 (Stage I)&gt;

最初の載荷においては初期剛性  $K_e = M_{cr}/\phi_{cr}$  で  $I_p$  点まで進む。ここに、 $M_{cr}$ : ひび割れモーメント、 $\phi_{cr}$ : ひび割れ曲率。 $I_p$  点をこえてさらに載荷すると、剛性は  $K_1$  になる。 $I_p$  をこえてから除荷するときは点 ( $M_{cr} - M_{li}$ ,  $\phi_{cr}$ ) を目指す。なお、除荷時の点の座標 ( $M_{cr} - M_{li}$ ,  $\phi_{cr}$ ) は図-2 のごとく引張側縁応力が 0 となるときの Decompression Moment と  $\phi_{cr}$  で表わされる。

## &lt;第 II 段階 (Stage II)&gt;

曲率が正反最大モーメント  $\pm M_u$  に対する  $\pm \phi_u$  以後は剛性は  $K_2$  になる。除荷の法則は第 I 段階と似ているが、 $M_{li}$  は減退モーメント幅  $M_{ld}$  に置換わる。変曲点  $II_u$  の座標は除荷時の曲率により決定される。

## &lt;第 III 段階 (Stage III)&gt;

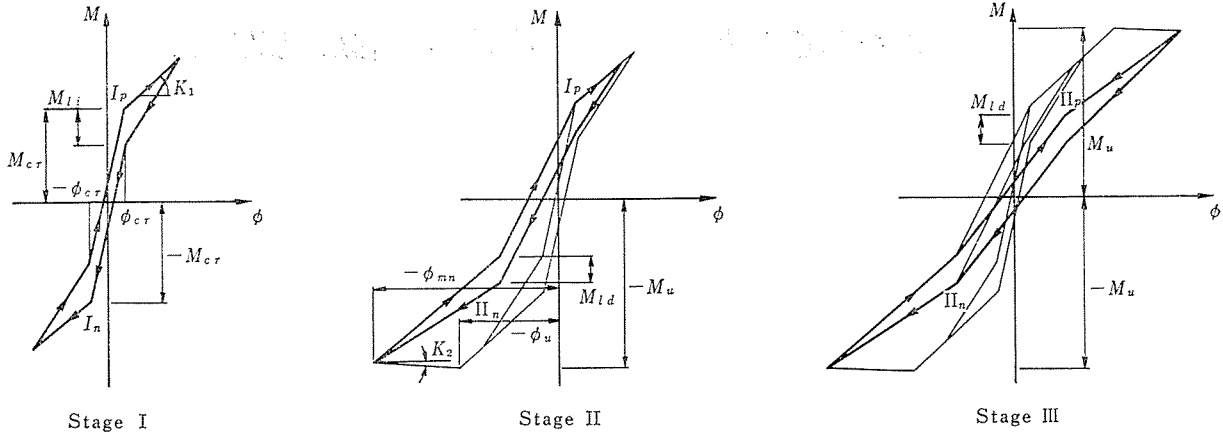


図-1 Blakeley Model

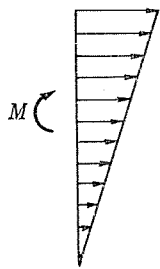


図-2 Decompression Moment

曲率が  $\pm\phi_u$  の両方をこえた時のパラメーター決定法は第II段階と同じであり、ループモーメント幅は  $M_{ld}$  である。  
 (2) RC 部材の理想化  
 RC 部材は図-3の Ramberg-Osgood 関数にしたがうと  
 している。  
 ここに、

$M_{ch}$ : 固有モーメント

$$M_{ch} = M_u \left( 1 - 0.05 \frac{\phi_m}{\phi_y} \right)$$

$\phi_m$ : 最大負荷曲率

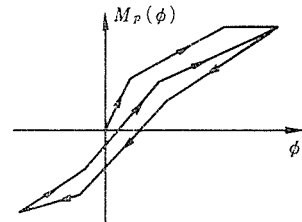
$\phi_y$ : 降伏曲率

$r$ : Ramberg-Osgood パラメーター

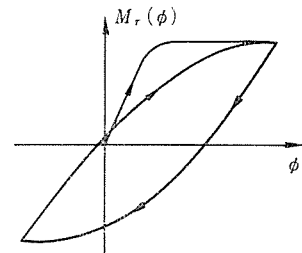
(3) PC と RC の中間の部材

PC と RC の中間の部材は (1) で定義される履歴特性と (2) で定義される特性とのある係数を乗じた組合せとして表わされる。すなわち、図-4 (a) に示されるプレストレストコンクリート履歴応答関数を  $M_p(\phi)$ , (b) の鉄筋コンクリート応答関数を  $M_r(\phi)$  とすると、中間部材応答関数  $M(\phi)$  は次のように定義される。

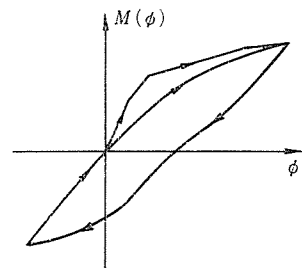
$$M(\phi) = \alpha M_r(\phi) + \beta M_p(\phi) \dots\dots\dots(1)$$



(a) Prestressed Concrete System



(b) Reinforced Concrete System



(c) Partially Prestressed Concrete System

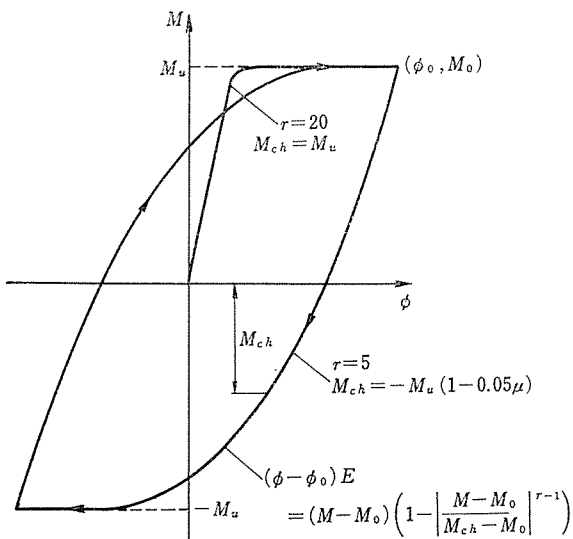


図-3 RC 部材  $M-\phi$  スケルトンカーブ (Ramberg Osgood Model)

図-4 パーシャルプレストレストコンクリートモデル

$$\alpha + \beta = 1 \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $\alpha, \beta$  は以下のように定義される。

$$\alpha = \frac{A_s \cdot f_{sy}}{A_p \cdot f_p + A_s \cdot f_{sy}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\beta = \frac{A_p \cdot f_p}{A_p \cdot f_p + A_s \cdot f_{sy}} \dots\dots\dots(4)$$

ただし,  $A_s$ : 鉄筋断面積  
 $A_p$ : PC 鋼材断面積  
 $f_{sy}$ : 鉄筋降伏点応力  
 $f_p$ : PC 鋼材降伏点応力

である。

2.2 Spencer R.A. のモデル<sup>4)</sup>

Spencer は PC 部材が耐震要素として用いられている高層構造物の合理的な応答解析を行うための資料を得る目的で, 9本の PC 部材を交番繰返し 載荷実験し, 部材の剛性および減衰性能の特性を明らかにした。

実験結果によると, クラック発生以後の定常状態の載荷履歴においては図-5 に示すような3つの近似的な直線と考えられる部分から成っており, ループ幅の変化は少ない。したがって, PC 部材は応答履歴は図-6 のような一定幅の Bi-linear のモデルに理想化されるとしている。

2.3 武藤の RC 部材履歴応答モデル

RC 部材の応力-変位履歴応答挙動を表わすのに 武藤

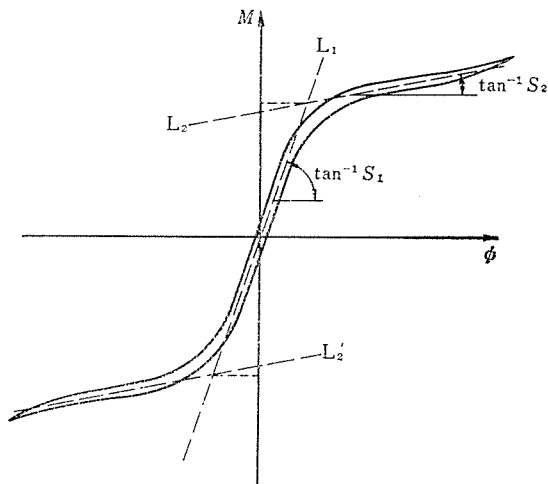


図-5 定常状態 PC 部材  $M-\phi$  履歴応答挙動

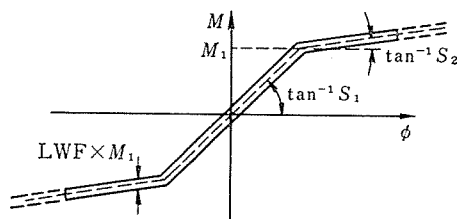
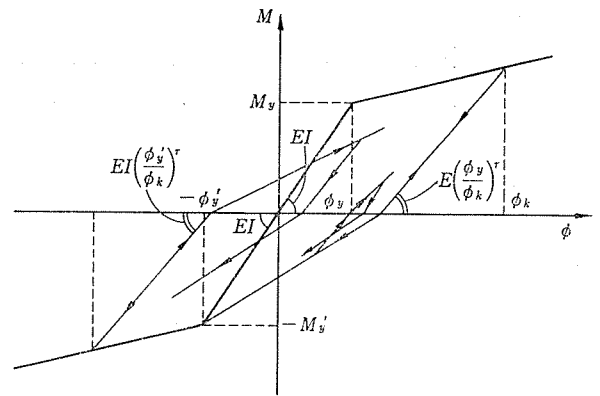
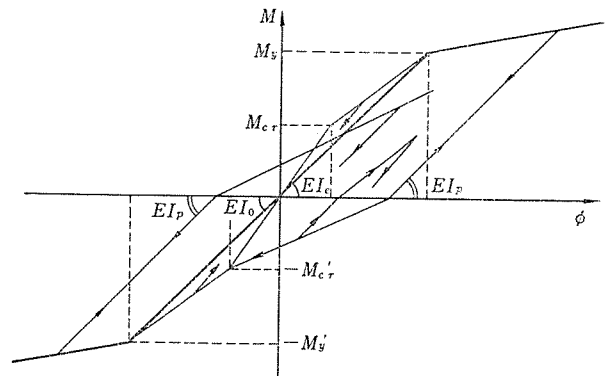


図-6 PC 部材  $M-\phi$  理想化モデル



(a) Degrading Bi-linear Model



(b) Degrading Tri-linear Model

図-7 武藤モデル

モデルは一般によく使われており, 実際の挙動によく符号している。それは図-7 に示すように以下のような法則性に従うものである。

正または負応力単調増加の際には“Bi-linear”または“Tri-linear”の挙動をし, それを処女曲線とする。加力から減力に転ずる場合には降伏点応力以前においては原点を志向し, 降伏以後は原点と降伏点応力, ひずみを結ぶ直線と同じ勾配で戻るとする。さらに反対方向に加力する場合には降伏以前は減力時と同勾配のまま反対の処女曲線に向かうものとし, 降伏以後は応力0の水平軸からは反対方向の降伏点を目指し, そのまま処女曲線上を進む。また, 減力の際には上述した法則と同様であり, さらに加力する場合には応力0の点から前回に戻った点(最大経験点)を指向し, 以下同様の挙動を繰返すものとする。

3. PC, RC 部材構造の非線形動的応答解析

繰返し応力を受ける場合の PC, RC 部材の応答履歴における非線形性の考慮は, 構造物の動的応答解析上避けて通ることはできない。この項では PC, RC 部材の  $M-\phi$  数値計算結果から, PC, RC 部材構造の非線形動的応答解析のための適正な応答モデルと履歴特性の検討

を行った。

PC, RC 部材構造の地震外力による非線形履歴応答の基本的性状の把握あるいは耐震設計のための非線形応答スペクトルの実用化の資料に資するため、図-8 のような1自由度の構造系において EL-CENTRO (N-S 成分) の実地震波加速度を入力し、非線形応答解析を行った。

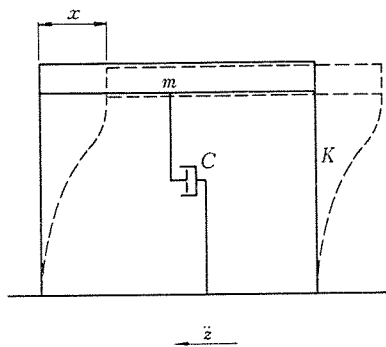


図-8 1 自由度系振動解析モデル

構造系は質量  $m$  の剛体の梁に無質量の剛性  $K$  の柱と粘性減衰機構  $C$  とから成っている。1 自由度系の振動基本式は以下のように与えられる。

$$m\ddot{x}_t + C\dot{x}_t + K_t x_t = -m\ddot{z}_t \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $m$  : 質量

$C$  : 粘性減衰定数

$K_t$  : 時刻  $t$  における有効剛性

$\ddot{x}_t$  : 時刻  $t$  における地盤との相対加速度

$\dot{x}_t$  : 時刻  $t$  における相対速度

$x_t$  : 時刻  $t$  における相対変位

$\ddot{z}_t$  : 時刻  $t$  における地震加速度

$\Delta t$  時間中は線形であるとして、これを増分形に書換えて、

$$m\Delta\ddot{x}_t + C\Delta\dot{x}_t + K_t\Delta x_t = -m\Delta\ddot{z}_t \dots\dots\dots (5')$$

系が弾性系であれば、左辺=0 で  $C=0$  とおいた非減衰自由振動の固有周期は、

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K_e}} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここに、 $K_e$  : 弾性バネ定数(初期剛性)。

粘性減衰定数  $h$  は (5) 式の右辺を 0 とおいた減衰自由振動が振動現象を起こすか否かの臨界粘性減衰定数  $C_c = 2\sqrt{mK_e}$  に対する比率で与えられ、

$$h = C/C_c = C/2\sqrt{mK_e} \dots\dots\dots (7)$$

となる。(5') 式に (6), (7) を代入して、両辺を  $m$  で割れば以下ようになる。

$$\Delta\ddot{x}_t + \frac{2\pi h}{T}\Delta\dot{x}_t + \frac{K_t}{K_e} \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}\Delta x_t = -\Delta\ddot{z}_t \quad (8)$$

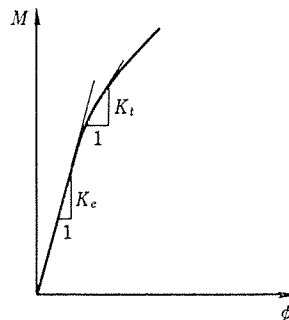


図-9 計算ステップと剛性変化

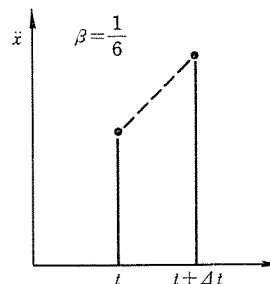


図-10 積分法と  $\beta$  値

$K_t/K_e$  は時刻  $t$  における初期弾性剛性に対する剛性比率を意味する。図-9 のように計算ステップ毎に判定する。

加速度  $\ddot{x}$  が  $t$  から  $t+\Delta t$  すなわち  $\Delta t$  時間内に線形に変化するものと仮定して、Newmark の  $\beta$  法を用い上式を積分する。図-10 のごとく  $\beta=1/6$  にとる。

$$\begin{cases} \dot{x}_{t+\Delta t} = \dot{x}_t + (\ddot{x}_{t+\Delta t} + \ddot{x}_t) \frac{\Delta t}{2} \\ x_{t+\Delta t} = x_t + \Delta t \cdot \dot{x}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \ddot{x}_t \\ \quad + \beta \cdot \Delta t^2 (\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t) \dots\dots\dots (9) \end{cases}$$

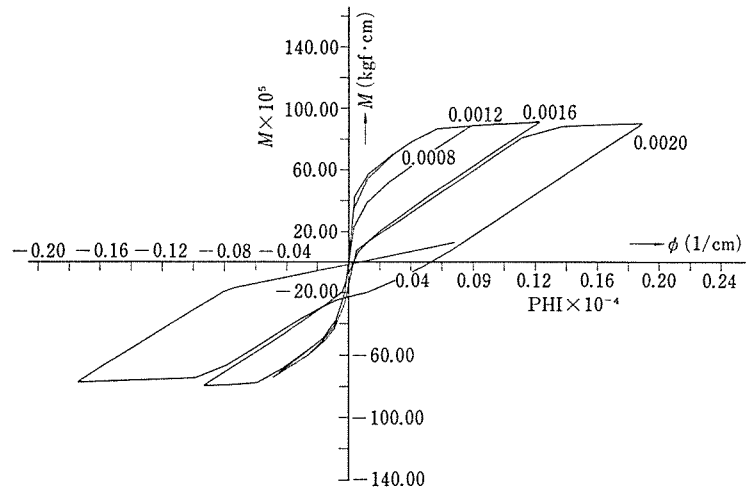
増分形に書換えると、

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}_t = \dot{x}_{t+\Delta t} - \dot{x}_t = (\ddot{x}_{t+\Delta t} + \ddot{x}_t) \frac{\Delta t}{2} \\ \quad = \Delta t \cdot \ddot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \Delta\ddot{x}_t \\ \Delta x_t = x_{t+\Delta t} - x_t = \Delta t \cdot \dot{x}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \ddot{x}_t \\ \quad + \beta \cdot \Delta t^2 (\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t) \\ \quad = \Delta t \cdot \dot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \ddot{x}_t + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \Delta\ddot{x}_t \dots\dots\dots (9') \end{cases}$$

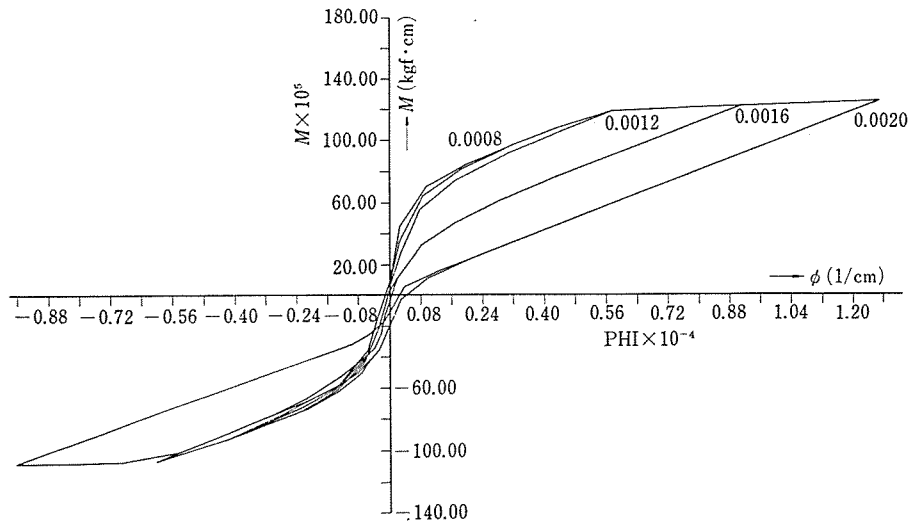
これを増分形式の振動方程式 (8) に代入する。

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{x}_t + \frac{2\pi h}{T} \left( \Delta t \cdot \dot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \Delta\ddot{x}_t \right) \\ + \frac{K_t}{K_e} \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \left( \Delta t \cdot \dot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \ddot{x}_t \right. \\ \left. + \beta \cdot \Delta t^2 \cdot \Delta\ddot{x}_t \right) = -\Delta\ddot{z}_t \end{aligned}$$

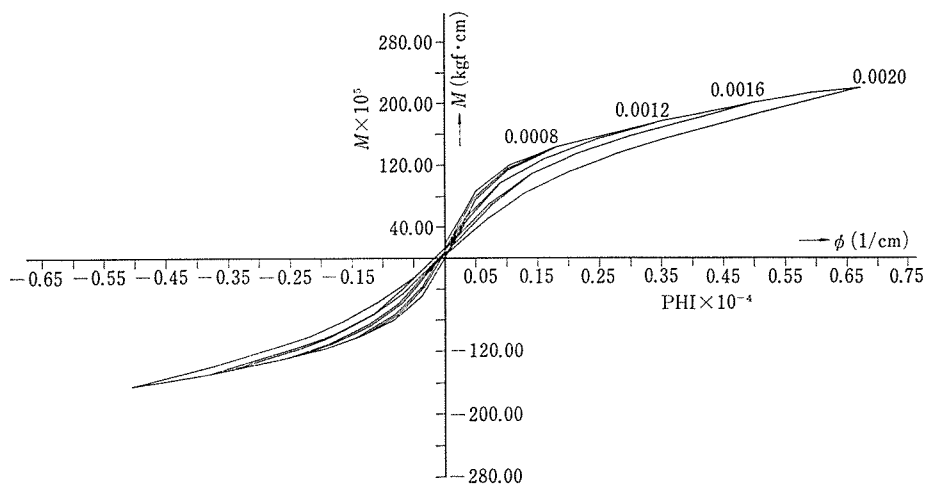
$\Delta\dot{x}_t$  で整理すると、



(1) Case 1  $w_p^* = 0.052$



(2) Case 2  $w_p^* = 0.073$



(3) Case 3  $w_p^* = 0.146$

図-11 PC 鋼材機械の比による  $M-\phi$  履歴応答曲線

$$\begin{aligned} & \left(1 + 4t \cdot \frac{\pi h}{T} + \beta^2 \cdot 4t^2\right) \Delta \ddot{x}_t = -\Delta \ddot{z} \\ & + \left(4t \cdot \frac{2\pi h}{T} + \frac{4t}{2} \cdot \frac{K_t}{K_e} \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}\right) \ddot{x}_t \\ & + 4t \cdot \frac{K_t}{K_e} \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \dot{x}_t \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

これより加速度増分  $\Delta \ddot{x}_t$  は以下のように求められ、速度、変位増分  $\Delta \dot{x}_t$ ,  $\Delta x_t$  は、それを (5') 式に代入することにより求められる。

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{x}_t &= \left(1 + 4t \cdot \frac{\pi h}{T} + \beta^2 \cdot 4t^2\right)^{-1} \\ & \left[ -\Delta \ddot{z}_t + \left(4t \cdot \frac{2\pi h}{T} + \frac{4t}{2} \cdot \frac{K_t}{K_e} \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}\right) \ddot{x}_t \right. \\ & \quad \left. + 4t \cdot \frac{K_t}{K_e} \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \dot{x}_t \right] \\ \Delta \dot{x}_t &= 4t \cdot \dot{x}_t + \frac{4t}{2} \cdot \Delta \ddot{x}_t \\ \Delta x_t &= 4t \cdot x_t + \frac{4t}{2} \cdot \dot{x}_t + \beta \cdot 4t^2 \cdot \Delta \ddot{x}_t \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

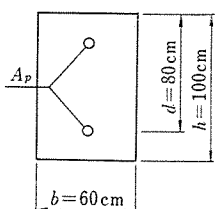
3.1 PC 部材構造の非線形動的応答解析

以下に示す PC 鋼材鉄筋機械的比の相違する 3 断面の PC 部材構造の実地震波による履歴応答挙動を観察し、部材中の PC 鋼材量の比率の大小が応答に及ぼす影響を明らかにした。

PC 部材断面で、PC 鋼材量を 3 種変化させ、PC 鋼材鉄筋機械的比の小さいものから Case1, Case 2, Case 3 とし、諸元を表-1 にまとめる。前記開発プログラムを使用し、Case 1 から Case 3 までの 3 断面の  $M-\phi$  履歴応答曲線を数値計算し、プロッターで打出したものを図-11 に示す。図-11 はコンクリート上縁および下縁ひずみが  $\epsilon_c=0.008, 0.0012, 0.0016, 0.002$  になるまで正反加力載荷した状態の  $M-\phi$  履歴応答曲線を表わしている。また、図-12 は 3 断面の定常状態の  $M-\phi$  履歴応答特性を比較したもので、コンクリート圧縮縁ひずみが  $\epsilon_c=0.0012$  になるまで、正・反加力載荷した状

表-1 PC 鋼材種類と PC 鋼材機械的比

	Case 1	Case 2	Case 3
PC 鋼材種類	SBPD 130/145	同左	同左
PC 鋼材断面積 $A_p$ (cm <sup>2</sup> )	5.923	8.322	16.644
PC 鋼材鉄筋機械的比 $w_p^*$	0.052	0.073	0.146
プレストレス導入レベル $\sigma_{p0}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	21.7	30.5	61.0



$f_c = 450 \text{ kg/cm}^2$   
 $f_p = 19000 \text{ kg/cm}^2$   
 プレストレス導入レベル  $\sigma_{p0}; \sigma_{p0} = \frac{P}{b \cdot h}$   
 PC 鋼材鉄筋機械的比  $w_p^*; w_p^* = \frac{A_p \cdot f_p}{b d \cdot f_c}$

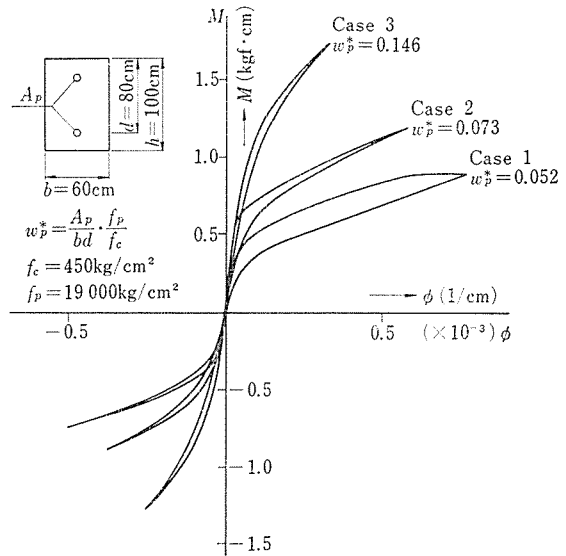


図-12 PC 鋼材量による定常状態  $M-\phi$  履歴応答

態を計算したものである。PC 鋼材鉄筋機械的比が大なるほど曲げ剛性、破壊抵抗曲げモーメントは増加し、その反面、断面の回転能力は減少するという傾向を示している。

部材の履歴応答挙動は図-12 に示すように Spencer の“Bi-linear”のモデルに理想化され、 $M-\phi$  関係は 3 つの勾配 (曲げ剛性 EI) の直線から成る。図-13 のごとく、 $M-\phi$  関係の初期勾配 (初期曲げ剛性) を  $S_1$ 、部材降伏後の 2 次勾配を正、反両方向にそれぞれ  $S_2, S_3$  とし、3 断面についてそれらを計算すると、表-2 のようである。また、定常状態の  $M-\phi$  履歴応答曲線から等価粘性減衰定数を計算すると、3 断面について表-2 のようであり、断面中の PC 鋼材量が増加するほど減衰定数は小さくなり、減衰性能は劣ってゆく傾向にある。

上記の部材定数と等価粘性減衰定数を用い、PC 部材構造の非線形動的応答解析を行った。構造諸元、解析条件は以下のとおりである。

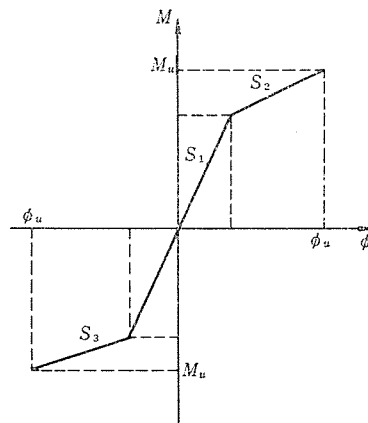


図-13 PC 部材理想化モデル

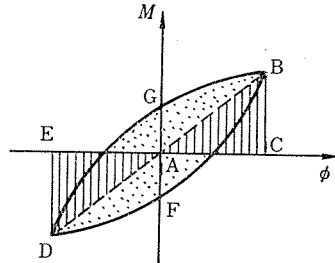
表-2 PC 部材剛性と等価粘性減衰定数

	Case 1	Case 2	Case 3
初期剛性 $S_1$ (kgf·cm <sup>2</sup> )	$7.50 \times 10^{11}$	$9.00 \times 10^{11}$	$1.26 \times 10^{12}$
2次剛性 $S_2$ ( " )	$7.12 \times 10^{10}$	$9.40 \times 10^{10}$	$1.96 \times 10^{11}$
" " $S_3$ ( " )	$7.50 \times 10^{10}$	$9.78 \times 10^{10}$	$1.66 \times 10^{11}$
等価粘性減衰定数 $h$	0.093	0.038	0.019
断面回転能力 $\phi_u$	$0.19 \times 10^{-3}$	$0.128 \times 10^{-3}$	$0.068 \times 10^{-3}$

$S; S=EI$

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{面積 BFDG}}{\Delta ABC + \Delta ADE}$$



- 1) 質点質量  $m = 4.5 \text{ t}$
- 2) 部材高さ  $H = 15 \text{ m}$
- 3) 地震波 EL-CENTRO 波 N-S 成分  
最大入力加速度 500 gal

応答結果を示すと、質点の応答加速度および応答変位の時経歴はそれぞれ図-14、図-15 のようであり、PC 鋼材鉄筋機械的比が増加するほど、応答加速度の最大値はほぼ直線的に増加する傾向にある。図-16 に示すとおり、最大応答値で機械的比が3倍になると加速度は約3倍の応答を与えている。変位に関しては PC 鋼材鉄筋機械的比に対して相関がみられなく、それは地震波の特性が入っているためと思われる。

### 3.2 RC 部材構造の非線形動的応答解析

鉄筋機械的比の相違する3断面の RC 部材構造の大地震波による非線形履歴応答解析を行い、部材の鉄筋量の大小が応答に及ぼす影響を明らかにし、耐震設計のための一資料とする。

RC 部材断面で表-3 に示すように鉄筋量を3種類変

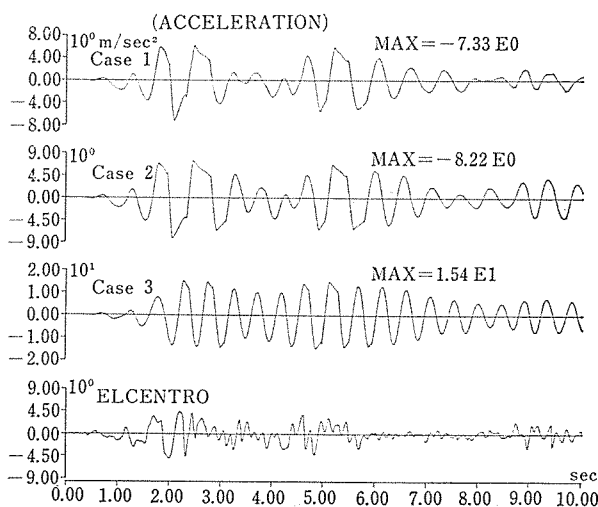


図-14 PC 部材加速度応答時経歴

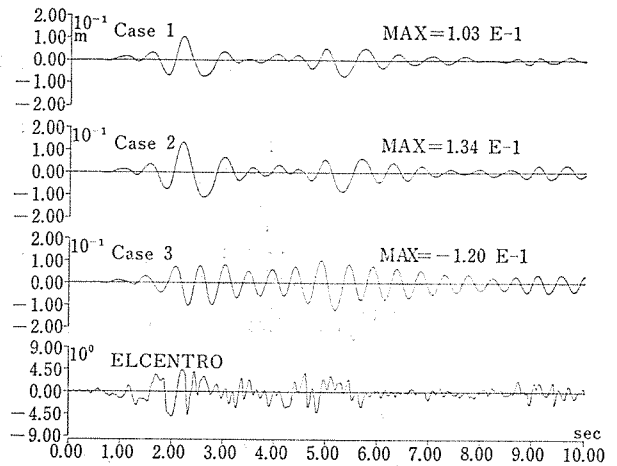


図-15 PC 部材変位応答時経歴

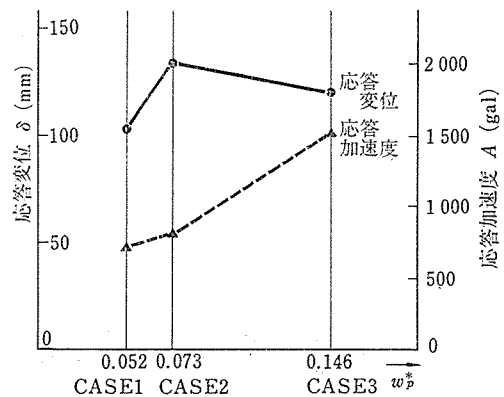
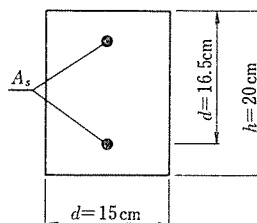


図-16 PC 鋼材機械的比と最大応答値

表-3 計算ケースと鉄筋機械的比

	Case 1	Case 2	Case 3
鉄筋種類 SD30	D16	D19	D22
鉄筋断面積 $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	5.958	8.595	11.613
鉄筋機械的比 $w_s^*$	0.205	0.295	0.395



$$w_s^* = \frac{A_s}{bd} \cdot \frac{f_{sy}}{f_c}$$

$$f_c = 450 \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_{sy} = 3827 \text{ kgf/cm}^2$$

化させた RC 部材構造の非線形動的応答解析を行った結果を以下に示す。

図-17 は表-3 に示した Case 1~Case 3 の3断面の  $M-\phi$  履歴応答曲線を表わし、コンクリートの上縁および下縁ひずみが  $\epsilon_c = 0.001, 0.0015, 0.002, 0.0025$  になるまで正・反載荷した状態を計算し、プロッターで打出したものである。図-18 は3断面の変形性能を対比するために部材が圧縮破壊するまで一方向に単調に荷重を増加させた状態を計算したものである。鉄筋機械的

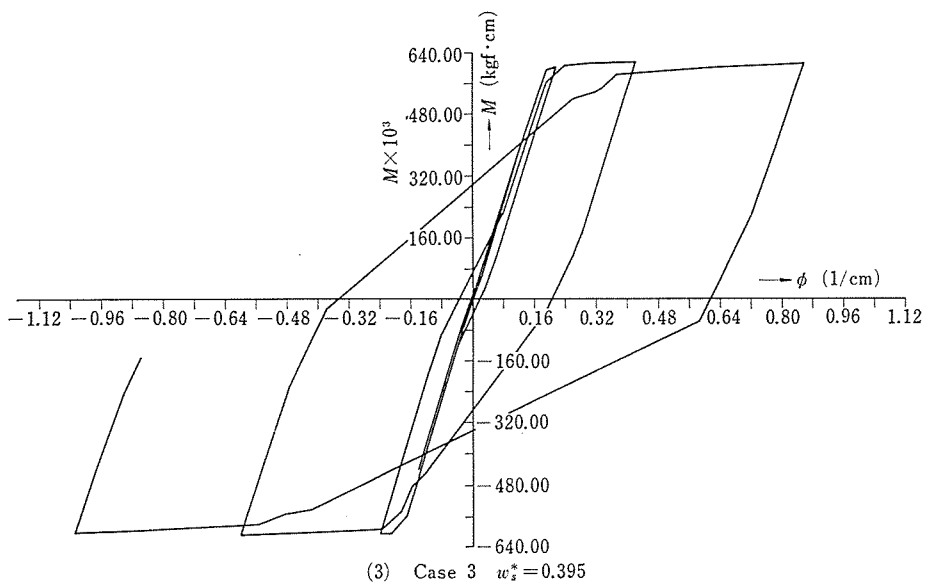
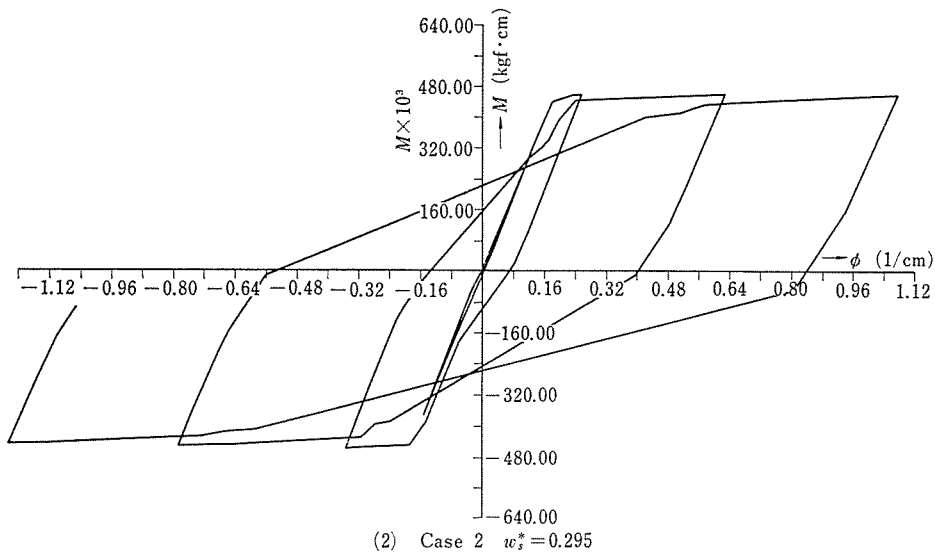
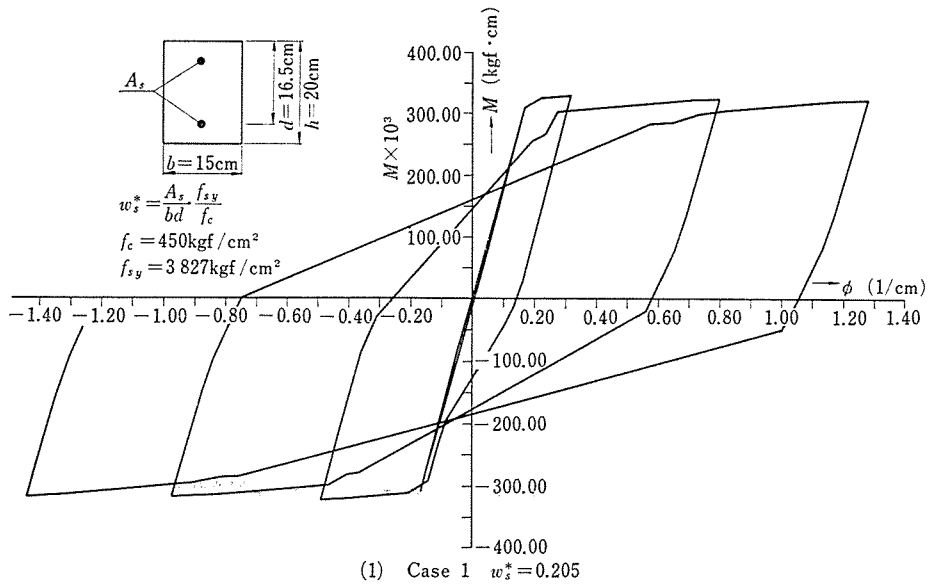
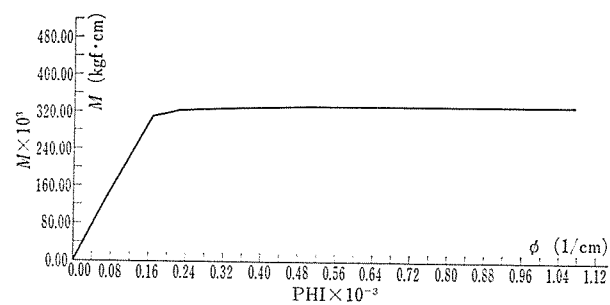


図-17 鉄筋機械的比の大小による RC 部材断面  $M-\phi$  履歴応答曲線

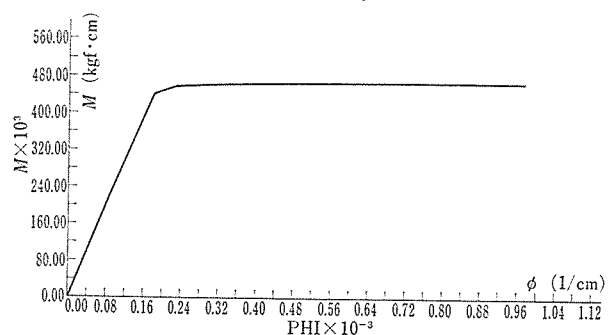


表-4 ダクティリティーと等価粘性減衰定数

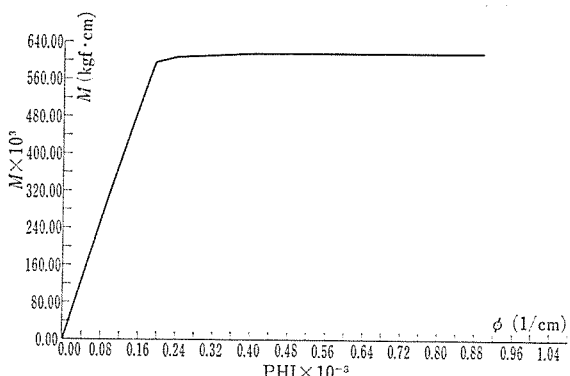
	Case 1	Case 2	Case 3
断面ダクティリティー	5.4	4.8	4.4
断面回転能力 $\phi_u$ (1/cm)	$1.08 \times 10^{-3}$	$0.96 \times 10^{-3}$	$0.88 \times 10^{-3}$
等価粘性減衰定数 $h$	0.214	0.160	0.066



(1) Case 1  $w_s^* = 0.205$



(2) Case 2  $w_s^* = 0.295$



(3) Case 3  $w_s^* = 0.395$

図-18 鉄筋機械的比の大小による  $M-\phi$  単調増加曲線

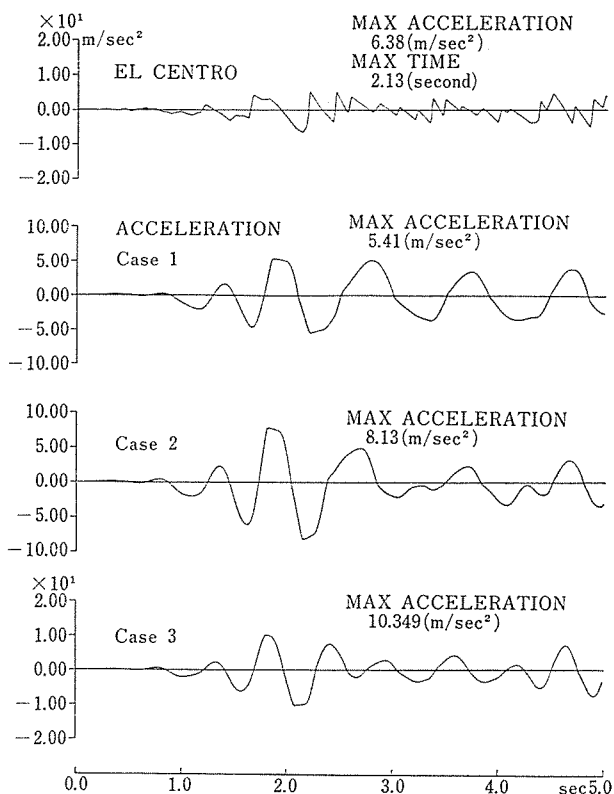


図-20 RC 部材加速度応答時経歴

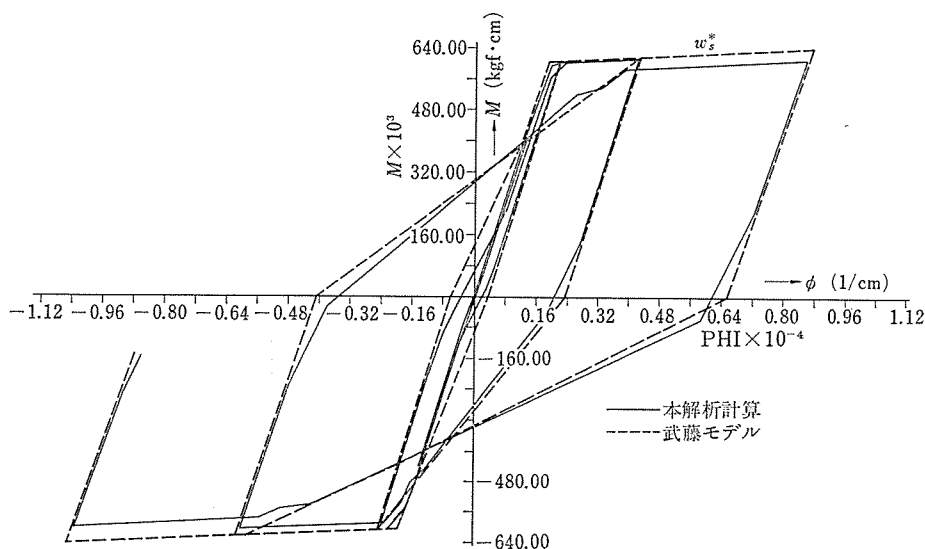


図-19 RC 部材加速度応答時経歴

報 告

比が増加するほど部材の破壊抵抗モーメントは増大し、反面、断面の回転能力、断面ダクティリティーは減少する。 $M-\phi$  履歴応答曲線から等価粘性減衰定数を計算すると、表-4 のようであり、断面の鉄筋量が増加するほど減衰定数は小さくなる。

以上の部材定数と等価粘性減衰定数を使用し、RC 部材構造の非線形動的応答解析を行った。部材の  $M-\phi$  履歴応答特性は図-19 に対比して示すとおり、武藤の“Degrading Tri-linear”モデルに近似している。解析条件は以下のとおりである。

- 1) 質点質量  $m=2t$
- 2) 部材高さ  $H=3m$

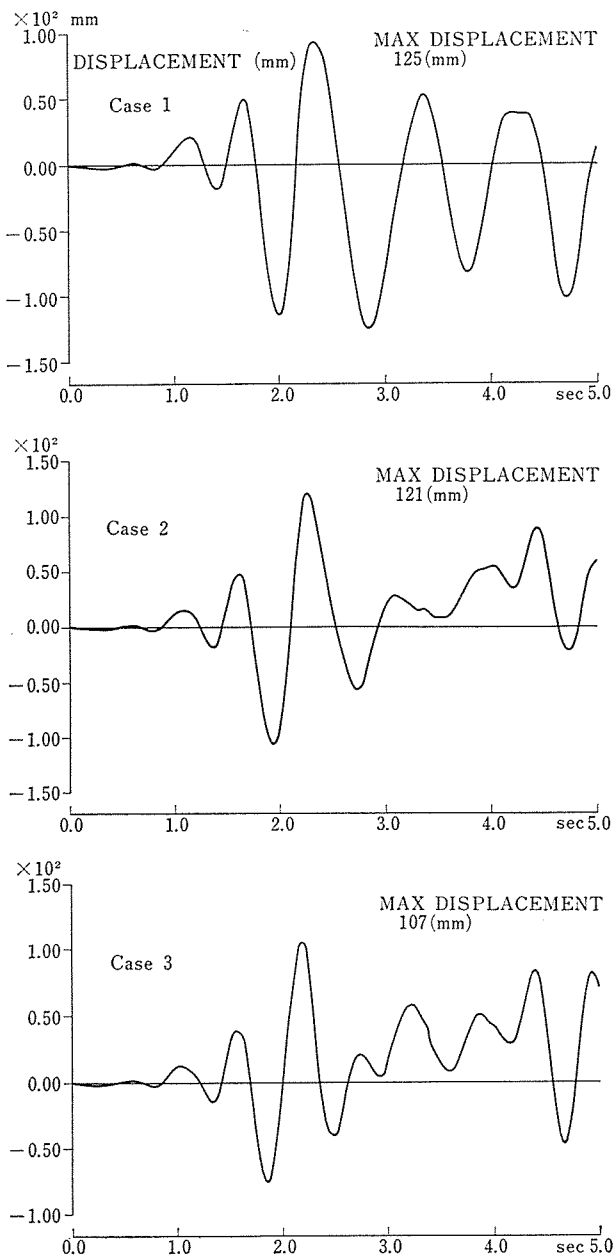


図-21 RC 部材変位応答時経歴

3) 地震波 EL-CENTRO 波 N-S 成分  
最大入力加速度 650 gal

応答結果を示すと、質点の応答加速度および応答変位の時経歴はそれぞれ図-20、図-21 のようであり、鉄筋機械的比が増加するほど、応答加速度の最大値は増加し、逆に変位応答の最大値は減少する傾向にある。最大応答値は図-22 に示すとおり、鉄筋機械的比が2倍になると最大応答加速度は約2倍、最大応答変位は約1/1.14の応答を与えている。

構造物を耐震的にするためには構造部材を耐力で抵抗させるか、変形性能で導入エネルギーを吸収するかの2通りの手法がある。図-23の斜線部は線形解における導入エネルギーを表わし、弾塑性々状にともなう塑性変形による等価なエネルギーにより導入エネルギーを吸収するためには面積が等しくなるだけ変形能力が要求される。Case 1, Case 2, Case 3の鉄筋量による断面部材の非線形応答計算の結果、 $M-\phi$  応答履歴曲線は図-24に示されるようである。 $M-\phi$  履歴応答曲線の半振幅性状は図-25のようであり、ダクティリティーでCase 1の断面はCase 3の1.83倍、回転能力で1.65倍の変形性能が要求される。

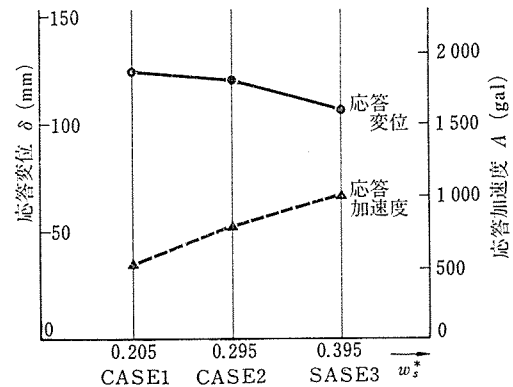


図-22 鉄筋比による最大応答値比較

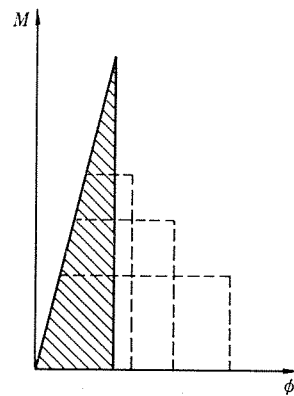
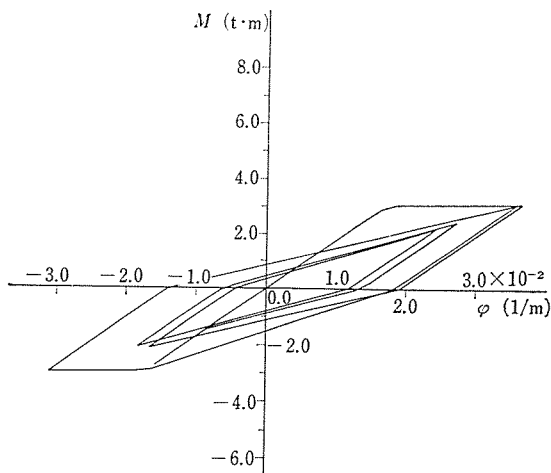
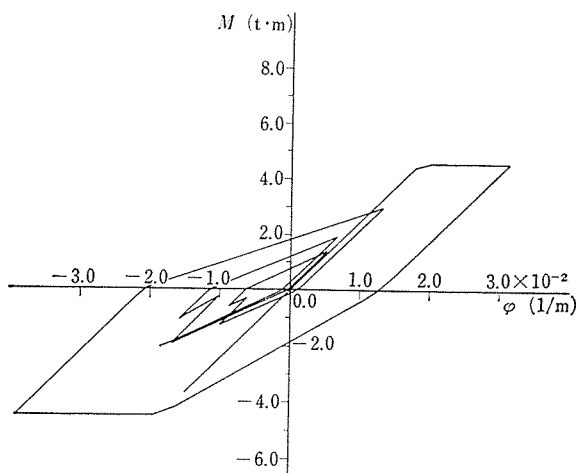


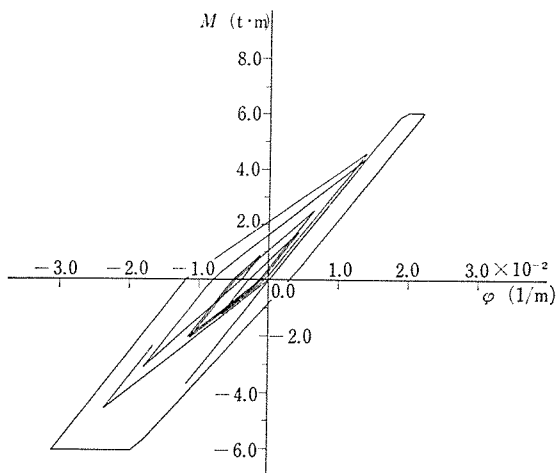
図-23 鉄筋機械的比の大小と弾塑性等価エネルギー



(1) Case 1  $w_s^* = 0.205$



(2) Case 2  $w_s^* = 0.295$



(3) Case 3  $w_s^* = 0.395$

図-24 鉄筋比の大小による  $M-\phi$  履歴応答曲線

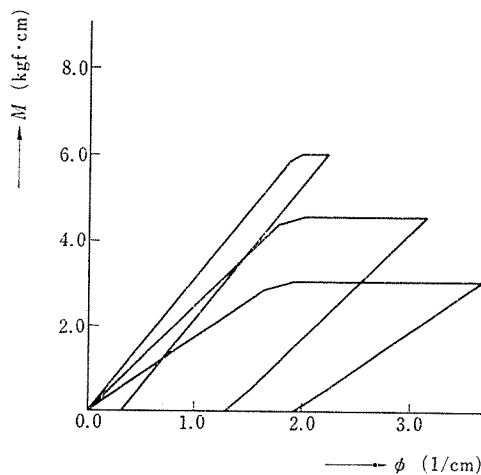


図-25 鉄筋機械的比の大小による半サイクルエネルギー吸収過程

#### 4. PC 長大実橋の橋脚部材の $M-\phi$ 履歴特性

前回<sup>1)</sup>の論文では、PC 長大橋の材料特性を考慮した非線形応答解析のための一資料とするべく、PC 長大実橋において PC 主桁の  $M-\phi$  応答曲線を計算し、PC 鋼材偏心配置が原因による正・反応答性状の非対称性を動的応答解析において考慮しなければならないことを指摘した。

ここでは上記 PC 長大実橋の橋脚部材断面の  $M-\phi$  応答履歴特性を数値計算し、その性状把握と変形性能、減衰性能を検討した。図-26 は H 橋の概要を示したものであり、図-27 は数値計算した P<sub>3</sub> 橋脚の横断面と検討断面位置を示している。検討 3 断面の配筋状態は図-28 のようである。3 断面について前記開発プログラムを使用し、 $M-\phi$  履歴応答曲線を数値計算し、プロッターにて図化したものを示すと図-29 のようであり、上縁および下縁ひずみが  $\epsilon_c = 0.001, 0.002, 0.0035$  になるまで正・反繰返し載荷し、戻した状態を計算したものである。その性状は図-29 に示すように RC 部材であるにもかかわらず、減力時に原点復帰の傾向を示す。それは橋脚部材は上部工重量と躯体自重による軸力部材で、軸力の存在が  $M-\phi$  履歴応答特性において加力から減力に転ずる際に復帰せしめる原因である。しかしながら、その性状は RC 部材特有の横太りで減衰性能が良い傾向を示している。等価粘性減衰定数、断面ダクティリティーを計算すると表-5 のようである。なお、等価粘性減衰定数は上記 3 サイクルの  $M-\phi$  履歴応答曲線より  $\epsilon_c = \pm 0.001$  の正・反ひずみを受けた状態(1 回目のサイクル)から求めたものである。粘性減衰定数は  $h = 0.10 \sim 0.15$  で比較的減衰性能が良い。また、断面ダク

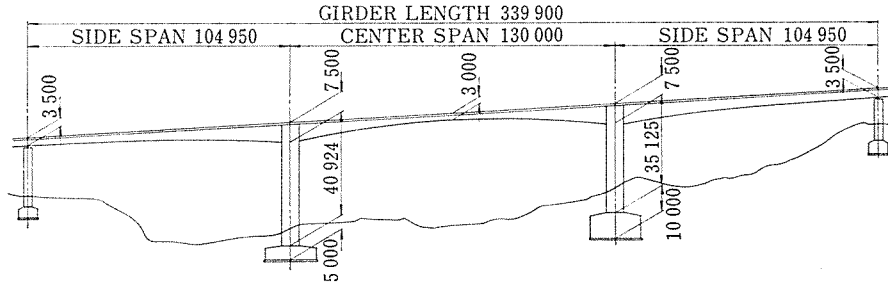


図-26 H橋概要図

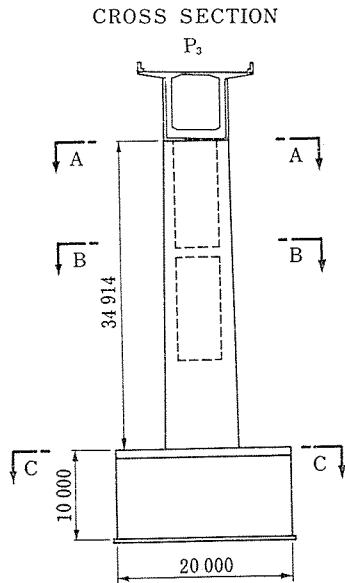


図-27 H橋 P<sub>3</sub> 橋脚横断面と検討断面

表-5 ダクティリティーと等価粘性減衰定数

	SECTION-A	SECTION-B	SECTION-C
断面ダクティリティー	11.9	9.8	8.4
断面回転能力 $\phi_M$ (1/cm)	$0.57 \times 10^{-4}$	$0.47 \times 10^{-4}$	$0.34 \times 10^{-4}$
等価粘性減衰定数 $h$	0.146	0.153	0.097

ティリティー  $\phi_u/\phi_y=8.4\sim 11.9$  で変形性能に富んでいる。

### 5. 結 論

本解析, 研究により得られた知見を要約すると, 以下のようである。

- 1) PC, RC 構造物の部材の応答履歴特性を考慮した非線形応答解析を行ううえで, 部材の履歴応答特性は, RC は武藤の Degrading Tri-linear Model, PC 部材は Spencer の提案する Bi-linear 型モデルに置換えて実用上差支えないことがわかった。
- 2) PC および RC 部材構造の実地震波による非線形応答解析を行ったところ, RC 構造においては鉄筋機械的比が増加するほど部材断面の回転能力, ダクティリティー, 減衰性能が減少し, その結果, 変位応答は減少するが加速度応答は増大する。試算断面部材では鉄筋機械的比が 2 倍になると加速度応答の最大値は約 2 倍の結果を与えている。PC 構造においては PC 鋼材鉄筋機械的比が増加するほど, 部材断面の回転能力, ダクティリティー, 減衰性能が劣ってゆく傾向にある。PC 鋼材鉄筋機械的比が増加するほど, 加速度応答はほぼ直線的に増加する。

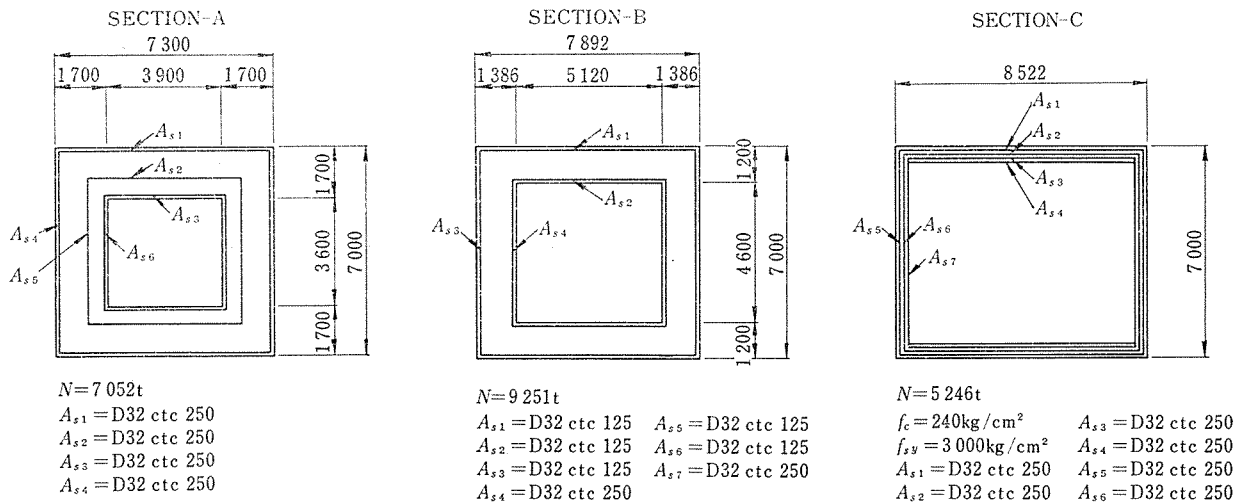
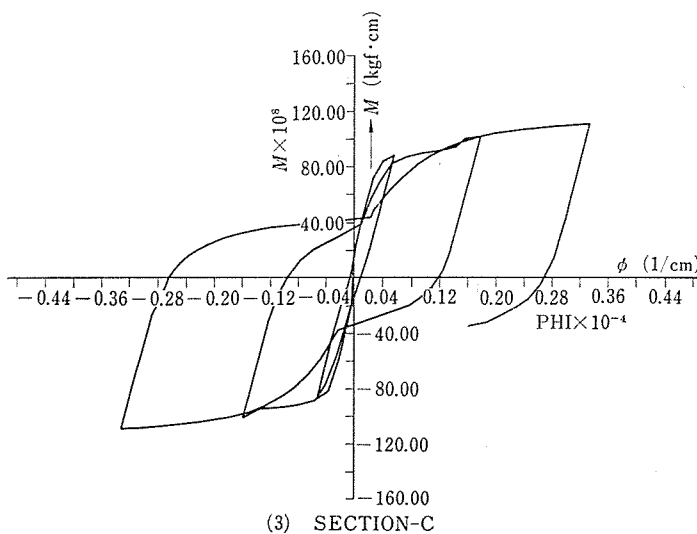
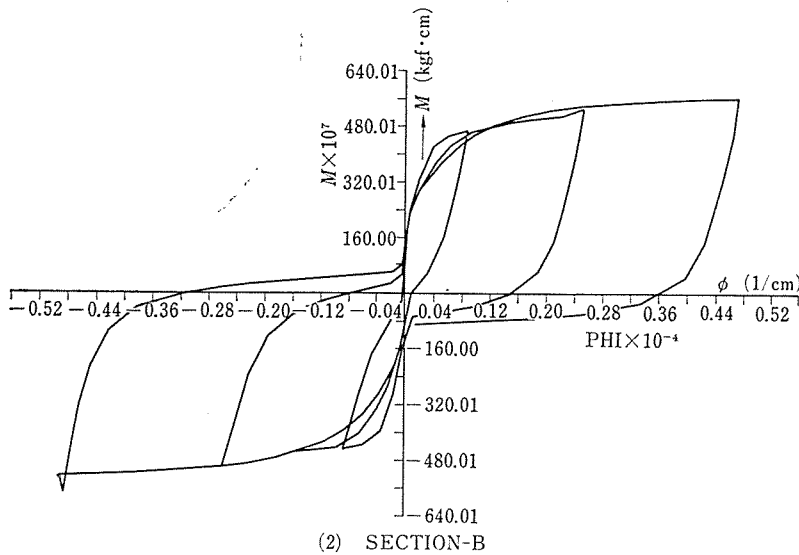
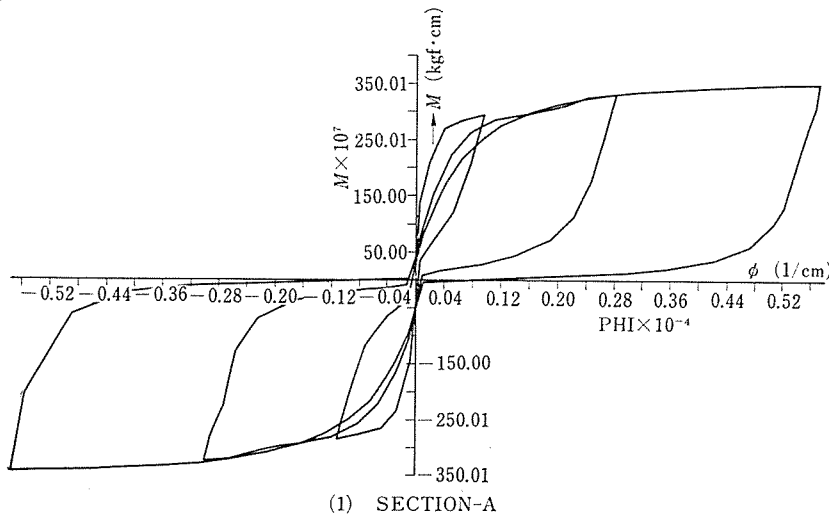


図-28 P<sub>3</sub> 橋脚検討断面配筋図



図一29 P<sub>3</sub> 橋脚断面 M-φ 履歴応答曲線

3) PC 長大実橋の橋脚部材断面の  $M-\phi$  応答履歴特性を理論数値解析した結果、RC 部材であるにもかかわらず、加力状態から戻るときに原点復帰する性状を示す。これは上部工重量と躯体自重とによる軸力の存在が原因である。形状は RC 部材特有の横太りで減衰性能が良い傾向を示しており、ちなみに  $\epsilon_c=0.001$  ひずみ変形時の等価粘性減衰定数を主要3断面で試算すると  $h=0.10\sim 0.15$  となっている。また、断面曲率ダクティリティーは  $\phi_u/\phi_y=8.4\sim 11.9$  であり、変形性能に富んでいる。

なお、数値計算にあたっては PC, RC 部材の  $M-\phi$  応答特性については当社所有の FACOM-V を使用し、PC, RC 構造の非線形動的応答解析については日本電子計算(株)の協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) Kevin J. Thompson and Robert Park : Seismic Response of Partially Prestressed Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST 8, August 1980
- 3) Blakeley, R.W.G. and Park, R. : Prestressed Concrete Sections With Cyclic Flexure, Journal of the Structural Division, Vol. 99, No. ST 8, August 1973
- 4) Spencer, R.A. : Stiffness and Damping of Nine Cyclically Loaded Prestressed Members, PCI Journal, Vol. 14, No. 3, 1969

【昭和 57 年 11 月 24 日受付】