

# 論文 RC 2 層ラーメン構造物の耐震性に及ぼす部材の降伏過程の影響

丸中 孝通<sup>\*1</sup>・田中 慎介<sup>\*2</sup>・鈴木 基行<sup>\*3</sup>

**要旨：**RC 2 層ラーメン高架橋の時刻歴地震応答解析を行い、構造物の耐震性に及ぼす部材の降伏過程の影響について検討した。その結果、柱や中層ばかりの耐力を上げると降伏過程によらず構造物の耐力が大きくなること、天端最大応答変位、残留変位は柱の塑性化が大きく影響を及ぼすこと、部材の降伏過程を変えることによる構造物の応答に及ぼす影響は地震波の特性によって異なることなどがわかった。

**キーワード：**RC 2 層ラーメン、耐震性、天端応答変位、残留変位、降伏過程

## 1. はじめに

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震により、ラーメン高架構造物に大きな被害が生じた。被害原因の検討の結果、構造物の応答に及ぼす部材降伏後の挙動の影響および部材の損傷が構造系全体の応答に与える影響などについて、さらに詳細な検討が必要であることが報告されている<sup>1)</sup>。本研究は、RC 2 層ラーメン高架橋を対象に部材の降伏過程が構造物全体の耐震性に及ぼす影響を解析的に検討することを目的とした。すなわち、柱やはりの軸方向鉄筋比及びせん断補強鉄筋比を変化させた各高架橋に対して各部材の曲げ降伏が発生していく順番を地震応答解析により検討し、これらが 2 層ラーメン高架橋の天端最大応答変位、残留変位などに及ぼす影響について検討した。

## 2. 解析方法

### 2.1 高架橋モデル

解析対象としたのは図-1に示すような東北新幹線標準設計の高さ 12m の線路直角方向の RC 2 層ラーメン高架橋である。この高架橋の橋軸直角方向(図-1の囲み部分)を取り出し、その質量を均等に並列フレームで負担させると仮定し、基礎固定型の 2 質点系にモデル化を行い、それをマトリクス法で解析した。各層の質量は 1 層目は  $6.78 \text{ tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 、2 層目は  $23.27 \text{ tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$  であった。

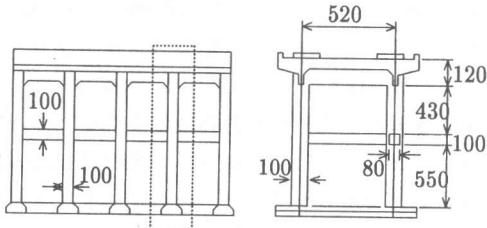


図-1 解析対象高架橋(単位: cm)

この高架橋は設計水平震度  $k_h = 0.25$  に対して設計され、柱の断面寸法は上柱、下柱ともに  $100\text{cm} \times 100\text{cm}$ 、中層ばかりでは高さ  $100\text{cm} \times$  幅  $80\text{cm}$  である。各鉄筋比を変化させる前の高架橋(以下、基準高架橋と呼ぶ)の柱および中層ばかりの配筋を図-2に示す。柱の軸方向鉄筋比は 2.44%，中層ばかりの圧縮および引張鉄筋比はともに 0.80% であり、せん断補強鉄筋比は部材のせん断降伏を生じさせないように柱で 0.25%，中層ばかりで 0.32% とした。次に解析を行った各高架橋モデルは、基準高架橋に対して中層ばかりの軸方向鉄筋比を 1.0 倍から 2.2 倍まで変化させたものと柱の軸方向鉄筋比を 0.6 倍から 1.4 倍まで変化させたものを用いた。その際には、軸方向鉄筋比の変化による曲げ耐力の増減と同じ割合でせん断耐力も増減するようにせん断補強鉄筋比を変化させた。このように柱と中層ばかりの耐力を変えることで部材の降伏過程を変化させ、それによる RC 2 層ラーメン高架橋の耐震性に及ぼす影響を検討した。

\*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻(正会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻(正会員)

\*3 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻、工博(正会員)

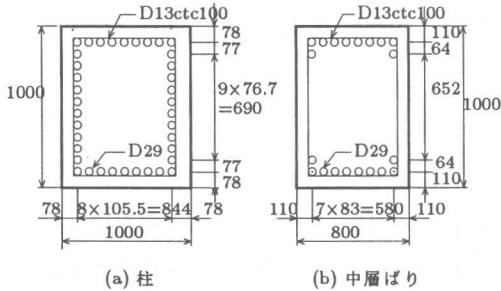


図-2 部材の配筋図(単位: mm)

## 2.2 スケルトンカーブおよび復元力特性

高架橋の挙動を考えるにあたり、部材断面の曲げモーメント-材端回転角関係は、図-3に示すようなテトラリニア型のスケルトンカーブを持つ耐力低下型モデルとした。スケルトンカーブの各折点の座標は静的弾塑性解析により算定した。ひびわれ発生時については部材断面の最外縁応力度がコンクリートの引張強度に達した時とした。また、部材降伏については、軸方向鉄筋に作用している引張力の合力位置のひずみが鉄筋の降伏ひずみに達した時とし、その後曲げモーメントは曲げ耐力に達するまで増加するとした。ここに、曲げ耐力は部材断面の最外縁歪みがコンクリートの終局歪み  $3500\mu$  に達した時とした。また、部材の終局変位については、荷重-変位関係の包絡線において、荷重が降伏荷重を下回らない時の最大の変位と定義した<sup>2)</sup>。

せん断力-せん断変形角関係については図-4のようなスケルトンカーブを持つ原点指向型モデルを採用した。各折点の座標の算定においては、せん断力のスケルトンカーブが未だ十分に解明されていないことから、せん断ひびわれ荷重、せん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>の方法に従い、せん断変形角  $\gamma$  に関しては、せん断降伏時  $\gamma=0.004$ 、ひびわれ時はその  $1/10$  と仮定した。

せん断力による変形量は曲げによる変形量と独立させて算定し、最終的に曲げとせん断による変形量を加えて部材の変形量とした。

部材の終局状態については、各部材の有する変形能を越える変形をした時、もしくはせん断降伏した時と定義した。部材の変形能は、以下

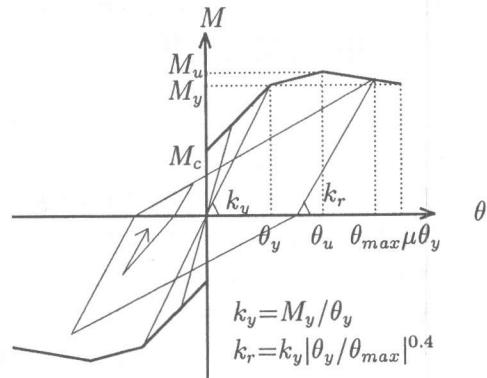


図-3 曲げモーメント-材端回転角関係

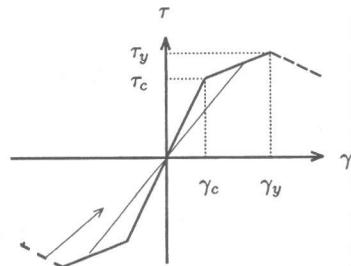


図-4 せん断力-せん断変形角関係

に示す韌性率評価式<sup>2)</sup>を用いて算定した。

$$\mu = \mu_0 + (1 - \mu_0)(\sigma_0 / \sigma_b) \quad (1)$$

$$\mu_0 = 12 \left( \frac{0.5V_c + V_s}{V_{mu}} \right) - 3 \quad (2)$$

ここに、 $\mu$ : 韌性率、 $\sigma_0$ : 作用軸圧縮応力、 $\sigma_b$ : つりあい破壊時の作用軸圧縮応力、 $V_c$ : コンクリートが負担するせん断力、 $V_s$ : せん断補強筋が負担するせん断力、 $V_{mu}$ : 曲げ耐力

## 2.3 動的解析法

一般に多自由度系の振動方程式は式(3)のように表現される。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = (\mathbf{F}_g(\ddot{y})) \quad (3)$$

ここに、 $[M]$ : 質量マトリクス、 $[C]$ : 減衰マトリクス、 $[K]$ : 剛性マトリクス、 $\{\ddot{y}\}$ ,  $\{\dot{y}\}$ ,  $\{y\}$ : それぞれ応答加速度、応答速度、応答変位のベクトル、 $(\mathbf{F}_g(\ddot{y}))$ : 地動加速度ベクトル

### (1) 質量マトリクス

集中質量法に基づき、次のような条件で質量マトリクス  $[M]$  を算定した。

a) 2層目の質量は上層横ばりの軸線上、1層目の質量は中層横ばりの軸線上に集中する。b) 柱の質量は、層高の半分までを各層の質量に加える。c) 上層縦ばりおよび中層縦ばりの質量、またスラブ・軌道スラブ・防音壁の質量は1径間分をそれぞれの層に加える。d) 質量間の相互作用はない。

### (2) 減衰マトリクス

初期減衰としては、粘性減衰系の Rayleigh 減衰を用いた。本解析では Rayleigh 減衰のうち各次モードの減衰定数を与える方法<sup>4)</sup>により、減衰マトリクス [C] を算定した。その際用いるモードベクトルおよび固有振動数は、初期剛性を用いた固有値解析により求めた。なお、減衰定数  $h_s$  は1次、2次ともに 0.02 と仮定した。

### (3) 剛性マトリクス

部材モデルには Giberson モデル<sup>5)</sup>を用いる。これと、2.2 で示した復元力モデルより、部材剛性マトリクスを算定し、接点での回転慣性を無視することにより自由度を水平層の変位数、すなわち 2 自由度系に縮小した剛性マトリクス [K] を用いる。

### 2.4 数値積分法

数値計算は、Newmark の  $\beta$  法<sup>6)</sup>を用いて  $\beta = 1/6$  の線形加速度法により計算した。なお計算の刻み時間は 0.002 秒とした。

### 2.5 入力地震波

入力地震波は、兵庫県南部地震で記録された JMA 波形：神戸海洋気象台 NS 成分 (I 種地盤)、JRT 波形：JR 鷹取 NS 成分 (II 種地盤)、EKB 波形：東神戸大橋 N78E 成分 (III 種地盤) を用いることとし、これらの地震波の最大入力加速度を拡大、縮小して解析を行った。

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 天端最大応答変位に及ぼす部材の降伏過程の影響

基準高架橋に対して中層ばりの軸方向鉄筋比  $p_l$  及びせん断補強鉄筋比  $p_w$  のみを表-1 に示すように変化させ、地震応答解析を行った。なお、表中の剛比とは、各部材の剛性を原点と降伏点を結ぶ割線剛性で代表させその剛性によって求

表-1 中層ばりの鉄筋比を変化させた時の部材の降伏過程

中層ばり 鉄筋比	部材の 降伏過程		最初に降伏が生じる最大入力加速度	
	JMA	EKB		
1.0 倍 $p_l=0.80\%$ $p_w=0.32\%$ 剛比:0.663	1 中層ばり	250gal	350gal	
	2 下柱下端	300gal	350gal	
	3 上柱上端	300gal	400gal	
	4 上柱終局	620gal	470gal	
1.3 倍 $p_l=1.04\%$ $p_w=0.43\%$ 剛比:0.846	1 中層ばり	300gal	400gal	
	2 下柱下端	300gal	400gal	
	3 上柱上端	350gal	450gal	
	4 上柱終局	680gal	510gal	
1.6 倍 $p_l=1.28\%$ $p_w=0.56\%$ 剛比:1.018	1 下柱下端	300gal	400gal	
	2 中層ばり	300gal	400gal	
	3 上柱上端	350gal	400gal	
	4 上柱終局	730gal	540gal	
1.9 倍 $p_l=1.52\%$ $p_w=0.68\%$ 剛比:1.174	1 下柱下端	300gal	450gal	
	2 中層ばり	350gal	450gal	
	3 上柱上端	350gal	500gal	
	4 上柱終局	780gal	570gal	
2.2 倍 $p_l=1.76\%$ $p_w=0.80\%$ 剛比:1.316	1 下柱下端	300gal	450gal	
	2 上柱上端	400gal	500gal	
	3 中層ばり	400gal	500gal	
	4 上柱終局	820gal	600gal	

めた下柱に対する中層ばりの剛度の比である。図-5、図-6 は JMA 波形および EKB 波形の最大加速度を表-1 に示した 5 つの高架橋モデルに拡大縮小して入力し天端最大応答変位について検討したものであり、最大加速度を 50gal おきに変化させて入力し高架橋が終局に至るまで解析を繰り返すこととした。なお、終局状態に至る時の最大加速度は入力加速度区分を小さくとり別途算定した。また、高架橋の終局とは上柱か下柱、または中層ばりのいずれかが終局状態に至った時とした。表-1 に示すように、JMA 波形及び EKB 波形ともに終局までの降伏過程は同一であり、最大入力加速度の増加による降伏の発生の進行程度が異なっている。高架橋が終局に至った最大入力加速度に着目すると柱の耐力を一定とした場合は降伏過程によらず、中層ばりの耐力を増加させた方が高架橋はより大きな外力に耐えることができた。

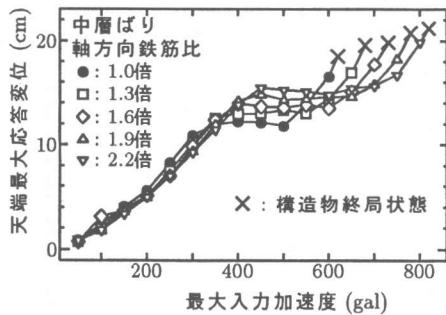


図-5 最大入力加速度と天端最大応答変位の関係  
(JMA 波形)

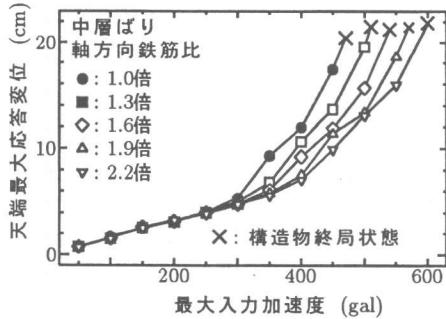


図-6 最大入力加速度と天端最大応答変位の関係  
(EKB 波形)

また、図-5によると最大入力加速度が350galを越えると各高架橋とも、ある程度までならば最大加速度を大きくしても天端最大応答変位があまり増加していないが、この範囲では中層ぱりを先に降伏させた高架橋の方が天端最大応答変位が小さいことがわかる。次に図-6によると最大入力加速度を変化させても中層ぱりの耐力が大きい方が天端最大応答変位が小さいという結果となった。従って入力地震波により結果が異なるが、この原因としては3.3に後述する地震動の特性の違いによる影響が大きいと考えられる。このように入力地震波により天端最大応答変位に及ぼす部材の降伏過程の影響が異なることがわかる。

次に基準高架橋に対して柱の軸方向鉄筋比  $p_l$ 、せん断補強鉄筋比  $p_w$  のみを表-2に示すように変化させて、同様の解析を行った。この表中の剛比も表-1と同様に下柱に対する中層ぱりの剛比である。図-7にこの各高架橋モデルに対してEKB 波形を拡大縮小して入力した結果を示す。図-6と図-7から、同じ最大入力加速度において

表-2 柱の鉄筋比を変化させた時の部材の降伏過程

柱 鉄筋比	部材の 降伏過程		最初に降伏が生じ る最大入力加速度
		EKB	
$p_l=1.46\%$ $p_w=0.14\%$ 剛比:0.849	1	下柱下端	300gal
	2	中層ぱり	300gal
	3	上柱上側	300gal
	4	上柱終局	345gal
$p_l=1.95\%$ $p_w=0.20\%$ 剛比:0.740	1	下柱下側	350gal
	2	中層ぱり	350gal
	3	上柱上端	350gal
	4	上柱終局	410gal
$p_l=2.44\%$ $p_w=0.25\%$ 剛比:0.663	1	中層ぱり	350gal
	2	下柱下端	350gal
	3	上柱上端	400gal
	4	上柱終局	470gal
$p_l=2.93\%$ $p_w=0.31\%$ 剛比:0.603	1	中層ぱり	400gal
	2	下柱下端	400gal
	3	上柱上端	450gal
	4	上柱終局	530gal
$p_l=3.42\%$ $p_w=0.37\%$ 剛比:0.557	1	中層ぱり	400gal
	2	下柱下端	450gal
	3	上柱上端	450gal
	4	上柱終局	590gal

の天端最大応答変位は中層ぱりの耐力を変化させた場合よりも柱の耐力を変化させた場合の方が大きく異なっている。これより、柱の塑性化は天端最大応答変位に大きく影響を及ぼしていると思われる。なお、図-5～図-7の解析では各部材ともせん断降伏は生じていなかった。

### 3.2 残留変位に及ぼす部材の降伏過程の影響

天端の残留変位についても中層ぱりの鉄筋比のみを表-1のように変化させた高架橋モデルと、柱の鉄筋比のみを表-2のように変化させた高架橋モデルに対して各地震波形の最大加速度を100galおきに入力する解析を高架橋が終局に至るまで行った。

使用したすべての波形において同様な傾向が得られたが、ここでは中層ぱりの鉄筋比のみを変化させ JMA 波形、EKB 波形を入力して得られた残留変位を図-8、図-9に示し、柱の鉄筋比のみを変化させ EKB 波形を入力して得られた残

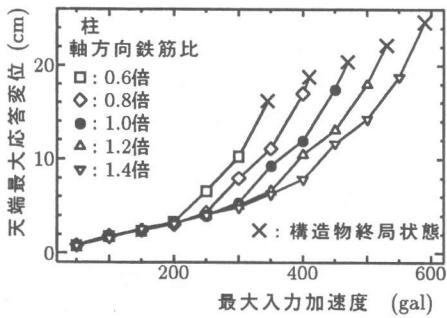


図-7 最大入力加速度と天端最大応答変位の関係  
(EKB 波形)

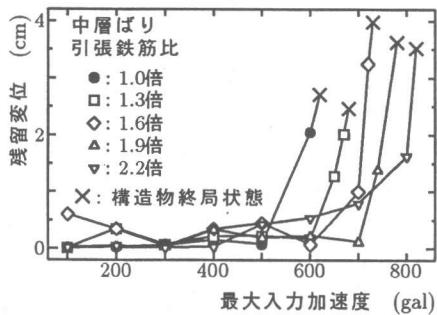


図-8 最大入力加速度と残留変位の関係(JMA 波形)

留変位を図-10に示す。これらの図において、上柱と下柱がともに曲げ耐力に至るまでは残留変位はそれほど大きい変化はせず、曲げ耐力に至った後急激に増加するという結果が得られた。これは、部材の復元力特性において曲げ耐力以降は下り勾配であることによる影響が大きいためと考えられる。また図-9、図-10によると中層ばかりの耐力のみを変化させた高架橋より柱の耐力のみを変化させた高架橋の方が残留変位が大きい部分の最大入力加速度の大きさが大きく異なることより、残留変位は中層ばかりよりも柱の塑性化が影響を及ぼしていると思われる。

### 3.3 構造物の塑性化による固有周期の変化に及ぼす部材の降伏過程の影響

図-5、図-6を比較すると最大入力加速度を同様に増加させても入力波形により天端最大応答変位の増加の様子が異なることがわかった。一方JRT波形を入力した場合はEKB波形を入力した場合と似た傾向を示した。そこで、各入力地震波の加速度応答スペクトルと、高架橋の塑

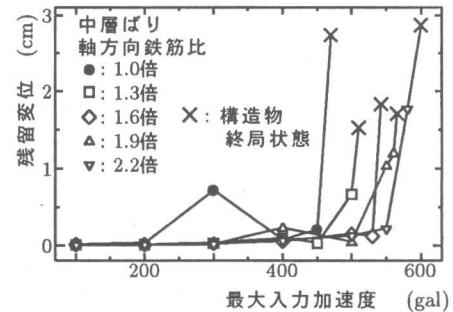


図-9 最大入力加速度と残留変位の関係(EKB 波形)

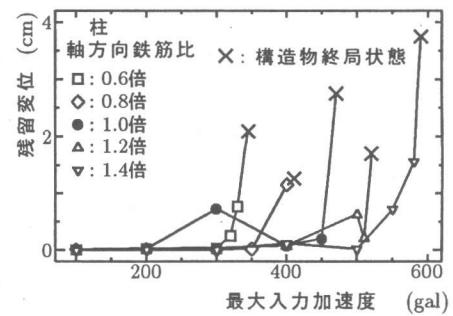


図-10 最大入力加速度と残留変位の関係(EKB 波形)

性化による固有周期の変化による影響について考察を加えた。

まず、本解析で使用した各高架橋モデルの固有周期は、1次固有周期は0.39～0.45sであり、2次固有周期は0.071～0.077sであった。また高架橋が終局に至った時、この各高架橋モデルでは1次固有周期は0.95s程度まで増加し、2次固有周期は0.1s程度まで増加した。さて図-5でJMA波形の最大入力加速度を増加させても天端最大応答変位があまり変化しない範囲(基準高架橋の場合では350gal～500gal程度)において、地震波が入力されて損傷した後の高架橋の固有周期を算定したところ、各高架橋とも0.75s程度まで変化していた。図-11によるとJMA波形は0.7s付近のピークを越えると応答加速度は比較的小さくなっていることより、地震動が入力されて早い時期に応答加速度が小さくなる範囲まで高架橋が塑性化したためにその後の地震動に対する応答が低減されたのではないかと考えられる。また図-5で中層ばかりの耐力を大きくすることで天端最大応答変位は大きくなっているが、この

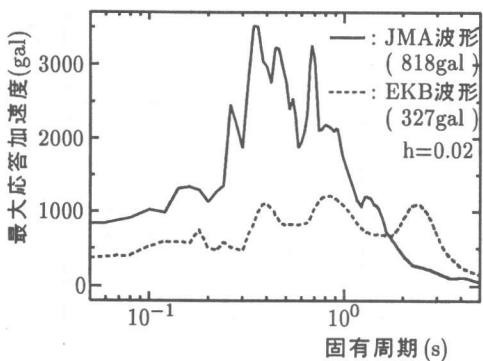


図-11 加速度応答スペクトル

原因としては中層ばかりの耐力を大きくすると主に柱が塑性化することで応答加速度のピークを越えるまで高架橋の固有周期が増加してしまうためだと思われる。

よってこの波形においては、柱に対し適当な剛比まで中層ばかりの耐力を小さくし、柱よりも中層ばかりを先に降伏させることで、高架橋が耐えることができる外力は若干低下するものの天端応答変位を減少させる効果が期待できる。

次にEKB波形の場合、図-6より最大入力加速度の増加に伴い天端最大応答変位が大きく増加している。図-11において高架橋が終局状態に至るまでの固有周期の変動する範囲においては、応答加速度はあまり大きな変化はない。これより、高架橋を塑性化させても応答が低減されることはないと想定される。最大入力加速度を大きくするにつれ天端最大応答変位が急激に増加していくものと思われる。

よって、EKB波形のような特性を有する波形を入力する場合、中層ばかりの耐力を小さくして構造物の固有周期を延ばすことは高架橋にとってあまり効果はなく逆に悪影響を及ぼすことも考えられる。したがって、ある部材だけを大きく損傷させるのではなく、各部材を同じ程度ずつ損傷させるように柱と中層ばかりの剛比を変化させることが高架橋にとって望ましいのではないかと考えられる。

#### 4. 耐震設計への適用

RC 2層ラーメン構造物において、天端最大応答変位や残留変位は柱の塑性化による影響が大

きいこと、地震動によって構造物の固有周期の変化による影響が異なるため、地震動の特性によって適切に部材の降伏過程を変化させることができることがわかった。

そこで、設計地点での地盤種別の違いやその他様々な要因を考慮した上で、想定する地震動の特性を把握する一方で、各部材が降伏後に高架橋としての終局状態に至るまでの固有周期の範囲を考慮し、柱に対する中層ばかりの剛比を適切に変化させて部材の降伏過程を設定することで、経済的な耐震設計が可能になると思われる。

#### 5.まとめ

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- (1) 中層ばかりや柱の耐力を上げると部材の降伏過程によらず、構造物はより大きな外力に耐えることができる。
- (2) 柱の塑性化は天端最大応答変位や残留変位に大きな影響を及ぼす。
- (3) 部材の降伏過程を変えることによって構造物の応答に及ぼす影響は地震動の特性によって異なるため、想定される地震動に対して柱に対する中層ばかりの剛比を適切に変化させることができることが望ましい。

#### 参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震による道路橋の震災に関する調査, 1995.3
- 2) 土木学会: 阪神淡路大震災被害分析と韌性率評価式、コンクリート技術シリーズ No.12, 1996.7.
- 3) 土木学会: 平成8年制定、コンクリート標準示方書(設計編), pp.60-61, 1996.3.
- 4) Wilson, E.L. and J.Penzien: Evaluation of Orthogonal Damping Matrices, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.4, pp.5~10, 1972.
- 5) Giberson, M.F.: Two Nonlinear Beams with Definition of Ductility, ASCE, Vol.95, ST2, pp.137~157, 1969.
- 6) Newmark, N.M.: A Method of Computation for Structural Dynamics, Proc. of ASCE, Vol.85, No. EM3, pp.67~94, 1959