

# 論文 阪神高速橋脚の二軸曲げ解析

飯藤将之\*1, 渋谷純一\*2, 佐藤 健\*3

要旨：本論は兵庫県南部地震で横倒しとなった阪神高速 3 号神戸線の橋脚の二軸曲げ性状に関して考察したものである。円形断面の曲げ耐力をファイバーモデルで推定し、橋脚の静的及び動的解析へと展開し、更に材端塑性バネを用いた解析を行った。静的解析から、1)段落とし部の曲げ耐力は橋脚脚部の約 3/4 となること、2)常時軸力下での降伏ベースシア係数が約 0.55 となること、そして、地震応答解析から、1)一軸入力で応答部材角が約 1/50 となること、2)段落としを考慮した場合に段落としに損傷が集中すること、3)2 種類の地震動に対して二軸同時入力の影響が小さいこと、を示した。

キーワード：阪神高速、兵庫県南部地震、地震応答、ファイバーモデル、材端塑性バネ

## 1. はじめに

95 年の兵庫県南部地震では、阪神高速道路 3 号神戸線が東灘区で 635m に渡り、主にせん断破壊により崩壊した。筆者らは、最終破壊に到るまでの曲げの影響も少なくないと考え、断面の応力-歪関係の非線形性に基づく解析を行い、段落とし配筋や二軸曲げの影響について検討した[1]。本論は、断面解析により脚部と段落としの耐力差を明確に示した上で、部材をファイバーモデル及び材端塑性バネでモデル化し、段落としの影響を補足検討し、更に、応答の二軸効果について 2 地点の地震記録を用いて再検討したものである。橋脚の破壊過程については十分理解されておらず、橋脚全体の解析の必要性も指摘されているが[2]、その解析のためには適切な強度と履歴則を与えなければならない。しかし、円形断面に関する有効な強度式がないため、非線形計算により曲げ耐力を精度良く捉えることができる本手法を用いることによって、橋脚 1 本の特性について考察することを目的とする。

## 2. 橋脚の概略と断面のモーメント-曲率解析

図 1 に南北方向断面を示す橋脚は、直径が  $R=3.1\text{m}$  の円形断面で、躯体高さが 9.9m の片持式柱である[3]。コンクリート強度は 26.5 MPa、主筋降伏応力は 343MPa である。

図 2(a)に、橋脚の

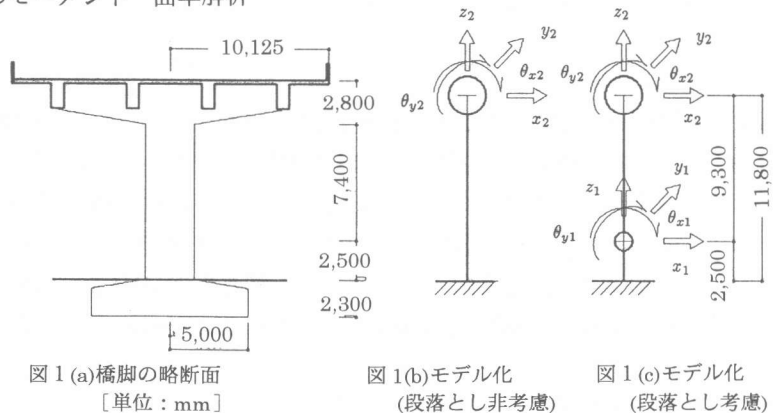


図 1 (a)橋脚の略断面  
[単位：mm]

図 1 (b)モデル化  
(段落とし非考慮)

図 1 (c)モデル化  
(段落とし考慮)

\*1 宮城工業高専 助教授 建築学科, 博士(工) (正会員)

\*2 宮城工業高専 教授 建築学科, 工博

\*3 宮城工業高専 講師 建築学科, 工修 (正会員)

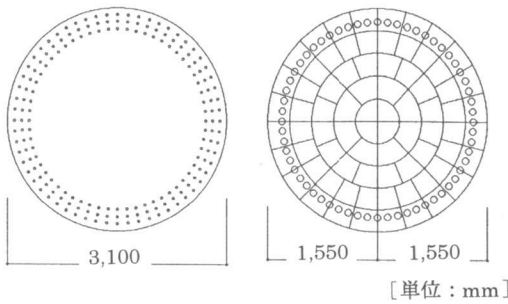


図 2(a) 脚部の配筋(180-D35)

図 2(b) 断面の要素分割

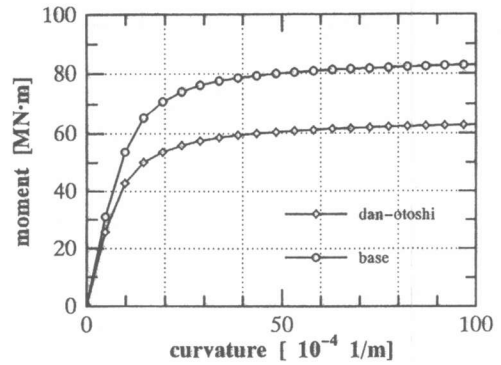


図 3 モーメント-曲率関係

下部の高さ  $h_1=2.5m$  の部分(脚部)の断面を示す。主筋量は 180-D35 で三段配筋となっている。 $h_1$  の位置(段落とし)を境界として、それより上の部分(上部部材)の主筋は 120-D35 で二段配筋となっている。

脚部と上部部材での耐力の違いを調べるために、両断面のモーメント-曲率( $M-\phi$ )解析を行う。円形断面のコンクリート部分は、図 2(b)に示すように半径  $r=1.55m$  を 5 層の同心円の層に分割し、それぞれの層を、中心に近い部分から、4, 8, 16, 24, 24 の微小要素に分割し、合計 76 の要素に分割する。脚部の主筋については、三段配筋を一まとめにして、3-D35( $2871mm^2$ ) を 1 主筋要素の断面積として、 $6^\circ$  ずつ合計 60 要素を配置する。同様に、上部部材の主筋は、2-D35( $1914mm^2$ ) を 1 主筋要素の断面積とする。

文献[1]では、設計での資料に基づいて、想定した鉛直地動加速度が  $0.4g$  と  $1.6g$  の場合の軸力下で静的解析を行ったが、本論では、橋脚が支える重量である  $10.91MN$  を軸力として与えて  $M-\phi$  解析を行う。尚、軸力比は  $0.07$  である。

解析結果を図 3 に示す。脚部(○)と上部(◇)の配筋の差が曲げ耐力の違いとして現れている。全鉄筋の  $1/4$  の鉄筋が引張降伏するときのモーメントは、脚部で  $63.3MN\cdot m$ 、上部で  $47.5MN\cdot m$  である。同様に、全鉄筋の  $1/3$  の鉄筋が引張降伏するときのモーメントは、脚部で  $70.5MN\cdot m$ 、上部で  $52.3MN\cdot m$  であり、それ以後も断面の耐力は上昇する。どの曲率レベルにおいても上部の耐力は脚部の約  $3/4$  程度となっている。

### 3. 静的非線形解析

前節の解析では断面の特性しか捉えることができないので、上下部材端の  $M-\phi$  関係における断面柔性から材途中の柔性を補間して部材剛性を評価することにより[4]、荷重-変形関係の解析を行い、橋脚の挙動について検討する。更に、通常解析に用いられる材端塑性バネを用いて、ファイバーモデルの解析による結果と比較検討する。材端塑性バネを用いる場合部材強度が必要となるが、前節より降伏曲げモーメント  $M_Y$  を、脚部で  $70MN\cdot m$ 、上部で  $52MN\cdot m$  として与える。また、材端塑性バネの脚部初期剛性  $Bk_0$ 、上部初期剛性  $Uk_0$  は、それぞれ、

$${}_B k_0 = c \times (3EI / h_1) \quad , \quad {}_U k_0 = c \times (2EI / h_2) \quad (1)$$

とし、 $c=200$ 、降伏時剛性低下率  $\alpha_Y$  を  $0.3$  とした。

上記 2 種類のモデルを用いて、柱脚から柱頭までをすべて脚部の 1 本の部材として扱った場合

と、段落としを境に2部材で橋脚を表現した場合の、4ケースの解析を行う。目標変形角は1/50とし、高さ11.8mの位置に、1ステップで水平変位増分を0.01mずつ、236ステップ与える。

静的非線形解析で得られた柱せん断力-頂部水平変形( $Q_x - \delta_x$ )関係を図4に示す。同図(a)はファイバーモデルによる結果である。部材角1/100におけるベースシア係数は、柱脚から柱頭までをすべて柱脚主筋量とした1部材で解析した場合(○)が0.60、段落としを考慮して脚部と上部の2部材で解析した場合(破線)が0.55である。両者の割合は0.91で、 $M-\phi$ 解析ほどではないが耐力に差が現れている。段落としを考慮した場合、部材角1/100において、脚部の部材角が1/446、上部部材の部材角が1/81であり、変形が上部部材脚部の回転に集中する。

図4(b)は材端塑性バネモデルによる $Q_x - \delta_x$ で、1部材での結果(実線)、2部材での結果(破線)とも0.16m付近で降伏する折れ線となっており、両者が殆ど一致している。1部材での解析における部材角1/100におけるベースシア係数は0.46で、1/50では0.55である。2部材で解析した場合に、部材角1/100において、脚部の部材角が1/410、上部部材の部材角が1/82である。

段落としを考慮したファイバーモデルと材端塑性バネモデルのせん断力の比は、部材角1/100で0.85で、1/50では0.95であり、ファイバーモデルの方が早い段階で鉄筋要素が降伏してしまうが、大変形領域では耐力はほぼ等しくなる。

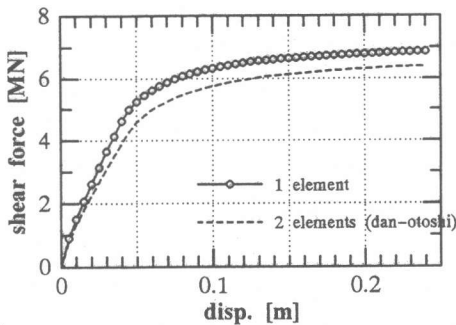


図4(a) 静的解析結果(ファイバーモデル)

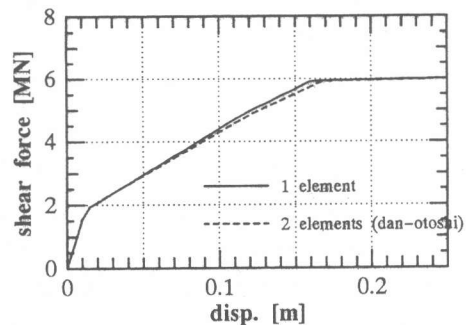


図4(b) 静的解析結果(材端塑性バネ)

#### 4. 一方向弾塑性地震応答解析

静的解析では2種類の部材モデルを用いて、段落とし配筋の考慮・非考慮を解析変数とした。本節では、それら4種類のモデル化のもとで、神戸海洋気象台(1995兵庫県南部地震)の記録を入力して応答解析を行い、引き続きモデル化と段落としの影響について検討を行う。

図1(b)に示したように、橋脚を1要素で表現し、回転慣性を考慮して曲げ自由度を縮合しない場合、振動方程式は5自由度となる。一方、図1(c)に示したように、段落とし部に節点を設けて、段落としでの配筋変更を考慮した場合の(5+5)自由度の非減衰の振動方程式は、

$$\begin{aligned}
 & [K_{full}] \{x_1, y_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, z_1, x_2, y_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}, z_2\}^T \\
 & = \{-m(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_0), -m(\ddot{y}_1 + \ddot{y}_0), -I_1 \ddot{\theta}_{x1}, -I_1 \ddot{\theta}_{y1}, 0, -m(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_0), -m(\ddot{y}_2 + \ddot{y}_0), -I_2 \ddot{\theta}_{x2}, -I_2 \ddot{\theta}_{y2}, 0\}^T
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

となる。図1(c)のモデル化により、 $M-\phi$ 解析で示した上下部材の耐力差を取り入れることができるとともに、曲げ破壊を対象としているため、段落とし部での損傷を評価することができる。(2)式において、と回転慣性モーメントは、

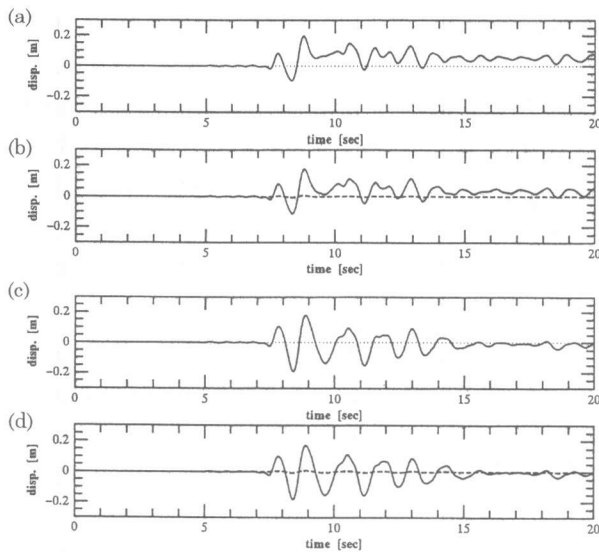


図5 時刻歴応答変形(神戸海洋気象台 NS)  
 (a) : ファイバー・1 要素 (b) : ファイバー・2 要素  
 (c) : 材端塑性バネ・1 要素 (d) : 材端塑性バネ・2 要素

$$m_2 = 1113[t], \quad I_2 = 30409[t \cdot m^2] \quad (3)$$

$$m_1 = 90[t], \quad I_1 = 54[t \cdot m^2] \quad (4)$$

とした。

神戸海洋気象台 NS を入力したときの解析結果について述べる。応答解析の時間刻みは、0.002[sec]とし、積分法は平均加速度法を用いた。減衰は  $h=0.05$  の初期剛性比例型減衰マトリックスとした。柱の軸力は 10.91MN の一定値とした。図 5 に 4 ケースの時刻歴応答変形を示す。同じモデルの場合、段落としの考慮・非考慮に係わらず応答波形がよく一致している。モデル間で、振動周期特性はあまり変わらないものの、材端塑性バネの方が、大振幅を経験した後に、変形が残留せずに戻るのに対して、ファイバーモデルの方は、(+ )側で最大応答変形を生じた後は残留変形が生じた状態で振動している。また、段落としを考慮した解析の時刻歴には、段落とし部の変形を破線で描いているが、殆ど変形していないことがわかる。

図 6 の各図に、ファイバーモデルで解析した場合の橋脚脚部限界断面でのモーメント-回転角 ( $M_y - \theta_y$ ) 関係を示す。同図(a)は 1 部材の解析での柱脚の結果であり、ファイバーの集合である弾塑性要素には部材角のために回転が生じる。(b)は 2 部材の解析での脚部部材の柱脚での結果で、曲げ耐力は 1 部材のときと殆ど等しいものの、脚部部材の部材角が小さいためにほぼ弾性的な挙動を示している。(c)は上部部材の脚部におけるもので、ループ形状は(a)と対応しているものの、段落としの配筋としているために、モーメントは約 7 割程度に下がっている。

最大応答変形を表 1 に示すが、部材角にすると 1.6/100 ~ 1.5/100 と、1/50 に近い値となっている。段落としを考慮した解析において上部部材だけで最大部材角をとると、ファイバーモデルの場合が 1.8/100、材端塑性バネモデルの場合が 1.9/100 となり、上部部材だけでかなりの変形をいられる。

表 2 に材端の曲げ回転角の最大値を示す。材端塑性バネモデルの場合は、塑性バネ要素の塑性回転角と弾性回転角の和である。M- $\phi$  解析の降伏モーメントを用いて、初期剛性を(1)式とし、降伏時剛性低下率を仮定することにより、部材端の降伏回転角を推定することができる。その降

表 1 最大応答変位 [m]

[m]	神戸海洋気象台 NS			
	段落とし非考慮		段落とし考慮	
	fiber	バネ	fiber	バネ
頂部変形	0.196	0.193	0.179	0.183
段落し変形	-	-	0.007	0.009

表 2 材端回転角 ( $\times 10^{-3}$  [1])

		神戸海洋気象台 NS			
		段落とし非考慮		段落とし考慮	
		fiber	バネ	fiber	バネ
上部	頭	11.8	1.8	9.5	3.6
	脚	-	-	13.6	10.7
脚部	頭	-	-	2.4	1.9
	脚	16.7	13.0	2.8	2.6

表 3 材端塑性率

		神戸海洋気象台 NS			
		段落とし非考慮		段落とし考慮	
		fiber	バネ	fiber	バネ
上部	頭	1.1	0.2	1.5	0.4
	脚	-	-	2.1	1.2
脚部	頭	-	-	0.7	0.9
	脚	1.5	1.3	0.8	1.3

伏回転角を用いて、材端の曲げ回転角を基準化して、塑性率としたものが表3である。同表からは、両モデルともに、1部材で解析した場合には橋脚の柱脚が、そして、2部材で解析した場合には上部部材の段落とし側が損傷箇所となることがわかる。しかし、曲げの塑性率の値は、2.1(ファイバー)と1.2(材端塑性バネ)であり、橋脚が崩壊に至るレベルとは考えられず、本解析は橋脚の最終崩壊原因を説明できるものではない。

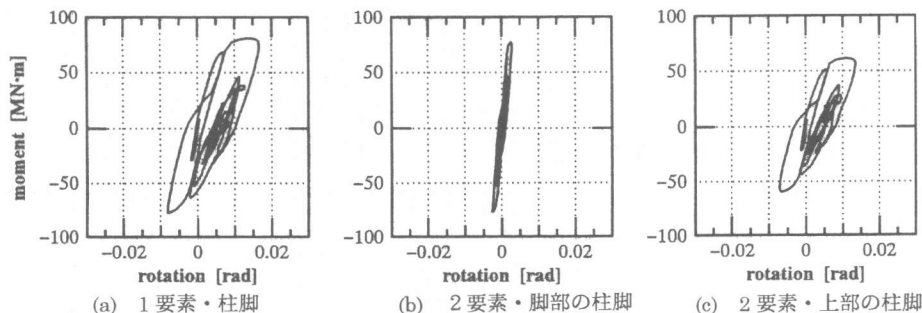


図6 脚部のモーメント-回転角関係

## 5. 二方向弾塑性地震応答解析

一方向地震応答解析を行った4ケースのうち、損傷を比較的良好に説明しているファイバーモデルを用いて、段落としを考慮して橋脚を2部材で表現して、二方向地震応答解析を行い、橋脚の二軸曲げ性状を検討する。地震波には、神戸海洋気象台、東神戸大橋・地盤[5](いずれも兵庫県南部地震)を用いて、EW一方向、NS一方向、更に二方向同時入力した場合の地震応答解析を行い、それぞれの応答性状を比較する。入力以外の解析の条件は前項と同一とする。設計では、橋桁の軸方向の応力が、軸直交方向よりも不利であることが指摘されているが、本解析の部材モデルにはその影響を取り入れることができない。

頂部最大応答変形を表4(a), (b)に示す。二方向入力の最大応答は、任意の方向の変形の最大値で示している。二方向同時入力時の橋脚頂部の最大応答のNS一方向入力時の最大応答に対する比は、神戸海洋気象台で84%であり、東神戸大橋では103%である。段落としでの水平変形の割合も頂部と大差なく、両地震波とも二方向同時入力は応答変形の増大をもたらすものではない。

前節と同じように部材端の塑性率を評価して、表5(a), (b)に示す。両地震波ともに、二方向同時入力時の塑性率とNS一方向入力時の塑性率は、殆ど一致している。海洋気象台に関しては文献[1]において、二方向同時入力が橋脚や損傷に与える影響が少ないことを示したが、比較的阪神高速に近い東神戸大橋の記録に関しても、二方向同時入力の影響は小さいと言える。

図7(a)に二方向同時入力による材端回転角の増大率を、図7(b)にモーメントの増大率をそれぞれ示す。分母はNS一方向入力時の値である。材端回転角は、上部部材の段落とし部で1.03であり、一方向入力時と二方向入力時で損傷状況は大きく変わらないと言える。また、モーメントは、降伏箇所となる上部段落とし以外では、脚部で1.28まで増大するケースがあるが、二方向入力により新たな損傷を生じさせるレベルではない。

文献[1]と同様に、二方向入力時の応答変位平面を描いて検討してみる。図8(a)は海洋気象台の変位平面で、いくらかの楕円形状はしているものに北北西と南南東の間で一軸振動する軌跡に近くなっている。図8(b)は東神戸大橋の変位平面で、始め北西と南東の間で振動した後、主に北北で一軸振動する軌跡となっている。円形断面には特定方向の振動は二軸曲げの劣化性状として

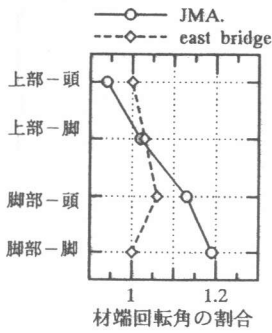


図 7(a) 材端回転角の増大(二軸/一軸)

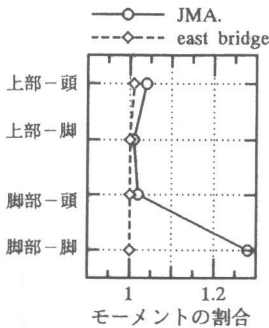


図 7(b) モーメントの増大(二軸/一軸)

表 4(a) 最大応答変位 [m]

	神戸海洋気象台		
	EW	NS	EW+NS
頂部変形	0.129	0.179	0.180
段落し変形	0.006	0.007	0.008

表 4(b) 最大応答変位 [m]

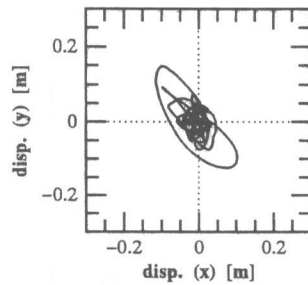
	東神戸大橋		
	EW	NS	EW+NS
頂部変形	0.296	0.112	0.114
段落し変形	0.002	0.006	0.006

表 5(a) 材端塑性率

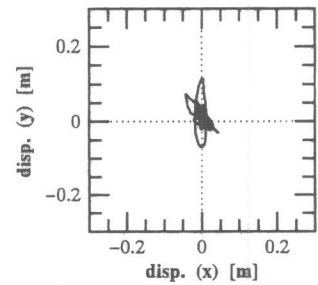
		神戸海洋気象台		
		EW	NS	EW+NS
上部	頭	0.8	1.5	1.3
	脚	1.4	2.1	2.1
脚部	頭	0.6	0.7	0.7
	脚	0.7	0.8	0.9

表 5(b) 材端塑性率

		東神戸大橋		
		EW	NS	EW+NS
上部	頭	0.1	0.5	0.5
	脚	0.3	1.2	1.2
脚部	頭	0.2	0.5	0.5
	脚	0.2	0.6	0.6



(a) 神戸海洋気象台・EW+NS



(b) 東神戸大橋・EW+NS

図 8 橋脚頂部の変位平面

影響を及ぼさないため、二軸曲げの効果が現れなかったと考えられる。

## 6. まとめ

兵庫県南部地震で横倒しとなった阪神高速橋脚の二軸曲げ性状に関して、ファイバーモデルと材端塑性モデルを用いて弾塑性解析を行った。まず、断面のM- $\phi$ 解析により、段落とし部分の曲げ耐力は橋脚脚部の約 3/4 となることを示した。次に、得られた耐力差を取り入れた静的非線形解析から、1)常時軸力下でのベースシアが0.5~0.6 となること、2)ファイバーモデルと材端塑性バネモデルの降伏耐力はほぼ等しいが、変形能に差があること、を示した。

更に、円形断面のままの二軸曲げ相互作用と回転慣性、更に段落としを考慮して弾塑性地震応答解析を行い、以下の知見が得られた。1)曲げ解析のモデルに基づいても、神戸海洋気象台の記録に対して応答部材角が 1/50 程度となる。2)ファイバーモデルでは、段落としへの損傷の集中と大振幅後の残留変形を時刻歴応答に表現できる。3)神戸海洋気象台、並びに東神戸大橋の記録波に対しては、二方向同時入力の影響が小さい。

### 【参考文献】

- [1]飯藤, 佐藤, 渋谷, 志賀, 柴田: “阪神高速橋脚の二軸曲げ性状(その 1)”, “同(その 2)”, 日本建築学会大会梗概集, vol.C, No.2, 1996.9.
- [2]丸山: “なぜ-全体構造と部材の破壊”, コンクリート工学, vol.33, No.11, pp.20-23, 1995.11.
- [3]阪神高速道路公団: “兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書”
- [4]飯藤, 柴田, 渋谷: “柱の二軸曲げと変動軸力を考慮した RC 骨組の地震応答”, コンクリート工学年次論文報告集, vol.13, No.2, pp.607-612, 1991.6.
- [5]建設省土木研究所: “土木構造物における加速度記録(No.21)”, 土木研究所彙報第 21 号