地震動解析による鋼製門形ラーメン橋脚の耐震性評価

EVALUATION OF EARTHQUAKE RESISTANCE FOR STEEL PIERS WITH RIGID PORTAL FRAME BY DYNAMIC RESPONSE

北村匡範*，後藤秀典**，白木　渡***，堂垣正博****
Masanori KITAMURA, Hidenori GOTO, Wataru SHIRAKI, and Masahiro DOGAKI

*　学士（工学）元関西大学工学部土木工学科学部生（現大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻）
（〒558-8585　大阪市住吉区杉本3-3-138）
**　学士（工学）関西大学大学院　工学研究科土木工学専攻　（〒564-8680　吹田市山手町3-3-35）
***　工博　香川大学教授　工学部信頼性情報システム工学科　（〒760-8526　高松市林町2217-20）
****　工博　関西大学教授　工学部土木工学科　（〒564-8680　吹田市山手町3-3-35）

It is recommended to adopt rigid frame steel piers superior to simple column pier as to redundancy after Hyogoken-Nanbu Earthquake. And it is advocated to change the Allowable Stress Design Method into the Limit State Design Method for the design of highway steel bridges. The aim of this paper is to present the seismic response of rigid portal frame piers supporting the highway bridges with continuous box girders. Four types of rigid portal frames are designed by two design methods, i.e., Allowable Stress Design Method and Limit State Design Method. In this study, dead load, live load, thermal load, and earthquake load are adopted. The elasto-plastic response of steel portal frames is analyzed by the FEM for four types of steel piers. The numerical computation is carried out to examine the influence of design method and shapes on the seismic behavior of piers. It is concluded that the LRFD is more effective method than the ASDM for scattering the seismic safty and to secure target seismic efficiency.

Keywords: *Steel rigid portal piers, Elasto-plastic transient response analysis, Allowable Stress Design Method, Load and Resistance Factor Design Method*

1. まえがき

わが国では，都市高速道路高架橋が高度経済成長期に湾岸域を中心に建設され始めた．高架橋を支える橋脚として，鋼製のラーメン橋脚がつぎのような理由で建設されてきた．すなわち，

①ラーメン橋脚は，不静定構造であるため，高い耐荷能力と変形性能を有している．
②わが国の大都市は軟弱な地盤で構成されているため，自重の軽い鋼製橋脚が，耐震上，優れている．
③桁下の空間が広いため，土地が有効利用できる．

このような特徴によって，“道路橋示方書　V耐震設計編”[1]では，鋼製ラーメン橋脚のみならず，鉄筋コンクリート製ラーメン橋脚も含めて，それらの地震時保有水平耐力の照査が省略されてきた．しかし，1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震では，強力な地震動による繰り返し載荷によってラーメン橋脚も損傷した．

その結果，“道路橋示方書　V耐震設計編”[1]が見直され，地震時保有水平耐力法が導入された[2]．この方法が鉄筋コンクリート製橋脚やコンクリート充填鋼製橋脚に適用され，それらの地震時保有水平耐力と残留変位の照査が義務づけられた．ただし，コンクリート無充填の鋼製橋脚や鋼製ラーメン橋脚では，地震時の応答性状，エネルギー吸収性能，崩壊に至るまでの挙動など，未解明な事項が多いため，動的解析による耐震性照査を定めている．

構造物のリダンダンシーを考えた場合，単柱形式よりもラーメン形式の鋼製橋脚の方が，倒壊のリスクを少なくすることができる．それゆえ，鋼製ラーメン橋脚にも，鉄筋コンクリート製橋脚やコンクリート充填鋼製橋脚と同様，耐震安全性が確保できるような，塑性域の挙動が加味された耐震設計法の確立が望まれる．

筆者らはこれまで，許容応力度設計法によって設計された既存の鋼製門形ラーメン橋脚を対象に，耐震信頼性の評価を行い，許容応力度設計法の問題点を指摘し，荷重係数設計法の有効性を示してきた[3),4)]．

ここではさらに，許容応力度設計法と荷重係数設計法によって設計された鋼製門形ラーメン橋脚を対象に，上

部構造と橋脚の死荷重および活荷重が作用するもとでの弾塑性時刻歴応答解析を行い，その動的耐震性能を明らかにする．

2. 対象とする構造物と入力地震波

2.1 対象構造物のモデル化

解析対象のラーメン橋脚は図-1（a）に示す一層門形ラーメンである．その柱の高さはh，はりの長さはlで，両基部は固定されている．ただし，支間長がL=40m程度の連続高架橋を支える橋脚に限定した．また，過去の建設実績を参照し，橋脚の高さhは10mと20m，間口lは20mと30mとし，これらを組合せた4種類の橋脚を対象とする．橋脚の鋼種はSM490Yで，その機械的性質は表-1のようである．また，降伏後の縦弾性係数を降伏前の0.01倍とした．

表-1 SM490Y の機械的性質

降伏点応力度	σ_y(MPa)	353
許容応力度	σ_a(MPa)	206
縦弾性係数	E(GPa)	206
線膨張係数	α(1/℃)	1.21×10^{5}
単位体積重量	ρ(KN/m^3)	77.0

上部構造は，図-1（d）に示すように，ラーメン橋脚に固定され，RC床版を有する鋼製2主箱桁橋である．それには死荷重と活荷重が作用しているものとした．

鋼製ラーメン橋脚は薄肉断面からなる．それは，図-1（b）に示すように，柱のフランジの幅と厚さがb_{cf}，t_{cf}，腹板のそれらがb_{cw}，t_{cw}である．同様に，はりではb_{bf}，t_{bf}，b_{bw}，t_{bw}である．これらは，鋼構造物標準図集[5]を参照し，支間長L，橋脚の全高h，全幅lとの関係で，つぎのように定めた．すなわち，

①柱とはりのフランジ幅：

$$b_{cf}=b_{bf}=\frac{L}{20} \tag{1}$$

②柱の腹板高：

$$b_{cw}=\frac{h+l}{20} \tag{2}$$

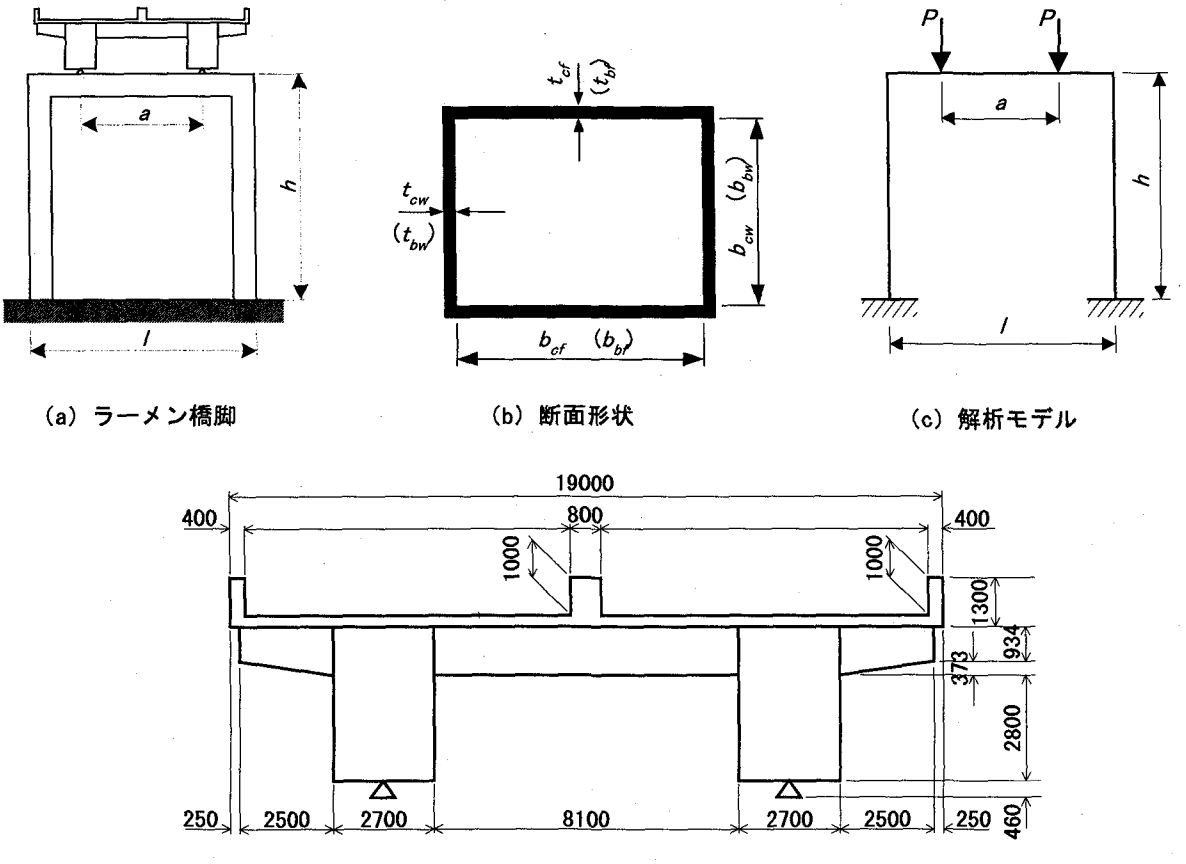
③はりの腹板高：

$$b_{bw}=\frac{l}{12} \tag{3}$$

である．

2.2 橋脚の断面設計

ラーメン橋脚の部材断面を許容応力度設計法と荷重係数設計法によって設計した．設計荷重は死荷重（D），



（a）ラーメン橋脚　　（b）断面形状　　（c）解析モデル

（d）上部構造の横断面　　（単位：mm）

図-1 解析対象の鋼製門形ラーメン橋脚と上部構造

活荷重（L），温度荷重（T），地震荷重（E）である．

（1）設計荷重

a）死荷重

死荷重の公称値D_nは，上部工の死荷重反力R_Dと橋脚の自重w_c，w_bの合計である．ここに，上部工の死荷重反力R_Dは，上部構造の設計死荷重を橋軸方向に等分布荷重とみなし，橋面工，主構造と支承，添加物ごとに荷重強度を求め，それらの合力を上部工の支点反力の影響線に適用して算定した．その結果，

$$D_n = R_D = 5.42 \text{（MN）} \tag{4}$$

が求められた．

橋脚の自重は，つぎのように求めた．すなわち，不静定な鋼製ラーメン橋脚を対象とするため，その板厚を繰り返し計算によって求めた．逐次計算で決定された板厚から単位長さあたりの体積を計算し，それに鋼材の単位体積重量を乗じ，さらに，ダイヤフラム，添接材，補剛材などの重量分として20%を加えて求めた．

b）活荷重

活荷重の公称値L_nに“道路橋示方書　I共通編”[6]のB活荷重を採用し，死荷重と同様，上部工の支点反力の影響線から求められた値を活荷重反力R_Lとした．

$$L_n = R_L = 1.90 \text{（MN）} \tag{5}$$

である．

c）温度荷重

温度荷重の公称値T_nは，温度がラーメン橋脚の断面内で均一に変化するものとし，

$$T_n = \Delta T = \pm 35℃ \tag{6}$$

とした．ただし，上部構造での温度変化は考慮しない．

d）地震荷重

地震荷重の公称値E_nは，“道路橋示方書　V耐震設計編”[1]における地盤特性と固有周期に対する係数（0.2＜T＜1.3）を考慮した設計水平震度K_hを用い，

$$K_h = E_n = 0.25 \tag{7}$$

に設定した．

（2）断面設計

a）許容応力度設計法による照査式

許容応力度設計法による照査は，“道路橋示方書　I共通編”[6]を参考に，上述の4種類の設計荷重に対して

$$\begin{aligned} &\sigma_D + \sigma_L \le 1.0\sigma_a, \\ &\sigma_D + \sigma_L + \sigma_T \le 1.15\sigma_a, \\ &\sigma_D + \sigma_E \le 1.5\sigma_a \end{aligned} \tag{8}$$

とする．ここにσ_D，σ_L，σ_T，σ_Eはそれぞれの設計荷重を単独に作用させた場合に任意断面に生じる応力，σ_aは許容応力度である．なお，式(8)をすべて満足するように設計断面を決定しなければならない．なお，応力照査の断面位置は，**図-1 (a)**に示すラーメン橋脚の基部および隅角部とした．

b）荷重係数設計法による照査式

荷重係数設計法では，

$$\gamma_D\sigma_D + \gamma_L\sigma_L + \gamma_T\sigma_T + \gamma_E\sigma_E \le \sigma_y \tag{9}$$

を満たす必要がある．ここに，荷重係数γ_D，γ_L，γ_T，γ_Eは文献 4），7）を参考に決定する．たとえば，限界状態を弾性限界とし，その限界状態関数Zを

$$Z = \sigma_y - (\sigma_D + \sigma_L + \sigma_T + \sigma_E) \tag{10}$$

目標信頼性指標を$\beta_T = 4.0$とすれば，

$$\gamma_D = 1.05,\ \gamma_L = 0.25,\ \gamma_T = 0.27,\ \gamma_E = 2.56 \tag{11}$$

のように決定される．ただし，死荷重は確定量である．一方，活荷重，温度荷重，地震荷重は確率変数として与えられる．

c）断面の決定

応力照査を行い，式(8)あるいは式(9)を満たすように板厚を決める．

その結果，**表-2** のように鋼製ラーメン橋脚の寸法諸元が決定された．ここに，I_c，I_bは，それぞれ柱とはりの曲げ剛さである．

2.3　鋼製ラーメン橋脚の初期不整

初期不整として，残留応力と初期たわみを考慮した．

（1）残留応力

箱形断面からなる部材に生じている残留応力を**図-2**に示すように仮定する．すなわち，断面の4隅には降伏点応力と同量の引張応力が生じているものとする．また，

表-2　構造解析するラーメン橋脚の寸法諸元（単位：mm）

モデル	1		2		3		4	
設計法	A	B	A	B	A	B	A	B
h	10,000		10,000		20,000		20,000	
l	20,000		30,000		20,000		30,000	
$b_{bf}=b_{cf}$	2,000		2,000		2,000		2,000	
b_{cw}	1,500		2,000		2,000		2,500	
b_{bw}	1,670		2,500		1,670		2,500	
$t_{cf}=t_{cw}$	31.6	27.4	43.3	27.9	20.3	33.1	29.3	28.2
$t_{bf}=t_{bw}$	24.5	22.7	31.7	21.8	20.2	33.1	26.2	26.4
I_c/l（$\times 10^{-3}m^3$）	8.9	7.8	23.1	14.9	5.4	8.8	13.0	12.5
I_b/l（$\times 10^{-3}m^3$）	4.4	4.1	9.4	6.4	3.6	5.9	7.7	7.8

A：許容応力度設計法，B：荷重係数設計法

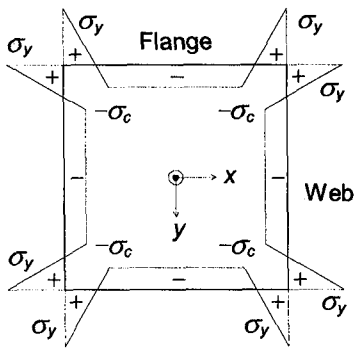


図-2　残留応力分布

板の中央部では，それにつり合う一様の圧縮応力が生じ，その大きさは板厚，鋼材の鋼種，入熱量などによって異なるが，$0.1\sigma_y$～$0.4\ \sigma_y$程度とされる[8]．

(2) 初期たわみ

道路橋示方書における構造物の製作基準によれば，初期たわみの許容値は部材長hの1/500とされる．ここでも，これを参考に，初期たわみを

$$w_0(x)=w_{0\max}\times\left(1-\cos\frac{\pi x}{2h}\right)$$

のように仮定する．ここに，$w_{0\max}$は初期たわみの最大値

$$w_{0\max}=\frac{h}{500}w_f$$

である．ただし，w_fは道路橋示方書で定められた許容値を係数倍するためのパラメータである．

2.4　入力地震波

地盤種別に定められた“道路橋示方書　V耐震設計編”の標準地震入力波のうち，**表-3**に示す6種類の地震波を用いる．

3. 運動方程式の定式化と数値解析法

3.1　解析上の仮定

鋼製ラーメン橋脚の運動方程式を誘導するにあたり，つぎのような仮定を設ける．

1) 門形ラーメン橋脚は構面内のみに振動する．
2) 門形ラーメン橋脚の左右基部で，入力地震波に位相のずれはない．
3) Bernoulli-Eulerの平面保持がなりたつ．
4) ラーメン橋脚は局部座屈しない．
5) 応力とひずみは，ひずみ硬化型のBi-linearな関係にある．

なお，上述の仮定のなかには，兵庫県南部地震の経験則と合致しないものもある．しかし，ここでは橋脚全体の動的応答に注目しているので，問題はないと思われる．

3.2　構造系全体の運動方程式

解析対象の鋼製ラーメン橋脚を有限個のはり－柱要素に離散化すれば，多自由度の振動系となる．その増分系の運動方程式を d'Alembert の原理に基づいて誘導するにあたり，材料的・幾何学的非線形性を考慮した Updated Lagrangian 手法を採用した．要素ごとに誘導した運動方程式に節点での力のつり合い条件を考えれば，構造系全体の運動方程式が

$$[M]\{\Delta\ddot{\delta}\}+[C]\{\Delta\dot{\delta}\}+[K]\{\Delta\delta\}=-\{\Delta P\}-(\{P_n\}+\{R_n\}) \quad (12)$$

のように求められる．ここに $[M]$，$[C]$，$[K]$はそれぞれ構造系の質量，減衰，剛性のマトリックス，$\{\Delta\ddot{\delta}\}$，$\{\Delta\dot{\delta}\}$，$\{\Delta\delta\}$，$\{\Delta P\}$はそれぞれ構造系の増分加速度，増分速度，増分変位，増分節点力，$(\{P_n\}+\{R_n\})$は時刻tすなわちn荷重段階での不平衡節点力である．ただし，質量マトリックスには集中質量マトリックスを，減衰マトリックスにはRayleigh減衰を適用した．

3.3　直接時間積分法

運動方程式(12)の解法にNewmarkのβ法を用いる．式(12)はこれによって任意時刻t+Δtでの増分変位$\{\Delta\delta\}$を未知数とする多元連立非線形代数方程式

$$\left[\frac{1}{\beta\Delta t^2}[M]+\frac{\gamma}{\beta\Delta t}[C]+[K]\right]\{\Delta\delta\}$$
$$=\left[\frac{1}{\beta\Delta t}[M]+\frac{\gamma}{\beta}[C]\right]\{\dot{\delta}_n\}$$
$$+\left[\frac{1}{2\beta}[M]+\frac{\Delta t}{2\beta}(\gamma-2\beta)[C]\right]\{\ddot{\delta}_n\}$$
$$-\{\Delta P\}-(\{P_n\}+\{R_n\}) \quad (16)$$

を得る．ここにβ，γは解法の安定や精度から決定される定数で，$\beta=0.25$，$\gamma=0.5$とした．

表-3　入力地震波

地震のタイプ	地盤種	地震名	観測地点	成分	卓越周期(s)
I	I	宮城県沖地震	開北橋周辺地盤上	TR	2.500
	II	日向沖地震	板島橋周辺地盤上	TR	2.500
	III	日本海中部地震	津軽大橋周辺地盤上	TR	1.786
II	I	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台地盤上	NS	0.732
	II		JR西日本鷹取駅構内地盤上	NS	1.081
	III		東神戸大橋周辺地盤上	N12W	2.000

3.4 多元連立非線形代数方程式の解法

Newmarkのβ 法の適用によって得られた式(16)を荷重増分法とNewton-Raphson法を組合せた混合法によって解く．非線形代数方程式の解は，反復過程における最新の増分変位$\{\Delta\delta_i\}$と計算過程で累積される増分変位$\sum_{k=1}^{i}\{\Delta\delta_k\}$の比

$$\frac{\left|\{\Delta\delta_i\}\right|}{\left|\sum_{k=1}^{i}\{\Delta\delta_k\}\right|}\leq\varepsilon \tag{17}$$

が許容誤差εより小さくなれば，反復解は収束したものとみなす．ここに，ε は解の精度と計算時間とを考慮して定められる．

4. 数値解析結果とその考察

許容応力度設計法と荷重係数設計法に基づいて設計した4種類の鋼製門形ラーメン橋脚を対象に，**表-3**に示す6種類の地震動に対する弾塑性時刻歴応答解析を行った．ここでは，タイプⅠの地震に相当し，Ⅰ種地盤で観測された地震動を“タイプⅠ・Ⅰ”のように表記する．

鋼製ラーメン橋脚の時刻歴応答解析の前に，その自由振動解析を行い，3次までの固有周期と振動モードを明らかにした．その結果，**表-4**に示す固有周期を得た．

4.1 構造形式の差異による応答の違い

(1) 柱頭における水平変位応答

柱の頂部における水平変位の時刻歴応答δ/δ_yを描けば，**図-3**（a）を得る．ここに，δ_yは鋼製橋脚の基部が降伏する時の柱頭での水平変位である．図中，(1)，(3)，(5)，(7) は許容応力度設計された橋脚，(2)，(4)，(6)，(8) は荷重係数設計された橋脚に対する水平変位応答を示す．

図から明らかなように，応答が構造形式によってかなり異なる．特に，モデル3の場合，その他の橋脚に比べて，振幅は大きく，減衰に要する時間が長い．一般に，幾何形状がスレンダーなほど，時刻歴応答は大きくなる．しかし，モデル4（h/l=0.67）は，モデル1（h/l=0.50）に比較してスレンダーにもかかわらず，応答変位は小さい．**表-2**からわかるように，モデル4はモデル1よりも柱の剛性が大きい．それゆえ，上述の結果は，剛性による影響を強く受けたためと考えられる．

(2) 鋼製ラーメン橋脚の耐震性評価

図-3（b）にモデル1からモデル4に対する最大応答変位を，**図-3**（c）に残留変位をそれぞれ示す．

図から明らかなように，モデル1，2，4では，いずれの地震動に対しても許容応力度設計されたラーメン橋脚が荷重係数設計されたそれよりも応答変位が小さい．特に，モデル2には，1,000年オーダーの地震動が作用しているにもかかわらず，“タイプⅡ・Ⅰ”の地震動以外は弾性応答を呈している．

一方，モデル3は，その他のモデルに比べて最大応答変位が大きい．

以上の結果をまとめれば，許容応力度設計された鋼製ラーメン橋脚の場合，荷重係数設計されたそれよりもラーメンの幾何形状によって応答変位の変動が大きく，そのばらつきが大きい．一方，荷重係数設計されたラーメン橋脚は，許容応力度設計されたものよりも幾何形状による応答のばらつきが少ない．

したがって，筆者らがさきの論文[3),4)]に示した静的な耐震信頼性解析結果と同様，動的耐震性能においても式(9)による荷重係数設計の照査が，幾何形状の違いによらず，保証した耐震性能をほぼ一定のレベルで満たすことになることがわかる．

4.2 地震動と地盤種の相違による地震応答の差異

(1) 柱頭での水平変位応答

地震動や地盤種の相違によって柱頭での水平変位がどのように異なるかを調べたところ，**図-4（その1）**を得た．ただし，ここでは4.1の解析結果において，許容応力度設計された橋脚と荷重係数設計された橋脚の応答変位に顕著な差異の認められたモデル3の場合について考察する．

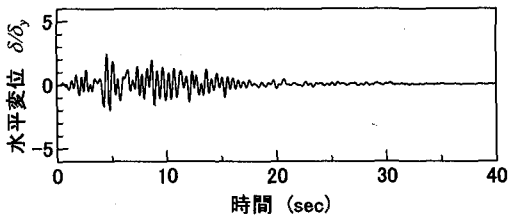
図-4（a）と（b）に示す地盤種による応答を比較したところ，タイプⅠに相当する地震動では，地盤種がⅠ種からⅢ種へと変化するに従って，振幅が増大する傾向にある．一方，タイプⅡの地震動に相当する場合，Ⅱ種地盤における振幅が最も著しい．なお，軟弱な地盤ほど振幅が顕著になるというような結果は得られなかった．これは，タイプⅡの地震動に相当する兵庫県南部地震の観測記録によって地盤種ごとの応答の比較を行っても，観測点が異なるため，すべての地盤種が同等の条件ではないということに起因しているものと思われる．

タイプⅠとタイプⅡの地震動による応答の結果を比較したところ，2つの設計法にかかわらず，最大応答変位

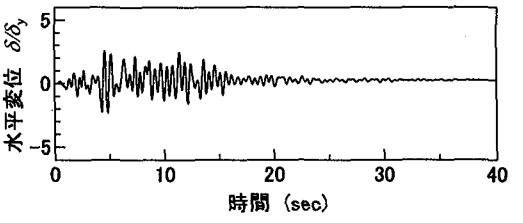
表-4 各モデルの振動モデルに対する固有周期

（単位：sec）

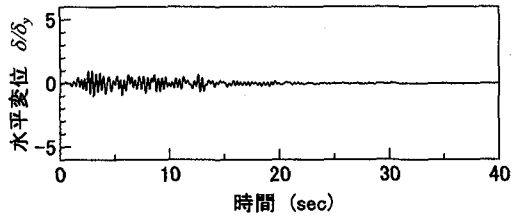
モデル	1		2		3		4	
設計法	A	B	A	B	A	B	A	B
1次の振動モード	0.81	0.87	0.97	1.20	1.23	0.97	1.30	1.32
2次の振動モード	0.24	0.25	0.16	0.20	0.61	0.48	0.40	0.41
3次の振動モード	0.14	0.15	0.10	0.12	0.18	0.14	0.12	0.12



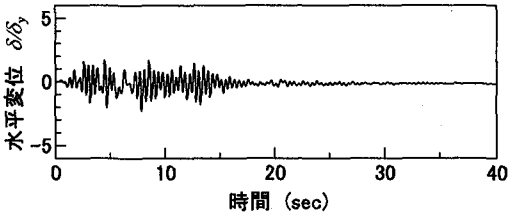
(1) 1A



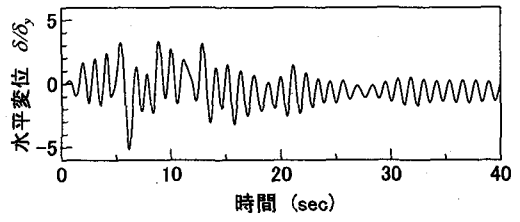
(2) 1B



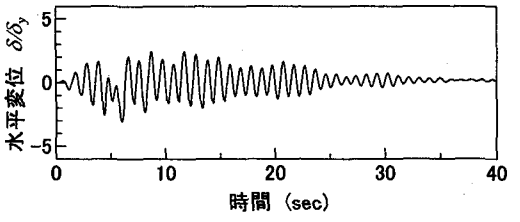
(3) 2A



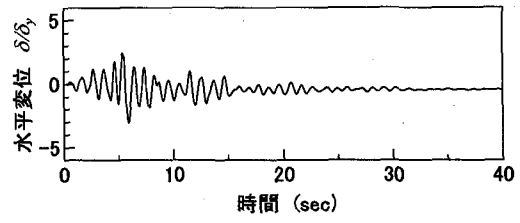
(4) 2B



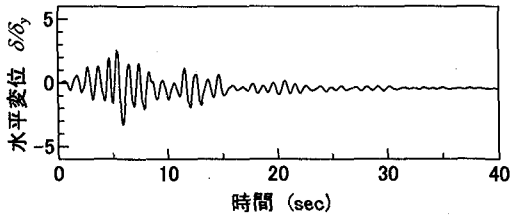
(5) 3A



(6) 3B

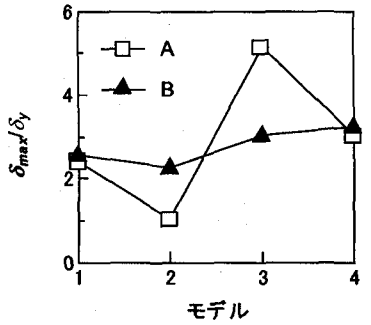


(7) 4A

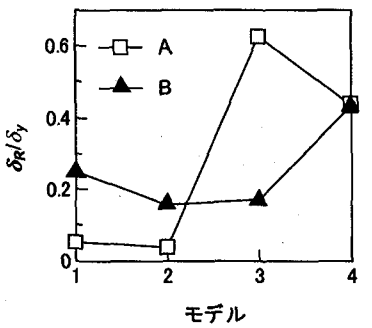


(8) 4B

(a) 柱頭での水平変位の応答

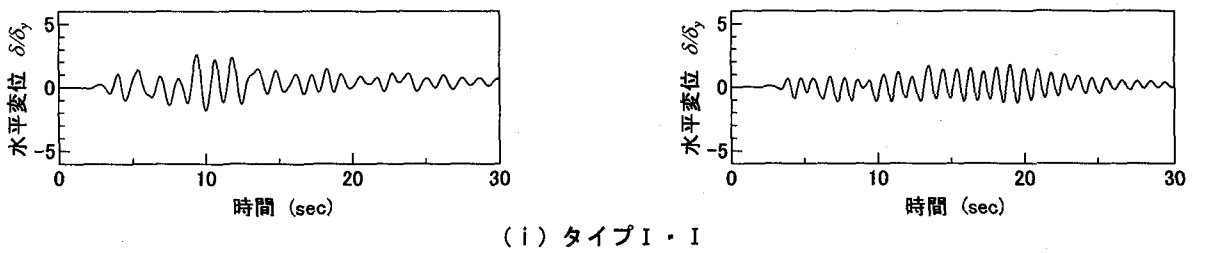


(b) 最大応答変位による耐震性評価

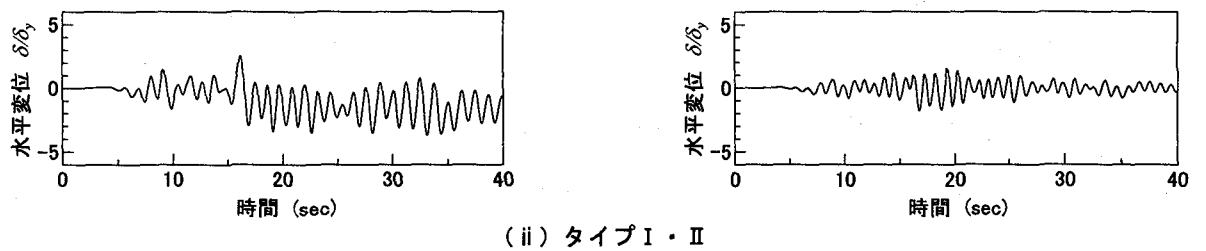


(c) 残留変位による耐震性評価

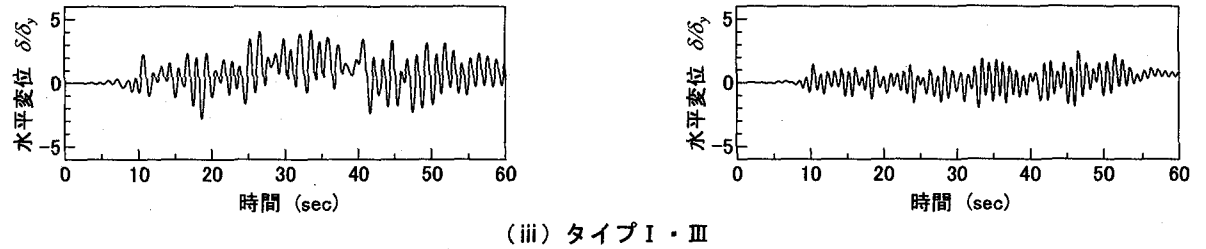
図-3 タイプⅡ・Ⅱにおけるラーメン構造形式の差違による応答結果



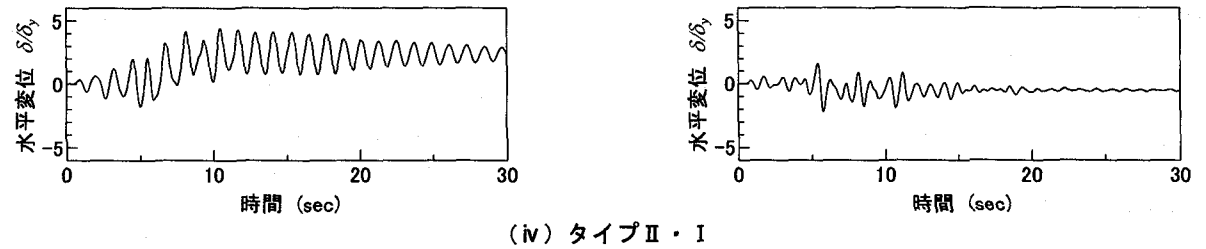
（ｉ）タイプⅠ・Ⅰ



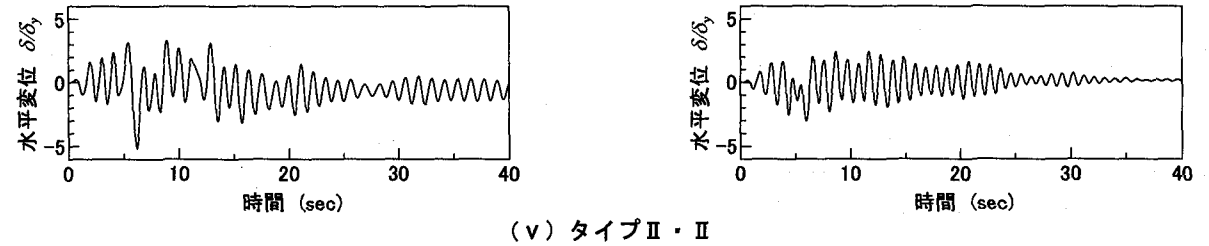
（ii）タイプⅠ・Ⅱ



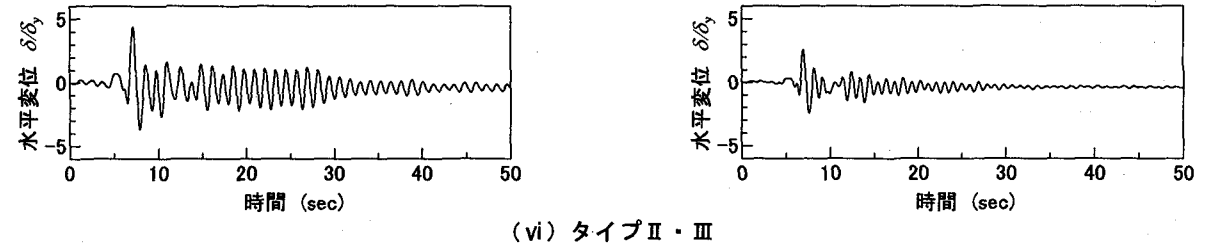
（iii）タイプⅠ・Ⅲ



（iv）タイプⅡ・Ⅰ



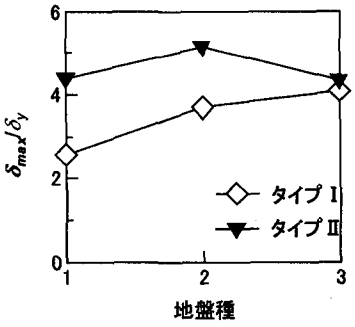
（v）タイプⅡ・Ⅱ



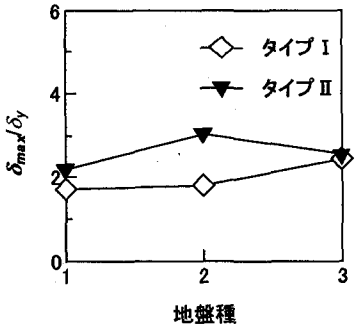
（vi）タイプⅡ・Ⅲ

(a) 3A の柱頭での水平変位の応答　　(b) 3B の柱頭での水平変位の応答

図-4　モデル 3 を対象とした地震タイプや地盤種の差違による応答結果（その１）



(c) 3A の柱頭における最大変位の応答結果



(d) 3B の柱頭における最大変位の応答結果

図-4　モデル3における地震タイプや地盤種の差違による応答結果（その2）

は，タイプⅡに相当する地震動を受けた方がタイプⅠに相当する地震動を受けた場合よりも大きかった．

太平洋沿岸域のプレート境界で発生する地震を想定したタイプⅠの地震動では，大きな振幅の地動が比較的長時間にわたって繰り返される．一方，内陸の活断層のずれによって起こる直下型のタイプⅡ地震動では，地動の継続時間は短いものの，極めて強い揺れを伴う．先に示したラーメン橋脚の応答にもそれらの特徴が強く反映されている．それゆえ，地震時の構造物の応答は，設計法や地盤種の違いだけでなく，地震動と構造物の固有周期との関係にも大きく影響され，構造物の信頼性指標を静的解析の結果[3),4)]だけで判断し設定するのでは，不十分であることが明らかになった．

本研究では，わずか数ケースの事例のみを考察したが，今後，さまざまなラーメン橋脚を対象に，系統的な研究を続ける必要があろう．

(2) 最大応答変位による耐震性評価

許容応力度設計法と荷重係数設計法によって設計されたモデル3を対象に，地盤種の違いによる最大応答変位の相違を検討すれば，**図-4** (c) と (d) を得る．設計法の違いによる応答の差異を調べたところ，タイプⅠとタイプⅡの地震動にかかわらず，あるいは，地盤種にもかかわらず，荷重係数設計された橋脚の方が許容応力度設計されたものよりも応答変位のバラツキが少ない．

以上のことから，筆者らが過去の論文[3),4)]で静的信頼性解析結果をもとに指摘した許容応力度設計法の問題点，それを解決するために導入した荷重係数設計法の有効性が動的解析の結果からも明らかにされたと思われる．また，静的信頼性解析では考慮できなかった個々の地震動特性による動的応答の違いについても考慮できたことは，意義深いことであると思われる．

5. あとがき

現在，世界の趨勢になりつつある信頼性理論に基づいた限界状態設計法を鋼道路橋の設計に導入するためには，鋼道路橋の地震時挙動を明らかにしておく必要がある．現行道路橋示方書では，地震応答などに未解明な部分の多い鋼製橋脚の耐震設計に動的解析による耐震性照査を規定している．

ここでは，許容応力度設計法と荷重係数設計法によって設計された鋼製門形ラーメン橋脚を対象に，上部構造と橋脚の死荷重および活荷重が作用するもとでの弾塑性時刻歴応答解析を行い，その地震時挙動を明らかにした．

数値解析で得られた結果は，つぎのようである．

1) 構造形式の違いによって，柱頭における水平変位の応答が異なる．一般に幾何形状がスレンダーなラーメン橋脚ほど，地震動に対する応答は大きくなる．また，柱の剛性による影響を強く受ける．
2) 地盤種の違いによる応答を調べた結果，必ずしも軟弱な地盤に相当するⅢ種地盤での応答が最大になるとは限らなかった．この原因として，本研究で地盤と橋脚の動的相互作用を考慮しなかったことが考えられる．しかし，いずれにしても構造物の地震応答は，設計法の違いや幾何形状だけでなく，地震動と構造物の固有振動特性との関係に大いに影響される．
3) 許容応力度設計されたラーメン橋脚のなかには，弾性応答を示すものや顕著な弾塑性応答を示すものが混在した．一方，荷重係数設計されたラーメン橋脚は，許容応力度設計された橋脚よりも幾何形状の相違による応答のばらつきが少ない．このことより，静的信頼性理論に基づいて得られた荷重係数設計式で設計されたラーメン橋脚の方が動的信頼性レベルの点でも一定のレベルで耐震性能を確保していることが示された．また，幾何形状によらず一定のレベルで満足していることも示された．

参考文献

1) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説　V耐震設計編，丸善，1990-2.
2) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説　V耐震設計編，丸善，1996-12.
3) 白木　渡・井面仁志・今井慈郎・伊藤則夫・石川

浩：地震時保有水平耐力照査式を用いた終局限界状態に対する鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.45A，pp.389-396，1999-3.
4）白木　渡・山本優也・松本　聡・堂垣正博：弾塑性有限変位解析による鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性，構造工学論文集，土木学会，Vol.46A，pp.403-411，2000-3.
5）阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，1980-4.
6）日本道路協会編：道路橋示方書・同解説　Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編，丸善，1996-2.
7）北沢正彦・久保雅邦・白木　渡・亀田弘行：鋼製橋脚における荷重組合せの解析と荷重係数の試算，構造工学論文集，土木学会，vol.33A，pp.761-773，1987-3.
8）土木学会鋼構造委員会編：座屈設計ガイドライン，土木学会，1987-10.

(2001年9月14日受付)