

I-B4

鋼製ラーメン橋脚の地震時弾塑性動的応答解析

岐阜大学工学部 正会員 村上茂之

岐阜大学工学部 正会員 奈良 敬

片山ストラテック 正会員 江尻武弘

1. はじめに

道路橋示方書V耐震設計編¹⁾では、鉄筋コンクリート製ラーメン橋脚に対しては、地震時保有水平耐力法が適用された。しかし、鋼製ラーメン橋脚の耐震設計法に対しては地震力の作用を受けた場合の応答メカニズム、靱性の評価等、未解明な部分が多いため、地震時保有水平耐力法の適用が見送られている。また、単柱形式の鋼製橋脚は、可能な限り不静定構造物（ラーメン構造物）とすることを薦めている²⁾。

本研究では、鋼製門型ラーメン橋脚を対象として、幾何学的ならびに材料学的非線形性を同時に考慮した弾塑性動的応答解析³⁾を行い、その弾塑性動的応答性状について明らかにすることを目的とする。

2. 動的解析における基礎方程式

動的解析にあたっては、平衡状態(N)から次の平衡状態(N+1)までの増分形の振動方程式に Newmark-β法を適用して、変形状態(m)において誘導された次式に示すような動的等価剛性方程式³⁾⁴⁾を反復法により解く。

a) $m=1$ のとき

$$\left[\mathbf{M}_{m-1} \left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} \right) + \mathbf{C}_{m-1} \left(\frac{\gamma}{\beta \Delta t} \right) + \mathbf{K}_{m-1} \right] \Delta \mathbf{d}_m = \Delta \mathbf{F}_{N+1} + \mathbf{M}_{m-1} \left(\frac{\dot{\mathbf{d}}_N}{\beta \Delta t} + \frac{\ddot{\mathbf{d}}_N}{2\beta} \right) + \mathbf{C}_{m-1} \left\{ \frac{\gamma \dot{\mathbf{d}}_N}{\beta} - \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{\mathbf{d}}_N \Delta t \right\} \quad (1)$$

b) $m \geq 2$ のとき

$$\left[\mathbf{M}_{m-1} \left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} \right) + \mathbf{C}_{m-1} \left(\frac{\gamma}{\beta \Delta t} \right) + \mathbf{K}_{m-1} \right] \Delta \mathbf{d}_m = \Delta \mathbf{R}_{m-1} \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{R}_{m-1} = \mathbf{F}_{N+1} - \mathbf{F}_N - (\mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}}_{m-1} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}}_{m-1} + \mathbf{K} \mathbf{d}_{m-1}) \quad (3) \quad \Delta \mathbf{d}_{N+1} = \Delta \mathbf{d}_N + \sum_{m=1}^l \Delta \mathbf{d}_m \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{M}_{m-1}$ ：変形状態(m-1)での質量マトリックス、 $\mathbf{C}_{m-1}$ ：変形状態(m-1)での減衰マトリックス、 $\mathbf{K}_{m-1}$ ：変形状態(m-1)での剛性マトリックス、 $\Delta \mathbf{d}_m$ ：変形状態(m-1)からの増分変位ベクトル、 $\mathbf{d}_N, \dot{\mathbf{d}}_N, \ddot{\mathbf{d}}_N$ ：平衡状態(N)における変位、速度、加速度ベクトル、 $\Delta \mathbf{F}_{N+1}$ ：平衡状態(N)から(N+1)までの増分荷重ベクトル、 $\Delta \mathbf{R}_{m-1}$ ：変形状態(m-1)における残差力ベクトル、 Δt ：時間増分、 β, γ ：Newmark-β法に用いるパラメータ、 l ：収束回数を表す。

3. 解析モデル

図-1に示すような断面を有し、図-2に示すような1層1スパンの鋼製ラーメン橋脚を解析モデルとする。解析モデルの構造諸元を表-1に示す。ただし、梁部のスパン長Lについては、軸力変動の影響を考慮するため、 $L=500, 1000\text{cm}$ と変化させた。解析モデルの記号において、R5はフランジの縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_{pf} = 0.5$ 、G5は補剛材剛比 γ を弾性座屈理論に基づく必要最小剛比 γ^* で無次元化した剛比パラメータ $\gamma/\gamma^* = 5$ 、F5は柱部材としての細長比 $\bar{\lambda} = 0.5$ を意味する。以下、本文中において、解析モデルは、これらの記号を組合せて

表記する。初期不整については、残留応力を考慮し、補剛板全体が自己平衡するような分布形⁵⁾を用いた。鋼種はSM490Yとし、等方

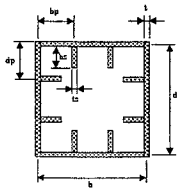


図-1 断面形状

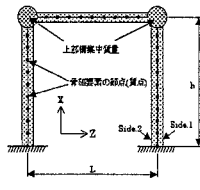


図-2 要素分割

表-1 構造諸元

モデル	b (cm)	bp (cm)	t (cm)	bp/t —	hs (cm)	ts (cm)	h (cm)
R5G5F5	210.0	70.0	3.20	21.89	29.71	5.04	1940.0
R5G5F35	210.0	70.0	3.20	21.89	29.71	5.04	1360.0

但し、 $b=d$, $bp=dp$, h : 橋脚高

キーワード：鋼製ラーメン橋脚，動的解析，軸力変動，局部座屈，耐震性能

〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 Tel.058-293-2405 Fax.058-293-2425

移動硬化則に基づいた Bi-linear 型の構成則を用いた。軸力比については、震度法で設計された橋脚の軸力比と細長比の関係から各地盤種別に応じて決定した（例えば、 $\bar{\lambda} = 0.5$ の場合、I 種地盤については、 $P/P_y = 0.16$ ）。但し、軸力比の低減が橋脚の弾塑性動的応答挙動に及ぼす影響を明らかにするために軸力比 $P/P_y = 0.1$ とする数値計算も行った。入力地震波については、レベル 2 のタイプ I 地震波およびタイプ II 地震波を用いた。

4. 解析結果および考察

R5G5F5 にタイプ II・I 種地盤（兵庫県南部地震気象庁神戸海洋気象台地盤上南北成分）の入力地震波を与えた場合について述べる。降伏変位（頭部に静的な水平力を受け、柱基部が降伏した時の頭部水平変位）で無次元化した右隅角部の水平変位の時刻歴応答を図-3 に、降伏軸力 で無次元化した軸力変動の時刻歴応答を図-4 に、降伏ひずみで無次元化した軸方向垂直ひずみの時刻歴応答を図-5 にそれぞれ示す。

図-3(a), (b)より、いずれの場合

においても、最大水平変位は降伏変位の 3 倍程度、残留変位は橋脚高の約 0.9% であり、梁部のスパン長の違いによる水平変位応答への影響は、振幅以外ほとんど見られない。また、図-3(c)は、 $L=1000\text{cm}$ 、 $P/P_y=0.1$ とした場合の応答であり、 $P/P_y=0.16$ の場合と比較して、

応答の最大値は約 40% 程度小さくなった。

ラーメン橋脚では、上部構死荷重反力に相当する圧縮軸力に加えて、地震によって生じる水平力の変動に伴う軸力が柱部材に作用する。図-4(a), (b)より、橋脚柱部に作用する軸力の最大値は、降伏軸力に対して、 $L=500\text{cm}$ の場合で約 45%、 $L=1000\text{cm}$ の場合で約 35% である。従って、梁部のスパン長を小さくすれば、地震による水平力に伴って軸力変動の影響を大きく受けることになる。

図-5(a), (b)より、 $P/P_y=0.16$ の場合、降伏ひずみの最大約 6 倍の垂直ひずみが発生している。通常の断面の場合には、橋脚基部に局部座屈が発生しているものと思われる。しかし、 $P/P_y=0.1$ の場合、ひずみは降伏ひずみの約 4 倍に抑えられている。従って、軸力比を 0.1 程度に低減すれば、適切な断面を採用することにより、水平変位、軸方向垂直ひずみ、残留ひずみの発生を抑え、結果として、局部座屈の発生を抑制できるとと思われる。

5. おわりに

門型鋼製ラーメン橋脚を対象とした弾塑性動的応答解析により以下の見解を得た。

- ①梁部のスパン長を小さくすれば、地震による水平力に伴う軸力変動が大きく現れる。その結果、横梁部に大きな繰返しせん断力を受け、ウェブプレートにせん断座屈が発生する可能性が高くなる。
- ②入力地震波による共振を避けた場合、軸力比の低減は、水平変位、軸方向垂直ひずみ、残留ひずみの発生を抑え、結果として、局部座屈の発生を抑制し、耐震性能向上に効果的である。また、別途実施中の補剛板の塑性変形能を用いて、軸方向垂直ひずみから、局部座屈の発生の有無を定量的に評価できる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996 年，12 月。2) 土木学会関西支部：大震災に学ぶ，第 I 巻，1998 年，6 月。3) 奈良敏・早川慎治・森脇良一：残留応力を考慮した補剛鋼箱型断面柱の弾塑性地震応答解析，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集 第 18 巻，1994 年，7 月。4) 奈良敏・村上茂之・玉利幸一：局部座屈を考慮した鋼製橋脚の弾塑性動的応答解析，第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.263-270，1998 年，11 月。5) 小松定夫・牛尾正之・北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文集，第 285 号，1977 年，9 月。

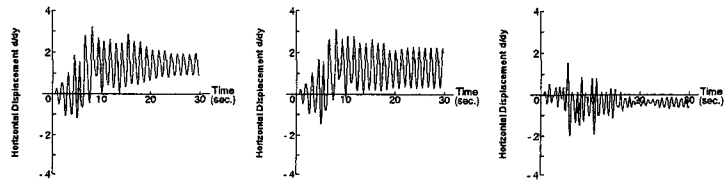


図-3 水平変位時刻歴応答（右隅角部）

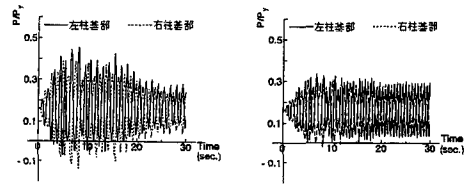


図-4 軸力変動 ($P/P_y=0.16$)

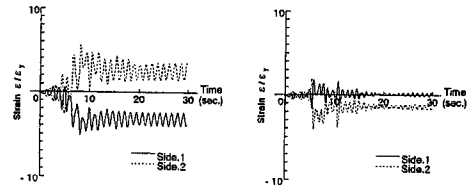


図-5 軸方向垂直ひずみ時刻歴応答 ($L=1000\text{cm}$ 右柱基部)