

## 基礎との相互作用と橋脚の損傷に関する一考察

徳島大学大学院 学生員○河野友紀

徳島大学工学部 正員 平尾 潔

徳島大学工学部 正員 沢田 勉

徳島大学工学部 正員 成行義文

1. まえがき 近年、強震下における構造物の損傷をエネルギー論的に評価し、合理的な耐震設計法を導くための研究が盛んであるが、その多くは基礎を固定したものであり、構造物と基礎との動的相互作用を考慮したこの種の研究例はあまりみあたらない。そこで本研究では、杭基礎をもつRC橋脚を対象として、動的相互作用を考慮した簡単な2質点3自由度系モデル（Sway-Rockingモデル）に対する地震応答解析を試みた。そして解析結果をもとに、基礎との相互作用が橋脚天端の最大水平変位並びに軸体の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響について若干の比較検討を行った。

2. 解析方法 図-1に示すSway-Rockingモデルの橋脚天端の水平振動、基礎のSway及びRocking振動に対する運動方程式をマトリックス表示すれば、次式のようになる。

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{X}} + 2h_1\omega_1\bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{X}} + \omega_1^2\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{X}) = -\bar{\mathbf{V}}\mathbf{x}_0 \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{M}}$ 、 $\bar{\mathbf{C}}$ 、 $\bar{\mathbf{F}}$ は、それぞれ、正規化された質量マトリックス、減衰マトリックス、復元力ベクトル、また、 $\bar{\mathbf{V}}$ は荷重ベクトル、 $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ は相対変位、速度、加速度ベクトルを表し、以下のようにある。

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1+\bar{m}_2 & 1 \\ 1 & 1 & 1+\bar{I}_\theta \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{m}_2 & \bar{h}_z & \bar{\omega}_2 \\ 0 & 0 & \bar{I}_\theta & \bar{h}_\theta & \bar{\omega}_\theta \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_1 & \bar{Q}_2 \\ \bar{m}_2 & \bar{\omega}_2 \\ \bar{I}_\theta & \bar{\omega}_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{V}} = \{1, 1+\bar{m}_2, 1\}^T, \quad \mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_\theta\}^T, \quad \dot{\mathbf{X}} = d\mathbf{X}/dt, \quad \ddot{\mathbf{X}} = d\dot{\mathbf{X}}/dt$$

ただし、 $\bar{m}_2 = m_2/m_1$ 、 $\bar{I}_\theta = I_\theta/(m_1 \cdot h^2)$ 、 $\bar{h}_z = h_z/h_1$ 、 $\bar{h}_\theta = h_\theta/h_1$ 、 $\bar{\omega}_2 = \omega_2/\omega_1$ 、 $\bar{\omega}_\theta = \omega_\theta/\omega_1$ 、 $\bar{Q}_1 = Q(x_1)/k_{10}$ 、 $\bar{Q}_2 = Q(x_2)/k_{20}$ 、 $\bar{Q}_\theta = Q(x_\theta)/k_{\theta 0}$ であり、 $(m_1, k_{10}, h_1, \omega_1 = \sqrt{k_{10}/m_1}, Q(x_1))$ 、 $(m_2, k_{20}, h_2, \omega_2 = \sqrt{k_{20}/m_2}, Q(x_2))$ は、それぞれ、橋脚天端の水平振動及び基礎のSway振動における質量、初期剛性、減衰定数、固有円振動数、復元力を、 $(I_\theta, k_{\theta 0}, h_\theta, \omega_\theta = \sqrt{k_{\theta 0}/I_\theta}, Q(x_\theta))$ は、基礎のRocking振動における回転慣性、初期剛性、減衰定数、固有円振動数、復元力を表す。また、 $x_0$ は入力地震動の加速度である。

次に、橋脚を含めた上部工質量 $m_1$ で正規化したエネルギー応答の釣合式は、式(1)の運動方程式に変位増分 $d\mathbf{X} = \dot{\mathbf{X}}dt$ を乗じ、地震継続時間にわたって積分することにより、次式のように表される。

$$\int \dot{\mathbf{X}}^T \bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{X}} dt + 2h_1\omega_1 \int \dot{\mathbf{X}}^T \bar{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{X}} dt + \omega_1^2 \int \bar{\mathbf{F}}^T(\mathbf{X}) d\mathbf{X} = - \int \mathbf{x}_0 \bar{\mathbf{V}}^T \dot{\mathbf{X}} dt \quad (3)$$

式(1)～(3)より明らかのように、このSway-Rockingモデルの応答は、上部工質量を含む橋脚の構造特性値 $(m_1, \omega_1, h_1)$ を基準とした質量比 $\bar{m}_2$ 、回転慣性比 $\bar{I}_\theta$ 、円振動数比 $\bar{\omega}_2$ 、 $\bar{\omega}_\theta$ 、減衰定数比 $\bar{h}_z$ 、 $\bar{h}_\theta$ 、並びに、復元力特性 $(Q(x_1), Q(x_2), Q(x_\theta))$ に依存することになる。ただし、本研究ではその基礎的研究として、復元力特性については橋脚の $Q(x_1)$ 、基礎の $Q(x_2)$ 及び $Q(x_\theta)$ に対し、それぞれ、図-2、図-3に示すQ-hystモデル、Hardin-Drnevichモデル<sup>1)</sup>を用いた。また、本解析では、

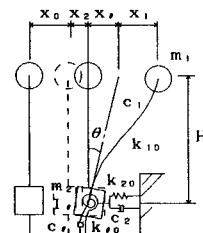


図-1 Sway-Rocking モデル

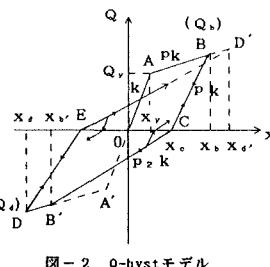


図-2 Q-hyst モデル

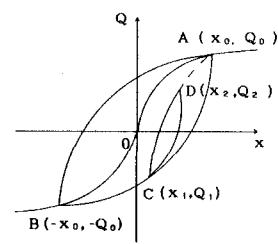


図-3 Hardin-Drnevich モデル

式(1)は線形加速度法により解き、式(3)は台形公式により数値積分した。

3. 解析結果 表-1に示すような構造特性値をもつ、3つの異なるモデル橋脚<sup>2)</sup>を選び、これらの質量比 $\bar{m}_2$ 、回転慣性比 $\bar{I}_\theta$ 、円振動数比 $\bar{\omega}_2$ 、減衰定数比 $\bar{h}_2$ 、 $\bar{h}_\theta$ を2、3変化させ、最大加速度を300gal、500galとしたEl-centro地震及び八戸地震を入力して解析した。そして解析結果をもとに、これらの構造特性並びに地震動特性の相違と、基礎との動的相互作用が橋脚の損傷、すなわち天端の最大水平変位並びに軸体の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響との関係について比較検討した。

その詳細は発表会当日にゆずり、ここではEl-centro地震（最大加速度300gal）を入力した場合の天端の最大水平変位 $x_{imax}$ に対する結果を図-4に示しておく。なお、図では横軸に円振動数比 $\bar{\omega}_2$ をとり、縦軸には、天端の最大水平変位 $x_{imax}$ に及ぼす基礎との相互作用の影響をみやすくするため、基礎を固定とした場合の最大水平変位 $x_{imax0}$ で正規化した値、 $\bar{x}_{imax} = x_{imax} / x_{imax0}$ 、をとっている。また、質量比 $\bar{m}_2$ 、回転慣性比 $\bar{I}_\theta$ 及び円振動数比 $\bar{\omega}_\theta$ の相違による影響を見るため、これらの組み合わせを2、3変化させた場合の結果を比較して示していく。

4. まとめ 本研究結果を要約すれば、1) 基礎との動的相互作用が橋脚の損傷（天端の最大水平変位並びに軸体の履歴吸収エネルギー）に及ぼす影響は、構造特性（質量比 $\bar{m}_2$ 、回転慣性比 $\bar{I}_\theta$ 、円振動数比 $\bar{\omega}_2$ 、 $\bar{\omega}_\theta$ 、減衰定数比 $\bar{h}_2$ 、 $\bar{h}_\theta$ ）並びに入力地震動特性すべてに依存し複雑であるが、相互作用の影響によってその損傷が大きくなる場合はいずれも、円振動数比 $\bar{\omega}_2$ が1.5以上の範囲であり、各構造特性パラメータのうちではこの $\bar{\omega}_2$ が最も重要なパラメータと思われる。2) 実在に近い表-1のモデル橋脚では、いずれも相互作用の影響によって橋脚の損傷は小さくなった。

参考文献 1) (財)防災研究協会；橋梁基礎の耐震設計法に関する調査研究（その2）、昭和62年3月  
2) 川島・長谷川・小山・吉田；大地震に対するRC橋脚の耐震設計法に関する研究、土木研究所資料第2266号、昭和60年12月

表-1 構造特性値及びパラメータ

$m_1$ (kg)	$\bar{m}_2$	$\bar{I}_\theta$	$\omega_1$ (1/s)	$\bar{\omega}_2$	$\bar{\omega}_\theta$
$0.19 \times 10^3$	$0.39 \times 10^0$	$0.12 \times 10^0$	$0.23 \times 10^2$	$0.23 \times 10^1$	$0.35 \times 10^1$
$0.42 \times 10^3$	$0.79 \times 10^0$	$0.22 \times 10^0$	$0.10 \times 10^2$	$0.41 \times 10^1$	$0.31 \times 10^1$
$0.59 \times 10^3$	$0.11 \times 10^1$	$0.77 \times 10^0$	$0.57 \times 10^1$	$0.57 \times 10^1$	$0.30 \times 10^1$

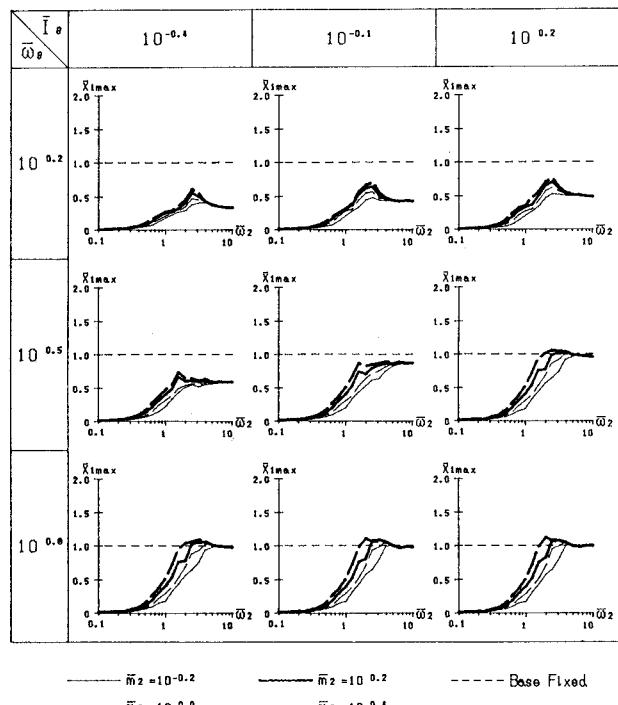


図-4 正規化した天端の最大水平変位 ( $\omega_1 = 0.57 \times 10^1$ )