

橋脚基礎底面に滑り型免震機構を有する 橋梁の地震応答特性の検討

河野哲也¹・山野辺慎一²・村山八洲雄³

¹鹿島建設技術研究所研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:tetsuya-kono@kajima.com

²鹿島建設技術研究所上席研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:yamanobe@kajima.com

³岡山大学教授 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

E-mail:mrym@cc.okayama-u.ac.jp

レベル2地震程度の強い地震力が橋梁に作用した場合に基礎と地盤間に生じる剥離や滑り現象によって、構造物の応答が低減されることが知られている。ここでは、橋脚基礎底面に滑り面を設けることで橋梁の最大応答を低減させる滑り型基礎免震構造の地震時の応答特性について、非線形動的解析により検討を行った。一般的な高架橋を上部構造および基礎の2自由度系でモデル化し、滑り型基礎免震構造の基本的な応答メカニズムについて整理した。

Key Words : Seismic Isolation of Foundation , Nonlinear dynamic analysis, Reduction of acceleration , Remaining deformation

1. はじめに

橋梁などの構造物がレベル2地震のような強い地震力を受けたとき、基礎の浮き上がりや地盤と基礎間に滑り現象が生じることで構造物の応答が低減し、予想よりも被害が軽減されることが知られている¹⁾。基礎の浮上りによって構造物の応答低減効果があることを解析的に検討している報告もある²⁾。また、Rion-Antirion橋の耐震設計では、礫層で支持された基礎が滑動する場合に滑動しない場合と比較して応答が低減することを確認している³⁾。しかしながら、基礎と地盤間の滑りを適切に制御して応答低減を積極的に図る構造の開発は実現には至っていない。

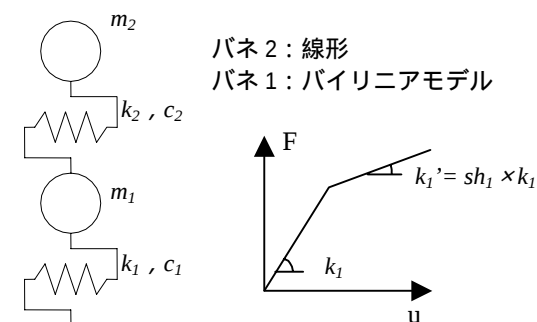
ここでは、橋脚基礎底面に滑り面を設けて構造物の応答低減を期待する滑り型基礎免震構造の開発するにあたって、本構造の基本的な地震時応答特性を把握するために、上部構造と下部構造をそれぞれ1質点でモデル化した2自由度系モデルの非線形動的解析による応答スペクトル特性の検討を行った結果について報告する。

2. 解析モデルおよび入力地震動

一般的な高架橋⁴⁾を解析対象橋梁として、解析モデルを上部構造の応答と下部構造の滑りを評価する

ために図-1のような2自由度系モデルとした。表-1に解析モデルの諸元を示す。

ここで、 m_1 、 m_2 は、それぞれ下部構造、上部構造の節点質量をモデル化しており、道路橋示方書の固有周期算定方法を参考にして、上部構造質量は、 $m_2 = (\text{桁質量} + \text{橋脚質量} \times 0.3)$ とし、下部構造質量は、 $m_1 = (\text{橋脚質量} \times 0.7 + \text{フーチング質量})$ とした。 k_1 、 k_2 は、それぞれ下部構造～地盤間の剛性、橋脚剛性をモデル化している。下部構造と地盤間は滑り現象をモデル化するために、動摩擦係数 μ として、 $\mu(m_1 + m_2)g$ を降伏点とする移動硬化型バイリニアモデルとした。1次剛性の値を地盤の影響を無視するためにできるだけ剛な値とし、2次剛性の値をほぼゼロに見なせる程度に下部構造と地盤間滑り時剛性



(1) 2自由度系モデル (2) バイリニアモデル

図-1 解析モデル

低下率を小さくした。また，周期特性による応答特性を検討するために k_2 の値を変化させることで短周期（0.05秒）から長周期（5.0秒）までの1次固有周期を持つ解析モデルを作成した。

下部構造と地盤間が滑っている状態では下部構造と地盤間の減衰力がほとんど発生しないと考えられる。一般的に用いられるRayleigh減衰で減衰マトリックスを作成してしまうと滑り状態で減衰力が生じてしまうため，本モデルでは減衰マトリックスを直接定義し，下部構造と地盤間の減衰力を生じさせないために c_1 を十分小さな値とした⁵⁾。また，減衰定数5%の1自由度系応答スペクトルと比較するために $c_2 = 2h_2\sqrt{m_2k_2}$ ， $h_2=0.05$ として橋脚部の減衰係数を定義した。下部構造底面で滑りを生じない場合は，上部構造質量 m_2 ，橋脚剛性 k_2 および減衰定数 h_2 から決まる1自由度系応答特性となる。

入力地震動は，レベル2地震動の神戸海洋気象台記録を用いた。

本検討では，上部構造の最大加速度応答，下部構造の残留変位，及び下部構造の最大速度から，構造物の応答低減特性，下部構造の残留変位特性，及び滑り面に生じる最大滑り速度について整理した。

表-1 解析モデル諸元

上部構造質量	m_2	731.90 (t)
下部構造質量	m_1	639.81 (t)
橋脚剛性	k_2	$1155.8 \sim 1.1558 \times 10^7$ (kN/m)
下部構造～地盤間初期剛性	k_1	1.0×10^8 (kN/m)
下部構造～地盤間滑り時剛性低下率	sh_1	1.0×10^{-12}
下部構造～地盤間動摩擦係数	μ	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, ∞
橋脚減衰係数	c_2	$c_2 = 2h_2\sqrt{m_2k_2}$ (kN・s/m)
下部構造～地盤間減衰係数	c_1	$c_1 = 1.0 \times 10^{-20} \cdot c_2$ (kN・s/m)

3．検討結果

(1) 基礎免震構造の基本的な応答特性

基礎免震構造の特徴的な応答特性について解析結果の一例から説明する。図-2,図-3に1次固有周期 $T=0.3\text{sec}$ ，摩擦係数 $\mu=0.3$ とした場合の上部構造および下部構造の速度，変位の応答波形を示す。

図-2に示すように下部構造と地盤間で滑りが生じる時に，下部構造の地盤に対する相対速度が大きくなり1.0m/s程度となった。

滑り型基礎免震は，通常の免震デバイスのような変位復元力機能を有していないため，図-3のように最大応答変位に近い残留変位を生じた。

図-4に上部構造の加速度応答スペクトルを示す。 $\mu=\infty$ は下部構造と地盤間を滑らせないケースであり，1自由度系と全く同じ結果となった。摩擦係数が小さくなるほど上部構造の応答が低減しているこ

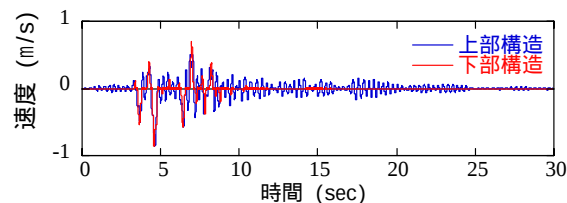


図-2 速度波形

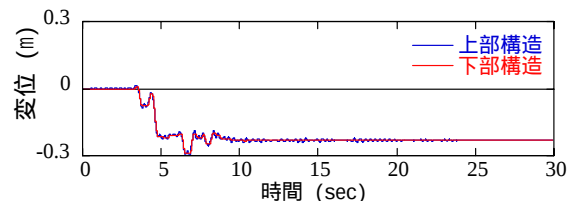


図-3 変位波形

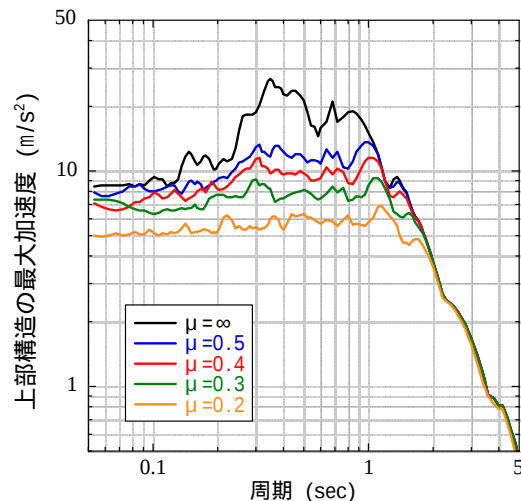


図-4 上部構造の加速度応答スペクトル

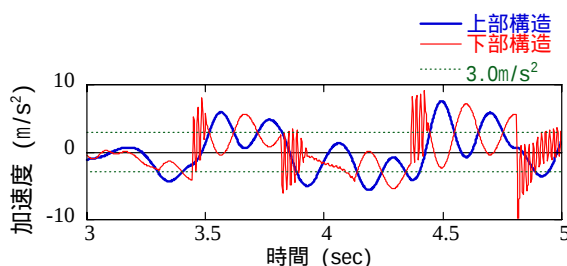


図-5 加速度波形

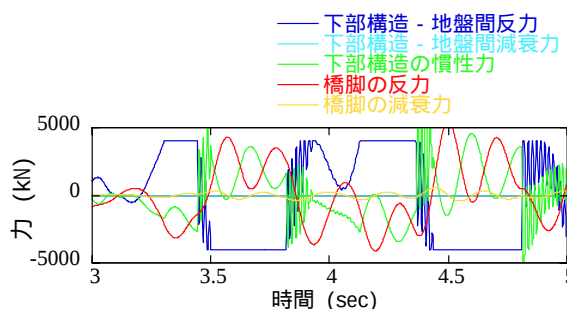


図-6 下部構造節点に作用する力の時刻歴波形

とが確認できる。周期0.3秒～1.0秒での上部構造の最大加速度は， $\mu=\infty$ で $14 \sim 27\text{m/s}^2$ となったのに対し， $\mu=0.3$ で $7 \sim 9\text{m/s}^2$ ， $\mu=0.2$ で $5 \sim 6\text{m/s}^2$ となった。

1自由度系完全弾塑性モデルとした場合，降伏耐力以上の反力が生じないことから，最大加速度も $a_{\max} = \mu N/m = \mu g(N/m: \text{滑り面に作用する軸力}, m: 1 \text{自由$

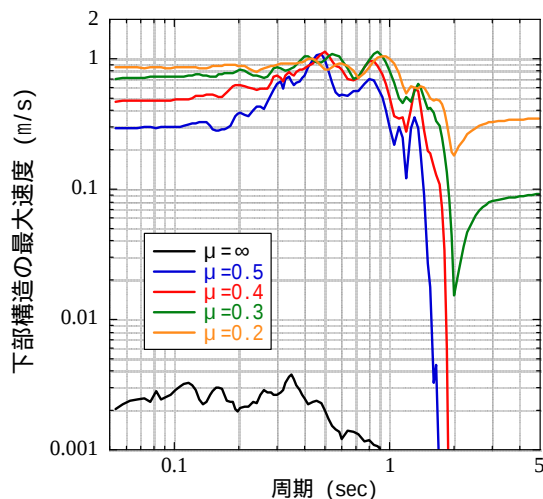


図-7 下部構造の速度応答スペクトル

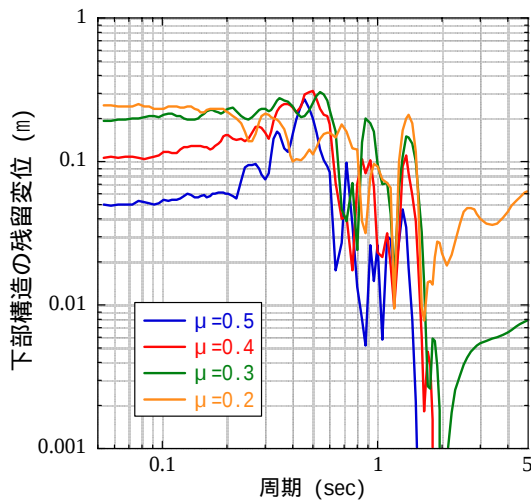


図-8 下部構造の残留変位応答スペクトル

度系の質点質量)で頭打ちとなる。これに対し、今回の2自由度系の検討結果では μg よりも大きな最大加速度となった。

図-5、及び図-6に、動摩擦係数 $\mu=0.3$ 、1次固有周期 $T=0.3\text{sec}$ のケースの上部構造と下部構造の絶対加速度波形、及び下部構造に作用する力の時刻歴波形を示す。

下部構造 - 地盤間の反力が $\pm \mu(m_1 + m_2)g$ で頭打ちとなっていることが図-6から確認できるが、図-5から上部構造の加速度は 3.0 m/sec^2 を中立点とした自由振動減衰波形になり、 μg よりも大きな加速度が生じている。これは下部構造と地盤間に滑りが生じている状態で図-1に示したモデルを $k_1=0$ とした条件で上部構造質点と下部構造質点の重心位置を中立点として振動しているためである。滑り状態での振動系の周期は $T_s = 2\pi\sqrt{m_1 m_2 / k_2(m_1 + m_2)}$ となり、上記ケースでは $T_s=0.2\text{秒}$ となる。

図-7に下部構造の最大速度応答スペクトルを示す。下部構造の速度は、滑り面の滑り速度を表す。全周期帯域において摩擦係数が小さいほど最大速度が大きくなる傾向がある。ただし、周期帯によっては摩擦係数が小さい場合よりも大きい場合の方が最大速度が小さくなっている。周期 $0.3\text{秒} \sim 1.0\text{秒}$ での滑り

速度は $0.7 \sim 1.1\text{m/s}$ となった。

図-8に下部構造の残留変位スペクトルを示す。周期 0.2秒 以下では摩擦係数が小さいほど残留変位が大きくなる傾向があるが、周期 0.2秒 以上では摩擦係数と残留変位の相関関係がほとんどない。摩擦係数 $\mu=0.3$ の場合では最大 0.3m の残留変位が生じる結果となった。

(2) 下部構造～地盤間バイリニアバネの2次剛性の変化による応答特性への影響

下部構造と地盤間の滑り面をモデル化しているバイリニアバネの2次剛性の値は、下部構造側面地盤拘束もしくは復元力機構を設けることで変化することから、ここでは2次剛性の変化による応答特性への影響について検討した結果を示す。

下部構造と地盤間のバネ要素の滑り出し後の2次剛性すなわち剛性低下率 sh_i を変化させたときの上部構造の最大加速度応答スペクトルおよび下部構造の残留変位応答スペクトルを図-9、図-10に示す。図-9から $sh_i=1.0 \times 10^{-4}$ (2次剛性 $k_i'=1.0 \times 10^4 \text{kN/m}$)以下では上部構造の最大加速度の低減がほぼ同程度であり、 $sh_i=1.0 \times 10^{-3}$ ($k_i'=1.0 \times 10^5 \text{kN/m}$)では最大

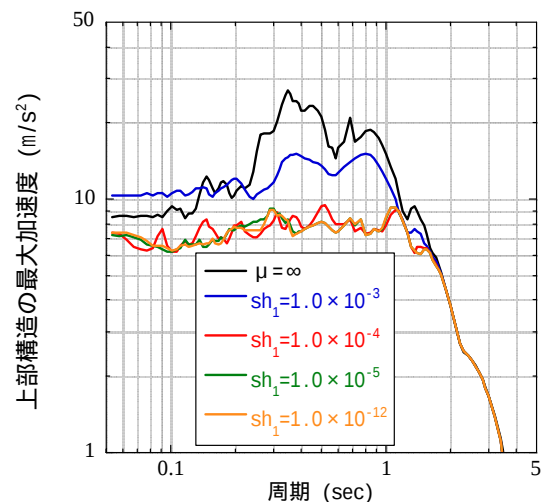


図-9 上部構造の加速度応答スペクトル

下部構造と地盤間バネの2次剛性の影響

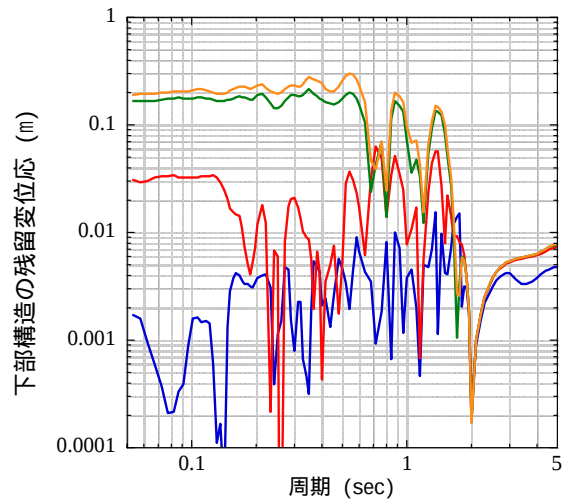


図-10 下部構造の残留変位応答スペクトル

下部構造と地盤間バネの2次剛性の影響

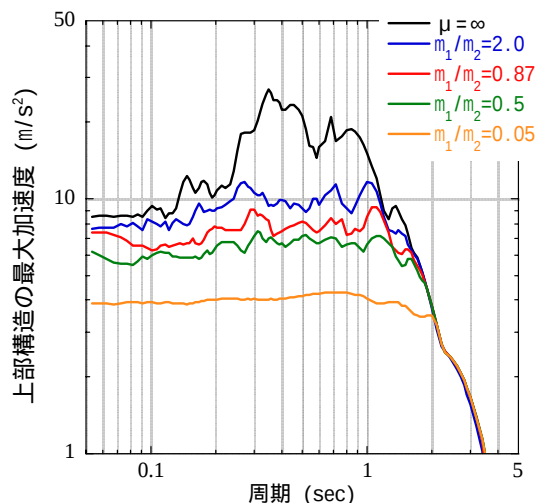


図-11 上部構造の加速度応答スペクトル
上部構造と下部構造の質量比の影響

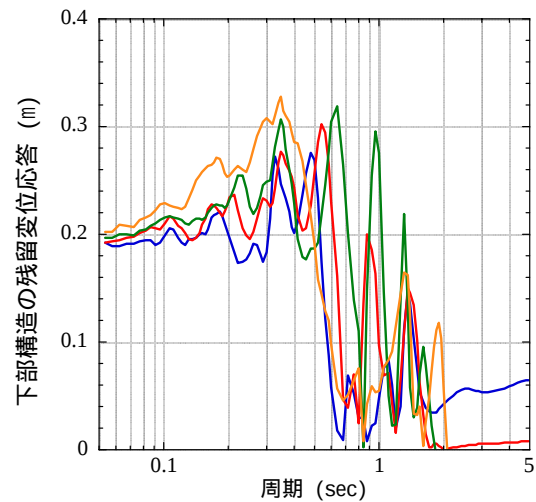


図-12 下部構造の残留変位応答スペクトル
上部構造と下部構造の質量比の影響

加速度の低減が小さくなっている。また、図-10からバイリニアバネの2次剛性が大きくなると残留変位が小さくなっていることがわかる。

今回対象とした橋脚が下部構造の滑る方向の前面の地盤のみに拘束を受けると仮定し、道路橋示方書の地盤バネ算出方法でその地盤バネを算出すると、N値1～50の砂地盤とすると、水平バネは $1.5 \times 10^6 \sim 2.1 \times 10^7 \text{ kN/m}$ となり、最大加速度が十分に低減される2次剛性よりも100倍以上大きい。基礎免震を有効に機能させるためには下部構造の側面拘束を一般的な地盤による拘束よりもかなり小さくする必要がある。

(3) 上部構造に対する下部構造の質量比による応答特性への影響

本検討では、一般的な高架橋をもとに表-1のような諸元による2自由度モデルとしたが、本検討の2次元モデルは、上部構造に対する下部構造の質量比 m_1/m_2 と摩擦係数 μ で無次元化して表現できる。

上部構造に対する下部構造の質量比の影響を確認するために $\mu=0.3$ とした場合の m_1/m_2 を0.05, 0.5, 0.87, 2.0, ∞ としたときの上部構造の最大加速度応答スペクトルおよび下部構造の残留変位スペクトルを図-11, 図-12に示す。 m_1/m_2 が小さいほど、すなわち、上部構造の質量が下部構造に比べて大きいほど、上部構造の最大加速度は小さくなる傾向がある。これは、上部構造の質量が下部構造に比べて大きくなると、上記にて説明した滑り状態での振動系において、上部構造の振幅が小さくなるためである。図-12から質量比 m_1/m_2 の大小による残留変位の相関性は見られなかった。

4. まとめ

レベル2地震時を対象として、基礎免震構造の地震時応答特性を2自由度系モデルを用いた検討を行った結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 下部構造と地盤間の動摩擦係数を小さくすると上部構造の最大加速度応答は小さくなる傾向になる。周期0.3秒～1.0秒での上部構造の最大加速度は、 $\mu = \infty$ で $14 \sim 27 \text{ m/s}^2$ となったのに対し、 $\mu = 0.3$ で $7 \sim 9 \text{ m/s}^2$ 、 $\mu = 0.2$ で $5 \sim 6 \text{ m/s}^2$ となる。レベル1地震時には滑り出さないためには $\mu > 0.2$ である必要があるが、 $\mu = 0.3$ においてレベル2地震動に対する応答低減特性を有することが確認できた。
- (2) 下部構造と地盤間の滑り面に生じる滑り速度は、周期0.3秒～1.0秒での滑り速度は $0.7 \sim 1.1 \text{ m/s}$ となる。
- (3) 周期0.2秒以上では摩擦係数と残留変位の相関関係がほとんどない。動摩擦係数 $\mu = 0.3$ の場合では最大0.3mの残留変位が生じる結果となる。
- (4) 下部構造と地盤間バイリニアバネの2次剛性を大きくするとある程度で最大加速度の低減効果が小さくなる。また、残留変位は小さくなる。
- (5) 上部構造に対する下部構造の質量比が小さくなると上部構造の最大加速度は小さくなる。また、質量比との代用による残留変位の相関性は小さい。

本検討では2自由度系モデルによる滑り型基礎免震構造の地震時応答特性についてまとめたものであり、今後、橋梁全体系モデルにて解析検討を行い、2自由度系モデルと比較検討する必要がある。また、残留変位については、構造上問題とならない許容値を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果，日本建築学会構造系論文集，第485号，pp.53-62，1996。
- 2) 川島一彦，細入圭介：直接基礎のロッキング振動が橋脚の非線形地震応答に及ぼす影響，土木学会論文集No.703 / -59，pp.97-111，2002.4
- 3) 川島一彦：リオン - アンティリオンの耐震設計，橋梁と基礎，pp.33-36，2001.3
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997。
- 5) 監崎達也，伊津野和行：すべり摩擦型免震支承のモデル化における初期剛性と減衰の与え方に関する検討，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1073-1076，2001。

(2003.10.31受付)