

地震時の桁の浮き上がりによる斜橋の回転特性

平井良幸¹・川島一彦²・松崎裕³・佐々木智大⁴

¹学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8522 東京都目黒区
大岡山2-12-1)

²フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (同上)

³正会員 博(工) 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (同上)

⁴正会員 博(工) 独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (〒673-0515 兵庫県三木市志染
町三津田西亀屋 1501-21)

1. はじめに

斜橋が地震時に回転しやすいことはよく知られており、1995年兵庫県南部地震や2010年チリ・マウレ地震においても斜橋の回転による被害が生じたことが報告されている¹⁾。それらの被害の多くが、回転変位による下部構造頂部縁端からの逸脱が原因となっている。

斜橋は橋台や隣接径間との衝突によって回転を生じ始める。また、斜橋の両端を支持する各部構造間の地震応答に違いがある場合や橋脚の弱軸方向が橋軸方向と異なる場合にも回転が惹起される。例えば、大塚ら²⁾は、斜橋の幾何学的平面形状による非線形動的解析に基づいて、回転のメカニズムを検討している。ただし、この解析では、下部構造はモデル化されておらず、斜橋だけが回転する状態を想定している。また、矢部ら³⁾は、大きな地震力を受けた場合に隣接する桁間及び桁と橋台間の衝突の影響を直橋と共に斜橋において解析し、衝突力の影響が大きく起因していることを示している。

2010年チリ・マウレ地震では、斜橋が大きく回転した結果、落橋した事例が複数あるが、このように大きな回転を生じた理由が重要である。チリと我国との大きな違いは積層ゴム支承と上下部構造間の結合にあり、チリでは積層ゴム支承は上下部構造とボルト結合されていない。このため、大きな上下方向地震動を受け、桁が積層ゴム支承から浮き上がると、桁が回転しやすくなるのではないかと推定される。

本文は、積層ゴム支承に対して桁が浮き上がることが、回転角を大きくする可能性があるかを検討する第一段階として、支承と上下部構造がボルト結合

されておらず、すべる状態において、桁の浮き上がりが生じると摩擦力がゼロとなると仮定した場合と摩擦力が伝達され続けると仮定した場合の応答の違いを、解析的に検討した結果を報告する。

2. 浮き上がりを考慮した摩擦力のモデル化

(1) 摩擦力のモデル化

地震時に桁が支承に対して、水平方向にずれようとする、桁と支承間に作用する摩擦力 F は、支承に作用する軸力 N 、摩擦係数 μ 、水平方向の相対変位 u 、鉛直方向の相対変位 v を用いて以下のようにになる。

$$F = \begin{cases} k_h |u| & k_h |u| < \mu N, v \leq 0 \\ \pm \mu N & k_h |u| \geq \mu N, v \leq 0 \\ 0 & v > 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 k_h は摩擦ばねの剛性を示している。桁は静的に $v_s \equiv mg/k_h$ だけ沈下し、この状態で上下方向地震動 $\ddot{v}_g$ の作用を受けると v だけ沈下する。 v は次式となる。

$$v = v_s - \frac{m\ddot{v}_g}{k_h} \quad (2)$$

$v > 0$ 、すなわち、桁が支承に対して浮き上がった場合には、桁～支承間には摩擦力は作用しない。これをここでは浮き上がりを考慮した場合と呼ぶ。

これに対して、桁の浮き上がりに伴う摩擦力の喪失を考慮しない場合には、摩擦力 F は次式となる。

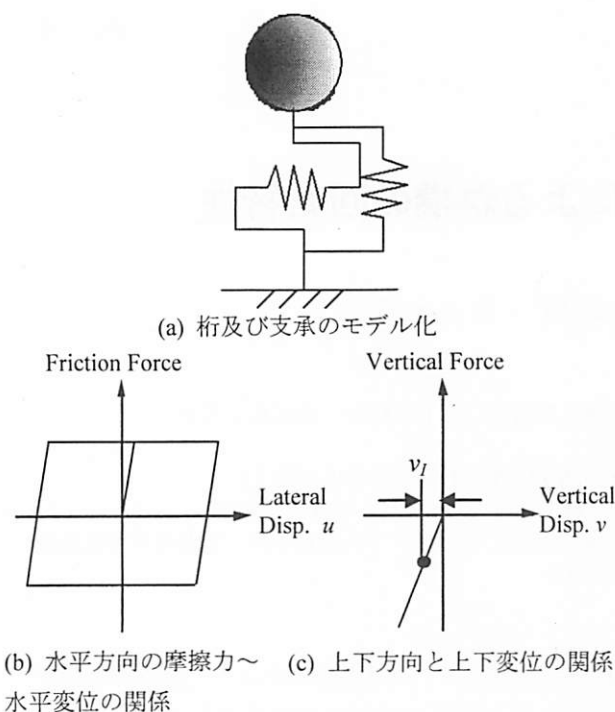


図-1 解析モデル

$$F = \begin{cases} k_h |u| & k_h |u| < \mu N \\ \pm \mu N & k_h |u| \geq \mu N \end{cases} \quad (3)$$

(2) 質点モデルに基づく桁地震応答解析

1 基の積層ゴム支承とこれによって支持された桁を取りだし、図-2に示すように1質点と摩擦ばね及び積層ゴム支承とこれからの浮き上がりを表すばねによって支持された構造モデルを考える。入力地震動として、2008年の岩手・宮城内陸地震によるKiK-netの 一関西観測点で観測された図-3に示す強UD成分を10秒間同時入力した。

質点の質量 m は50tとし、非線形な摩擦履歴特性を有するばねを水平方向にセットし、ばね剛性 k_h を $7.90 \times 10^3 \text{ kN/m}$ と設定した。また、鉛直方向のばね剛性 $k_v = 100 k_h$ とした。ばね剛性 k_h 、 k_v は、水平方向の固有周期 $T_h = 0.5$ 秒、鉛直方向の固有周期 $T_v = 0.05$ 秒になるようにそれぞれ定めたものである。ただし、限界摩擦抵抗力 P_y は、死荷重反力 $W = mg$ に摩擦係数 μ を乗じた値であるとし、ここでは $\mu = 0.2$ とし解析を行った。

(3) 数値解析結果

浮き上がりを考慮した場合と考慮しない場合の質点の水平方向及び鉛直方向の応答変位及と摩擦力を示した結果が図-3である。図-3(a)に示すように、浮き上がりを考慮した場合と考慮しない場合には、それぞれ水平方向に最大で0.360m、0.236mの応答変位が生じる。浮き上がりを考慮した場合の方が、考慮

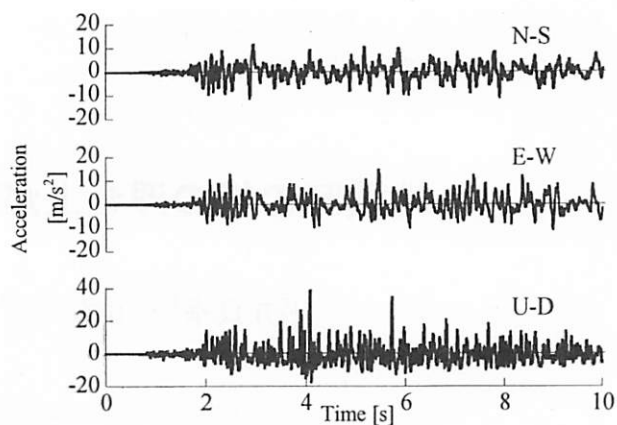


図-2 入力地震動

しない場合よりも質点の水平変位は52%大きい。

このような違いはすでに時刻2～3秒の間に生じ始めている。図-3(c)より、この間の摩擦力を見ると、時刻2.5～2.7秒にかけて浮き上がりを考慮した場合には摩擦力が0～40kNと小さくなっているのがわかる。

図-3に示した応答を時刻2～3秒に注目して示すと、図-4(a)のようになる。時刻2.5～2.55秒間を時刻a、時刻2.65～2.69秒間を時刻bと定義すると、図-4(b)に示すように、時刻a及び時刻bでは、質点は最大5.25mm、5.50mmだけ浮き上がっている。当然、浮き上がりを考慮した場合には時刻a及び時刻b間は摩擦力がゼロとなるのに対して、浮き上がりを考慮しない場合には、それぞれ最大55kN、90kNの摩擦力が質点に作用する。結果として、時刻2.55秒及び2.69秒における質点の最大応答変位は浮き上がりを見込まない場合には30mm、50mmであるのに対して、浮き上がりを見込んだ場合には75mm、105mmとそれぞれ2.5倍、2.1倍大きくなる。以上より、上下方向の変位 v に伴い摩擦力がゼロになる場合には、摩擦力が伝達される場合に比較して、大きな応答変位が生じることがわかる。

3. 解析対象橋と解析モデル

(1) 解析対象橋

解析対象としたのは、図-7に示す斜角50度、幅員 $d = 9.75\text{m}$ の鋼板桁1連である。桁は長さ $l = 40\text{m}$ 、その重量は468tfであり、直接基礎を有する鉄筋コンクリート製逆T型橋台によって単純支持されている。道路橋示方書に規定される地盤条件は、I種地盤である。橋台の弱軸方向は橋軸方向と50度の角度をなしている。これを橋軸方向(X方向)や橋軸直角方向(Y方向)と区別するために、橋台の弱軸方向を支承線直角方向(x方向)、強軸方向を支承線方向(y方向)と呼ぶことにする。桁はゴム支承により橋台によって支持されている。支点反力 R_i は

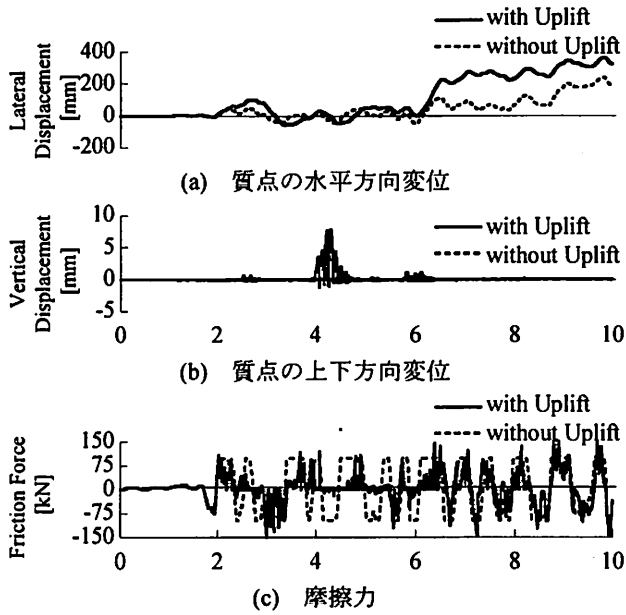


図-3 質点の応答変位と摩擦力

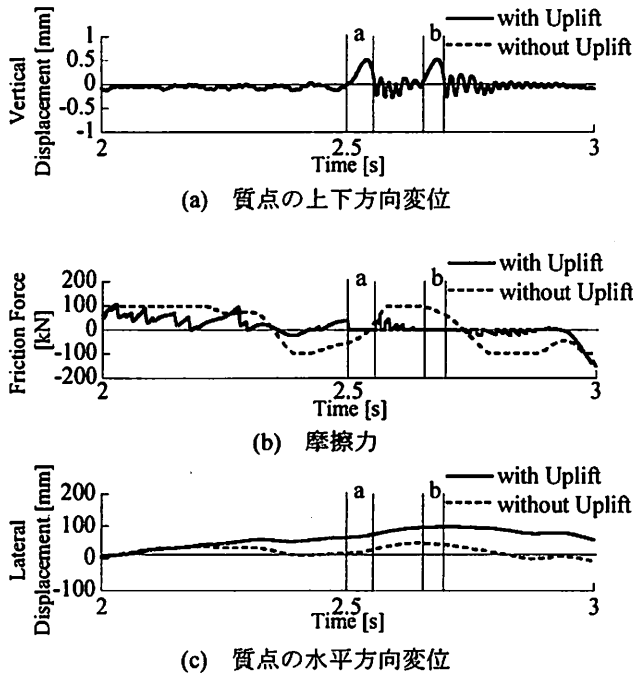


図-4 質点の応答変位と摩擦力
(時刻2秒～3秒間)

573kNであり、各支承の限界摩擦抵抗力 P_y は、死荷重反力 R_i に摩擦係数 μ を乗じた値とする。なお、ここで、 $\mu=0.2$ とする。

道路橋示方書では桁かかり長 S_E の最小値は次式のように規定されている⁴⁾。

$$S_E = 0.7 + 0.005l \quad (4)$$

式(4)によれば、解析対象とする斜橋の桁かかり長 S_E は $S_E=0.90\text{m}$ となるため、ここではこの値を用いることとする。 S_E を見込むと、斜橋が回転可能な辺長比 d/l と斜角 θ の関係は次式から求められる⁵⁾。

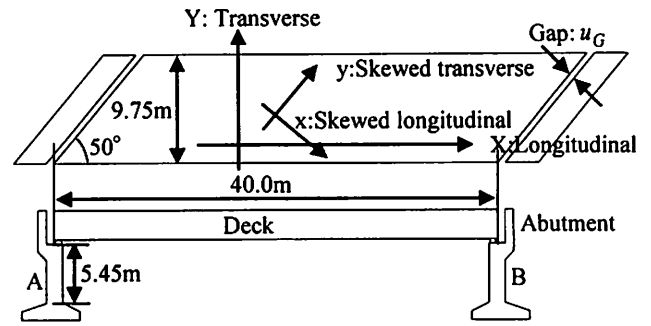


図-5 解析対象とする斜橋

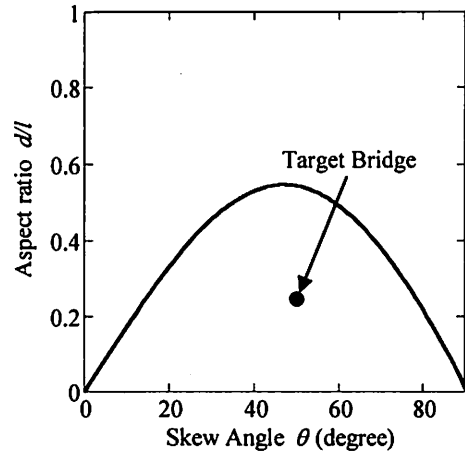


図-6 辺長比と斜角の関係

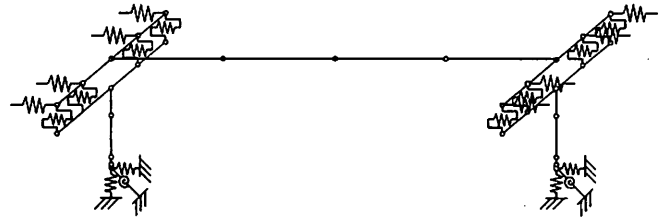


図-7 解析モデル

$$\frac{d}{l} < \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{\cos \theta}{\sin \theta}} \quad (5)$$

ここで

$$c_1 = \frac{-c_2 \sin \theta_2 - \sqrt{\frac{u_G}{d} (c_2 + \cos \theta)}}{c_2^2 - 1} \quad (6)$$

$$c_2 = \left(\frac{u_G}{d} + \cos \theta \right) \quad (7)$$

ここで、 u_G は桁と橋台の遊間長であり、ここでは 0.05m とした。式(5)より回転可能な斜角 θ 及び辺長比 d/l を求めた結果が図-6である。解析対象橋では $\theta=50$ 度、 $d/l=0.244$ であるため、回転可能であると判定される。

また、この斜橋が最終的に鈍角端でも桁が支持されなくなる時の回転角を脱落回転角 θ_u とすると、脱落回転角 θ_u は次式のようになる⁵⁾。

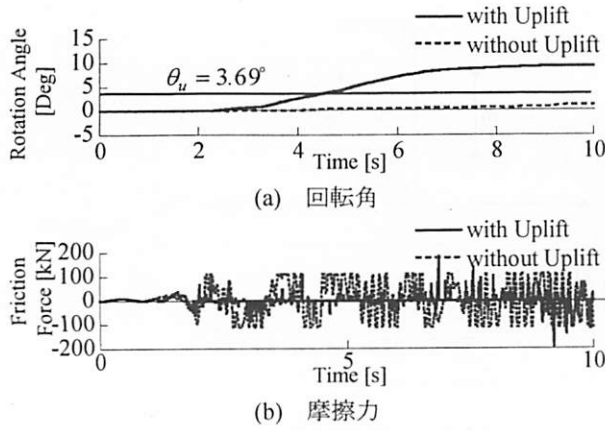


図-8 支承線直角方向の摩擦力と回転角の関係
(橋台A鈍角端)

$$\theta_u = \tan^{-1} \frac{c_3 + \sqrt{c_3^2 - c_4 \cdot c_5}}{c_3} \quad (8)$$

ここで、

$$c_3 = \frac{d}{l} - \frac{\sin 2\theta}{2} \quad (9)$$

$$c_4 = \left(\frac{S_E}{l} - \sin \theta \right)^2 - \left(\frac{d/\sin \theta}{l} - \cos \theta \right)^2 \quad (10)$$

$$c_5 = \frac{S_E}{l} \left(\frac{S_E}{l} - 2 \sin \theta \right) \quad (11)$$

式(8)より、脱落回転角 θ_u は3.69度となる。

(2) 解析モデル

解析では、桁及び下部構造を図-7に示すように離散型骨組構造としてモデル化した。強震動を受けると、橋台は塑性化する可能性が高いが、本解析では桁の浮き上がりによる斜橋の回転特性を検討することが主目的であるため、橋台は線形状態、桁は剛性にあると仮定した。

積層ゴム支承と桁のすべりをモデル化するため、支承線方向と支承線直角方向にそれぞれ摩擦抵抗ばねをセットした。2. と同様に浮き上がりを考慮した場合と考慮しない場合の応答を検討するために、式(1)、(2)により摩擦ばねをモデル化した。

桁と橋台の衝突は衝突ばねを用いてモデル化することとし、衝突ばねの剛性 k_I および衝突力 F_I を以下のように与えた。

$$F_I = \begin{cases} k_I \Delta u & \Delta u \leq -u_G \\ 0 & \Delta u > -u_G \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 u_G は圧縮方向の遊間長、 Δu は支承線直角方向の桁と橋台の相対変位であり、

$$\Delta u = u_i - u_j \quad (13)$$

と定義する。 u_i 、 u_j はそれぞれ、 i 点、 j 点での支承線直角方向の応答変位である。ここでは、川島の解析に基づいて次式より衝突ばねの剛性 k_I を定めた⁶⁾。

$$\gamma = \frac{k_I}{\frac{nEA}{L}} = 1.0 \quad (14)$$

ここで、桁の長さを L 、軸方向剛性 EA とし、 n は、桁のはり要素の個数である。この結果、ここでは $k_I = 7.25 \times 10^3 \text{ MN/m}$ とした。また、図-9のように斜橋の端面に衝突ばねを4基取り付けることとした。

解析で使用した地震動は、KiK-netの 一関西観測点で観測された図-3に示す強震記録とし、橋軸方向にNS成分を橋軸直角方向にEW成分を、また鉛直方向にUD方向を10秒間同時入力した。

4. 斜橋の応答

浮き上がりを考慮した場合と考慮しない場合に対して斜橋の回転角及びこの時の橋台A側鈍角端の摩擦力を示した結果が図-8である。図-8(a)に示すように、浮き上がりを考慮した場合と考慮しない場合には、それぞれ最大9.10度、1.47度の回転角が生じる。桁の浮き上がりを考慮した場合は、これを考慮しない場合に比較して、桁の最大回転角は6.2倍大きい。

このような応答の違いは、時刻2.8～5.0秒間に顕著に見られる。この間の摩擦力を見ると時刻2.8～5.0秒にかけて浮き上がりを考慮した場合には、これを考慮しない場合に比較して、摩擦力が小さくなっている。浮き上がりを考慮した場合と浮き上がりを考慮しない場合の衝突力、回転角、鉛直方向の相対変位及び摩擦力を時刻2.8～5.0秒における橋台A側鈍角端に注目して示すと、図-9、図-10のようになる。図-9(a)より、この間で衝突が7回生じており、衝突力の最大値は38MNである。桁の質量は408tであるため、最大衝突力は桁の重量の8.1倍に相当する。この衝突力によって、図-9(b)に示すように、3.3秒及び4.2秒付近で桁の回転角が増加する。この時の橋台A側鈍角端における桁と支承との鉛直方向の相対変位が図-9(c)である。図-9(c)より、桁は鈍角端側において最大40mm浮き上がり、これに伴い、図-9(d)に示すように摩擦力がゼロになっている。

一方、図-10(a)より、浮き上がりを考慮しない場

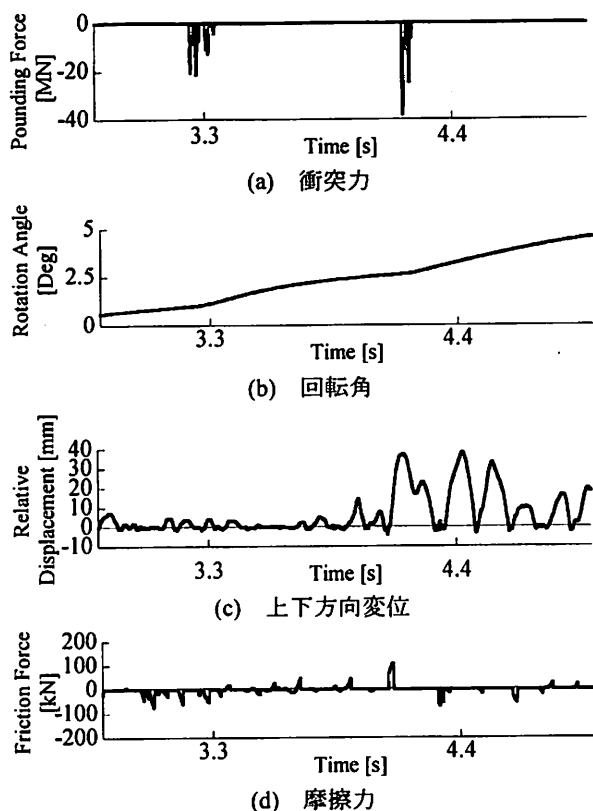


図-9 浮き上がりを考慮した場合の応答
(時刻2.8秒～5.0秒間)

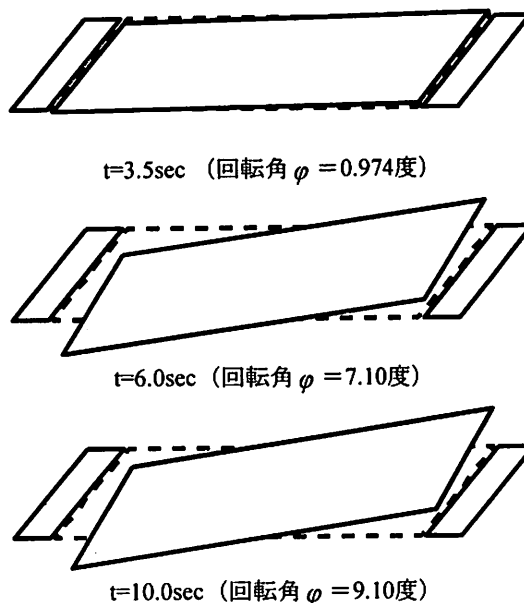


図-11 斜橋の回転軌跡

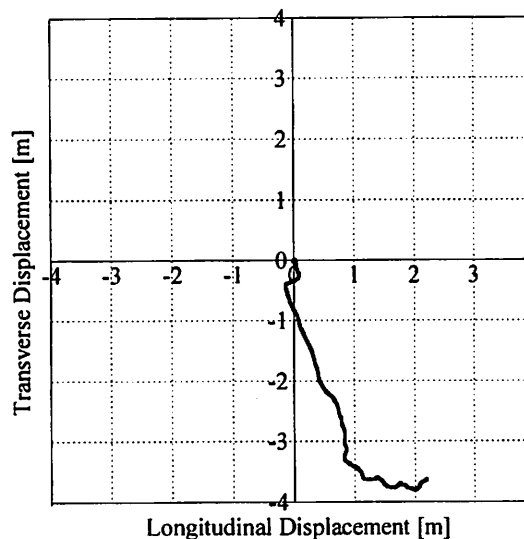


図-12 橋台A側鋭角側支点変位の軌跡

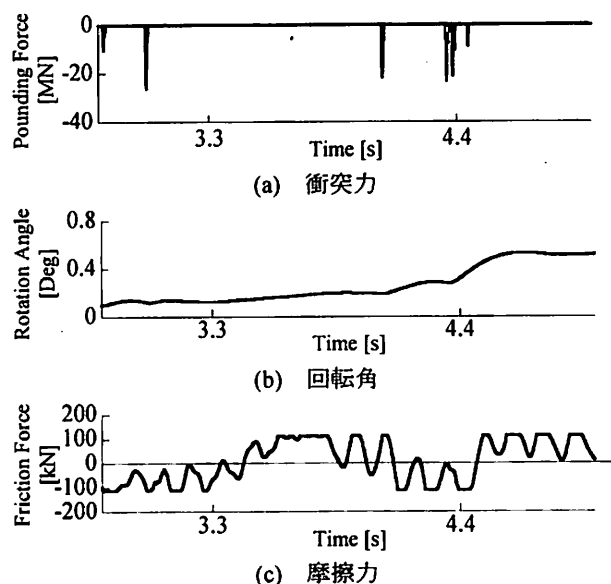


図-10 浮き上がりを考慮しない場合の応答
(時刻2.8秒～5.0秒間)

合は7回の衝突が生じ、その最大値は27MNである。衝突の結果、図-10(b)に示すように、3.0秒及び4.4秒付近で桁の回転角が増加する。最大115kNの摩擦力が連続的に支承から桁に作用している。これを図-9に示した浮き上がりを考慮した場合と比較すると、浮き上がりを考慮した場合には、浮き上がりを考慮しない場合に比較して長時間にわたり大きな摩擦力

が作用していることがわかる。

図-9(b)及び図-10(b)から、時刻2.8～5.0秒間における桁の浮き上がりを見込んだ場合の回転角の増分は、4.0度であるのに対して、浮き上がりを見込まない場合には、回転角の増分は0.6度と小さい。

この斜橋の脱落回転角 θ_u は3.69度であるため、図-8(a)より浮き上がりを考慮した場合には、時刻4.56秒で桁は脱落回転角に達する。しかし、浮き上がりを考慮しない場合には最大回転角が1.47度であり、脱落回転角には達しない。

以上より、本斜橋は浮き上がりを考慮しないと落橋しないが、浮き上がりを考慮すると、脱落回転角に至り落橋する。

図-11は桁の応答を時間経過に従って模式的に示したものである。桁の重心を中心にして反時計回りに回転していることがわかる。図-12は、浮き上がりを考慮した場合における橋台A側鋭角側支点変位の

軌跡を示している。鋭角端は橋軸方向及び橋軸直角方向にそれぞれ最大2.20m , 3.62m移動しており、時間の経過とともに主に橋軸直角方向に移動している。

5. 結論

本論文では、浮き上がりを考慮した場合の斜橋の回転特性を検討した結果を報告した。本検討から得られた結論は以下の通りである。

- 1) 上下方向地震動の作用による桁の浮き上がりを考慮することにより、桁の運動を妨げる摩擦力が鉛直方向の相対変位 v に伴いゼロになり、桁の水平方向の移動量は大きくなる。
- 2) たまたま、桁の浮き上がった時に衝突力が作用すると、桁は回転しやすくなり、回転角が大きくなる。また、浮き上がりを考慮することで、桁は落橋する可能性がある。

参考文献

- 1) Kawashima, K., Unjoh, S., Hoshikuma, J., and Kosa, K. : Damage of bridges due to the 2010 MAULE, CHILE, Journal of Earthquake Engineering, Accepted for Publication
- 2) 大塚 久哲, 神田 昌幸, 鈴木 基行, 川神 雅秀 : 斜橋の水平地震動による回転挙動解析 ; 土木学会論文集, No.570/I-40, pp. 315-324, 1997.
- 3) 矢部正明, 武村浩志, 川島一彦 : 直橋および斜橋の桁間衝突とその影響 ; 構造工学論文集, 43A, pp. 781-792, 1997.
- 4) 日本道路協会 : 道路橋示方書, V耐震設計編, 丸善, 2002.
- 5) 平井良幸, 川島一彦 : 地震時の斜橋の回転条件に関する考察 ; 第 3 回近年の国内外で発生した大地震の記録と課題に関するシンポジウム発表講演集, pp. 143-148, 2010.
- 6) 川島一彦 : 動的解析における衝突のモデル化に関する一考察 ; 土木学会論文集, 第 308 号, pp. 123-126, 1981.