

地震時における斜橋の回転特性

平井 良幸¹・川島 一彦²・松崎 裕³

¹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)

E-mail: hirai.y.ad@m.titech.ac.jp

²東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻教授 (〒152-8522 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: kawashima.k.ac@m.titech.ac.jp

³東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻助教 (〒152-8522 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: matsuzaki.h.aa@m.titech.ac.jp

斜橋が地震時に回転しやすいことはよく知られており、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。本論文では、まず桁端と橋台パラペット間の遊間を見込んだ場合の斜橋及び直橋の回転条件を検討し、落橋に至るまでの桁の回転挙動を明らかにした。続いて、チリでは、支承は上下部構造とボルト結合されていないことから、大きな上下方向地震動を受け、桁が支承から浮き上がると、桁が回転しやすくなると考えられることから、桁の浮き上がりによる斜橋の回転特性について検討した。桁の浮き上がりが生じて摩擦力がゼロになる場合と摩擦力が伝達され続ける場合の応答の違いを解析し、桁の浮き上がりによって、桁の回転角が増加し落橋しやすくなることを明らかにした。

Key Words : Skewed Bridge, Deck Rotation, Uplift, Gap, Abutment, Seat Support Length

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、桁の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誘発される。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、桁だけが回転する状態を想定している。また、矢部ら³⁾は、隣接する桁間及び桁と橋台間の衝突の影響を考慮して、強震動作用下での直橋と斜橋の地震応答解析を行い、桁の回転に衝突力の存在が大きく影響していることを示している。

道路橋示方書においては斜橋が回転可能な条件が規定されているが、これは桁端と橋台パラペット間の遊間をゼロと仮定した場合の回転条件である⁴⁾。したがって、道路橋示方書の回転条件式では、直橋は回転しないことになる。しかしながら、実

際には、桁端と橋台パラペット間の遊間は一般にゼロではないため、これを考慮すると斜橋の回転は道路橋示方書で示されるよりもさらに広範囲な条件の斜橋でも生じ得るし、また、直橋も回転できることになる。

また、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。チリと我国の橋梁構造の大きな違いは積層ゴム支承と上下部構造間の結合の有無にあり、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察される。

本論文は、桁端と橋台パラペット間の遊間を見込んだ場合の斜橋及び直橋の回転条件を明らかにすると同時に、落橋が起こり得る条件を検討した。また、積層ゴム支承に対して桁が浮き上がることが、桁の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。

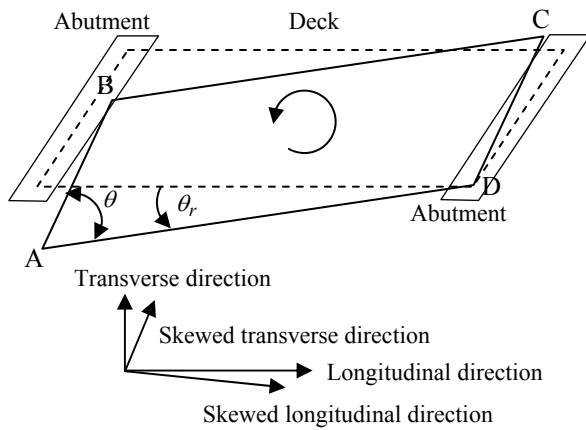


図-1 斜橋の回転

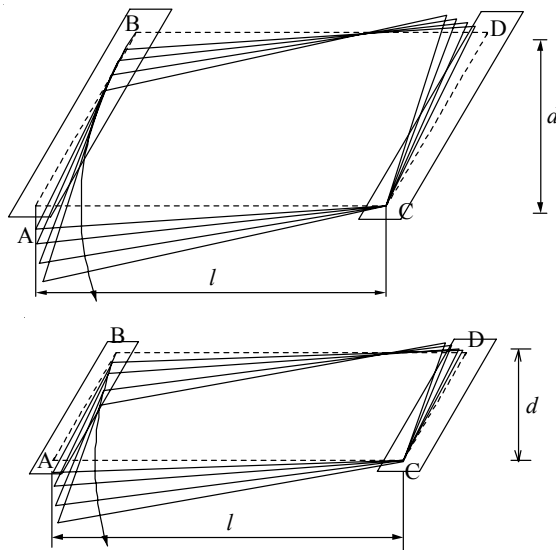


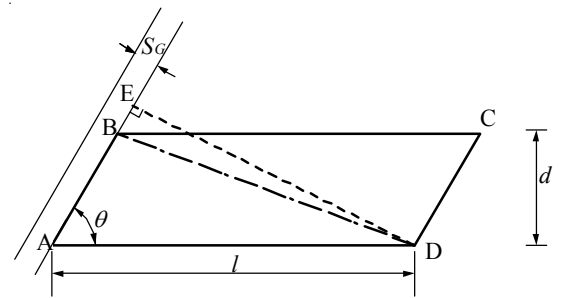
図-2 斜橋の回転とこれに伴う点Bの軌跡

2. 遊間長を考慮した斜橋の回転条件

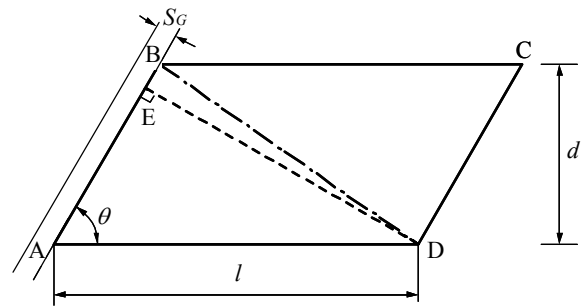
斜橋は橋台や隣接径間との衝突によって回転を生じ始める。また、斜橋の両端を支持する各部構造間の地震応答に違いがある場合や橋脚の弱軸方向が橋軸方向と異なる場合にも回転が誘発される。そこで、本研究では、橋の軸方向とこれに直角方向をそれぞれ橋軸方向、橋軸直角方向と呼び、土圧の作用方向とこれに直角方向をそれぞれ支承線直角方向、支承線方向として、回転条件を検討する。

地震時に何らかの理由によるスパン l 、橋軸直角方向及び支承線方向の幅がそれぞれ d 、 b ($b = d / \sin \theta$) の斜橋 ABCD に回転モーメントが作用し、図-1 に示すように一方の鈍角端 D を中心に他方の端 AB が反時計回りに回転し始める状態を考える。斜角を θ ($0 < \theta \leq \pi/2$) とし、反時計回りの回転角を θ_r とする。

辺長比 d/l が異なる2つの斜橋が回転する場合の鈍角端 B の軌跡を図-2 に示す。桁端と橋台パラペット間の遊間 S_G がゼロである場合には、斜橋がパラ



(a) 反時計回りに回転できる場合



(b) 反時計回りに回転できない場合

図-3 斜橋の回転条件

ペットに衝突せずに反時計回りに回転できる条件は、鈍角端 D から線分 AB に下ろした垂線との交点を E とすると、線分 AB の長さが線分 AE よりも短い場合で、これを表すと次式のようになる^{4),5)}。

$$\frac{d}{l} < \frac{\sin 2\theta}{2} \quad (1)$$

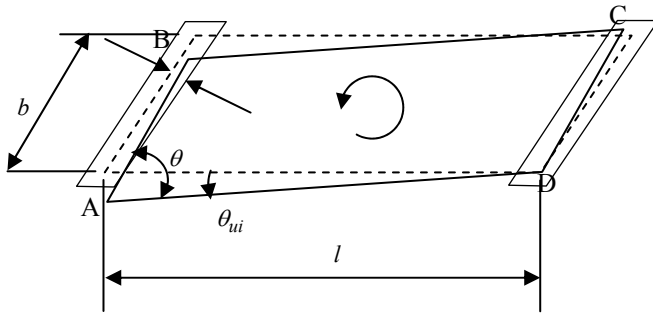
すなわち、式(1)を満足する範囲に辺長比 d/l が存在すれば、斜橋 ABCD は反時計回りに回転できることになる。なお、式(1)を満足しない場合、つまり、線分 AB の長さが線分 AE よりも長い場合には斜橋は反時計回りに回転できない。ここで、点 E が重要な理由は、線分 AB の長さが線分 AE よりも長い場合に、斜橋が反時計回りに回転しようとする時、桁端 AB の中で最も橋台パラペット側に出っ張る点が点 E であるためである。

しかし、一般には桁端と橋台パラペット間の遊間 S_G は図-3 のようにゼロではない。このため、ここでは、 S_G が存在する場合を対象に斜橋の回転が生じる条件を検討してみる。この場合には、遊間 S_G の値に応じて斜橋 ABCD は反時計回りに回転できる場合がある。

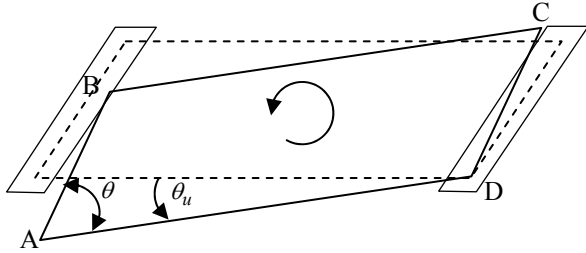
いま、図-1 に示すように斜橋 ABCD が鈍角端 D を中心に回転するとし、この回転角を θ_r とする。ただし、反時計回りを θ_r の正とする。遊間 S_G がゼロである場合と同様に、点 E の位置に応じて、以下のように2ケースに分けて考えてみる。

(1) 線分 AB の長さが線分 AE よりも短い場合

図-3(a) から明らかなように、この場合には斜橋は反時計回りに問題なく回転できる。



(a)脱落開始回転角 θ_{ui}



(b)脱落回転角 θ_u

図-4 脱落開始回転角及び脱落回転角

(2) 線分ABの長さが線分AEよりも長い場合

図-3(b)に示すように、反時計回りに回転しようとするとき、点Eが線分ABを超えて橋台パラペット側に出張ることになる。斜橋の回転角を θ_r とすると、このときに点Eが線分ABを超えて橋台パラペット側に出張る量を d_{rm} とすると、 d_{rm} は、

$$\begin{aligned} d_{rm} &= r \left[1 - \cos \left\{ (\theta + \theta_D) - \frac{\pi}{2} \right\} \right] \\ &= r \{ 1 - \sin(\theta + \theta_D) \} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 θ_D は $\angle ADB$ 、 r は線分BDの長さであり、

$$\theta_D = \tan^{-1} \left(\frac{d}{l - d / \tan \theta} \right) \quad (3)$$

$$r = d / \sin \theta_D \quad (4)$$

したがって、斜橋が反時計回りに回転可能な条件は、次式で与えられる。

$$d_{rm} \leq S_G \quad (5)$$

これを具体的に求めると、斜橋が反時計回りに回転可能な条件は次式となる。

$$\frac{d}{l} < \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{\cos \theta}{\sin \theta}} \quad (6)$$

ここに、

$$c_1 = \frac{-c_2 \sin \theta - \sqrt{\frac{S_G}{d} (c_2 + \cos \theta)}}{c_2^2 - 1} \quad (7)$$

$$c_2 = \left(\frac{S_G}{d} + \cos \theta \right) \quad (8)$$

$S_G = 0$ の場合には、式(6)は式(1)と等しくなる。なお、 $S_G > 0$ であれば、斜橋だけでなく、直橋も回転できることになる。すなわち、この場合には、 $\theta = \pi/2$ であるから、直橋が回転できる条件は以下のようなになる。

$$\frac{d}{l} < \frac{2 \frac{S_G}{d}}{1 - \left(\frac{S_G}{d} \right)^2} \quad (9)$$

3. 回転に伴って斜橋が落橋する条件

回転に伴って斜橋を支持する橋台部分の長さが減少すると、図-4に示すように、斜橋は落橋する。斜橋は地震前に支承線橋軸方向に桁かかり長 S_E に相当する分だけ橋台によって支持されているとする。この状態から斜橋が反時計回りに回転して最初に鋭角端Aが橋台から支持されなくなる時の回転角を脱落開始回転角 θ_{ui} 、最終的に鈍角端が支持されなくなる時の回転角を脱落回転角 θ_u と定義すると、 θ_{ui} と θ_u はそれぞれ次式で与えられる。

$$\theta_{ui} = \theta - \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{S_E}{l} \right) \quad (10)$$

$$\theta_u = \tan^{-1} \frac{c_3 + \sqrt{c_3^2 - c_4 \cdot c_5}}{c_3} \quad (11)$$

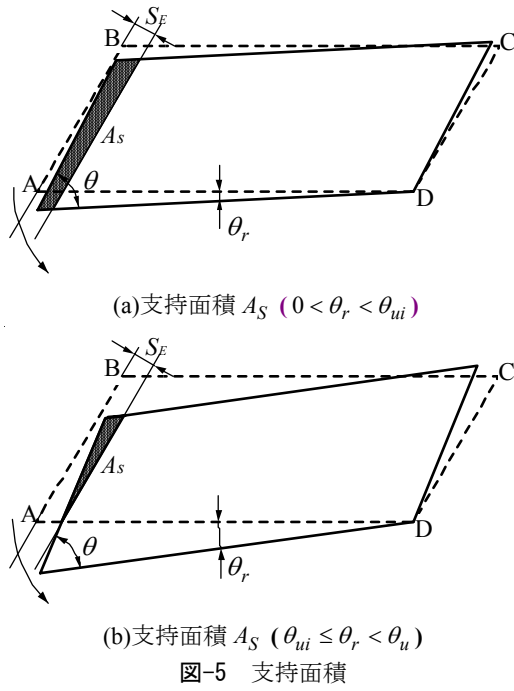
ここに、

$$c_3 = \frac{d}{l} - \frac{\sin 2\theta}{2} \quad (12)$$

$$c_4 = \left(\frac{S_E}{l} - \sin \theta \right)^2 - \left(\frac{b}{l} - \cos \theta \right)^2 \quad (13)$$

$$c_5 = \frac{S_E}{l} \left(\frac{S_E}{l} - 2 \sin \theta \right) \quad (14)$$

したがって、斜橋の回転角 θ_r が脱落開始回転角 θ_{ui} 以上になると、斜橋の端部は鋭角端から順次支持されなくなり、脱落回転角 θ_u に達すると斜橋は完全に落橋することになる。ただし、これは脱落回転角 θ_u に達するまでに斜橋が部分崩壊しないと仮定した場合であり、斜橋が部分崩壊した場合に



は、脱落回転角 θ_u に達する前に落橋することもあり得る。

斜角の回転角 θ_r が $\theta_{ui} < \theta_r < \theta_u$ の範囲にある場合に、斜橋の端部が橋台によって支持されている区間の長さ（支持区間長）を b_s とすると、

$$b_s = b - \frac{l\{\sin\theta - \sin(\theta - \theta_r)\} - S_E}{\sin\theta_r} \quad (15)$$

いま、支持区間長 b_s を支承線方向の長さ b で無次元化し、次式のように支持区間長比 β_s を定義する。

$$\beta_s = \frac{b_s}{b} \quad (16)$$

一方、式(15)では橋台上で支持されている桁の長さによって落橋の可能性を表したが、これを図-5に示すように橋台上で支持されている桁の面積（以下、支持面積と呼ぶ） A_s によって表すと、 A_s は以下ようになる。

$$A_s = \begin{cases} b \cdot d - \frac{1}{2} \left\{ c_6 \cdot \left(b - \frac{c_9}{\sin\theta} \right)^2 + c_7 - c_8 \right\} & 0 < \theta_r < \theta_{ui} \\ \frac{b_s^2 \sin\theta \cdot \sin\theta_r}{\sin(\theta - \theta_r)} & \theta_{ui} < \theta_r < \theta_u \end{cases} \quad (17)$$

ここに、

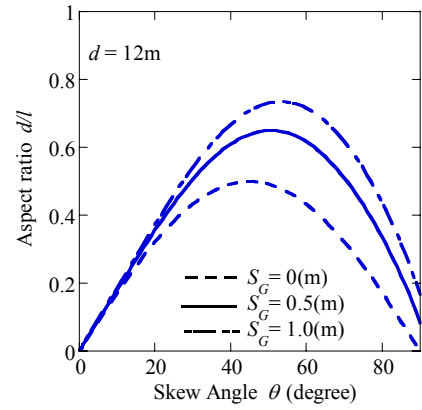


図-6 回転可能な辺長比 d/l と斜角 θ の関係

$$c_6 = \frac{\sin\theta \cdot \sin\theta_r}{\sin(\theta - \theta_r)} \quad (18)$$

$$c_7 = \left(b - \frac{S_E}{c_6} - c_9 \cdot \sin(\theta - \theta_r) \right)^2 \quad (19)$$

$$c_8 = \frac{\sin\theta}{c_6} + c_9 \cdot \sin(\theta - \theta_r) \cdot \sin\theta \quad (20)$$

$$c_9 = \frac{l\{\sin\theta - \sin(\theta - \theta_r)\} - S_E}{\sin\theta_r} \quad (21)$$

ここで、もともと橋台上で支持されている桁の面積 A_{s0} は、

$$A_{s0} = b \cdot S_E \quad (22)$$

であるから、支持面積比 β_{sA} を次式のように定義する。

$$\beta_{sA} = \frac{A_s}{A_{s0}} \quad (23)$$

なお、式(16)において $\beta_s = 0$ の条件から求められる脱落回転角 θ_u と式(23)において $\beta_{sA} = 0$ の条件から求められる脱落回転角 θ_u は、これらの定義から明らかなように同一の値となる。

4. 水平面内における斜橋の回転挙動

(1) 回転可能な辺長比 d/l

いま、支間長 $l=36\text{m}$ 、幅 $d=12\text{m}$ の斜橋を考えてみる。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。

$$S_E = 0.7 + 0.005l \quad (24)$$

式(24)によれば、ここで対象とする斜橋の桁かかり長 S_E は $S_E=0.88\text{m}$ となるため、ここではこの値を用いることとする。桁端から橋台パラペットまでの遊間 S_G はいろいろな条件で異なるため、ここ

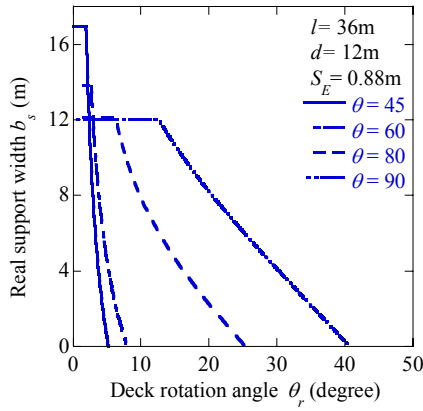


図-7 支持区間長 b_s

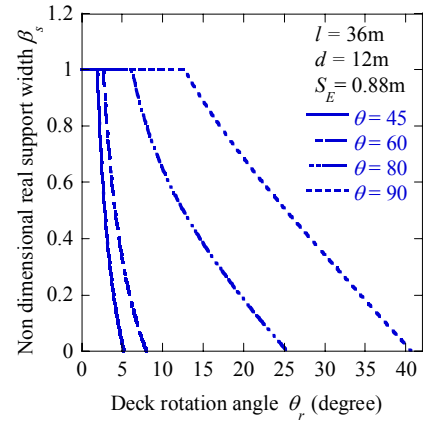


図-9 支持区間長比 β_s

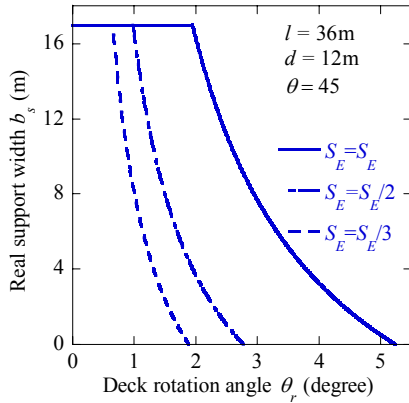


図-8 $S_E/2$, $S_E/3$ とした場合の支持区間 b_s

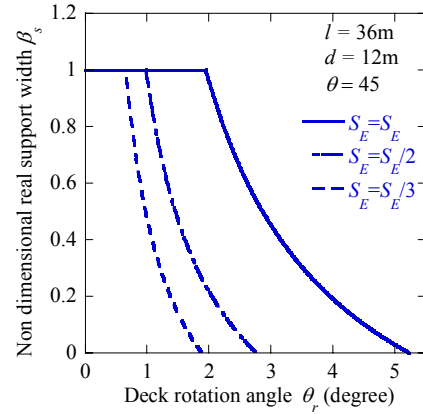


図-10 支持区間長比 β_s

では、 S_G をゼロとした場合の他に、0.5m、1.0mの3ケースを考えることとする。この条件で回転可能な辺長比 d/l と斜角 θ の関係を求めた結果が図-6である。 S_G がゼロであるとする、斜角 $\theta=45$ 度の場合には辺長比 d/l が0.5までの斜橋が回転可能であるが、 S_G が0.5mの場合には斜角 $\theta=51$ 度の場合に、また、 S_G が1.0mの場合には斜角 $\theta=53$ 度の場合に、それぞれ辺長比 d/l が0.645及び0.735の斜橋まで回転できることになる。当然ながら、 S_G が大きくなるにつれて、回転できる斜橋の辺長比 d/l が大きくなる。さらに、 S_G がゼロの場合には直橋は回転できないが、 S_G がゼロでない場合には直橋でも回転できることになり、例えば、 $S_G=0.5m$ 、1.0mの場合には、回転可能な直橋の辺長比はそれぞれ0.0835、0.168となる。

(2) 支持区間長 b_s

上記と同様な条件で、支持区間長 b_s を求めてみる。まず、桁かかり長 S_E を0.88mと仮定して、斜角 θ が45度、60度、80度、90度の4種類に対して式(15)により支持区間長 b_s を求めると、図-7のようになる。斜角によって支承線方向の桁の幅 b は大きく変化するが、 $\theta=45$ 度の場合を例にとると、斜橋が1.95度回転すると鋭角端側で桁は橋台から支持さ

れなくなり、5.23度回転した段階で鈍角端も橋台から外れ、完全に落橋することになる。すなわち、この場合には、脱落開始回転角は1.95度、脱落回転角は5.23度となる。斜橋が回転することにより、鋭角端で斜橋が橋軸直角方向に移動する変位を d_{TR} とすると、 d_{TR} は次式で与えられる。

$$d_{TR} = l\theta \quad (25)$$

したがって、脱落開始回転角が1.95度、脱落回転角が5.23度ということは、斜橋が橋軸直角方向にそれぞれ1.23m、3.29m移動した状態に相当する。これに対して、斜角 θ が80度の場合には、脱落開始回転角は6.19度 ($d_{TR}=3.89m$)、脱落回転角は25.4度 ($d_{TR}=16.0m$) と大きくなり、事実上、このような条件では回転によって桁が橋台から落下する可能性はほとんど無いと言える。重要な点は、脱落開始回転角及び脱落回転角は斜角 θ が60度程度までは斜角 $\theta=45$ 度の場合とほとんど変わらないことである。したがって、斜角 θ が60度程度以下の斜橋は桁回転により落橋しやすいということがわかる。

以上は、桁かかり長 S_E を0.88mとした場合であるが、 S_E を1/2 ($S_E=0.44m$)、1/3 ($S_E=0.29m$) にした場合の支持区間長 b_s を斜角 θ が45度の場合に対して求めた結果が図-8である。 $S_E/3$ の場合に

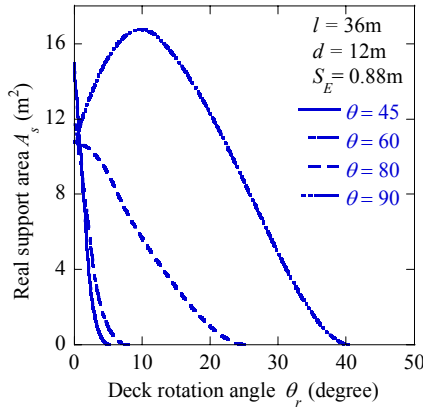


図-11 支持面積 A_s

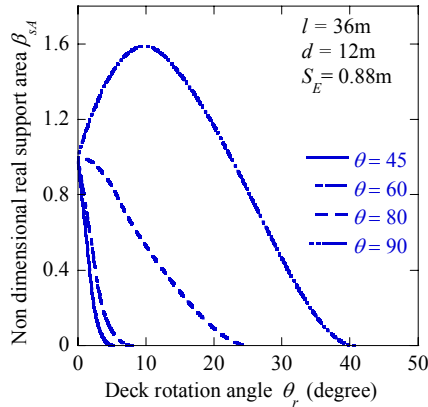


図-12 支持面積比 β_{SA}

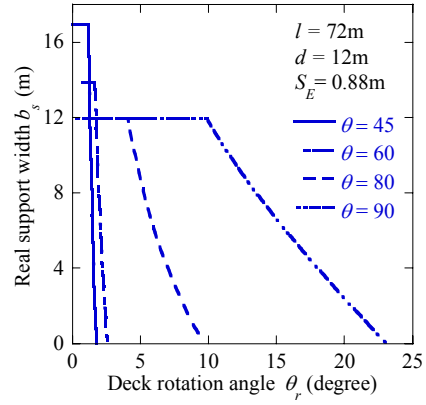


図-13 支持区間長 b_s

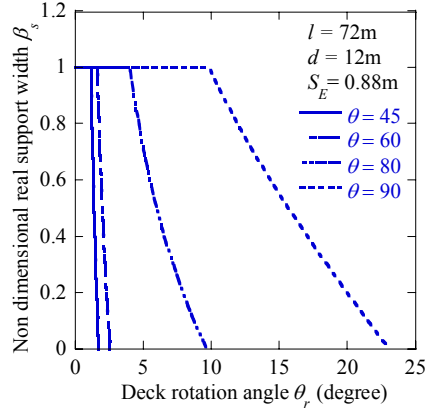


図-14 支持区間長比 β_s

は、脱落開始回転角は0.656度 ($d_{TR}=0.412m$) となり、また、脱落回転角は1.89度 ($d_{TR}=1.19m$) となることから、容易に回転によって斜橋は落橋し得ることがわかる。

以上の結果では縦軸を支持区間長 b_s によって表したが、これを式(16)で定義した支持区間長比 β_s によって無次元化して表すと、図-9、図-10のようになる。

(3) 支持面積 A_s

上記と同様に、式(17)による支持面積 A_s を求めると、図-11のようになる。条件は上記と同じであり、支間長 $l=36m$ 、幅 $d=12m$ の斜橋で、桁かかり長 S_E を $0.88m$ と仮定して、斜角 θ を45度、60度、80度、90度の4種類に変化させて解析した結果である。

斜角が45度の場合には、式(22)より当初の支持面積 A_{s0} は $14.9m^2$ となる。斜橋が回転するにつれて、支持面積 A_s は単調に減少し、脱落回転角 $\theta_u=5.23$ 度になると $A_s=0$ となる。斜角が60度の場合にも斜角が45度の場合と似た特性となる。これに対して、直橋の場合には、回転が生じ始めると支持面積 A_s は当初の支持面積 A_{s0} よりも一度大きくなり、その後減少していく。以上の結果を、式(23)による支持

面積比 β_{SA} によって表すと、図-12のようになる。

(4) 支間長の影響

以上の解析では、支間長 $l=36m$ と仮定してきたが、支間長の影響を検討するため、幅 $d=12m$ 、 $S_E=0.88m$ と固定したままで支間長 $l=72m$ とすると、斜角 θ が45度の場合には、脱落開始回転角は1.18度、脱落回転角は1.75度となる。同一条件下における支間長 $l=36m$ の斜橋では、脱落開始回転角は1.95度、脱落回転角は5.23度であるから、これらと比較すると脱落開始回転角、脱落回転角ともに小さくなる。特に、脱落回転角は5.23度から1.75度と非常に小さくなることが重要である。なお、斜橋が回転することにより、鋭角端が橋軸直角方向に移動する変位 d_{TR} を式(25)から求めると、脱落開始回転角、脱落回転角に相当する変位 d_{TR} は、それぞれ1.48m、2.20mとなる。

これに対して支間長 $l=36m$ の場合には、脱落開始回転角、脱落回転角に相当する変位 d_{TR} は、それぞれ1.23m、3.29mである。したがって、脱落開始回転角に相当する変位 d_{TR} は、 $l=36m$ に比較して $l=72m$ の方がわずかに大きくなるが、脱落回転角に相当する変位 d_{TR} は、 $l=72m$ となると、 $l=36m$ の場合の1/3に減少する。以上に示したように、幅 d 、

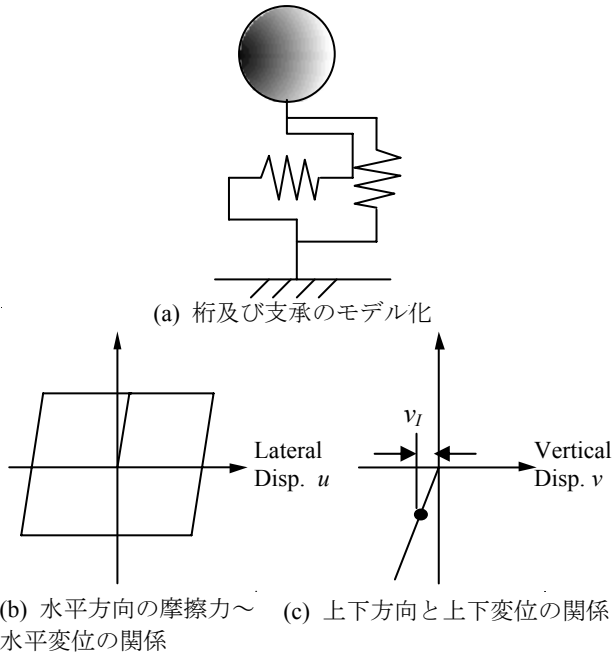


図-15 解析モデル

桁かかり長 S_E を固定したまま支間長 l を大きくすると、小さい回転角で容易に落橋するが、これを支持区間長 b_s 及び支持区間長比 β_s によって示すとそれぞれ図-13、図-14のようになる。これらの結果を $l=36\text{m}$ の場合の図-7及び図-9とそれぞれ比較すると、より小さい回転角で支持区間長 b_s 及び支持区間長比 β_s が減少することが分かる。

5. 桁の浮き上がりを考慮した摩擦力のモデル化

(1) 桁－支承間の摩擦力のモデル化

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-15に示すように1質点と摩擦力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仮定する。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与えられる。

$$F = \begin{cases} k_h |u| & k_h |u| < \mu N, v \leq 0 \\ \pm \mu N & k_h |u| \geq \mu N, v \leq 0 \\ 0 & v > 0 \end{cases} \quad (26)$$

ここで、 k_h は摩擦ばねの剛性である。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 $\ddot{v}_g$ の作用を受けた場合に桁に生じる上下方向変位 v は次式となる。

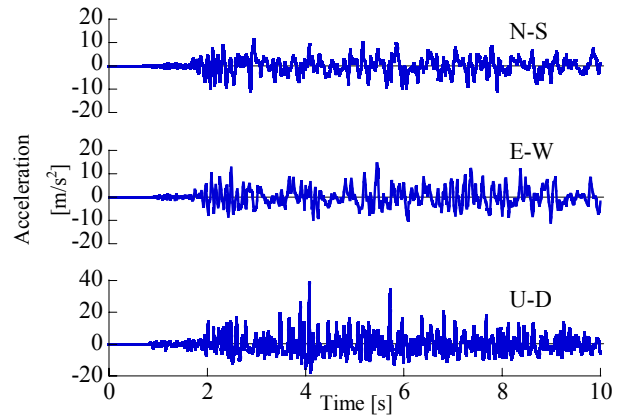


図-16 入力地震動

$$v = v_s - \frac{m \ddot{v}_g}{k_h} \quad (27)$$

ここでは、 v は下向きを正とする。図-15のモデルでは支承及び下部構造には上下方向変位は生じないと仮定しているから、 v は桁と支承間に生じる相対変位となる。 $v > 0$ 、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。

$$F = \begin{cases} k_h |u| & k_h |u| < \mu N \\ \pm \mu N & k_h |u| \geq \mu N \end{cases} \quad (28)$$

(2) 質点モデルに基づく桁の地震応答解析

a) 解析モデル

(1)で提案したモデルに基づき、桁の浮き上がりの効果を検討する。入力地震動としては、図-16に示す2008年岩手・宮城内陸地震においてKiK-net一関西観測点で観測された強震記録を用い、NS成分とUD成分を10秒間同時入力した。質点の質量 m は50tonとし、図-15(b)に示した摩擦履歴特性を有するばねを水平方向に設け、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 は $100 k_h$ とした。ばね剛性 k_h 及び k_v は、水平方向の固有周期 T_h が0.5秒、鉛直方向の固有周期 T_v が0.05秒になるようにそれぞれ定めたものである。限界摩擦抵抗 P_y は、式(26)による μN で与え、 $\mu=0.2$ とした。

b) 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図-17に示す。図-17(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

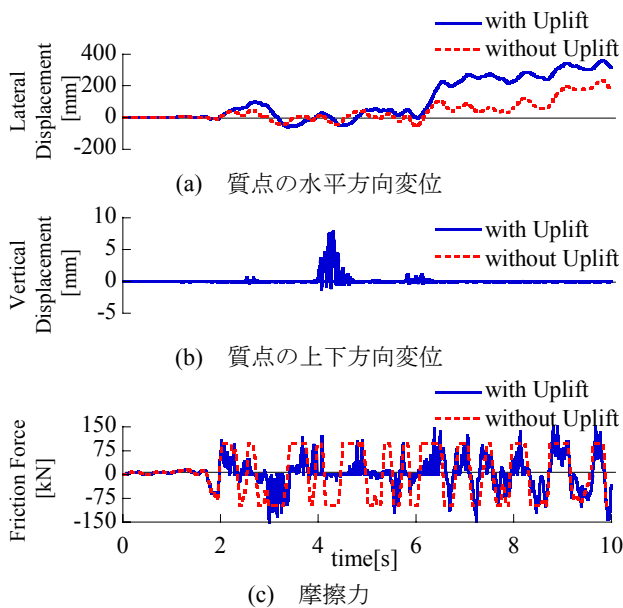


図-17 質点の応答変位と摩擦力

慮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秒の段階で生じ始めている。図-17(c)より浮き上がりを考慮した場合には時刻2.5～2.7秒にかけて摩擦力が0～40kNと小さくなっているのがわかる。

図-17に示した応答を時刻2～3秒間だけに着目して示すと、図-18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と呼ぶと、図-18(a)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。

6. 桁の浮き上がりを考慮した斜橋の地震応答解析

(1) 解析対象橋

解析対象としたのは、図-19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 $l=40\text{m}$ 、質量は468ton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。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

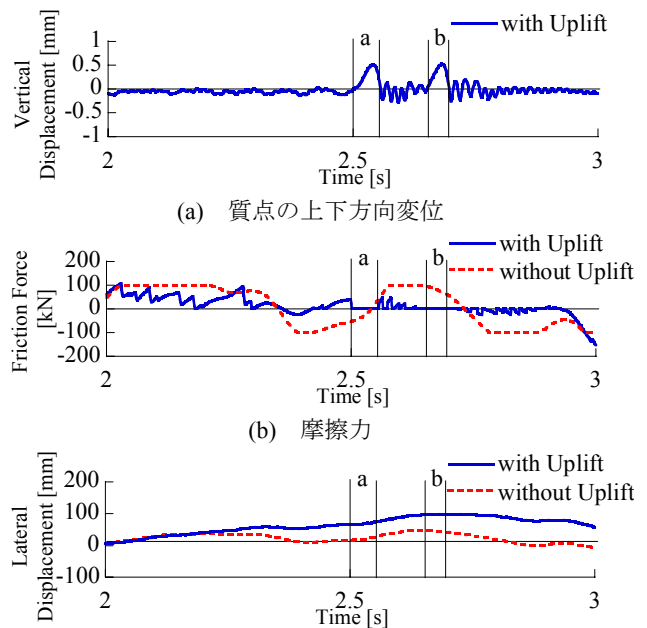


図-18 質点の応答変位と摩擦力
(時刻2秒～3秒間)

を支承線方向(y方向)と呼ぶこととする。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573kNであり、各支承の限界摩擦抵抗力 P_y は、 $\mu=0.2$ と仮定して式(26)による μN から求める。

式(24)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。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(6)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-20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、この斜橋の脱落回転角 θ_u は式(11)から求めると、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-21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、桁は剛体であると仮定した。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。5.と同様に浮き上がりを考慮した場合とこれを考慮しない場合の応答を検討するために、式(26)、(28)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。

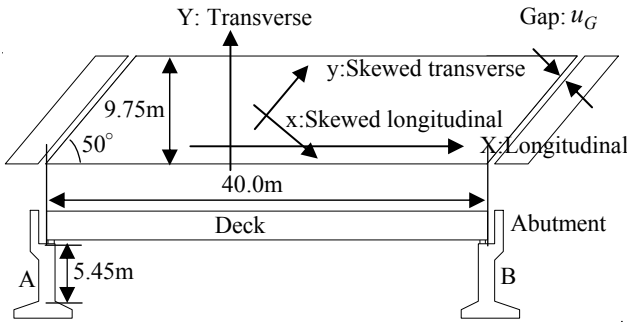


図-19 解析対象とする斜橋

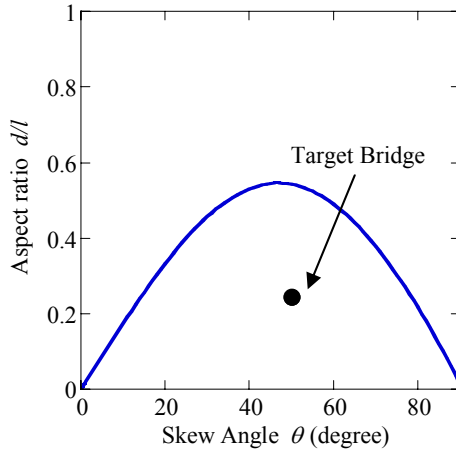


図-20 辺長比と斜角の関係

$$F_I = \begin{cases} k_I \Delta u & \Delta u \leq -u_G \\ 0 & \Delta u > -u_G \end{cases} \quad (29)$$

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、

$$\Delta u = u_i - u_j \quad (30)$$

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⁹⁾。

$$\gamma = \frac{k_I L}{nEA} \cong 1.0 \quad (31)$$

ここで、 L は桁の長さを、 EA は軸方向剛性、 n は桁をはり要素でモデル化した場合の要素数である。この結果、ここでは $k_I = 7.25 \times 10^3 \text{ MN/m}$ とした。また、図-21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、5.の解析に用いた同一の強震記録とし、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。

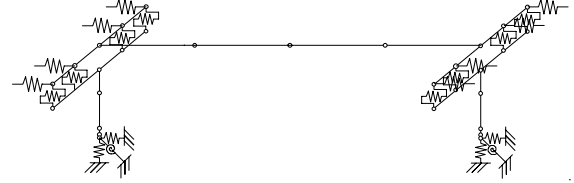
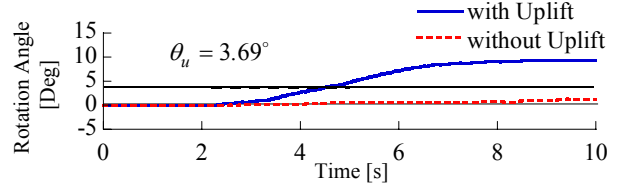
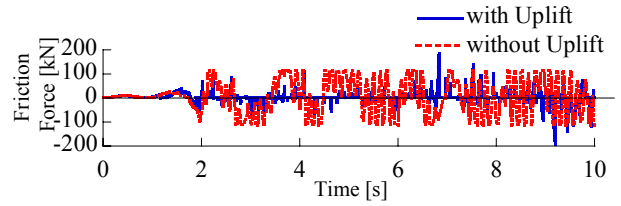


図-21 解析モデル



(a) 回転角



(b) 摩擦力

図-22 支承線直角方向の摩擦力と回転角の関係 (橋台A鈍角端)

(3) 桁の浮き上がりが斜橋の地震応答に及ぼす影響

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-22である。図-22(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、摩擦力が小さい時間が長くなっている。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-23、図-24のようになる。図-23(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468ton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-23(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-23(c)である。図-23(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-23(d)に示すように摩擦力がゼロになっている。

一方、図-24(a)より、浮き上がりを考慮しない場合は7回の衝突が生じ、その最大値は27MNである。

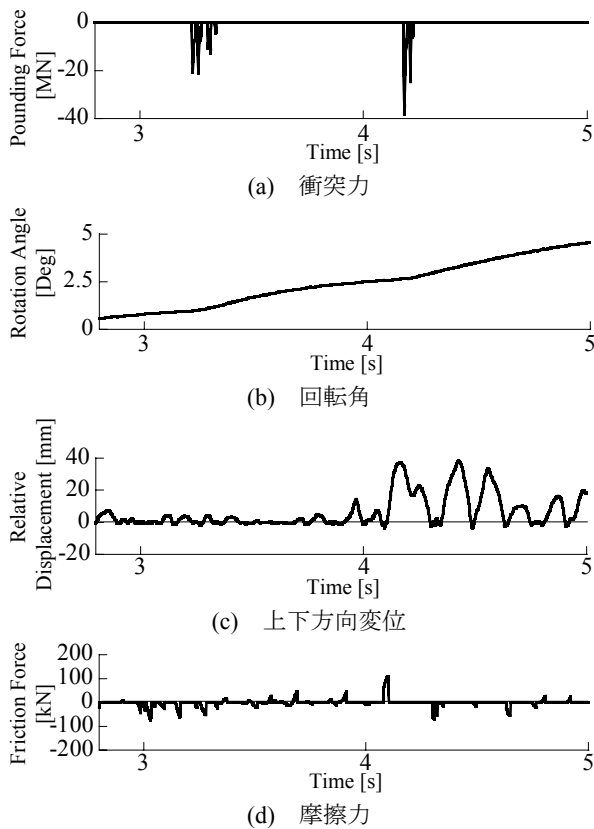


図-23 桁の浮き上がりを考慮した場合の応答
(時刻2.8秒～5.0秒間)

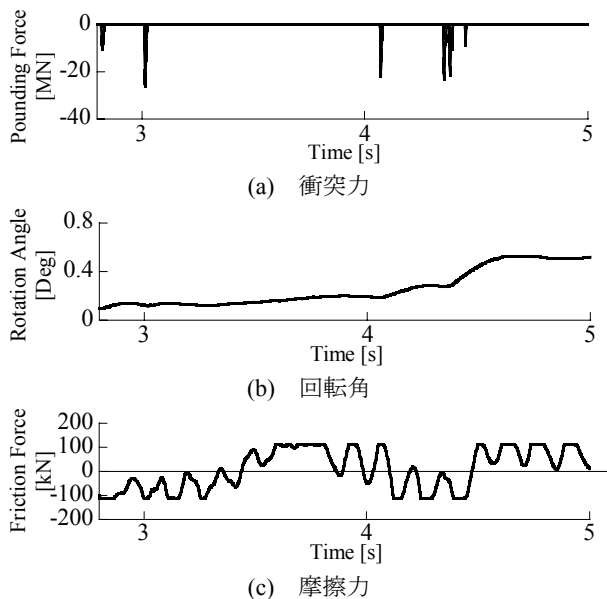


図-24 桁の浮き上がりを考慮しない場合の応答
(時刻2.8秒～5.0秒間)

衝突の結果、図-24(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-23に示した浮き上がりを考慮した場合と比較すると、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-23(b)及び図-24(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-22(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。

7. 結論

本論文では、桁端と橋台パラペット間の遊間を見込んだ場合の斜橋及び直橋の回転条件を明らかにすると同時に、桁の支承からの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。本研究から得られた結論は以下の通りである。

- 1) 桁端と橋台パラペット間の遊間を見込むことにより、これをゼロと仮定した場合よりもより大きな辺長比 d/l の斜橋まで回転できることになる。さらに、桁端と橋台パラペット間の遊間をゼロと仮定すると直橋は回転できないが、桁端と橋台パラペット間の遊間を見込むと、直橋でも回転できる条件が出てくる。
- 2) 桁かかり長 S_E が道路橋示方書の最小値の値だけ確保されていれば、斜橋といえども事実上回転によって落橋する可能性は低いと考えられるが、桁かかり長がこれよりも短いと、斜橋は回転によって橋台から支持されなくなり、落橋する可能性が出てくる。
- 3) 斜角 θ と橋軸直角方向の幅 d が一定であれば、支間長 l が長くなる程、脱落開始回転角、脱落回転角ともに小さくなる。特に、支間長 l が長くなると脱落回転角は大きく減少することが斜橋の落橋に重要である。
- 4) 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、桁と支承間の摩擦力が鉛直方向の相対変位 v に伴い小さくなるため、桁の水平移動量は大きくなる。
- 5) 桁が浮き上がった状態で桁に衝突力が作用すると、桁は回転しやすいため、回転角が大きくなる。この結果、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、桁が落橋する可能性が高まる。

参考文献

- 1) Kawashima K., Unjoh S., Hoshikuma J., and Kosa K.: Damage of bridges due to the 2010 Maule, Chile, Earthquake, Journal of Earthquake Engineering, pp.1036-1068, 2011
- 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) 川島一彦，渡邊学歩：斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究，土木学会論文集，No.675/I-55, pp.141-159,2001.

ROTATIONAL RESPONSE OF SKEWED BRIDGE UNDER STRONG SEISMIC EXCITATIONS

Yoshiyuki HIRAI, Kazuhiko KAWASHIMA and Hiroshi MATSUZAKI

It is well known that skewed bridges tend to rotate and collapse under the strong seismic excitation. This paper clarified the requirement for rotation of skewed bridges including straight bridges considering the gap between a deck and an abutment. Then, deck rotation response of skewed bridges in which the deck can uplift from its bearings is studied. It is shown that the skewed bridges are likely to rotate more extensively, if uplift of the deck from bearings is allowed to occur.