

簡易解析モデルによる地震時の鋼鉄道橋の転倒に関する 基礎的検討

池田学¹・中原正人¹・北健志²・永井紘作³・豊岡亮洋⁴

¹正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造 (〒185-8540 東京都国分寺光町2-8-38)

²正会員 (財)鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造 (〒185-8540 東京都国分寺光町2-8-38)

³正会員 工修 小金井市(元(財)鉄道総合技術研究所) (〒184-8504 東京都小金井市本町6-6-3)

⁴正会員 博(工) 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市左京区京都大学桂Cクラスター)

1. はじめに

「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）」（以下、鋼・合成標準）¹⁾では、地震時の鋼橋や合成桁の転倒に対する照査が定められている。この照査は、地震時に桁や列車に作用する水平力による転倒モーメントが、桁や列車の重量および支承部の浮き上がり止めなどから求まる抵抗モーメント以下であることを確認することにより行っている。従来は特に問題とならなかったが、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」（以下、耐震設計標準）²⁾の適用により地震力が大きくなり、地震時の桁の転倒モーメントが増えている。一方、桁の転倒に対する抵抗力としては、桁や列車の自重の他、支点部のアンカーボルトや浮き上がり止めなどの浮き上がりに抵抗する装置の耐力があり、従来から抵抗モーメントはほとんど変わっていない。その結果、特に重心の高い鋼桁において、転倒に対する照査が厳しくなっているのが現状である。これが満足しないために、支承寸法や浮き上がりに対する装置を大きくせざるを得なくなるといった事例も生じている。

一方、過去の鋼鉄道橋の地震被害では、支承部の損傷事例はあるが、桁が転倒に至った事例はない。そのため、現状行われている照査はかなり安全側となっている可能性もあり、照査法を見直す必要性が生じている。

本論文では、鋼橋や合成桁の実構造を模擬した簡易解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行い、支点部からの浮き上がりが生じやすい条件を把握するとともに、モーメントの釣り合いの照査法と比較した。

さらに、剛体の転倒に対する評価法を参考に、地震時の桁の転倒に対する照査法について検討を行った。

2. 実構造における地震時の桁の転倒に対する照査法

鋼・合成標準「7.5 橋桁の転倒に対する照査」では次式により照査を行うこととしている。

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot \frac{M_{sd}}{M_{rd}} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 γ_a , γ_b , γ_i ：構造解析係数，部材係数，構造物係数

M_{sd} ：橋桁の底面端部における転倒モーメント（荷重係数を考慮した値）

M_{rd} ：橋桁の底面端部における転倒に対する抵抗モーメント

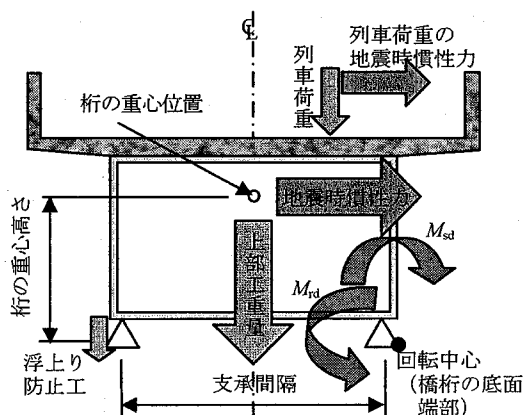


図-1 桁の転倒に対する照査の概念図
（鋼・合成標準）

表-1 2質点モデルの解析におけるパラメータ

		パラメータ			
		重量	桁の重心高さ	支承間隔	想定構造
上部工	ケース A	10,000(kN)	1.5(m)	2.2(m)	支間 40m 程度の単線合成桁
	ケース B	25,000(kN)	4.0(m)	3.0(m)	支間 80m 程度の単線合成桁
	ケース C	40,000(kN)	6.0(m)	6.0(m)	支間 100m 程度の複線合成桁
	ケース D	10,000(kN)	4.0(m)	3.0(m)	ケース B の上部工重量を軽減
橋脚	降伏震度	0.30, 0.50, 0.70, 1.00 の 4 ケース			
	固有周期	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50(sec) の 5 ケース			
浮上り防止工	初期剛性	5.0×10^5 , 2.5×10^6 , 5.0×10^6 , 1.0×10^7 (kN/m) の 4 ケース			
	破断震度	0.30, 0.50, 0.70, 1.00 の 4 ケース			

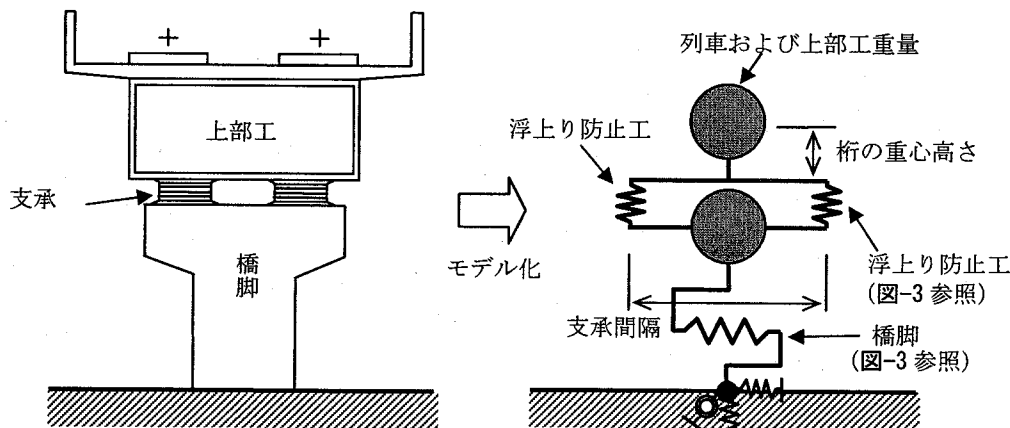


図-2 2質点ばねマスモデルの概要

3. 2質点モデルによる時刻歴応答解析

(1) 解析モデルおよび解析パラメータ

大規模地震時における桁の支点部からの浮き上がり挙動をみるために、構造物を2質点ばねマスモデルにモデル化し、上部工の構造諸元や下部工の剛性等をパラメータとした非線形時刻歴応答解析を行った。解析に用いたパラメータ一覧を表-1に示す。

図-2に本解析で用いたモデルの概要を示す。解析モデルは基礎と橋脚、上部工をそれぞれ質点で表現し、支承部や橋脚の非線形特性をばね要素でモデル化した2質点ばねマスモデルとした。

橋脚および浮上り防止工の非線形特性を図-3に示す。橋脚の非線形特性は、降伏および最大点を通るトリリニア型モデルとし、履歴特性は剛性低下を考慮した武田モデルを用いた。また、浮上り防止工の非線形特性は破断後に耐力が0となるようなギャップ型モデルを用いた。浮上り防止工の初期剛性については、鋼製支承の浮上り止め（ピンチプレート）の曲げ剛性やゴム支承の圧縮ばね定数などを参考に4ケース設定した。また、浮上り防止工の破断震度とは、破断耐力を桁や列車の重量で除した値である。

解析ケースの総数は、表-1の組合せで約6000ケースである。

照査の概念図を図-1に示す。転倒モーメント M_{sd} は地震時の上部工および列車の水平方向の慣性力に重心高さを乗じて算定する。転倒モーメントの算定にあたっては、一般に、地震時の上揚力は考慮していない。また、転倒に対する抵抗モーメント M_{rd} は、上部工および列車の自重によるモーメントと、モーメントの回転中心のある支承と反対側の支承の浮き上がり止めの抵抗力によるモーメントを足し合わせて算定している。照査は、列車荷重がある場合と無い場合のそれぞれについて行っている。

ここでいう浮き上がりに抵抗する装置とは、鋼製支承の浮き上がり止め（ピンチプレート）や沓座のアンカーボルトの引き抜き等を指し、本論文では総称して浮上り防止工という。

上記の照査は、桁の転倒に対して照査をしているのではなく、正確には“桁が支点部から浮き上がらない”ことを照査している。もし桁が浮き上がったとしても、即転倒に至るものでなく、元に戻ろうとする復元力以上に転倒方向への力が作用しない限り転倒まで至ることはないと考えられる。そのため、本来は、支点部から浮き上がるかどうかの照査と、浮き上がった後に桁が転倒するかどうかの照査を区別して検討するのが望ましいと考えられる。

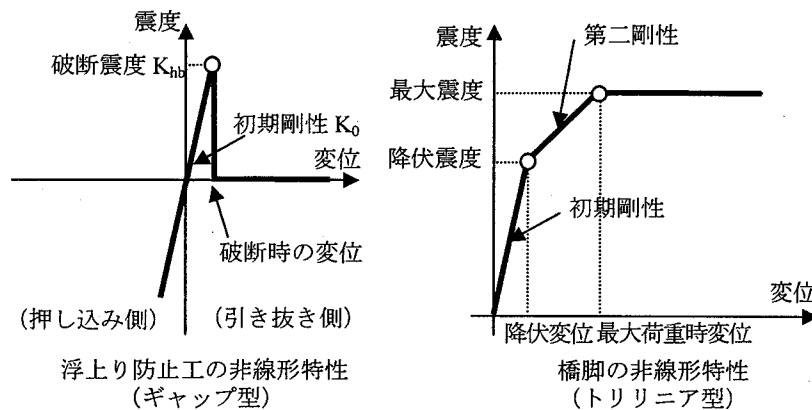


図-3 橋脚および浮上り防止工の非線形特性

減衰については、本モデルでは1次モードが卓越するためモード減衰とし、部材粘性減衰として橋脚および支承には減衰定数1%、地盤・基礎には10%を設定した。なお、2次モード以降については臨界減衰として設定した。入力地震波は耐震設計標準G0～G5地盤用の設計地表面地震動を用い、水平方向のみに入力した。

(2) 解析結果

各上部工における解析結果を図-4(a)～(d)に示す。図は、各上部工ケースについて、浮上り防止工の初期剛性ごとに整理した。なお、浮上り防止工の初期剛性は、表-1に示す4ケースのうち3ケースについて示している。グラフは、横軸が橋脚の最大応答震度（解析での最大加速度を自重で除して算定）と、縦軸は浮上り防止工の破断震度である。なお、図中のマークの形状は構造物の等価固有周期ごとに区分している。白抜きで小さいマークが桁が支点部から浮き上がらなかったケースを、黒塗りで大きいマークは浮き上がったケースを表す。各グラフの実線については後述する。

これらの図より、桁が支点部から浮き上がる結果となったケースに着目すると、以下のような傾向があることが確認できる。

- ・下部工の最大震度が大きく浮上り防止工の破断震度が小さい場合に浮き上がりが生じやすい。
- ・いずれの上部工ケースにおいても浮上り防止工の剛性が大きい方が浮き上がりが生じやすい。
- ・桁重量が小さく、重心高さが低い上部工ケースAでは浮き上がりは生じにくい。逆に、桁重量が重く、重心高さが高い場合には浮き上がりが生じやすい。
- ・桁重量が重く、重心高さが高く支承間隔が小さい構造（上部工ケースB）が浮き上がりが生じるときの橋脚震度が一番低い。

また、本結果では区分は省略したが、地震動の種類では、G3地盤用の地震動が浮き上がるケースが一番多かった。また、上部工ケースDを用いて、橋脚の非線形特性の降伏点以後の剛性を変化させて解析を行ったが、これによる影響は小さかった。

(3) モーメント照査法との比較

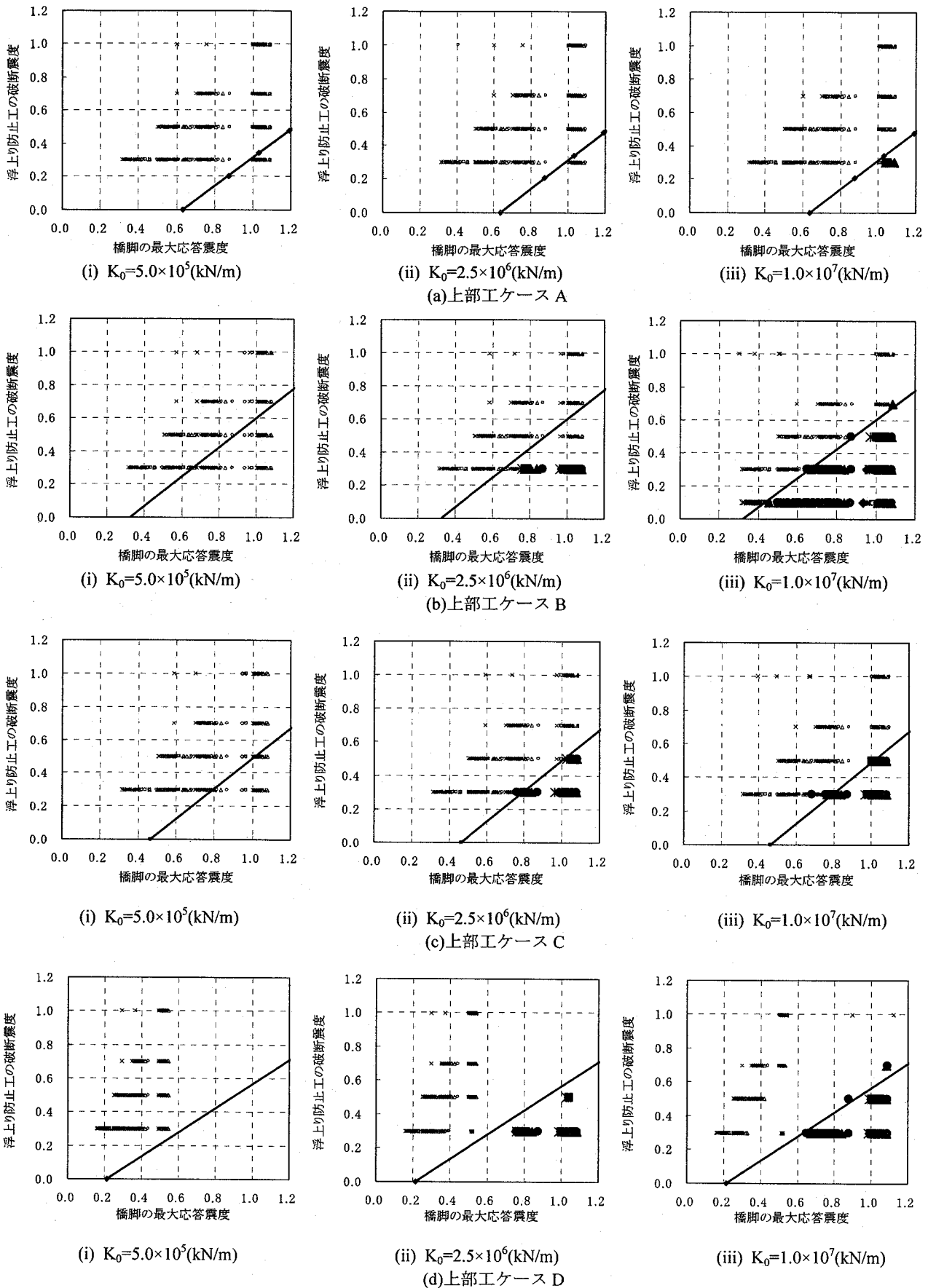
図-4(a)～(d)には、図-1に概念図を示した実設計におけるモーメントの釣り合いから算定される浮き上がりの限界線を実線で示した。この限界線は、構造物の諸元等をもとに、浮上り防止工の破断震度と橋脚の最大震度の関係から一意的に定めることができる。この線より上側の領域は浮き上がりが生じない、下側の領域は浮き上がりが生じると判断することができる。なお、列車荷重については、耐震設計標準に準拠し、設計水平力の算出時には震度0.3を上限とした重量を考慮している。

図中の実線と時刻歴応答解析結果を比較すると、モーメント照査法から算定される限界線は時刻歴応答解析結果とほぼ合っていることがわかる。ただし、浮上り防止工の初期剛性が小さい場合にはモーメント照査法がかなり安全側の評価になっていることがわかる。このような場合には、2質点ばねマスモデルで時刻歴応答解析を行うことで、合理的な評価が可能と考えられる。

4. 桁を考慮した簡易モデルによる時刻歴応答解析

(1) 解析モデルおよび解析パラメータ

前述の解析では橋脚1基のみに着目し、桁を質点にモデル化したが、実構造では桁は複数の橋脚上に支持されている。そのため、桁の地震時の挙動は、支持されている複数の橋脚の応答に影響を受ける。



※凡例…黒塗りで大きいマーク：支点部から浮き上がったケース，白抜きで小さいマーク：浮き上がらなかったケース
 ○： $T_{eq}=0.50$ (sec)，△： $T_{eq}=0.75$ (sec)，□： $T_{eq}=1.00$ (sec)，◇： $T_{eq}=1.25$ (sec)，×： $T_{eq}=1.50$ (sec) (T_{eq} ：橋脚の等価固有周期)

図-4 解析結果とモーメントの釣り合いの限界線との比較

表-2 桁と考慮した簡易モデルの解析におけるパラメータ

上部工		パラメータ			
		重量	桁の重心高さ	支承間隔	想定構造
橋脚	ケース D	10,000(kN)	4.0(m)	3.0(m)	80mの単線桁 (重量減)
橋脚	降伏震度	0.6, 線形の2 ケース			
	固有周期	0.50, 0.75 (sec)の2 ケース			
浮上り防止工	初期剛性	5.0×10 ⁵ , 2.5×10 ⁶ , 5.0×10 ⁶ , 1.0×10 ⁷ (kN/m)の4 ケース			
	破断震度	0.60, 0.80, 1.00 の3 ケース			

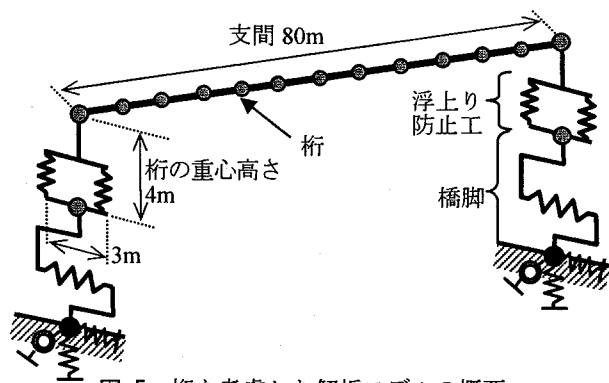


図-5 桁を考慮した解析モデルの概要

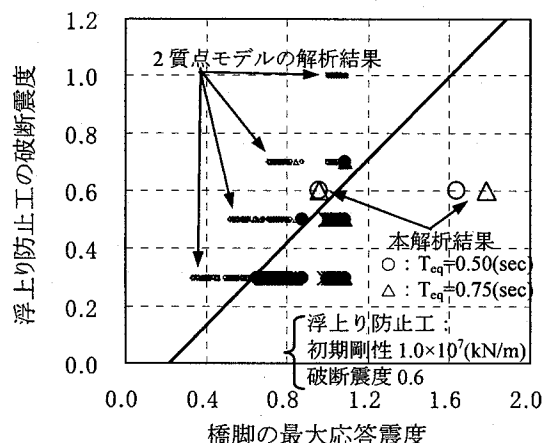


図-6 桁を考慮した簡易モデルの解析結果

ここでは単純桁を対象に、桁を考慮してモデル化することによる影響について検討する。

解析モデルの概要を図-5に示す。起点側および終点側の橋脚については図-2と同様なモデル化とし、2つの橋脚の間に桁を追加したモデルとした。桁の支間は80mとし、桁は線形部材として曲げ剛性、せん断剛性およびねじれ剛性を設定した。

桁の重心位置、支承間隔および上部工重量は、前述の上部工ケースDと同様な条件としたが、実構造物を想定し、列車荷重については桁の重心高さからさらに2.5m高い位置に載荷した。

本解析における解析条件等を表-2に示す。本解析では、耐震設計標準のG3地盤用の設計地表面地震動を用い、水平方向に入力した。

(2) 解析結果

図-6に、桁を考慮したモデルの解析結果の一例を、図-4(d)(iii)の結果に追加して示す。本解析ではいずれのケースにおいても浮き上がりが生じていない。モーメント照査法や2質点ばねマスモデルの時刻歴応答解析結果で桁に浮き上がりが生じる場合でも、桁に支点部からの浮き上がりは生じない結果となっている。これは、桁が弾性変形することによって、支点部への負荷が軽減されたためと考えられる。このことから、桁をモデル化して解析を行う方が実挙動に近く、さらに合理的な評価が可能であると考えられる。

5. 桁の応答速度を用いた転倒に対する検討

(1) 桁の転倒に対する検討方法

ここでは、桁に浮き上がりが生じたケースを対象に、桁が転倒するかどうかの検討を行う。前述のような簡易な解析方法では、桁が転倒するまでの挙動を精度良く求めることはできない。そこで、剛体の転倒に対する評価法を参考に検討を行うこととする。

水平振動を受ける剛床上に置いた剛体が転倒するのに必要な速度 v は、文献3),4)より、以下の式が提案されている。この提案式は直接基礎の転倒の照査にも用いられている。

$$v \geq 0.4 \sqrt{\frac{8}{3} g r \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}} \quad (2)$$

式(2)の各記号は図-8に示すとおりである。式(2)で算定される速度は、転倒するときの最小速度であり、ここでは転倒限界速度ということとする。時刻歴応答解析で得られる桁の重心位置での応答速度が転倒限界速度を下回っていれば、転倒が生じないと判断することが可能と考えられる。

式(2)の鋼橋や合成桁への適用性については十分な検証が必要であるが、本論文ではおおよその傾向をつかむことを主眼として、適用できるものと仮定する。なお、転倒限界速度の算定にあたっては、図-8に示す各記号は、桁の外形の寸法をもとに定めることとした。

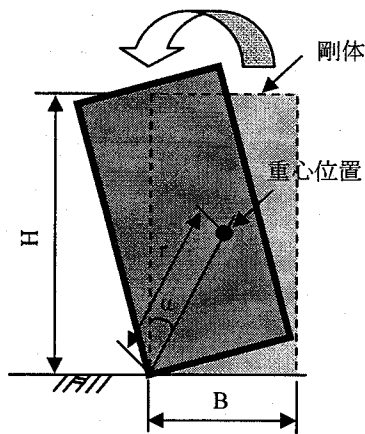


図-8 転倒に対する考え方

(2) 桁の転倒に対する考察

前述の2質点ばねマスモデルで桁が支点部から浮上りが生じたケースについて、浮き上がり後（浮上り防止工の破断以降）の最大応答速度と、式(2)の右辺で算定される転倒限界速度を比較した結果を図-9に示す。

図-9より、上部工ケースA、Cについては、いずれのケースについても、時刻歴応答解析結果の最大応答速度は転倒限界速度を下回っている。一方、上部工ケースBおよびDでは転倒限界速度を上回るケースもある。この転倒限界速度を上回るケースは、構造物の等価固有周期が1.0secを超え、かつ橋脚の最大応答震度が大きいケースで、さらに浮上り防止工は破断震度が小さくかつ初期剛性が大きいケースであった。この解析は橋軸直角方向に着目しているが、実構造物においては、軟弱地盤上や高橋脚を除くと、橋軸直角方向の固有周期が1.0secを超えることは少ない。そのため、転倒限界速度を上回ったケースは、いずれも実構造物で想定されるケースは稀であるものと考えられる。本検討の結果から判断すると、実構造物では、桁が実際に転倒する可能性は低いと考えられる。

6. 結論

構造物を2質点ばねマスモデル等の簡易解析モデルでモデル化して時刻歴応答解析を行い、桁の転倒に関する検討を行った。本検討により得られた結論を以下に示す。

- 1) 下記の条件で支承部からの桁の浮き上がりが生じやすい傾向であることが確認された。
 - ・下部工の最大震度が大きく、浮上り防止工の破断時震度が小さい場合
 - ・浮上り防止工の剛性が大きい場合

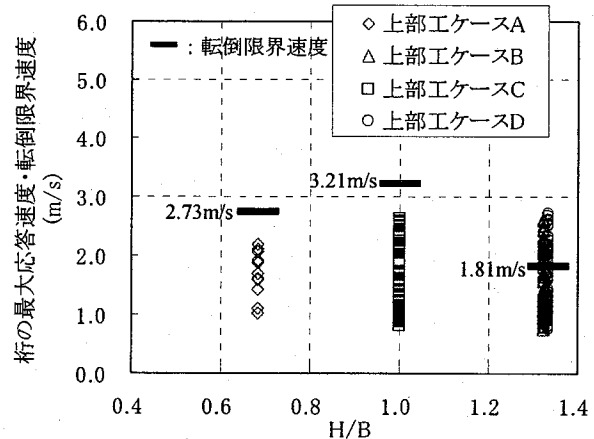


図-9 桁の最大応答速度と転倒限界速度の関係

・重心高さが高く支承間隔が小さい構造の場合

- 2) モーメントの釣り合いによる照査法は時刻歴応答解析と比較して、ほぼ同様に、浮上り防止工の剛性が比較的小さい場合には安全側に評価される。
- 3) 本論文で示した簡易解析モデルの時刻歴応答解析は、支点部からの浮き上がりの照査に適用できると考えられる。
- 4) 剛体の転倒に対する照査が適用できると仮定し、桁の最大応答速度を用いて転倒に対する検討を行ったところ、一般的な鋼橋や合成桁の場合には転倒に至る可能性は小さい。

今後は、解析結果をより精査し、地震時の挙動の傾向をつかむとともに、本論文に示した簡易解析モデルによる照査法を実際の設計に取り入れられるように検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究は、国土交通省からの委託を受けて実施した「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として行われたものである。解析においては（株）ジェイアール総研エンジニアリングにご協力頂いた。ここに記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），2000.7
- 2) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999.10
- 3) 海野隆哉，梅原俊夫，村田修，島峰徹夫：直接基礎の浮上りおよび転倒に対する根入れの影響，構造物設計資料No.88，pp13-16,1986,12
- 4) 石山祐二：地震動による物体の転倒条件，日本建築学会論文報告集，第317号，1982.7