

簡易解析モデルを用いた地震時の橋桁の転倒照査法

黒田 智也* 池田 学** 豊岡 亮洋***

Verification of Overturning of Girders Under Severe Earthquakes by Simple Analysis Model

Tomoya KURODA Manabu IKEDA Akihiro TOYOOKA

In designing a steel or composite structure, an overturning of the bridge girder is one of the major factors that should be taken into consideration. We should be duly taken into consideration that the overturning power is increasing by increase of the recent earthquake power. Current design method is based on the static analysis. In this research, we applied a simple analysis model to four cases of bridge girders, carried out dynamic analysis, and examined overturning of the bridge girder. As a result, we found that the possibility of overturning is low in the case of usual actual structures. It was also found that the verification of overturning of the bridge girder is possible by the simple analysis model. In this paper, we report the result of dynamic analysis, and the result of examination of the verification of overturning of the bridge girder under severe earthquakes.

キーワード：簡易解析モデル，時刻歴応答解析，橋桁の浮上り，橋桁の転倒

1. はじめに

「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）」¹⁾（以下、現行の設計標準という）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、地震時等に桁や列車に作用する水平力による転倒モーメントが、桁や列車の重量及び支承部の浮上り止め等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。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上り止め等の浮上に抵抗する装置の耐力があり、従来から抵抗力の算定方法はほとんど変わっていない。一方で、桁の転倒方向への作用力は、大規模地震を想定した「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」（以下、耐震設計標準という）²⁾の適用により増加傾向にある。その結果、これまで特に問題とならなかったが重心の高い鋼桁においては転倒に対する照査が厳しくなっているのが現状である。

過去の鋼鉄道橋の地震被害を見ると支承部の損傷事例はあるものの、設計時に想定した以上の地震が生じた場合でも桁が転倒に至った事例は報告されていない。そのため、従来の設計標準で行われている照査はかなり安全側となっていることが考えられる。

このような背景から、本研究では新たに鋼橋や合成桁の実構造を模擬した簡易解析モデルを作成し、時刻歴応答

解析を実施することで従来の設計標準で行われている照査法よりも合理的な照査方法を提案することを目的とした。

本報告では、従来の照査法と実構造を模擬した簡易解析モデルによる時刻歴応答解析結果の比較³⁾や、大規模地震時の支点部からの浮上りが生じやすい条件の整理、更に剛体の転倒に対する評価法^{4), 5)}を参考に、地震時の橋桁の転倒に対する照査法について検討したので、その結果について述べる。

2. 地震時の橋桁の転倒に対する照査法

地震時の橋桁の転倒に対する照査の概念図を図1に示す。現行の設計標準では地震時の桁の転倒に対して式(1)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、 $\gamma_a, \gamma_b, \gamma_i$ ：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

この照査は、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。転倒モーメント M_{sd} は、式(2)に示すとおり、地震時の上部工及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。この場合、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、式(3)に示すとおり、上部工及び列車の自重による抵抗モーメントと、モーメントの回転中

* 構造物技術研究部（鋼・複合構造）（現 東日本旅客鉄道㈱）
 ** 構造物技術研究部（鋼・複合構造）
 *** 構造物技術研究部（耐震構造）

特集：鋼・合成構造物の設計技術

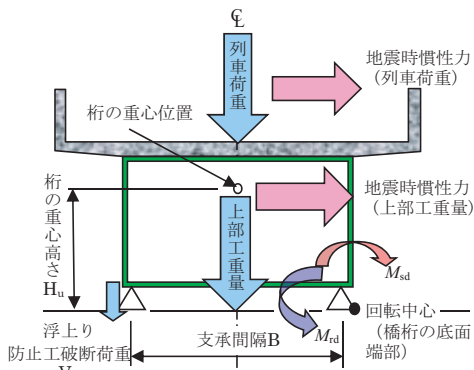


図1 橋桁の転倒に関する照査の概念図

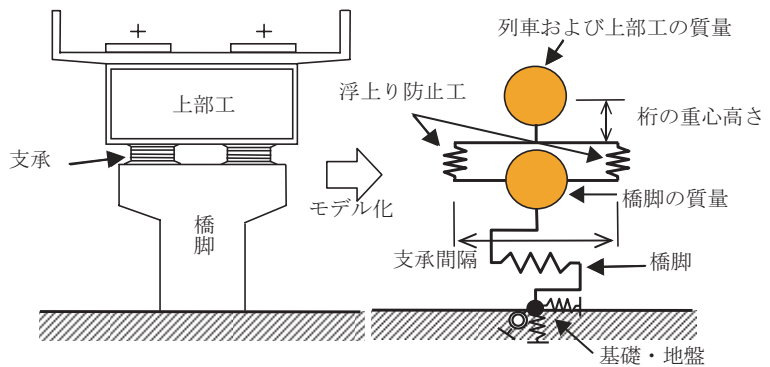


図2 2質点ばねマスモデルの概要

表1 2質点ばねマスモデルの解析におけるパラメータ

		パラメータ				
		重量 W_u+W_L	桁の重心高 H_u	支承間隔 B	H_u/B	想定構造
上部工	ケース A	10,000(kN)	1.5(m)	2.2(m)	0.68	支間 40m 程度の単線合成桁
	ケース B	25,000(kN)	4.0(m)	3.0(m)	1.33	支間 80m 程度の単線合成桁
	ケース C	40,000(kN)	6.0(m)	6.0(m)	1.00	支間 100m 程度の複線合成桁
	ケース D	10,000(kN)	4.0(m)	3.0(m)	1.33	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	$5.0 \times 10^5, 2.5 \times 10^6, 5.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^7$ (kN/m) の 4 ケース				
	破断震度	0.30, 0.50, 0.70, 1.00 の 4 ケース				

心のある支承と反対側の支承の浮上りに抵抗する装置による抵抗モーメントを足し合わせて算定している。ここで言う浮上りに抵抗する装置とは、鋼製支承の浮上り止め（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ており、本論文では総称して浮上り防止工という。

$$M_{sd} = W_u \cdot K_{dh} \cdot H_u + W_L \cdot K_{Lh} \cdot H_L \quad (2)$$

$$M_{rd} = (W_u + W_L) \cdot B / 2 + V_{sd} \cdot B \quad (3)$$

ここに、 W_u : 上部工重量

W_L : 列車荷重

V_{sd} : 浮上り防止工の破断荷重

H_u : 橋桁底面端部から桁重心までの距離

H_L : 橋桁底面端部から列車荷重位置までの距離

B : 橋桁の支承間隔

K_{dh} : 上部工重量に対する水平震度

K_{Lh} : 列車荷重に対する水平震度 (上限 $K_{Lh}=0.3$)

式(1)のモーメントの照査（以下、モーメント照査法という）は、正確には橋桁の転倒に対して照査をしているのではなく、“橋桁が支点部から浮上らない”ことを照査していると言える。式(1)による照査を満足しない場合でも、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。よって、本検討では、橋桁の支点部からの浮上りに対する検討と、橋桁の転倒に対する検討を区別して行う。

3. 2質点モデルによる浮上りに対する検討

3.1 解析モデル及び解析パラメータ

大規模地震時における橋桁の支点部からの浮上りがどのような条件で生じるかを把握するため、2質点モデルによる時刻歴応答解析を行った。解析モデルは、図2に示すとおり、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。また、解析パラメータは表1に示す上部工の構造諸元や下部工の剛性等とした。モーメント照査法では地震時の構造物の動的応答特性や、地盤、下部工の特性が考慮されておらず、今回の解析モデルを用いることにより精緻な評価が可能と考えられる。

橋脚及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、降伏及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ゼロとなるようなギャップ型モデルを用いた。

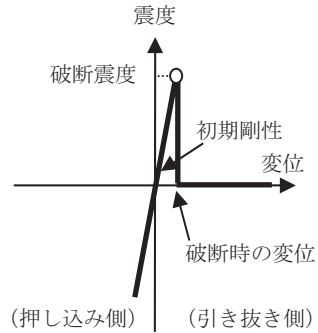
浮上り防止工の初期剛性については、鋼製支承の浮上り止め（ピンチプレート）の曲げ剛性やゴム支承の圧縮ばね定数等を参考に4ケース設定した。また、浮上り防止工の破断震度とは、浮上り防止工の破断荷重を桁や列車の総重量で除した値であり詳細は後述する。減衰については、本モデルでは1次モードが卓越するためモード比例減衰とし、部材粘性減衰として橋脚及び支承には減衰定数1%、地盤・基礎には10%を設定した。なお、2次

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L2地震動（スペクトルⅡ）で、耐震設計標準によるG0～G5地盤用の設計地表面地震動を用い、橋軸直角方向のみに入力した。解析ケースの総数は、表1の組合せで約6000ケースである。

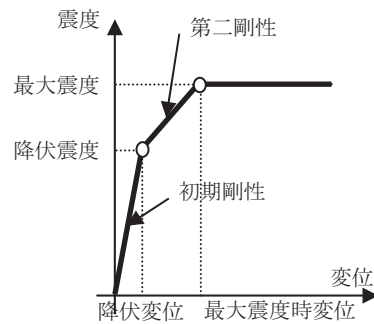
3.2 解析結果

2質点モデルの解析結果を図4、図5に示す。図4、図5は横軸が橋脚の最大応答震度（解析による橋脚の最大作用力を自重で除して算定）と、縦軸は浮上り防止工の破断震度の関係を示している。図4は4ケースある上部工のうちA～Cの3ケースの結果を示し、図5は上部工ケースBに着目し、浮上り防止工の初期剛性別に整理したものである。なお、図中のマーク○（赤色）は解析において桁が支点部から浮上らなかったケースを、×（青色）は浮上ったケースを表す。浮上りの有無の判定は、解析結果の浮上り防止工ばねの最大荷重が、図3（a）に示す破断震度以下かどうかにより判定した。

各グラフの実線は、後述するモーメント照査法によるモーメントの釣合いから算定される浮上りの限界線を示している。上部工ケースに着目した図4では、 H_u/B （桁の重心高 H_u と支承間隔 B の比）が1.0以上となるケースB,Cにおいて橋脚の最大応答震度が大きく、浮上り防止

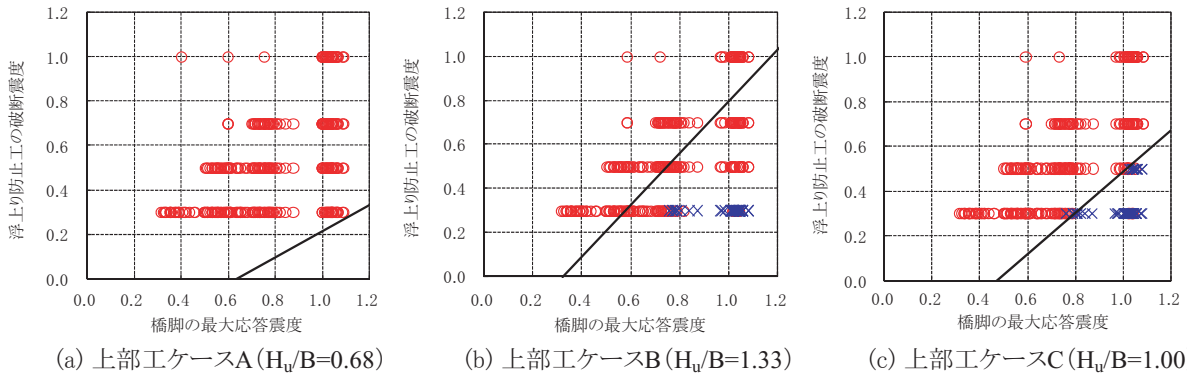


(a) 浮上り防止工の非線形特性(ギャップ型)



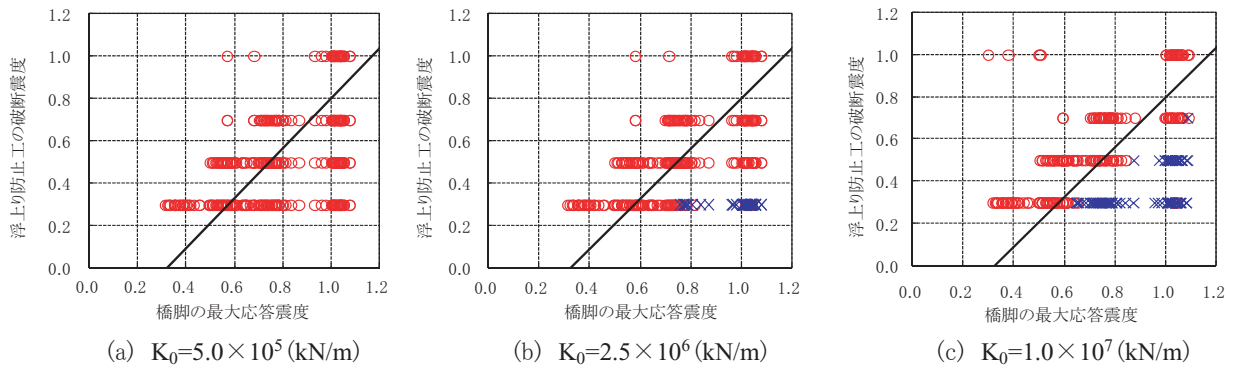
(b) 橋脚の非線形特性(トリニア型)

図3 橋脚及び浮上り防止工の非線形特性



※凡例…○：支点部から浮上らないケース，×：浮上るケース，—— モーメント照査法による境界線

図4 上部工ケース毎に着目した場合（浮上り防止工の初期剛性 $K_0=2.5 \times 10^6$ (kN/m)）



※凡例…○：支点部から浮上らないケース，×：浮上るケース，—— モーメント照査法による境界線

図5 浮上り防止工の初期剛性 K_0 に着目した場合（上部工ケース B）

表2 橋桁を考慮した簡易モデルの解析におけるパラメータ

		パラメータ			
上部工		重量 W_u+W_L	桁の重心高 H_u	支承間隔 B	想定構造
		ケース D	10,000(kN)	4.0(m)	3.0(m)
橋脚	降伏震度	0.6, 線形の2 ケース			
	固有周期	0.5, 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			

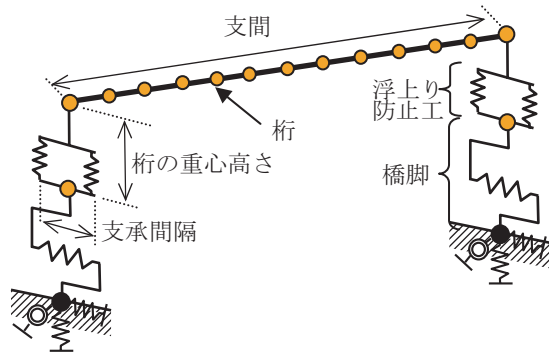


図6 橋桁を考慮した解析モデルの概要

工の破断震度が小さい場合に浮上りが生じやすい。反対に、桁の重量が軽く、 H_u/B が1.0以下の上部工ケースAでは浮上りは生じにくい傾向を示した。また、図5より浮上り防止工の初期剛性が大きい方が橋桁は浮上りを生じやすいと言える。これは、浮上り防止工の初期剛性が大きいと最大応答加速度が大きくなるケースが多いことが理由と考えられる。これらのことから、地震時に橋桁が支点部から浮上りを生じやすい条件は桁の重量が重く、桁の重心高と支承間隔の比 H_u/B が1.0以上、かつ浮上り防止工の初期剛性が大きい場合であると言える。なお、本結果では表1に示す橋脚の固有周期毎について傾向は見られなかったため、図4、図5においてこの区分の表記は省略した。

3.3 モーメント照査法との比較

図4、図5に示した実線は、式(1)の照査式を用いてモーメントの釣合いから算定される浮上りの限界線である。縦軸は、構造物の諸元等をもとに算定した浮上り防止工の破断震度 K_{vs} とした。横軸はモーメントの釣り合いから算定される上部工の水平震度 K_{dh} であるが、設計では上部工の水平震度は橋脚の最大応答震度を用いることから、図4、図5は橋脚の最大応答震度として示している。これらは、以下の式(4),(5)を用いて各々算定した。

$$K_{dh} = \frac{M_{rd} - (W_L \cdot K_{Lh} \cdot H_L)}{W_u \cdot H_u} \quad (4)$$

$$K_{vs} = \frac{V_{sd}}{W_u + W_L} \quad (5)$$

なお、式(4),(5)の各記号は式(1)~(3)と同一である。式(4),(5)における列車荷重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

した。また、抵抗モーメントの算定においては安全側の評価となるよう列車荷重は考慮していない。図4、図5において、限界線よりも上側の領域はモーメント照査法で支点部に浮上りが生じない。また、下側の領域は浮上りが生じると判断することができる。モーメント照査法と2質点モデルによる時刻歴応答解析結果を比較すると、浮上りの限界線と時刻歴応答解析結果の浮上りの境界(図において○と×の境界)に相違が見られる。モーメント照査法による限界線の下側の領域に着目すると、2質点モデル解析結果では浮上らないと判定されるものが数多く見られ、モーメント照査法は2質点モデルによる評価よりも安全側の評価となっていることが分かる。この傾向は、特に、浮上り防止工の初期剛性が小さい場合や、浮上り防止工の破断震度が大きくなるほど顕著に表れている。よって、2質点ばねマスモデルによる時刻歴応答解析は、浮上り防止工の初期剛性が小さい場合や、浮上り防止工の破断震度が大きい場合にモーメント照査法と比べてより合理的な評価が可能と考えられる。

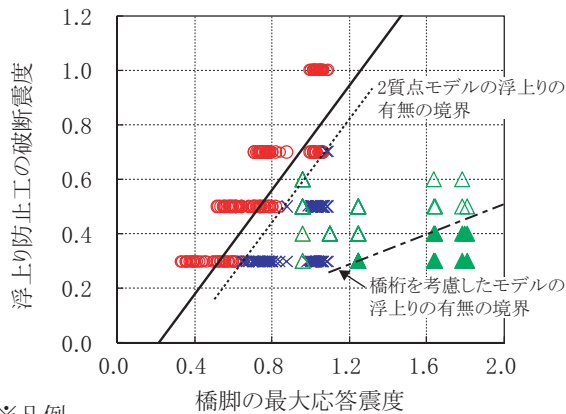
4. 橋桁を考慮した簡易解析モデルによる浮上りに対する検討

4.1 解析モデル及び解析パラメータ

ここでは、実際の単純桁の橋梁を対象として、橋桁を考慮した簡易解析モデルにより、支点部からの浮上りに対する検討を行った。解析モデルの概要を図6に示す。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。本解析では桁を線形部材として曲げ剛性、せん断剛性及びねじれ剛性を考慮した梁要素でモデル化した。実構造において桁は複数の橋脚上に支持されているため、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と考えられる。起点側及び終点側の橋脚のモデル化は図2と同様である。本解析における解析パラメータ等を表2に示す。本解析では、2質点モデルにおいて最も浮上りケースが多かった耐震設計標準のG3地盤用のL2地震動(スペクトルII)の設計地表面地震動を用い、橋軸直角方向に入力した。

4.2 解析結果

橋桁を考慮したモデルによる解析結果の一例を図7に



※凡例
 —：モーメント照査法による限界線
 [2質点モデル] [橋桁を考慮したモデル]
 ○：浮上らないケース, △：浮上らないケース
 ×：浮上るケース ▲：浮上るケース
 図7 橋桁を考慮したモデルの解析結果の一例

示す。2質点モデル及びモーメント照査法との比較を行うため、図7はモーメント照査法による限界線及び2質点モデル、本解析モデルの解析結果を併せて表記した。橋脚の最大応答震度1.0付近で浮上り防止工の破断震度が0.3~0.6の範囲に着目すると、モーメント照査法や2質点モデルでは橋桁が支点部から浮上る結果となっているが、橋桁を考慮した本解析モデルの結果ではいずれのケースでも浮上りは生じていない。これは、橋桁の水平曲げ変形やねじり変形により転倒方向の慣性力が低減し、支点部の浮上りへの負荷が軽減されたためと考えられる。また、橋桁を考慮した本モデルにおいても、浮上り防止工の破断震度が小さく橋脚の最大応答震度が大きい場合は浮上りが生じているが、浮上り防止工の破断震度が0.5以上であれば浮上りが生じることはほとんどないと考えられる。以上より、桁をモデル化して解析を行うことにより、モーメント照査法や2質点モデルに比べ、さらに合理的な評価が可能であると言える。なお、橋桁の重量が大きい場合は地震時の慣性力が大きくなり上記の傾向と異なることが想定されるため、適用にあたっては慎重な検討が必要と考えられる。

5. 橋桁の応答速度を用いた転倒に対する検討

5.1 橋桁の転倒に対する検討方法

これまでの検討は、橋桁の支点部からの浮上りに着目した検討であったが、ここでは橋桁が支点部から浮上った以降に転倒するかどうかといった終局状態の挙動に対する検討を行う。前述のような簡易解析では、桁の浮上りの挙動は把握できるものの、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、前述の2質点ばねマスモデルにおいて橋桁が支点部から浮上るケースを対象とし、剛体の転倒に対する評価法を参考に検討

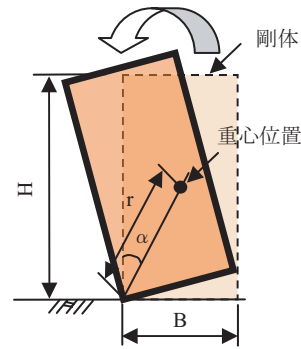


図8 転倒に対する考え方

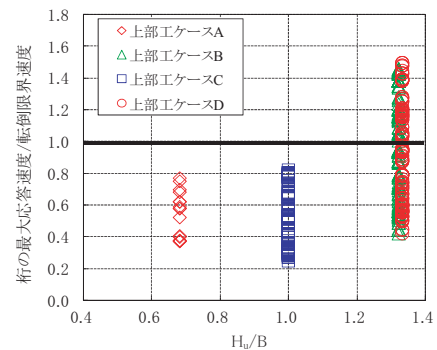


図9 橋桁の最大応答値と転倒限界速度の関係

を行うこととした。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 の算定式には式(6)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。式(6)の g は重力加速度を示し、その他の各記号は図8に示すとおりで、桁の外形の寸法をもとに定めた。

$$v \geq 0.4 \sqrt{\frac{8}{3} g \cdot r \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}} \quad (6)$$

式(6)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 v を転倒限界速度と定義する。つまり、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。剛体を対象とした式(6)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と考えられるが、本検討では橋桁の転倒に対するおおよその傾向をつかむことを主眼としたため、適用できるものと仮定して検討を行った。

5.2 橋桁の転倒に対する検討結果

図9に浮上り後(浮上り防止工の破断以降)の桁の重心位置での最大応答速度と転倒限界速度 v の比較結果を示す。上部工ケースA、Cについては、いずれも最大応答速度と転倒限界速度の比が1.0を下回っていることから最大応答速度が転倒限界速度を以下であり橋桁は転倒に至る可能性は低いと考えられる。一方、上部工ケースB及びDでは1.0を上回るケースも見られた。転倒限界

特集：鋼・合成構造物の設計技術

速度 v を超えたケースは、構造物の等価固有周期が 1.0sec 以上で橋脚の最大応答震度が大きい場合かつ浮上り防止工の破断震度が小さく、初期剛性が大きいケース等であった。実構造物においては、橋軸直角方向の固有周期が 1.0sec を超える構造物は軟弱地盤上や高橋脚を除くと実構造物で想定されるケースでは少ない。そのため、本検討結果より、多くの実構造物において、大規模地震時に橋桁が支点部から浮上った後、転倒に至る可能性は低いと考えられる。

6. 橋桁の地震時の転倒に対する照査法

本検討結果を踏まえ、橋桁の地震時の転倒について図 10 に示すフローにより照査が可能であると考えられる。照査手順の考え方は、“橋桁の浮上りに対する照査”を行い、これを満足しない場合は“橋桁の転倒に対する照査”を行う 2 段階の照査である。一般的な構造物の場合には、従来通り、モーメント照査法により“橋桁の浮上りに対する照査”を行う。モーメント照査法を満足できない場合には、この照査では地震時の構造物の動的応答特性や、地盤、下部工の特性が考慮されていないため、“2 質点モデルを用いた照査”や“橋桁を考慮した解析モデルを用いた照査”を行うことでより合理的な評価が可能である。これらの照査を満足しない場合には、“橋桁の転倒に対する照査”³⁾を行う。

なお、本検討における橋桁の転倒に対する検討は、前述したとおり、剛体の転倒に対する評価法を参考に検討を行ったものであり、1 つの便法を参考として示している。今後実験や解析による更なる検討が必要であり、この適用性については十分検討する必要がある。

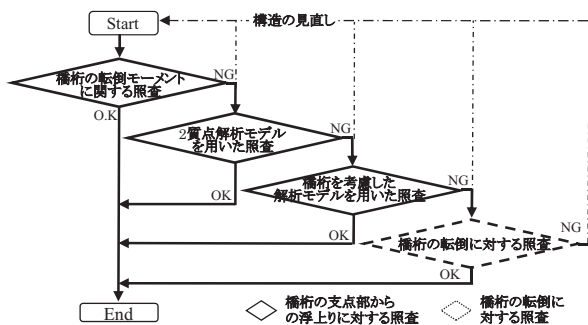


図 10 橋桁の地震時の転倒に対する照査フロー

7. まとめ

本研究では、近年の地震時作用力の増大を背景に、橋桁の転倒に関して簡易解析モデルを用いた時刻歴応答解析を行うことで、従来のモーメント照査法よりも合理的な評価法を提案した。本検討で得られた結果をまとめて

以下に示す。

- (1) 支点部から橋桁が浮上りを生じやすい傾向として以下の条件を確認した。
 - ・浮上り防止工の初期剛性が大きい場合
 - ・橋脚の応答震度が大きく、浮上り防止工の破断震度が小さい場合
 - ・重心高さが高く支承間隔が小さい橋桁の場合
- (2) モーメント照査法は本検討における時刻歴応答解析結果と比較して、ほぼ同様の結果を与える。また、浮上り防止工の破断震度が大きい場合や初期剛性が比較的小さい場合には安全側に評価される。
- (3) 2 質点ばねマスモデルや、橋桁を考慮した簡易解析モデルを用いた時刻歴応答解析による支点部からの浮上りに対する照査の有効性を明らかにした。
- (4) 桁の最大応答速度を用いた転倒に対する検討を行い、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ことを確認した。

以上より、本検討で示した時刻歴応答解析による照査は、上部構造のみでなく下部構造の特性や支点部の浮上りに対する剛性も考慮可能であり、従来の橋桁のモーメントの釣合いによる照査法に比べ、より精度が高い照査が可能であると考えられる。

謝辞

本検討は、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」の一環として行ったものである。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。

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) 池田学，中原正人，北健志，永井紘作，豊岡亮洋：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，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2008.1
- 4) 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，pp.13-16,1986,12
- 5) 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