

# 鋼・合成構造物の桁の転倒および浮上りに対する 構造安全性の照査方法と設計への効果

三宅 温\* 小林 裕介\* 池田 学\*\*

Method for Verifying Structural Safety of Steel/Composite Girder  
against Overturning and Lifting and Its Effect on Design

Nodoka MIYAKE Yusuke KOBAYASHI Manabu IKEDA

In the design of railway steel girders, it is necessary to prevent overturning and lifting of the girder against possible forces acting on the girder. This paper outlines a verification method against the two limit states of girder overturning and girder lifting, and describes a revised method of calculating the lifting force that takes into account the vibration characteristics of the girder. A trial design of the bearing parts was also carried out using the revised calculation method. The result confirmed that the revised calculation made some parts of the bearing smaller.

キーワード：桁の転倒，桁の浮上り，支承部，浮上り防止工，上揚力

## 1. はじめに

鋼橋や合成桁の設計では、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）に準拠し、安全性・使用性・復旧性の各要求性能について対象構造物の限界状態を設定し、それに対応する性能項目の照査を行う。安全性の性能項目の一つである構造安全性は、耐荷能力および安定を保持できなくなる状態を限界状態とし、各部位・部材に対する破壊、疲労破壊、桁の転倒・浮上り等に対し照査を行う必要がある。

桁の転倒・浮上りに対する照査方法を表1に示す。桁の転倒は、橋軸直角方向に生じる風や地震の影響等の水平作用によって、桁が転倒する状態を指す。桁の浮上りは、鉛直地震動等の鉛直上向きの作用により、桁が浮き上がった状態を指す。これらの限界状態に対する照査は、対象とする外力が異なるものの、どちらも支承部において桁が支承から浮き上がる状態（表1の青点線で示す現象で、以下、支承部の浮上り）を限界状態とする。そのため設計応答値の算定方法に違いはあるものの、同一の設計限界値に対し同様の照査を行うこととしている。

今回の鋼・合成標準改訂<sup>1)</sup>では、桁の転倒・浮上りに対する照査の内容を大きく2点変更した。1点目は、限界状態の考え方である。従来は、実用上、桁の下端が支承から離れる、支承部の浮上りを限界状態としていた。しかし仮にこのような状態となっても、桁が支承から逸脱せず元の支承位置に戻ることができれば、必ずしも桁

が不安定になるとは限らない。そのため、今回新たに支承からの逸脱（以下、支承部の逸脱）を限界状態に加え、照査方法を整理した。ただし、ここで言う「支承部の浮上り」とは、照査項目の名称ではなく現象そのものを指すことに留意されたい。

2点目は、桁の浮上りに対する照査に用いる設計応答値の算定方法である。地震時における桁の浮上りに対する照査では、設計応答値として鉛直地震動が桁に与える上向きの慣性力を考慮するが、従来の照査では安全側に割り切った一定値を慣性力に用いていた。しかし、慣性力は桁の鉛直方向のたわみの固有周期により変動することから、桁の応答特性を考慮し設定できるよう変更した。

本稿では、桁の転倒・浮上りに対する照査の概要および改訂内容、今回の改訂による実設計への効果を示す。なお、桁の転倒・浮上りに対する照査は、構造要素である桁の安定に関するものであり、照査の基本的な事項は鋼・合成標準 第Ⅱ編 橋りょう<sup>1)</sup>による。ただし、鋼・合成構造の桁はコンクリート構造と比べて重量が軽く、転倒・浮上りが問題になりやすいという実情から、鋼・合成構造特有の事項であるとして具体的照査は鋼・合成標準 第Ⅲ編 鋼・合成構造<sup>1)</sup>（以下、鋼・合成構造編）に示している。また、鉛直地震動により支承部に作用する鉛直力や、支承部の各限界値の算定等は、鋼・合成標準 第Ⅳ編 支承構造<sup>1)</sup>に示している。

## 2. 桁の転倒・浮上りに対する照査方法

支承部の浮上りと支承部の逸脱の2つを限界状態とした照査は、それぞれ2.1節、2.2節による。

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

表1 桁の転倒・浮上りに対する照査方法

	桁の転倒に対する照査	桁の浮上りに対する照査
限界状態 (共通)	限界状態①：支承部の浮上り 桁下端が支承から離れた状態  追加 限界状態② 支承部の逸脱 重なり長が0になった状態	
応答値	地震作用：水平方向を考慮 	地震作用：鉛直方向を考慮 

### 2.1 支承部の浮上りを限界状態とした照査

支承部の浮上りを限界状態とした照査は、力を指標とした照査であり、鋼・合成構造編の条文には静的な構造計算による照査方法を示している。桁の転倒に対する照査では応答値として水平力により生じるモーメントを、桁の浮上りに対する照査では鉛直力を用いて照査する。

桁の転倒に対する照査は、桁の底面端部を回転中心としたモーメントにより、支承部が浮き上がらないことを確認する。照査は式(1)による。

$$\gamma_i \cdot M_{td} / M_{otd} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここで、 $M_{td}$ ：設計転倒モーメント

$M_{otd}$ ：設計抵抗モーメント

$\gamma_i$ ：構造物係数で、一般に地震の影響以外の作用に対する照査は1.05、地震の影響に対する照査は1.0とする

設計限界値にあたる設計抵抗モーメント  $M_{otd}$  は、桁の底面端部における転倒に対する抵抗モーメント  $M_{ot}$  を限界値係数  $\gamma_L$  で除すことにより求まる。

$$M_{otd} = M_{ot} / \gamma_L \quad (2)$$

$M_{ot}$  は、具体的には図1に示すように、常時、地震時に関わらず、死荷重、列車荷重およびピンチプレートなどの浮上り防止工の耐力分を必要に応じて考慮する。

桁の浮上りに対する照査は、支承部に生じる上揚力により、支承部の浮上りが生じないことを確認することにより行う。照査は式(3)による。

$$\gamma_i \cdot R_{sd} / R_{rd} \leq 1.0 \quad (3)$$

ここで、 $R_{sd}$ ：桁の浮上りに対する照査に用いる設計支点反力（上揚力）

$R_{rd}$ ：上揚力に抵抗できる構造の設計耐力

$\gamma_i$ ：構造物係数で、一般に地震の影響以外の作用に対する照査は1.05、地震の影響に対する照査は1.0とする

設計限界値にあたる、上揚力に抵抗できる構造の設計耐力  $R_{rd}$  は、上揚力に抵抗できる構造の耐力  $R_r$  を限界値係数  $\gamma_L$  で除すことにより求まる。

$$R_{rd} = R_r / \gamma_L \quad (4)$$

$R_r$  は図2に示すように、上揚力に抵抗できる浮上り防止工等の耐力であり、構造に応じて算定する。ピンチプレートやアンカーボルトなどの上揚力に抵抗できる構造がある場合には、その耐力を用いることができる。なお、後述するように、桁の浮上りに対する照査は設計応答値の算定時に上向き反力から死荷重を差し引くため、設計限界値では死荷重による抵抗分を考慮しない。

### 2.2 支承部の逸脱を限界状態とした照査

支承部の逸脱に対する照査は、今回の改訂により追加した照査方法である。桁が支承から浮き上がっても表1の重なり長を確保できていれば逸脱せずに元に戻るため、照査方法は、浮上り量が支承部の重なり長以下となることを確認する。2.1節に示す方法は比較的簡易な方法であるが、大規模地震等において支承部の応答値が大きくなり、浮上り防止工が著しく大型化する場合がある。

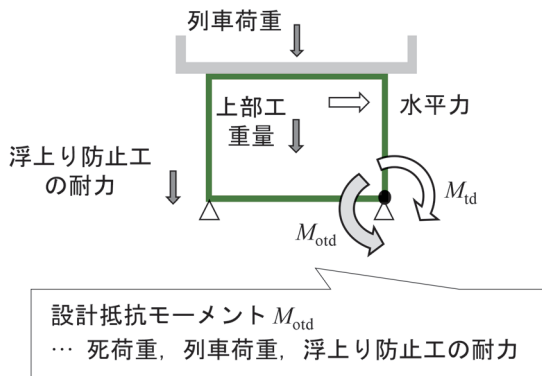


図1 転倒に抵抗する力

そのような場合には、浮上りを許容あるいは浮上り防止工の塑性化を許容し、支承部の逸脱を限界状態とすることで、支承を経済的に設計することができる場合もある。

### 3. 設計応答値の算定方法および改訂内容

設計地震動に対する設計応答値の算定は、構造物の動力学特性を適切に表現できる動的解析法によるのが基本である。ただし、支承部の設計では静的な地震作用を設定し、静的解析法により行ってきた。そのため、本稿においても鋼・合成構造編の条文に示している、力を指標として簡易に照査する場合の設計応答値の算定方法を示す。なお、鋼・合成構造編には、動的解析法による照査の具体的な方法を示している（付属資料Ⅱ 6-7）。

#### 3.1 桁の転倒に対する照査

桁の転倒に対する照査に用いる設計応答値は、桁を転倒させる作用として生じる水平力を桁の底面端部に生じる設計転倒モーメント  $M_{td}$  に変換し算定する。

$$M_{td} = \gamma_R \cdot M_t \quad (5)$$

ここで、 $M_t$  は桁の底面端部における転倒モーメント、 $\gamma_R$  は応答値係数である。

##### a) 常時

常時における照査では、基本的に遠心荷重と風荷重から転倒モーメントを算定する。その他にも、桁の片側に設置された橋側歩道がある場合には、遠心荷重との競合や雪荷重を考慮する等、構造に応じたモーメントを必要に応じて加算する。

##### b) 地震時

地震時における照査では、橋軸直角方向の水平地震動による桁の地震時慣性力から転倒モーメントを算定する。列車荷重を考慮する場合は、列車荷重の地震時慣性力も見込む。通常の桁の場合は水平方向のみ地震動を考慮し、鉛直の地震動を組み合わせる必要はない。

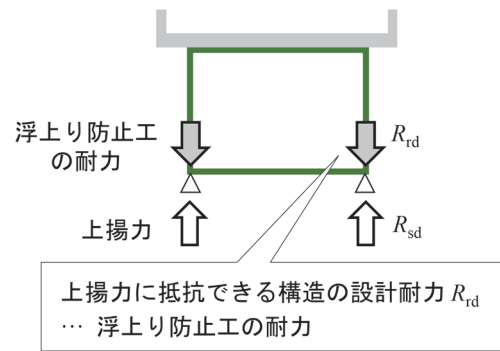


図2 浮上りに抵抗する力

a), b) で考慮している作用の他に、桁への水平方向の力としては車両横荷重や車輪横圧荷重もあるが、各車軸による水平力が他と同時に作用することはほぼなく、作用方向が逆のものもあって打ち消しあう傾向にあると考えられるため、風荷重や地震の影響に対して照査していれば、原則として考慮する必要はない。

なお、a), b) および図1からわかるように、桁の転倒に対する照査においては、設計応答値、設計限界値の両方に列車荷重の影響を含んでいるため、応答値と限界値への寄与の程度によっては、列車荷重が小さいもしくは非載荷の状態を想定した方が照査が厳しくなる場合がある。そのため、桁の転倒に対する照査は常時および地震時に対し、それぞれ列車荷重を考慮する場合、考慮しない場合の両方の照査を行う必要がある。

#### 3.2 桁の浮上りに対する照査

桁の浮上りに対する照査に用いる設計応答値は、支点到に生じる設計反力  $R_{sd}$  を算定する。

$$R_{sd} = \gamma_R \cdot |R_s| \quad (6)$$

ここで、 $R_s$  は支点到に生じる負の反力であり、死荷重による正の支点到反力分を減じて算定してよい。

##### a) 常時

常時における照査では一般に、死荷重、列車荷重および衝撃荷重の負反力から、死荷重による正反力を差し引いて算定する（図3）。

$$R_s = \sum(\gamma_f \cdot R_s) = \gamma_{IL} \cdot R_{sL} + \gamma_{II} \cdot R_{sI} + \gamma_{ID} \left( R_{sD1} + \frac{R_{sD2}}{2} \right) < 0.0 \quad (7)$$

ここに、

$\gamma_{IL}$ ,  $\gamma_{II}$ ,  $\gamma_{ID}$  : 列車荷重、衝撃荷重および死荷重に対する作用係数

$R_{sL}$ ,  $R_{sI}$  : 列車荷重および衝撃荷重による支点到の反力（負値）で、支点到に上揚力を生じ

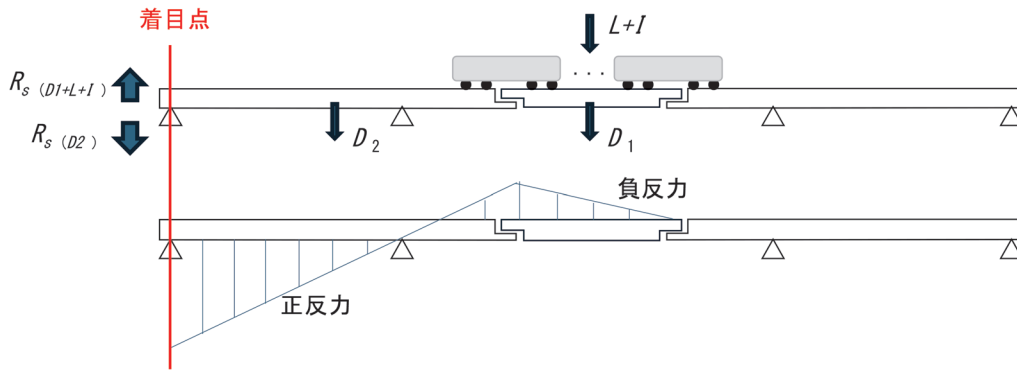


図3 負反力が生じる例

させる部分にそれぞれの荷重を載荷して算定する

$R_{sD1}$  : 死荷重による支点の負の反力(負値)で、支点上揚力を生じさせる範囲に死荷重を載荷して算定する

$R_{sD2}$  : 死荷重による支点の正の反力(正值)で、支点に下向きの力を生じさせる範囲に死荷重を載荷して算定する

このとき、 $R_s$  が 0、すなわち負反力が生じないことを確認できた場合は、常時においては照査を満たしているものとしてよい。

b) 地震時

地震時における照査の  $R_s$  は、鉛直地震動が桁に与える上向きの慣性力  $R_{sEQ}$  から死荷重による正反力  $R_{sD}$  を差し引いて算定する。この  $R_{sEQ}$  は、 $R_{sD}$  に鉛直方向の応答加速度  $\alpha$  を震度換算した鉛直震度  $K_v$  を乗じたものである。

$$R_s = R_{sEQ} - R_{sD} = K_v \cdot R_{sD} - R_{sD} = (K_v - 1) \cdot R_{sD} \quad (8)$$

ここに、

$R_{sEQ}$  : 地震動による支点の負の反力(負値)

$R_{sD}$  : 死荷重による支点の正の反力(正值)

$K_v$  : 鉛直震度

$$K_v = \alpha / (9.81 \cdot 100) \quad (9)$$

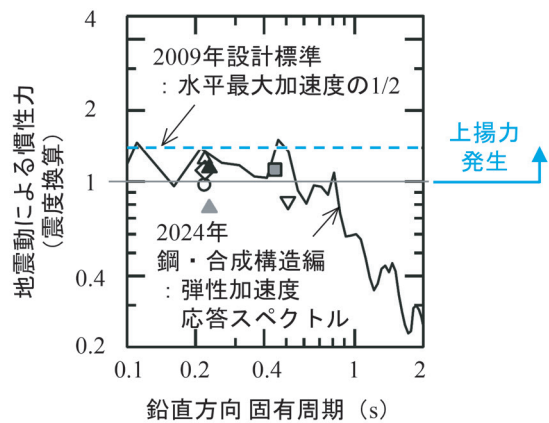
$\alpha$  : 鉛直方向の応答加速度 (gal)

今回の改訂では、上式の応答加速度  $\alpha$  の設定方法を変更した。応答加速度  $\alpha$  には、これまで「水平地震動による最大応答加速度の 0.5 倍」という安全側に割り切った値が多く用いられてきたが、「桁の鉛直方向固有周期に応じた G0 地盤の弾性加速度応答スペクトルの 0.5 倍」としてよいこととした。これにより、地震動に対する桁の応答特性を考慮して  $R_s$  を算定することが可能となる。

鉛直地震動が桁に与える上向きの慣性力  $R_{sEQ}$  について、改訂前後における違いを図 4 に示す。図 4 は桁の鉛直一次モードの固有周期  $T$  を横軸とし、G0 地盤における L2 地震動スペクトル II の 0.5 倍を設計地震動として与えた時の  $R_{sEQ}$  を示したものである。プロット種別は凡例のとおり、固有周期  $T$  の異なる 5 橋の鋼橋・合成桁である。プロットはいずれも入力した鉛直地震動の弾性加速度応答スペクトルより小さい値を示しており、これは上向きの慣性力が主に桁の鉛直方向の振動で生じているためと考えられる。したがって、鋼・合成構造編では式(8)のように、上向きの慣性力を桁の鉛直方向固有周期における弾性加速度応答スペクトルから求め、さらに自重分を差し引くことで上揚力とした。

破線で示す 2009 年鋼・合成標準<sup>2)</sup> の手法で求めた上向きの慣性力は、前述したように最大応答加速度の半分となる一定の値としている。一方で、実線で示す鋼・合成構造編の手法では、この破線より小さい値となっており、固有周期が大きい範囲、つまり長支間の橋りょうでは、

破線で示す 2009 年鋼・合成標準<sup>2)</sup> の手法で求めた上向きの慣性力は、前述したように最大応答加速度の半分となる一定の値としている。一方で、実線で示す鋼・合成構造編の手法では、この破線より小さい値となっており、固有周期が大きい範囲、つまり長支間の橋りょうでは、



凡例	---	2009年鋼・合成標準
	—	2024年鋼・合成構造編
	○	橋りょう1 (合成桁, 支間30.8m)
	▲▲	橋りょう2 (上路PG, 支間47.5m)
	■	橋りょう3 (合成桁, 支間43.5m)
	▽	橋りょう4 (合成桁, 支間68.0m)
	◇	橋りょう5 (H埋め, 支間17.4m)

図4 地震動による慣性力

地震動における上揚力が発生しない結果となっている。

以上より、改訂後の手法では、特に長支間の橋りょうにおいて経済的な設計に寄与するものと考えられる。

#### 4. 試算における効果の検証

3.2節で示した、桁の浮上りに対する照査に用いる設計応答値の算定方法を改訂したことによる効果について、支承部の構造寸法に着目し効果の検証を行った。

##### 4.1 試算条件

単純合成桁に対し、2009年鋼・合成標準および鋼・合成構造編に準拠して鉛直地震動による上揚力をそれぞれ算出し、支承寸法を比較した。対象とした合成桁の試算条件を以下に示す。

###### 試算条件

- 支間  $L$  : 55.3 m
- 固有周期  $T$  : 0.62 s
- 支承構造 : BP-A 支承

当試算では鉛直震度  $K_v$  を算定する際、図5に赤で示す包絡曲線を用いた。この包絡曲線は、図4の地震動の弾性加速度応答スペクトルをもとに設定したものである。固有周期 0.5s までは鉛直震度  $K_v$  を上限の一定値、固有周期 1.0s で  $K_v$  が1となるため、固有周期 0.5~1.0s は線形で低下する直線とした。固有周期 1.0s 以降は  $K_v$  が1より小さくなるため、実質は照査を省略できる領域である。なお、包絡曲線を用いたのは実構造物の固有周期  $T$  が設計と異なった場合に慣性力が危険側に変動する可能性があるため(図4)、安全側の照査となるよう配慮したことによる。

##### 4.2 試算結果および改訂による効果

当試算の条件下における改訂前後の設計反力を表2、支承の浮上り防止工の構造寸法を図6に示す。固有周期  $T$  が 0.62s の場合における鉛直震度  $K_v$  は、改訂前の設定方法では図4、図5における慣性力の最大値である 1.35 を固有周期  $T$  によらず一律用いる必要があったが、改訂後は 1.08 に減少した。これに比例して、鉛直地震

動が桁に与える上向きの慣性力  $R_{SEQ}$  および支点に生じる設計反力  $R_{sd}$  も減少したため、支承部の部材のうち上揚力により寸法が決まっていたものには寸法の縮小がみられた。図6より、アンカーボルトは径の縮小に伴って長さが半分になり、ピンチプレートは、幅が 70mm 減少、板厚が 5~6 割程度に減少した。以上より、浮上りに対する照査に用いる設計応答値の算定方法の改訂によって、上揚力により寸法が決まる支承部の部材寸法が縮小

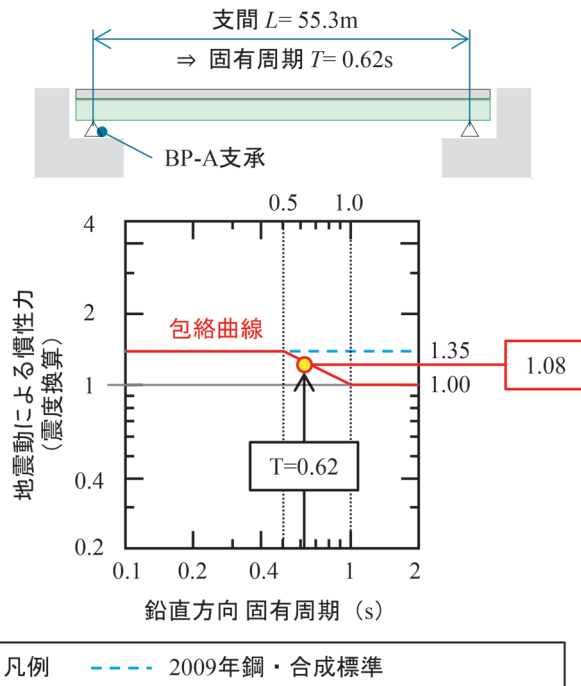


図5 慣性力算出に用いる包絡曲線

表2 改訂前後の支点に生じる設計反力 比較

	2009年 鋼・合成標準	2024年 鋼・合成構造編
固有周期 $T$ (s)	0.62	
鉛直震度 $K_v$	1.35	1.08
支点に生じる 設計反力 $R_{sd}$ (kN)	1283	293

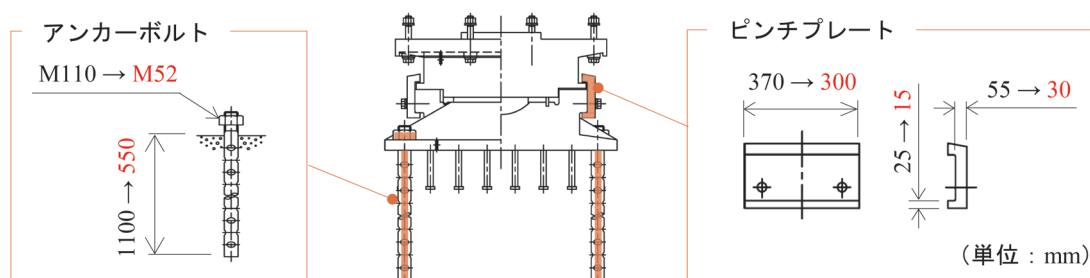


図6 改訂前後の支承部の部材寸法比較

されることを確認した。なお、前述のとおり、長支間の橋りょうでその効果はより大きくなると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、改訂された鋼・合成標準における、転倒・浮上りに対する照査の改訂内容と、実橋での試算により確認した実設計への効果を紹介した。今回新たに整理した、支承部の逸脱を限界状態とした照査方法、および地震時の桁の応答特性を考慮する設計応答値の算定方法は、いずれも支承部の経済的な設計に寄与するものである。今後、大規模地震を想定して設計される鉄道構造物に役立てていただけたら幸いである。

なお、これらの検討は国土交通省委託による鉄道の技術基準整備のための調査研究の一環として実施されたものである。

## 謝 辞

本稿の内容は、国土交通省からの委託を受けて設立された「鋼・合成構造物の設計に関する委員会」（委員長：奥井義昭埼玉大学教授）で審議していただいた。ここに記して委員・幹事の方々に謝意を表する。

## 文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，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），丸善出版，2024
- 2) 国土交通省鉄道局監修，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），丸善出版，2009