

鋼・合成構造物の設計に用いる衝撃係数の簡易算定式の適用条件

池田 学* 徳永 宗正* 小林 裕介**

Application Conditions of the Simplified Calculation Method for the Impact Factor of Steel and Composite Structures

Manabu IKEDA Munemasa TOKUNAGA Yusuke KOBAYASHI

The application conditions of the simplified calculation method for the impact factors of steel and composite structures were studied, with a view to relaxing some of them. As a result, it was reconfirmed that the current application conditions are reasonable. For simply supported composite girders, the impact factors calculated using the simplified calculation method were compared with those calculated through the standard calculation method for concrete structures. It was confirmed that the relative magnitudes of these calculated impact factors vary depending on the girder span, natural frequency and train speed.

キーワード：鋼・合成構造物，衝撃係数，剛性規制条件式，共振，固有振動数

1. はじめに

衝撃係数は、橋りょうの動的な応力やたわみ等の応答の静的応答に対する増加割合と定義される。橋りょうの設計は、一般に静的解析が用いられるため動的応答を直接算定せずに、列車荷重による静的応答に設計衝撃係数（以下、衝撃係数という）を乗じて、動的応答に相当する応力やたわみを算定している^{1) 2)}。

2024年に改訂された「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²⁾）では、「第Ⅱ編 橋りょう」（以下、橋りょう編）に橋りょう共通の衝撃係数の算定式を、「第Ⅲ編 鋼・合成構造」（以下、鋼・合成構造編）に簡便な算定式を規定している。これらの算定式の概要を表1に示す。表1は、比較しやすいように、設計標準の表現を一部変更しており、記号も本稿に用いている記号に統一している。

橋りょう編の算定式（以下、橋りょう編式）は、コンクリート構造物の設計において一般に用いられている。鋼・合成構造編の算定式（以下、簡易算定式）は、従来^{例え^ば3)}から用いられている算定式で、橋りょう編式より簡便であるが、桁が共振することがない条件で適用されることを前提としている。そのため、表1に示す適用条件(a)~(c)がある。

設計実務において、表1の適用条件のうち条件(a)と(c)を満たすことが困難なケースが増加しているため、これを緩和できると簡易算定式の適用拡大が図れ、さらには桁剛性の低減、すなわち断面縮小による経済化も図れる可能性がある。

本稿では、まず橋りょう編式と簡易算定式の相違点を整理した。簡易算定式の適用条件(a)と(c)について、その根拠を整理するとともに、条件の緩和の可能性について検証した。さらに、橋りょう編式と簡易算定式の計算値を比較し、簡易算定式の適用性を確認した。なお、簡易算定式の適用条件(c)の式(6)は剛性規制条件式と言われており、本稿でもこの名称を用いる。

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

表1 橋りよう編と鋼・合成構造編の衝撃係数の算定法の概要

	橋りよう編 ¹⁾ (橋りよう編式)	鋼・合成構造編 ²⁾ (簡易算定式)
設計衝撃係数の算定法	$i = (1+i_a)(1+i_c) - 1 \quad (=i_a+i_c+i_a \cdot i_c) \quad (1)$ <p>i: 設計衝撃係数 i_a: 速度効果の衝撃係数で、速度パラメータ α、車両形式、車両長、部材のスパンを用いて、ノモグラム(動的シミュレーション結果)から算定する。 α: 速度パラメータで、次式により算定する。</p> $\alpha = \frac{v}{7.2f_b \cdot L_b} \quad (2)$ <p>v: 列車または車両の最高速度(km/h) f_b: 部材の基本固有振動数(Hz) L_b: 部材のスパン(m) i_c: 車両動揺の衝撃係数で、次式により算定する。</p> $i_c = \frac{10}{65+L_b} \quad (3)$	$i = K_a \cdot \alpha + \frac{10}{65+L_b} \quad (=i_a+i_c) \quad (4)$ <p>ただし、iは0.7を超えないものとする。 i: 設計衝撃係数 K_a: 係数で、在来鉄道では$K_a=2.0$、新幹線では$K_a=1.0$ α: 速度パラメータで、次式により算定する。</p> $\alpha = \frac{v}{7.2f_{bl} \cdot L_b} \quad (5)$ <p>v: 当該区間を走行する列車の最高速度(km/h) f_{bl}: 載荷時の部材の基本固有振動数(Hz) L_b: 部材に最大活荷重断面力を生じさせる同符号の影響線の基線の長さ(m)</p>
	適用条件	<p>以下の場合については、別途検討を行う必要がある。</p> <p>(a) 橋りようまたは部材の減衰定数が小さい場合 (b) 列車および車両の軸配置が付属資料5-3(鉄道橋の設計衝撃係数)¹⁾の解析条件と大きく異なる場合 (c) 斜張橋等の高次不静定構造物で、部材ごとに動的特性が異なり単純梁で近似するのが困難な場合</p>

2. 橋りよう編式と簡易算定式の相違

表1より、橋りよう編式と簡易算定式は、いずれも速度効果による影響と車両動揺による影響を組み合わせられており、後者は同じ算定式を用いているという共通点がある。一方、橋りよう編式と簡易算定式は、主に以下のような相違点がある。

- ・ 衝撃係数の上限：橋りよう編式は上限がないが、簡易算定式は0.7の上限値がある。
- ・ i_a の算定法：橋りよう編式はあらかじめ計算されたノモグラム等から算定するが、簡易算定式は速度パラメータ α の一次式から算定する。
- ・ $i_a \cdot i_c$ の項：橋りよう編式は考慮するが、簡易算定式は考慮しない。
- ・ 適用条件：橋りよう編式は特殊な構造物以外は適用でき汎用性は高いが、簡易算定式は列車速度や剛性等に関して適用範囲が限定されている。

これらの違いは、橋りよう編式は共振域まで考慮した算定法であるのに対し、簡易算定式は共振しないことを前提としているため生じている。なお、橋りよう編式と簡易算定式で速度パラメータ α の算定式における固有振動数の記号が異なるが、橋りよう編式では構造物の質量のみで算定される固有振動数であるのに対し、簡易算定式では列車の質量を付加した条件で算定される固有振動数であるためである。

簡易算定式の適用条件(b)の取り扱い、5.1節において後述する。

3. 列車速度の上限

簡易算定式(式(4)) (表1)において、速度効果による影響である右辺第1項(i_a)に着目し、列車速度との関係を確認する。スパン10~90mの単純桁について、列車速度をパラメータに、速度300km/hを超える領域までシミュレーションを行った結果と簡易算定式の比較を図1に示す。図1は、速度パラメータ α

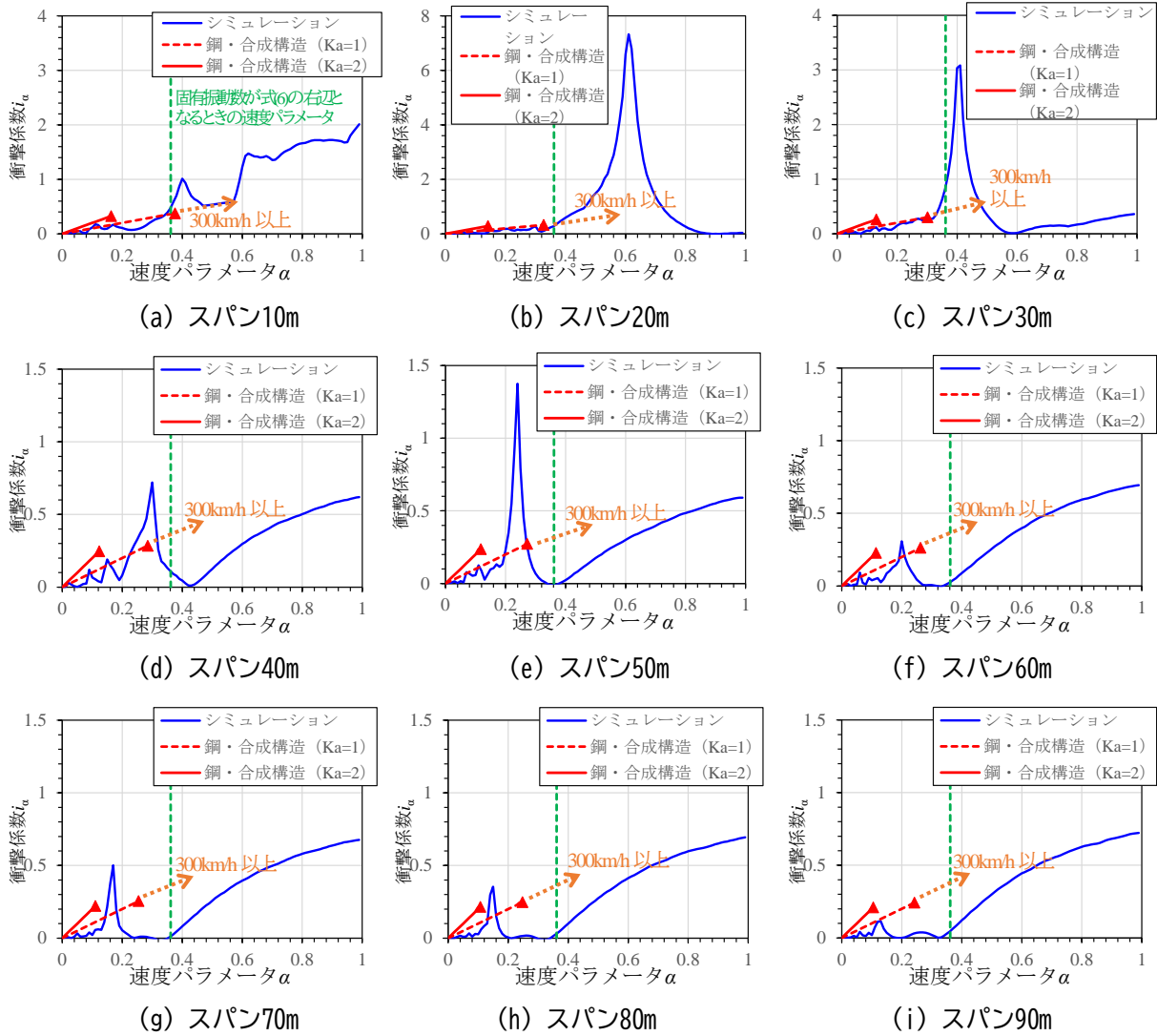


図1 単純桁の衝撃係数（速度効果による衝撃係数 i_a ）の比較

と衝撃係数 i_a の関係を示している。

シミュレーションでは、1自由度系の単純支持梁上を車両16両の車軸配置の連行荷重列が等速で移動する時の梁の動的応答を計算し、動的応答倍率を求めており、橋りょう編式の i_a の計算と同じ条件における結果である¹⁾⁴⁾。シミュレーションの結果は図1の青線で、簡易算定式の結果は、図1の赤実線が在来鉄道 ($K_a=2.0$)、赤破線が新幹線 ($K_a=1.0$) の場合を示している。▲は新幹線では速度の上限である300km/h時点を示し、在来鉄道では速度130km/h時点を示している。また、簡易算定式により新幹線について速度300km/hを超える領域まで外挿した場合のイメージを、橙破線の矢印で記入している。なお、簡易算定式における荷重時の固有振動数 f_{bL} は、設計実務で一般的である $f_{bL}=70L_b^{-0.8}$ により計算している。

図1のシミュレーション結果より、いずれのスパンにおいても、衝撃係数 i_a がピークとなる速度パラメータ α が存在し、そのときの i_a の値はスパンにより大きく変わる。また、衝撃係数 i_a がピークとなる速度パラメータ α はスパンの増加と共に小さくなっている。このピークは共振によるもので、車両走行に伴う加振振動数が桁の鉛直一次固有振動数に一致する場合に発生する。

簡易算定式の新幹線 ($K_a=1.0$) の場合の衝撃係数 i_a は、速度パラメータ α が小さい領域ではシミュレーションとほぼ一致している。新幹線の速度300km/h時点（図1の▲）に着目すると、スパン30m以下の桁では共振領域の手前である。スパン30m以下の桁ではシミュレーションの i_a のピークは共振すると大きく

なるが、速度 300km/h 以下ではその共振域には入らない。速度 300km/h を超える領域まで外挿すると、動的応答が急増する共振領域に入る。スパン 40m、50m の桁では、速度 300km/h のときは、共振領域あるいはそれをわずかに超えた領域にある。スパン 60m 以上の桁は、速度 300km/h のときは共振領域を超えているものの、シミュレーションにより得られる i_a のピーク値は小さく、簡易算定式の計算値との差異は小さい。

これらの結果より、簡易算定式の適用条件(a) (表 1) については、速度 300km/h 以上では、特にスパン 30m 以下の桁で衝撃係数 i_a が 3.0 を超えるような動的応答が急増する領域に入るため、300km/h より高速域への緩和は難しい。一方、スパン 40m を超える桁では速度 300km/h 未満でも共振域に入るが、スパン 30m 以下の桁と比較して動的応答は小さく、実橋においても共振により桁に問題が生じている事例は確認されていないことより、速度の上限を 300km/h 未満に低減する必要はないと考えられる。このため、従来通り、簡易算定式の適用条件は速度 300km/h 以下とするのがよいと考えられる。

4. 剛性規制条件式

4.1 剛性規制条件式の根拠

表 1 の式(6)の剛性規制条件式は、以下に根拠を示すように、固有振動数が従来の実績の下限以上であることを確認するものである。

式(6)の左辺は、等材質・等断面の単純梁の曲げ振動に関する固有振動数の算定式を意味している。この固有振動数は、列車荷重が載荷されていない状態の梁の固有振動数である。スパン L_b 、曲げ剛性 EI 、橋りょうのみの単位長あたり重量 w の固有振動数 f_b は、理論的に次式により算出される。

$$f_b = \frac{\pi}{2L_b^2} \sqrt{\frac{EIg}{w}} \quad (7)$$

また、等分布荷重 w を受ける単純支持梁の最大たわみ δ_d は、次式により算出される。

$$\delta_d = \frac{5wL_b^4}{384EI} \quad (8)$$

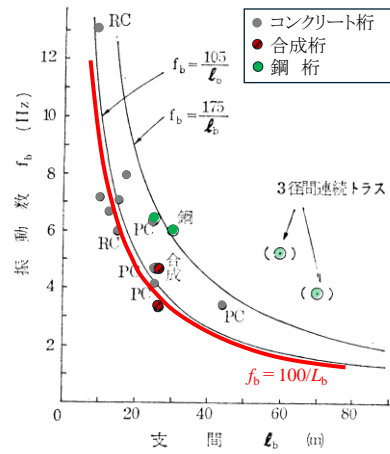
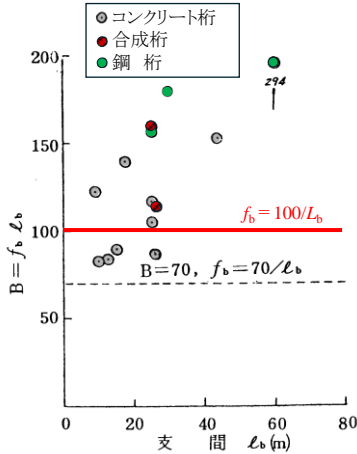
式(8)を変形して式(7)に代入し、 f_b について整理すると次式となる。

$$f_b = \sqrt{\frac{5\pi^2 g}{4 \times 384 \delta_d}} \quad (9)$$

右辺の√内の π と g に数値を代入して整理すると、式(6)の左辺が得られる。

一方、式(6)の右辺は実績に基づいて定められたものと思われるが、過去の設計標準^{例えは5)}等には明確に記載されていない。おそらく、1983年の建造物設計標準⁵⁾に新幹線荷重を導入するにあたり、文献6, 7に示されている、東海道新幹線および山陽新幹線の桁の基本固有振動数の実測値(図2)に基づいていると思われる。図2に $100/L_b$ を赤線で記入しているが、鋼橋や合成桁の下限相当となっており、経験的に既設の桁剛性の下限と同等以上となるように定めたと推察される。

なお、式(6)の右辺の数値 100 を低減できれば、剛性規制条件式の範囲が拡大できることになるため、適用上は有利な方向となる。ここでは、これを剛性規制条件式の緩和といい、次節以降に、式(6)の右辺を見直せるかどうかに着目して検討する。



(a) 桁のスパンと $B = f_b L_b$ の関係 ⁶⁾に加筆 (b) 桁のスパンと基本固有振動数の関係 ⁷⁾(図-4) に加筆

図2 桁のスパンと基本固有振動数(実測値)の関係

4.2 剛性規制条件式の根拠

桁の固有振動数 f_b は、一般に、スパンに関する経験式である次式により表現することができる。

$$f_b = c \cdot L_b^{-0.8} \tag{10}$$

ここで、 c : 係数, L_b : スパン

剛性規制条件式の式(6)の右辺と式(10)の固有振動数の関係を図3に示す。式(10)の係数 c は、実橋で想定される範囲である40, 50, 60, 70の4ケースとした。図3より、剛性規制条件式は、スパン10~20mでは固有振動数が概ね $60L_b^{-0.8}$ 以上、スパン20~40mでは概ね $50L_b^{-0.8}$ 以上、スパン40mを超えると $40L_b^{-0.8}$ 以上に相当することがわかる。

最近の整備新幹線の合成桁(スパン20~80m)の固有振動数は、連続合成桁も含まれるが、実測結果⁸⁾によると $55L_b^{-0.8}$ 程度が多い。これは、剛性規制条件式の右辺の $100/L_b$ に近く、剛性規制条件式を満足する限界に近い状態であるものが多いといえる。

4.3 桁の固有振動数による動的応答への影響

剛性規制条件式を緩和した場合の、桁の固有振動数 f_b による動的応答への影響に着目する。

図1には、桁の固有振動数 f_b が式(6)の右辺である $100/L_b$ のときの速度パラメータ a を、緑破線で示している。このときの列車速度は整備新幹線の一般的な最高速度である260km/hとしている。式(6)の右辺の数値100を低減、すなわち剛性規制条件式を緩和すると、これから計算される速度パラメータ a が大きくなるため緑破線は右側に移動し、特に共振時の動的応答が大きいスパン30m以下の桁では動的応答が急増する領域に入る。列車速度が260km/hより大きい場合には緑破線はさらに右側に移動することになる。そのため、共振を極力避けるためには、桁の固有振動数 f_b は、少なくとも式(6)の右辺より大きくする(緑破線の左側にする)必要があると考えられる。

4.4 乗り心地の限界値との関係

「鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)」⁹⁾には、走行安全性、乗り心地等の照査におけるたわみの限界値が示され、橋りょう編¹⁾²⁾に踏襲されている。ここでは、たわみの限界値と剛性規制条件式の関係について検討する。なお、乗り心地のたわみの限界値の方が常時の走行安全性の限界値より小さいため、

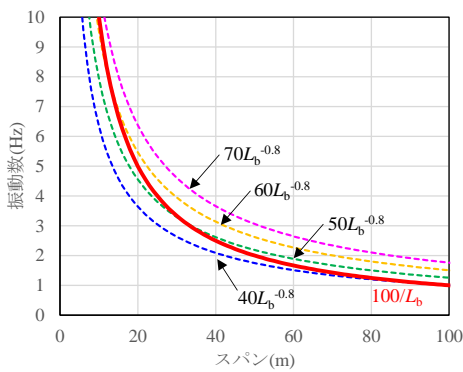


図3 桁の固有振動数と剛性規制条件式の関係

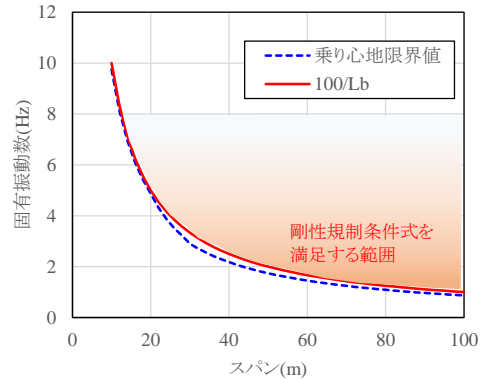


図4 乗り心地のたわみ限界値となる固有振動数と剛性規制条件式の比較 (列車速度 260km/h, 複数連)

ここでは乗り心地の限界値を用いる。

桁の固有振動数とたわみには相関があり、固有振動数が小さくなると、剛性が小さく、桁のたわみは大きくなる。そこで、桁のたわみが乗り心地の限界値^{1) 2) 9)}になるときの固有振動数を算出し、式(6)の右辺と比較する。

具体的には、スパンごとに、死活荷重比率（死荷重と列車荷重の比率）を設定し、活荷重による桁のたわみが乗り心地の限界値となるときの死荷重による桁のたわみを求め、これを式(6)の左辺に代入することにより固有振動数を求めることができる。これにより算定したスパン L_b と乗り心地のたわみ限界値となる固有振動数 f_b の関係を図4に青破線で示す。この固有振動数 f_b は、乗り心地を満足する最小の固有振動数である。なお、ここでは、乗り心地のたわみの限界値として、列車速度 260km/h で複数連の場合の限界値を用いた。また、死活荷重比率は、鋼橋や合成桁の実績から、やや低めの値として、スパン 30m で3、スパン 70m で7としてスパンに応じて線形関係を設定した。

図4には、桁の固有振動数が、剛性規制条件式の下限となる式(6)の右辺 ($100/L_b$) の場合も示している。図4より、乗り心地のたわみの限界値となるときの固有振動数は、式(6)の剛性規制条件式の下限とほぼ等しいことがわかる。このことから、剛性規制条件式を緩和すると、図4の赤線が青破線より下に移動するため、乗り心地の照査を満足しなくなる場合があることがわかる。

4.5 条件緩和の可能性のまとめ

式(6)の剛性規制条件式は、動的応答が急増する共振の回避、乗り心地の確保の観点から、緩和することは好ましくなく、むしろ限界に近いレベルに設定されていることが改めて確認された。スパンが大きい桁では式(6)を満たしていても共振域に入る場合もあるが、これまでの実橋の実績から考えると、剛性規制条件式の限界に近い状態で設計された橋りょうが多く存在するものの実務上の問題は発生していないことから、剛性規制条件式を厳しくすることまでは必要ないと考えられる。また本稿では割愛するが、剛性規制条件式を満たす場合は、式(4)の計算値は、速度 260km/h 以下において上限値である 0.7 より概ね小さくなることも別途確認している。

以上より、式(6)による剛性規制条件式は、緩和は難しく、むしろ必要な剛性を確保する観点から必要十分な条件であると考えられる。

5. 衝撃係数の算定式の適用区分と比較

5.1 衝撃係数の算定式の適用区分

橋りょう編式と簡易算定式の適用区分の概念を図5に示す。図5は、単純桁で電車・内燃動車荷重および新幹線の場合であり、表1の簡易算定式の適用条件(a)と(c)について、列車速度 v と桁の固有振動数 f_b の関係で示したものである。簡易算定式は、速度300km/h以下で、かつ所要の固有振動数以上となるような桁剛性が一定以上の場合が適用条件となる(図5の青色範囲)。

単純桁以外については、表1の条件(b)に当てはまらないため橋りょう編式を用いることになるが、トラス主構や床組の縦桁および横桁については単純支持梁ではないが、これまでの適用実績も多く問題がないため、鋼・合成標準²⁾では、これまでと同等の構造や諸元であれば簡易算定式を用いてよいこととしている。連続桁については、文献10, 11により精度の高い算定法が提案されている。

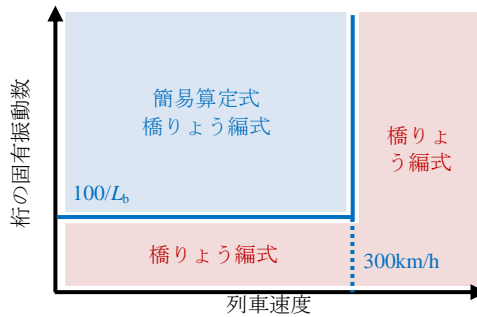


図5 衝撃係数の算定式の適用区分イメージ(単純桁)

5.2 簡易算定式と橋りょう編式の衝撃係数の比較

図6に、スパン30m, 50m, 70mの3ケースの単純合成桁について、簡易算定式と橋りょう編式による衝撃係数 i_a の計算結果の比較を示す。簡易算定式は、速度160km/h以下は在来鉄道、速度200~300km/hは新幹線として計算した。

図6の実線は、載荷時固有振動数 f_{bL} を鋼橋や合成桁の設計で実績の多い $70L_b^{-0.8}$ とした場合、すなわち桁剛性が比較的大きい場合を想定している。同図の破線は、桁の固有振動数 f_b を、剛性規制条件式(式(6))の下限である $100/L_b$ とした場合、すなわち桁剛性が下限に近い場合を想定している。

図6より、まず在来鉄道では、簡易算定式は橋りょう編式と同等または大きくなっている。新幹線では、簡易算定式は橋りょう編式より小さい傾向にある。これは、高速になるほど共振域に入る可能性が高く、共振を考慮して算出される橋りょう編式の方が大きくなるためである。桁剛性が大きい場合(図6の実線)

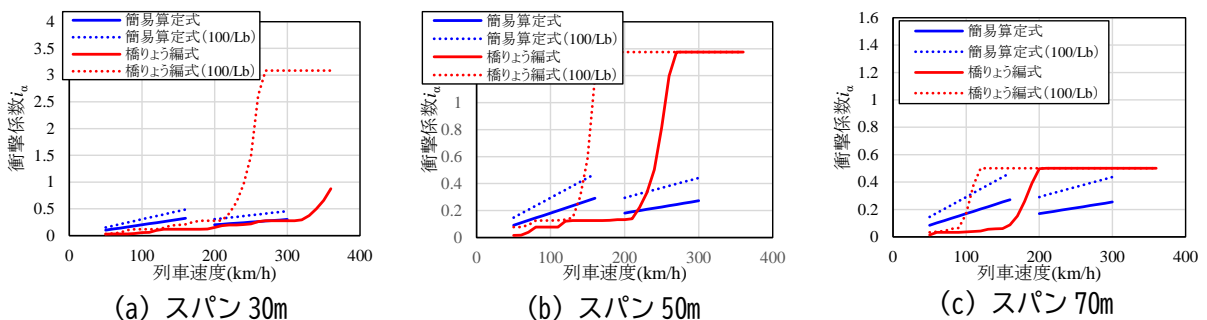


図6 簡易算定式と橋りょう編式の衝撃係数の比較

は、スパン 30m の桁では速度 300km/h まで共振域に入らないため、衝撃係数は両式でほぼ同じ値となっている。

簡易算定式の適用条件を満たす場合、橋りょう編式も適用できる（図 5）が、図 6 より両者の計算値は条件によって大小が変わり一定の傾向はなく、一概にどちらの算定法がよいか示すことは難しい。これまでの設計との連続性の観点からは、簡易算定式を適用できる場合はこれにより衝撃係数を算定するのがよいが、剛性規制条件式を満足していても高速走行時に共振する恐れがある場合は橋りょう編式を用いるのがよいと思われる。

6. おわりに

本稿では、鋼・合成標準における衝撃係数の簡易算定式の適用条件について、主に緩和の可能性の観点から検討した。その結果、この適用条件は妥当であることが再認識された。また、簡易算定式と橋りょう編式の適用条件を整理して示すとともに、単純合成桁を対象に両者による衝撃係数の計算値を比較したところ、差異には一定の傾向は認められず、条件によって大小の傾向が変わることが確認された。

鋼橋・合成桁の衝撃係数については、例えば、走行車両と構造物の連成応答の影響、レール継目による影響等いまだ明確になっていない部分も残されている。引き続き、これらの影響を考慮できる算定法の提案に向けて取り組む。

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します。

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（コンクリート構造物），丸善出版，2023
- 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，2024
- 3) 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
- 4) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，Vol.724，pp.83-102，2003
- 5) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説（鋼鉄道橋，鋼とコンクリートの合成鉄道橋），1983
- 6) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的応答に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1074，1978
- 7) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第 258 号，1976
- 8) Matsuoka, K., Tanaka, H., Kawasaki, K., Somaschini, C., & Collina, A.: Drive-by methodology to identify resonant bridges using track irregularity measured by high-speed trains, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 158, No. 107667, 2021.
- 9) 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（変位制限），丸善出版，2006
- 10) 徳永宗正，池田学：鉄道連続桁式橋りょうの列車通過時動的応答特性と簡易評価法，土木学会論文集，Vol.79, No.1, 22-00185, 2023
- 11) 徳永宗正，池田学：鉄道連続桁式橋りょうの列車通過時動的応答特性の解明および衝撃係数の簡易評価法，鉄道総研報告，Vol.39, No.2, pp.15-23, 2025