

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

徳永 宗正* 池田 学*

Dynamic Response Characteristics of Continuous Girder Bridge During Train Passage and a Simple Evaluation Method
for Impact Coefficient

Munemasa TOKUNAGA Manabu IKEDA

This study organized and generalized the structural specifications of general railway continuous girders and then carried out comprehensive dynamic response analysis of continuous girders during train passage. The impact coefficient of the deflection of the continuous girder shows multiple peaks at the resonant speed for each natural vibration mode. When the number of spans is odd, the 1st and 3rd modes are amplified at the resonant speed, and when the number of spans is even, the 2nd mode is amplified at the resonant speed. Based on clarified dynamic response characteristics of continuous girder, a simple evaluation method of the impact coefficient with the applicable range up to 400 km/h has been proposed, and its validity has been demonstrated.

キーワード：連続桁，新幹線，共振，動的応答，衝撃係数，簡易評価法

1. はじめに

鉄道連続桁式橋りょうは，高速道路，河川や港湾を跨ぐような箇所が多く採用されている構造形式である。高速鉄道の場合，連続桁の列車通過時の動的応答においては高次モードが複数発生し，その動的応答を推測するには動的応答解析を実施する必要がある。一方で，設計実務では動的応答倍率を衝撃係数に置き換えて，これを静的応答に掛け合わせることで動的応答を予測する方法が一般に用いられる。衝撃係数は列車通過時の動的応答解析等による詳細な検討により直接的に算出できる。技術の進歩等により動的応答解析を比較的容易に実施できる一方で，解析モデルの妥当性の検証や解析結果の解釈には，高度かつ専門的な見識が必要となる。設計過程において断面等の設定の更新の度に動的応答解析を繰り返し実施するのは，円滑な設計を進める上で現実的でなく，対象橋りょうが一般的な場合には，少数のパラメータから衝撃係数を簡易に算定する方法が用いられている。

鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）¹⁾（以下，「鋼合成標準」）では，速度パラメータの1次関数により衝撃係数を算定する方法（以下，「鋼標準法」）が記載されている。鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）²⁾（以下，「RC標準」）では連続桁のように単純な1次振動モードのみで応答を表現できないような場合には，原則として動的応答解析を実施することとしているが，実務的にはRC標準のノモグラムを拡張した方法³⁾（以下，「RC標準法」）が用いられる場合が多

い。近年の鉄道における高速化の要請により，国内の既設新幹線線区においても360km/hまでの高速化の検討が進められているが，既往の算定法は高速化した場合の適用が困難である。

連続桁の動的挙動に関する研究は古くから多くなされている^{4) 5)}が，多くが実在する数橋を対象とした動的応答解析もしくは実測結果に基づく検討であり，スパン長やスパン数，さらには列車速度等のパラメータ範囲は限定的であることから，一般的な検討とは言い難い。また，適用範囲に関する言及もなされておらず，260km/hまでを検討範囲とした宇野らの研究³⁾以外に連続桁の衝撃係数について体系化を試みた研究は過去に存在しない。

本研究では，高速領域を対象とした連続桁式橋りょうの衝撃係数の簡易算定法を提案することを目的として，はじめに2章では，鉄道橋りょうとして一般的な連続桁の構造諸元について整理，一般化するとともに，数値解析方法を示した。さらに，一般的な連続桁の構造諸元を想定して，3章では固有値解析，4章では動的応答解析を実施し，高速列車通過時の連続桁の動的応答の特徴について考察した。最後に5章において，列車通過時の連続桁の衝撃係数の簡易評価方法について検討した。なお本論文は文献⁶⁾の内容の一部を抜粋したものである。

2. 数値解析方法

本研究では，脱線前後の車両挙動を解析可能な，新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARS III⁷⁾を用いた検討を行った。

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

2.1 車両の力学モデル

列車は、車両系の振動による動的相互作用の影響について考慮した VBI (Vehicle Bridge Interaction) モデル、および移動する荷重列とした ML (Moving Load) モデルによりモデル化した。

図 1 に、VBI で用いた車両の力学モデルを示す。車両は、車体、台車枠、輪軸の各構成要素を剛体と仮定し、これら剛体をばね、ダンパで結合した三次元モデルとした。1 車両当たりの自由度は 31 である。また、実車では各構成要素間に過大な相対変位を抑制するストッパが設けられていることから、これを表現するために、接触時にはばねに高い剛性を与えることでストッパの挙動を表現した。なお、力学モデルの妥当性については、実物大車両模型を用いた検証実験や、汎用の機構解析プログラムとの比較・検証が既に実施されている⁸⁾。車両の入力諸元には、鉄道構造物等設計標準・同解説 (変位制限)⁹⁾ で用いた新幹線車両のものを用いた。列車は、この車両モデルを車端に設けた鉛直方向ばね及びダンパで任意両数連結して構成する。本検討では、営業時の一般的な車両編成を想定し、RC 標準と同様に 16 両編成とした。乗車率は空車を仮定し、静止軸重 110.7kN とした。

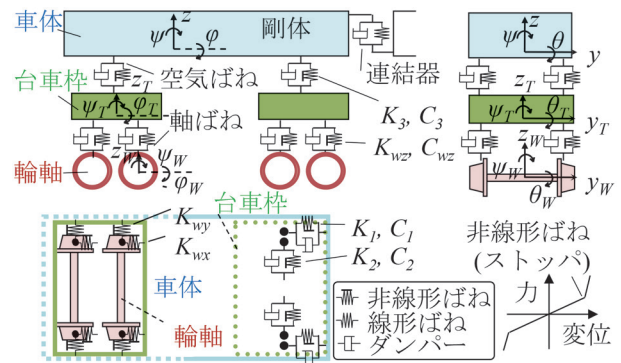


図 1 車両の力学モデル

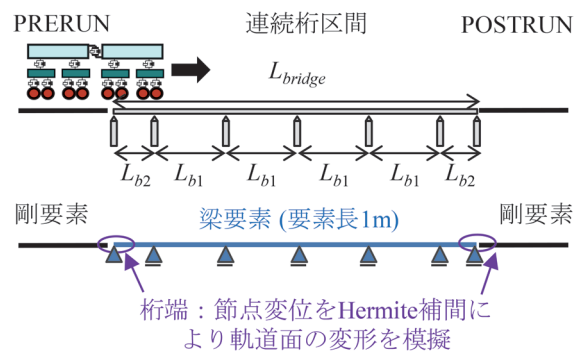


図 2 橋りょうの力学モデルの概念図

2.2 橋りょうの力学モデル

図 2 に、橋りょうの力学モデルの概念図を示す。橋りょうは、対象とする合成連続桁および PC 連続桁を要素長 1m の弾性梁要素によりモデル化した。連続桁の前後には列車の走行面 PRERUN, POSTRUN を剛要素によりモデル化した。連続桁と PRERUN および POSTRUN の境界部には、列車通過時の連続桁の変形に伴う鉛直折れ角が発生する。この折れ角による軌道面の変形は、境界部前後の節点変位から Hermite 補間により表現した⁷⁾。軌道種別はスラブ軌道を想定した。

連続桁の橋長 L_{bridge} は 2.3 節で後述するようにパラメータとして設定し、これに伴いスパン数 n_s を制御した。実橋りょうの統計調査によると、橋りょう内で中央径間 (両端部以外) のスパン長は概ね等しく、側径間 (両端部) のみ中央径間より若干短いスパン割の例が多かった。従って、スパン長は中央径間に対して L_{b1} 、側径間に対して L_{b2} として、スパン比 r_{Lb} ($=L_{b2}/L_{b1}$) をパラメータとすることにより制御した。

2.3 解析ケース

表 1 に、解析パラメータおよび解析ケースを示す。上下線で構造が対称であることから一方の走行のみとした。橋りょうに関するパラメータは、基準スパン長 L_{b1} 、スパン数 n_s 、スパン比 r_{Lb} とした。基準スパン長は各中央径間のスパン長である。側径間のスパン長は $L_{b2} = r_{Lb}L_{b1}$ とした。なお、 $n_s = 2$ の場合は $L_{b2} = L_{b1}$ である。

表 1 解析パラメータおよび解析ケース

パラメータ	記号	パラメータの設定
走行速度	V	50, 70, 90, 100, 105, 110, ... 5km/h interval ..., 570, 580, 590, 600 km/h
基準スパン長	L_{b1}	25, 38, 50, 63 m
スパン数	n_s	2, 3, 4, 5, 6
スパン比	r_{Lb}	0.5, 0.75, 1.0
橋りょう種別		合成桁(G) PC桁

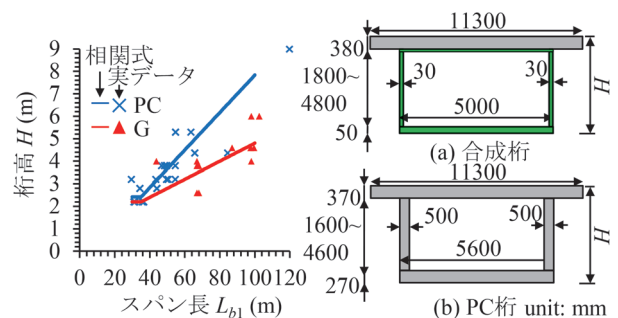


図 3 仮定した断面寸法および桁高とスパン長の関係

また、橋長は $L_{bridge} = (n_s - 2)L_{b1} + 2L_{b2}$ により表現される。

図 3 に、仮定した断面形状および桁高とスパン長の関係を示す。鉄道分野で採用の多い箱型断面を対象とし、これらの断面寸法は、連続桁の平均的な諸元として既設連続桁の文献調査¹⁰⁾に基づき、中央径間の長さ L_{b1} をパ

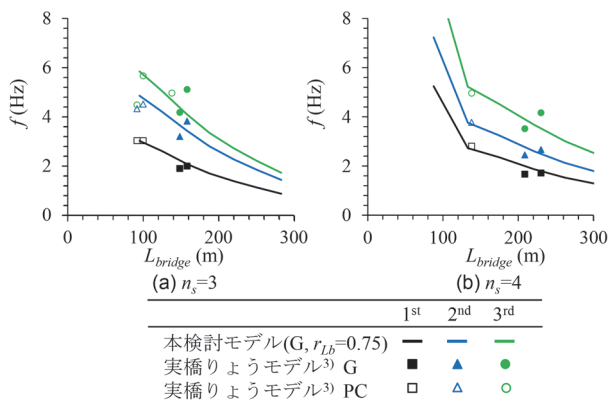


図4 本検討モデルと実橋りょうモデルの固有振動数の比較

ラメータとして決定した⁶⁾。合成桁（図中のG）およびPC桁の断面は長さ方向に一律として、断面寸法のうち桁高のみを可変として、曲げ剛性、単位長さ重量を設定した。

梁要素に与える曲げ剛性の算定において平面保持を仮定して、図3中に示す断面の主構造部分のみを考慮して、緑部分は鋼材のヤング率 200kN/mm^2 、灰色部分のコンクリートのヤング率はPC部材の設計値である 31kN/mm^2 を与えて算出した。剛性算出において非構造部材は無視した。梁要素に与える単位重量の算定においては、断面積から算出される主構造の重量に加えて、軌道や高欄など非構造部材である版上設備の重量を一律で 80kN/m /複線分を考慮した。単位重量は概して $250\sim 400\text{kN/m}$ であり、列車が 18kN/m 程度であることから、重量比（橋りょう/列車）は $15\sim 20$ 程度である。

3. 連続桁の固有値解析結果

図4に、本検討モデルと実橋りょうモデルによる固有振動数の比較を示す。本検討モデルは固有値解析により得られた1次から3次の固有振動数を、実橋りょうモデルは、文献³⁾に示されている実在する連続桁の諸元を用いた固有値解析により得られた結果を示している。また、本検討モデルはこれらの橋りょうの諸元に近いパラメータとして $r_{lb}=0.75$ の場合の結果を示している。図から、本検討モデルと実橋りょうモデルの固有振動数が概ね同様の傾向を示していることが確認できる。従って、本検討で設定した橋りょうの断面諸元や重量が、実橋りょうの動的応答を評価する上で妥当であったと判断できる。

図5に、合成桁の固有値解析結果による固有振動数 ($r_{lb}=1.0$) を示す。図から、1次の固有振動数と L_{b1} の関係に着目すると、単純支持の理論解と固有値解析の結果が一致していることが確認できる。

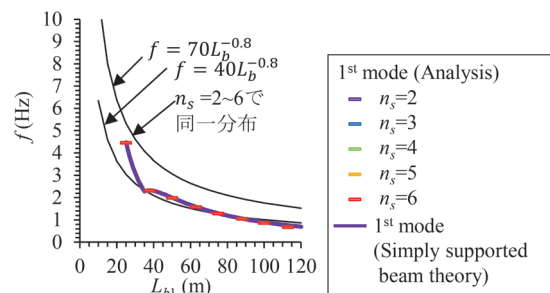


図5 合成桁の固有値解析結果による固有振動数 ($r_{lb}=1.0$)

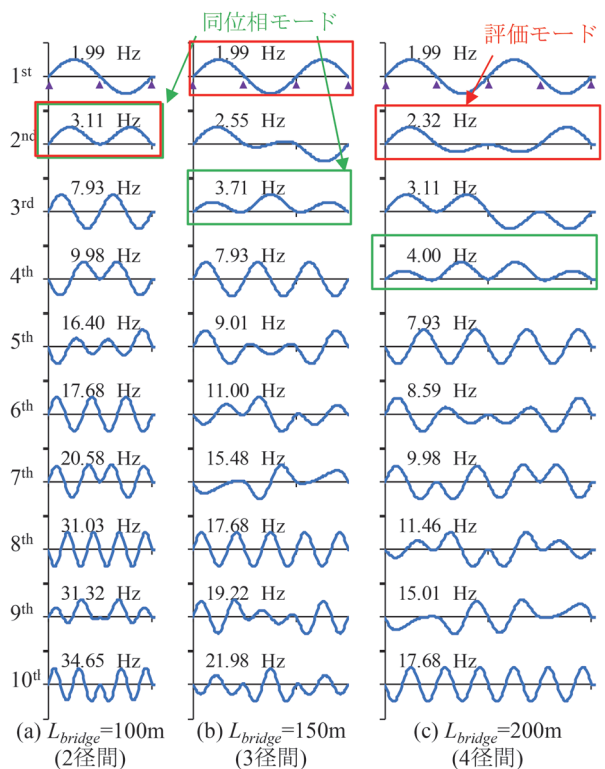


図6 合成桁の固有値解析結果による固有振動モード

図6に、合成桁の固有値解析結果による固有振動モード形状を示す。ここでは代表的な例として、 $L_{b1}=50\text{m}$ 、 $r_{lb}=1.0$ 、 $n_s=2\sim 4$ の場合の結果を示す。図から、各固有振動モードのモード形状に関して、いくつかの特徴が観察できる。即ち、1次モードは2径間を1周期とする正弦波であること、 n_s が偶数の場合は1次モードで側径間が逆位相であり、2次モードで同位相であること、 n_s が奇数の場合は、1次モードで側径間が同位相、2次モードで逆位相であること、 n_s 径間の n_s 次モードは各スパンが同位相に変形するモードである（図中の緑枠）こと、 n_s 径間の n_s+1 次は1径間を1周期とする正弦波であること等の特徴が確認できる。列車通過による外力は1方向の荷重となることから、一般的には刺激係数が大きい振動モードが励起されやすい傾向となる。厳密には、列車の進入時と退出時には、橋りょうの一方に偏心

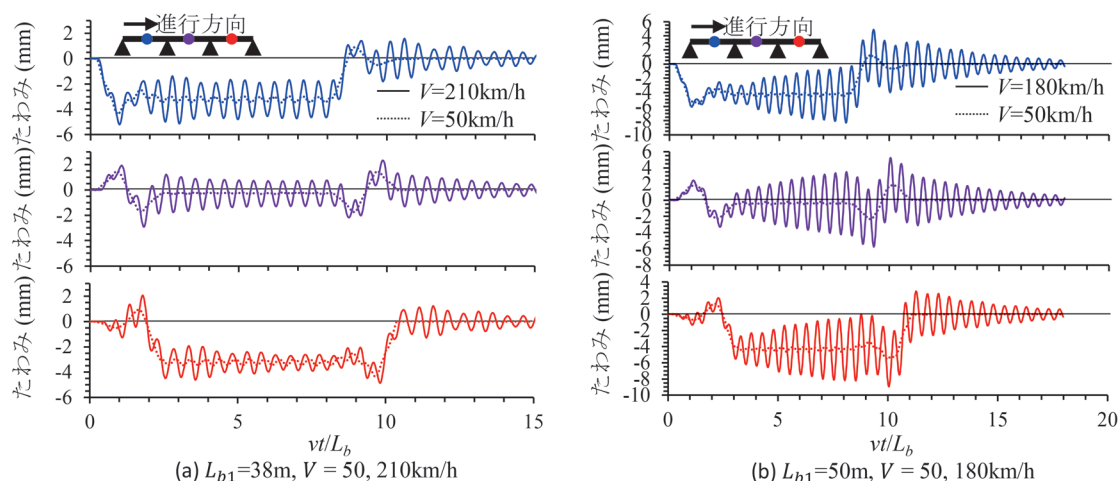


図7 たわみの時刻歴応答波形 ($n_s=3$, $r_{Lb}=1.0$)

して荷重が配置されることから、この瞬間に最大値が決まるような場合には刺激係数が小さい振動モードでも励起される。また、評価項目や評価点によっても変化するが、静的応答の最大値が全スパンに列車が配置される瞬間に発生する場合には、同位相モードの寄与が大きくなる一方で、静的応答の最大値が列車が側径間等に偏心して配置される瞬間に発生する場合には、同位相モードの寄与は小さくなる。図中には、5章で新たに提案した評価方法で用いる評価モードを明示的に赤枠で囲んで示している。

4. 連続桁の動的応答解析

連続桁の動的応答解析から算出された応答として、連続桁の設計において重要な着目箇所となる、各スパンのたわみ、支点反力、中間支点上の負曲げモーメントに着目した検討を行う。なお、スパン中央の正曲げモーメントは、たわみに近い傾向を示すことを確認している。ここでは、PC連続桁と比較すると固有振動数が低く動的応答が大きくなる傾向にある合成連続桁に着目する。

4.1 時刻歴応答波形

図7に、たわみの時刻歴応答波形を示す。代表的な例として、 $n_s=3$, $r_{Lb}=1.0$, $L_{b1}=38\text{m}$, 50m , 列車速度はほぼ静的応答となる 50km/h , 1次モードの共振速度となるそれぞれ 210km/h ($2.2\text{Hz} \times 25\text{m} \times 3.6$), 180km/h ($1.99\text{Hz} \times 25\text{m} \times 3.6$), 進行荷重 (MLモデル) の場合の結果を示す。たわみは各スパン中央の節点の値である。横軸は、動的応答と列車速度が 50km/h の場合の静的応答を比較しやすいように、時刻 t を L_{b1}/v により無次元化して vt/L_{b1} とした。ここで v は列車速度 (m/s) である。はじめに、静的応答とみなせる列車速度が 50km/h の場合について考察する。進入側の第1径間は列車進入直

後に 4.4mm 程度の最大値を示し、その後は概ね一定値を示す。さらに、中間の第2径間は列車の進入時および退出時に 1.8mm 程度のたわみが発生する一方、列車が全径間に配置される時間には側径間に荷重が配置されることによる応答の相殺により、たわみが 0.5mm 程度にまで減少し、概ね一定値を示す傾向が見られる。退出側の第3径間は第1径間と対称の傾向を示しており、列車退出直前に 4mm 程度の最大値を示す。上記のように中央径間のたわみが、側径間と比較して小さくなる3径間連続桁の特徴は、後述する衝撃係数の値に大きな影響を及ぼすことから重要な特徴である。

続いて、列車が共振速度で通過する場合の動的応答について考察する。動的応答波形は、静的応答を中心に中央径間と側径間が逆位相となる1次モードの動的な振動成分が重畳する形状であることがわかる。

$L_{b1}=50\text{m}$ の場合は1車両が通過する毎に応答が大きくなる共振現象が発生しており、静的たわみが大きくなる退出時において各スパンで最大値を示すことがわかる。この傾向は、単純桁の共振の傾向と同様であることから解釈しやすい結果である。図6で示すように、卓越する1次モードの各スパンのモード振幅が等スパン ($r_{Lb}=1.0$) の場合は等しいことから、両者の桁において径間によらず動的応答成分の大きさは同程度である傾向が見られる。

$L_{b1}=38\text{m}$ の場合は片振幅で $1\sim 2\text{mm}$ 程度の大きさの動的応答が発生している一方で、列車通過とともに動的応答が成長する共振は発生しておらず、単純桁の反共振と同様に波形が減衰していく傾向にある。また、この速度領域では1次モードの他に2次、3次モードが若干含まれており、この影響により、第1径間のほうが第3径間よりも若干応答が大きくなり、また波形にうなりが発生すると考えられる。

また、先述したように、中央径間は側径間と比較して

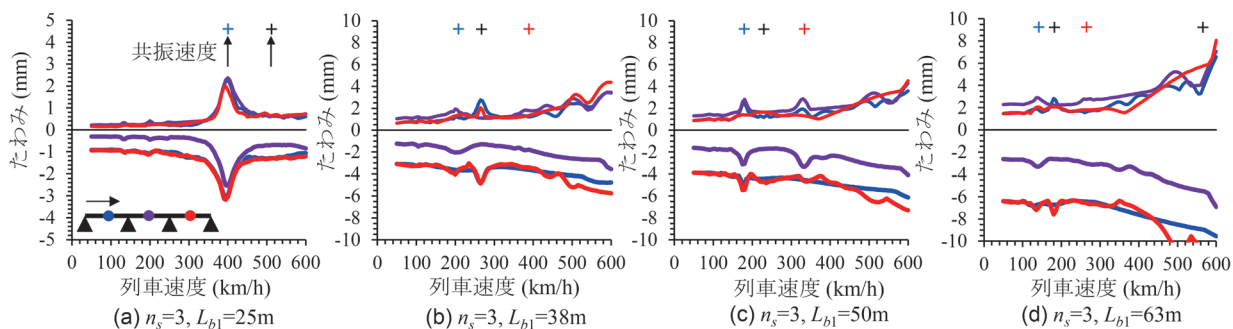


図8 たわみの最大応答値 ($r_{Lb}=1.0$)

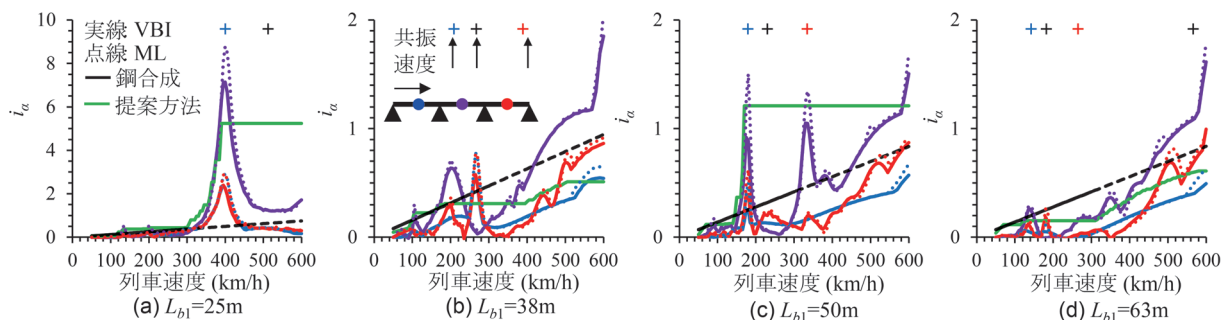


図9 たわみの衝撃係数 ($n_s=3, r_{Lb}=1.0$)

静的応答が小さいことから、動的応答振幅が同じ場合、中央径間の方が衝撃係数が大きくなる傾向となる。

4.2 たわみの最大値

図8に、たわみの最大応答値を示す。代表的な例として、 $n_s=3, r_{Lb}=1.0$ 、連行荷重 (ML モデル) の場合の結果を示す。着目指標であるたわみは各スパンの下向きおよび上向きの変位であり、下向きを負、上向きを正の値として記載している。図には、固有値解析から得られる固有振動数 f と列車長 L_v から求まる共振速度 $V_r (= 3.6fL_v, 500\text{km/h}$ 以下) を +プロットで併せて示しており、最低次のモードを青色、図6で示す同位相モードを赤色で示している。 $n_s=3$ の場合、青は1次、赤は3次、黒は2次と4次以上のモードに対応した共振速度である。図から、スパン長の増加と共にたわみの絶対値が増加する傾向が確認できる。列車速度が 50km/h の場合の結果を静的たわみとみなしたとき、側径間と中央径間のスパンが同じ場合、3径間の場合は側径間と比較して中央径間のたわみは小さくなる傾向にある。これは、図7で示したように、側径間の静的たわみの最大値が着目する側径間だけに列車が配置された瞬間に発生する一方で、中央径間の最大静的たわみは着目する中央径間だけでなく側径間にも列車が分布した状態で発生し、たわみが相殺されるためである。また、速度の増加と共にたわみが漸増する傾向に、各共振速度でたわみが上向き、下向き両側で大きくなる傾向が重畳している。3径間の場

合は、1次モードの共振速度において、下向きのたわみは第1径間より第3径間で大きくなる一方で、上向きのたわみは第3径間より第1径間で大きくなる傾向にあることがわかる。

4.3 たわみの衝撃係数

図9に、たわみの衝撃係数を示す。代表的な例として、 $n_s=3, r_{Lb}=1.0$ の場合の、車両を VBI モデル、ML モデルとしたときの結果である。衝撃係数は 50km/h の結果を静的応答とみなして算出した。図には、5章で後述する鋼合成標準の簡易評価方法を黒線で示しているが、固有値解析の最低次の振動モードの固有振動数としたうえで適用範囲 300km/h を仮にそのまま拡大した場合の目安の直線を黒点線にて示している。

図から、たわみの衝撃係数は、固有値解析から得られる各固有振動モードの共振速度において複数の極大点が見られ、列車速度に応じて励起される固有振動モードが変化する傾向にある。単純桁の場合の共振スパンである $L_{b1}=25\text{m}, 50\text{m}$ の場合には1次、3次モードに対応する共振速度で衝撃係数が急増し、1以上の値を示すことがわかる。特に、 $L_{b1}=25\text{m}$ の場合は $L_{b1}/L_v=1$ となることから共振の影響が大きく表れている。一方で、反共振スパンである $L_{b1}=38\text{m}, 63\text{m}$ の場合には、それぞれ、列車速度 $267\text{km/h}, 182\text{km/h}$ で2次モードの共振が発生している。また1次モードに対応する共振速度付近でも衝撃係数が一定程度増加している。このとき、図7(a)

の時刻歴波形からもわかるように、動的応答は一定の振幅で発生しているものの、連行荷重の繰り返し载荷による共振は発生しておらず、衝撃係数の値は最大で0.6程度である。

各スパンのたわみの衝撃係数は、中央径間の方が大きくなる傾向にある。これは、中央径間の最大静的たわみは中央径間だけでなく側径間にも列車が分布した状態で発生し、たわみが相殺されることで、衝撃係数の分母の静的たわみが小さくなるのが主要因である。また、側径間のたわみの衝撃係数は、進入側より退出側で大きくなる傾向にある。これは、図7(b)で示した時刻歴波形からもわかるように、進入側は静的たわみと動的成分が最大を示す時刻が異なる一方で、退出側は両者共に退出前のほぼ同時刻に最大値を示すためである。

たわみの衝撃係数は、列車速度が400km/h程度以下の領域、特に共振速度時においてスパン長の増加と共に減少する傾向にある。これは、スパン長の増加とともに1軸あたりのモード外力の継続時間が増加し、複数輪軸が干渉して打ち消し合い、励起される固有振動モードが不明確となるためと考えられる。400km/h以上の超高速領域に着目すると、特にスパンが長い場合において衝撃係数が急激に増加することがわかる。この動的応答増幅は、200~400km/hで見られる連行荷重の共振ではなく、単一の移動荷重でも発生するものである。即ち、速度パラメータの増加とともに動的応答が増幅する動的効果であり、連続桁の場合には単純梁よりも顕著な動的応答を示す。

動的相互作用の影響について、VBIモデルとMLモデルを比較すると、共振が発生する列車速度(図の横軸)についてはほとんど違いがなく、車両の付加質量効果が現れていない。一方で、共振速度において、顕著な共振が発生し衝撃係数が1を超えるような場合には、車両との動的相互作用の影響により衝撃係数(図の縦軸)が低下する傾向にある。例えば、 $L_{b1}=25\text{m}$ の場合には、列車速度が400km/h程度で発生する1次共振において、衝撃係数はMLモデルでは8.7程度を示す一方、VBIモデルでは7.1程度であり、20%程度低減している。同様に、 $L_{b1}=50\text{m}$ の第2径間では、列車速度が180km/h程度で発生する1次共振において、衝撃係数はMLモデルでは1.5程度を示す一方、VBIモデルでは0.9程度であり、40%程度低減している。単純桁の場合でも一般的に見られるこの現象は、連続桁の場合にはより大きく現れているように見受けられる。これは、連続桁は橋長が長い場合、車両系の減衰の大部分を占める車両/台車間の空気ばねの1橋りょうあたりに配置される個数が増加することにより、空気ばねの減衰に大きく影響を受けるためと考えられる。以降、車両の振動系の効果を考慮した実現象に近いVBIモデルの結果のみに着目して整理する。

図10に、たわみの衝撃係数にスパン数が与える影響

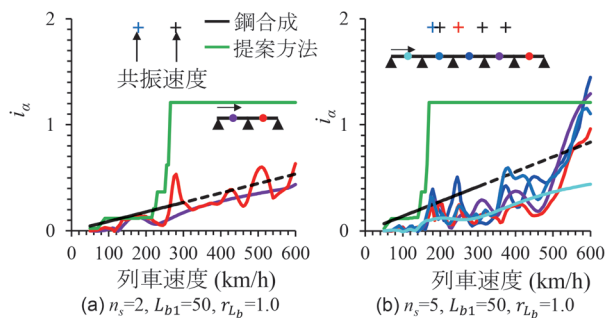


図10 たわみの衝撃係数にスパン数が与える影響

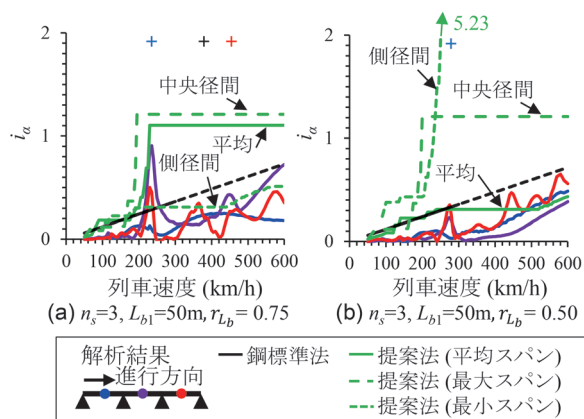


図11 たわみの衝撃係数にスパン比が与える影響

を示す。代表的な例として、 $L_{b1}=50$ 、 $r_{Lb}=1.0$ の結果を示す。

図から、図9(c)に示す $n_s=3$ の場合と併せてこれらのケースにおいては、1次モードの固有振動数は同じであり、対応する共振速度は180km/h程度である。2次モード以上の固有振動数はスパン数の増加とともに小さくなることから、共振速度が400km/h以下の領域となる固有振動モードが増加している。また、 $n_s=2$ の場合には、衝撃係数は2次モードの共振速度で増幅する一方で、1次モードでは増幅していない。 $n_s=3$ の場合には、衝撃係数は1次、3次モードの共振速度で増幅する一方で、2次モードでは増幅していない。 $n_s=5$ の場合、衝撃係数は1次もしくは2次モードの共振速度で増幅する一方で、この共振速度時の衝撃係数は、 $n_s=2$ 、3の場合と比較して、スパン数の増加と共に減少する傾向にある。これらの傾向は、スパンが長い場合と同様に、スパン数が増えるほど複数輪軸の場合にはこれらが干渉して打ち消し合うためと考えられる。400km/h以上の超高速領域の動的応答増幅については、 $n_s=2$ の場合は見られないが、 $n_s=5$ の場合には $n_s=3$ の場合と同様に衝撃係数が急激に増加する現象が見られる。

図11に、たわみの衝撃係数にスパン比が与える影響を示す。代表的な例として、 $L_{b1}=50\text{m}$ 、 $n_s=3$ の結果を示す。図9(c)に示す $r_{Lb}=1.0$ と比較すると中央径間

は同様で、側径間のみが異なる結果である。図中の提案方法については5章にて後述する。図の解析結果から、スパン比の減少と共に、1次モードの共振速度における中央径間の衝撃係数は低下する一方で、側径間の衝撃係数の低下量は小さいことがわかる。これは、スパン比の減少と共に固有振動数が増加し、全固有振動モードの共振速度が増加すること、中央径間の静的たわみが大きくなること等が原因と考えられる。

5. 連続桁の衝撃係数の簡易評価方法

鋼合成標準¹⁾、RC標準²⁾では、列車の走行による構造物の動的な応答、即ち動的応力、たわみの静的応答に対する増加割合を衝撃係数と定義しており、設計衝撃係数はそれぞれ式(1)、式(2)により算定することとしている。

$$i = i_\alpha + i_c \quad (1)$$

$$i = (1 + i_\alpha)(1 + i_c) - 1 \quad (2)$$

ここで、 i は設計衝撃係数、 i_α は速度効果の衝撃係数、 i_c は車両動揺の衝撃係数である。本研究では、このうち速度効果の衝撃係数 i_α を対象として連続桁の場合の評価方法について検討している。鋼合成標準¹⁾、RC標準²⁾が i_α により考慮する現象は概ね同様であり、数式により表現すると式(3)、式(4)のように表される。

$$i_\alpha = K_\alpha \alpha \quad (3)$$

$$i_\alpha = f_i(\alpha, L_e/L_v) \quad (4)$$

$$\alpha = v/2f_e L_e \quad (5)$$

ここで、 K_α は係数であり在来線は2、新幹線は1である。 α は式(5)で示す速度パラメータ、 L_v は車両長である。 v は列車速度、 f_e は部材の固有振動数、 L_e は部材長であり影響線の弦長で代替される。式(3)で示す鋼合成標準では連行荷重の共振を想定せずに速度パラメータの1次式としている。式(4)で示すRC標準では、列車を模擬した荷重列が作用する線形梁理論に基づく動的応答増幅倍率の数値解を与えており、共振を厳密に考慮している。これらは多様な部材を対象とした衝撃係数 i_α の一般的な算定方法であり、部材の評価項目や動的応答特性に応じて f_e 、 L_e の設定に注意する必要がある。

本研究で提案する連続桁の衝撃係数の簡易評価方法では、式(4)で示すRC標準の単純梁を仮定した衝撃係数の解析結果に、連続桁の特徴を考慮したパラメータとし

て有効固有振動数 f_e 、有効スパン L_e を適用したものである。 f_e 、 L_e は4章の結果に基づき以下のように設定する。

有効固有振動数 f_e は、卓越する振動モードの固有振動数を採用する。即ち、スパン数が奇数の場合($n_s=3, 5$)は最低次の振動モード、スパン数が偶数の場合($n_s=2, 4, 6$)は2次モードに着目する。

たわみを考える場合の有効スパン L_e は、2径間の場合は長い方のスパン長、3径間以上の場合は中央径間および側径間のスパン長の平均値とする。図11から、スパン比が1以外の場合($r_{Lb}=0.5, 0.75$)、中央径間の長さを部材長 L_e として採用した場合には、 r_{Lb} が変化しても評価結果は一定であることから、実際には r_{Lb} の低下とともに低下する衝撃係数に対して過大評価を与える傾向にあることがわかる。一方で、側径間の長さを部材長 L_e として採用した場合には、 $L_{b1}=50\text{m}$ 、 $r_{Lb}=0.75$ 以外の場合において過大評価、 $L_{b1}=50\text{m}$ 、 $r_{Lb}=0.75$ の場合において過小評価を与える傾向にある。両者の平均を部材長 L_e として採用した場合には両者の間の値をとっており、ほとんどの列車速度領域において動的解析結果の傾向を捉えつつ、概ね安全側の評価を与えていることがわかる。

負曲げモーメント、支点反力を考える場合の有効スパン L_e は、着目点を含む2径間分の長さとする。解析結果は文献⁶⁾によるが、提案方法は、 L_e を1径間分の長さとした場合には解析結果を過大評価する傾向にある一方で、 L_e を2径間分の長さとした場合には動的解析結果の傾向を捉えつつ安全側の評価を与えている。

図9～図11では、連続桁のたわみの衝撃係数について、解析結果と提案方法を比較する。

式(3)で示す鋼合成標準の方法(図中の黒線)¹⁾は、300km/h以下の共振速度より低い速度領域においては解析から得られる衝撃係数の増加の全体的な傾向と一致しており、概ね安全側の評価を与えている。一方で、3径間で $L_{b1}=25\text{m}$ 、50m、75mの場合のように1次モードの共振速度が300km/h以下となり、共振現象が発生する場合には、鋼合成標準(図中の黒線)の方法はこの現象を考慮した評価方法ではないことから過小評価を与える。尤もこれは連続桁だけでなく、単純桁の場合でも同様である。4径間以上の場合には、先述したように衝撃係数が全体的に低下する傾向にあり、図10より、鋼合成標準の方法でもほとんどの場合で安全側の評価を与えることから、4径間以上の連続桁に限定して鋼合成標準の方法を適用することは一定の妥当性を有すると考えられる。

提案方法(図中の緑線)は、ほとんどの速度領域で動的応答解析から得られた衝撃係数の傾向を捉えられており、かつ安全側の評価を与えている。共振が発生するような速度領域の全体的な傾向として、連続桁の低次の振

動モードにはその形状が正負の逆位相となる領域があり、複数の列車が幅広く載荷される場合にはモード外力の相殺が発生することから、単純桁の場合よりも励起される動的応答倍率は小さくなるものと考えられる。動的応答が急増する可能性がある400km/h以上の超高速領域では、単純梁の解析結果を援用した提案手法においては過小評価を与えていることから、単純梁の援用に基づく提案手法の適用は難しいと考えられる。

一部、等スパンの3径間で $L_{b1}=38m$ 、63mの場合のように、単純梁では反共振スパンとなる場合に、1次モードの共振速度において過小評価を与える場合がある。RC標準の衝撃係数は共振現象を考慮したものであり、単純梁の場合には、静的応答、動的応答が両者とも1次モードに大きく支配される。一方で、連続桁の場合は必ずしも静的応答と動的応答の支配モードが一致しない。先述したように、3径間の静的たわみは3次モードに支配される一方で、1次共振速度においてその動的応答は1次モードに支配される。これらのように、静的と動的で卓越する振動モードが異なること、連続桁のモード形状が単純桁と異なることが反共振スパンにおける過小評価の要因と考えられる。これらの過小評価の程度は衝撃係数にして0.2~0.3程度である。

図12に、簡易評価手法の推定精度を示す。既往の測定結果および解析結果と提案評価法の結果を比較する。新幹線線区の開業の際に測定されたたわみの測定結果を整理したものであり詳細は文献に譲る⁶⁾。鋼合成標準、RC標準、本研究の提案方法の3通りの簡易評価手法と測定結果、動的応答解析結果を比較した。図から、鋼標準法は特に衝撃係数が1を超える場合に過小評価する傾向にあり、危険側の評価を与えていることがわかる。これは鋼標準法が共振を考慮していないためである。RC標準の方法は安全側ではあるものの、特に衝撃係数が1を超え共振が発生する場合に過度に衝撃係数を大きく評価する傾向にある。提案方法は、動的応答解析結果および実測結果に対してはほとんどの場合で-0.1から+0.5程度の範囲で衝撃係数を評価しており、安全側でありながらも鋼標準法、RC標準法よりも精度が高い傾向にあることがわかる。なお、実測結果で衝撃係数が0の場合が多数見られるが、これは測定誤差や一定の列車速度の実測結果しか得られていないことなどによると考えられる。

図13に、提案手法の適用範囲を示す。従来の鋼合成標準の方法は300km/h以上の高速領域に適用できないこと、共振現象を考慮していないことから一部で過小評価を与えていることに課題があった。また、RC標準法は過度に安全側であること、適用範囲が明確となっていない課題があった。本研究で提案手法においては先述したように400km/h程度の列車速度領域までは共振現象

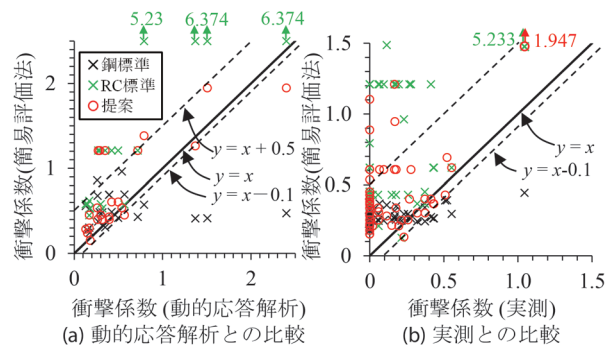


図12 簡易評価手法の推定精度

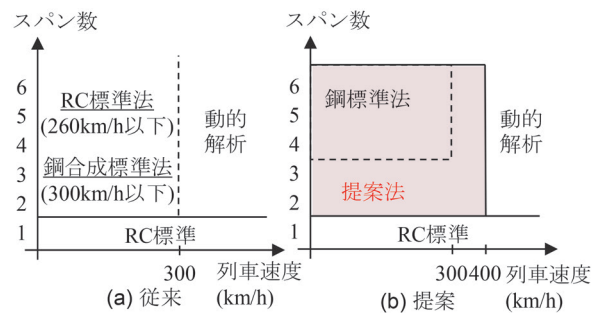


図13 提案手法の適用範囲

が発生する列車速度や程度を精度よく再現しつつ、概ね安全側の評価を与える方法となっている。また、解析結果との比較により鋼合成標準の適用範囲も4径間以上と明確化された。これ以上の列車速度の場合には動的現象が複雑となり、単純梁理論の援用からは大きく外れた現象となることから動的応答解析を実施するのが良い。

6. まとめ

本研究では、一般的な鉄道連続桁の構造諸元について整理、一般化した上で、列車通過時の連続桁の包括的な動的応答解析を実施し、高速領域における連続桁式橋りょうの動的応答特性に関して以下の知見を得た。

- ・たわみの衝撃係数においては、各固有振動モードの共振速度において複数の極大点が見られ、共振速度に応じて励起される固有振動モードが変化する。スパン数が奇数の場合、共振速度において1次、3次モードは増幅する一方、2次モードは増幅しにくい傾向にある。
- ・中央径間のたわみの衝撃係数は、側径間より大きくなる傾向にある。これは、中央径間の最大静的たわみは中央径間だけでなく側径間にも列車が分布した状態で発生し、たわみが相殺されることで、衝撃係数の分母の静的たわみが小さくなることが主要因である。
- ・たわみの衝撃係数は、スパン数およびスパン長の増加とともに励起される固有振動モードが不明確となり、列車速度が400km/h程度以下の領域では減少する傾

向にある。これは、スパン長の増加とともに1軸あたりのモード外力の継続時間が増加し、複数輪軸が干渉して打ち消し合うためである。400km/h以上の場合は、スパン数に関係なく特にスパンが長い場合において、動的効果による衝撃係数は急激に増加する。

- ・上記応答特性を踏まえた上で、RC標準の単純梁を仮定した衝撃係数の解析結果に、連続桁の特徴を考慮したパラメータとして有効固有振動数、有効スパンを適用する連続桁の衝撃係数の簡易評価法を提案した。有効固有振動数として、スパン数が奇数の場合は最低次の振動モード、スパン数が偶数の場合は2次モードに着目し、有効スパンはスパンの平均値とした。提案方法は400km/h程度の列車速度領域までは共振現象が発生する列車速度や程度を精度よく再現しつつ、概ね安全側の評価を与える。

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，2009
- 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（コンクリート構造物），丸善出版，2004
- 3) 宇野匡和，曾我部正道，谷村幸裕，金森真：高速列車走行による鉄道連続桁の動的応答性状に関する研究，構造工学論文集A，No.53，pp.67-76，2007
- 4) 本田秀行，小堀為雄，山田善一：多径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数に関する考察，土木学会論文報告集，No.331，pp.65-73，1983
- 5) Martínez-Rodrigo, M.D., Andersson, A., Pacoste, C., & Karoumi, R.: Resonance and cancellation phenomena in two-span continuous beams and its application to railway bridges, *Engineering Structures*, 222, 111103, 2020.
- 6) 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，pp.22-00185，2023
- 7) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995
- 8) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集（C編），Vol.72，No.706，pp.1849-1855，2005
- 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) 成田顕次，徳永宗正，池田学：連続桁の地震時走行安全性の基本特性，鉄道工学シンポジウム論文集，No.25，pp.199-206，2021