

レール継目を有する鋼橋の列車通過時動的応答

北川 晴之* 徳永 宗正* 池田 学*

Dynamic Response of Steel Girders with Rail Joints during Train Passage

Haruyuki KITAGAWA Munemasa TOKUNAGA Manabu IKEDA

The aim of this study is to elucidate the mechanism of the increase in the dynamic response of the bridge due to the passage of a train through a rail joint. The numerical results showed that the dynamic response due to the passage of a rail joint is amplified by the resonance that occurs when the excitation frequency with the passage of two wheelsets in a bogie coincides with the natural frequency of the bridge. Furthermore, the impact factor for rail joint is more sensitive to span than the calculation method of design standard and decreases as the bridge span increases.

キーワード：レール継目，鋼橋，動的相互作用解析，衝撃係数，軸距，共振

1. はじめに

橋りょうの設計では，列車通過時の動的応答は，列車の静的荷重を，衝撃係数で割り増した衝撃荷重を算定することで考慮している¹⁾。衝撃係数の要因には，1) 規則的な車軸配置による連行荷重の速度効果，および2) 軌道不整やレール継目により生じる車両のばねの動揺や車体の慣性力による動揺効果等がある。2) の動揺効果による衝撃係数 i_c は，鋼・合成構造物の設計標準¹⁾において以下の式で示されている。

$$i_c = \frac{10}{65 + L_b} \quad (1)$$

式(1)では， i_c は橋りょうのスパン L_b のみの関数となっており，レール継目の影響は直接的に反映されていない。さらに，上記1) の速度効果の衝撃係数 i_a は，鋼・合成構造物の設計標準¹⁾では，

$$i_a = K_a \alpha \quad (2)$$

と速度パラメータ α の関数として示されている。このとき， K_a は係数であり，新幹線では $K_a = 1$ ，在来線では $K_a = 2$ である。在来線において K_a がより大きいのは，軌道の高低変位のパワースペクトル²⁾ に現れない車輪フラットやレール継目の影響に配慮して余裕を与えたためである。

以上のように，設計標準の衝撃係数算定法は，列車のレール継目通過時の動揺効果による橋りょうの動的応答増加メカニズムを考慮した算定式になっていない。レール

継目による影響は，衝撃係数の要因のうち占める割合が比較的大きいと思われるが，これを適切に考慮されず，設計標準の衝撃係数算定法では過大，あるいは場合によっては過小に評価している可能性がある。そのため，レール継目による影響も考慮した高精度な衝撃係数算定法を示すことが重要である。

そこで，著者らはレール継目（以下，継目）通過時の橋りょうの動的応答増加メカニズムを解明しそれを反映した衝撃係数の算定法の提案を目的として，理論，実測および数値解析に基づく検討を行っている^{3) 4)}。このうち，本論文では，継目による衝撃係数が相対的に大きいと考えられる軽量の橋りょうである鋼橋を対象に，数値解析による橋りょうの動的応答増加メカニズムの解明と衝撃係数算定法の構築のための影響因子の抽出とその要因分析の結果を示す。具体的には，2章では，本研究に用いる解析手法の提案と，既往の実測結果と比較してその妥当性の確認を行った。3章では継目通過時の鋼橋の動的応答増加メカニズムを明らかにするとともに，4章では，スパン 50m までの標準的な鋼橋について継目による衝撃係数の影響分析を行った。なお，新幹線はロングレールが一般に用いられているため，本論文では継目が多く存在する在来線を対象とした。

本論文は，文献4の内容を抜粋して，解析結果を一部追加，再整理したものである。

2. レール継目を有する鋼橋の動的応答解析手法

2.1 解析手法

本研究では，車両と線路構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII⁵⁾を用いて，列車/橋りょうの動的相互作用を考慮した解析を行った。

図1に橋りょうおよび軌道の解析モデルを示す。再現

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

解析対象の橋りょうは、スパン 22.3m でスパン上に継目を有する単純支持の上路プレートガーダーとした。解析では鋼桁を弾性梁要素でモデル化した。鋼桁の要素分割は、スパンを 50 分割とした。軌道はレールを梁要素でモデル化し、まくらぎ、軌道パッド等のその他の部材はばね要素に集約した。さらに、鋼橋全体では、その形状を考慮するために、レールと鋼桁および鋼桁と支承をばね要素で結んでおり、支承は単純支持とした。鋼桁の質量は図面に基づき、剛性はこの質量と実測結果の固有振動数⁴⁾を基に決定した。本研究では、軌道構造を橋まくらぎ式と想定し、軌道ばねの剛性は軌道パッドの値⁶⁾を用い、線形弾性を仮定した。減衰はモード減衰比として与え、鋼橋の各モードに対して 1.0% とした。また、解析におけるモード次数は 12 とし、200Hz 程度までの振動を考慮した。

図 2 に車両モデルを示す。車両は車体・台車枠・輪軸を剛体と仮定し、これらをばね・ダンパで結合するマルチボディによりモデル化した。自由度は 1 車両あたり 31 である。列車は、この車両モデルを端部でばね・ダンパで結合して構成した。

2.2 妥当性検証解析の条件

図 3 に再現解析に用いた列車の概要を示す。本研究では、近年の一般的な在来線車両を想定し、車体の質量は空車相当、車両数は 6 両とした。

継目は、レールと車輪間の接触計算に用いる相対変位 δ_z を求める際に考慮した。具体的には、継目の形状を以下の式で表される式 (3) に走行面の凹凸形状 e_z を加えた。

$$\delta_z = z_R - z_W + e_z \quad (3)$$

このとき z_R と z_W は、レールと車輪の鉛直変位である。また、継目の位置は、実測結果より進入側支点から 15.23m とした。図 4 に検証解析で用いた継目周辺の走行面の凹凸形状を示す。図に示す実線部は 1m 弦の実測で得られた継目近傍のレール頭頂面凹凸形状から作成した。ただし、継目の遊間は線形補間している。また、図の破線部は、後述する再現解析において継目通過による応答が十分に表れなかったことから、外挿して設定した変位である。具体的には、追加の落ち込み量を 1.5mm と仮定し、実測で 80km/h 付近で衝撃荷重のピークが生じていたことから、継目落ちが生じた区間の長さが全体で 2.5m となるように外挿区間の長さを設定した。なお、実測ではレール継目は支え継ぎ形式であった。

2.3 解析手法の妥当性確認

図 5 にスパン中央たわみの時刻歴波形を示す。図から実測と解析のたわみ量は 4 秒付近を中心に若干違いが

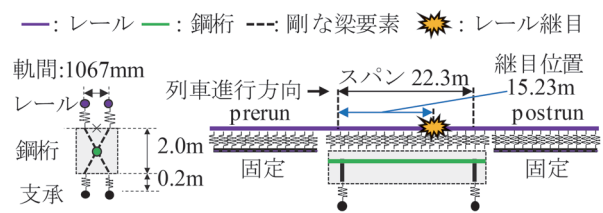


図 1 橋りょうおよび軌道の解析モデル

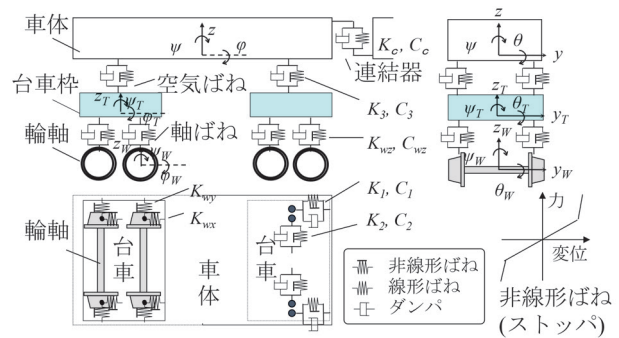


図 2 車両の力学モデル

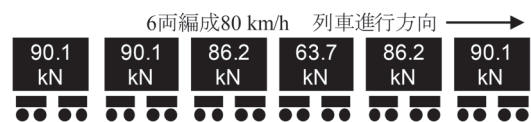


図 3 再現解析に用いた列車の概要

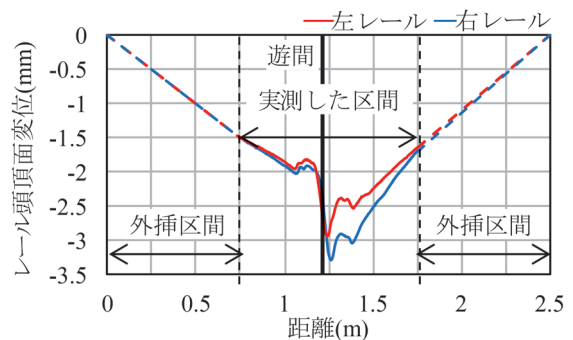


図 4 再現解析に使用した継目波形

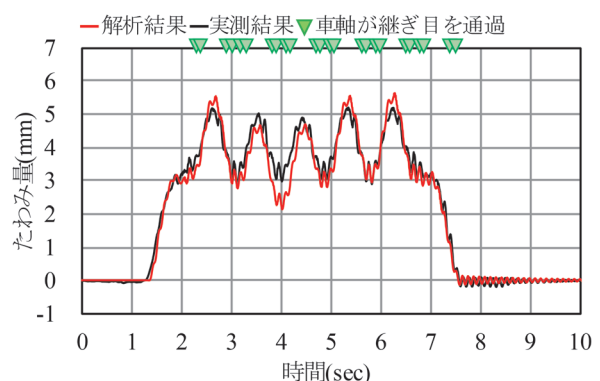


図 5 スパン中央たわみの時刻歴波形

見られるが概ね一致した。この違いは、実測では解析で想定したように軸重が1車両内で均一でないためと考えられる。したがって、剛性をはじめとした鋼橋の静的応答に関する諸元を再現できているといえる。

図6にたわみの動的成分を示す。たわみの動的成分算出には、実測と解析で同様の処理を施している。具体的には、実測された、あるいは解析で得られた原波形に対して、橋りょうのたわみ1次モードの固有振動数の1/2程度を目安に5Hzをカットオフ周波数としたローパスフィルタを施したたわみの静的成分を求め、さらにたわみの原波形から静的成分を引くことでたわみ速度の動的成分を求めた。

図の時刻歴波形について着目すると、実測から得られた波形では、輪軸が継目を通過することで振幅が大きくなっていた。また、輪軸が通過し、次の輪軸が通過するまでの間では、自由振動が発生していた。解析結果においても、同様に輪軸の継目通過による振幅と自由振動の振幅の双方が確認された。さらに、自由振動の波数も実測と一致していた。ただし、解析と実測で自由振動の位相や振幅の若干のずれが表れていた。これは、実測ではレールと鋼橋間の拘束を支配する締結装置の非線形性や、ねじりモードや水平方向の振動モード等の考慮していない振動モードなどが応答に影響を及ぼしている可能性がある。また、列車退出後の自由振動において、実測波形がより小さい振幅を示した。これは、レールにより接続された隣接する橋りょうにより生じた減衰の影響であると考えられる。以上より、本研究で用いた解析手法により継目を有する鋼橋における動的現象のうち支配的な要因を再現できているといえる。

図7に列車速度とたわみの衝撃係数の関係を示す。図には、実測結果と、継目ありとなしの2ケースの解析結果を示す。たわみの衝撃係数*i*は、実測と解析ともに、以下の式により求めた。

$$i = \frac{d_{dmax}}{d_{smax}} \quad (4)$$

このとき、 d_{smax} は5Hzのローパス処理により得られた静的たわみの最大値であり、 d_{dmax} はたわみの動的成分の時刻歴波形の最大値である。動的成分はローパス処理前から静的たわみ波形 d_s を差し引くことで求めた。

実測結果を基にした統計分析⁴⁾では、衝撃係数は時速80km/h程度でピークを示し、100km/h程度で再度増加する傾向を示していた。継目ありの解析結果でも、時速80km/h程度でピークを示し、100km/h程度で再度増加するなど、実測結果と同様の傾向を示した。

なお、解析から得られた衝撃係数が80~100km/hを中心に実測より低いのは、実測では継目以外の軌道変位に

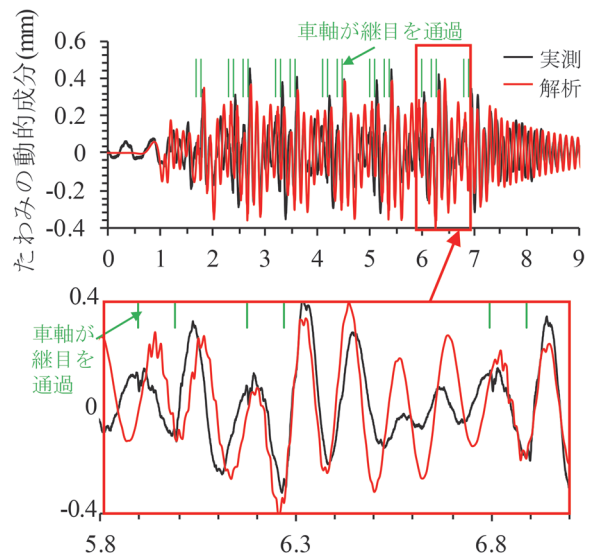


図6 スパン中央におけるたわみの動的成分 (列車速度 80km/h)

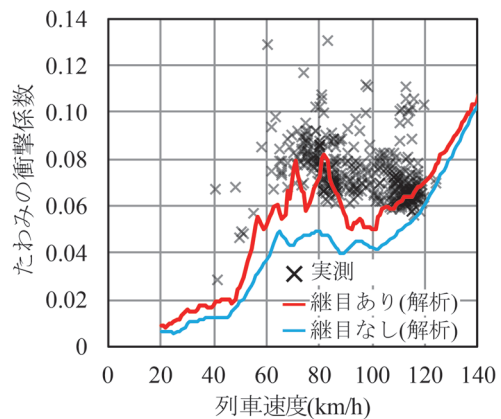


図7 列車速度と衝撃係数の関係

よる動的応答が含まれているためと考えられる。一方で、継目のみの考慮で80km/hのピークにおける衝撃係数が実測のばらつき範囲内に収まっているため、継目通過時の衝撃係数の増加を妥当に再現できたと考えられる。

以上のことから、提案する動的相互作用解析により、継目を有する鋼橋の列車通過時の静的応答および動的応答を定量的に再現できたといえる。鋼橋の動的応答における支配的な要因は、車両の継目通過および橋りょうの自由振動であり、解析モデルによりこの挙動を再現できていることが確認された。

3. レール継目の諸元が橋りょうの動的応答に与える影響

3.1 解析条件

図8に一般化した継目の形状を示す。ここでは、図4の実測結果より三角形形状に近似できるので、レール遊間

部を中心に三角形の継目落ちが生じたと仮定した。以降では、この三角形の底辺を継目長さ j_{len} 、高さを継目深さ j_{dep} と呼ぶこととする。

表 1 に継目特性検討のための解析条件を示す。橋りょうは図 1 と同様のモデルとし、軌道構造は 2 章と同様に橋まくらぎ式とした。ただし、継目通過による橋りょうの動的応答が大きくなることが予想される短スパン橋りょうを対象として、スパン 10m の鋼橋を想定した。質量は、鋼桁は 0.54t/m、軌道等の付帯構造物は 0.12t/m とした。このとき、橋りょう / 車両の質量比 $\rho_{b,v}$ は 0.428 となる。固有振動数は、図 1 のようにモデル化された鋼桁の固有振動数が $f=180/L_b^{1)}$ となるように設定した。ただし、鋼桁の高さは 1m とした。表 1 に示す固有振動数は、このときの固有振動数を示しており、レール、軌道ばね、鋼桁が一体となって変形するたわみ 1 次モードの値である。

継目の諸元として、 $j_{dep}=1\text{mm}$ とし、 j_{len} は、0.8~5.6m の 8 通りを設定した。 j_{len} に関しては、橋りょうのたわみとの関係に着目した検討が皆無であることから、実測における凹凸形状の計測区間長を含んだ幅広い値を採用した。また、継目の位置は、スパンを L_b としたとき、進入側の支承からの距離 j_{dis} が 0 (支承上) ~ $6L_b/12$ (スパン中央) となるように 7 通り設定した。列車は 6 両編成とし、軸重は 75kN とした。列車速度は 20~150km/h とした。

3.2 継目の形状の影響

図 9 に継目長さ j_{len} が変化したときの列車速度と衝撃係数の関係を示す。いずれの継目もスパン中央に位置している。特に継目通過により生じる衝撃係数をより明確化して議論するため、次のような衝撃係数 i_2 を定義する。

$$i_2 = \frac{|d_{d,j}^{max}|}{|d_{s,nj}^{max}|} \quad (5a)$$

$$d_{d,j} = d_a - d_{a,nj} \quad (5b)$$

ここで、 $d_{s,nj}^{max}$ は 20km/h における継目なしのケースのたわみ時刻歴波形最大値、 d_a は継目があるケースのたわみ時刻歴波形、 $d_{a,nj}$ は継目なしのケースのたわみ時刻歴波形、 $d_{d,j}$ は継目の有無によるたわみの差分の時刻歴波形、 $d_{d,j}^{max}$ はたわみの差分の時刻歴波形最大値である。なお、 d_a^{max} 、 $d_{a,nj}^{max}$ および $d_{d,j}^{max}$ は、同一時刻ではなく異なる時刻の値である。

図 9 より、列車速度と i_2 の関係に着目すると、列車速度 120km/h 程度まで i_2 は増加し、さらに高速域では減少あるいは一定となる傾向を示す。また、列車速度 40km/h、60km/h、120km/h で i_2 のピークが確認された。

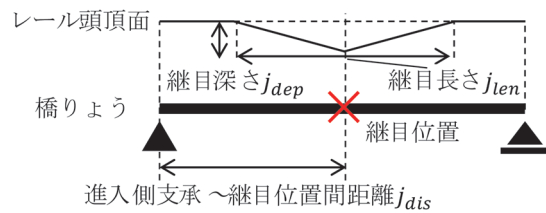


図 8 一般化した継目の形状

表 1 継目特性検討のための解析条件

パラメータ	値
橋りょうスパン L_b (m)	10
単位長さ質量(t/m)	0.66
橋りょう/車両の質量比 $\rho_{b,v}$	0.428
たわみ 1 次モード固有振動数(Hz)	21.03
モード減衰比(%)	2
継目深さ j_{dep} (mm)	1
継目長さ j_{len} (m)	0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 5.6
進入側支承~継目位置距離 j_{dis} (m)	0, $L_b/12$, $2L_b/12$, $3L_b/12$, ..., $6L_b/12$
列車速度(km/h)	20~150

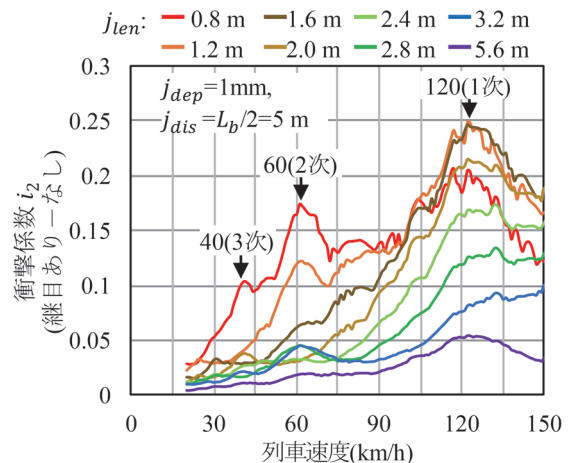


図 9 継目長さが変化したときの列車速度と衝撃係数の関係

図 10 (a) に、 i_2 のピーク時として列車速度 120km/h 付近のピークで最も大きい i_2 を示したケースのたわみ時刻歴波形を示す。図 10 (a) には、継目なしのケースについても示している。また、図 10 (b) は、継目の有無によるたわみの差分の時刻歴波形を示す。

まず図 10 (a) に着目すると、輪軸が継目を通過する時点を緑線で示しているが、その時点で振幅が大きくなっており、継目がないケースより大きいたわみ量を示していた。

さらに、図 10 (b) のたわみの差分 $d_{d,j}$ の時刻歴波形に着目すると、継目通過による $d_{d,j}$ の増加が 1 輪軸ごとに現れていた。このとき、1 台車分の継目通過に着目すると、1 軸目の通過による振幅よりも 2 軸目の通過による振幅のほうが大きかった。したがって、継目を同一台

車の2軸の車軸が通過することによる加振振動数が、橋りょうの固有振動数に一致して、共振（以降、台車の軸距を加振間隔とした共振を軸距共振と呼ぶ）していると考えられる。なお、このとき、

$$V = 3.6fL \quad (6)$$

に、列車速度 $V=120\text{km/h}$ 、台車の軸距 $L=2.1\text{m}$ を代入すると、軸距共振発生時に卓越する固有振動数は 15.87Hz と算出される。これは、たわみ1次モード固有振動数 21.03Hz （表1）の75%程度である。既往の研究⁷⁾によると、スパン10mで橋りょう/車両の質量比 $\rho_{b,v}=0.5$ の場合、列車通過時の橋りょうの固有振動数は、車両の質量が付加されることによって80~85%程度まで低下する。本検討では、 $\rho_{b,v}$ は0.428のため既往の研究⁷⁾より車両の付加質量の影響は大きいと考えられ、列車通過時の固有振動数が75%程度まで低下し、これにより列車速度120km/h時に軸距共振したと考えられる。

なお、図9では60km/hや40km/hにもピークが確認できるが、これは軸距共振の2次共振および3次共振である。

また、図9中の60km/h、120km/hのピークでは、それぞれ異なる長さの継目が最も大きい i_2 を示していた。具体的には、60km/hでは $j_{len}=0.8\text{m}$ 、120km/hでは $j_{len}=1.2\text{m}$ および1.6mのケースが最も大きい i_2 を示していた。 i_2 が最も増加する継目長さについて、1自由度系における衝撃荷重作用時の理論から考察する⁸⁾。詳細は既報⁴⁾に示すが、1自由度系に正弦波形状の衝撃荷重が入力される時、継続時間 τ の無次元量 τ/T (T は系の固有周期) と応答変位の関係は、 $\tau/T=0.78$ 付近となる時極大値を示す。今、1輪軸の継目上通過にかかる時間を τ 、車両の付加質量を考慮した橋りょうの固有周期を T とおくと、 $V=60\text{km/h}$ では、 $j_{len}=0.8\text{m}$ のとき、 $\tau=0.048\text{sec}$ 、 $1/T=f=21.03\text{sec}^{-1}$ より、 $\tau/T=1.001$ 、 $j_{len}=1.2\text{m}$ のとき、 $\tau=0.072\text{sec}$ 、 $1/T=21.03\text{sec}^{-1}$ より、 $\tau/T=1.514$ となり、 $j_{len}=0.8\text{m}$ のときが、 $j_{len}=0.8\text{m} \sim 5.6\text{m}$ の範囲で最も0.78に近い。同様に $V=120\text{km/h}$ では、 $j_{len}=1.2\text{m}$ のとき $\tau=0.036\text{sec}$ 、 $1/T=21.03\text{sec}^{-1}$ より、 $\tau/T=0.777$ 、 $j_{len}=1.6\text{m}$ のとき、 $\tau/T=1.053$ となっていた。このとき、継目長さが1.2mと1.6mで i_2 に大きな違いが見られなかったのは、極大値近くでは応答変位が大きく変化しないためと考えられる。このように、軸距共振時において、 i_2 と j_{len} の関係は衝撃荷重が作用する1自由度系の動的応答により概ね説明できることがわかる。

以上のことから、継目を同一台車の2軸の車軸が通過することによる加振振動数が橋りょうの固有振動数と一致すると、軸距共振により橋りょう動的応答がピークとなることが確認された。さらに、軸距共振発生時の動的応答の大きさは継目上の通過時間と橋りょうの固有周期

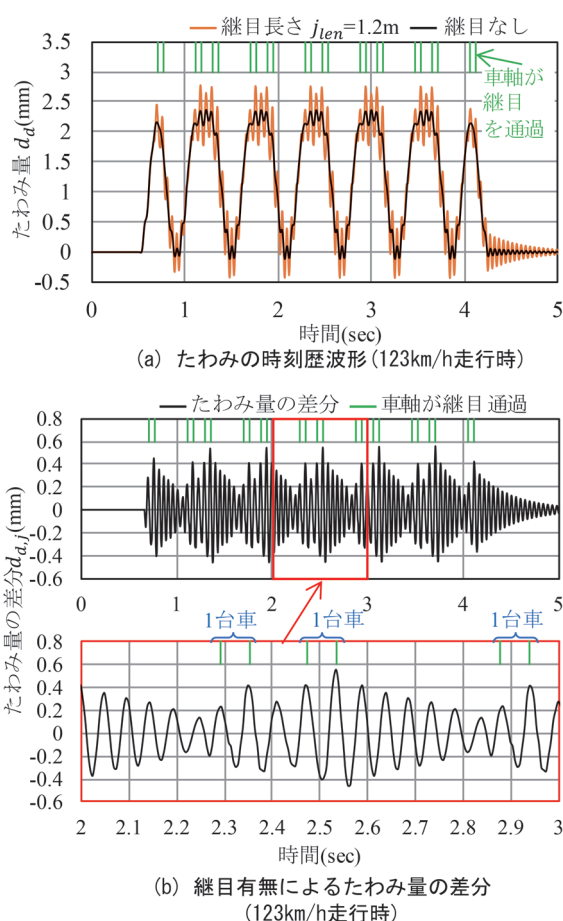


図10 たわみおよび継目の有無によるたわみ差分の時刻歴波形

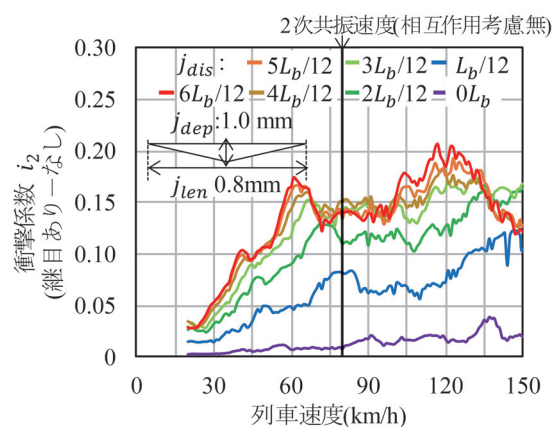


図11 継目の位置が変化したときの列車速度と衝撃係数 i_2 の関係

の比が0.78~1.0程度で i_2 が極大値を示し、1自由度系における衝撃荷重作用時の理論から概ね説明できることがわかった。

3.3 継目の位置の影響

図11に継目の位置 j_{dis} が変化したときの列車速度と衝

衝撃係数 i_2 の関係を示す。 j_{dis} が変化しても、軸距共振に関連した 120km/h、60km/h、40km/h 付近のピークが生じていることが共通していた。しかしながら、 j_{dis} が減少する、すなわち支承上に近づくにつれピーク時の i_2 も同様に減少し、 i_2 がピークとなる列車速度が高速側にシフトする傾向が表れていた。

まず、60～80km/h におけるピークに着目すると、これらは、2次共振の発生によるものであった。2次共振に対する共振速度は、 j_{dis} が減少するにつれて高速側へシフトし、最大で 20km/h 程度差が生じていた。これは、継目がスパンの支承側に位置することで、 $j_{dis} = L_b/2$ (= $6L_b/12$ 、スパン中央) の場合よりも 1次モードに付加される車両の質量が減少し、列車通過時に卓越する固有振動数が上昇したためと考えられる。いま、式(6)に $j_{dis} = L_b/12$ における共振速度 $V = 79\text{km/h}$ 、および加振間隔 $L = 2.1/2\text{m}$ を代入すると、固有振動数は 20.89Hz と得られる。したがって、 $j_{dis} = L_b/12$ のとき、固有振動数の入力値 21.03Hz に対して、橋りょうの固有振動数はほとんど低下しておらず、車両の付加質量効果が表れていないことがわかる。さらに、 j_{dis} が $4L_b/12$ より小さいケースでは、軸距共振が確認できないが、これは 150km/h 以降にピークがシフトしたものと考えられる。なお、 $j_{dis} = 0L_b$ (支承上) のときもわずかに i_2 が生じていたが、これは、列車が橋りょう上に進入する際にすでに車両が動揺しており、軸重が増加したためと考えられる。

次に図 12 に示す軸距共振発生時の衝撃係数の大きさと継目位置の関係について確認する。図は図 11 で確認された 2次共振時の i_2 と j_{dis} の関係について示している。既報⁶⁾ に示しているが、継目位置による衝撃係数の増加は、理論的には橋りょうの 1次モードに比例する。そこで、 i_2 と 1次モード形状 ψ_1 を比較した。ただし、 ψ_1 の係数 C は図 11 に示された 2次共振速度から車両の質量付加効果が小さく、車両と橋りょうの動的相互作用の影響が小さいと考えられる、 $j_{dis} = L_b/12$ において i_2 と ψ_1 が一致するように設定した。各 j_{dis} において i_2 と ψ_1 を比較すると、 j_{dis} が増加するにつれて、 i_2 は ψ_1 に対し相対的に小さく、 $j_{dis} = L_b/2$ における i_2 は ψ_1 に対しておよそ半分程度であった。

図 12 における i_2 と 1次モード形状 ψ_1 が合わない理由について、図 13 に示す継目位置と付加される質量及び減衰の関係から考察する。まず、図 13 (a) に示すように継目がスパン中央付近にある場合、継目通過時には台車および輪軸もスパン中央に位置しており、たわみも大きくなる。すなわちたわみ 1次モードのモード外力が大きい状態にあるが、一方で橋りょうと一体で振動する質量も大きく、橋りょうに付加される減衰も大きい。そのため、 i_2 は大きくなるものの、車両の付加質量および減衰により 1次モード形状よりも小さくなると思えら

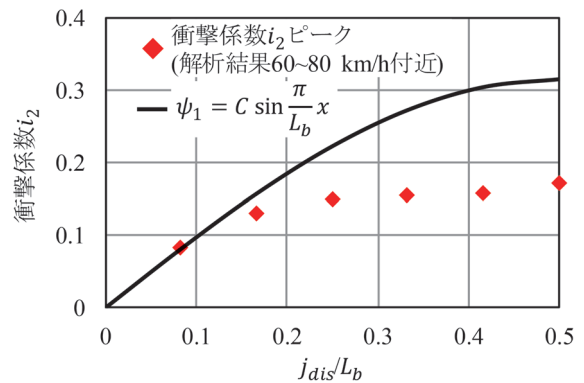


図 12 継目の位置が変化したときの列車速度と衝撃係数 i_2 の関係

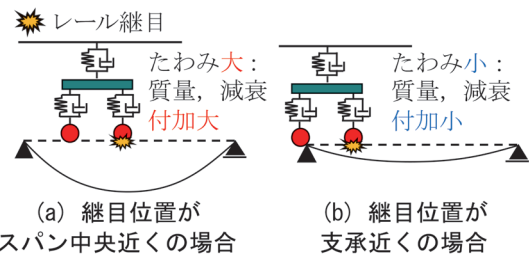


図 13 継目位置と付加される質量及び減衰の関係

れる。一方で図 13 (b) に示すように、継目が支承近くに位置する場合、継目通過時のたわみは小さいことから、たわみ 1次モードのモード外力も小さく i_2 は小さくなるが、橋りょうに付加される質量や減衰も小さいため、 i_2 は 1次モード形状よりも小さくならずほぼ同等になっていると考えられる。

以上のように、継目がより支承近くに位置することにより継目による衝撃係数が低下することが確認された。このとき、継目が支承近くに位置する場合、継目がスパン中央に位置する場合と比較して、橋りょうに付加される車両の質量が減少することで軸距共振が発生する速度は高速化するとともに、橋りょうに付加される車両の減衰も減少することから、共振時衝撃係数は継目が支承近くになるにつれ低下の程度が鈍化していた。

4. 鋼橋のスパンが橋りょうの動的応答に与える影響

4.1 解析条件

ここでは、スパン 10～50m の標準的な鋼橋の衝撃係数を分析することを目的として、橋りょうのスパンを変化させた解析を行った。表 2 に解析条件を示す。図 1 のモデルに対し、スパンは $L_b = 10 \sim 50\text{m}$ の 5 通りとし、鋼桁の固有振動数は $f = 180/L_b^{1.1}$ により求めた。このとき、鋼桁の高さは 1m で一定とした。鋼桁の剛性は質量と固

表2 橋りょうのスパンに着目した解析条件

パラメータ	値
鋼桁の固有振動数 f	$f = 180/L_b$
橋りょうスパン L_b (m)	10, 20, 30, 40, 50
鋼橋の単位長質量 ρA (t/m)	$0.05L_b + 0.25$
モード減衰比(%)	2
継目深さ J_{dep} (mm)	1
継目長さ J_{len} (m)	0.8
進入側支承～継目位置距離 J_{dis} (m)	$6L_b/12$ (スパン中央)
列車速度 (km/h)	20~150

有振動数から求めた。単位長さ当りの質量 ρA は実績より $\rho A = 0.05L_b + 0.25$ t/m と設定した。継目の特性に関するパラメータはすべて一定とし、 i_2 の算出のためにすべてのケースにおいて、継目なしの解析も実施した。なお、定尺レールは長さ 25m であることから、スパンが 25m を超える実橋りょうは複数の継目を有しているが、本研究では、継目通過時応答の把握のため、継目はスパンによらずスパン中央の 1 か所のみとした。また、軌道ばねの剛性は橋まくらぎ式を想定している。

4.2 スパンの影響と衝撃係数増加要因分析

図 14 に鋼橋の L_b が変化したときの列車速度と i_2 の関係について示す。いずれの L_b においても、矢印で示すように、ピークが認められ軸距共振が発生していることが確認できる。軸距共振時の i_2 は L_b の増加とともに減少していた。具体的には、 $L_b = 10$ m の時に 0.2 程度であることにに対し、 $L_b = 50$ m の時では 0.003 程度まで減少していた。この i_2 の減少には、3つの要因が考えられる。1つ目は L_b の増加とともに橋りょう上に存在する輪軸の数が増加するが、継目通過による衝撃荷重は 1 輪軸ごとに順次生じるため、衝撃荷重の割合が小さくなることである。2つ目は鋼橋上の車両ダンパの数が増加し、車両から付加される減衰の影響が大きくなること、3つ目は、鋼橋の固有振動数が低下し、継目通過時の衝撃荷重が低下することである。

図 14 には、設計標準の衝撃係数算定法¹⁾である、式(1)の i_c ($L_b = 10$ m, 50 m) と式(2)の i_α も示している。 i_c と i_α には継目以外の要因が主に考慮されているため、継目のみによる衝撃係数である解析結果と直接比較できるものではないが、ここでは L_b による傾向やおおよその数値の程度を把握するため比較する。

まず、動揺効果の衝撃係数 i_c と比較すると、 L_b が 10 m では、 i_2 がやや大きい値を示す傾向にある一方で、 L_b が 50 m では i_2 が i_c を大きく下回っていた。また、レール継目に対して余裕分が与えられている i_α と比較すると、 L_b が 10 m では、 i_2 が i_α よりも大きい値を示す傾向にある一方、 L_b が 20 m 以上では i_2 が i_α を大きく下回っていた。したがって、 i_2 は現行の衝撃係数算定法よりも L_b に対する感度が高いことがわかる。特に、 i_2 は車両

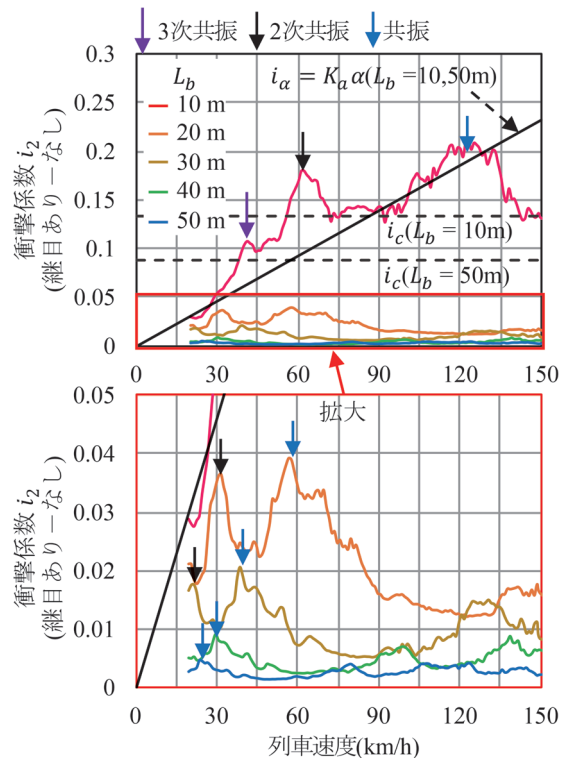


図 14 鋼橋のスパンが変化したときの列車速度と衝撃係数 i_2 の関係

の動揺により発生するものの、 i_c とは異なり L_b の感度が大きく、 L_b が 30 m では十分小さい値となった。

このように、継目による衝撃係数は、設計標準の衝撃係数算定法と L_b の感度が異なるため、高精度な衝撃係数算定法を構築するためには算定法を別に定める必要がある。継目による衝撃係数は、3章で示した結果も踏まえると、列車の軸配置と速度、桁のスパン、固有振動数が支配的なパラメータとなるため、これらを用いた算定法が必要になる。また、この場合、 i_c を軌道不整による衝撃係数と継目による衝撃係数を分離した算定法にする必要があると考えられる。

5. まとめ

本論文では、数値解析によるレール継目を有する鋼橋の動的応答増加メカニズムの解明と衝撃係数算定法の構築のための影響因子の抽出とその要因を分析した。以下に結論を示す。

- 1) 実測を行った鋼橋を対象に動的相互作用解析モデルの妥当性を検証した。その結果、提案する動的相互作用解析により、レール継目を有する鋼橋の静的応答および動的応答を定量的に再現できることを示した。
- 2) 一般化したレール継目落ち形状を設定し、レール継目区間の長さを変化させた解析を行った。その結果、継目通過による動的応答は、同一台車内の二軸の輪軸の通

過に伴う加振振動数と橋りょうの固有振動数が一致するときに発生する共振により増幅することを示した。軸距共振発生時の動的応答の大きさは、継目の通過時間と橋りょうの固有周期の比が0.78~1.0程度となるとき極大値を示し、1自由度系における衝撃荷重作用時の理論から概ね説明できることが分かった。

3) 橋りょう上のレール継目の位置を変化させた解析を行った。その結果、継目位置がより支承に近づくにつれて共振発生時の動的応答が低下する傾向となった。このとき、継目が支承近くに位置する場合、継目がスパン中央に位置する場合と比較して橋りょうに付加される車両の質量が減少することで、軸距を加振間隔とした共振が発生する速度は高速化するとともに、橋りょうに付加される車両の減衰も減少することから共振時衝撃係数の低下は鈍化していた。

4) 標準的な鋼橋を対象にスパンを変化させた解析を実施し、鋼橋における衝撃係数の大きさを評価した。その結果、設計標準の衝撃係数と比較して、レール継目通過による衝撃係数はスパンの感度が大きく、スパンの増加とともに大きく減少する。

5) 本検討に基づく、レール継目通過による衝撃係数は、列車の軸配置と速度、橋りょうのスパン、固有振動数が支配的なパラメータになると考えられる。

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），丸善出版，2009
- 2) 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256号，pp.35-47，1976
- 3) 徳永宗正，北川晴之，池田学：レール継目を有する鋼鉄道橋りょうの列車通過時動的応答の実測，構造工学論文集，Vol.69A，pp.293-305，2023
- 4) 北川晴之，徳永宗正，池田学：レール継目が橋りょうの列車通過時動的応答に及ぼす影響，土木学会論文集，80巻，ID: 23-15050，2024
- 5) 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
- 6) 徳永宗正，池田学，八木英輝：鉄道鋼橋および合成橋の非構造部材が主構造の曲げ剛性へ及ぼす影響，土木学会論文集，79巻，14号，ID: 22-15050，2023
- 7) 北川晴之，徳永宗正，池田学：列車/橋りょうの動的相互作用が橋りょうの列車通過時動的応答に及ぼす影響，土木学会論文集，79巻，14号，ID: 22-15059，2023
- 8) Harris, C.M. and Crede, C.E. "Shock and Vibration Handbook Vol.1 Basic Theory and Measurement", MacGraw-Hill Book Company Inc., 1961.