

レール継目での衝撃が鋼橋の疲労に与える影響評価手法の提案

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○向井 天 上山 裕太
松岡 弘大 小林 裕介
(株) 日建設計シビル 正会員 田辺 篤史

1. はじめに

鋼鉄道橋上にレール継目(図1)が敷設されている場合、レール継目で発生する衝撃力により、桁全体や部材局部の振動が励起され、鋼部材の疲労き裂の発生と進展を助長する一因となる。従来あまり着目されていない100Hz以上の高周波振動も疲労に影響を与える例も報告されている¹⁾。この高周波振動の影響を把握するにあたって、レール継目で発生する高周波振動のみに着目すれば、実質的に定点載荷であるとみなすことができる。定点載荷であれば、伝達関数を用いることができ、効率的にレール継目の影響の把握が可能となる。そこで、本研究ではFEM解析により求めた伝達関数を用いて、高周波振動による応力を再現し、レール継目での衝撃が鋼橋の疲労に与える影響を評価する手法を提案する。提案するにあたって、FEMモデルの周波数特性や減衰特性の設定が課題となるが、これらに関する知見は十分に蓄積されてない。そのため、評価手法に資するFEMモデルの構築方法についても併せて検討することとする。



図1 レール継目

2. 評価手法の概要

図2に本評価手法の概要を示す。本評価手法は、対象橋りょうを模擬したFEMモデルから求めた伝達関数を用いて、レール継目近傍の代表箇所での応力計測波形を逆解析してレール継目で発生する等価衝撃荷重波形 $P(t)$ を求め、そこから、順解析により任意点の応力波形を算出するものである。

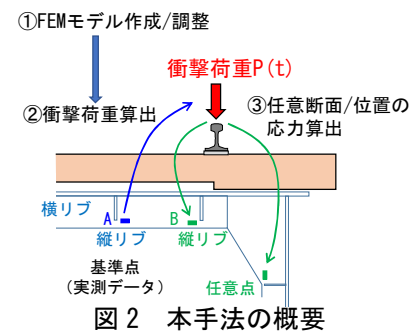


図2 本手法の概要

3. FEM解析での高周波振動による応力の再現

FEM解析にて高周波振動による応力を再現するため、FEMモデルの周波数特性や減衰特性について検討した。周波数特性については、FEMモデルのメッシュサイズやモデル化範囲を調整し、減衰特性については減衰定数を調整することで行った。なお、FEMモデルにより伝達関数を算出する手法には、材料減衰を考えない「周波数応答解析」と材料減衰を考慮する「複素応答解析」があるが、疲労への影響評価では減衰の影響が大きいと考えられるため、複素応答解析を用いることとした。

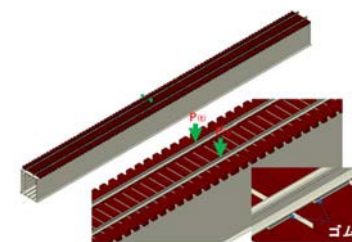


図3 FEMモデル

3.1 対象橋りょうとFEMモデルの概要

対象橋りょうは、レール継目で励起される高周波振動によって実際に疲労き裂が発生していた単線鋼上路箱桁とし、疲労き裂発生位置である図2の測点A、B(縦リブ横リブ交差部)を着目箇所とした。

図3にFEMモデルの全景を示す。モデル化範囲は対象の1径間分とし、境界条件は単純支持とした。鋼板部材は4節点シェル要素でモデル化し、対傾構等の一部の部材は2節点剛梁要素とした。レール、まくらぎ、軌道パッドといった軌道材料は8節点ソリッド要素を用いた。材料の特性値を表1に示す。

表1 材料の特性値

材料	E (N/mm ²)	v	密度
鋼材	200,000	0.3	7.8
まくらぎ	8,000	0.2	0.74
軌道パッド	2.98	0.49	0.94

3.2 周波数特性の調整

図4に測点Aの実測ひずみの周波数スペクトルと、FEMモデルの固有値解析結果を示す。周波数特性のキーワード 鋼鉄道橋, レール継目, 高周波振動, 伝達関数, 複素応答解析

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL042-573-7280

整は、これらのピーク周波数を合わせることで行った。ただし、固有値解析は橋りょう全体の固有振動が出力されるため、モード質量等で正規化し、測点 A の実測結果と比較できるようにしている。なお、本研究ではレール継目で励起される高周波振動に着目し、移動荷重により発生する準静的成分による低周波数帯の応力は評価対象外としている。FEM は実測より高い結果となった。そのため、周波数特性の再現性を高めるため、以下の因子を FEM モデルに考慮した。

①横リブのメッシュサイズ

当初横リブのメッシュサイズは、縦リブ間を4分割するサイズとしていた。これは、縦リブ間の横リブの半波長分の固有振動モードを表現するには十分なサイズであるが、1波長分の固有振動モードを表現するには荒いメッシュサイズである。そこで、縦リブ間の1波長分の固有振動モードを表現できるようにメッシュサイズを8分割とした。

②モデル化範囲

図4に示す解析結果は、軌道のモデル化範囲が、継目直下のまくらぎ1本分の幅としていた。そこで、衝撃の伝搬に影響を及ぼすと考えられる継目直下以外のレールやまくらぎを FEM モデルに追加した。

図5に①、②を FEM モデルに考慮した結果を示す。実測と FEM モデルのピーク周波数が概ね等しくなったことがわかる。

3.3 減衰定数の調整

材料減衰にはレイリー減衰を用い、質量比例減衰と剛性比例減衰のパラメータ α と β について調整を行った。減衰定数を設定するパラメータは、多くなりすぎると、支配的な因子が分かりづらく、実測結果との調整が複雑になるため、ある程度のグルーピングを行い、鋼材、まくらぎ等（継目部以外）、まくらぎ等（継目部）とした。このうち、まくらぎ等（継目部）は、車軸がレール継目を通過する際に、衝撃力によってまくらぎと鋼材の間に若干の滑りが生じると考えられるため、独自の値を設定することとした。滑りの影響は非線形であるが、等価な線形の大きめのレイリー減衰で疑似的に再現した。

調整にあたっては、各材料の α 、 β を仮定して応答を算出し、解析結果と実測の最大応力範囲の比が1に近づく様にした。図6に応力範囲の比の変化を示す。最終的に表2に示す値を得ることができた。

図7に減衰定数を調整した FEM モデルから算出した2台車通過あたりの測点 B の応力を示す。減衰定数の調整により、実測応力と解析結果が概ね一致し、実橋りょうの応力の再現が可能になった。再現した応力から疲労損傷度を算出することで疲労の評価が可能になる。

4. まとめ

本研究では、FEM モデルのメッシュサイズやモデル化範囲、減衰定数を適切に調整し、レール継目での衝撃が鋼橋の疲労に与える影響評価手法を提案した。

参考文献

- 1) 井上太郎, 小林裕介: レール継目での衝撃が箱断面上路鈹桁床組の疲労に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.555-565, 2021.3.

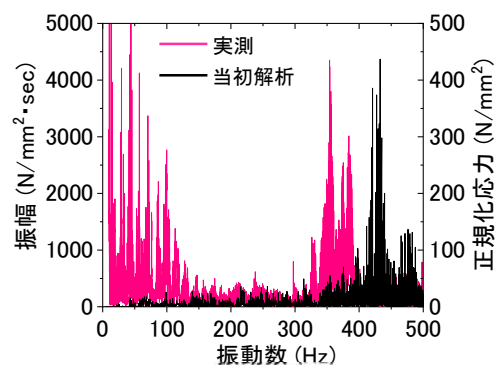


図4 実測と FEM モデルの比較

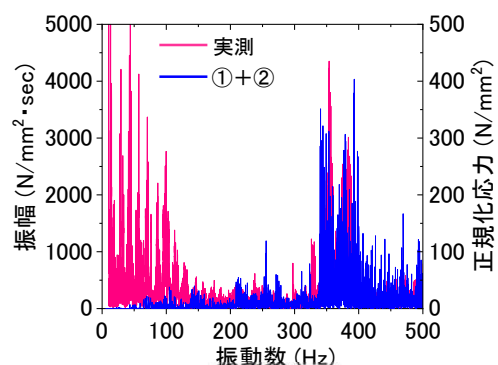


図5 FEM モデルの調整結果

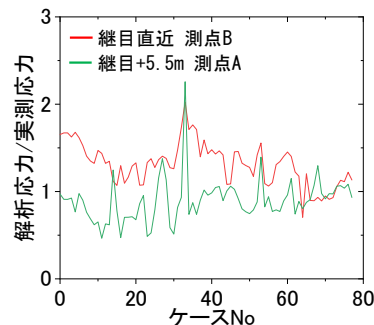


図6 減衰定数の調整結果

表2 設定した減衰定数

材料		α	$\beta (\times 10^{-5})$
鋼材(桁・レール)		37.6	0.908
まくらぎ等	継目部以外	301	7.27
	継目部	90250	182

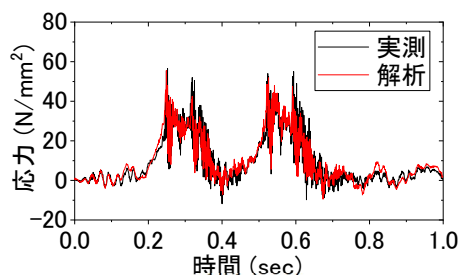


図7 測点 B の応力算出結果