

レール継目での衝撃が箱断面上路鋸桁床組の疲労に及ぼす影響

小林 裕介* 井上 太郎**

Effects of Impact Loads from Train Wheel Passing Rail Joints on Fatigue at Deck System of Steel Box Girders

Yusuke KOBAYASHI Taro INOUE

Impact loads from train wheel passing rail joint tend to cause fatigue cracks in steel girders near rail joint. In order to evaluate the effects of impact load on fatigue at the deck system of a steel box girder, we carried out stress measurements of steel girders at an existing bridge. The result showed that the impact loads at rail joints generates two types of high frequency natural mode vibration ; around 40Hz, and around 350Hz. It also showed that those vibrations lead to increasing range and cycle of the stress at welding joints of the deck system.

キーワード：レール継目，疲労，縦リブ・横リブ交差部，高周波振動，床組

1. はじめに

レールとレールの連結部はレール継目と呼び、一般的には25m間隔で配置され、レールの温度変化による伸縮を吸収できる構造となっている(図1)。レール継目が配置された軌道は、レール継目を溶接により接合した軌道(以下、ロングレール)と比較して軌道新設時の初期コスト削減等のメリットがあるものの、継目上を車輪が通過する際の衝撃(以下、「レール継目での衝撃」)は軌道変位の増加による乗り心地の低下を生じさせる要因となる。

鋼鉄道橋の観点から見たレール継目は、疲労き裂の発生を助長する因子の一つである(例えば¹⁾²⁾)。これは、レール継目での衝撃が桁全体や部材局所の振動を励起することによるものと考えられており、実際に、レール継目での衝撃に起因した疲労き裂が多数発生している。レール継目での衝撃は、ロングレール化により解消することが可能であるが、一方で、ロングレール化はそれに伴うロングレール縦荷重の増加による桁や橋脚の補強等が必要になる場合があり、費用対効果の観点から困難な場合も多い。

レール継目での衝撃は、レールと車輪との相互作用によるものであるため、橋梁におけるその影響はレールやまくらぎ等の軌道を支持する部材において特に大きいものと考えられる。軌道を支持する部材としては、例えば箱断面上路鋸桁(以下、箱桁)の床組が挙げられるが、箱桁の内部は密閉されているため軌道上からの目視によ

るき裂の確認が不可能であり、日々の巡回において疲労き裂の有無を確認することは困難である。そのため、箱桁の検査精度の向上が求められており、その精度向上に資する、レール継目での衝撃によって振動が励起されやすい部材や、その影響度や影響範囲についての情報を、現象を含めて解明しておくことが重要であると言える。

そこで、箱桁床組の縦リブ・横リブ交差部を対象に、レール継目での衝撃が疲労に及ぼす影響(以下、「レール継目の影響」)を明らかにすることを目的として、レール継目での衝撃により振動が励起されている部材やそのモードを推定し、疲労への影響度を評価した³⁾)。さらに、レール継目での衝撃によって生じる応力に対して、断面位置や列車速度、レール継目からの距離等の諸因子が及ぼす影響についても評価した³⁾)。本稿では、これらの結果について報告する。

2. 検討概要

レール継目の影響の評価は、実橋の応力測定により



図1 レール継目の構造(支え継ぎ)

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

** 元 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

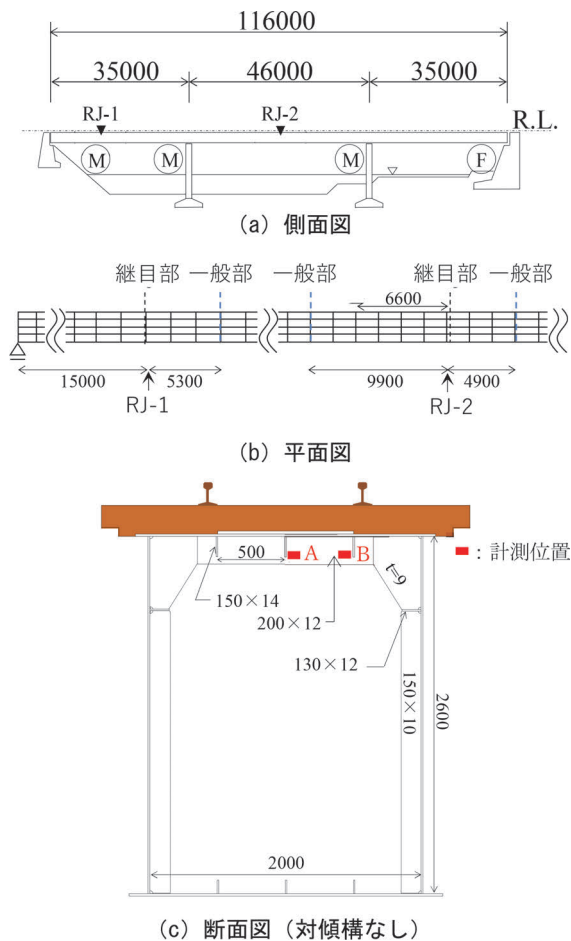


図2 対象橋梁一般図 (単位: mm)

行った。また、衝撃により振動が励起されている部材およびそのモードの推定には、応力測定結果に加えて固有値解析結果も参考にした。本章では、その検討方法の概要を示す。

2.1 対象橋梁

対象橋梁は、昭和40年代に設計された在来線の橋梁である。レール継目の構造は図1に示すとおりであり、軌道構造は橋まくらぎ式である。レール継目の支持方式は、継目の直下を軌道パッドおよびレール締結装置を介してまくらぎにより支える支え継ぎ形式である。対象橋梁の一般図を図2に示す。構造形式は単線の3径間連続箱断面上路鉸桁であり、桁高は2600mm、腹板中心間隔は2000mmである。断面形状が複数種類あり、1.4～1.8m間隔で配置された横リブ数本毎に対傾構ありの断面形状が存在する。本稿においては対傾構なしの断面(図2(c))における応力を測定した。

2.2 対象継手

今回対象とした縦リブ・横リブ交差部の溶接ディテールを図3(a)に示す。縦リブおよび横リブには平鋼が

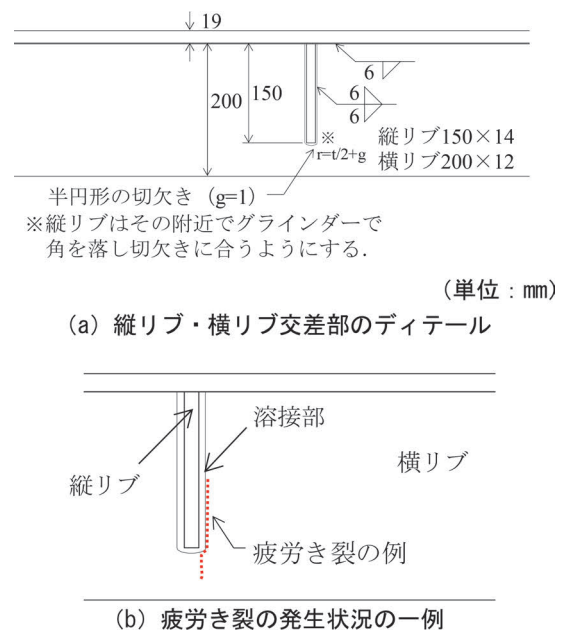


図3 縦リブ・横リブ交差部のディテールと疲労き裂の一例

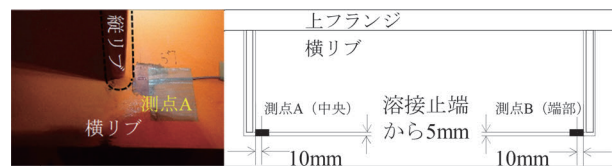


図4 縦リブ・横リブ交差部応力の測定位置

用いられており、板厚はそれぞれ14mm、12mmである。リブには下フランジが無く、橋軸方向に貫通した縦リブに合わせて切り欠かれている。縦リブと横リブはすみ肉溶接により接合されており、横リブの上下部にはスカラップがない構造である。本橋梁の一部の縦リブ・横リブ交差部では、横リブ側止端を起点とした疲労き裂が発生しており、図3(b)に示すように溶接部の下側から上下方向に進展していた。

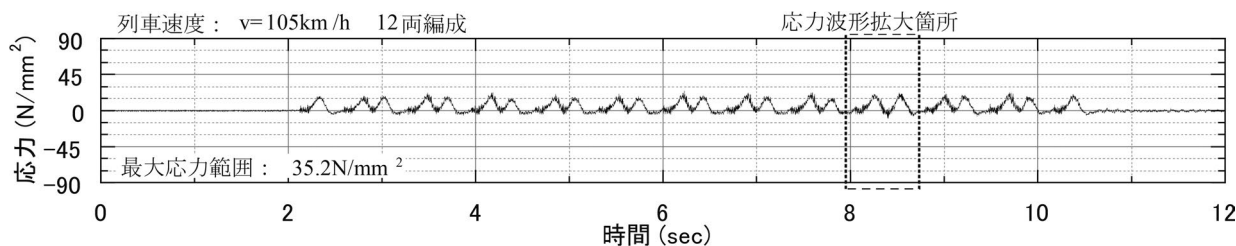
2.3 応力測定

実橋の応力測定は、図2(b)に示す継目RJ-1、RJ-2において、レール継目直下の断面(以下、継目部)とレール継目から5～10m程度離れた断面(以下、一般部)に対して実施した。

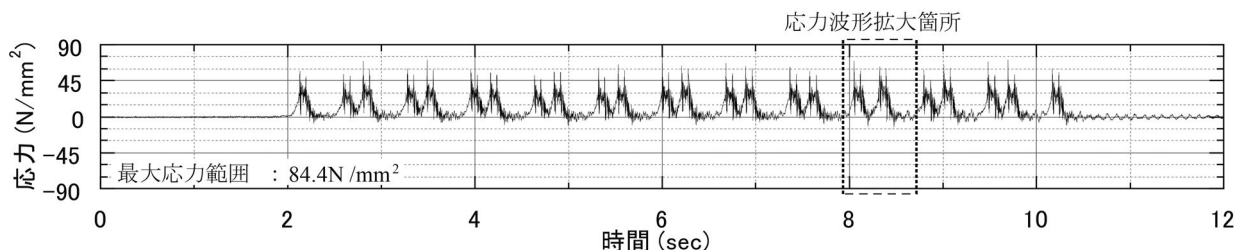
縦リブ・横リブ交差部応力の測定位置を図4に示す。縦リブ・横リブ交差部応力の水平方向は、疲労き裂が横リブ側止端から生じていたことを踏まえ、横リブ上で測定し、測定におけるサンプリング周波数は1kHzとした。

2.4 固有値解析

レール継目での衝撃により振動が励起される部材およ



(a) 一般部



(b) 継目部

図6 測点 A における 1 編成 (12 両) 通過時の応力波形

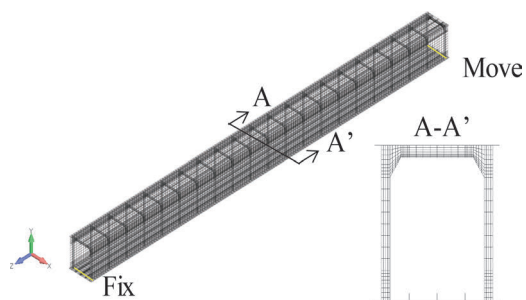


図5 固有値解析モデル

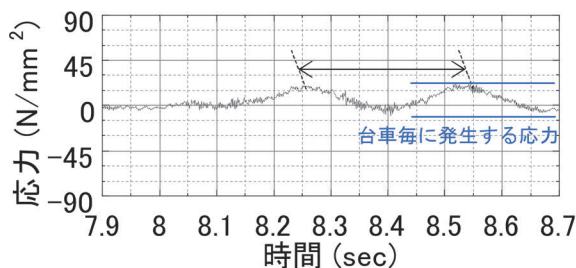
びそのモードを推定するために、固有値解析を実施した。図5に解析モデルを示す。モデル化は対象橋梁の側径間とし、固有値解析には、解析コードとしてNX Nastran, プリポストプロセッサとしてFemap 11.4.0を使用した。境界条件は単純支持とし、使用要素は、4節点シェル要素を基本とし、対傾構等の一部では2節点はり要素を用いた。要素分割は図5に示すとおりであり、節点数は38266、要素数は38880である。なお、レールやまくらぎ等の軌道はモデル化していないおらず、車両重量も考慮していない。

3. 縦リブ・横リブ交差部の応力性状と発生要因

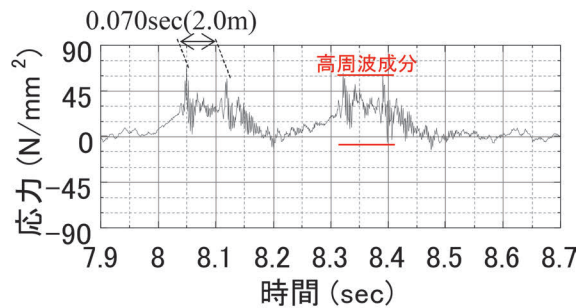
本章では、移動荷重により継目部の縦リブ・横リブ交差部に生じた応力について、一般部と継目部の応力測定結果から、応力の成分毎に発生要因となる変形モードを推定した結果を示す。

3.1 一般部と継目部の応力

RJ-1の一般部と継目部における、列車1編成(12両)通過時の縦リブ・横リブ交差部(測点A)の応力波形を



(a) 一般部



(b) 継目部

図7 2台車通過時の応力波形

図6に、図6を拡大した2台車通過時の応力波形を図7に示す。図6、図7より、一般部および継目部の応力は1編成通過時に複数回発生しており、そのピーク数は台車数(24台)とほぼ一致している。つまり、応力は台車毎に発生しているものと考えられる。また、継目部の応力は、台車毎に発生している応力に高周波成分が重畳しているように見える。高周波成分は、台車毎に生じる応力1波につき2回発生しており、ピーク数は車軸数(48軸)、ピーク間隔は軸距(2.1m)とほぼ一致している。つまり、高周波成分は車軸毎に発生しているものと考えられ、高周波成分の卓越断面は継目部のみであることから、高周波

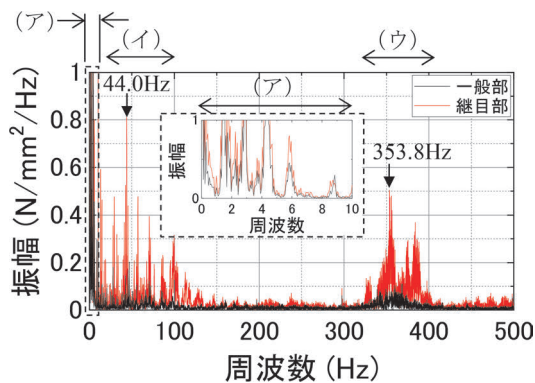


図8 1編成通過時応力のフーリエスペクトル

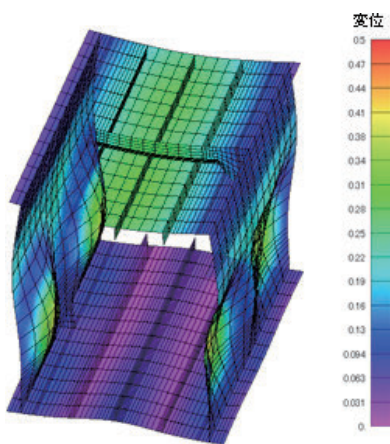


図9 箱断面の振動モード (41.2Hz)

成分はレール継目での衝撃に起因するものと考えられる。

3.2 車軸毎にレール継目での衝撃により発生する振動

車軸毎に生じるレール継目での衝撃により振動が励起されている部材やそのモードを推定する。

①レール継目での衝撃により卓越した応力の周波数

1編成通過時の応力波形から得られたフーリエスペクトルを図8に示す。図8から、卓越周波数は以下の3つに大別される。1つ目は10Hz未満の成分(以下、成分(A))、2つ目は44.0Hzにピークを有する成分(以下、成分(I))、3つ目は353.8Hzにピークを有する成分(以下、成分(U))である。上述の3成分のうち、成分(A)は一般部と継目部で振幅が概ね同程度であり、列車速度と台車間隔から算出した台車毎に生じる応力の周波数と一致していることから、成分(A)は台車毎の横リブのたわみにより生じる準静的な応力成分(以下、準静的な成分)であると考えられる。

一方で、成分(I)、成分(U)は一般部では振幅が比較的小さく、継目部では振幅が比較的大きいことから、レール継目での衝撃により励起される振動により卓越した応力成分であると考えられる。

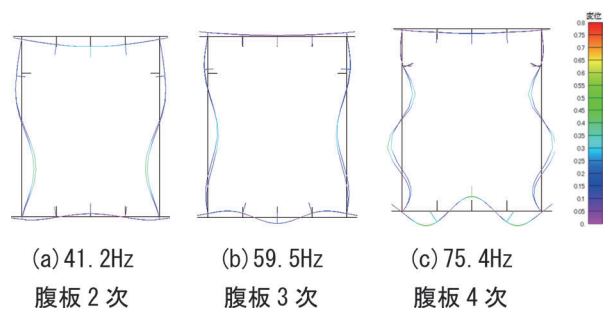


図10 箱断面の変形に起因する床組の固有振動モード (黒線: 変形前)

②成分(I)を生じさせる振動

実橋のピーク周波数は、図9に示す固有値解析から得られた、箱断面の変形と連成した床組のたわみ振動モード(以下、箱断面の振動)と概ね同程度であった。このことから、レール継目での衝撃により励起される成分(I)を生じさせる主たる振動は、箱断面の振動であると推定される。なお、箱断面の振動成分にスペクトルのピークが比較的多数存在したのは、図10に示すように腹板の変形次数や床組の橋軸方向の変形範囲が異なった固有振動モードが比較的狭い周波数帯に複数存在していたからであると推察される。

③成分(U)を生じさせる振動

成分(U)は、鋼橋の構造物全体系の振動モードの一般的な固有振動数よりも著しく高周波であることから、部材探知の局所的な振動により生じているものと推察される。部材単体の振動を横リブ単体の振動と仮定し、横リブを縦リブと上フランジに支持された長方形板とみなし、以下の式⁴⁾を用いて、横リブ単体の面外振動モード(以下、面外振動)の固有振動数を算出する。

$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho}} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 m, n は振動次数、 ρ は単位面積あたりの質量、 a, b は長辺、短辺の長さ、 D は板の曲げ剛性であり、 D は以下の式(2)より算出される。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu)} \quad (2)$$

式(2)中の E は弾性係数、 h は板厚、 ν はポアソン比である。なお、試算における境界条件は、横リブ高さを2倍とした4辺単純支持の板と仮定して算出した。式(1)および式(2)から固有振動数を算出すると、横リブ単体の面外振動の固有振動数は336.5Hzとなる。これは、図8に示す実橋で測定した成分(U)のピーク周波数と概ね同程度であった。また、実橋のピーク周波数は、図11に示す固有値解析から得られた面外振動の固

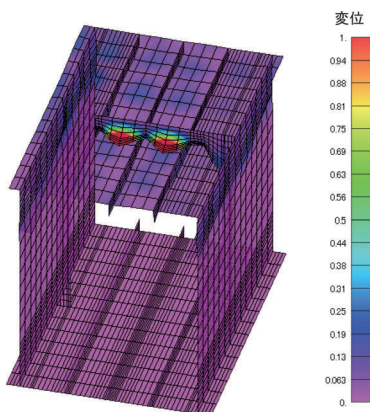


図 11 横リブ単体の面外振動モード (361.3Hz)

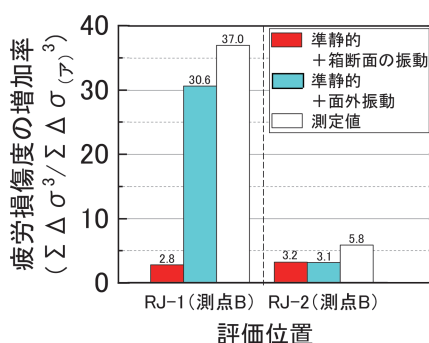


図 12 疲労損傷度の増加

有振動数とも概ね同程度であった。このことから、レール継目での衝撃により励起される成分 (ウ) を生じさせる主たる振動は、横リブの面外振動であると推定される。

4. レール継目での衝撃が疲労に及ぼす影響

本章では、箱桁床組の疲労に及ぼすレール継目の影響を、応力範囲 ($\Delta\sigma$) の繰り返し数に着目した三乗和 ($\Sigma\Delta\sigma^3$) (以下、疲労損傷度)⁵⁾ を評価指標とし、継目での衝撃により励起される振動の影響度に着目して評価した結果を示す。なお、応力範囲の頻度数にはレインフロー法を用いた。また、衝撃により励起される各振動成分の抽出は、周波数領域でフィルター処理をすることにより行った。

図 12 に、RJ-1 および RJ-2 の継目部で測定した縦リブ・横リブ交差部 (測点 B) における疲労損傷度の一般部に対する増加率を示す。図 12 では、測定値および測定値から周波数領域でフィルター処理をすることにより抽出した各振動成分を示している。疲労損傷度の増加率は、RJ-1 の継目部 (測点 B) の測定値で 37.0 倍であり、一般部と比較して大きく増加していた。また、横リブの面外振動による疲労損傷度の増加率は、30.6 倍となっており、RJ-1 の継目部の疲労損傷度を増加させた主たる要因は、横リブの面外振動と推定される。

次に、RJ-1 および RJ-2 の継目部 (測点 B) に対する応力測定結果を比較すると、疲労損傷度の増加率は、RJ-1 (測点 B) の測定値で 37.0 倍、RJ-2 (測点 B) で 5.8 倍であり、RJ-1 と RJ-2 の断面では継目の影響に差異がみられる。また、箱断面の振動成分は RJ-1、RJ-2 の継目部で概ね同程度であるのに対し、面外振動成分は RJ-1 と RJ-2 の継目部での差異が大きい。つまり、継目の影響は断面毎の差異が大きいと言え、本橋における RJ-1 と RJ-2 の継目部に生じていた継目の影響の差は、面外振動の励起に起因するものと考えられる。横リブ単体の面外振動が励起される要因としては、今後分析の深度化を図る必要があるが、RJ-1 と RJ-2 において横リブ直上のまくらぎ位置やその接触状態、レール継目条件等が異なっており、これらの条件の違いが因子の一つである可能性がある。

なお、本測定でのサンプリング周波数は 1kHz としているが、これは疲労き裂の主たる原因が箱断面の振動のように数十 Hz 程度の部材振動であると当初想定していたことによる。1kHz のサンプリングでは、350Hz 程度の面外振動の個々の波の最大値まで捉えられておらず、図 12 で示すような疲労損傷度については過少に評価している可能性があることを付記しておく。

5. 継目での衝撃に影響を及ぼす諸因子

レール継目での衝撃によって生じる応力に影響を及ぼす諸因子について、縦リブ・横リブ交差部の最大応力範囲に着目して評価した結果を示す。

5.1 列車速度

図 13 に、RJ-1 および RJ-2 の測点 A、測点 B における最大応力範囲と列車速度の関係を示す。ここで、最大応力範囲とは列車通過時の最大応力と最小応力の差を表す。継目部の最大応力範囲は、列車速度の上昇に伴い増加する傾向にある。一方で、一般部の最大応力範囲は、列車速度が上昇しても増加の割合は小さい。つまり、列車速度はレール継目での衝撃に及ぼす影響が大きいと考えられる。

次に、列車速度の上昇に影響される振動モードについて考察する。図 14 に示すのは、RJ-1 および RJ-2 の継目部で測定した最大応力範囲と列車速度の関係であり、箱断面の振動、面外振動の各成分について示している。図 14 (a) より、箱断面の振動成分は速度が上昇しても概ね一定であるが、図 14 (b) より、面外振動成分は速度の上昇とともに増加する傾向にある。つまり、列車速度の上昇は、縦リブ・横リブ交差部の面外振動成分の増加に影響を及ぼしやすく、結果として本橋梁の縦リブ・横リブ交差部の最大応力範囲を増加させていたものと考えられる。

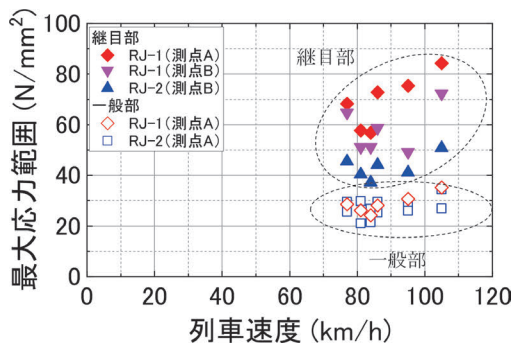


図 13 列車速度の影響

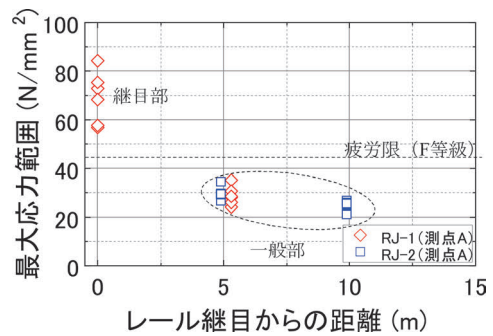
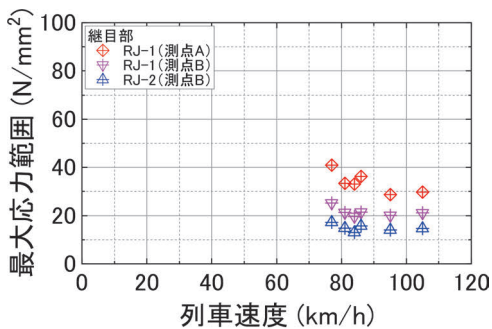


図 15 レール継目からの距離の影響



(a) 箱断面の振動成分

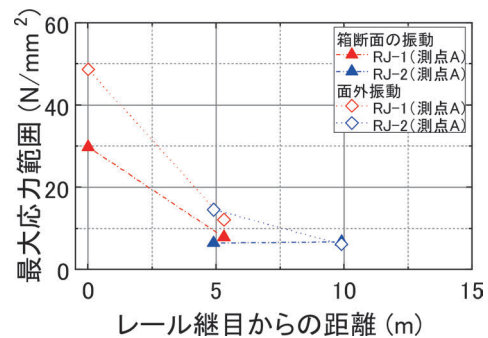
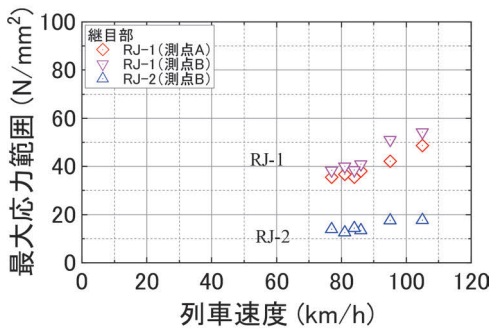


図 16 箱断面の振動成分，面外振動成分の影響範囲



(b) 面外振動成分

図 14 列車速度が与える各成分への影響

5.2 レール継目からの距離

図 15 に、RJ-1 および RJ-2 の測点 A に対する最大応力範囲とレール継目からの橋軸方向の距離の関係を示す。最大応力範囲は、一般部よりも継目部で大きく、レール継目から離れるに従い減少する傾向にある。

次に、振動の影響範囲について考察する。図 16 に示すのは、各振動成分の最大応力範囲である。最大応力範囲は、レール継目直下、5m、10m 位置でそれぞれ示している。箱断面の振動および面外振動成分は、レール継目から離れるに従い減少する傾向にあり、継目からの距離が 5m を超えると減少の割合が小さくなる。つまり、本橋梁におけるレール継目での衝撃の影響範囲は 5m 程度と考えられる。

6. まとめ

本稿では、在来線の箱桁を対象に現地応力測定を行い、一般部と継目部の応力性状の比較等により、レール継目での衝撃が箱桁の床組の疲労に及ぼす影響を評価した。さらに、レール継目での衝撃によって生じる応力に対して、断面位置や列車速度、レール継目からの距離等の諸因子が及ぼす影響についても評価した。

以下に、本研究で得られた成果を示す。

- ① レール継目での衝撃は、台車の移動による横リブのたわみにより発生する応力に、衝撃に励起される振動に起因すると考えられる比較的高周波の応力を重畳させることで縦リブ・横リブ交差部をはじめとする床組の発生応力を増加させる。
- ② レール継目での衝撃により励起される主な振動は 2 つあり、1 つは横リブ単体の面外振動、もう 1 つは箱断面の変形と横リブのたわみが連成する振動モードであると考えられる。
- ③ 縦リブ・横リブ交差部の疲労損傷度は、一般部に対して継目部で最大 37.0 倍に増加し、その主たる要因は横リブの面外振動であると考えられる。また、レール継目での衝撃が疲労に与える影響は断面毎の差異が大きい。
- ④ 列車速度の上昇に伴い、レール継目の影響は増加し、特に、横リブ単体の面外振動成分を増加させる。

- ⑤ レール継目の影響は、レール継目からの距離が離れるに従い低下し、本橋梁における影響範囲はレール継目から5m程度であった。

謝 辞

本研究における実橋応力測定にあたり、関係者の皆様より多大なるご協力を頂いた。ここに記して心より謝意を表す。

文 献

- 1) 幸田真也, 坂田鷹起: 斜角を有する鋼鉄道橋箱桁の応力調査, 土木学会第74回年次学術講演会, I-202, 2019
- 2) 丹間泰郎, 野中大輔, 中嶋啓助, 田辺勉: 在来線上路プレートガーダーにおける疲労損傷調査, 土木学会第61回年次学術講演会, 4-328, pp.653-654, 2006
- 3) 井上太郎, 小林裕介: レール継目での衝撃が箱断面上路鉸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
- 4) 武田信之: 詳解 振動工学, 共立出版, 2010
- 5) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例—2012年改定版, 技報堂出版, 2012