

鋼橋の疲労の累積を予測する



小林 裕介
Yusuke Kobayashi
構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室長



上山 裕太
Yuta Ueyama
前 構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室
研究員



向井 天
Takashi Mukai
前 構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室
研究員

はじめに

鋼橋を構成する部材は、列車が繰り返し通過することにより疲労が累積します。一定以上の疲労が累積するとき裂が発生し、最悪の場合にはそのき裂が進展して部材が破断し、列車を通せなくなることもあります。鉄道の鋼橋は、ほかのインフラ設備と比べても経年が長いことから、疲労には特に注意を払う必要があります。

一方で、列車が繰り返し通過することによって累積する疲労は、部材の外観を全く変化させません。したがって、目視を主体とした定期検査では、鋼橋のどこの部材に、どの程度の疲労

が累積しているかがわかりません。

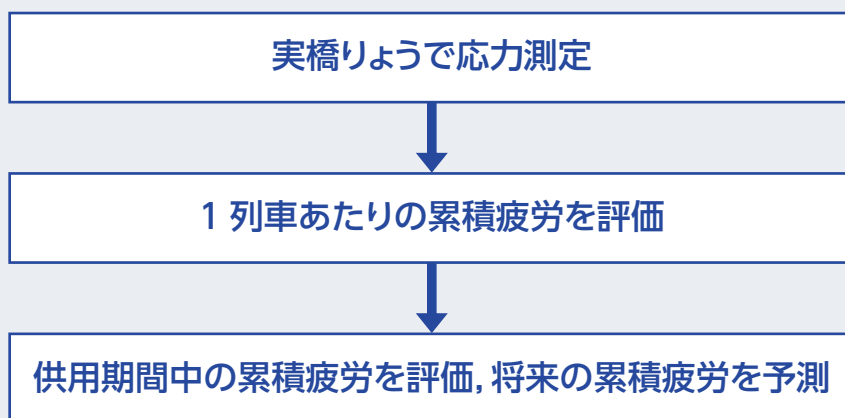
累積する疲労は、一般的に応力測定によって予測します。本記事では、まずこの累積する疲労の予測方法について紹介します。次に、疲労き裂の被害が多いレール継目の近傍において、累積する疲労を解析的に予測する方法を紹介します。

応力測定による累積疲労の予測

予測方法の概要

疲労は応力が繰り返されることによって生じる破壊現象です。たとえば、針金を繰り返し折

図1 既設鋼橋での累積疲労の評価の流れ



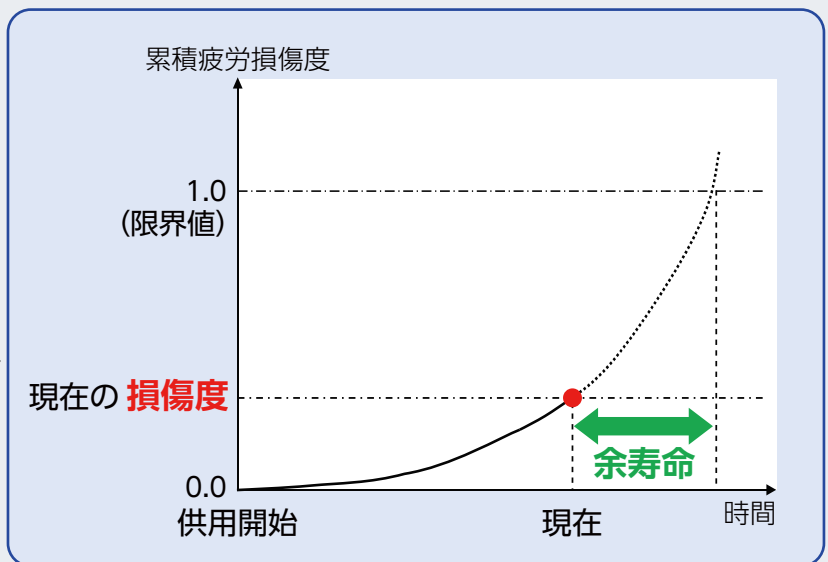
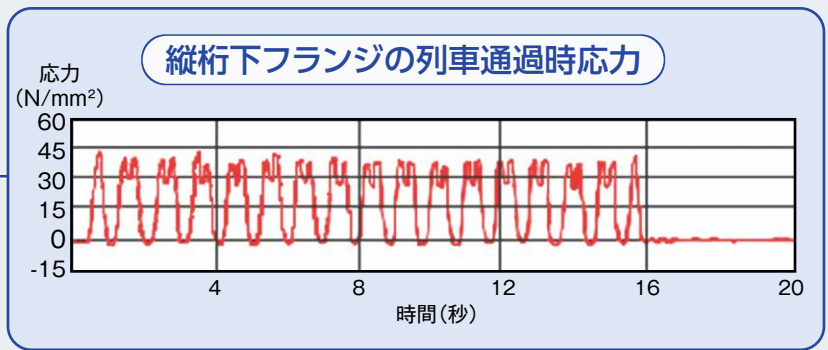
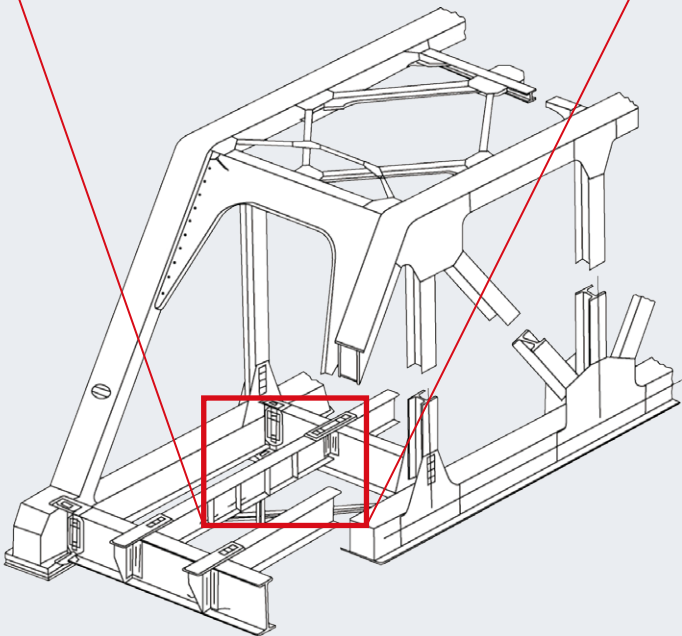
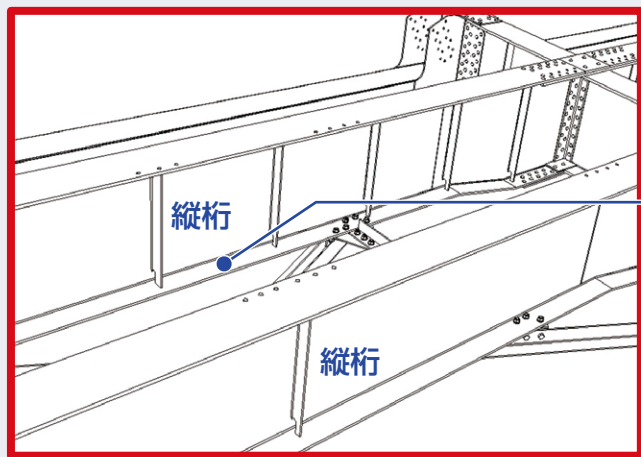


図2 累積疲労損傷度の算出イメージ

り曲げて、最終的に切断する方法も金属の疲労を利用したものです。鋼橋では、応力が数百万回のオーダーで繰り返されて疲労が生じます。したがって、累積する疲労は、対象とする部位における応力の変動履歴から評価・予測することができます。既設の鋼橋に対する具体的な手順としては(図1, 図2), 1列車が通過したときの対象部位の応力変動を測定し, 1列車あたりの累積する疲労を計算します。そのうえで, 供用期間中の列車本数を乗じることで, これまでに累積した疲労を計算する, もしくは, 予測したい期間の列車本数を乗じることで, 将来に累積する疲労, もしくは余寿命を予測します¹⁾²⁾。

累積疲労損傷度

累積する疲労の詳細な計算方法の説明は割愛しますが, 鋼材においては, 応力が変動する範囲の3乗と, 繰り返し数に比例して疲労が累積するという関係があり, その関係を用いて計算します。例えば, 50N/mm²という応力範囲と100N/mm²という応力範囲がそれぞれ1回ずつ生じていたとすると, 100N/mm²の方が8倍(= (100÷50)³)の疲労が累積するといった具合です。同じ応力範囲であれば, 繰り返し数が2倍になると, 累積する疲労も2倍になります。このような方法で計算し, 最終的には累積疲労損傷度とよばれる指標で疲労の累積の程度

を表します (図2のグラフの縦軸)。累積疲労損傷度は0.0～1.0で表し、1.0となったときに疲労破壊が生じるとしています。

対象部位

累積疲労損傷度を得るためには、基本的に部位ごとに応力を測定する必要があります。ただし、応力測定は測定点が増えるにつれ、労力やコストがかさみます。図2は、トラス橋の縦桁下フランジを対象とした評価の例になります。この対象部位は列車が通過する際に、縦桁がたわむことによって応力が生じています。したがって、たわみが最も大きくなる支間中央で応力も最も大きくなるため、支間中央を代表点とすれば、部材全長にわたって安全側に累積疲労損傷度を評価・予測することができます。実際の現場では、このような工夫を行っています。

レール継目近傍での累積疲労の予測

レール継目での衝撃による応力

レール継目 (図3) の近傍では、特に疲労が累

積しやすい傾向にあります³⁾。これは、列車の車輪がレール継目を通過する際に衝撃を生じて、鋼橋のレール継目近傍の部材を大きく振動させることが要因です。箱桁形式の鋼橋の縦リブと横リブの交差部 (図4) で測定した応力を図5に示します。このような部位では、台車が通過する際に縦リブや横リブがたわむことで応力が生じますが、レール継目近傍ではさらに車輪が通過するごとに大きな応力も生じています。この応力は、縦リブや横リブなどの鋼板が太鼓の面のように振動することで生じており、その振動数も1秒間に数百という高いものです。このように、レール継目近傍では応力が大きく、かつその繰り返し数も多くなるため、疲労が累積しやすくなります。一方で、レール継目で生じた衝撃によって振動する鋼板部材は多数存在し、すべての部材で応力測定を行い累積する疲労を評価・予測することは現実的ではありません。また、このような振動に対しては、評価・予測するうえでの代表点を抽出することも困難です。



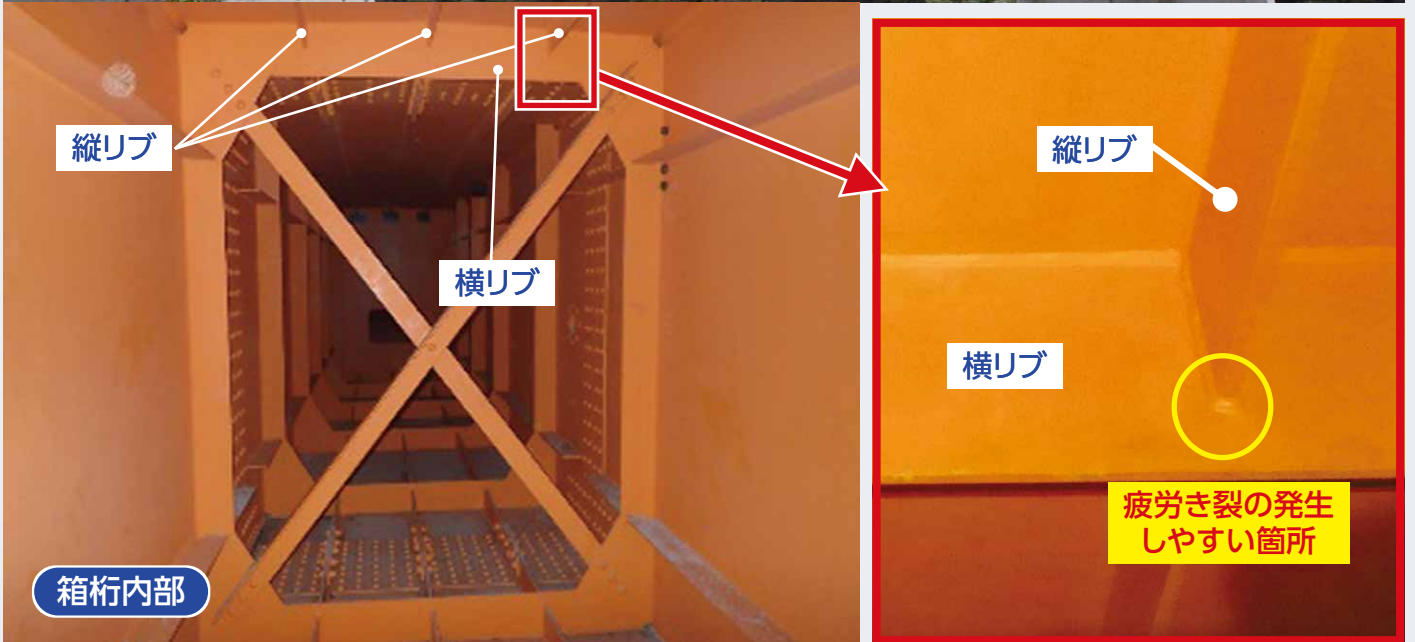
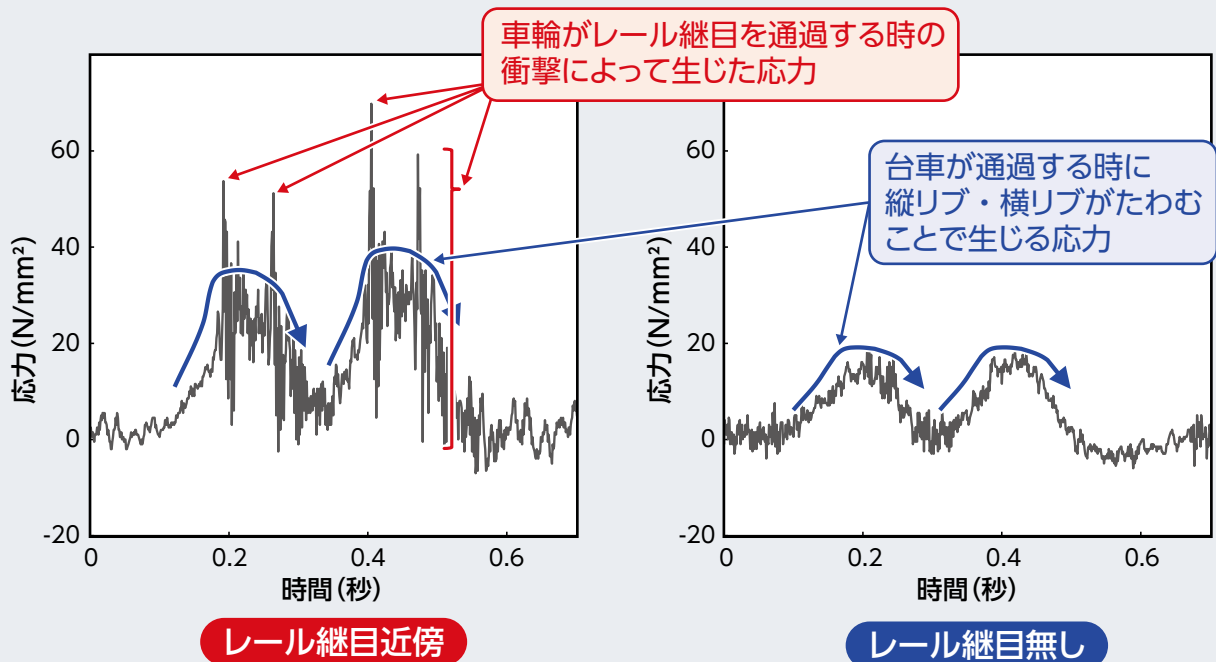


図4 箱桁形式の鋼橋の縦リブと横リブの交差点

図5 縦リブと横リブの交差点の応力



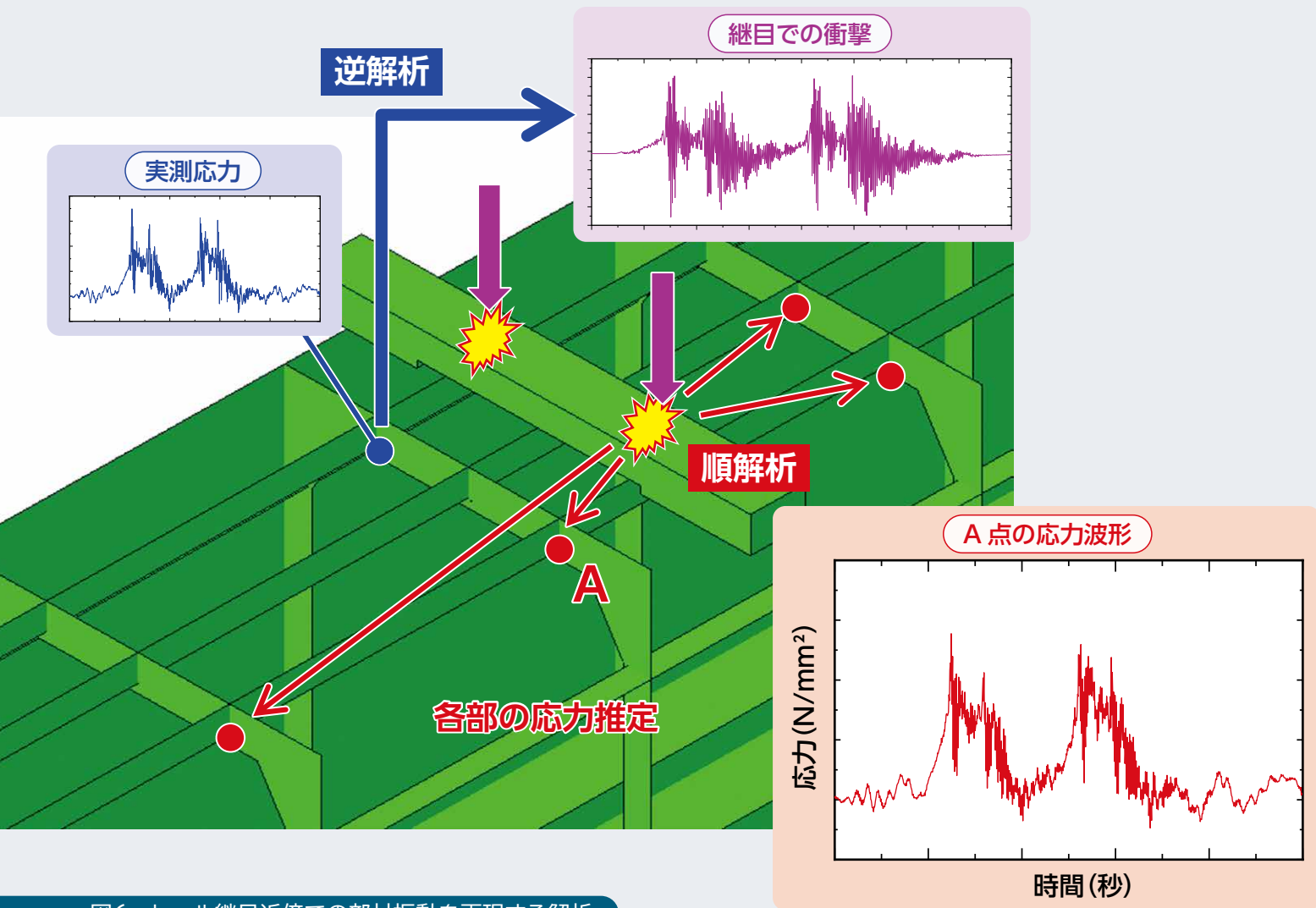


図6 レール継目近傍での部材振動を再現する解析

部材振動を再現する解析

このような問題に対処するため、レール継目近傍での部材振動を再現する解析手法を開発しました。実際の解析としては、1箇所での実測応力を入力すると、レール継目近傍における各部材の応力変動を得られるというものです。これまでレール継目近傍での振動や応力を解析的に評価することが難しかった理由は、車輪がレール継目を通る際の衝撃自体の評価が難しかったことにあります。この衝撃は、レール継目の状態や条件などによって大きく異なるためです。そこで図6に示すように、実測の応力変動から逆解析によってレール継目での衝撃を推定し、これをもとに各部の応力変動を順解析で推定することとしました。なお、本手法ではレール継目での衝撃と各部位での応力変動との

関係を有限要素法[®]により伝達関数[®]として求め、それを順解析と逆解析に利用しています。

検査着目箇所の抽出

開発した解析手法を用いて、レール継目近傍での累積疲労を予測した結果を図7に示します。●の大きさが累積疲労の相対的な大きさを表しており、このような結果によってレール継目近傍において衝撃が影響を及ぼす範囲や、検査での着目すべき箇所を評価できていることがわか

有限要素法

複雑な対象物を、直線や長方形、立方体といった単純な形状の均質な小領域（要素）に分割し、小領域の単純計算を重ね合わせることにより、複雑な対象物の近似的な解を求める手法です。

伝達関数

システムへの入力を出力に変換する関数です。

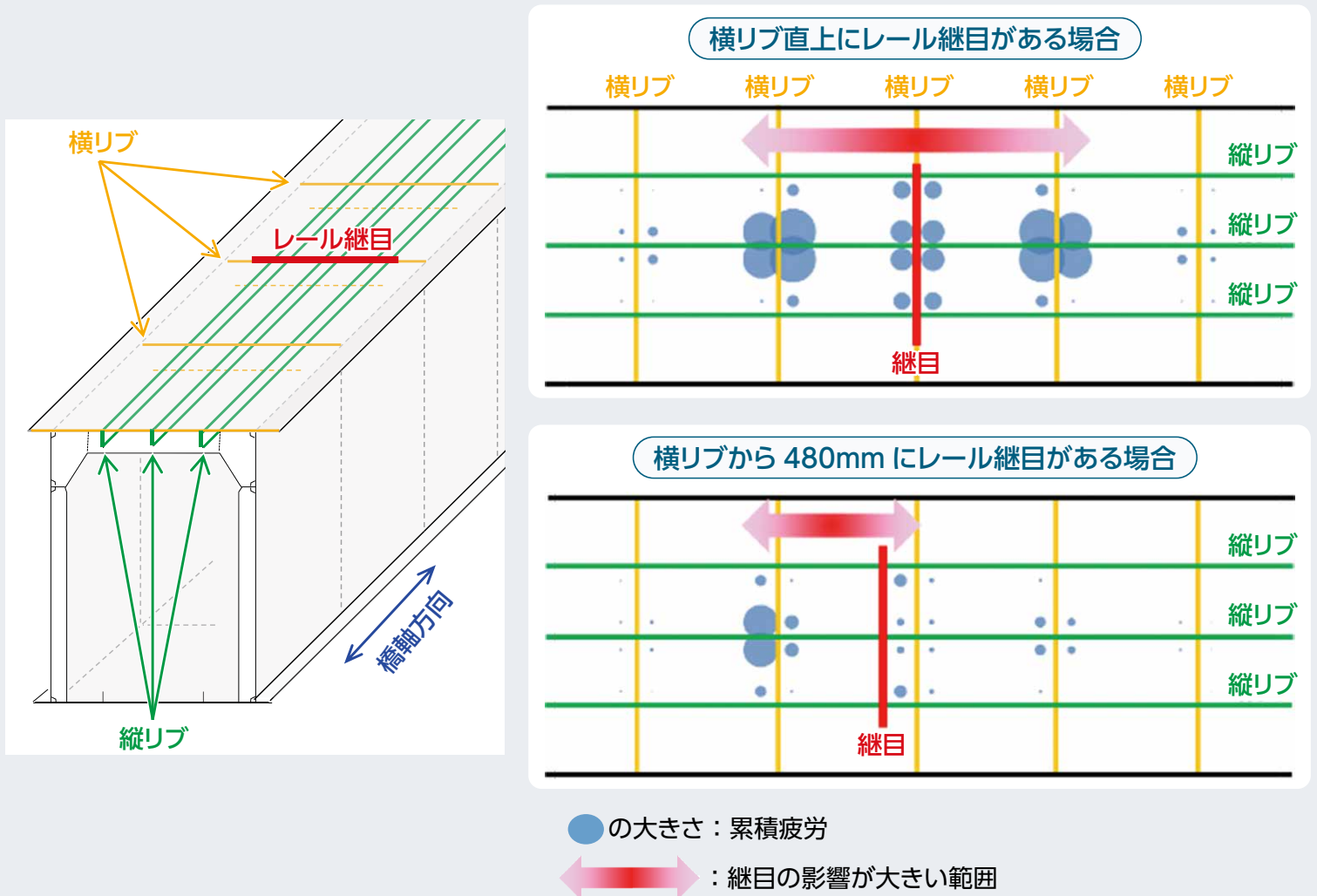


図7 累積する疲労の予測結果

ります。また、レール継目と横リブとの位置関係によって、累積疲労の大きい部位が変わってくることもわかります。

図7で示したようなマップにより、優先的に検査すべき箇所が明らかになるうえ、補強する場合もその優先順位を明確にすることができ、維持管理の省力化につなげることができます。なお、このようなマップは、累積疲労の絶対値まで評価し、余寿命の予測などをする場合は、個々の鋼橋のレール継目ごとに解析して作成する必要があります。一方で、レール継目近傍の累積疲労の相対比較だけであれば、構造形式ごとに代表となる鋼橋で解析してマップを作成し、そのマップを同一の構造形式の鋼橋で参照することができます。今後、構造形式ごとの解析事例を増やし、維持管理の実務で活用できるよう

なマップを増やしていきたいと考えています。

おわりに

本記事では、累積する疲労の評価・予測方法として一般的な応力測定による方法を紹介し、くわえて新しく開発したレール継目近傍の鋼橋部材の振動を解析する手法についても紹介しました。経年構造物が増え維持管理の負荷が年々増大している中で、このような技術が少しでも維持管理実務の省力化につながれば幸いです。RRR

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編） 鋼・合成構造物，丸善出版，2007
- 2) 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
- 3) 井上太郎，小林裕介：レール継目での衝撃が箱断面上路板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