

## 論文

## デッキ進展き裂を有する鋼床版 U リブ溶接部近傍の応力振幅比

上野萌音\*, 大西弘志\*\*, 齊田涼\*

\*岩手大学, 大学院総合科学研究科修士課程地域創生専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

\*\* 博士 (工学), 岩手大学教授, 理工学部システム創成工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

U リブ溶接部を模した試験片を対象とした振動疲労試験により, き裂部周辺の応力振幅比を確認することで, 疲労き裂の検出が可能である. 本研究では, デッキ進展き裂を有する U リブ鋼床版の FEM 解析を行い, U リブ鋼床版においても溶接部周辺の応力振幅比の変動を確認することができ, 疲労き裂の検出が可能であることを示した.

キーワード: 疲労き裂, U リブ溶接部, 応力振幅比, 鋼床版

## 1. はじめに

デッキ進展き裂の図を図-1 に示す. 1999 年 9 月に一般国道 134 号の湘南大橋においてデッキプレートに貫通した疲労き裂が発見されるなど<sup>1)</sup>, 交通量が多い鋼床版橋梁においてデッキ進展き裂が多数報告されている. き裂がデッキプレート上にまで進展すると路面を陥没させる恐れがあり, 道路利用者に大きな影響を与えるため, 早急に対処する必要がある. そのため, これらき裂の早期発見・補修工事が必要とされている.

通常, 鋼構造物の疲労き裂の検出を目的とした点検では, 溶接部周辺の目視点検に加え, 必要に応じて磁粉探傷試験や浸透探傷試験などの非破壊検査を併用している. しかし, 目視点検の精度は検査者の技量に左右される他, 磁粉探傷試験や浸透探傷試験においても構造物表面に発生したき裂のみに対応可能であり, デッキ進展き裂のような, 内部の損傷に対応することができない.

これらの課題を対処するために, 先行研究<sup>2)</sup>では鋼床版 U リブ溶接部を対象とした振動疲労試験を行い, 活荷重の大きさに依存しない新たなき裂検出方法について検討した. き裂の有無を判断する場合, 一方向の応力値だけで判断する場合には, その時に対象構造物に作用している荷重 (外力) も考慮しなければならないため, 判断が難しい. そこで疲労き裂を中心とした 2 方向の応力値の比をとることで無次元化し, き裂を定量的に検出できることを確認した. 疲労き裂の発生・進展に伴い, 長手方向の応力値が減少し, 長手直角方向の応力値が増加することで, それらの比である軸方向応力比 (長手直角方向応力値/長手方向応力値 [Y 軸/X 軸]) が増加する. 以上より, 軸方向応力比を確認することで, き裂の有無を判定できる可能性があることが示された.

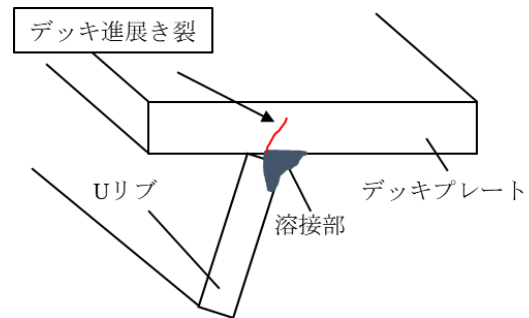


図-1 デッキ進展き裂

しかし, 疲労問題は実応力値ではなく, 応力振幅を用いて整理される. そこで本研究では, 先行研究の振動疲労試験のデータをもとに, 疲労き裂を中心とした直交する 2 方向の応力振幅の比である応力振幅比を用いて, き裂を定量的に検出することが可能か検討を行った.

また, 実橋においても本手法が適用可能かを検討するために FEM 解析を行った.

## 2. 先行研究で行われた振動疲労試験概要

使用した振動疲労試験機の概要図を図-2 に示す.

この試験機は試験体を台座に固定した片持ち梁として, 自由端側に設置した偏心モーターが回転することにより, 試験体を振動させ曲げ応力を発生させるものである. 載荷装置の試験体の取り付け位置や, 偏心モーターの回転速度を変化させることにより, 試験体に発生する応力の大きさや振動周波数を調整することができる. 事前に試運転を行い, 得られたひずみから求めた応力が目標の

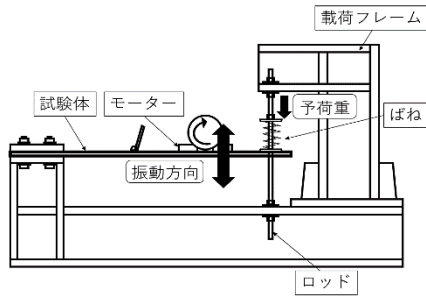


図-2 振動疲労試験概要図

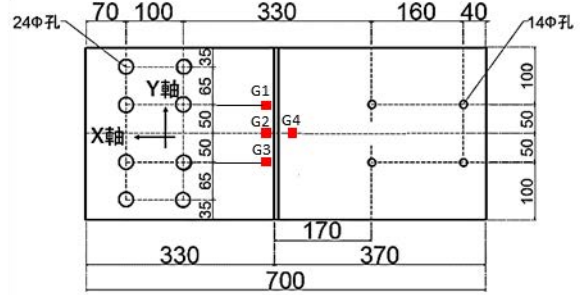
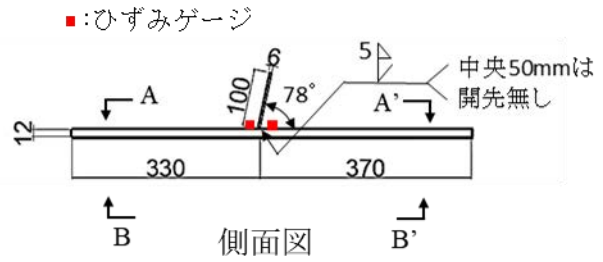
公称応力範囲となるように振動数を調整することで、試験体に加える荷重の大きさを調整した。また、モーターの回転振動のみでは、応力比が両振り ( $R=-1$ ) である疲労試験となる。しかし、本試験では、試験体の先端にコイルばねを設置し、このコイルばねによって試験体を押し下げた状態で疲労試験を行うことによって、試験体を与える応力比を片振り ( $R>0$ ) として疲労試験を行った。

### 2.1 試験体概要

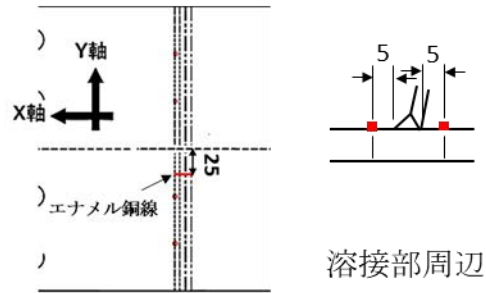
振動疲労試験で使用された試験体の寸法とひずみゲージ位置を図-3 に示す。試験体の材質は SM400A とし、鋼床版デッキプレートを模した板厚 12mm、幅 300mm、長さ 700mm の母材に、U リブの板厚 6mm に相当するリブが角度  $78^\circ$  で溶接されたものである。通常、U リブ溶接部における溶け込み量は板厚の 75%以上とする基準が設けられているが<sup>3)</sup>、本研究では図-4 に示すようにリブ両端から約 75mm を溶け込み量が大きい範囲、リブ中央約 50mm を溶け込み量が小さい範囲とすることで、試験体中央部にき裂の起点を生じさせた。必要溶け込み量を確保するためリブ両端は開先処理を施し、リブ中央は無開先とし、脚長 5mm 程度の部分溶け込み溶接およびすみ肉溶接としている。ひずみゲージは、応力集中の影響を含んだ応力を測定するために、実橋梁での計測<sup>4)</sup>、輪荷重走行試験<sup>5)</sup>を参考に、溶接止端から長手 (X 軸) 方向に 5mm、長手直角 (Y 軸) 方向にそれぞれ 50mm 離れた位置としている。

### 2.2 試験条件

試験終了条件は、長手直角 (Y 軸) 方向の最大応力値が長手 (X 軸) 方向の最大応力値より大きくなった場合、すなわち、それらの比である軸方向応力比 (Y 軸/X 軸) が 1 を超えた場合、または、図-3(b)に示すような、リブのない平面側に貼り付けられたき裂検出用のエナメル銅線を、溶接止端から発生した疲労き裂がこの位置まで到達し、破断するまでと設定した。各試験体それぞれでモーターの上限回転数を決め、1 サイクル当たり 13~14 分中 1 分間 (サンプリング間隔 4ms) の測定を行った。試験体の試験開始時の公称応力範囲は



(a) A-A'



(b) B-B'

図-3 試験体寸法とひずみゲージ位置

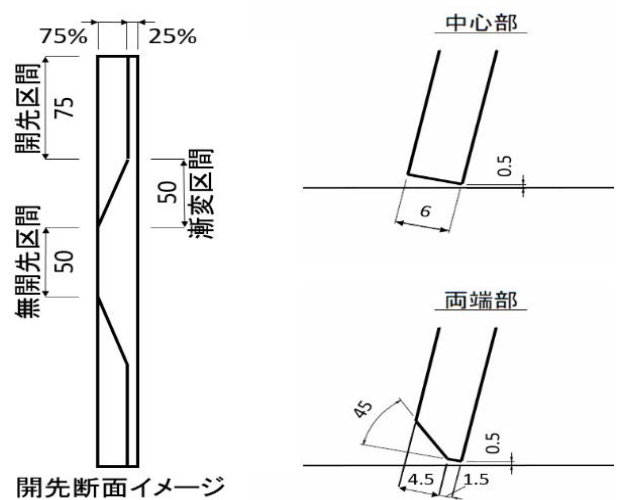


図-4 試験体開先断面図

99.8MPa, き裂は 155 万回で発生し, 試験終了時の繰り返し回数は 2,001,900 回であった。

### 3. 試験結果・考察

#### 3.1 応力振幅および応力振幅比の求め方

本検討では, 応力振幅を求めるにあたり, 三軸のひずみゲージによって計測したひずみを用いている。三軸ゲージの第 1 軸を長手方向 (X 軸), 第 2 軸を長手直角方向 (Y 軸) とした。これら 2 方向それぞれのひずみから以下の式 (1) を用いて, 長手方向 (X 軸) と長手直角方向 (Y 軸) の応力振幅をそれぞれ求めた。

$$\sigma_a = \{(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \times E\} / 2 \quad (1)$$

ここで,  $\sigma_a$ : 応力振幅 (MPa)

$\varepsilon_{max}$ : 最大ひずみ ( $\mu$ )

$\varepsilon_{min}$ : 最小ひずみ ( $\mu$ )

$E$ : ヤング率 (210GPa)

本検討では, 主応力が長手方向 (X 軸) を向いているため, 以下の式 (2) を用いて, 応力振幅比を求めた。

$$\text{応力振幅比} = \sigma_{aY} / \sigma_{aX} \quad (2)$$

ここで,  $\sigma_{aX}$ : 長手方向の応力振幅 (MPa)

$\sigma_{aY}$ : 長手直角方向の応力振幅 (MPa)

#### 3.2 き裂周辺における応力振幅比の変動

振動疲労試験のデータをもとに, 3.1 で述べた算出方法により応力振幅比を求めた。試験体における応力振幅比の変動を図-5 に示す。

U リブ閉断面の外側に位置する G1, G2, G3 ゲージにおいて, 繰り返し回数 180 万回から応力振幅比が増加していることが確認された。リブ外側に位置するゲージの中で G1 ゲージの応力振幅比の増加量が大きく, G3 ゲージが小さいのは, き裂が G1 ゲージ寄りに発生したためだと考えられる。G4 ゲージの応力振幅比の増加量がリブ外側に位置するゲージより大きいのは, U リブ溶接部に隔てられることなく, き裂進展による応力振幅比への影響を受けているからだと考えられる。このこ

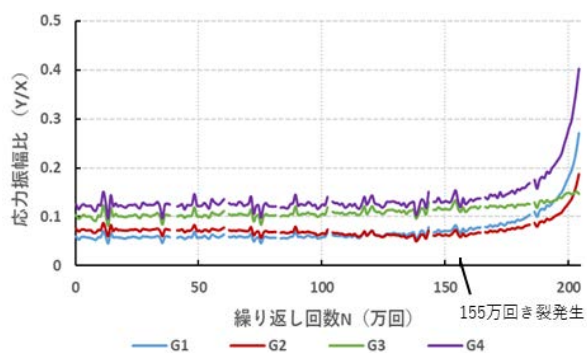


図-5 応力振幅比の変動

とから, 応力振幅比の増加傾向には溶接部の有無が影響することがわかる。

リブ外側におけるゲージ位置においてき裂発生・進展に伴い, 応力振幅比の変動が確認されたことから, 実橋にてゲージの貼り付けが可能な閉断面リブ外側において, 応力振幅比の増加を確認することで, き裂を検出できることが考えられる。

### 4. FEM 解析

この章では第 3 章に示した振動疲労試験の結果を基に, 実橋での有効性を検証するため FEM 解析を行った。

実橋において本手法を用いる場合, 橋梁に車両を通過させ, その時生じるひずみを鋼床版下面の閉断面リブ外側で測定し, 応力振幅比を算出することで, き裂を検出することを目標としている。しかし, 先行研究では U リブ溶接部を模した試験片を対象とした定点载荷によるき裂の検出について検討しており, 移動荷重下でのき裂部周辺の応力状態は明らかになっていない。そこで本研究では, 応力振幅比を用いたき裂検出方法が実橋においても適用可能か調べるために, デッキ進展き裂を有する実橋モデルを作成し FEM 解析を行った。

#### 4.1 解析概要

汎用有限要素解析プログラム (SOFiSTiK) を用いて解析を実施した。解析モデルの材料特性は一般鋼材を想定し, 鋼材のヤング率は  $E=210\text{GPa}$ , ポアソン比  $\nu=0.3$  と設定し, 8 節点ソリッド要素を用いた六面体要素および, メッシュのサイズが変化する境界部分で 4 節点ソリッド要素を使用し, モデル化を行った。

解析モデルは図-6 に示すような U リブ 3 本を有する鋼床版のモデルとし, 支承条件は pin-roller とした。

解析モデルにおける U リブは日本鋼構造協会規

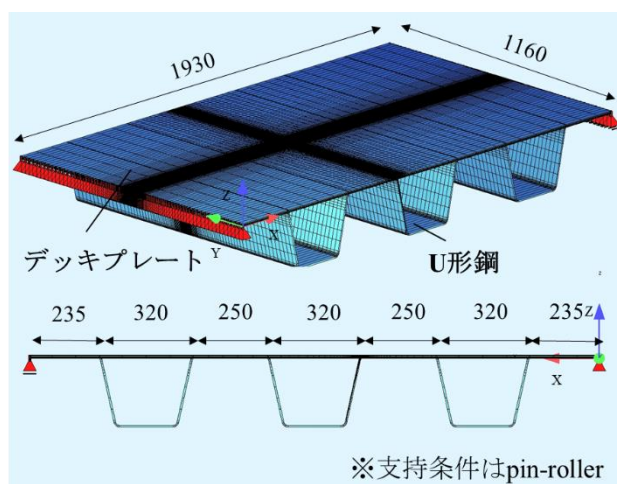


図-6 解析モデル鳥観図と側面図

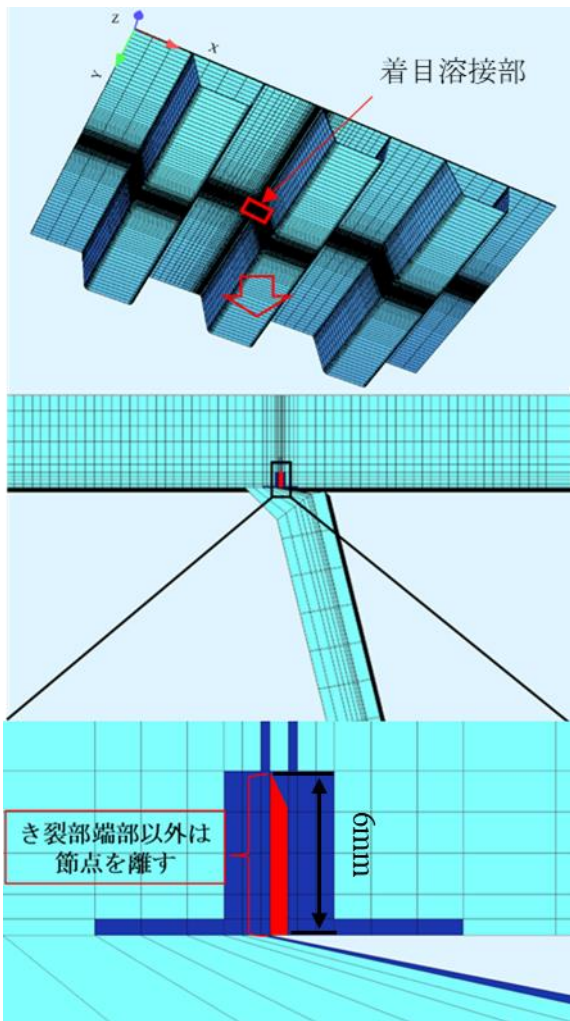


図-7 着目溶接部とき裂部詳細

格 U-320×240×6-40 とし、デッキ厚 12mm, U リブ厚 6mm, 隣接する U リブ同士の間隔 250mm とした。き裂は U リブの溶接ルート部から母材の板厚方向に進展するデッキ進展き裂を想定した。き裂長さは 0mm~36mm までの長さを 12mm 毎に解析を行い、き裂幅は 0.1mm, き裂深さは、き裂深さ/き裂長さ=1/2 と仮定してモデルを作成した。着目溶接部とき裂部詳細を図-7 に、各解析モデルのき裂長さ詳細を図-8 に示す。図-7 において赤色がき裂部を示している。図-8 において、赤線はき裂部、黒点は閉断面リブ外側 G2 ゲージ位置、灰色は溶接部を示しており、黒の太線で囲まれた部分は本研究の検討範囲を示している。

本研究では、実測に基づいた溶接脚長を参考に、溶け込み量を 75%としている。検討対象である溶接部近傍のメッシュサイズは 1mm を基本とした。

#### 4.2 解析ケース

解析ケースはき裂長さ 4 パターンと、荷重位置 3 パターンを組み合わせ合わせた計 12 ケースとした。なお、荷重荷重はシングルタイヤを想定し、荷重範

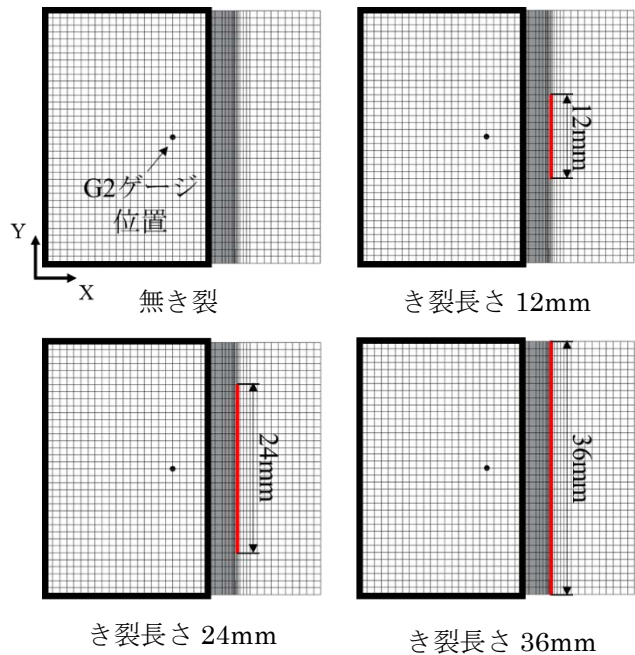


図-8 き裂長さ詳細

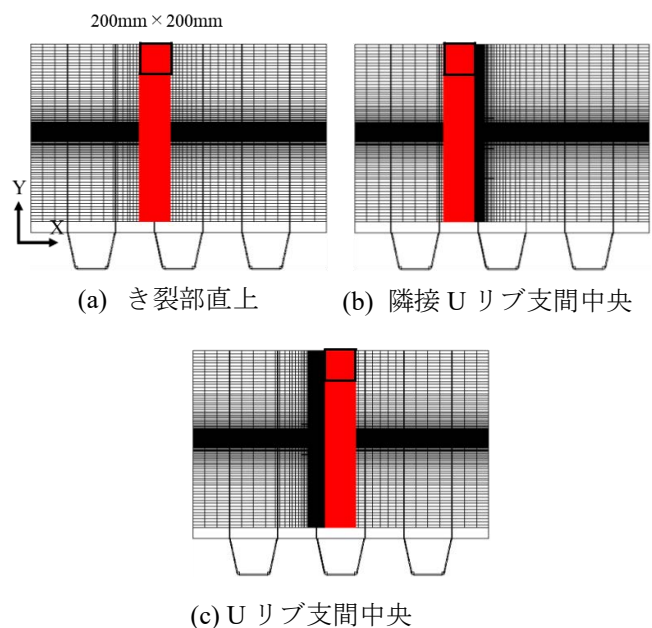


図-9 荷重位置詳細

囲(200mm×200mm)に 50kN を等分布荷重として与えた。荷重位置は、図-9 に示すように、き裂部直上(a), 隣接 U リブ支間中央(b), U リブ支間中央(c) の 3 パターンとした。移動荷重を再現するために橋軸方向に 120mm ずつ移動させた計 9 点に荷重した。

#### 4.3 応力振幅および応力振幅比の算出

解析の 1 例を図-10 に示す。図-10 はき裂長さ 12mm の解析モデルに対して隣接 U リブ支間中央(b)に荷重した 9 点の荷重位置を示しており、グ

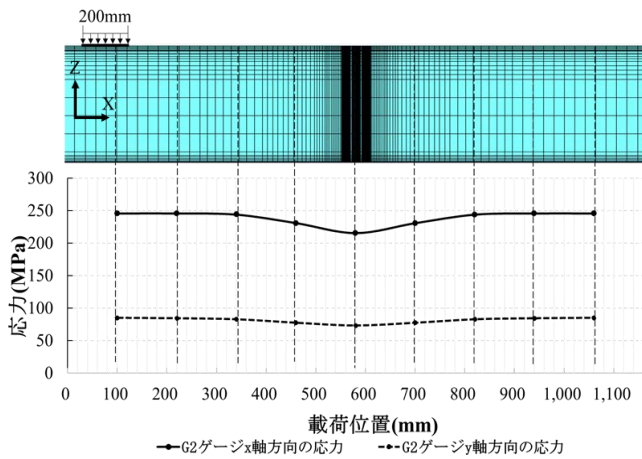


図-10 荷荷位置と応力の関係

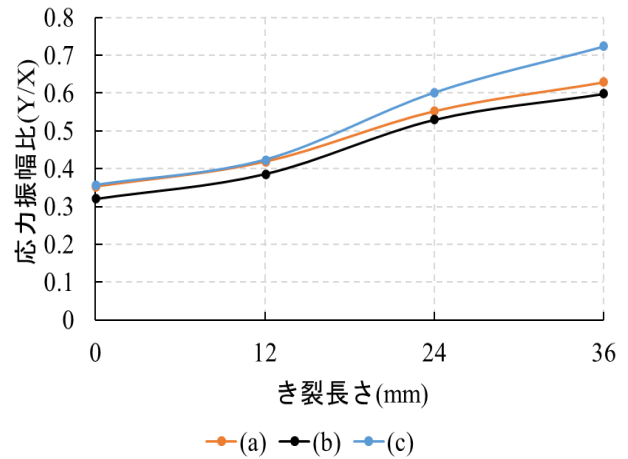


図-11 各荷荷位置における応力振幅比の変動

ラフはそれぞれの荷荷位置に対応する G2 ゲージ位置での各軸方向の応力を示している。実線を X 軸方向、破線を Y 軸方向の応力とし、この結果をもとに 3.1 で示した計算式により振動疲労試験と同じゲージ位置の G2 位置での応力振幅および応力振幅比をき裂長さ 0mm から 36mm の各解析モデルにて算出した。

#### 4.4 解析結果

それぞれの荷荷位置における G2 ゲージ位置の応力振幅比の変動を図-11 に示す。試験結果同様、いずれの荷荷位置においても、き裂の発生・進展に伴い、閉断面リブ外側 G2 ゲージ位置における応力振幅比が増加する傾向が確認された。

荷荷位置(c), (a), (b)の順に応力振幅比の増加量が大きいことから、荷荷位置が橋軸直角方向に移動することで、き裂進展に伴う応力振幅比の増加傾向が異なることがわかる。

次に、各荷荷位置とき裂長さごとの応力振幅比コンター図を図-12 に示す。コンター図における検討範囲は図-8 の黒線で囲まれた部分である。

荷荷位置(a)の場合、無き裂では検討範囲のすべての要素にて応力振幅比 0.40 未満が確認された。

(以下、応力振幅比 0.40 以上の範囲を影響範囲とする)き裂長さ 12mm では応力振幅比 0.40~0.55 の範囲がき裂部周辺にて確認された。き裂長さ 24mm では影響範囲が拡大し、応力振幅比 0.60 以上の範囲もき裂部周辺に確認され、き裂長さ 36mm においても影響範囲が拡大していることがわかる。

荷荷位置(b)の場合、無き裂では応力振幅比 0.40~0.50 の範囲がき裂部から X 軸方向に 26mm 離れた要素にて確認された。き裂長さ 12mm ではき裂部周辺にて応力振幅比 0.40~0.55 の範囲が確認され、き裂長さ 24mm ではき裂部周辺およびき裂部から離れた影響範囲において応力振幅比が上昇した。き裂長さ 36mm でも同様に、影響範囲の拡大が確認できる。

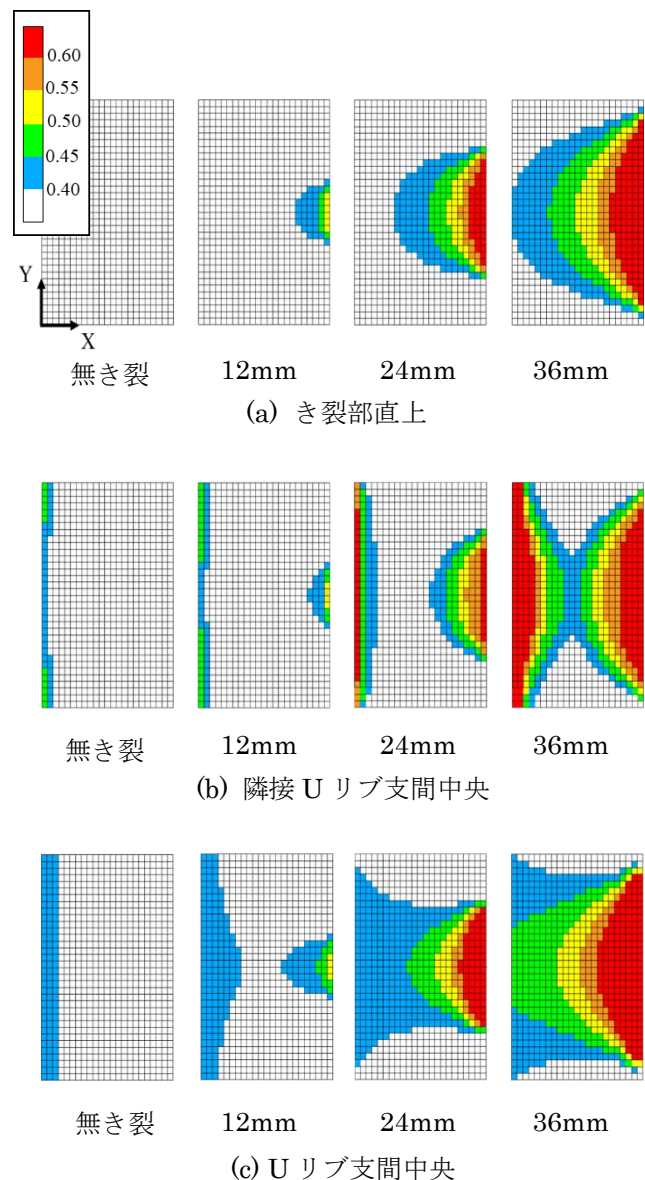


図-12 各荷荷位置における応力振幅比コンター図

荷重位置(c)の場合、無き裂では応力振幅比 0.40~0.45 の範囲が裂部から X 軸方向に 24mm 離れた要素にて確認された。き裂長さ 12mm ではき裂部周辺にて応力振幅比 0.40~0.55 の範囲が確認され、き裂部から離れた影響範囲も拡大した。き裂長さ 24mm では、き裂部から離れた要素とき裂部周辺の影響範囲どちらも拡大し、き裂長さ 36mm においても同様に影響範囲の拡大が確認された。

荷重位置ごとに結果を比較すると、無き裂では、荷重位置(a)でのみ検討範囲にて影響範囲が確認されなかった。有き裂では、荷重位置(c)での影響範囲の拡大が他の荷重位置に比べてより顕著であった。

全ての荷重位置においてき裂の進展に伴いき裂部周辺における影響範囲の拡大、応力振幅比の増加が確認されたが、荷重位置(b), (c)ではき裂部から離れた要素においても影響範囲の拡大、応力振幅比の増加が確認された。これは、荷重位置を変えたことで主応力の方向が変化し、同じき裂長さであってもその傾向に違いが出たと考えられる。

これらの解析結果から、実橋においても閉断面リブ外側にて応力振幅比の変動を確認することで、き裂の有無を判定できると考えられる。

## 5. まとめ

先行研究である鋼床版Uリブ溶接部を対象とした振動疲労試験のデータを参照し、き裂周辺の応力振幅比の変動を確認することで、き裂の有無を定量的に判定可能か検討を行った。

次に、実橋において本手法が適用可能かを判断し、影響範囲を明らかにするために3本のUリブを有する鋼床版を対象としたFEM解析を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

(1) Uリブ溶接部を模した試験片を対象とした振動疲労試験により、き裂部周辺の応力振幅比を確認することで、疲労き裂の検出が可能であることが示された。

(2) FEM解析により、移動荷重下におけるデッキ進展き裂を有する実橋モデルにおいて、振動疲労試験と同様に、き裂の進展に伴い、すべての荷重位置パターンで、閉断面リブ外側での応力振幅比の上昇が確認された。このことから、実橋においても閉断面リブ外側の応力振幅比の変動を確認した場合、き裂の有無の判定が可能であると考えられる。

(3) 移動荷重の荷重位置が異なる場合、同じき裂長さであっても、き裂を有する溶接部周辺の応力振幅比の影響範囲が異なる。

今後は、デッキ進展き裂が発生する可能性が高いUリブと横リブ交差部を中心としたFEM解析を行い、き裂部周辺の応力振幅比の影響範囲を明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 菊池孝雄, 児玉孝喜, 後藤和満: 湘南大橋における鋼床版の疲労対策, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.1-10, 2007.
- 2) 千葉慎二, 堀合聡, 三浦真季, 大西弘志: 鋼床版 U リブ溶接部に発生する疲労き裂周辺における軸方向応力比の検討, 土木学会 第10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2018.7.
- 3) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究-実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討-, 国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書 No.471, 2008.8.
- 5) 吉浪泰祐: 摩擦型ゲージを用いた鋼床版 U リブ・デッキプレート溶接部に発生する疲労き裂の検出手法, 2010.2.

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)