

論文

鋼床版 U リブ溶接部に発生する疲労亀裂周辺における軸方向応力比の検討

千葉慎二*, 堀合聡**, 三浦真季***, 大西弘志****

*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)

**岩手大学, 大学院工学研究科博士後期課程機械・社会環境システム工学専攻
(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

***株式会社長大 (〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町一丁目 20 番 4 号)

****博 (工), 岩手大学准教授, 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)

通常, 鋼橋の主たる損傷の一つである疲労損傷の検査は目視により行われていることが多い。しかし, 目視点検は検査者の経験や技量に左右される他, 非破壊探傷試験においても内部の損傷には対応できない場合がある。本検討では, 鋼床版の U リブ溶接部を模した試験体を用い, 振動疲労試験を行い, 疲労亀裂周辺の 2 方向の軸方向応力の値を比較することで, 定量的な亀裂検出方法を提案することができないか検討を行った。

キーワード: 疲労, U リブ溶接部, 応力, 軸方向応力比, 鋼床版

1. はじめに

鋼道路橋の床版は, コンクリート系床版, 鋼・コンクリート合成床版, 鋼床版に大別される。

鋼床版は比較的薄板のデッキプレートに縦リブ, 横リブの補剛材を溶接した薄板集成構造であり, 床版としての役割のみならず, 主桁の一部としての機能を有している。そのため, 従来のコンクリート系床版に比べ軽量であり, 下部工への負担も軽減されることや構造高を低くできることなどから, 死荷重の比率が高い長大橋や跨線橋, 跨道橋などにおいて桁高の制約がある橋梁に広く使用されている。また, 補剛材である縦リブには, パルププレートリブ, 平リブ及び閉断面リブがあり, 特に閉断面リブ (U リブ) については日本鋼構造協会規格に準拠した U 形鋼が使われ, 横リブ間隔を大きくできる利点から主流となっている。

しかし, 近年, 鋼床版の疲労亀裂について多くの報告がある。特に都市部の高速道路や重交通路線など大型車交通量が多いほど, 疲労亀裂が発生している事例 (図-1) が多く³⁾, その発生箇所としてデッキプレートと U リブなどの溶接部付近に多い。この溶接部付近に発生する疲労損傷には横リブやデッキプレート, 垂直補剛材の溶接止端部から発生し母材方向に進展するもの, 溶接ビード, デッキプレートを貫通するものなど数種類⁴⁾があるが, このうち, デッキプレートを貫通する方向に進展する亀裂については, 亀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, 利用者にも被害を及ぼ

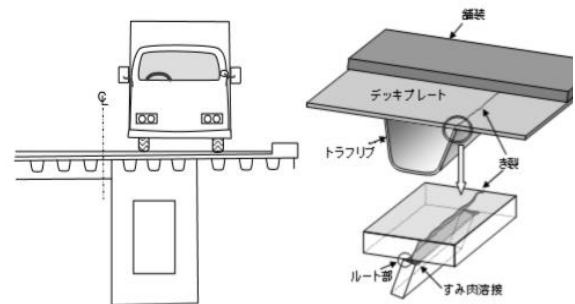


図-1 鋼床版の損傷イメージ図²⁾

す可能性があるため, 注意しなければならない。過去に, デッキプレート貫通亀裂の亀裂長が 500mm を超え進展していた事例も多数確認されている⁵⁾。また, 鋼床版は主桁の一部として応力を伝達する部材であるため, 疲労亀裂の発生は構造系に与える影響も大きいと言える。

このように, 鋼床版における溶接部付近に発生する疲労亀裂は重要な劣化問題であると言える。上述したような進展性が見られる亀裂は, 直ちに対策を取らなければならない損傷であり, 亀裂を見つけた場合には正しい判定を行なった上で対策を行うことが必要となる。しかし, 鋼構造物の溶接部は, 点検しづらい箇所であり, 更に塗装などによる防食処理が施されていることが多いため, 防食処理の下の亀裂を見つけることは難しい。

疲労損傷の検査には目視検査が最も多く用いられ, 目視結果により亀裂が疑われた際には, 必要に応じ



写真-1 面外ガセット溶接継手疲労試験状況

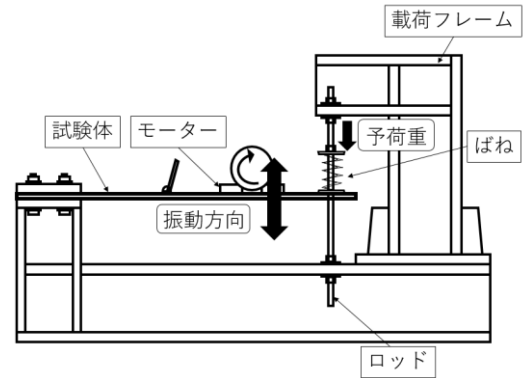


図-3 Uリブ疲労試験機概要

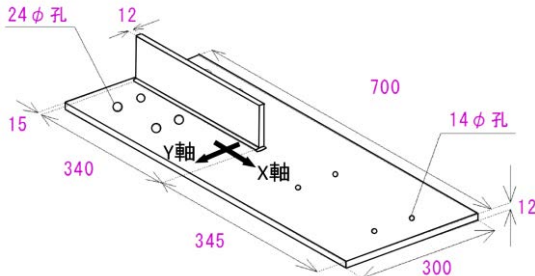


図-2 面外ガセット溶接継手疲労試験体



写真-2 Uリブ振動疲労試験状況

て浸透探傷試験や磁粉探傷試験などを組み合わせて点検が行われている。しかし、目視検査においては検査者の経験や技量に左右される他、浸透探傷試験や磁粉探傷試験においても、表面もしくは表面近傍に亀裂が生じていない場合は検出することが出来ず、さらには内部の亀裂や表面亀裂の場合でもほとんど開口していなかった場合は亀裂がないものと判断されることがある⁹⁾。

疲労損傷の検査は熟練者による目視検査と、対象ディテールに適した非破壊試験の適用が必要となるが、管理対象施設の増大や、橋梁を含む道路施設に対しての5年に1度の近接目視による点検の実施などにより⁷⁾、点検者の違いに対する定量的な判断や、検査方法の確実性、結果への信頼性は今後より一層求められる。

そこで、堀合ら⁸⁾が岩手大学で行った研究では、面外ガセット溶接継手を用いた振動疲労試験（写真-1、図-2）及びFEM解析を行い、長手方向(X軸)、長手直角方向(Y軸)の応力状態を確認することで、疲労亀裂の有無を確認することができないかという検討をしており、亀裂の進展に伴い、X軸方向の応力値が減少し、Y軸方向の応力値が増加する傾向があり、それらの比(Y値/X値)を確認することで亀裂の有無を判定できることを示している。

本論文では、この研究をもとに目視検査や非破壊試験の補助的手段として、鋼床版Uリブ溶接部を対象とした場合でも、ひずみゲージによりX軸方向の応力値とY軸方向の応力値の比を確認することで、亀裂の有無を客観的にかつ、定量的に確認すること

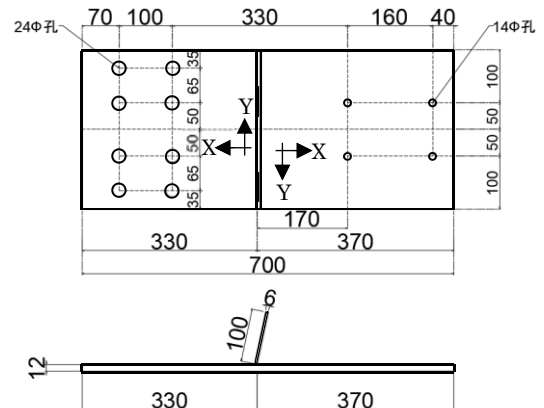


図-4 Uリブ試験体概要

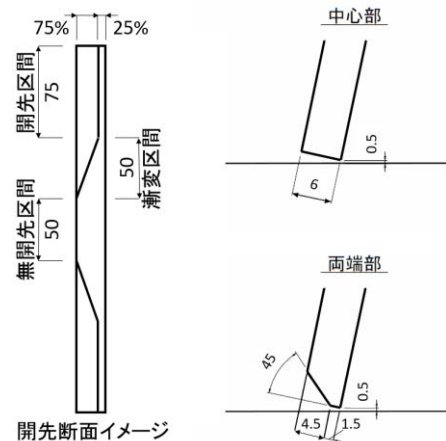


図-5 試験体開先断面図

が出来ないか検討を行なった。

2. Uリブ溶接部を模した試験体での振動疲労試験

試験体による振動疲労試験は、名古屋大学で開発された振動疲労試験機を使用した⁹⁾。振動疲労試験機の概要と試験状況の写真をそれぞれ、図-3、写真-2に示す。本研究のNo.1の試験体では実橋を想定し、リブを下向きにした状態¹⁰⁾で疲労試験を行った。しかし、想定していた亀裂を確認できなかったため、No.2の試験体では山田ら¹¹⁾が行ったUリブの板曲げ疲労試験を参考にし、リブが上向きになるように試験体を設置した。この試験機は、試験体を片持ち梁に固定し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、試験体に曲げ応力を発生させるものであり、荷重装置の試験体への取り付け位置や、偏心モーターの回転速度を変化させることによって、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。今回は、事前に試運転を行って得られたひずみから求めた応力が目標の公称応力となるように振動数を調整することで、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 ($R=-1$) の疲労試験となるが、本試験では、試験体の先端にコイルばねを設置し、このコイルばねで試験体を押し下げた状態で疲労試験を行うことにより、試験体に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

本研究で使用した試験体を図-4に示す。試験体の材質はSM400Aとし、鋼床版の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に相当するリブを角度 78° で溶接したものである。また、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、本研究では、図-5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を溶け込み量が少ない範囲とすることで、試験体の幅の中央部に亀裂の起点を生じさせようとした。必要溶け込み量を確保するためリブ両側は開先処理を施し、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た。なお、両溶接の接続は連続性をもたせるため、漸変区間を設けている。また、直径24mmの孔は振動疲労試験機への設置のために、直径14mmの孔は偏心モーターを設置するための孔である。試験体に貼付けたひずみゲージの状況を図-6示す。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溶接先端から長手方向(X軸)に5mm、長手直角方向(Y軸)にそれぞれ50mm離れた位置に貼り付けた。さらに、亀裂の進展方向は板厚を貫通する向きであると考えられるため、ゲージを溶接部周辺に貼り付けた位置に対称となるようにリブのない

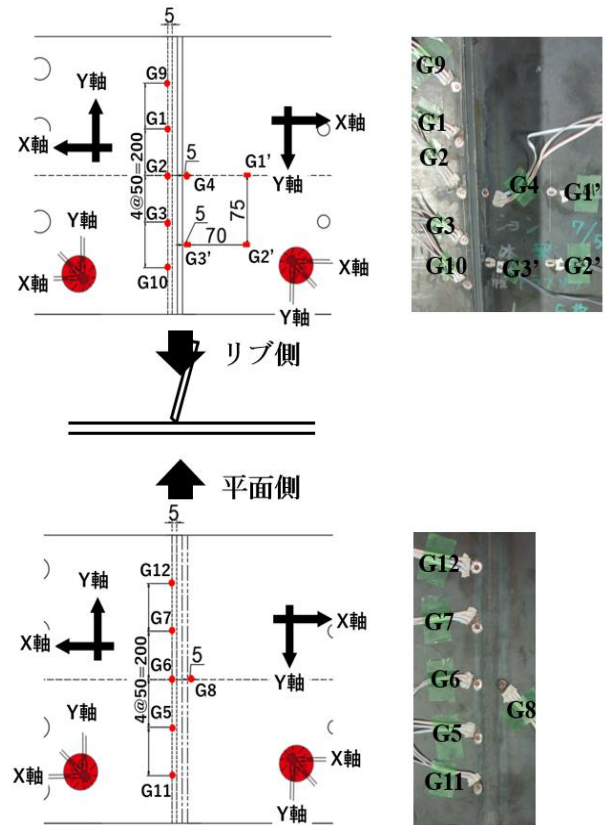


図-6 ゲージ貼付け状況 (上:リブ側 下:平面側)

表-1 各試験体の試験開始時の公称応力と試験終了時の繰返し回数

試験体番号	公称応力(MPa)	繰返し回数 N(回)
No.1	119.6	20,003,100
No.2	99.7	1,941,900

平面側にも貼り付けた。G1'のゲージはG4から長手方向(X軸)に70mm離れた位置に、G2'のゲージはさらにG1'から長手直角方向(Y軸)に75mm離れた位置に、G3'のゲージはG4から長手直角方向(Y軸)に75mm離れた位置に貼り付けた。このG1', G2', G3'のゲージで計測したひずみの結果を用いて、比例の関係より公称応力範囲を求めた¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。試験体に貼り付けたゲージはG1~G12の三軸ゲージがFRA-1-11、G1'~G3'の一軸ゲージがFLA-1-11を使用した。

2.2 試験条件

各試験体の試験開始時の公称応力と、試験終了時の繰返し回数を表-1に示す。試験終了条件は、長手直角方向(Y軸)の応力値が長手方向(X軸)の応力値よりも大きくなった場合、またはリブのない平面側に亀裂検

出用のエナメル銅線 (0.04mmφ) を貼り付け、溶接部付近から発生した亀裂が板厚方向に進展し、貫通するまでとした。

また、1 サイクルのモーター上限回転数を各試験体 50 万回とし、1 サイクル当たり 13~14 分中 1 分間 (サンプルリング間隔 4ms) の測定を 50 回行った。

3. 試験結果・考察

3.1 溶接部中央での応力値及び応力比の変動

振動疲労試験における、各試験体のリブ外側の溶接部の中央に位置する G2 ゲージでの長手方向 (X 軸) と長手直角方向 (Y 軸) の応力値及びその比の絶対値を図-7 示す。

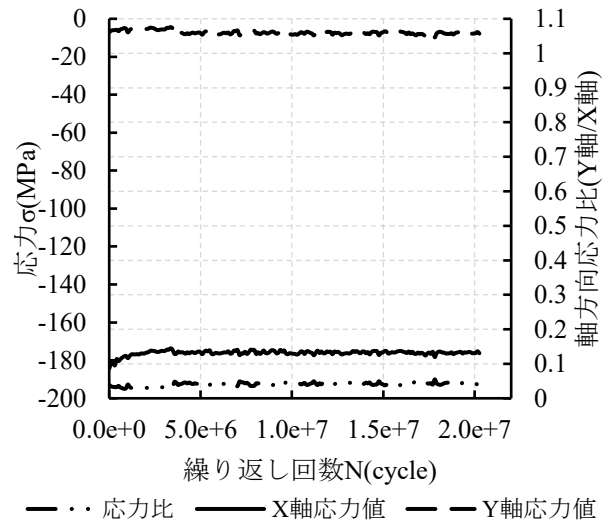
一般に、亀裂が発生していない状態では、主応力の方向は長手方向 (X 軸) を向いているが、亀裂が発生した場合には亀裂を避けるような向きになるため、亀裂発生箇所付近における主応力の向きは長手方向とは異なる向きになる。亀裂の有無を確認することを考えた場合、X 軸、Y 軸方向の応力値だけで判断することは難しく、その時の対象構造物に掛かっている荷重 (外力) も含めて判断しなければならない。そのため、1 章でも示した堀合らが行った研究では、各軸方向の比を取ることで無次元化することができ、荷重 (外力) を考慮せずに亀裂の有無を判断することが可能であることを明らかにしている。

これを利用し各試験体の X 軸方向応力値と Y 軸方向応力値の比をとり、同様に亀裂の発生や影響範囲の検討を行った。長手方向 (X 軸) の応力が開放され長手直角方向 (Y 軸) の応力が増加する傾向を示したのは試験体 No.2 であった。

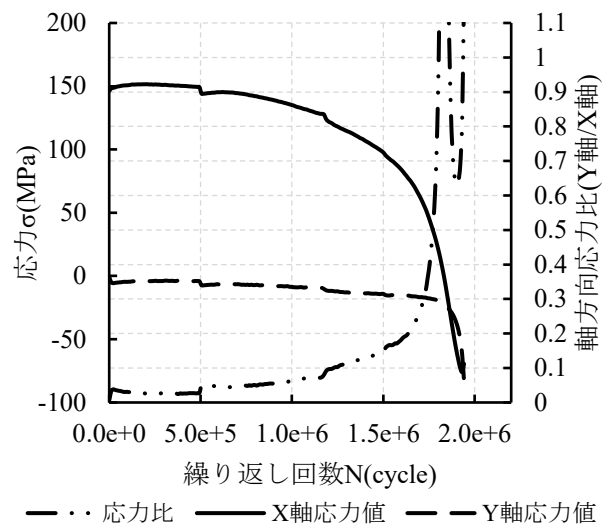
試験体 No.1 の 2 方向の軸方向応力の比 (Y 値/X 値) に関しては、2000 万回終了時まで 0.1 を超えることなく目視による亀裂も確認されなかった。

3.2 亀裂周辺における 2 方向の軸方向応力比の検討

亀裂の発生・進展が確認できた試験体 No.2 に関して、亀裂の起点であると考えられるリブ側の中央部付近のゲージ位置における軸方向応力比を図-8 に、リブのない平面側の中央部付近のゲージ位置における軸方向応力比を図-9 に、さらに、試験体のリブ側とリブのない平面側の中央部に位置する G2, G4, G6, G8 ゲージ位置における軸方向応力比を図-10 に示す。図-8, 9, 10 について、軸方向応力比は絶対値とし、軸方向応力比が大きく増加した繰返し回数 150 万回以降の範囲を示している。また、図-8, 9, 10 において各ゲージの X 軸、Y 軸の 2 方向の軸方向応力比が初めて 1 を超えた時における繰返し回数が早い順に並べ替え、リブ側 (着色) とリブのない平面側 (無色) で整理したものを表-2 に示す。これより、初めに応力比が 1 を超えたゲージはデ



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2

図-7 各試験体 G2 ゲージの軸方向応力値及び応力比

ッキプレート貫通亀裂の一般的な発生位置に最も近い、リブ側のリブ内側中央にあたる G4 ゲージであることが分かる。次に、溶接部中央の G2 ゲージ、漸変区間にある G1 ゲージ及び G4 ゲージの真下の G8 ゲージ、漸変区間の G3 ゲージ、リブのない側の G6, G7 ゲージという順に応力比が 1 を超えていることが確認できる。G5 ゲージの応力比は終了時の繰返し回数の時点で 0.99 であり、1 を超えはしないが限りなく 1 に近い値であった。また、リブ側の G3 ゲージよりもリブのない平面側の G8 ゲージでの軸方向応力比の方が早く 1 を超えていることから、亀裂の発生は中央部からではなく、G1 ゲージ側に少し寄った位置から発生したものと考えられる。

図-8, 9, 10 及び表-2 より、初めに亀裂は試験体の

表-2 軸方向応力比と繰返し回数の関係

位置	ゲージ番号	軸方向応力比 (Y 値/X 値)	繰返し回数 (回)
リブ側	G4	2.06	1,795,100
リブ側	G2	1.09	1,805,600
リブ側	G1	2.06	1,868,500
平面側	G8	1.40	1,868,500
リブ側	G3	2.26	1,910,500
平面側	G6	1.13	1,931,500
平面側	G7	1.21	1,941,900
平面側	G5	(0.99)	1,941,900

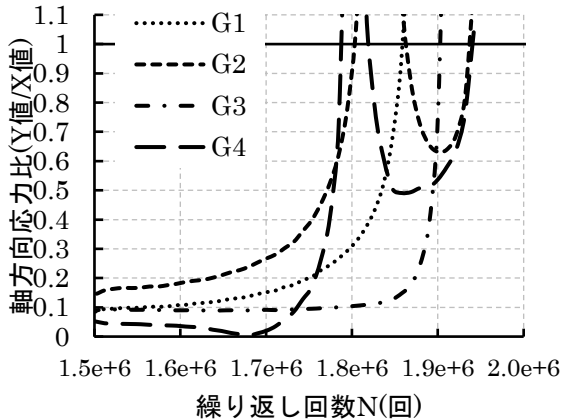


図-8 リブ側ゲージ位置での応力比(試験体 No.2)

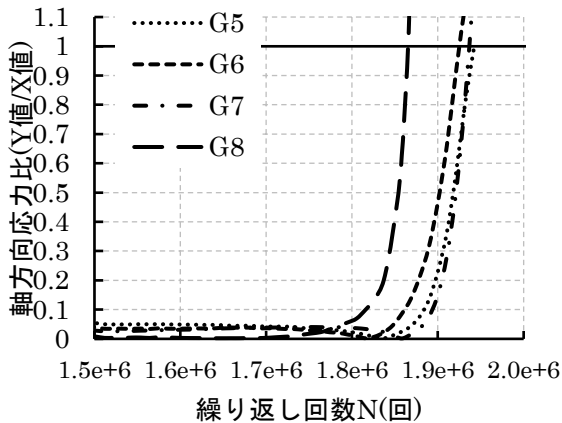


図-9 平面側ゲージ位置での応力比(試験体 No.2)

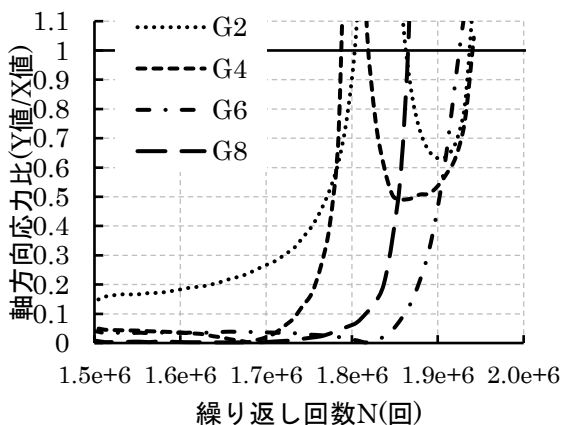


図-10 中央部ゲージ位置での応力比(試験体 No.2)

長手方向 (X 軸方向), 長手直角方向 (Y 軸方向) 中央部付近の G4 ゲージ位置と G1 ゲージ位置の間の G4 ゲージよりが発生し, これが板厚方向, 長手直角方向に進展したことで, まず G2 ゲージに影響を及ぼし, その後

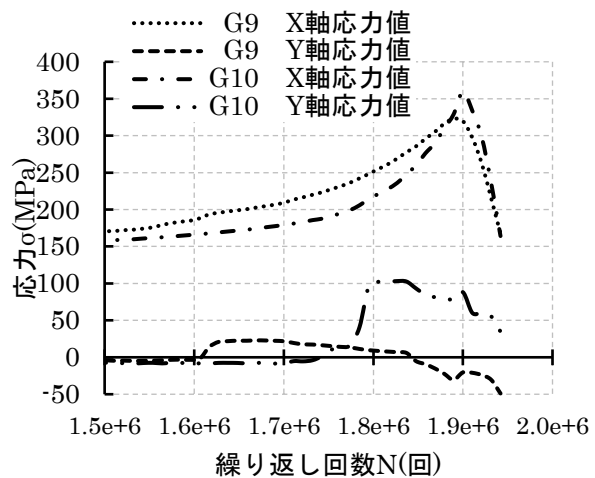


図-11 G9 及び G10 での各軸方向応力値 (試験体 No.2)

G1 ゲージ及び G8 ゲージ, G3, G6, G7 ゲージと長手直角方向に広がるように進展し続けたと考えられる。

図-11 にリブ側端部に位置する G9, G10 ゲージの各軸方向の応力値を示すが, 試験体端部の溶け込み量 75% を確保している位置にある G9~G12 ゲージでは, 試験終了時まで応力比は 1 を超えなかった。図-11 より, G9, G10 ゲージの各軸方向の応力値が表-2 に示した繰返し回数付近で急激に増加し, 試験終了時には減少している傾向が確認できる。これは, G4 ゲージ付近で亀裂が発生し, 長手直角方向に進展し G9, G10 ゲージに近づいたことにより, 亀裂先端近傍での応力集中によって応力値が増え, その後亀裂が G9, G10 ゲージ位置を通り過ぎ進展したことにより, ゲージ位置での応力の伝達が断たれ応力値が減る傾向を示したと考えられる¹⁾。

これら G1~G8 ゲージと G9, G10 ゲージの関係性から, 亀裂が試験体中央部の G4 ゲージ付近に発生し, 板厚方向, 長手直角方向に広がるように進展したことを明らかにした。

実橋での U リブは閉断面であるため, ひずみゲージ

をリブ内側に貼り付けるのは難しい。しかし、試験体 No.2 の結果からデッキプレート貫通亀裂を直接確認できない位置でも亀裂の発生、進展による各軸方向の軸方向応力比の増加を確かめることができた。そのため、リブ外側の溶接部に貼り付けたゲージでも亀裂の判定が可能であると考えられる。

4. 結論

本論文では、鋼床版 U リブ溶接部の疲労損傷におけるデッキプレート貫通亀裂に着目し、亀裂周辺の X 軸 Y 軸の軸方向の応力の状態を確認することで、亀裂の有無を確認できないか検討を行った。本論文で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 鋼床版 U リブ溶接部を模した試験体による振動疲労試験により、デッキプレート貫通亀裂の発生、進展時の溶接部周辺における長手方向 (X 軸方向)、長手直角方向 (Y 軸方向) の 2 方向の軸方向応力の変化を明らかにした。
- (2) 亀裂の発生、進展に伴い、X 軸方向の応力値が減少し、その後 Y 軸方向の応力値も減少した。ここで、絶対値としてこの 2 方向の軸方向の応力値を見ると、Y 軸方向の応力値の減少量に比べ、X 軸方向の応力値の減少量が大きいことから、相対的に、2 方向の軸方向応力比が増加することを明らかにした。
- (3) X 軸、Y 軸の軸方向応力値の比を取り無次元化し、荷重を考慮せず亀裂の有無を判断する方法で、U リブ溶接部を対象とした場合でも亀裂の判定が可能であり、目視点検や非破壊検査の補助的な手段となり得ることを明らかにした。
- (4) 亀裂周辺における X 軸、Y 軸の各軸方向応力比の変動を確かめることで、亀裂の発生・進展状況を確認できる。
- (5) デッキプレート貫通亀裂に関し、リブ外側の溶接部付近の X 軸、Y 軸の軸方向応力比を確認することで亀裂の判定が可能であることを明らかにした。

今回、軸方向応力比を確認する方法で疲労亀裂の発生、進展を判定できた試験体は 99.7MPa の公称応力で試験をした No.2 のみであった。今後の課題として、公称応力を変えた試験を複数回行い、亀裂発生、進展時の溶接部周辺の応力状態を確認する必要がある。さらに、確認できなかった疲労亀裂発生及び進展時の断面をビーチマーク試験などにより確認し、軸方向応力比と亀裂進展の関連性を明確にするとともに、FEM による試験の再現を行い、亀裂判定の検出モデルとその影響範囲を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.
- 2) 国土技術政策総合研究所：損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究，2010.9.
- 3) 時田英夫，永井政伸，三木千壽：交通データをベースとした首都高速道路の疲労環境の評価，土木学会論文集 No.794，2005.7.
- 4) 土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労 2010 年改訂版，2010.12.
- 5) 小西季里子：国道 357 号における鋼床版の補修事例について
- 6) 横野泰和：溶接・接合部の非破壊試験法と検査，溶接学会誌第 78 巻第 3 号，2009.
- 7) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2017.8.
- 8) 堀合聡，桑原優，三浦真季，大西弘志：疲労亀裂発生に伴う主応力の挙動，日本材料学会信頼性シンポジウム，2017.12
- 9) 山田聡，渡辺直起，山田健太郎，小塩達也：簡易型振動疲労試験機の開発と適用試験，トピー工業技法 No.24 2008.
- 10) 三木千壽，横山薫，吉田大介，穴見健吾，大庭潤輝：レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた鋼床版 U リブ溶接部疲労き裂の補修，鋼構造論文集第 23 巻第 91 号，2016.9.
- 11) 山田健太郎，Ya Samol：U リブすみ肉溶接のルートき裂を対象とした板曲げ疲労試験，土木学会構造工学論文集 Vol.54A，2008.3.
- 12) 木下幸治，荒川慎平：板曲げを受ける面外ガセット継手のき裂形状比を適用した疲労き裂進展解析，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.69 No.1 20-25，2013.
- 13) 木下幸治，荒川慎平：XFEM による板曲げを受ける面外ガセット溶接継手部の疲労き裂進展経路シミュレーション，構造工学論文集 Vol.58A，2012.3.
- 14) 山田健太郎，小塩達也，鳥居詳，白彬，佐々木裕，山田聡，面外ガセット溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼすショットブラストの影響，構造工学論文集 Vol.54A，2008.3.

(2018 年 7 月 20 日受付)