

## 論文

# U リブを有する鋼床版における疲労亀裂発生・進展に伴う 応力振幅変動の検討

柿崎捷吾\*, 大西弘志\*\*, 堀合聡\*\*\*, 星川翔\*

\*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)

\*\*\*博士 (工学), 株式会社中央コーポレーション (〒025-0003 岩手県花巻市東宮野 11-5)

鋼床版をはじめとする鋼構造部材における疲労亀裂の点検は目視で行われ, 必要に応じて非破壊検査が行われる。目視点検では技術者の経験や技量に左右され, 非破壊検査では確実に検出できる範囲に限界があることが問題となっている。本論文では, 先行研究で行われた U リブを有する鋼床版の輪荷重走行試験のデータを基に, 亀裂発生箇所付近における応力振幅やその比について確認し, 亀裂の発生や進展に伴う変動について検討を行った。

キーワード: 疲労亀裂, U リブ溶接部, 応力振幅, 輪荷重走行試験

## 1. はじめに

鋼床版はコンクリートを用いた構造に比べ, 重量が小さく, 急速施工が可能のため, 地盤が強固ではない都市内などで多く採用されている<sup>1)</sup>。その一方で, 過積載車を含む大型トラックの走行が多い幹線道路や, 都市内高架橋において疲労亀裂が多く確認されており問題となっている。亀裂はその多くが溶接部付近から発生し, 進展していく。進展方向はいくつかあるが, なかでも溶接ルート部からデッキプレートの板厚方向に進展する亀裂に関しては, 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, 早急に対処する必要がある。通常, 鋼橋の亀裂に対する点検は目視点検が一般的である。また, 必要に応じ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を行っている。しかし, 目視点検では技術者の経験や技量に左右され, 見えない部分については損傷を確認できないこと, 浸透探傷試験や磁粉探傷試験では内部の損傷には対応できない場合がある。

先行研究として, 堀合らは目視点検や非破壊検査の補助的手段として, 亀裂発生が予想される箇所での主応力方向の応力値と主応力方向に直角な方向の応力値との比である軸方向応力比の値を確認することで亀裂の発生・進展の判定ができないか検討を行った<sup>2)</sup>。

疲労現象は繰り返し回数と疲労亀裂が発生する箇所に作用する応力振幅を用いて整理され, 応力振幅は疲労強度を検討する上で重要なパラメータである。そこで, 本論文では堀合らが検討を行った

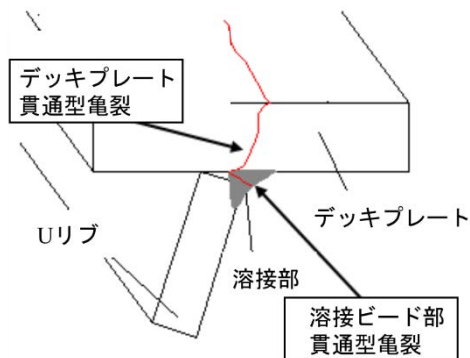


図-1 U リブ溶接部における疲労亀裂

手法<sup>2)</sup>を参考にし, 大阪大学で行われた先行研究である, U リブを有する鋼床版の輪荷重走行試験<sup>3)</sup>のデータを基に, 亀裂発生箇所付近における応力振幅や 2 方向の応力振幅の比について確認し, 亀裂の発生や進展に伴う変動についての検討を行った。

## 2. 先行研究の試験概要

本章では, 大阪大学で行われた先行研究である輪荷重走行試験の試験概要を示す。

図-1 に示すように, 鋼床版 U リブ溶接部における疲労亀裂は溶接ルート部からデッキプレートの板厚方向に進展する亀裂 (デッキプレート貫通型亀裂) と U リブ溶接部のルート部から溶接ビー

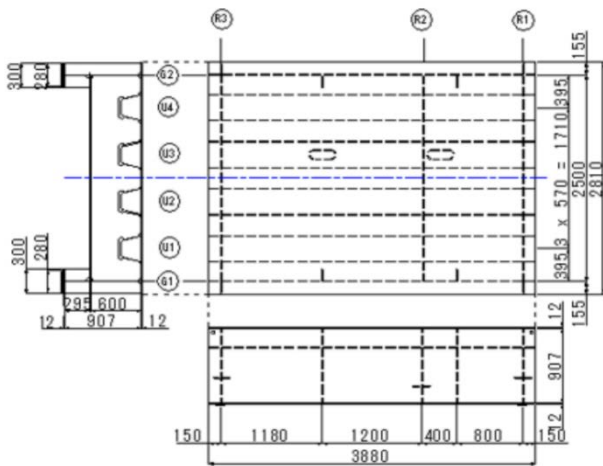


図-2 試験体平面図および側面図

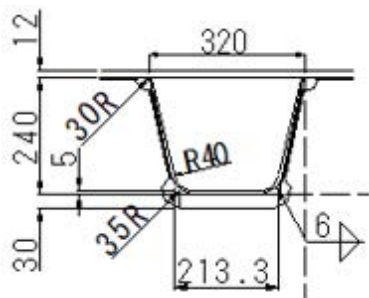


図-3 Uリブ断面図

ト部へ進展する亀裂(溶接ビード貫通型亀裂)に分類される。先行研究ではデッキプレート貫通型亀裂を対象としており、これを再現するために実物大鋼床版モデルを用いた輪荷重走行試験が実施された。

## 2.1 試験体概要

輪荷重走行試験において使用した試験体の詳細を図-2、図-3、表-1に示す。試験体はUリブを4本、横リブを3本有している。試験体寸法は橋軸方向が3880mm、橋軸直角方向が2810mmであり、デッキプレートの板厚は12mmである。また、一部の横リブ支間部を2380mmとし、輪荷重走行試験機の走行範囲内に位置するように製作されている。試験体は2体使用された。1体目(試験体1)はUリブ・デッキプレート溶接部の溶け込み量を20~40%程度、2体目(試験体2)は溶け込み量を75%となっている。また、通常、Uリブ溶接部における溶け込み量はリブ板厚の75%以上を確保することが定められている<sup>4)</sup>。その他の詳細は同一である。なお、Uリブの一部、U3リブ底面にハンドホールが設けられており、Uリブ閉断面内にひずみゲージを貼り付けた後、カバープレートが溶接により取り付けられた。

## 2.2 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験機を図-4に示す。この試験機は橋軸方向に2000mmの範囲で荷重を載荷したまま毎分30往復程度の移動速度で往復運動する。この

表-1 主要部材寸法

部材	寸法 (mm)
デッキプレート	12
Uリブ	320×240×6-R40
横リブ (R1, R3)	ウェブ：600×10 フランジ：200×12
横リブ (R2)	ウェブ：700×10 フランジ：200×12
主桁	ウェブ：907×9 フランジ：300×12

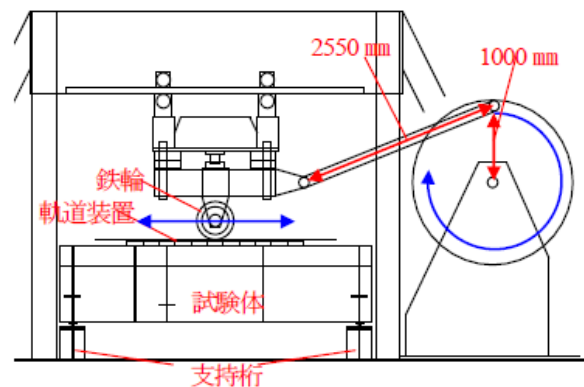


図-4 輪荷重走行試験機

試験機により、道路橋床版を走行する車両の移動輪荷重に近い荷重載荷状態を再現している。

輪荷重走行試験機の車輪には耐久性を確保するために鉄輪を使用しているため、試験体に載荷した場合、線荷重を載荷することになる。そこで試験体上面に図-5に示す橋軸方向200mm、橋軸直角方向190mmの鉄製の載荷ブロックを床版上面に並べ、その上を鉄輪が走行することにより面荷重を再現している。また、載荷ブロックの上には載荷ブロックカバーが設置されている。載荷ブロックカバーの上には車輪の走行面の平滑性を確保するために厚さ12mmの軌道用鉄板が設置された。設置状況を図-6に示す。さらに衝撃の緩和や騒音の防止、載荷板と床版上面の摩耗防止のために載荷ブロックカバーと軌道用鉄板、載荷ブロックとデ

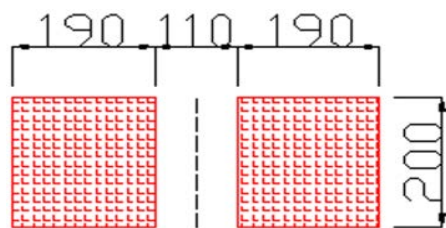


図-5 荷重ブロックの荷重面積

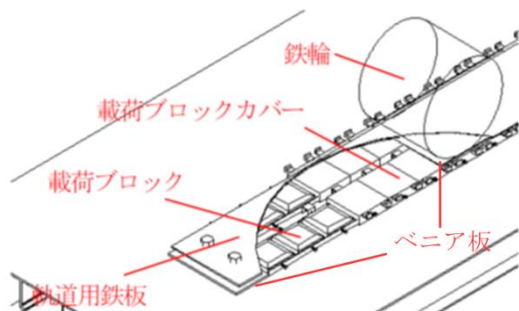


図-6 軌道装置

ッキプレートの上に厚さ 5mm のベニア板が挟まれている。以下、これらの機材を軌道装置と呼ぶ。

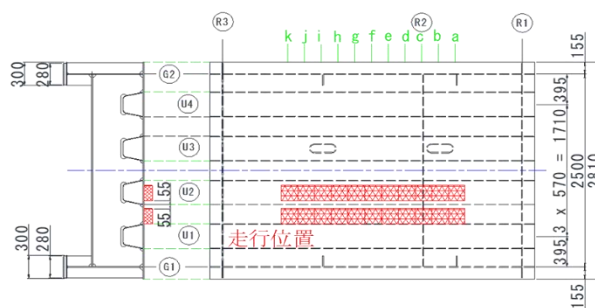
また、軌道装置の設定および荷重位置を図-7に示す。この荷重位置は既往の研究<sup>9)</sup>によりデッキプレート貫通型亀裂の誘発に成功している。

荷重荷重は T 荷重 98kN を考慮し、117.6kN とされた。試験体の支持条件は、試験体の主桁と端部の横リブが交差する 4 点で主桁下フランジと支持桁上フランジの間に丸鋼を用いて固定されている。

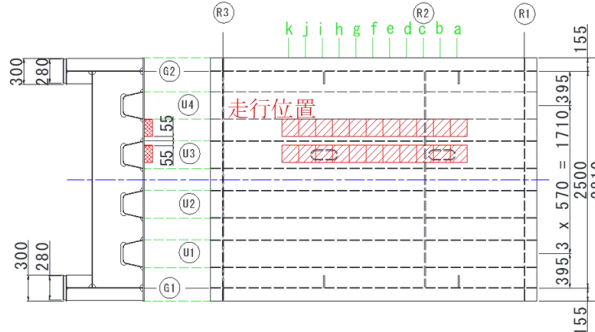
また、輪荷重走行試験中に静的荷重試験を実施している。静的荷重試験は輪荷重走行試験中に指定した回数で走行を中断し、指定した断面に対して鉄輪を荷重することで実施している。

### 2.3 ひずみ計測位置

輪荷重走行試験において図-8 に示すように 200mm 間隔で 11 断面設定された。ここで、橋軸方向は設定した断面に垂直な方向である。静的荷重試験実施時の各部のひずみを計測するために、図-8 に示す断面のうち b, c, d, f, i の 5 断面にひずみゲージが配置された。先行研究では c 断面（横リブとの交差部）に着目し、亀裂付近のひずみを確認している。軌道装置を設置した試験体 1 のリブ U1 と U2 近傍におけるひずみゲージの貼り付け位置を図-9 に示す。一軸ゲージでは橋軸直角方向のひずみ、二軸ゲージでは橋軸直角方向、橋軸方向のひずみを計測している。先行研究では図-9 において赤枠で示した、c 断面の 1, 3, 23 の値を用いて検討を行っている。図-10 に示す位置では、別のひずみゲージ（三軸）を貼り付け、輪荷重走行下における動的計測を行っている。輪荷重走行下、測定周期 1kHz で 10 秒間測定している。また、ゲージ番号については、例えば、c 断面の 1 のゲージの場合、c1 と断面位置を示した後にゲージ番号を付与する形としている。今回はこれらの断面のうち、c



(a) 試験体 1



(b) 試験体 2

図-7 走行位置図

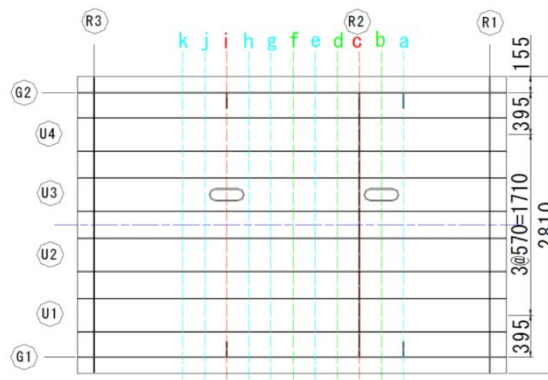


図-8 試験体 1, 2 の平面図

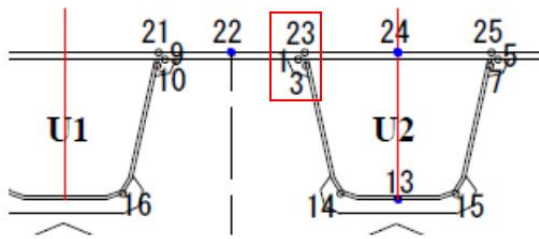
断面（横リブとの交差部）と i 断面（横リブ支間中央部）を対象としている。

## 3. 先行研究の試験結果・考察

本章では先行研究によって得られた疲労試験の過程における亀裂の発生状況を示す。

### 3.1 疲労亀裂発生位置

輪荷重走行試験中に実施した静的荷重試験による試験体 1 の c 断面の荷重回数・ひずみ関係を図-11 に示す。ただし、c23 は試験時の摩耗により破損したため、繰り返回数 55 万回～65 万回付近ではひずみを計測できていない。図-11 より、荷重回数 30 万回から荷重回数 60 万回付近にかけて c1 の値が減少していき、荷重回数 60 万回でひずみがほぼ 0 となり、それ以降引張側支配に変化したことが明らかになっている。また、貼り直した直後の c23 では摩耗により破損する前のひずみから大き



○一軸ゲージ ●二軸ゲージ

図-9 ひずみゲージ位置(試験体1 c断面)

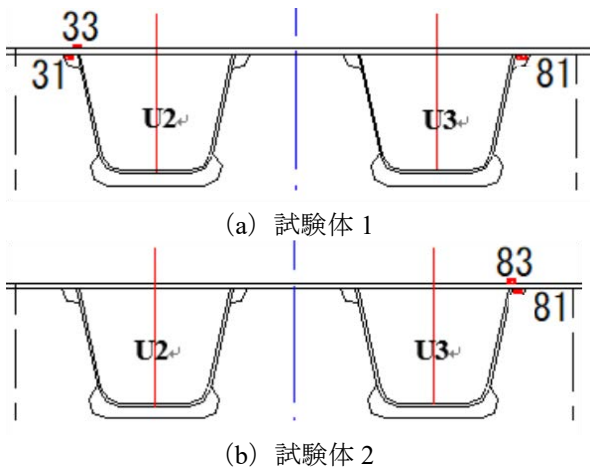


図-10 動的計測用ひずみゲージ貼り付け位置  
 く増加したことがわかっている. c1, c23 の値の変  
 化の傾向より荷回数 60 万回付近において亀裂が  
 発生した可能性があると考察されている. c3 に関  
 しては、ほとんど変化がみられなかった.

荷回数 261 万回時にデッキプレート上面の  
 c23 の値が急激に変化していたため、デッキプレ  
 ート上面を確認したところ、疲労亀裂が確認され  
 た. その位置は c 断面周辺、荷ブロックで挟み込  
 んだ溶接上であった. 亀裂の発生位置・状況を図-12  
 に示す. 亀裂は c 断面から 80mm 進展したもの  
 と、その延長線上に 214mm 進展したものの 2 本確  
 認された. U リブ溶接部に磁粉探傷試験が実施さ  
 れたが、亀裂は確認されなかった. これより、この  
 疲労亀裂はデッキプレート貫通型亀裂と判断され  
 た. c 断面周辺以外では i 断面を含め溶接部およ  
 びデッキプレート上面では亀裂は確認されなかつ  
 た.

試験体 2 では 126 万回でハンドホール・カバ  
 ープレート溶接部から発生した亀裂が U リブ溶  
 接部まで到達したため、試験が終了された. 荷  
 重試験終了時に U リブ溶接部およびデッキプレ  
 ート上面に対して磁粉探傷試験が実施されたが、  
 亀裂は確認されなかった.

U リブ・デッキプレート溶接部の溶け込み量  
 が 20~40%程度である試験体 1 では疲労亀裂  
 がデッキプレート上面で確認されたことに対し  
 て、溶け込み量が 75%確保されている試験体  
 2 ではデッキプレート上面においては確認され  
 なかった. これにより溶接部の溶け込み量の違  
 いが疲労亀裂の進展状況に影響を与えている  
 と考察されている.

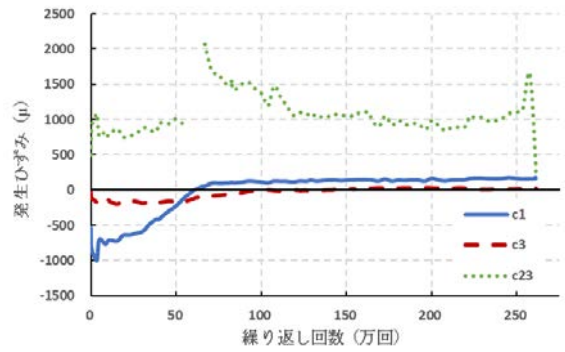


図-11 荷回数・ひずみ関係(試験体1 c断面)

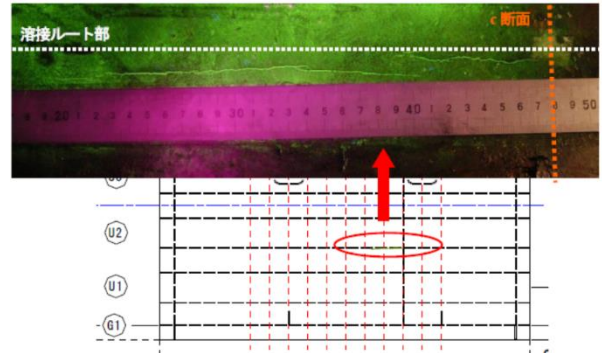


図-12 デッキプレート貫通型亀裂確認位置

#### 4. 先行研究の試験結果に基づく検討

本章では 3 章で示した先行研究によって得ら  
 れた疲労試験の過程における亀裂の発生状況を基  
 に、応力振幅や 2 方向の応力振幅の比を確認す  
 ることで亀裂の有無を判定することができないか  
 考察を行った.

##### 4.1 応力振幅および応力振幅の比の求め方

本研究では、応力振幅を求めるにあたり、動  
 的計測用ひずみゲージによって計測されたひず  
 みを用いた. 三軸のひずみゲージの第 1 軸を橋  
 軸直角方向とし、第 2 軸を橋軸方向とした. 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、橋軸直角方向と橋軸方向の応力振  
 幅をそれぞれ求めた.

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

ここで、

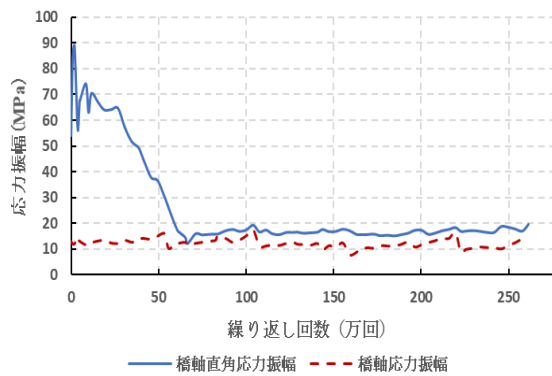
$\Delta\sigma$  : 応力振幅 (MPa).

$\varepsilon_{max}$  : 最大ひずみ ( $\mu$ ).

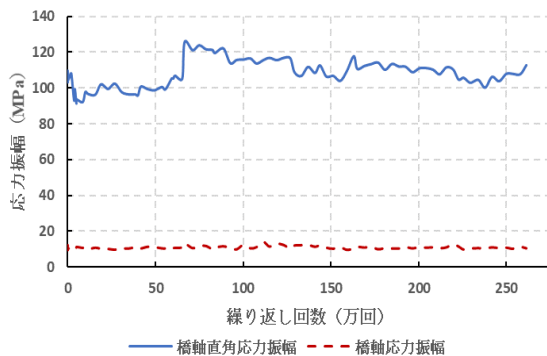
$\varepsilon_{min}$  : 最小ひずみ ( $\mu$ ).

$E$  : ヤング率 (210,000 N/mm<sup>2</sup>).

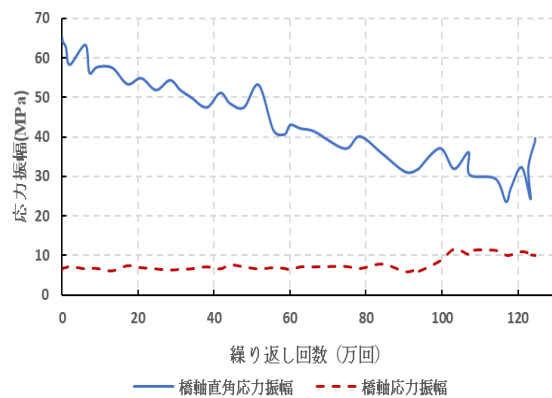
応力振幅の比は堀合らが検討を行った手法<sup>2)</sup>  
 を参考にし、算出した. 本検討では主応力方向  
 が橋軸直角方向を向いているため、以下の式  
 (2) を用いて、応力振幅の比を求めた.



試験体 1 c 断面 (c31)



試験体 1 i 断面 (i31)



試験体 2 c 断面 (c81)

図-13 応力振幅

$$\text{応力振幅の比} = \frac{\Delta\sigma_{\text{橋軸}}}{\Delta\sigma_{\text{橋軸直角}}} \quad (2)$$

ここで、

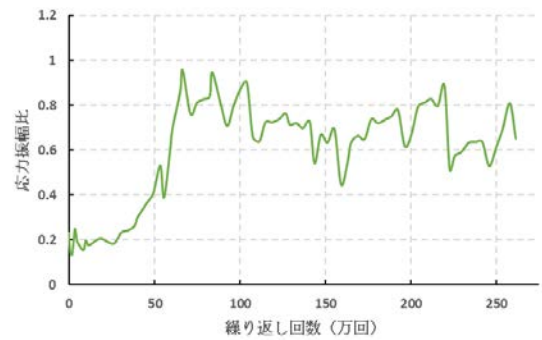
$\Delta\sigma_{\text{橋軸}}$  : 橋軸方向の応力振幅 (MPa)

$\Delta\sigma_{\text{橋軸直角}}$  : 橋軸直角方向の応力振幅 (MPa)

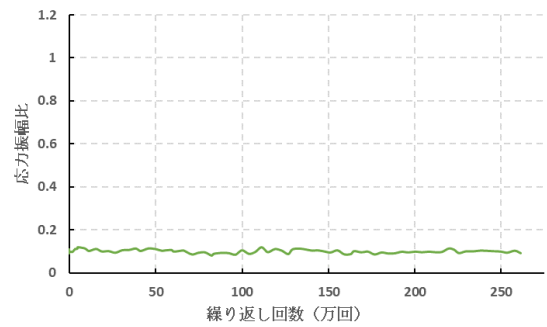
#### 4.2 亀裂発生位置周辺の応力振幅の経時変化

先行研究のデータを基に、各試験体の輪荷重走行下で計測された試験体 1 の c31, i31 および試験体 2 の c81 における橋軸直角方向、橋軸方向の応力振幅と载荷回数との関係を図-13 に示す。

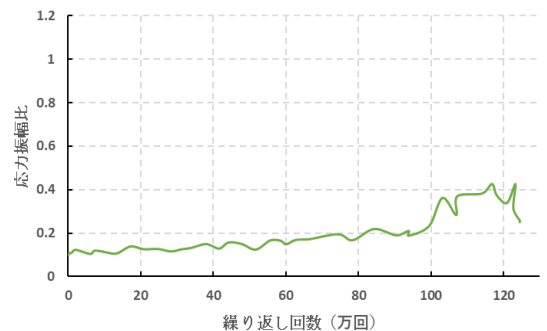
一般的に亀裂が発生していない状態では主応力は橋軸直角方向を向いているが、亀裂が発生すると、主応力は亀裂を避けるような向きとなるため、亀裂発生箇所付近における主応力の向きは橋軸直



試験体 1 c 断面 (c31)



試験体 1 i 断面 (i31)



試験体 2 c 断面 (c81)

図-14 応力振幅比

角方向を避けるような向きとなる。

図-13 に示すように、亀裂が発生した試験体 1 の c31 では载荷回数 60 万回にかけて橋軸直角方向の応力振幅が大きく減少していることがわかる。また、载荷回数 60 万回以降では橋軸直角方向の応力振幅が一定となる傾向がみられた。これは、亀裂が発生・進展し、亀裂の先端が c31 の位置から離れ、この位置付近の応力が解放されたためである<sup>9)</sup>。亀裂が確認されなかった試験体 1 の i31 では、橋軸直角方向の応力振幅はほぼ変動していなかった。しかし、同様に亀裂が確認されなかった試験体 2 の c81 では、試験体 1 の c31 ほどの大きな変動ではないが、橋軸直角方向の応力振幅は減少する傾向がみられた。これより、試験体 2 の c 断面付近において、デッキプレート上面に亀裂は達していないものの、デッキプレート内部に亀裂が発生している可能性があると考えられる。また、橋軸方向の応力振幅についてはいずれの計測点においても大きな変動はみられなかった。これより、デッキプレート貫通型亀裂の有無にかかわらず、橋軸方向

の応力振幅には大きな影響は与えないものと考えられる。

#### 4.3 亀裂発生位置周辺の応力振幅比の経時変化

図-13 において橋軸直角方向、橋軸方向の応力振幅の挙動を示したが、亀裂の有無を確認する場合、橋軸直角方向、橋軸方向の応力振幅の値だけで判断することは難しく、その時の対象構造物に作用している荷重(外力)も含めて判断しなくてはならない。そのため堀合らが行った研究では、各軸方向の比をと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、より簡便に、亀裂の有無を判断することができることを明らかにしている。これを利用し各試験体の橋軸直角方向と橋軸方向の2方向の応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)をとり亀裂の発生や進展の検討を行った。

試験体1のc31、i31および試験体2のc81における応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)と载荷回数との関係を図-14に示す。図-14より、試験体1のc31では、载荷回数60万回にかけて応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)が大きく増加していることがわかる。これは図-11におけるc1の変化と同じ傾向であり、载荷回数60万回付近で亀裂が発生したと考えられる。亀裂が確認されなかった試験体1のi31では、応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)はほぼ変動しなかった。また、同様に亀裂が確認されなかった試験体2のc81では、応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)は増加する傾向はみられたものの、試験体1のc31ほど大きな変動ではなかった。これより、試験体1のi断面付近では亀裂が発生しておらず、また、試験体2のc断面付近ではデッキプレート上面に亀裂は達していないものの、デッキプレート内部に亀裂が発生している可能性があると考えられる。

閉断面リブを有する実橋での計測を想定した場合、ひずみゲージの貼り付け位置として、鋼床版下面の閉断面リブ外側が考えられる。上述したように、c31のようなリブ外側ゲージ位置において、亀裂の発生・進展に伴い、応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)が増加することが確認された。これより、応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)を確認する本手法はデッキプレート貫通型亀裂に対して有用である可能性を示した。

#### 5. まとめ

本論文では、鋼構造物における疲労損傷の中でも鋼床版Uリブ溶接部周辺の疲労損傷におけるデッキプレート貫通型亀裂に着目し、大阪大学で行われた先行研究である、Uリブを有する鋼床版の輪荷重走行試験のデータを基に、亀裂周辺の橋軸

直角方向、橋軸方向の応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)の挙動を確認することで、亀裂の有無を判定することができないか検討を行った。本稿で得られた知見を以下に示す。

(1) 鋼床版Uリブを有する試験体による輪荷重走行試験により、デッキプレート貫通型亀裂の発生・進展時の溶接部周辺における橋軸直角方向の応力振幅は減少し、橋軸方向の応力振幅はほとんど変化がみられないことを示した。

(2) 亀裂の発生に伴い、橋軸方向の応力振幅の減少量に比べて、橋軸直角方向の応力振幅の減少量が大きいことから、相対的に2方向の応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)が増加することを示した。

(3) 溶接部の溶け込み量が一因と考えられる亀裂の進展状況の違いにより、応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)にも違いが出ることを示した。

(4) 亀裂の有無の判定を応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)をとることで確認したが、デッキプレート下面リブ外側での計測によって、デッキプレート貫通型亀裂の有無を確認できる可能性を示した。

本研究では2方向の応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)で検討を行った。実橋における計測ではひずみゲージを利用した測定が一般的であり、ひずみ範囲を利用して同様の結果を示すと考えられる。このことより、亀裂による応力変化の影響範囲に橋軸直角方向と橋軸方向の応力値を計測できるひずみゲージを貼り付けることができれば、測定値のデータを利用して応力振幅の比(橋軸/橋軸直角)を判定することで、亀裂の有無を確認することが可能であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労，土木学会鋼構造シリーズ19，2010年改訂版 2012.12.
- 2) 堀合聡，桑原優，三浦真季，大西弘志：疲労き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，2017.3.
- 3) 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方法，大阪大学大学院修士論文，2012.2.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II鋼橋・鋼部材編，2017.11.
- 5) 大西弘志，永田淳，長屋優子，鈴木統：クランク式試験装置を用いた道路橋床版の共通輪荷重走行試験，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文報告集，p31-37，2006.7.
- 6) 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.

(2020年7月17日受付)