

応力集中部に発生したき裂周辺の主応力の挙動

Behavior of principal stress near cracks arising at areas of stress concentration

○三浦 真季* 大西 弘志** 堀合 聡***
Maki MIURA Hiroshi ONISHI Akira HORIAI

ABSTRACT Inspections of fatigue cracks are carried out by visual inspections, and non-destructive inspections (ex. MT, PT) are also used as necessary. However, the inspector occasionally overlooks fatigue cracks because it depends on the skill of the inspector. Therefore, we propose a method using a strain gauge as a simpler inspection method. In this study, we picked up the stress concentration part in out-of-plane gusset welded joints. And we confirmed the stress state around the fatigue cracks by simple FEM model with simulating cracks and conducted vibration fatigue test. We examined whether fatigue cracks can be found out quantitatively by their results.

Keywords: 疲労き裂, 主応力, 振動疲労試験, FEM
fatigue crack, principal stress, vibration fatigue test, FEM

1. はじめに

鋼構造物に生じる損傷の1つである疲労き裂は応力集中部となる溶接部周辺に発生するものが多いため、き裂の検出を目的とした点検は溶接継手を中心に行われる¹⁾。現在、き裂に対する点検は目視点検が行われ、き裂損傷が疑われた場合には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、き裂損傷の有無を確認している。き裂損傷がある場合には軽微なうちに早急に適切な対策を講じることが求められるものもあるため、早期にき裂を発見することが望ましい。しかし、き裂の発見は容易ではない上、目視点検は点検者の技量や経験に左右されるため、き裂の見落としは起こりうる。そこで、経験の少ない点検者でも確実に疲労き裂を発見できる手法として、溶接部周辺の主応力を確認することでき裂の有無を判断する手法を検討する。本研究では、はじめに簡易な FEM モデルで擬似的にき裂をモデル化することで基本的なき裂周辺の応力状態を確認し、

続いて実構造物を想定したモデルで振動疲労試験とその解析を行い、それらの結果の比較検討を行うことで疲労き裂を確認できるかの検討を行った。

2. 円孔を有する平板の解析

簡易なモデルで解析を行うことで、き裂周辺の基本的な主応力の方向を確認した。

2.1 解析概要

平板に円孔があり、その円孔から短手方向両側にき裂を模した切り込みを入れ、長手方向面内に引張力を与えたモデルを考える。解析には、汎用有限要素プログラムを用いた。また、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 $E=210,000\text{N/mm}^2$ 、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によるモデル化を行った。解析モデルは長手方向(X 軸方向)を 540mm、短手方向(Y 軸方向)を 160mm、厚さを 30mm、円孔の半径を 10mm とし、き裂を簡易

*岩手大学大学院工学研究科博士前期課程社会環境工学専攻(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

**博士(工学) 岩手大学理工学部システム創成工学科社会基盤・環境コース 准教授
(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5) 第2種正会員

***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)

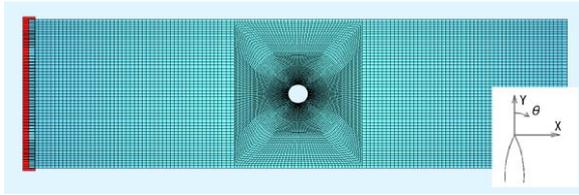


図1 解析モデル

表1 応力値比較

解析モデル	r	θ	σ_x 計算値	σ_x 解析値
き裂長 10mm	2.42	65.97	0.262	0.271
き裂長 20mm	2.37	66.09	0.375	0.352

的に模した切り込みを作り，その長さを 10mm と 20mm の 2 ケースのモデルと無き裂のモデルを作成した．境界条件は，モデル片側では XYZ 軸の並進自由度を拘束し，各軸方向の変位を全て拘束した．もう片側は自由端とし，長辺方向への引張力を自由端側の断面に載荷した．要素寸法はき裂周辺で 1.0mm×0.7mm×2.5mm とした．

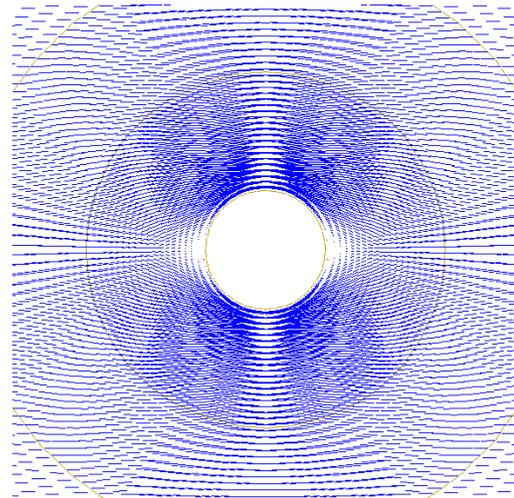
切り込み周辺の応力状態の検証を行った．図 1 に切り込み長さを 20mm としたモデル図とき裂先端の座標系を示す．また，作成したモデルにおいて，き裂先端を原点とした極座標を取り，き裂周辺の任意の点の応力値を次式による計算式にて比較したものを表 1 に示す．

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{r}} \cos(\theta/2) (1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)) \quad (1)$$

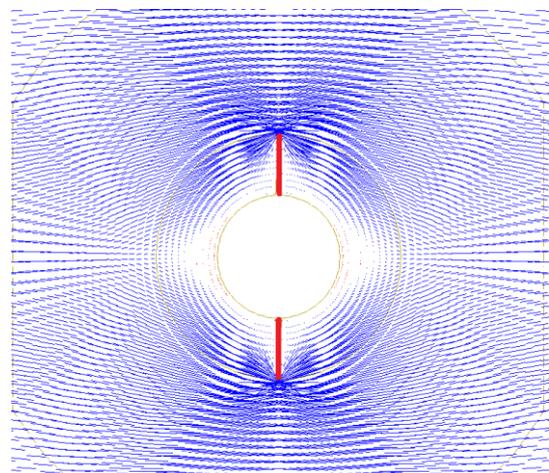
ここで， σ_0 は引張応力， a は切り込み長さ(き裂長)， r はき裂先端からの距離， θ は任意点とき裂先端を結んだ線とき裂進行方向とのなす角度である．表 1 より，き裂先端から任意の点での計算値と解析値に差がないことよりこの簡易モデルの妥当性を確認した．

2.2 主応力方向の確認

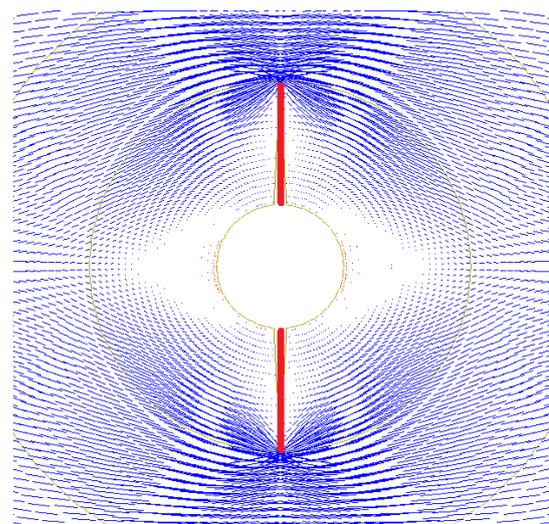
無き裂モデルとき裂長 10mm，20mm のモデルにおける主応力方向の xy 平面への射影を図 2 に示す．図中の赤線はき裂を，青線は主応力方向を表示している．また，青線の長さは主応力の大きさを表している．無き裂モデルでは，短辺方向の円端に主応力が向いている．応力集中部から長さ 10mm のき裂が生じると，円孔周辺の主応力は小さくなり，き裂周辺の主応力方向はき裂先端か



(a) 無き裂



(a) き裂長 10mm



(c) き裂長 20mm

図2 主応力方向

ら放射線状に広がっている。き裂長が 20mm のモデルでも同様の傾向がより顕著に見られる。き裂進展に伴い、き裂周辺の主応力方向はき裂先端から放射線状に広がっていることを確認した。

3. 実モデル試験体による振動疲労試験

疲労き裂が問題となるのはおもに溶接継手であり、すみ肉溶接継手では、溶接止端、溶接ルートといった応力集中部からき裂が発生する。本研究では、2 章で確認した基本的な主応力方向を踏まえたうえで、面外ガセット溶接継手を対象に振動疲労試験を行い、応力集中部となる溶接止端部に発生したき裂周辺の主応力を確認した。

3.1 振動疲労試験概要

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。振動疲労試験機の概要と試験機の写真をそれぞれ図 3、図 4 に示す。この試験機は、試験体を片持ち梁式に固定し自由端側に設置した偏心モーターの回転により試験体を振動させることで試験体に曲げ応力を発生させるものであり、载荷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、本研究では、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なった。

図 5 に試験体の寸法を示す。試験体の材質は SS400 とし、板厚 12mm、幅 300mm、長さ 700mm の鋼板に、高さ 100mm、幅 340mm、板厚 12mm のガセットプレートが直角に脚長 10mm ですみ肉溶接されたものである。直径 24mm の孔は試験体を振動疲労試験機へ設置するために、直径 14mm の孔は試験体に偏心モーターを設置するために設けた孔である。図 6 にひずみゲージの貼付位置を示す。G3 は応力集中の影響を含んだ応力を測定するためにガセットプレート溶接止端から長手方向に 5mm 離れた位置に配置した。G1、G2、G4、G5 は

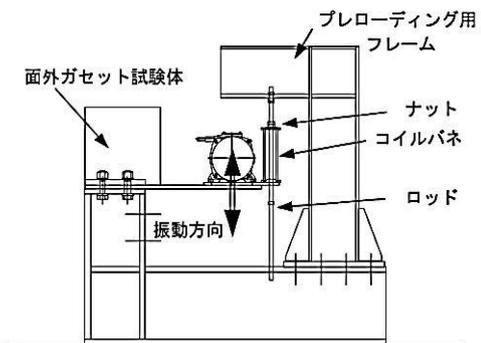


図 3 振動疲労試験機概要

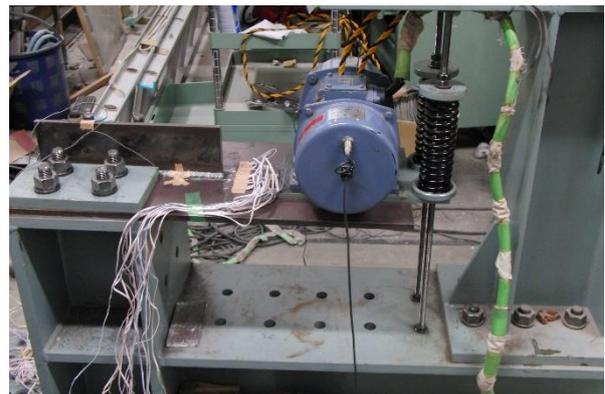


図 4 振動疲労試験機

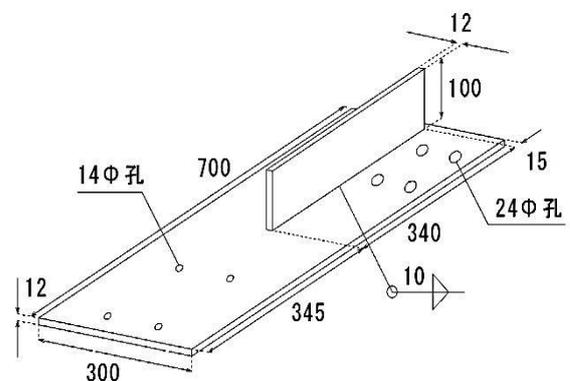


図 5 試験体寸法

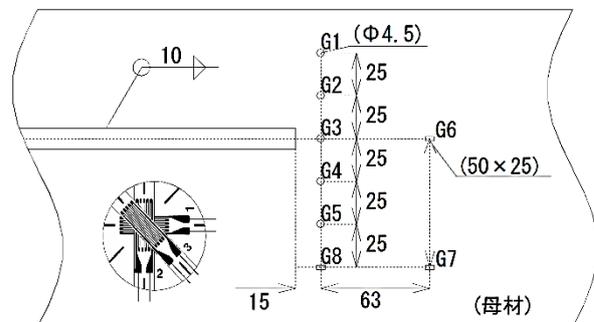


図 6 ゲージ位置

G3 ゲージから短手方向にそれぞれ 25mm 離して等間隔に配置し、G6 のゲージは G3 から長手方向に 63mm 離れた位置に、G7 のゲージはさらに G6 から短手方向に 75mm 離れた位置に、G8 のゲージは G1～G5 に並列の位置に 25mm 離して配置し、G6、G7、G8 から得られたひずみの計測結果と各ゲージ位置の溶接止端部から長手方向への水平距離を用いて、比例の関係より、溶接止端部の公称応力範囲を求めた³⁾⁴⁾⁵⁾。G1～G5 にはゲージ長 1mm の三軸ゲージ、G6～G8 にはゲージ長 1mm の一軸ゲージを使用した。

振動疲労試験により繰り返し繰り返し荷重を行い、図 7 に示すようにガセット中心から $a=21\text{mm}$ 、両側に $2a=42\text{mm}$ となる位置にき裂検出用のエナメル線を貼り付け、溶接止端から発生した疲労き裂の片方どちらかがこの位置まで到達すると、エナメル線が破断し振動疲労試験機が停止するようにし、その疲労き裂の進展する過程のひずみの値を計測した。

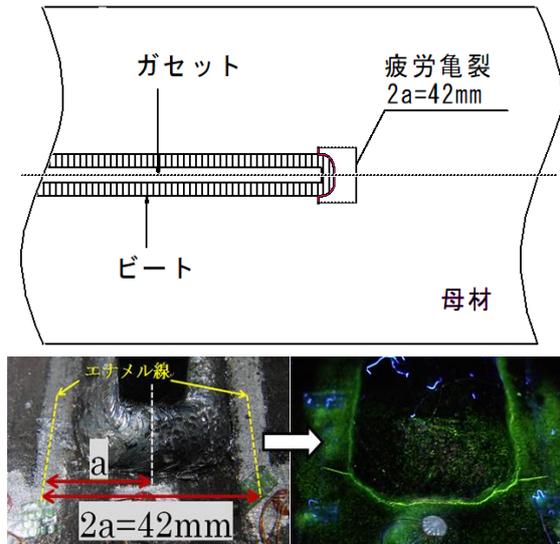


図 7 疲労損傷

3.2 振動疲労試験結果

公称応力範囲を 119.8MPa に設定した試験体の各ゲージ位置における主応力値を図 8 に示す。溶接止端から 5mm の位置に貼り付け、応力集中の影響が最も大きい G3 では、繰り返し回数が約 9000 回までは応力値が微小に増加し、その後減少した。繰り返し回数が約 9000 回まではき裂が発生しておらず、繰り返し回数約 9000 回以降に溶接止端部より疲労き裂が発生し、長手方向の応力の伝達が弱くなったことで G3 の主応力値が減少していったと考えられる。

同試験体の各ゲージ位置における主応力の角度を図 9 に示す。角度 θ は、長手方向から時計回りに回転した角度を正、反時計回りに回転した角度を負としている。繰り返し回数約 9000 回までは全てのゲージで大きな変化は見られないが、き裂発生後は G2、G4 でき裂進展に伴い主応力方向が X 軸方向から離れていくのが明確である。一方、き裂からの距離が G2 や G4 より遠い G1 と G5 ではき裂発生後も主応力方向に大きな変動は見られず、き裂の影響があまり見られない。

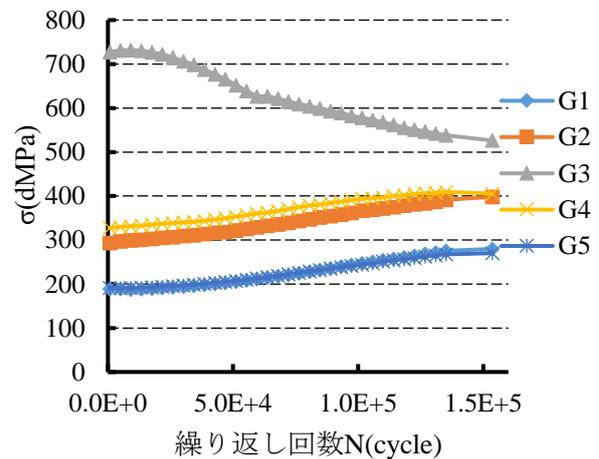


図 8 主応力値

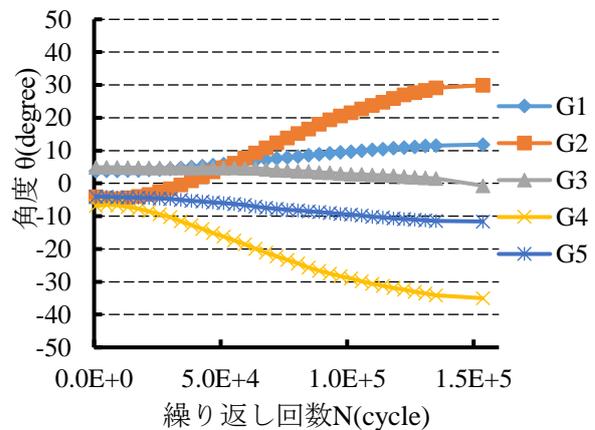


図 9 主応力角度

4. 解析的検討

3 章に示した振動疲労試験の結果を基に、解析

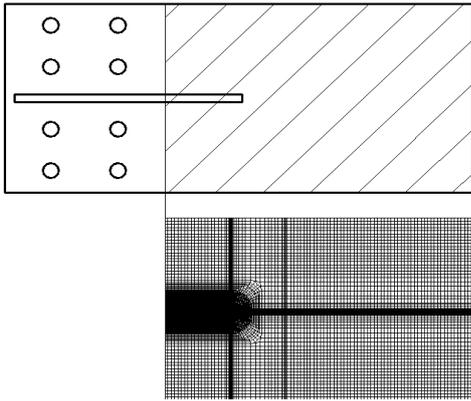
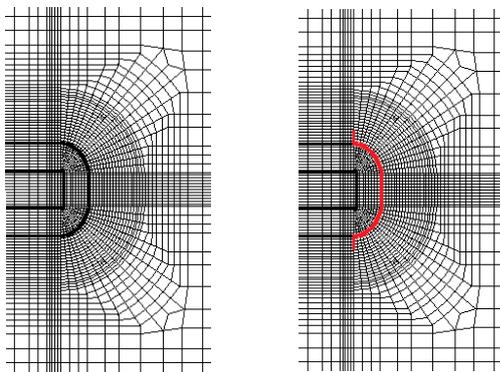


図 10 解析モデル



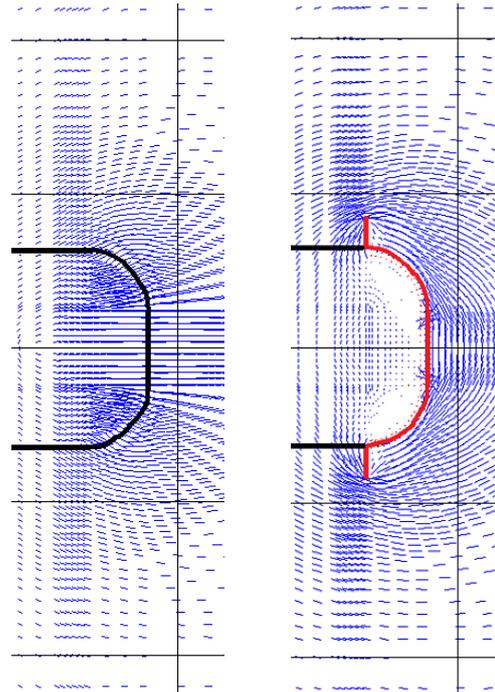
(a) 無き裂 (b) き裂長 21mm

図 11 き裂部詳細

を行った。

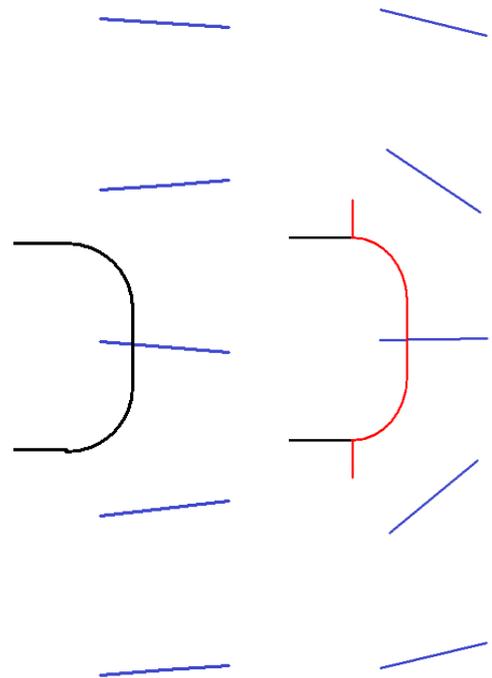
4.1 解析概要

解析モデルの材料特性は試験体と同材とし、鋼材のヤング率 $E=210,000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ と設定した。解析モデルは図 10 のように試験機への固定部から自由端側の部分をモデル化し、振動疲労試験機に固定している側の XYZ 軸の並進自由度を拘束し、ガセットプレート溶接部止端部の Z 軸の並進自由度を拘束しガセットプレートを擬似的に再現した。解析モデルは、無き裂、実試験体の試験終了時と同様の 21mm 状態を想定し、き裂深さを (き裂深さ/き裂長=1/2) としてモデルを作成し、それぞれのモデルにおいてのき裂周辺の応力の状態を確認した。検証を行いたいき裂想定部 (溶接止端部) 周辺の要素寸法は $1\text{mm}\times 1\text{mm}\times 1\text{mm}$ とした。各解析モデルのき裂部の詳細を図 11 に示す。この図において、き裂を赤線



(a) 無き裂 (b) き裂長 21mm

図 12 主応力方向



(a) 試験開始直後 (b) 試験終了直前

図 13 主応力方向

で示す。

4.2 解析結果

各モデルにおける主応力方向の xy 平面への射影を図 12 に示す。図中の赤線はき裂を、青線は主応力の方向を表示している。また、青線の長さは主応力の大きさを表しており、細黒線の交点がゲージの位置を示している。無き裂モデルでは、すべてのゲージの位置において主応力方向はほぼ X 軸を向いているが、き裂長 21mm モデルでは、き裂先端から放射線状に主応力方向が向いており、両モデルを比較すると G2, G4 位置において明確に角度が変化しているのが分かる。

解析結果と振動疲労試験結果との比較のために、試験開始直後と試験終了直後の主応力方向を図 13 に示す。図中の赤線はき裂を、青線は主応力の方向を表示している。図 12 と図 13 から、解析結果は試験結果と同様の傾向が見られることを確認した。

5. 結論

本研究では円孔を有する平板の解析と面外ガセット溶接継手の振動疲労試験及びその疑似モデルを用いた解析を行った。本研究より得られた結論を以下に示す。

- 応力集中部から発生したき裂周辺の主応力方向は、き裂先端から放射線状に広がることを確認した。
- き裂の長さにより影響範囲は異なるが、実試験体では無き裂状態ではほぼ X 軸を向いている主応力方向が、き裂の発生により G2, G4 位置では X 軸方向から離れるように傾きはじめ、一方、G1, G5 位置では変化は見られないことを確認した。
- き裂の影響がある範囲では、無き裂状態とき裂長が 21mm まで進展した状態を比較すると主応力角度の向きが変わることを確認した。

本モデルの G2, G4 位置において、無き裂では主応力が X 軸方向に向かっているが、き裂長が 21mm では主応力方向が X 軸方向から離れている。このことから、G2, G4 位置において主応力角度を測定し、 X 軸方向であるか否かを確認することで、き裂の検出が可能であると考えられる。

実構造物においては、既存構造物の初期応力状態を FEM モデルによりあらかじめ計算しておき、実測

値との間で主応力の向きが異なるかどうかによって疲労き裂の有無を判定する計画である。そのため、今後は単純引張応力下にあるガセットや鋼床版デッキプレートなど他の部位に関する検討も進めたいと考える。

【参考文献】

- 1) 山田健太郎, 舘石和雄: 鋼橋の維持管理, 2015.6.
- 2) 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, トピー鉄構技報, No.24, pp.15-22, 20008.
- 3) 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, pp.20-25, 2013.
- 4) 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, pp.824-833, 2012.3
- 5) 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, pp.522-529, 2008.3