

# 疲労亀裂の発生・進展に伴う 軸方向応力比の変動

堀合聡<sup>1</sup>・三浦真季<sup>2</sup>・千葉慎二<sup>3</sup>・新銀武<sup>4</sup>・大西弘志<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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)

E-mail: t5716002@iwate-u.ac.jp

<sup>2</sup>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)

E-mail: miura-m@chodai.co.jp

<sup>3</sup>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)

E-mail: g0117038@iwate-u.ac.jp

<sup>4</sup>博(工) 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目 11 番 5 号)

E-mail: tshingin@m.e-chuoh.com

<sup>5</sup>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)

E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

鋼構造物の劣化問題において、亀裂は溶接部周辺に発生するものが多い。亀裂損傷の点検は目視点検や必要に応じて浸透探傷試験や磁粉探傷試験により行われるが、目視点検では検査者の技量に左右されることや、非破壊検査では検出精度の問題や内部亀裂・欠陥には対応できないという問題を持つ。そこで、経験や技量の少ない点検者でも確実に亀裂を発見できる方法として、亀裂周辺の X 軸方向応力と Y 軸方向応力の比を確認することで、亀裂の有無を判定する方法を検討した。本論文では、実大試験体を用いた振動疲労試験を行い、その試験結果をもとに三次元 FEM 汎用解析ソフトを用いた解析モデルによる検討を行った。

**Key Words:** stress, fatigue crack, fillet welded joint, FEM

## 1. はじめに

社会基盤を構成する鋼構造物の劣化問題では、大きく分けて、鋼材の腐食と亀裂、破断等がある<sup>1)</sup>。鋼材の腐食は、塗膜などの防食機能が何らかの原因で劣化損傷し、鋼材が露出した箇所から供給された水分および塩分(飛来塩分や冬季間の融雪剤散布)が付着することにより鋼材が酸化し劣化する現象である。鋼橋における腐食の発生部位としては、伸縮継手部などの桁端部における腐食や、床版、舗装の損傷部からの漏水による腐食、構造上土砂の堆積や滞水し易い箇所における腐食、塗膜の品質を確保しにくい箇所における腐食などがある<sup>2)</sup>。しかし、鋼材の腐食損傷は劣化現象の進行速度が遅いため、

定期的に点検を行っていけば計画的に対処できる損傷である。

一方、亀裂は主に溶接部周辺に発生する疲労損傷により発生するものが多く<sup>3)</sup>、部材接合方法として溶接工法の採用と、通行車両の大型化、重量化や交通量の飛躍的な増加等により疲労損傷による亀裂の発生が問題化してきている。発生部位においては桁端切欠き部などの断面変化が大きい箇所や、ガセット部材の接合部、横桁フランジなどの部材の連続性が途切れている箇所などに多く見られる。これらのうち主部材に直接溶接されていない構造で、二次部材に発生した亀裂や、進展性の無い亀裂は直ちに問題になることは少ないが、進展性が見られる亀裂や主部材に発生した亀裂に関しては、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部材の連結部などに多く、点検しづらい箇所である。更に塗装などによる防食処理が施されていることがほとんどであり、防食処理の下にある亀裂を見つけることは難しい。破断は腐食の進行により生じるものと、亀裂が進展して生じるものの他、衝突などの外力によるものがあるが、破断を発見した場合も直ちに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。

これらの損傷のうち疲労による亀裂に着目すると、現在、亀裂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、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。

また、三木ら<sup>4)</sup>は、面外変形によってすみ肉溶接止端部から発生する疲労亀裂を対象として、磁粉探傷試験、渦流探傷試験、浸透探傷試験と超音波探傷試験について最も適した非破壊試験とそれらの精度を比較検討しており、発生部材の形状や亀裂の長さ、深さなどの適用範囲などを示しており、発生部位に適した工法や試験方法を選定しなければ適切な結果が得られず、非破壊検査の適用にあたっては十分な検討が必要となる。

これまで述べたように、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5年に1度の近接目視による点検の実施などにより<sup>5)</sup>、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。

そこで本論文では、亀裂の発生が疑われる実構造物の目視検査や非破壊試験の補助的手段として、亀裂周辺のX軸、Y軸方向の応力状態に着目し、それぞれの軸方向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が出来ないか検討を行なった。

はじめに、平板に円孔があり、そこから亀裂が発生した簡易な構造での解析モデルにて亀裂の有無による円孔周辺の軸方向の応力状態を確認し、亀裂周辺のX軸方向の応力値とY軸方向の応力値を比較することにより亀裂の有無を判定することができるか

検討し、この簡易モデルの結果をもとに、ガセットプレートが溶接されているモデルに対して振動疲労試験と解析モデルを作成し、亀裂周辺の各軸方向の応力状態を検討した。

## 2. 簡易モデルでの検討

### (1) 平板引張モデルの確認

平板に円孔があり、その円孔から短手方向両側に亀裂を模した切り込みを入れ、長手方向面内に引張応力を与えたモデルを考える。解析には、3次元FEM汎用解析ソフトを用いて行った。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 $\nu=0.3$ と設定した。解析モデルは長手方向(X軸方向)540mm、短手方向(Y方向)を160mm、厚さを9mmとし、円孔の半径を10mm、円孔の両側に亀裂を簡易的に模した切り込みを作り、その長さを10mmと20mmの2ケースのモデル六面体要素を用いて作成した。このモデルは平板表面の各軸方向の応力値の比較を目的としたため、亀裂先端の詳細まで再現せずにメッシュサイズは約1mmを基本とした。このモデルの短辺の片側の面を完全固定し、もう片方の面にX軸方向に0.1MPaの引張荷重を掛け、切り込み周辺の軸方向の応力状態の検証を行った。

図-1に切り込み長さを20mmのモデル図と亀裂先端の座標系を示す。また、作成したモデルにおいて、亀裂先端を原点とした極座標を取り、亀裂周辺の任意の点の応力値を式(1)による計算式にて比較したものを表-1に示す<sup>6)</sup>。

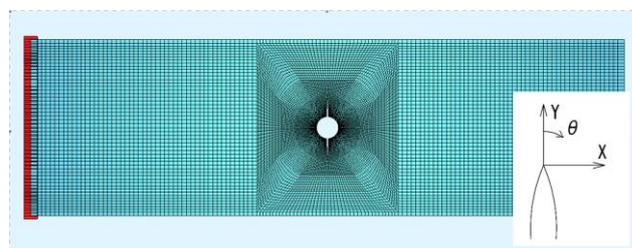


図-1 解析モデル

表-1 各モデルでの応力値 (MPa)

Analysis model	r	$\theta$	$\sigma_x$ 計算値	$\sigma_x$ 解析値
Crack length 10mm	2.49	-65.13	0.259	0.282
Crack length 20mm	2.44	-65.39	0.370	0.361

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

ここで、 $\sigma_0$ は引張応力、 $a$ は切り込み長さ(亀裂長)、 $r$ は亀裂先端からの距離、 $\theta$ は任意点と亀裂先端を結んだ線と亀裂進行方向とのなす角度である。表-1より、亀裂長10mmと20mmでは計算値と解析値の傾向は逆転しているが、それぞれの値に大きな差がないことによりこの簡易モデルは妥当だと言える。代表的な点を2点取り上げたが、他の点も同様な傾向を示す。

## (2) 亀裂周辺の軸方向の応力値の比較

実際の亀裂発生箇所に対して対策を講じる際には、必要に応じて対策前後に応力測定を行うが、測定値を正しく評価するには測定時の外力(荷重)等を含めて評価しなければならず、実際には荷重車などを載荷して計測を行い、その計測は大掛かりになることが多い。そこで、測定したX軸方向、Y軸方向の応力値の比を取ることで外力の値を利用せず亀裂周辺の応力変化を確認できるか検討を行なった。この引張力を与えたモデルにおいて、X軸方向の応力値とY軸方向の応力値を比較し逆転している範囲を確認する。

図-2にY軸方向の応力値がX軸方向の応力値を上回っている範囲を解析モデル上にプロットしたものを示す。この図において、Y軸方向の応力値がX軸方向の応力値を上回っている箇所を赤色で着色し

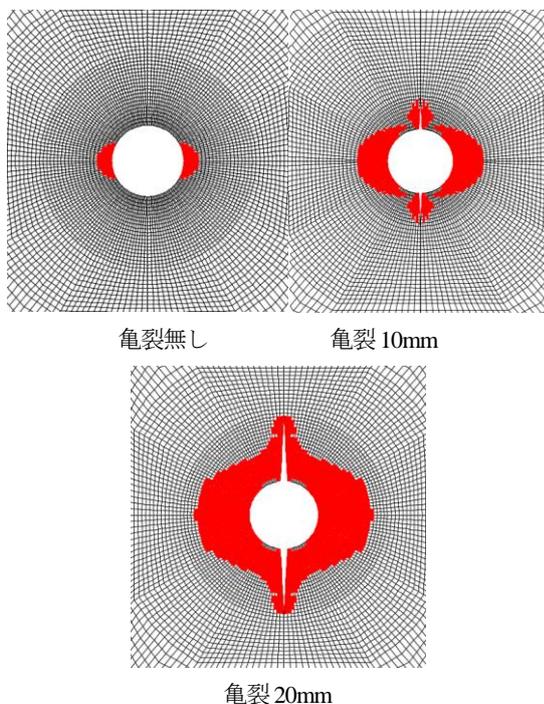


図-2 各モデルでの軸方向応力比

ている。亀裂の無い状態だと、円孔のX軸方向両端部においてはX軸方向の応力が伝達されないでY軸の軸方向応力値が大きい結果を示している。図-1の引張りモデルにおいて、円孔のY軸方向両端部において無亀裂の状態であればY軸方向の応力値よりX軸方向の応力値が大きい値を示している。しかし、亀裂により周辺の応力状態が乱され、Y軸方向の応力値がX軸方向の応力値より大きくなっている事が確認できる。これより亀裂周辺のX軸方向の応力値とY軸方向の応力値を比較することにより亀裂の有無を判定することができると思われる。この簡易モデルの結果をもとに、ガセットプレートが溶接されているモデルでの亀裂周辺の応力状態を検討した。

## 3. ガセットプレート付きモデルでの検討

ガセットプレートが溶接されたモデルを作成するにあたり、実試験体による振動疲労試験を行い、その結果と解析モデルとの比較検討を行い、亀裂周辺の応力状態を検討した。

### (1) 面外ガセット溶接継手の振動疲労試験

実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<sup>7)</sup>。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

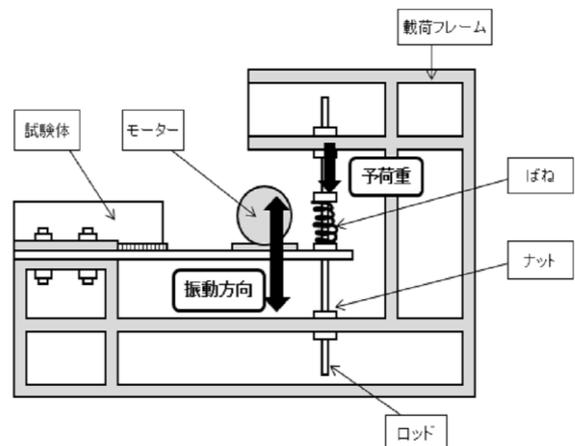


図-3 振動疲労試験機の概要



図-4 振動疲労試験機の写真

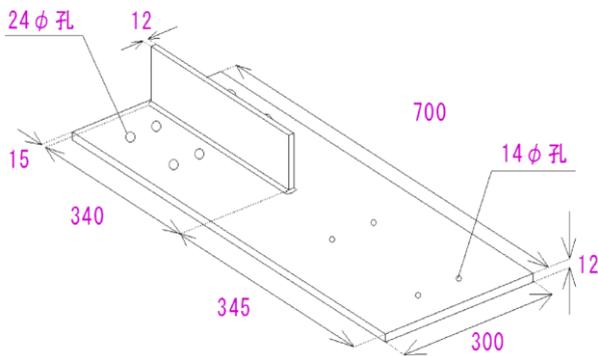


図-5 試験体寸法

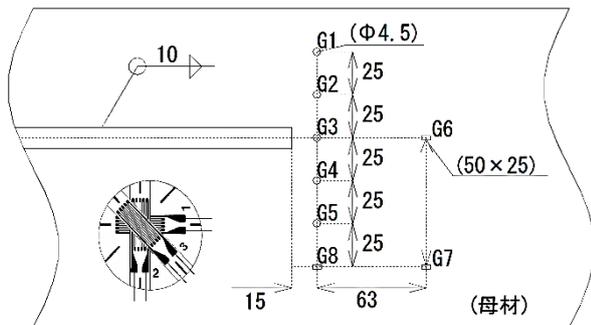


図-6 ひずみゲージ貼り付け位置

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い、サンプリング間隔 500Hz にて計測を行った。

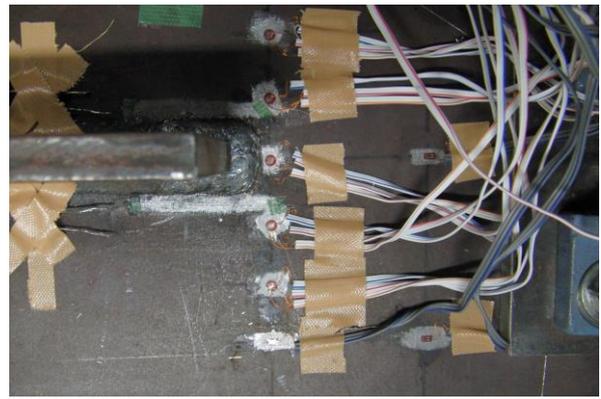


図-7 ひずみゲージの貼り付け状況

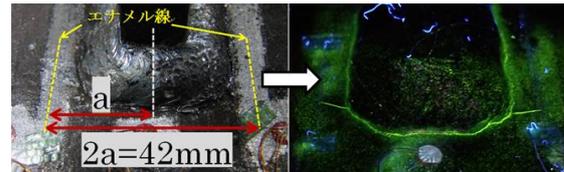
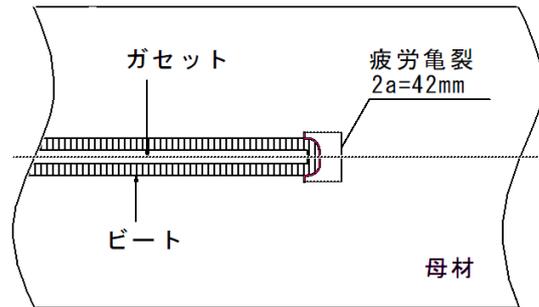


図-8 疲労亀裂の検出方法

次に本研究で使用した試験体を図-5 に示す。試験体の材質は SS400 とし、板厚 12mm、幅 300mm、長さ 700mm の母材に、板厚 12mm、高さ 100mm、長さ 340mm のガセットプレートが直角に脚長 10mm のすみ肉溶接で溶接されたものである。また、ガセット端部は回し溶接の処理を行った。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。試験体に貼り付けたひずみゲージの位置を図-6 に、ゲージを貼り付けた状況写真を図-7 に示す。G3 は応力集中の影響を含んだ応力を測定するために溶接止端から長手方向に 5mm 離れた位置に貼り付けた。G1, G2, G4, G5 は 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 離して配置した。この G6, G7, G8 のゲージで計測したひずみの結果より、G6 と G7 の平均応力と G8 の位置での応力の傾きを出して溶接止端部の応力を比例の関係より公称応力範囲を求めた<sup>8) 9) 10)</sup>。試験体

表-2 各試験体の設定応力と繰り返し回数

試験体番号	公称応力 (MPa)	载荷速度 (Hz)	繰り返し回数
No.1	119.8	17.5	154,800
No.2	101.5	17.0	240,200
No.3	79.1	15.0	890,000

に貼り付けたゲージは G1～G5 の三軸ゲージが FRA-1-11, G6～G8 の一軸ゲージには FLA-1-11 を使用した。

(2) 振動疲労試験結果と考察

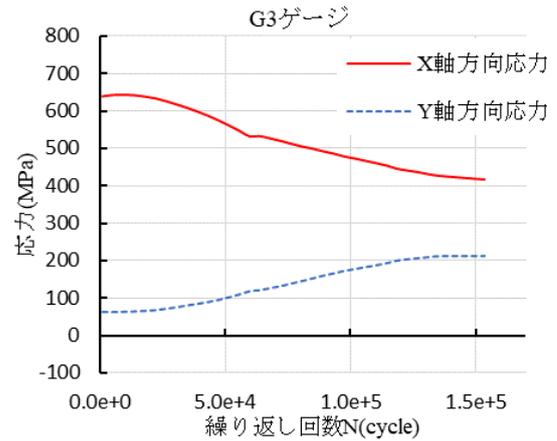
振動疲労試験により繰り返し载荷を行い、図-8 に示すように、ガセット中心から  $a=21\text{mm}$ 、両側に  $2a=42\text{mm}$  となる位置に亀裂検出用のエナメル線を貼り付け、溶接止端から発生した疲労亀裂の片方どちらかがこの位置まで到達すると、エナメル線が破断し振動疲労試験機が停止するように設定し、その疲労亀裂の進展する過程の応力の値を計測した。

各試験体の試験開始時の公称応力と、亀裂が  $2a=24\text{mm}$  の亀裂長まで進展するまでの繰り返し数を表-2 に示す。

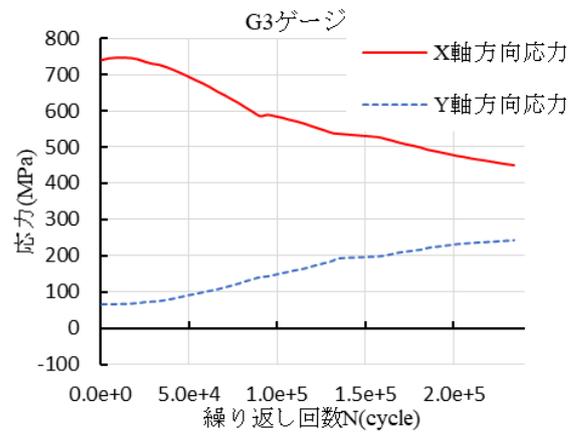
また、振動疲労試験における各試験体の G3 ゲージの長手方向 (X 軸) と短手方向 (Y 軸) の発生応力 (振幅の最大値) のグラフを図-9 に示す。試験体 No.2 が試験体 No.1 より公称応力が小さいが、開始時の発生応力が大きくなっているのは溶接ビードの大きさや止端形状が影響していると思われる。各試験体において、亀裂が進行するにつれ母材表面の X 軸方向の応力が開放され、それに伴い Y 軸方向に応力が移行していくのが確認できる。試験体 No.1 と試験体 No.2 は亀裂長  $2a=24\text{mm}$  に達した段階でも、X 軸方向応力と Y 軸方向応力が逆転するまでには至っていないが、試験体 No.3 では、亀裂長が  $2a=24\text{mm}$  に達する前に各軸方向の応力値が逆転している。これは表-2 に示したように振動疲労試験における载荷荷重の大きさが関係していると思われる。

本来、亀裂が発生していない状態において、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、主応力は亀裂を避けるような向きになるため、亀裂発生箇所近傍の主応力方向は長手方向 (X 軸) とは異なる。

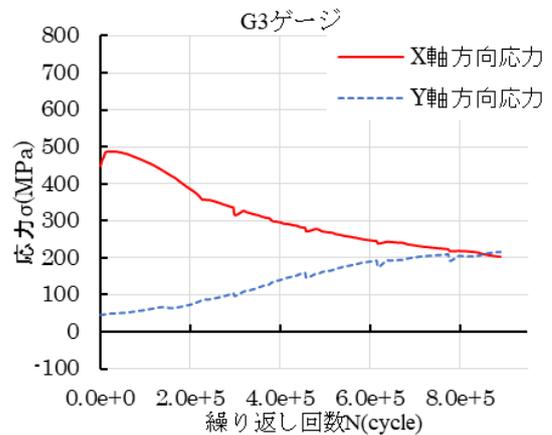
これを利用し、X 軸方向応力と Y 軸方向応力の比を取ることで、亀裂の進展過程を確認しようとしたものを図-10 に示す。この図からも各試験体において亀裂の進展に伴い長手方向の応力が開放され、かつ短手方向の応力が大きくなっていく傾向がわかる。また、試験体 No.1 と試験体 No.2 より、亀裂がある



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2



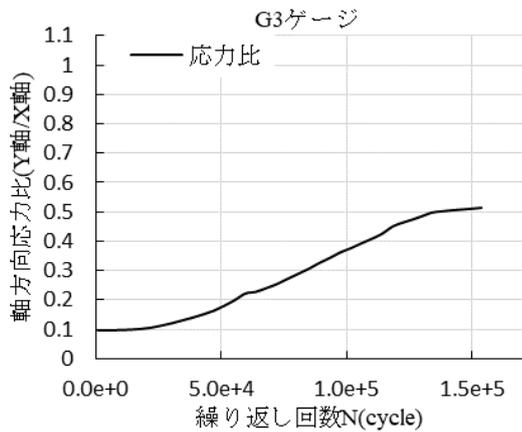
(c) 試験体 No.3

図-9 各試験体の軸方向応力値

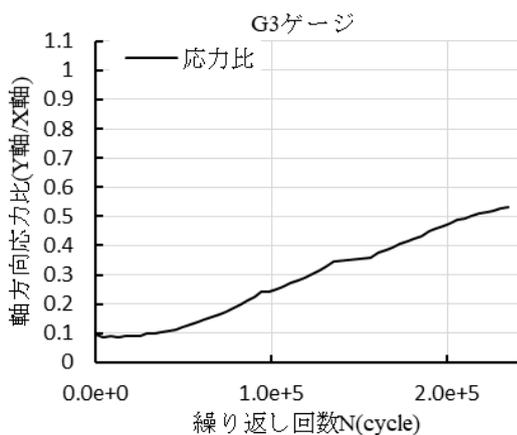
程度進展した場合でも軸方向応力比 (Y 軸/X 軸) が 0.5 程度であり、試験体 No.3 では 1 を超えていることが明らかになった。

(3) 解析モデルの作成

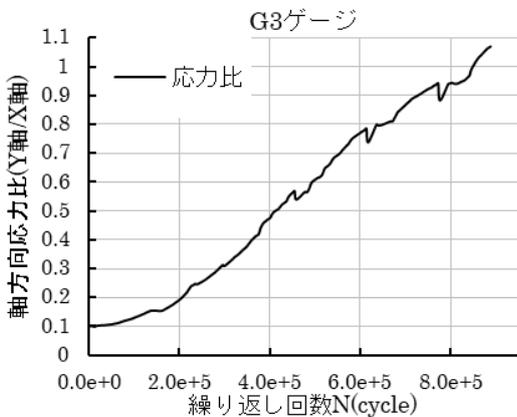
3 (1) に示した振動疲労試験の結果を基に、解析モ



(a) 試験体 No.1



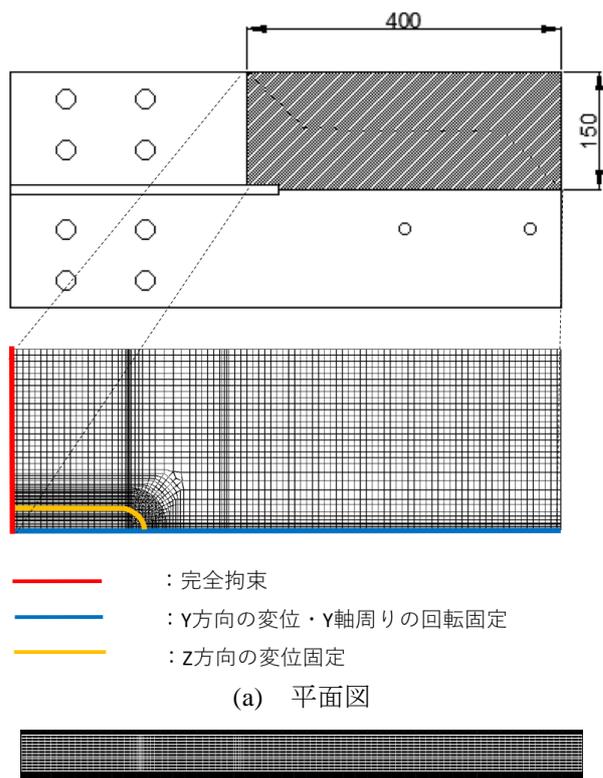
(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3

図-10 各試験体の軸方向応力比

デルでの検討を行った。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-11に示すような疲労試験体の一部分をモデル化した平面モデルとし、振動疲労試験機に固定している側のXYZ変位および回転を拘束した剛結とし、ガセットプレート溶接止端部のZ方向変位を固定してガセットプレートを擬似的に再現した。解析モデルの亀裂



(a) 平面図  
(b) 側面図  
図-11 解析モデル

は、振動疲労試験結果の2軸の軸方向応力比の変化に基づき、ガセットプレート先端の溶接止端部から亀裂が進展していく過程を想定し、亀裂長を、1mm, 2mm, 5mm, 10mm, 21mmとし、亀裂深さを(亀裂深さ/亀裂長=1/2) <sup>1)</sup>として中心から外側に段階的に浅くしたモデルを作成し、それぞれのモデルにおいての亀裂周辺の応力の状態を確認した。検証を行いたい亀裂想定部(溶接止端部)周辺のメッシュサイズは1mmを基本とし、母材の厚さ方向にも1mmとした。各解析モデルの亀裂部の詳細を図-12に示す。この図において、亀裂を赤い太線で示しているが、振動疲労試験結果を参考に、溶接線に沿うように、母材に亀裂を作成した。

#### (4) 解析結果と考察

各解析モデルの亀裂長における解析を行い、図-6で示したG1, G2, G3のゲージ位置でのX軸方向(試験体長手方向)とY軸方向(試験体短手方向)の応力の値を示したものを表-3に示す。亀裂長1mmと2mmのモデルにおいて、各ゲージ位置でのX軸方向の応力値とY軸方向の応力値を見ると、亀裂長が2mm程度であっても、一番近いG3ゲージの位置においても大きな変化を確認することができない。亀裂長が5mmに達したモデルでは、一番近いG3ゲージのX軸方向の応力値が減少し、Y軸方向の応力値

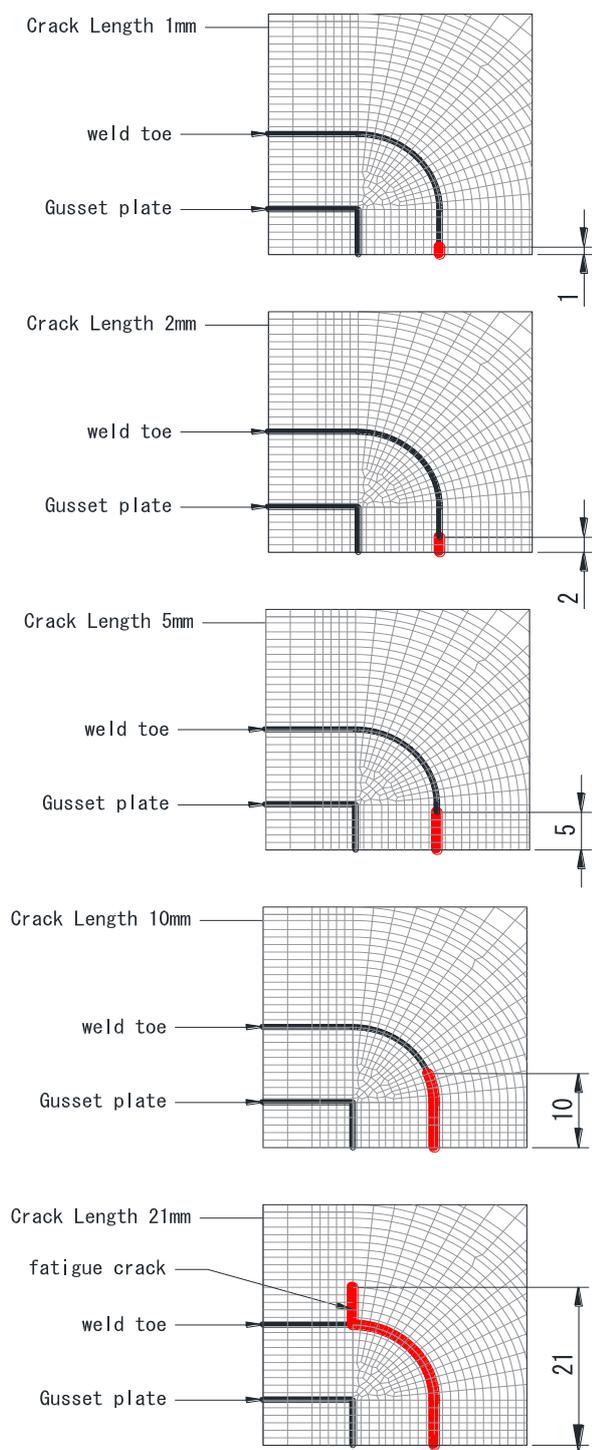


図-12 亀裂モデル詳細

が増加している。これは、亀裂により母材の表面付近に伝わっていた応力の伝達が絶たれ、亀裂付近に設置したゲージ位置での X 軸方向のひずみが伝達されなくなり、それに伴い Y 軸方向にひずみが移行したと考えられる。亀裂長 10mm および 21mm のモデルになると、その傾向は顕著になっているのが確認できるが、G1 ゲージ、G2 ゲージの位置まで影響を及ぼすまでには至っていない。

表-3 および図-9、図-10 より G3 ゲージの位置における解析値と実験結果の比較をみると、亀裂長が長くなるにつれ Y 軸方向の応力値が増え、X 軸方向の応力値が減る傾向が確認できる。これよりこの解析は妥当であると言える。

このモデルにおいて亀裂が発生していない状態では、最大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、応力の伝達は亀裂により絶たれるため亀裂を避けるような方向に変化する。これを視覚的に確認するために亀裂長 1mm から 21mm の各モデルにおける最大主応力の方向を示したものを図-13 示す。この図において、亀裂を赤い太線で示し、最大主応力の方向線を青い細線で示す。亀裂長 1mm のモデルでは、亀裂周辺に若干の最大主応力方向の変化は見られるものの、その他の部分においての最大主応力の方向は X 軸方向を向いている。その後、亀裂長が長くなるにつれ、最大主応力の方向が変化する範囲が大きくなるのが確認でき、亀裂長が 10mm や、21mm に達すると、はじめに亀裂が発生した位置付近の表面の応力は亀裂線に並行に沿っているのが確認できる。

表-3 では、一般的にひずみゲージを貼り付ける位置での各モデルの亀裂長における応力値の比較を行い、図-13 で、それぞれの亀裂長における亀裂付近の最大主応力の方向の確認を行った。亀裂の有無を確認することを考えた場合、本研究のような一定した連続荷重では、亀裂近辺で測定される応力値の減少していく過程で判断できるが、実橋では外力の大きさが不明であるため、ある時点での応力値の減少で判断するのは難しい。そのため X 軸方向の応力値や Y 軸方向

表-3 各解析モデルにおけるゲージ位置での応力値 (MPa)

Analysis model	G1			G2			G3			G6
	X	Y	Y/X	X	Y	Y/X	X	Y	Y/X	X
Crack length 1mm	129.7	27.5	0.212	192.5	76.9	0.399	243.8	167.4	0.687	98.5
Crack length 2mm	130	27.6	0.212	193	77.1	0.399	213.9	167	0.781	98.4
Crack length 5mm	132	28.2	0.214	197.6	79	0.4	89.5	165.2	1.846	97.7
Crack length 10mm	138.5	29.9	0.216	211.5	83.9	0.397	24.8	143.5	5.786	95.5
Crack length 21mm	155.1	27.4	0.177	215.7	54.5	0.253	-54.7	212.1	-3.88	89.6

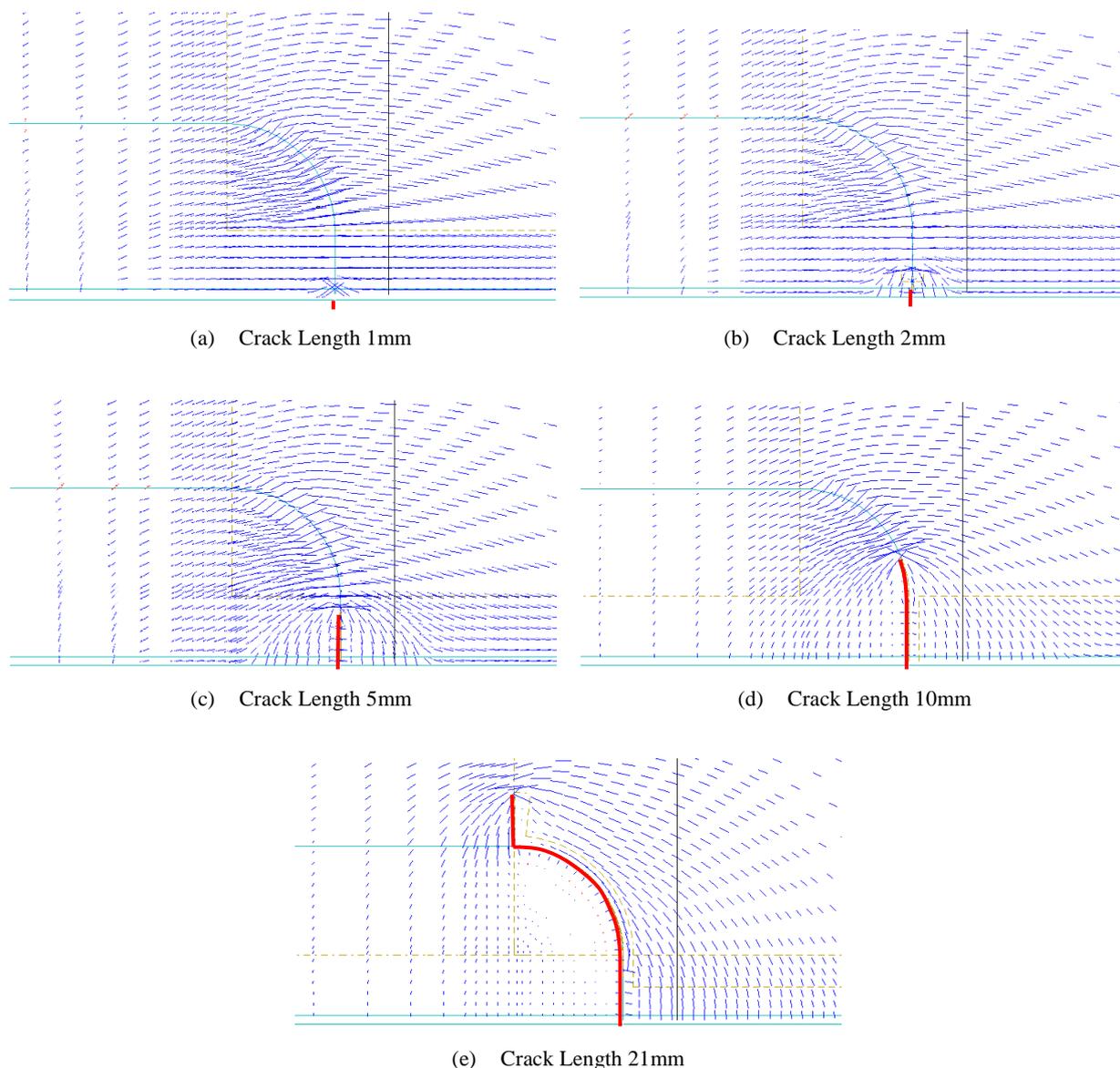


図-13 各モデルの亀裂付近の最大主応力方向

の応力値のそれぞれの値だけで亀裂の有無を判断するのは難しく、先に述べたように、その時の対象モデルに載荷されている外力（荷重）も含めて判断しなければならない。表-3ではX軸方向とY軸方向のそれぞれの応力値のほか、X軸方向応力とY軸方向応力値の比を示している。2軸の軸方向応力値の比を取ることでも次元化し、その比を比較することで、ある外力が掛かった時点（瞬間）で、その大きさに関係なく亀裂の有無が判断できると考える。あるいは実計測においては、応力値を比較せずにひずみゲージの値をそのまま利用することで、より簡便な計測が可能であると考える。

図-14は、それぞれの亀裂長において、母材のど

の範囲でY軸方向の応力値がX軸方向の応力値を上回るかを検討した結果を解析モデル上にプロットしたものである。図-2と同様に、Y軸方向の応力値がX軸方向の応力値を上回っている箇所を赤色で着色している。亀裂長1mmモデルや2mmモデルでは、やはり亀裂長が短いので、(Y軸応力値/X軸応力値)の影響範囲はごく限られた範囲である。そのため、この時点での軸方向応力比による亀裂の有無の判断は難しい。亀裂長5mmのモデルでは亀裂位置から長手方向(X軸方向)に7mm程度まで(Y軸応力値/X軸応力値)の影響がみられ、亀裂長10mmのモデルでは亀裂位置から長手方向に13mm程度まで(Y軸応力値/X軸応力値)の影響がみられ、加えて短

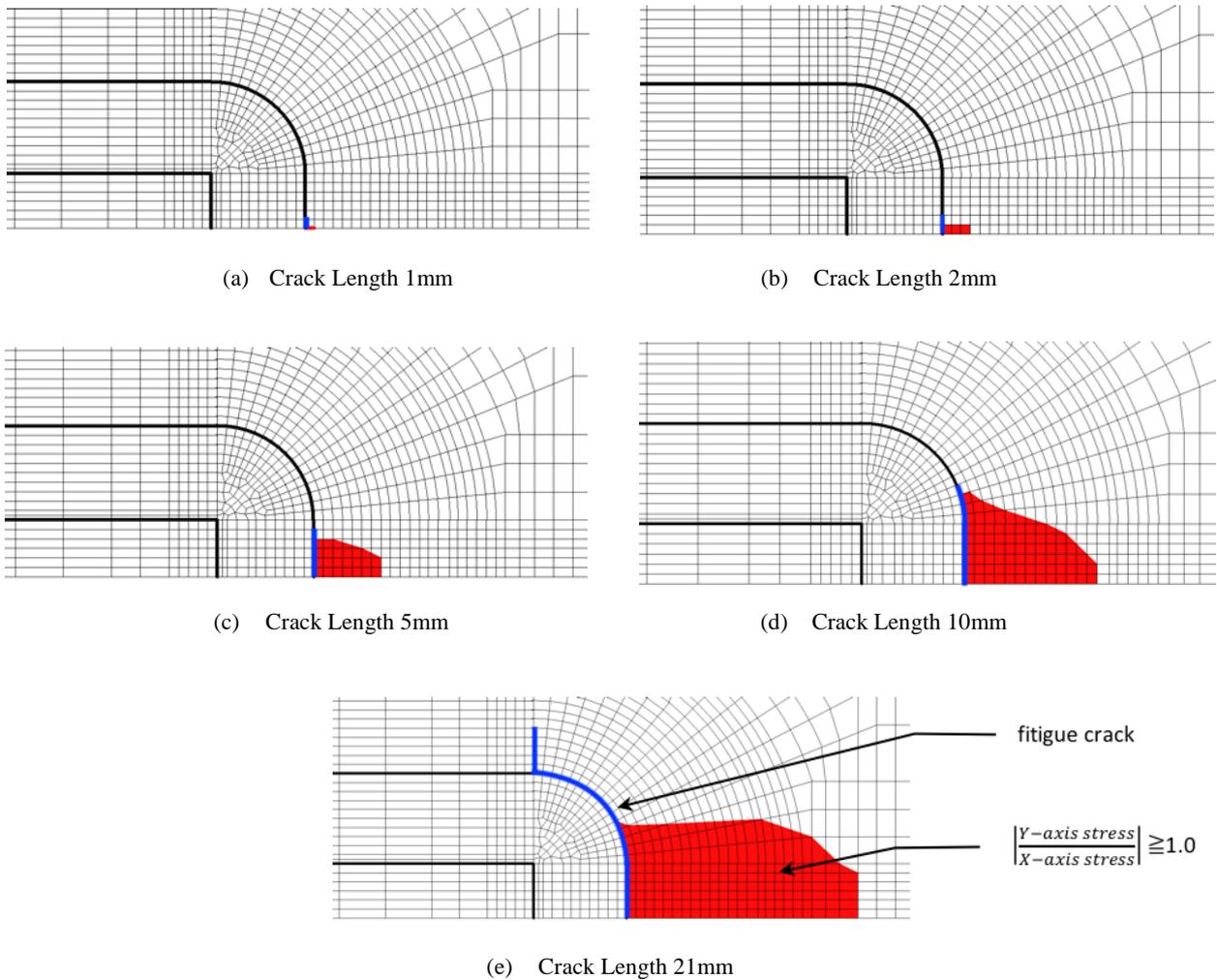


図-14 各モデルの亀裂付近の亀裂影響範囲 (Y 軸応力値/X 軸応力値>1)

手方向においても亀裂位置から離れるにつれて影響範囲が減少しているのを確認した。亀裂長 21mm になると、かなりの広範囲において (Y 軸応力値/X 軸応力値) の影響を及ぼしているのが確認できる。

また、いずれのモデルにおいても長手方向に影響範囲が伸びているのが確認できる。この結果により、亀裂が発生することにより、X 軸方向の応力が開放され、Y 軸方向の応力が大きくなり、X 軸と Y 軸の軸方向応力値が逆転することを検討した。

#### 4. 結論

本論文では、鋼構造物の劣化問題のうち鋼材の疲労損傷である亀裂に着目し、亀裂周辺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) 簡易的な引張モデルにおいて、亀裂周辺の軸方向の応力状態を検討し、亀裂により X 軸方向と Y 軸方向の応力値の大きさが増減することを FEM 解析で明らかにした。
- (2) ガセットプレート付き試験体による振動疲労試験により、溶接部からの亀裂発生後の亀裂周辺の軸方向の応力の変化の過程を明らかにした。
- (3) ガセットプレート付き曲げモデルの解析において、亀裂が発生する可能性が高い位置において亀裂長がある一定値 (本モデルにおいては 5mm) に達した場合、各軸方向の応力値の大きさが増減し、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事を示した。

(4) 解析モデルでのそれぞれの亀裂長において、亀裂周辺の軸方向応力比 (Y 値/X 値) を確認し、逆転している影響範囲を示した。

本論文では軸方向の応力値の比で検討を行ったが、実際の計測では、ひずみゲージを利用した測定が一般的であり、ひずみの値を利用しても同様の結果を示すと考える。このことより、亀裂による応力変化の影響範囲内に X 軸と Y 軸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、測定値のデータをそのまま利用して軸方向応力 (ひずみ) 比 (Y 軸値/X 軸値) 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。

また、今回検討したモデルは、簡易引張りモデルとガセットプレートが溶接されている曲げモデルによる亀裂周辺の応力状態を検討したものであるが、今後は、その他の疲労亀裂を想定した溶接モデルについても検討を行い、さらに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) 国土交通省：道路橋定期点検要領 2014.  
2) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.688，I-54，299-311，2001.1

3) 三木千寿，坂野昌弘，館石和雄，福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，第 392 号，I-9，1988.4  
4) 三木千寿，深沢誠，加藤昌彦，大畦雄：表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性，土木学会論文集，第 386 号，I-8，1987.10  
5) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2017.8  
6) E.P.ポポフ，成岡昌夫，浜田実：固体の力学入門 1，2 1975.  
7) 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 2008.  
8) 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 2013.  
9) 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 2012.  
10) 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 2008.  
11) 坂野昌弘，新井正樹：面外ガセット溶接継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響 2003.

(2018. 6. 22 受付)

## FLUCTUATION OF AXIAL STRESS RATIO WITH OCCURRENCE AND PROGRESS OF FATIGUE CRACK

Akira HORIAI, Maki MIURA, Shinji CHIBA, Takeshi SINGIN, Hiroshi ONISHI

Cracks frequently occur around welded part in degradation problem of steel structure. The inspection of crack damage is carried out by visual inspection and magnetic particle examination as needed. However, it has disadvantages that depend on inspector's skill in visual inspection and is impossible to detect because of accuracy of detection and deal with internal cracks and defects in non-destructive inspection. Therefore, I investigated method of-confirming the presence or absence of cracks as a way that inspector with little experience and skill check cracks certainly by calculating rate of X-axis and Y-axis stress around cracks. In this paper, I carried out vibration fatigue test using actual size specimen, based on the result, I investigated by analysis models made with 3D FEM general-purpose analysis software.