

溶接継手ルート部起点の疲労き裂発生伝播寿命 に対する局所的な材料特性および形状因子の影響

堤 成一郎¹・柴田 誉²・Riccardo FINCATO³

¹正会員 大阪大学接合科学研究所 准教授 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ケ丘 11 番 1 号)
E-mail: tsutsumi@jwri.osaka-u.ac.jp

²学生員 大阪大学接合科学研究所 修士課程 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ケ丘 11 番 1 号)
E-mail: shibata@jwri.osaka-u.ac.jp

³非会員 大阪大学接合科学研究所 特任講師 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ケ丘 11 番 1 号)
E-mail: fincato@jwri.osaka-u.ac.jp

社会基盤構造物において疲労が大きな問題となっており、破損事例も多く報告されている。中でも溶接継手ルート部から発生するき裂は、溶接ビード表面からの目視による発見が困難なこともあり、疲労性能支配因子の明確化と精度の高い評価手法が重要となる。本研究では、溶接継手ルート部を起点とする疲労損傷に影響を与える諸因子について数値解析的な検討を行った。具体的には、非線形 FEM 解析および線形破壊力学に基づく X-FEM 解析を実施することにより、ルート部の局所的な弾塑性挙動とそれに基づいて予測される疲労き裂発生寿命、および疲労き裂発生後の伝播挙動について考察した。その結果、応力集中の高い溶接ルート部の疲労損傷は、疲労き裂伝播過程が支配的となり、局所的な材料特性やルートギャップによる影響は小さいことを明らかにした。一方、角変形矯正が疲労寿命に与える影響は大きく、ルート部に圧縮応力を導入する付加的なプロセスによる疲労寿命延長効果が示唆される結果を得た。

Key Words: Fatigue Crack Initiation, Fatigue Crack Propagation, Weld Root

1. 緒言

近年、鋼橋をはじめとする鋼構造物の疲労問題が顕在化しており、損傷・破損原因の多くを占める¹⁾と言われている。それを受け、2002年より道路橋示方書・同解説書²⁾において鋼橋の疲労設計が導入され、2012年の改定時³⁾には「疲労設計」として独立した章が追加された。また、我が国には2017年時点で橋長2m以上の橋梁は約73万橋存在⁴⁾し、その多くが2002年以前に建設されているために、今後の交通量や供用年数の増加に伴って疲労損傷拡大防止に対する要求は増々高まっていくものと思われる。特に溶接部は、溶接余盛や未溶着部などの応力集中部の形成や残留応力、溶接変形など様々な要因が重畳することから、疲労き裂の発生・伝播を伴う破壊の起点となる。その中でも片側すみ肉溶接継手は、施工性や経済性に優れる継手形式であるが、施工時に溶接ルートが残ることがあり、高応力集中部となることから、疲労損傷の起点となりやすい。

ルート部から発生する疲労き裂とその後の伝播特性にはルートギャップや角変形等の形状因子、HAZ等の局所的な材料特性分布状況が影響を与えることが既往の研究^{5a)}により明らかにされている。しかし、それらの影響

は継手形式や荷重モードなど、状況によって変化しており、溶接継手ルート部を起点とする疲労損傷のメカニズムに関して十分な理解が得られているとは言い難い。

一方、近年の計算技術の目覚ましい進歩により、有限要素法に代表される数値シミュレーション技術は、研究・開発・設計段階等において幅広く用いられており、その信頼性は、実験に代わるツールとなりつつある。著者ら¹⁰⁻¹²⁾も、これまで溶接構造物の繰返し変形挙動、特に極低・低・高サイクル疲労き裂発生および地震動を含む繰返し座屈問題等への適用を目指した繰返し弾塑性モデルを提案しており、様々な継手形式や構造形式に対してその妥当性を検証してきた。また近年、阿部ら¹³⁻¹⁴⁾は荷重伝達型片側すみ肉溶接継手の溶接ルートギャップやHAZ強度特性等が疲労性能に与える影響に関して実験的な検討を実施している。

そこで本研究では、ルート部から発生する疲労損傷に注目し、阿部ら¹³⁻¹⁴⁾による疲労試験結果を対象に、弾塑性 FEM 解析および線形破壊力学に基づくき裂伝播解析を実施することにより、溶接ルートギャップや角変形などの形状因子と HAZ 強度特性が疲労寿命に与える影響について検討を行った。

2. 材料構成モデルと疲労き裂発生寿命評価則

材料モデルには純粋弾性応答から弾塑性応答への滑らかな遷移を表現可能な拡張下負荷面¹⁵⁻¹⁶⁾、弾性境界面および繰返しに伴う硬・軟化を表現するために繰返し損傷の概念を導入した疲労 SS モデル^{11-12, 17-24)}を採用した。採用した疲労 SS モデル応答の例を図-1 に示す。

本研究では、疲労き裂発生寿命に対する平均応力および材料強度の両影響を考慮可能な評価式の提案を行う。

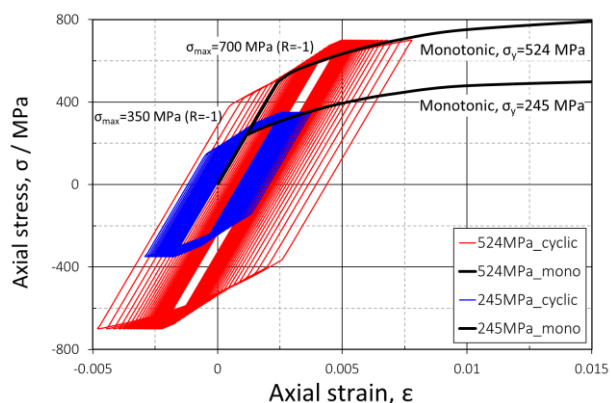


図-1 材料モデルの応力ひずみ応答

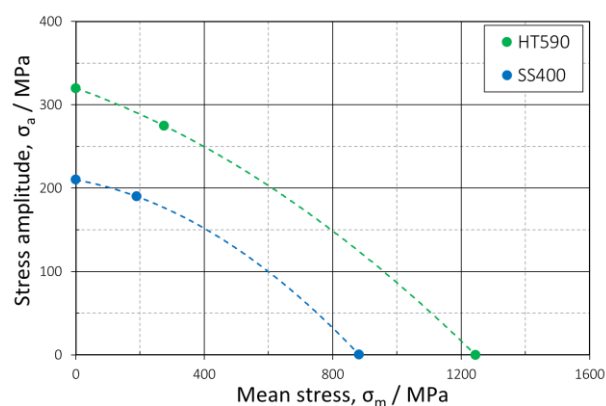


図-2 疲労限度線図

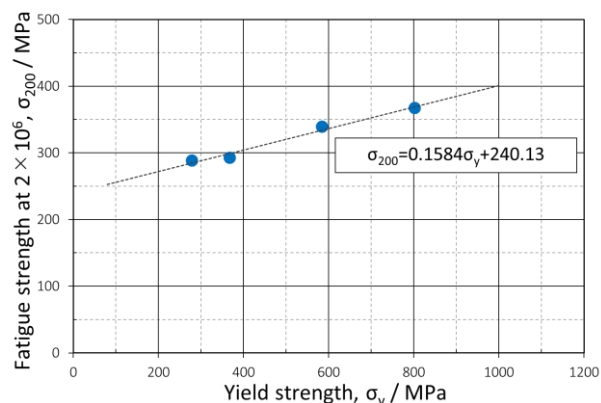


図-3 降伏応力と 200 万回疲労強度の関係

平均応力は一般に、疲労寿命に大きな影響を与えることが知られており、引張の平均応力は疲労寿命を低下させ、圧縮の平均応力は疲労寿命を延長させることが実験により明らかにされている。そこで、既往の研究により 2 種類の鉄鋼材料 JIS SS400^{25,26)}および HT590²⁷⁾に対して実施された材料疲労試験結果をもとに、図-2 に示す疲労限度線図を取得した。これらを基に作成した平均応力の影響を考慮した関数を $A(\sigma_m)$ とし、それぞれ以下に示す。

HT590

$$A(\sigma_m) = \frac{3.200 \times 10^2}{-9.628 \times 10^{-5} \sigma_m^2 - 1.372 \times 10^{-1} \sigma_m + 3.200 \times 10^2} \quad (1)$$

SS400

$$A(\sigma_m) = \frac{2.100 \times 10^2}{-1.913 \times 10^{-4} \sigma_m^2 - 6.892 \times 10^{-2} \sigma_m + 2.100 \times 10^2} \quad (2)$$

続いて、図-3 に既往の研究²⁸⁾によって得られた降伏応力と 200 万回疲労強度の関係を示す。この関係より、繰返し数 200 万回時の応力は弾性応答であると仮定し、ヤング率 ($E = 206 \text{ GPa}$) で除すことによりひずみ範囲と降伏応力の関係を算出した。得られる関係式を以下に示す。

$$\Delta \varepsilon_{200} = 7.68 \times 10^{-7} \sigma_y + 1.17 \times 10^{-3} \quad (3)$$

続いて、繰返し数 200 万回において、これまで実験データベースに基づいて提案されている疲労き裂発生寿命

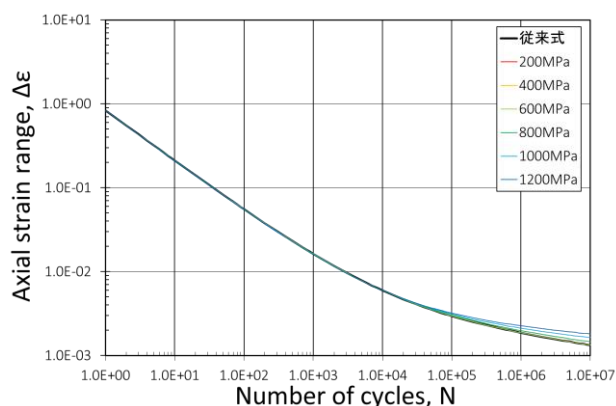


図-4 軸ひずみ範囲と繰返し数の関係
(6 種の降伏応力に対する評価式)

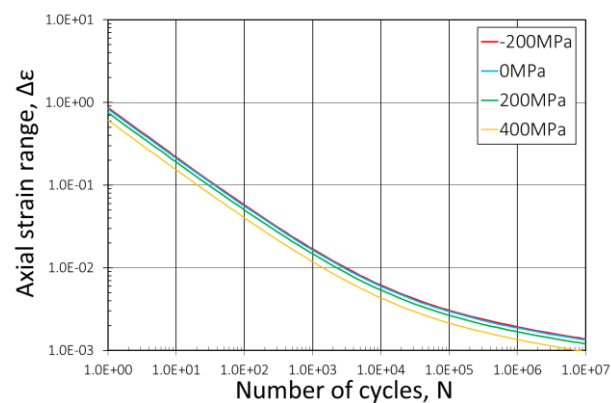


図-5 軸ひずみ範囲と繰返し数の関係
(4 種の平均応力に対する評価式)

式の値と式(3)の漸近式を以下に示す。

$$\Delta \varepsilon_{200} = \left\{ \left(-7.654 \times 10^{-7} \sigma_y + 2.178 \times 10^{-3} \right)^{-n} + \left(1.680 \times 10^{-3} \right)^{-n} \right\}^{-1/n} \quad (4)$$

ただし、 $n=100$ とする。

以上の条件と、繰返し数 $N = 10000$ 回において、既往の式²⁹⁾と一致するという条件の下、以下のように設定した方程式を解くことによって既往式を拡張する。

$$\Delta \varepsilon_t \times A(\sigma_m) = 0.83 N_c^{-0.606} + a N_c^b \quad (5)$$

ここに、

$$a = \frac{2.857 \times 10^{-3}}{10000^b}$$

$$b = \log_{200} \left(\frac{\{c^{-n} + (1.680 \times 10^{-3})^{-n}\}^{-1/n} + 3.233 \times 10^{-3}}{2.857 \times 10^{-3}} \right) \quad (6)$$

$$c = -7.654 \times 10^{-7} \sigma_y + 2.178 \times 10^{-3}$$

ただし、 $n=100$ とする。

図-4 および図-5 に、提案評価式から得られる応答曲線を示す。図-4 より、降伏応力を変化させることにより、高サイクル疲労側の寿命が大きく延伸することがわかる。一方、図-5 に SS400 の材料特性より作成した平均応力を変化させた評価式から得られる応答曲線を例として示すが、これより平均応力の値が負側に増大することにより疲労寿命が大きく延伸することが確認できる。

3. 疲労寿命評価

本章では、疲労試験を模擬した構造体に対して、先に述べた材料構成モデルを採用した繰返し弾塑性解析および線形破壊力学に基づく X-FEM を活用した疲労き裂伝播解析を行う。

(1) 疲労き裂発生寿命評価

阿部ら^{13,14)}による疲労試験的検討結果を模擬した解析 FEM モデルを図-6 に示す。解析ソルバーには Abaqus (ver.6.14-3) を採用し、四辺形一次要素を用いた平面ひずみ条件で解析を行う。また、疲労き裂発生が予測される溶接ルート部付近の最小メッシュサイズは $5 \times 5 \mu\text{m}$ 程度とした。荷重および境界条件は疲労試験を模擬し、解析モデル端部に応力比 $R = 0.05$ となる荷重範囲 ΔF_a を 6 段階 (9/8/7/6/5.5/5 kN) の条件で繰返し回数 $N=100$ まで載荷した。また、ここでは材料の降伏応力を全領域 $\sigma_y = 245 \text{ MPa}$ 、ルートギャップなしと設定し、材料強度分布、角変形、および残留応力の影響は考慮せずに解析を実施した。

得られたルート部付近の累積相当塑性ひずみの分布の一例 (荷重範囲 $\Delta F_a = 9 \text{ kN}$) を図-7 に示す。この図より、ルート部付近において大きく塑性化が進行していること

が分かる。また、き裂発生が予測されるルートギャップ先端における応力ひずみ応答を図-8 に示す。なおルートギャップ先端となる節点における最大荷重載荷時の最大主ひずみ方向の応力ひずみ応答を出力している。これより繰返し荷重載荷に伴う応力ひずみ挙動のループ形状は、塑性変形により刻々と変化しながら、定常状態に近づいていることが確認できる。

(2) 疲労き裂伝播解析

疲労き裂発生後の伝播挙動に関して考察することを目的として、X-FEM に基づく疲労き裂伝播解析を行った。初期き裂は、長さ $5 \mu\text{m}$ とし、ルート先端に開口角の二

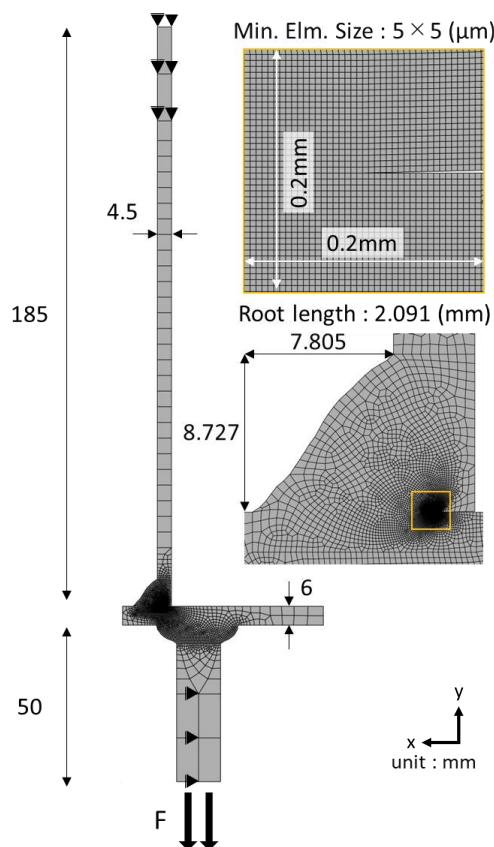


図-6 解析モデル

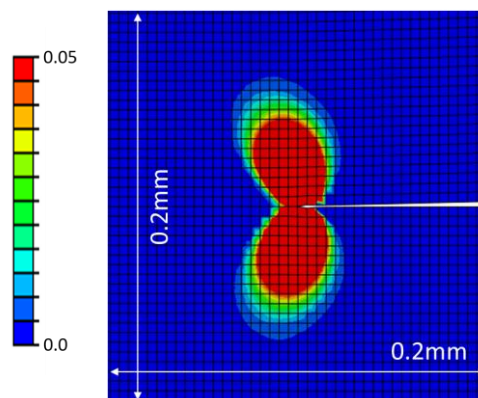


図-7 ルート部付近の累積相当塑性ひずみ分布 (荷重範囲 $\Delta F_a = 9 \text{ kN}$)

等分線の角度となるように挿入した。これより得られる単位応力载荷時のき裂長さと等価応力拡大係数の関係 (a - K_{eq} 関係) を図-9 に示す。なお、 a - K_{eq} 関係を3次関数近似することにより、疲労き裂伝播寿命を評価し、き裂長さ 8 mm までの寿命を疲労き裂伝播寿命と設定した。また、寿命評価は JSSC 基準に基づいて、次式で与えられる Paris 則および材料定数³⁰⁾ ($C = 1.1 \times 10^{-12}$, $n = 2.75$, $\Delta K_{th} = 76$) を採用した。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{eq}^n - \Delta K_{th}^n) \quad (7)$$

ここに、

$$K_{eq} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (8)$$

(3) 破断寿命評価

破断寿命は疲労き裂発生寿命と疲労き裂伝播寿命の総和として与える。解析によって得られた荷重範囲と疲労寿命の関係を図-10 に示す。なお、この図には先に述べた疲労き裂発生寿命評価結果も示している。これより、低応力側においてやや安全側の評価となっているものの、疲労試験結果をおおむね再現できることが示された。また、図-11 に各荷重条件における疲労き裂発生および伝播寿命を示す。なお、図中の値は、破断寿命に対する発生および伝播寿命の百分率である。この図より、いずれ

の荷重ケースにおいても、き裂発生寿命が破断寿命を占める割合は、1%から1.5%程度と非常に小さく、疲労き裂伝播寿命が卓越することが分かる。

4. ルートギャップの影響

観察結果¹³⁾を基に、ルートギャップを有する試験体を模した数値解析を行った。破断寿命の半分の繰返し数におけるルートギャップの大きさが $d=0\text{--}30\mu\text{m}$ 程度であったため、荷重載荷によってギャップが拡大する可能性を考慮し、本研究ではルートギャップ無し ($d=0\mu\text{m}$) のモデルに加え、 $d=10$ および $20\mu\text{m}$ のルートギャップを有するモデルについて検討を行った。なお、ルート部形状は開先角 90° と設定した。設定したルート形状に対して得られる応力ひずみ応答を図-12 に示す。これより、全ケースともに繰返し回数の増加につれて応力ひずみループが定常状態に近づいていくことが確認できる。ただし、ルートギャップを有するモデルの方が、ラチェティング挙動が進行し、より大きく塑性化していることが分かる。図-13 は、1 サイクル目の最大荷重載荷時のルート部の累積相当塑性ひずみ分布を示している。この図より、ルートギャップを有するモデルは、き裂開口部の広い領域に亘って塑性化が進行していることが確認でき

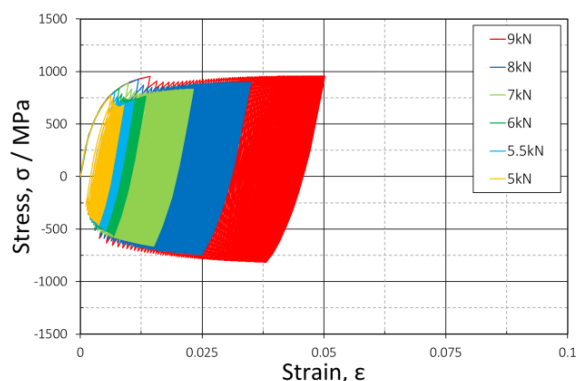


図-8 ルートギャップ先端における応力ひずみ応答 (荷重範囲の影響)

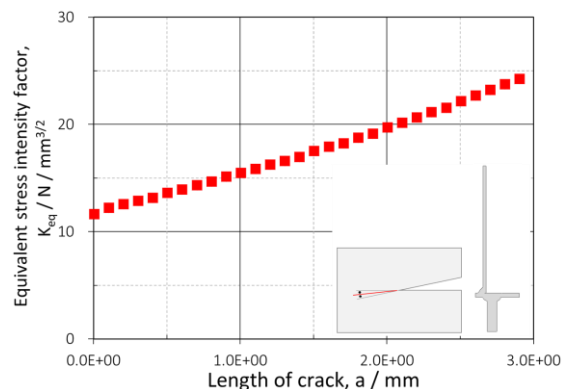


図-9 a - K_{eq} 関係 (単位応力載荷)

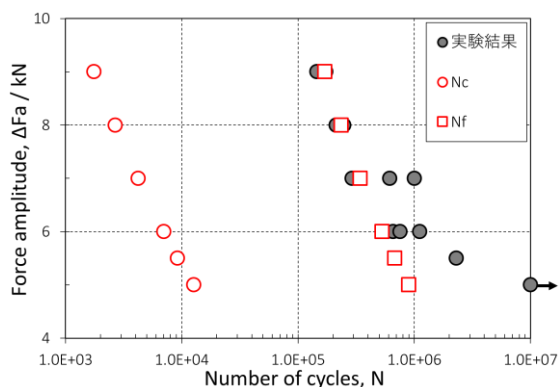


図-10 荷重範囲と疲労寿命の関係 (Nc: き裂発生寿命, Nf: 破断寿命)

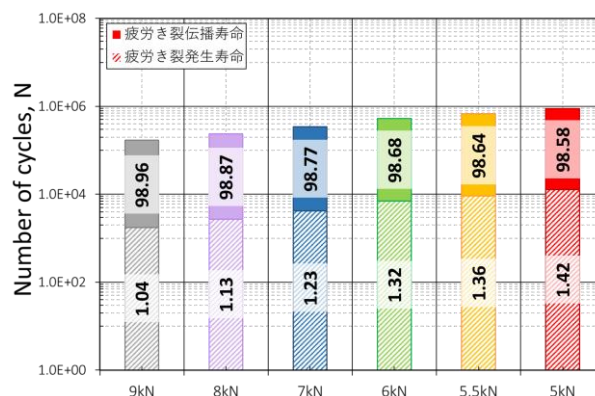


図-11 各荷重条件における疲労き裂発生および伝播寿命

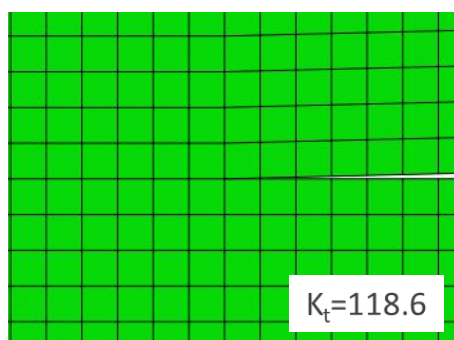
る。このことは、ルートギャップの存在により、塑性化に大きく寄与する相当応力の上昇、つまりせん断応力成分を含む偏差応力が増大するためだと考えられる。

ルートギャップを有するモデルに対して、前章と同様の条件を与えた場合に予測された荷重範囲と疲労寿命の関係を図-14 に示す。この図より、想定した 3 タイプのモデルに対して得られる伝播寿命はほぼ一致することが分かる。つまり、本研究で設定したルートギャップ形状の差異がき裂伝播寿命を支配する応力拡大係数範囲に与える影響は小さいことが示された。

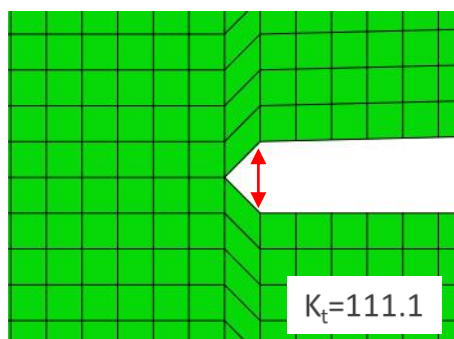
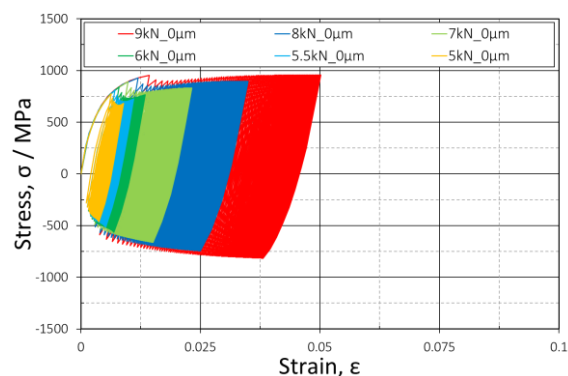
図-15 に解析により得られた荷重範囲と疲労寿命の関係を先に述べた疲労き裂発生寿命と併せて示す。これらの図より、疲労き裂発生に比して疲労き裂伝播寿命が卓

越するため、本研究で設定したルートギャップが疲労寿命に与える影響は小さいことが確認された。そのため、対象文献の実験結果のバラツキにルートギャップの与える影響は小さいことが示唆される。

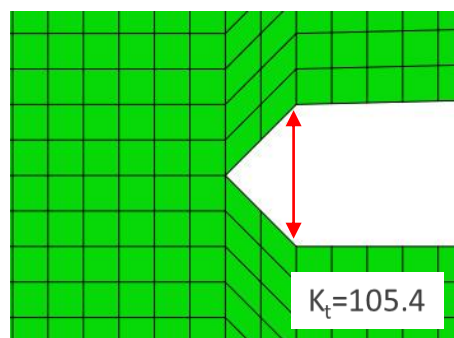
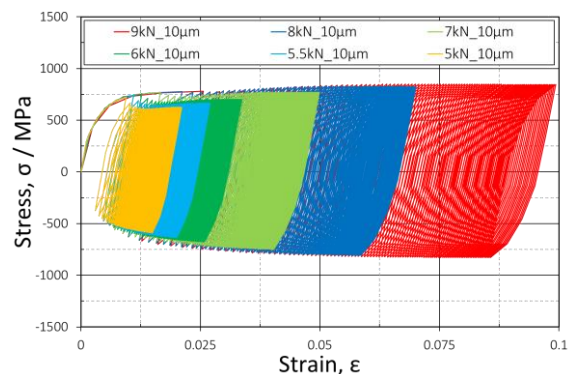
また、図-14 および図-15 には、参考までに同様のルート形状で作成した $d=1\text{mm}$ (応力集中係数 $K_t=90.2$) の解析結果をプロットしてあるが、応力集中係数が非常に大きいため、本研究で設定したルートギャップ形状が疲労挙動に与える影響は小さいことが確認できる。疲労き裂伝播寿命評価結果がやや低寿命側の評価となっているのは、ルートギャップの存在により、のど厚が減少したことが原因であると考えられる。



a) $d=0\mu\text{m}$



b) $d=10\mu\text{m}$



c) $d=20\mu\text{m}$

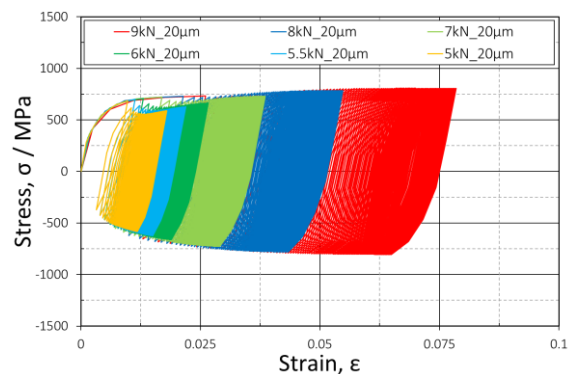


図-12 ルート部形状およびルートギャップ先端における応力ひずみ応答 (ルートギャップの影響)

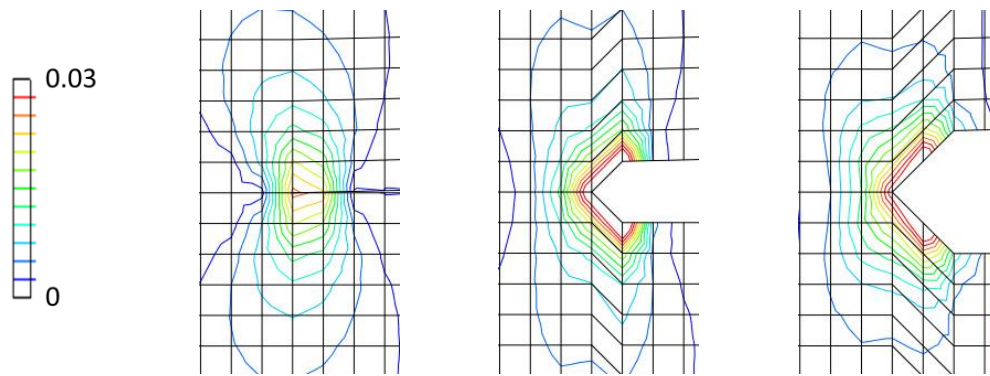


図-13 1サイクル目最大荷重時の累積相当塑性ひずみ分布

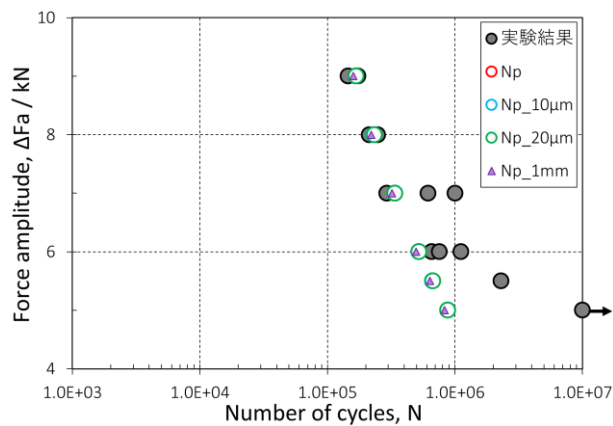


図-14 ルートギャップによる
荷重範囲と疲労寿命の関係比較
(Np : き裂伝播寿命)

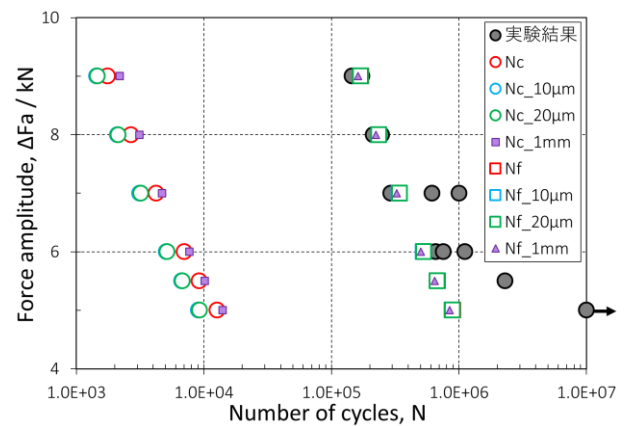


図-15 ルートギャップによる
荷重範囲と疲労寿命の関係比較
(Nc : き裂発生寿命, Nf : 破断寿命)

5. 材料強度の影響

材料強度分布の影響を考慮した数値解析を行った。本検討では、評価対象とした試験体のビッカース硬さ計測結果¹⁴⁾を参考に、降伏応力およびHAZ領域を図-16に示すように設定した。溶接金属部およびHAZ部のビッカース硬さ計測結果がそれぞれHV=203およびHV=181であったため、以下の式より両領域の降伏応力を推定した。

$$HV = 0.2362\sigma_y + 79.281 \quad (9)$$

その結果、溶接金属部は溶接ワイヤとして使用されたJIS Z3313 相当材 ($\sigma_y = 530\text{MPa}$) と同程度の降伏応力 ($\sigma_y = 524\text{MPa}$) を有することを確認した。また、計測領域以外は、母材と同じ降伏応力 ($\sigma_y = 245\text{MPa}$) と設定した。材料構成モデルは第2章に述べたものを採用した。

図-17に弾塑性解析によって得られた応力ひずみ応答を示す。この図より、材料強度分布の考慮の有無にかかわらず、両者ともループ形状は繰返し荷重载荷に伴う塑性変形によって刻々と変化するものの、定常状態に近づいていることが分かる。また、材料強度分布を考慮した場合の応力ひずみ関係は、考慮していない結果に比べ

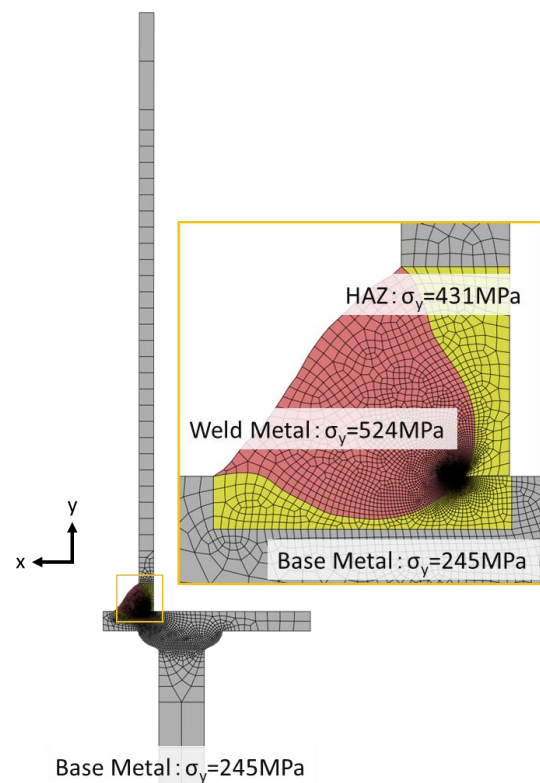


図-16 設定した降伏応力の値および領域

チェッティング挙動が抑えられ、局所的な平均応力は大きくなることを確認できる。続いて、図-18 に解析によって得られる荷重範囲と疲労寿命の関係を示す。この図より、降伏応力が疲労寿命に与える影響は非常に小さく、いわゆる切欠き感受性³⁰⁾として呼称される結果となっている。

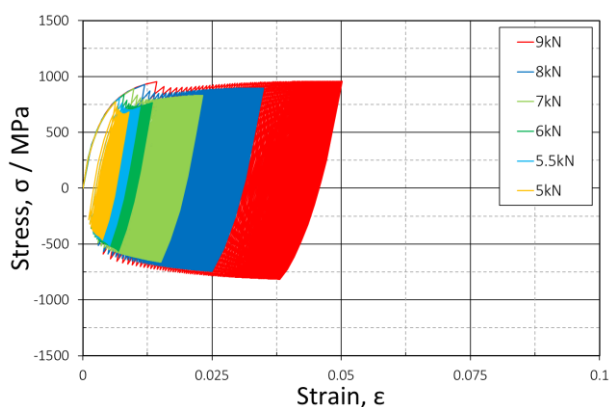
6. 角変形矯正の影響

溶接に伴う角変形を想定したモデルに対して検討を行った。以降、上記モデルに加え、一般的なすみ肉溶接によって得られる角変形量^{32,33)}を想定し、 $\theta = 0.5^\circ$ および 1.0° を有する解析モデルを検討対象とした。解析モデルの一例を図-19 (角変形量 $\theta = 1.0^\circ$) に示す。解析手順と

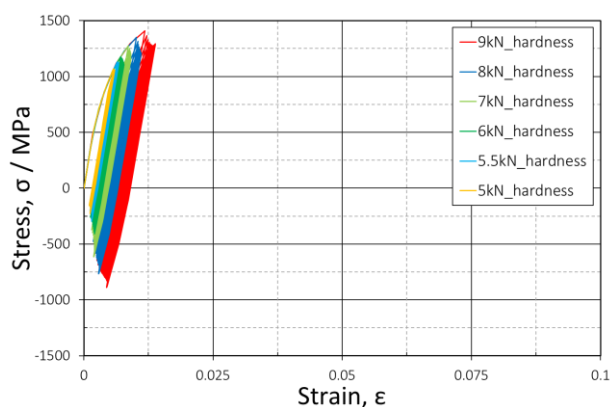
しては、治具拘束による角変形矯正としてモデル上端部に x 軸方向強制変位を与えた後、これまでと同様にモデル下端部に繰返し荷重を 100 回載荷させた。

図-20 に角変形矯正プロセスによって生じたルート部付近の y 軸方向応力分布および疲労載荷終了までの応力ひずみ応答を示す。この図より、角変形を矯正することによりルート部周辺が圧縮応力場となるため、繰返し荷重の載荷開始後もルート部の応力の上昇は小さく、平均応力も小さくなることを確認できる。

続いて、図-21 および図-22 に解析により得られた荷重範囲と疲労破断寿命の関係を示す。なお、図-22 には疲労き裂発生寿命も併せて示す。これより、角変形矯正に伴う圧縮応力により大きな疲労寿命延長効果が確認でき、その影響は特に低応力側で大きいことが示された。



a) 材料強度分布の影響の考慮なし



b) 材料強度分布の影響の考慮あり

図-17 ルートギャップ先端の応力ひずみ応答
(材料強度の影響)

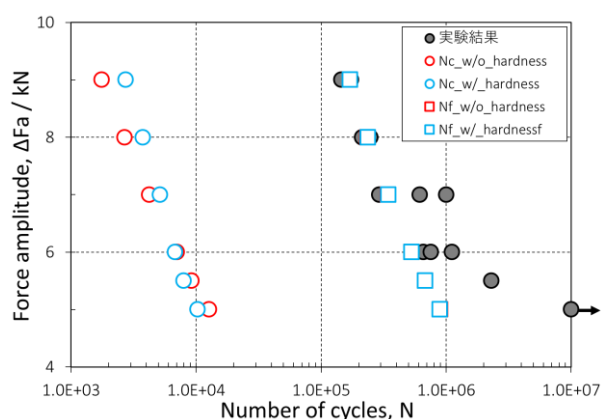


図-18 材料強度影響による荷重範囲と疲労寿命の関係比較
(Nc : き裂発生寿命, Nf : 破断寿命)

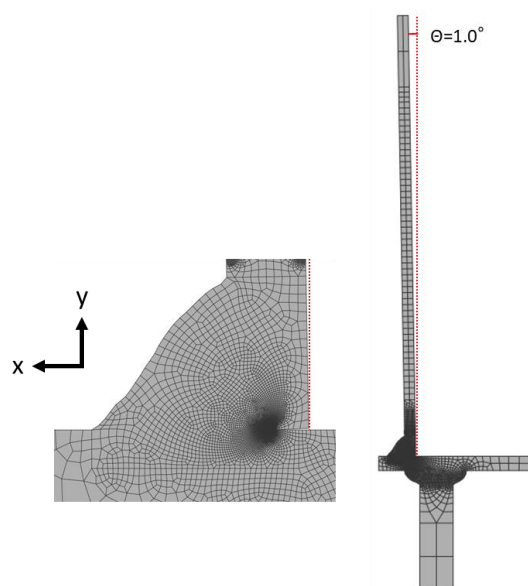
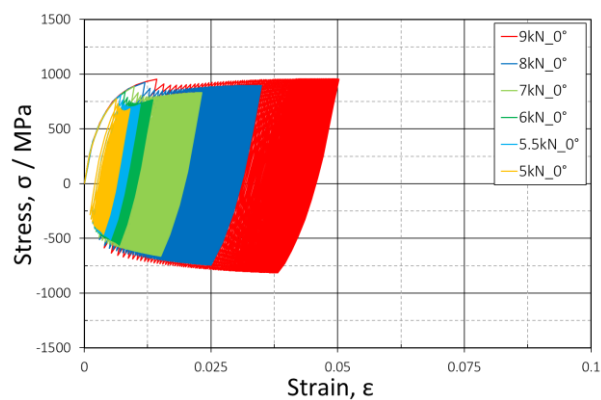
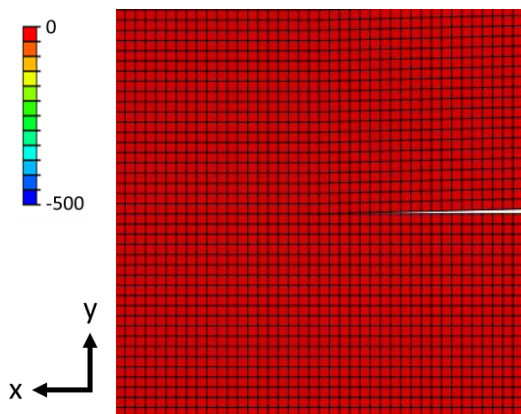
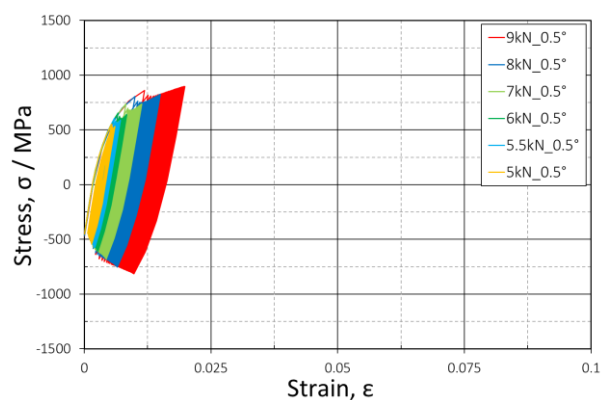
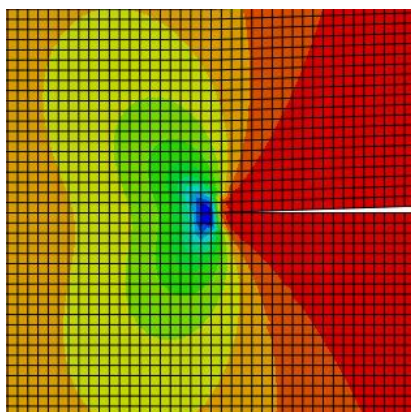


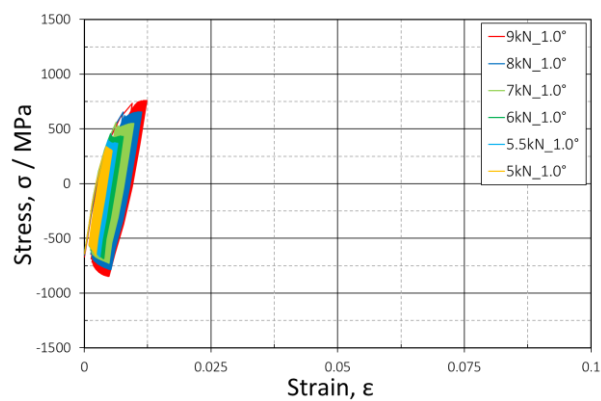
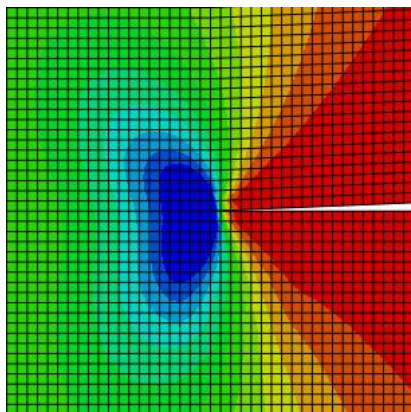
図-19 解析モデル
(角変形量 $\theta = 1.0^\circ$)



a) $\theta = 0^\circ$



b) $\theta = 0.5^\circ$



c) $\theta = 1.0^\circ$

図-20 角変形矯正時の y 軸方向応力分布およびルートギャップ先端の応力ひずみ応答

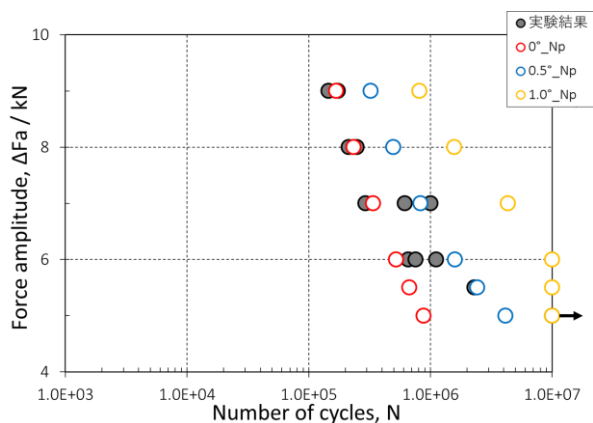


図-21 角変形矯正による荷重範囲と疲労寿命の関係比較 (Np: き裂伝播寿命)

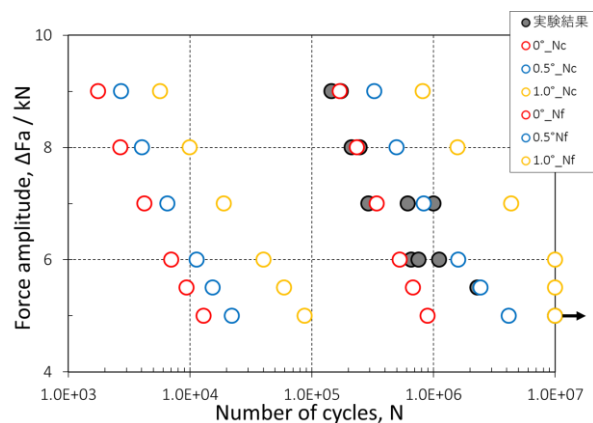


図-22 角変形矯正による荷重範囲と疲労寿命の関係比較 (Nc: き裂発生寿命, Nf: 破断寿命)

7. 結論

本研究は、荷重伝達型片側すみ肉溶接継手の溶接ルート部を起点とする疲労き裂発生および伝播寿命に対する局所的な材料特性および形状因子の影響を明らかにすることを目的として、ルートギャップ、材料強度および角変形矯正が疲労寿命に与える影響に関して検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 本研究で提案する評価手法によって、荷重伝達型片側すみ肉溶接継手の疲労試験¹³⁻¹⁴⁾を模擬した解析を実施し、荷重範囲が小さい領域においてはやや安全側の評価となったものの、おおむね実験結果を再現可能であることを示した。
- 2) ルートギャップを有するモデルは、ルート開口部の広い領域に亘って塑性化が進行し、疲労き裂発生寿命が短くなることが示された。また、疲労き裂伝播寿命が卓越するため、ルートギャップの有無が疲労寿命に与える影響は小さいことが示唆された。
- 3) 材料強度の分布を考慮した評価において、考慮していない結果に比べ、低応力側で疲労き裂発生寿命が短く評価された。また、材料強度の分布が疲労寿命に与える影響は極めて小さいことが確認された。そのため、ルート部のような高応力集中箇所となる継手ルート部の高強度化による寿命延伸効果は小さいことが示唆された。
- 4) 角変形を考慮した検討に関して、角変形を矯正することにより、ルート部周辺が圧縮応力場となり、寿命の大きな延伸効果が確認された。また、その影響は低応力側において大きい。そのため、角変形矯正のようなルート部周辺に大きな圧縮応力を積極的に付与する付加的なプロセスによる疲労寿命延長効果が示唆される。

謝辞

本研究は内閣府の総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」（管理法人：JST）および JSPS 科研費 A262893320 の支援により実施した。

参考文献

- 1) 日本材料学会編：疲労設計便覧，p.1，株式会社養賢堂，1995。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編），2002。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編），2012。
- 4) 国土交通省：令和元年版国土交通白書，第Ⅱ部，第2章，

p.110，2019。

- 5) 伊藤義康，斉藤正弘，村上俊明，柏谷英夫：部分溶込み溶接ルート部からの疲労き裂発生特性，材料，37，415，404-409，1988。
- 6) 穴見健吾，横田博之：引張と曲げを受ける荷重伝達型十字継手の疲労挙動，構造工学論文集，54A，695-702，2008。
- 7) 森猛，藤野大地，南邦明，谷口哲志：余盛と未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価，土木学会論文集，70，1，118-128，2014。
- 8) 平出隆志，伊木聡，半田恒久，田川哲哉，池田倫正，森田花清，Fincato Riccardo，堤成一郎：溶接継手疲労寿命に及ぼす熱影響部の繰返し負荷下の材料挙動の影響，溶接学会論文集，36，2，145-151，2008。
- 9) Iida, K., Iino, N.: Fatigue strength of butt welded joints having angular distortion, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1976, 140, 259-265, 1976。
- 10) 堤成一郎，森田花清，Fincato Riccardo.: 疲労き裂発生伝播寿命に対する溶接ビード形状の影響に関する解析的検討，構造工学論文集，63A，609-618，2017。
- 11) Fincato, R., Tsutsumi, S.: A return mapping algorithm for elastoplastic and ductile damage constitutive equations using the subloading surface method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1-26, 2017。
- 12) Tsutsumi, S., Fincato, R.: Cyclic plasticity model for fatigue with softening behaviour below macroscopic yielding, Materials & Design, 165, 107573, 2019。
- 13) 阿部孝正，曙紘之，加藤昌彦，菅田淳：荷重伝達型片側すみ肉溶接構造物における疲労き裂進展挙動の観察，日本機械学会論文集，82，833，2016。
- 14) Akebono, H., Kato, M., Sugeta, A.: Fatigue properties and fracture mechanism of load carrying type fillet joints with one-sided welding, Frattura ed Integrità Strutturale, 35, 424-433, 2016。
- 15) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, Int. J. Solids Struct. 25, 917-945, 1989。
- 16) Hashiguchi, K., Tsutsumi, S.: Elastoplastic constitutive equation with tangential stress rate effect, Int. J. Plasticity, 17, 117-145, 2001。
- 17) Tsutsumi, S., Toyosada, M., Hashiguchi, K.: Extended subloading surface model incorporating elastic boundary concept, Journal of Applied Mechanics, JSCE, 9, 455-462, 2006。
- 18) 堤成一郎，豊貞雅宏，村上幸治：巨視的弾性条件下での一定両振り荷重繰返しに伴う塑性ひずみ成長挙動，日本機械学会論文集 A, 73(730), 724-731, 2007。
- 19) 堤成一郎，矢嶋泰基，村上幸治，後藤浩二，豊貞雅宏：損傷を考慮した繰返し弾塑性モデル-巨視的弾性条件下における疲労き裂発生-，応用力学論文集，JSCE, 10, 437-444, 2007。
- 20) Tsutsumi, S., Murakami, K., Goto, K., Toyosada, M.: Cyclic stress-strain relationship during high cycle fatigue process : Elastoplastic constitutive model introducing cyclic damage effect, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 7, 243-250, 2008。
- 21) 梶井秀斗，堤成一郎，Fincato Riccardo：非比例高サイクル疲労下の繰返し硬軟化挙動に対する接線塑性構成式の拡張，土木学会論文集 A2, 73, 2, I_367-I_378, 2017。
- 22) Fincato, R., Tsutsumi, S.: Closest-point projection method for the

- extended subloading surface model, *Acta Mechanica*, 228, 12, 4213-4233, 2017.
- 23) Fincato, R., Tsutsumi, S.: Ductile Damage Evolution under Non-Proportional Loading, 土木学会論文集 A2, 73, 2, I_355-I_361, 2018.
 - 24) Fincato, R., Tsutsumi, S.: A numerical study of the return mapping application for the subloading surface model, *Engineering Computations*, 35, 3, 1314-1343, 2018.
 - 25) 西谷弘信, 田中洋征, 藤村顕世: 炭素鋼および高張力鋼突合せ溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼす応力比の影響, *The Society of Materials Science*, 41, 469, 1532-1538, 1992.
 - 26) 西谷弘信, 村田正廣, 森浩一郎: 平均応力が正の場合のき裂材における ΔK_{th} およびコーキング効果とき裂閉口現象との関係, *日本機械学会論文集 A 編*, 46, 406, 622-628, 1980.
 - 27) 杵渕雅男: 自動車足回り部品軽量化のための熱延高張力鋼板の疲労強度に関する研究, 京都大学大学院工学研究科博士論文, 2015.
 - 28) 渡辺修, 松本重人, 中野善文, 齊藤良行: 高強度鋼溶接継手の疲労強度とその支配因子, *溶接学会論文集*, 13, 3, 438-443, 1995.
 - 29) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 株式会社養賢堂, 1995.
 - 30) 日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例- 2012 年改訂版, 技報堂出版, 2014.
 - 31) Miki, C., Nishimura, T., Tanabe, H., Nishikawa, K.: Study on estimation of fatigue strengths of notched steel members, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 316, 153-166, 1981.
 - 32) 門井浩太, 篠崎賢二, 山本元道, 宝蔵雄一, 井上康宏, 大脇桂, 猪瀬幸太郎: ホットワイヤ・レーザ溶接法による極低変形すみ肉溶接技術の開発, 平成 23 年度溶接学会全国大会講演概要.
 - 33) 猪瀬幸太郎, 杉野友洋, 松本直幸, 大脇桂, 大畑和夫: レーザホットワイヤすみ肉溶接の開発と都市高速橋梁への適用, *IHI 技報*, 52, 1, 59-63, 2012.

(Received July 19, 2019)
(Accepted December 10, 2019)

EFFECT OF LOCAL MATERIALS AND GEOMETRIES OF WELD JOINT ROOT ON FATIGUE CRACK INITIATION AND PROPAGATION LIFE

Seiichiro TSUTSUMI, Homare SHIBATA, Riccardo FINCATO

In recent years, fatigue has become a major problem in infrastructures, and many failure cases have been reported. Above all, the cracks initiated from weld joint root are difficult to detect visually from the surface of the weld bead, so it is important to clarify the factors governing the fatigue performance and to make an evaluation method with high accuracy. In this study, we investigated the various factors that affect fatigue damage starting from the weld joint root by numerical analysis. In particular, the local behavior of the root was analyzed by nonlinear FEM analysis and X-FEM analysis based on linear fracture mechanics, and crack initiation life and propagation life were discussed. As a result, it was found that the fatigue crack propagation process dominates the fatigue damage of the weld root where the stress concentration factor is high, and the influence by the local material property and the root gap is small. On the other hand, the effect of angular distortion correction on the fatigue life is large, and the result that the fatigue life extension effect is suggested by the additional process of introducing compressive stress at the weld root was obtained.