

2026年3月9日

2024年度 大畑財団 研究助成

静岡大学工学部機械工学科 藤井朋之  
電子メール：fujii.tomoyuki@shizuoka.ac.jp  
電話：053-478-1029

## 研究報告書

# 鉄鋼材料に生じた疲労き裂の補修技術の開発

## 1. 緒言

我が国ではインフラの多くが高度経済成長期に建造され、経年劣化による部材の損傷が深刻な問題となっている。機械構造物の損傷・破壊原因の8割以上は疲労との報告がある。一般的に、疲労は材料表面でき裂が発生・進展するため、外部からき裂を視認することができる。よって、目視等の非破壊検査とき裂補修を適切に行うことができれば、インフラの長期安全性は確保できる。現在、実構造体で発見されたき裂は補強、ストップホール追加、溶接、取り換え等により無害化されているが、より簡便な補修技術が望まれている。例えば、細井らは、疲労き裂の生じた鋼に対して、き裂にパルス電流を印可することによりき裂閉口を実現している[1]。また、関野らはアルミナ-チタン複合材料において電気化学的陽極酸化反応によりき裂治癒できることを示している[2]。これらのき裂補修技術では、大電流が必要になることや補修できる材料に限られることなど問題点も多い。ところで、藤井らはアルミニウム合金の応力腐食割れ進展試験において、実験中に生じた反応生成物がき裂面を閉じるように架橋を形成することを明らかにしている[3]。そこで、き裂補修には、外部からき裂内に新たな金属相を導入することでき裂を閉口させることができることを発案した。

本研究では、インフラの主要な構造材料である鉄鋼材料に生じたき裂の簡便な補修技術の開発を目的とする。そこでき裂面に電気亜鉛めっきを施すことでき裂を閉口させるき裂補修技術について検討した。まずは、有限要素法（FEM）により、理想的に亜鉛めっきが形成された場合におけるめっきに効果について検討した。次に、2つのブロック試験片を亜鉛めっきで接合して、接合強度の評価を行い、最後に、小型引張(CT)試験片に生じた疲労き裂に亜鉛めっきを行い、その有効性を検討した。

## 2. 有限要素法によるき裂補修の検証

### 2.1 解析モデル

亜鉛めっきによるき裂補修の効果を検討するために、図1に示すASTME399に準拠した厚さ12.7mmのCT試験片を用いる。切欠き先端に3mmの疲労き裂を導入した試験片の応力分布および見かけのき裂長さに関する検討を行った。本試験片における応力拡大係数 $K$ は、以下の式で求められる[4]。

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

$$F(\alpha) = \frac{(2 + \alpha)(0.886 + 4.46\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (2)$$

ここで、 $P$  は荷重、 $B$  は試験片厚さ、 $W$  は試験片幅、 $a$  は荷重線からき裂先端までの長さである。以下の議論では、疲労き裂の長さを単にき裂長さと呼ぶ。本研究ではき裂補修の効果を検討するために、見かけのき裂長さ  $a_{est}$  をコンプライアンスの変化に基づき評価した[5]。

$$a = W(1.002 - 4.0632U + 11.242U^2 - 106.04U^3 + 464.33U^4 - 650.68U^5) \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{(BEC)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (4)$$

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5)$$

ここで、 $E$  は CT 試験片の材料のヤング率、 $\delta$  は荷重線変位である。式(3)から推定された荷重線からき裂先端までの長さ  $a$  から荷重線から切欠き底までの距離  $d$  を引くことにより、見かけのき裂長さ  $a_{est}$  を導出した。なお、本研究の場合には、 $d = 9 \text{ mm}$  である。

$$a_{est} = a - d \quad (6)$$

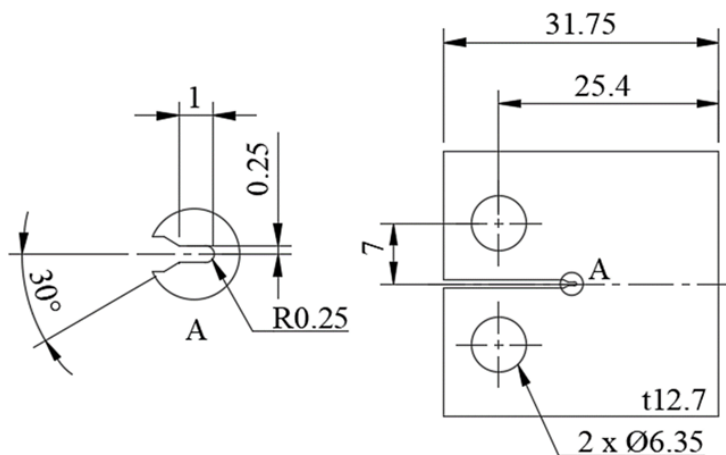
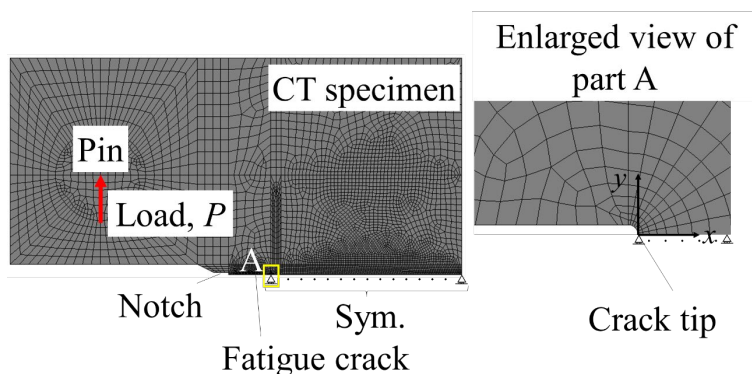


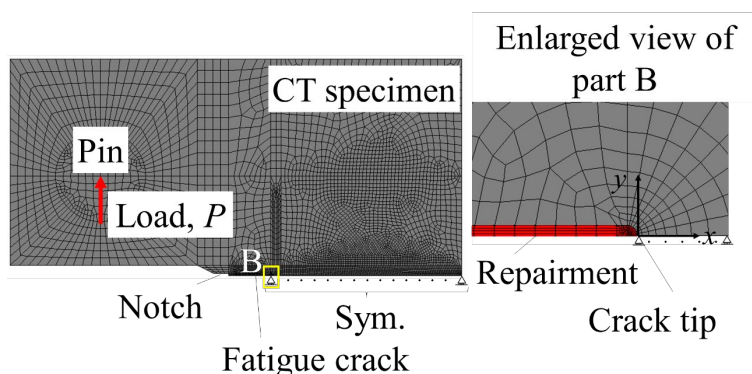
図 1 CT 試験片の寸法

図 2 に切欠き底から 3 mm の疲労き裂が存在するモデルのメッシュ分割および境界条件を示す。鋼製の CT 試験片にある疲労き裂は鋭い切欠きとし、切欠き内部に亜鉛、樹脂を導入して、き裂が補修されているものとした。さらに、疲労き裂が生じていない状態に相当する鋼による補修についても比較のために解析した。解析では均質等方弾性体を仮定し、平面ひずみ条件で解析を行った。対称性を考慮して 1/2 モデルの解析を行っている。解析では、応力拡大係数  $K$  が  $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

となる荷重  $P = 243 \text{ N}$  をピン中心に負荷した。本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェア ANSYS19.0 を使い、材料は等方均質弾性体であると仮定し、平面ひずみ条件で解析を行った。表 1 に解析に使用した材料の機械的性質を示す。



(a) 疲労き裂を導入



(b) 疲労き裂の中に補修材料を導入

図 2 解析モデル

表 1 弾性定数

材料	ヤング率, GPa	ポアソン比
鋼	208	0.3
亜鉛	108	0.25
樹脂	2	0.3

## 2.2 解析結果と考察

図3にき裂補修を行ったCT試験片の切欠き底からき裂延長線上における引張方向の応力分布を示す。なお、補修を行っていない場合の応力分布も併せて示す。補修を行っていない場合ではき裂先端で強い応力集中が生じている。樹脂による補修を行った場合では応力集中が緩和されているが、まだ応力集中がみられる。一方で、亜鉛による補修を行った場合ではき裂先端での応力集中が非常に小さくなっていて、鋼による補修（疲労き裂が生じていない状態に相当）の応力分布に近い分布になっている。図4に疲労き裂先端の応力分布近傍の応

力分布を両対数図で示す．また，応力拡大係数が1.0および0.18 MPam<sup>0.5</sup>における応力分布を合わせて示している．き裂を補修していない場合は傾きが-1/2の特異性を有する応力分布を生じている．樹脂による補修を行った場合には応力拡大係数が0.18 MPam<sup>0.5</sup>における応力分布に近いが，応力分布の傾きはおおよそ-0.36であり，補修の効果は得られている．一方で，亜鉛による補修では，応力分布が鋼による補修を行った場合の応力分布とほぼ同等であり，応力集中がほとんど生じておらず高い効果が認められる．図5に補修を行った試験片に対する推定き裂長さを示す．なお，補修を行っていない場合の推定き裂長さも併せて示す．き裂補修を行っていない場合の推定き裂長さが実際の長さの3 mmよりも小さい2.8 mm程度であり，鋼による補修を行った場合ではわずかにき裂が長く見積もられている．これは式(3)の推定誤差に起因するものであろう．樹脂による補修を行った場合の推定き裂長さは，2.8 mmより短く0.5 mm程度になっているが，き裂補修として不十分である．一方，亜鉛による補修を行った場合の推定き裂長さは，鉄による補修を行っていない場合の推定き裂長さと同程度の長さとなっており，き裂がほぼ消失していると考えられることができる．以上の結果より，疲労き裂内すべてに亜鉛めっきにより亜鉛の金属層を導入できた場合，き裂がないときの剛性（コンプライアンスの逆数）が得られるとともにき裂先端近傍の応力特異性を消失させることができることから，力学的にはき裂が消失させることができることが分かった．

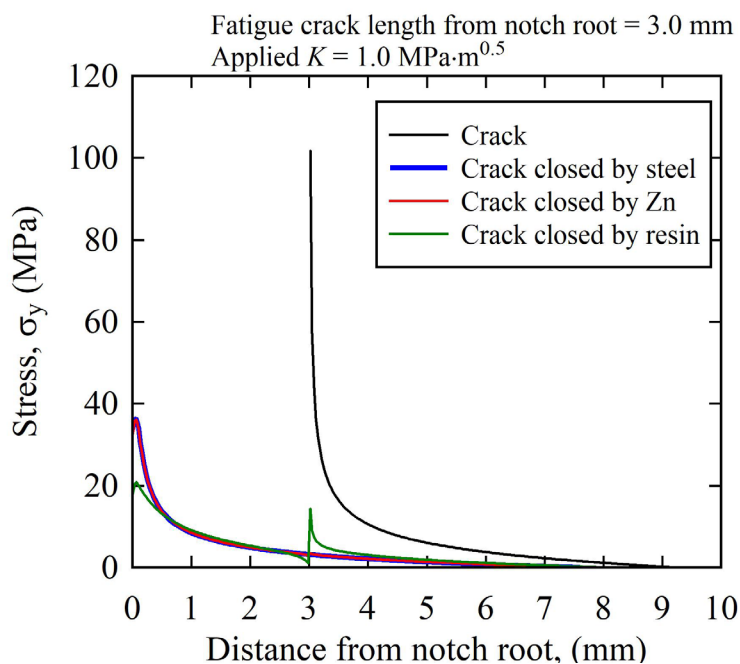


図3 き裂先端の応力分布（切欠き底から3mmまでが疲労き裂に相当）

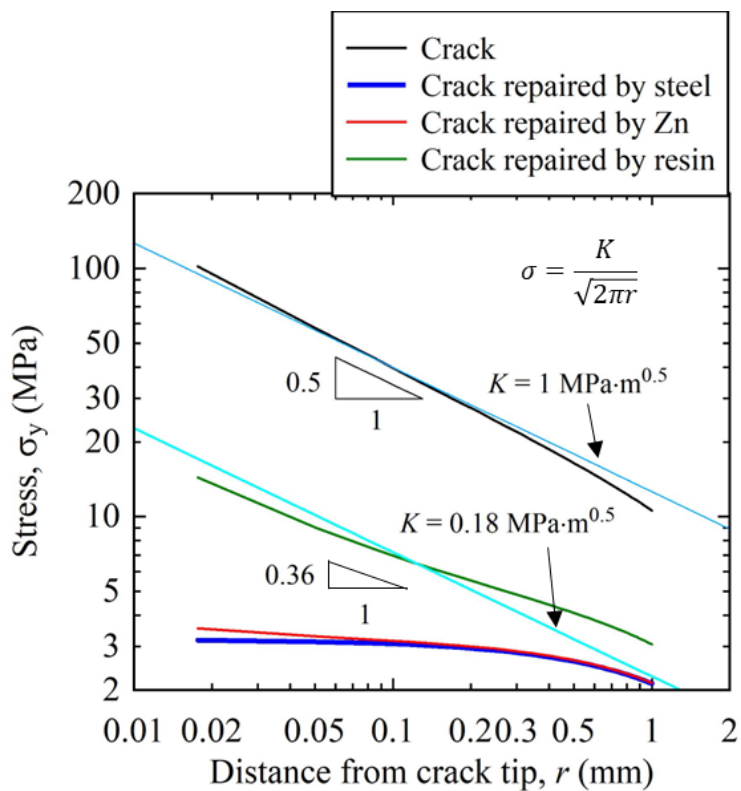


図4 破壊力学の観点から評価したき裂先端の応力分布

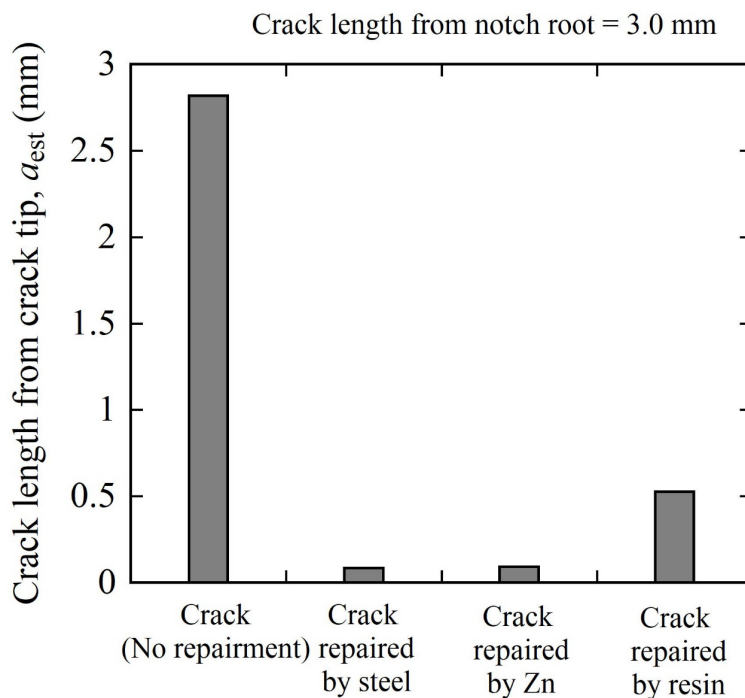
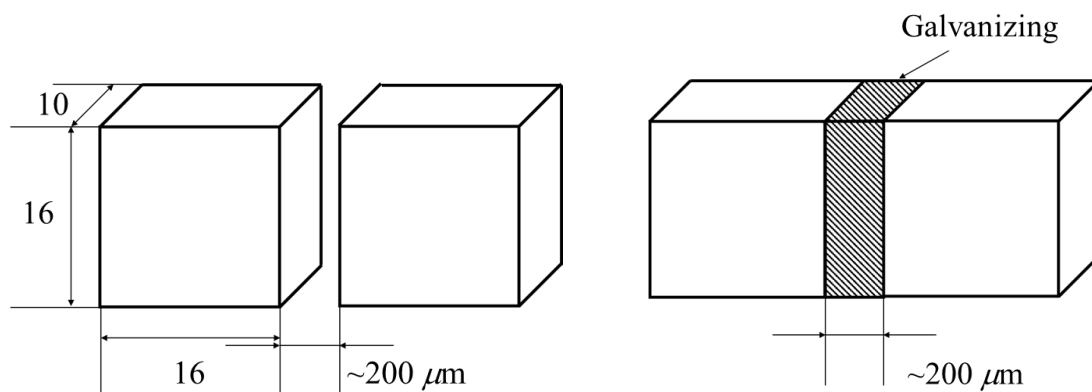


図5 補修材が及ぼす見かけのき裂長さへの効果

### 3. 亜鉛めっきの界面強度評価

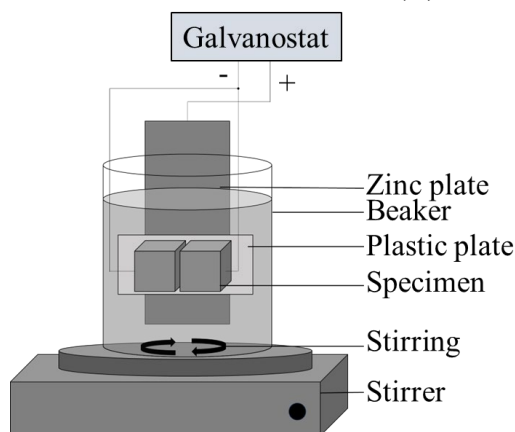
#### 3.1 実験方法

亜鉛めっきによるき裂補修の予備的検討として、亜鉛めっきと鋼の界面強度評価を行った。供試材には、圧力用鋼板SPV235を用いた。図7に試験片の連結の様子を示す。図7(a)に示すように、2つの試験片を絶縁体の上に隙間をあけて配置する。この隙間は最大で200  $\mu\text{m}$ である。試験片の隙間以外の部分には樹脂皮膜を施し、隙間内のみがめっきがされることで、図7(b)に示すように最終的にめっきによる連結が期待される。図7(c)にめっき中の試験片配置の模式図を示す。めっき液は $\text{Zn}^{2+}$  30 g/L,  $\text{NH}_4^{2-}$  170 g/L になるように、塩化亜鉛15.63 gと塩化アンモニウム51.86 gを蒸留水で溶かし、合わせて200 mlとした。試験片を陰極、亜鉛版を陽極に設置し、直流電源を用いてめっき処理を行った。めっき処理中はスターラーにより200 rpm, 30  $^{\circ}\text{C}$ 一定でかく拌をしている。本研究では、めっきは電流密度3  $\text{A}/\text{dm}^2$ , 3時間とした。連結した試験片を3組製作した。連結部の様相の確認のため、走査型電子顕微鏡（SEM）で接合部近傍を観察した。



(a) ブロック試験片の配置

(b)めっきによる接合



(c) めっき処理の模式図

図7 試験片の連結の様子

次に、連結した試験片に対してクロスヘッド速度1 mm/min, 室温大気中で引張試験を行った。なお、めっきによる接合では接合部近傍にもメッキが付着し

ているが，取り除かずに試験に供した．試験後は，連結面の断面をSEMにより観察し，めっきされた部分の割合を観察した．

### 3.2 実験結果と考察

図8に典型的な接合部近傍のSEM写真を示す．なお，(a)から(d)はそれぞれの位置を示しており，(c)は樹脂板に固定した面，(a)はその上面，(b)と(d)はその側面である．図7(c)に示すように樹脂板に固定した面における隙間にはめっき液は入り込んでいたものの，ほとんどめっき層がないことがわかる．これは電流がほとんど流れていないことに起因していると考えられる．なお，隙間の内部には島状に連結しているような部分が見られる．一方，その他の面では，すきまからめっきがはみ出していることがわかる．表面近傍に電流が集中したため，集中的にめっきが析出したと考えられる．

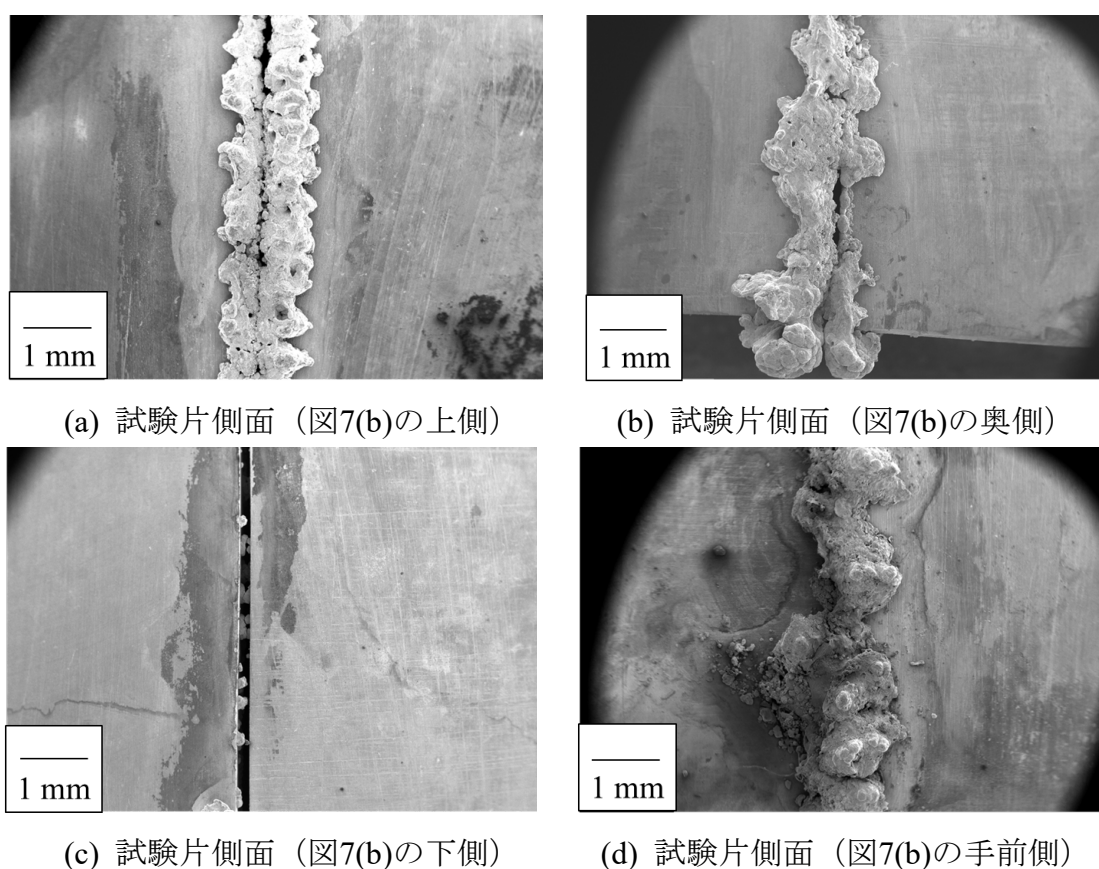


図8 接合部のSEM観察

図9に接合した試験片の荷重－ストローク関係を示す．すべての試験片で，負荷初期は直線的に荷重が増加するがおおよそ6N程度で非線形性が生じた．3本中2本（試験片2と3）は，非線形が生じた後に荷重が低下し，その後破壊した．一方，3本中1本（試験片1）は，非線形性が生じた後に荷重一定で変形が進行した．接合部の面積は， $160 \text{ mm}^2$ であることから，最大応力を接合部面積で除した公称応力は $0.04 \text{ MPa}$ 程度となり，接合強度はとても低い．図10に試験片1の破断後の接合面のSEM写真を示す．図8(a)に相当する部分の近傍のみにめっきが析出しており，大部分の領域はめっきがほと

んどなく，隙間のままであった．全面積におけるメッキ部の面積は，おおよそ35%程度であった．めっきの析出状態については，試験片2および3も同程度であった．つまり，隙間全体にめっきが析出せず，側面近傍のみにめっきが析出するため，接合強度が低いことがわかる．さらに，最大荷重をメッキ部の実面積で除した正味強度でも，おおよそ0.11 MPa程度とその強度は低いことがわかる．

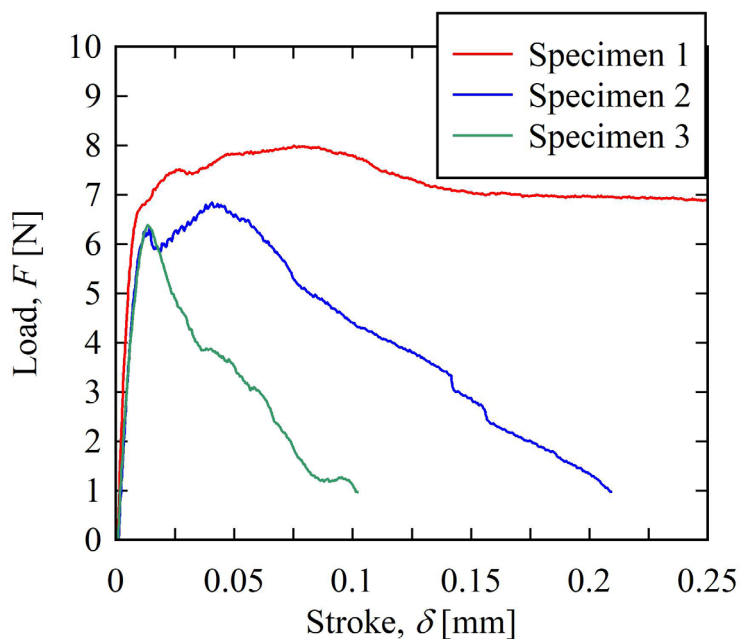


図9 荷重-ストローク関係

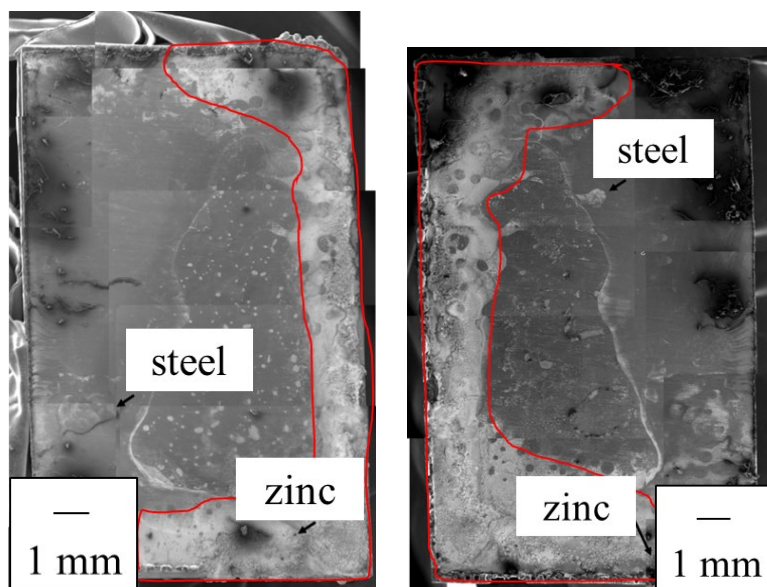


図10 破面のSEM写真（Specimen 1，鏡像となるように配置）

#### 4. 亜鉛めっきによるき裂補修の効果の検証

前章までで、き裂内にめっきが緻密に析出することができればき裂補修の効果は高いものの、隙間をめっきで埋めることはとても困難であることが分かった。そこで、本章では、実試験片を用いてき裂内にどの程度めっきが析出し、どの程度の効果があるかを検討した。

##### 4.1 実験方法

試験片は、図2で示したCT試験であり、疲労試験で予き裂をおおよそ3 mm程度導入した。本研究での疲労試験は、疲労予き裂を導入するための予備試験を含めて、荷重比 $R=0.1$ 、初期応力拡大係数範囲 $\Delta K$ が $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}^{0.5}$ 、繰返し速度が10 Hz、荷重制御で行った。応力拡大係数範囲 $\Delta K$ は次式で与えられる。

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = (P_{max} - P_{min}) \frac{1}{B\sqrt{W}} F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (7)$$

ここで、 $P_{max}$ および $P_{min}$ はそれぞれ疲労試験中の最大荷重および最小荷重であり、荷重比 $R$ は次式で与えられる。

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (8)$$

さらに、有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff}$ は、次式で与えられる。

$$\Delta K = K_{max} - K_{op} = (P_{max} - P_{cl}) \frac{1}{B\sqrt{W}} F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (9)$$

ここで、 $P_{op}$ はき裂閉口荷重であり、本実験では疲労試験中の除荷弾性コンプライアンスの変化から推定した。

本研究では、まず、疲労予き裂から1 mmだけ疲労き裂を伸長させ、き裂進展特性を導出した（以下、き裂材と称す）。次いで、図7(c)と同様の配置で疲労予き裂を含めた疲労き裂内にめっきを施した。その後、1 mmだけ疲労き裂を伸長させ、き裂進展特性を導出した（以下、き裂補修材と称す）。試験後に、疲労試験により試験片を分離させ、破面を観察し、き裂面のめっきの有無などを調査した。本実験手順により、材料特性としての疲労き裂進展特性とき裂補修材の疲労き裂進展特性を一本の試験片から導出し、比較することが可能となる。き裂進展速度 $da/dN$ は次式で与えられるセカント法を用いた。

$$\frac{da}{dN} = a_{i+1} - a_i \quad (10)$$

ここで、添え字 $i$ は計測順を示している。き裂進展速度に対応させる応力拡大係数の算出に使用するき裂長さは、次式で与えられる。

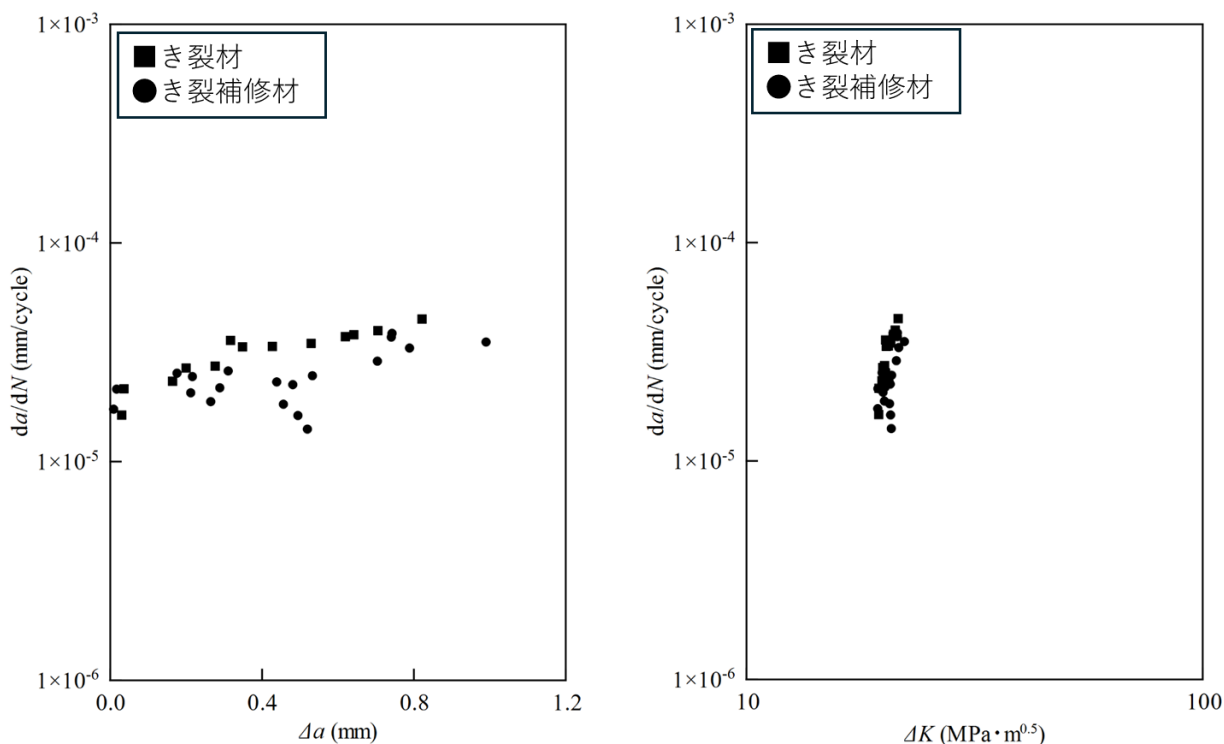
$$a = \frac{a_{i+1} + a_i}{2} \quad (11)$$

なお、本試験では、荷重制御で疲労試験を行っていることから、き裂進展に伴い応力拡大係数（応力拡大係数範囲）は増加する。

##### 4.2 実験結果と考察

図11に、き裂進展速度－応力拡大係数範囲およびき裂進展速度－有効応力拡大係数範囲の関係を示す。図のように、き裂進展速度－応力拡大係数範囲では、き裂材にくらべき裂補修

材はき裂進展速度が低速になっていることがわかる。一方、き裂進展速度－有効応力拡大係数範囲の関係では、き裂進展速度は共に左の方向にシフトし、ほぼ一致していることがわかる。これは、き裂閉口によるものと思われる。図12に、1 mmのき裂進展中のき裂開口時の応力拡大係数 $K_{op}$ の推移を示す。き裂材と比較してき裂補修材の $K_{op}$ は高くなっていることから、き裂内部にめっきなどが導入されることで、き裂閉口を促進したと考えられる。図13に、破面観察を示す。破面は、切欠き部、疲労予き裂および疲労き裂、めっき後の疲労き裂に分けられる。めっきは破面上では観察できないが、き裂面は茶色に変色しており錆が生じていることがわかる。めっき時には、水溶液中に浸漬する必要があるが、狭い隙間のき裂面の場合には、めっき処理後に水溶液を完全に除去することができない。そのため、弱酸性のめっき水溶液により錆が生じてしまう。Elberは、き裂面内に生じた酸化物によりき裂閉口が助長されることを示している（酸化物誘起き裂閉口）。このことから、本研究ではめっきではなくき裂面内の錆によりき裂閉口が生じやすくなり、その結果、有効応力拡大係数が減少することでき裂進展速度が低下したと考えられる。本研究で、当初期待していためっきによる完全なき裂閉口は達成することができなかったため、今後は、めっきをき裂内部に効果的に析出する手段を構築する必要がある。



(a) 応力拡大係数範囲による整理

(b) 有効応力拡大係数範囲による整理

図11 疲労き裂進展特性

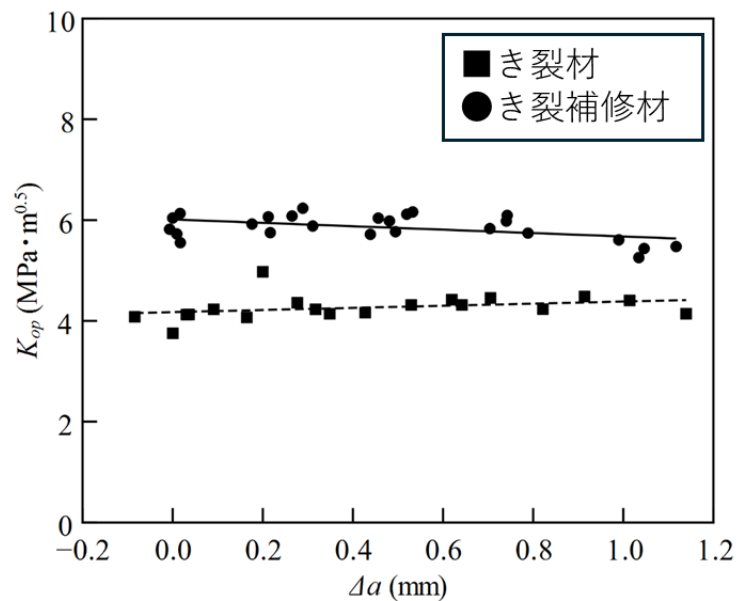


図12 き裂開口時の応力拡大係数



図13 破面観察

## 5. 結言

電気亜鉛めっきによるき裂補修を目的に研究を行った。得られた結果を次に示す。

- 1) 鋼製試験片のき裂内に亜鉛めっきが理想的に形成された場合、完全にき裂が閉じることで補修が可能である。
- 2) 電気亜鉛めっきは、隙間内部での析出が困難である。
- 3) 疲労き裂に電気亜鉛めっきを適用したところ、き裂面の酸化物によるき裂閉口に起因したき裂進展の遅延が認められた。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人大畑財団2024年度研究助成により推進いたしました。心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Shota Nakayama, Yutaro Sugeno, Tomoto Kambayashi, Atsushi Hosoi, Yuichi Furukawa, Takashi Tomita, Hiroyuki Kawada, Mechanism of Fatigue Crack Closure in Steel Under High-Density Pulsed Current, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, **48** (2025), 1879-1892.
- [2] Shengfang Shi, Tomoyo Goto, Sung Hun Cho, Tohru Sekino, Electrochemically Assisted Room - Temperature Crack Healing of Ceramic - Based Composites, *Journal of the American Ceramic Society*, **102** (2019), 4236-4246.
- [3] 東郷敬一郎，材料強度解析学—基礎から複合材料の強度解析まで—，株式会社内田老鶴圃，2013，pp.126-127.
- [4] Tomoyuki Fujii, Daiki Ito, Yoshinobu Shimamura, Growth characteristics of stress corrosion cracking in high-strength 7075 aluminum alloy in sodium chloride solutions, *Engineering Fracture Mechanics*, **292** (2023), #109657.
- [5] Ashok Saxena, S. J. Hudak Jr. , Review and extension of compliance information for common crack growth specimens. *International Journal of Fracture*, **14** (1978), 453-68.
- [6] Wolf Elber, Fatigue crack closure under cyclic tension, *Engineering Fracture Mechanics*, **2** (1970), 37-45.