

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：57101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13664

研究課題名（和文）長いき裂を対象とするペースト法とプラズマ法を複合した新規き裂進展抑制手法の構築

研究課題名（英文）Construction of a new crack growth suppression method by paste method and plasma method for long cracks

研究代表者

佐々木 大輔（Sasaki, Daisuke）

久留米工業高等専門学校・材料システム工学科・助教

研究者番号：50772498

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、パルス通電焼結と粉末粒子を融合させた補修方法「プラズマ・粒子法」を開発し、疲労寿命延命効果ならびに疲労破壊挙動に着目して研究を行った。本研究により以下の6点の成果が得られた。1 模擬き裂部にくさび効果を期待させる微粒子の焼結体を形成できた。2 疲労き裂進展速度が遅くなることが確認された。3 結晶粒径には本補修方法が影響を与えないことが確認された。4 補修によりき裂先端の硬さが低下すること。5 き裂進展速度が上昇する場合、脆性破面率の上昇を伴うこと。6 有限要素法を用いた力学解析によって、焼結体によりき裂先端の塑性域が小さくなることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建設後50年経過する構造物において、補修工事の猶予時間を設けるため、簡易補修方法の開発が望まれている。しかし、有用な既存の補修方法でも10cm程度の開いた疲労き裂補修が残された課題となっている。本研究では、大きく開いた疲労き裂の補修に成功し、き裂進展速度を減速させ、寿命を延命することに成功した。社会的意義は、老朽が進んだ大型構造物の補修工事の猶予時間を設けることができる点にある。学術的意義は、き裂進展抑制メカニズムに新たに焼結物によるくさび効果を加えた点にある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a repair method "plasma particle method" by pulsed energization sintering and powder particles. In addition to, we have researched the fatigue life extension effect and fatigue fracture behavior. The following 6 results were obtained. 1 A sintered product of fine particles have been formed in the simulated cracks. 2 It was confirmed that the fatigue crack growth rate was decreased. 3 It was confirmed that this repair method did not affect the crystal grain size. 4 The hardness of the crack tip was slightly reduced due to the heat of repair. 5 When the crack growth rate increases, the brittle fracture surface rate increases. 6 Finite element method suggests that the plastic region at the crack tip becomes smaller due to the sintered product.

研究分野：材料強度

キーワード：疲労破壊 き裂進展 焼結物 くさび効果 補修 パルス通電 微粒子 大型構造物

### 1. 研究開始当初の背景

社会的背景は以下になる。現在、建設後 50 年以上の構造物の補修は急務となっている。国内の大型構造物は 2033 年には 50%以上が建設後 50 年以上のものとなる(国土交通省 HP: 社会資本の老朽化の現状と将来)。しかし、費用と人手の確保が難しくすべての構造物に対して大がかりな補修・補強を行うことは不可能な状況にある。このような背景から簡易的な疲労き裂進展抑制手法の構築が求められている。しかし既存の方法では 10cm 程度の疲労き裂を補修することが、鋼種(溶接割れ)、施工環境(真空環境のみ)、継続的效果の保証等から困難となっている。き裂進展抑制手法の学術的背景は以下になる。疲労寿命の大部分がき裂進展に費やされるため、き裂進展を抑制することで構造物寿命の延命が可能である。き裂進展量はき裂の開口と閉口の変化量と対応があり、この変化量を小さくすることでき裂進展抑制につながる。具体的にはき裂進展を抑制する因子には、き裂面内の酸化物(S. Suresh et al, Metallurgical and Materials Transactions A, 1981)等があげられる。き裂面内の酸化物は開閉口の変化量を減少させ、き裂進展を抑制する。この進展抑制効果は面内に存在する異物が酸化物でない場合くさび効果と呼ばれる。

ところで、疲労き裂の進展抑制方法に着目すると、近年は進展抑制メカニズムに基づいた補修方法が提案されている。混合ペースト法は微粒子(アルミナ、磁粉等)と溶媒(オイル、グリース等)の混合ペーストを用いた手法で、応力集中部もしくはき裂部にペーストを塗布する。その状態で疲労試験を行うと、表面張力に基づく毛细管現象によりき裂面内に溶媒が侵入する。溶媒と同時に微粒子がき裂面内に輸送され、微粒子のくさび効果によりき裂進展を抑制する(I. Takahashi and M. Ushijima, Materials Transactions, 2007)。この方法は、小さい微粒子を選定し、ペーストの粘度を調整すると“き裂形状を問わず自動的に微粒子を輸送できる”画期的な方法である。申請者らも、円周切欠き材の低サイクル疲労寿命に対して混合ペースト法が延命効果を示すことを明らかにしてきた[研究業績 6]。しかし、混合ペースト法では応力レベルが増大するもしくは、き裂長さが長くなると抑制効果が望めない。そこで本申請課題は、混合ペースト法の課題であった“有効な粒子径選定”の制約条件を取り払いより継続的な疲労き裂進展抑制効果を狙う。

その制約条件を取り払うため、申請者らはプラズマ法に着目した。プラズマ法はパルス通電を行うことでき裂先端から 2 mm の範囲でき裂の原子レベルでの治癒を可能とする(A. Hosoi, T. Kishi and Y. Ju, Materials, 2013)。この方法はパルス通電時に生じるき裂面内の放電現象により、面内の酸化膜を除去し原子拡散に基づき治癒する画期的な方法である。プラズマ法を、疲労き裂に適用する場合には“き裂先端の増大する開口量”に対応できることが鍵となる。申請者らは同じくパルス通電を用いて世界で初めて粉体を用いて鋼材のパルス通電接合に成功しその強度を明らかにしてきた[研究業績 1,3]。銅粉末を用いた 2 つの鋼材の接合強度は“最低でも 100 MPa”を示している。

そこで、混合ペースト法で得た“き裂形状を問わず自動的に微粒子を輸送できる”効果とプラズマ法で得た“最低でも 100 MPa”の接合強度を融合させることで、疲労寿命延命効果が望むことが出来るか検証した。検証には応力拡大係数の重ねあわせを用いた。仮定としては、無限板中に 10 cm の疲労き裂が存在し、安定な疲労き裂進展をしており、鉄鋼材料に 200 MPa の引張応力がき裂面に対して法線方向に負荷され、き裂面内全域が焼結体から 100 MPa き裂を閉じるように応力を受けていると仮定した。き裂周りの塑性域からの閉口する応力拡大係数は安定なき裂進展の場合、全応力拡大係数の 6 割を有すると仮定した(き裂は最大荷重のおよそ 6 割で開き始めるため)。この場合、重ね合わせた応力拡大係数は、以下ようになる。

$$200(\pi \times 5 \times 10^{-2})^{0.5} - 200(\pi \times 5 \times 10^{-2})^{0.5} \times 0.6 - 100(\pi \times 5 \times 10^{-2})^{0.5} = -7.924$$

上記のように、重ね合わせた応力拡大係数は  $-7.92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  を示し、き裂は開口することが出来ない。(鋼の場合、 $3 \sim 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  の場合疲労き裂が進展する。)つまり疲労き裂進展を抑制し、進展速度を 0 に出来る可能性が示唆された。また仮に疲労き裂が進んだとしても、き裂面の焼結体によるくさび効果を期待することが出来る。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、補修が難しいとされる 10 cm 程度のき裂に対してき裂進展速度を 2 分の 1 以下にすることを目標とし、新たな疲労き裂進展抑制手法を開発し、その力学的評価を行うことである。

### 3. 研究の方法

疲労試験の材料には構造用鋼 2 種(S45C・SS400)を用いる。塗布するものは 2 種類である。1 つは混合ペーストには鉄微粒子とオイルのペーストを用いる。予き裂部に混合ペーストまたは鉄微粒子を塗布した CT 試験片に対してパルス通電を行う。通電後、研磨を行い、疲労試験を行う。疲労試験時には、試験片の表面き裂進展をその場観察する。試験後、破面解析により内部疲労き

裂進展速度の変化・脆性破面率の変化を明らかにする。破面解析後、き裂周りの硬さ測定を行う。硬さ測定により通電処理による硬さの低下、疲労試験後の硬さ変化を明らかにすることができる。また、側面の組織観察を行う。組織観察によって通電処理による組織変化を明らかにすることができる。有限要素法解析により、疲労き裂進展時の応力拡大係数に対する面内焼結物のくさび効果の影響を明らかにする。

#### 4. 研究成果

S45C 材において以下 6 点が確認された。1) プラズマ焼結時の模擬き裂先端の温度は、現在の試験片で最大で 550°C 程度まで上昇することが確認された。2) 疲労試験の結果、熱処理材、プラズマペースト材、未処理材よりも微粒子プラズマ材の疲労寿命が長くなることが確認された。3) 光学顕微鏡を用いた模擬き裂部の充填率確認の結果、充填率はプラズマペースト材、微粒子プラズマ材でいずれも十分でないことが確認された。4) 電子顕微鏡を用いた破面観察結果より、破面に観察されるストライエーション幅は微粒子プラズマ材で最も小さいことが確認された。5) 組織観察結果より、結晶粒径に大きな違いがなく、現在のプラズマ焼結条件では、結晶粒の粗大化が起こらないことが確認された。6) 疲労き裂進展速度が微粒子プラズマ材の場合、未処理材より遅くなることが確認された。

SS400 材において以下の 7 点が解明された。1) プラズマペースト法を使用すると寿命が低下する場合が存在すること、2) 充填率が上昇すると疲労き裂進展速度が低下すること、3) 焼結が進むと疲労き裂進展速度が低下すること、4) 硬さ試験により、き裂先端の硬さは未処理材が一番高く、充填率高くなると硬さの低下が少なくなること、5) 熱処理によりき裂先端の硬さは HV 10 程度低下すること、6) 脆性破面率が熱処理により上昇すること、7) き裂進展速度が上昇する場合は、脆性破面形成が大きく影響していることが確認された。

有限要素法によって新たに以下の 2 点が解明された。1) 硬さ変化に基づく力学解析を行った結果、通電処理後塑性域が拡大することが示された、2) ストライエーション幅の減少率と塑性域の比較により焼結体によるき裂先端の塑性変形抑制効果が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐々木大輔, 室井航大
2. 発表標題 その場観察と破面解析に基づくプラズマ・粒子法による模擬き裂補修の効果検証
3. 学会等名 一般社団法人日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 室井航大, 佐々木大輔
2. 発表標題 疲労き裂に対する鉄炭素混合粉とパルス通電焼結の補修効果
3. 学会等名 一般社団法人日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会 学生ポスターセッション
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下敬太, 佐々木大輔
2. 発表標題 鉄炭素混合粉とパルス通電焼結による組織と硬さの変化
3. 学会等名 第26回高専シンポジウムオンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木大輔, 川上雄士, 南口誠
2. 発表標題 超高齢化社会の物流を支える老朽化した大型構造物の簡易補修方法
3. 学会等名 イノベーション・ジャパン2020～大学見本市Online
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田錬太, 佐々木大輔, 室井航大
2. 発表標題 プラズマ・粒子法による疲労き裂補修及び充填率と焼結温度の影響
3. 学会等名 一般社団法人 日本鉄鋼協会 第179回春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田錬太, 佐々木大輔
2. 発表標題 プラズマ・粒子法による疲労き裂補修及び充填率の影響
3. 学会等名 一般社団法人 日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志岐 瑞帆, 佐々木 大輔, 川上 雄士, 南口 誠
2. 発表標題 Effect of repair with pulse current sintering and fine particle on fatigue life and crack growth rate
3. 学会等名 4th STI-gigaku 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室井航大, 佐々木大輔
2. 発表標題 鉄炭素混合粉とパルス通電を用いたき裂補修の開発
3. 学会等名 第25回高専シンポジウム in Kurume
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 志岐瑞帆, 佐々木大輔
2. 発表標題 疲労寿命とき裂成長速度に及ぼすパルス通電焼結と微粒子による補修の影響
3. 学会等名 一般社団法人 日本鉄鋼協会 第179回春季講演大会 学生ポスターセッション
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中宏樹, 佐々木大輔
2. 発表標題 鋼材と鉄微粒子のパルス通電接合体の引張強度に及ぼす焼結条件の影響
3. 学会等名 一般社団法人 日本鉄鋼協会 第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田錬太, 佐々木大輔
2. 発表標題 プラズマ法と鉄微粒子のペーストが疲労き裂進展に及ぼす影響と焼結状態の解明
3. 学会等名 一般社団法人 日本鉄鋼協会 第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木大輔, 池田錬太, 田中宏樹, 川上雄士
2. 発表標題 ペースト法とプラズマ法を組み合わせた簡易補修方法における疲労き裂進展抑制効果の解明
3. 学会等名 公益社団法人日本材料学会 九州支部主催 九州支部第5回学術講演会・総会 第31回信頼性シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木大輔, 川上雄士
2. 発表標題 鋼材と鉄微粒子のパルス通電接合体の引張破壊挙動
3. 学会等名 日本材料学会第67期通常総会・学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>応用固体力学研究室 (佐々木 大輔 助教)  <a href="http://www.kurume-nct.ac.jp/MSM/laboratory/materialssystemengineering3/">http://www.kurume-nct.ac.jp/MSM/laboratory/materialssystemengineering3/</a>          久留米工業高等専門学校 産学民連携テクノセンター 研究者プロフィール  <a href="http://www.kurume-nct.ac.jp/RCTC/profile/MSM/sasaki">http://www.kurume-nct.ac.jp/RCTC/profile/MSM/sasaki</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川上 雄士  (Kawakami Yuji)		
研究協力者	南口 誠  (Nanko Makoto)		
研究協力者	森園 靖浩  (Morizono Yasuhiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------