

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：57101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14050

研究課題名（和文）簡易延命手法のき裂/焼結体界面の最適設計と高サイクル疲労特性向上

研究課題名（英文）Optimal Design of Crack/Sintered Body Interfaces in Simplified Repair Techniques and Improvement of High-Cycle Fatigue Properties

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・准教授

研究者番号：50772498

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、プラズマ・粒子補修法の延命効果の向上を大きな目的とする。そのために、プラズマ粒子補修法を用いて補修を行い、保持時間や焼結温度を変化させた際の界面強度および破面形成、疲労寿命に及ぼす影響を実験と解析から調査した。実験の結果、保持温度を高くすることで引張強度と破断のびが上昇することが確認された。補修時のき裂位置毎における温度・応力を可視化し、ポイド・析出物の応力依存性を解明した。最も微視的損傷が少ない補修温度を採用し補修を行なった結果、疲労寿命を伸ばすことに成功した。デジタル画像相関法と有限要素法を用いて補修された試験片のひずみ幅は小さくなることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建設後50年以上の構造物補修は現在急務となっている。そこで大規模な補修工事の猶予時間を設けるため、簡易的疲労き裂補修方法の開発が望まれている。しかし、既存の補修方法では補修対象である10cm程度の疲労き裂補修が困難である。これまでに申請者は、低サイクル疲労寿命延命手法、パルス通電焼結体強度に関する研究に従事しており、二つを融合することで10cm程度の疲労き裂を補修し疲労寿命を延命する可能性を見出した。そこで本研究では、プラズマ粒子補修法の効果的な補修を行うため、特に焼結体とき裂面の界面剥離を抑制することで、補修効果を高くすることを試みた。

研究成果の概要（英文）：This study aims to enhance the repair effects of the plasma particle repair method. Repairs were performed using the plasma particle repair method. The effects on interfacial strength, fracture surface formation, and fatigue life, when varying the holding time and sintering temperature, were investigated through experiments and simulations. The experimental results shows that increasing the holding temperature improves tensile strength and elongation at break. The temperature and stress at each crack location during repair were visualized, elucidating the stress dependency of voids and precipitates. By adopting the repair temperature with the least microscopic damage, the fatigue life was successfully extended. It was revealed that the strain amplitude of the repaired specimens decreased using digital image correlation and finite element methods.

研究分野：材料力学

キーワード：疲労 補修 温度分布 界面 プラズマ焼結 金属微粒子 画像相関法 ひずみ

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延命手法の構築が求められている。すでにストップホール法や溶接補修など優れた簡易補修方法が存在する。しかし既存の方法を持ってしても 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残された課題となっている。

疲労寿命延命手法の学術的背景は以下になる。疲労破壊はき裂発生、き裂進展、不安定き裂進展の 3 過程に分けることができる。いずれかの過程を抑制することで構造物寿命の延命が可能である。き裂進展を抑制する因子としては、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。申請者もき裂面内に焼結体を作成させることで、残された課題とされていた長いき裂に対して、き裂進展速度を 3 分の 1 まで抑制し、寿命延命に成功した（平成 29 年度科研費若手研究による成果。当初目標：き裂進展速度を 2 分の 1 に抑制）。

2. 研究の目的

本研究の目的は、10cm 程度の疲労き裂に対して疲労寿命を 2 倍に延命する簡易補修方法を実用化することである。学術的独自性は 2 つある。一つはき裂面内全域に着目することで低い静的強度を示す手法でも著しく疲労寿命を延ばす可能性があることに注目している点。もう一つは、これまで巨視的なき裂/焼結体界面特性に着目して補修を行ってきたが、空間的界面特性の設計を行う点にある。学術的創造性は、既存の疲労き裂進展抑制メカニズムに焼結体とき裂面凝着による新たなき裂閉口メカニズムを加える点にある。これにより、多角的な視点から今後の疲労き裂補修方法が提案されると考える。

3. 研究の方法

【1-1 き裂/焼結体界面特性の温度依存性】 補修時の焼結温度をパラメータとして変化させる（500 から 700 まで 50 刻み）。焼結後、引張試験片状に切り出し、電子顕微鏡による組織観察、元素分析を行う。分析後引張試験、破面解析を行う。

【1-2 二次元温度可視化技術の構築】 有限要素法を用いて試験片と焼結体界面における補修時の温度と応力分布を可視化する。

【1-3 補修効果の平均応力依存性】 補修後試験片を研磨し、平均応力を変更して疲労試験を行う。試験時には試験片表面をその場観察する。試験後、破面解析により内部疲労き裂進展速度の変化を明らかにする。補修条件は一定とする。同様の疲労試験を補修前試験片に対しても行う。

【2-1 き裂/焼結体界面特性の補修応力依存性】 補修時の応力をパラメータとして変化させる（50MPa から 250MPa まで 50MPa 刻み）。令和 3 年度と同様に組織観察、元素分析、引張試験、破面解析を行う。

【2-2 二次元応力可視化技術の構築】 令和 3 年度に開発した有限要素法解析技術を用いて補修時の荷重をパラメータとし、解析を行う。2-1 と本項目で補修時のき裂位置毎における温度・応力を可視化し、ポイド・析出物の応力依存性を解明する。

【2-3 補修効果の補修温度依存性】 1-1 で得られた最も平均の引張強度と延性の高い補修温度を採用し補修を行う。令和 3 年度同様に、研磨、その場観察疲労試験、破面解析を行う。

【3-1 力学解析への組み込み】 平成 29 年度若手研究にて構築した有限要素法による力学解析技術に 1-1 2-1 の解析結果を用いて、き裂先端の応力集中を最も抑制する補修条件を選定する。

【3-2 補修効果の荷重依存性】 2-1 と 3-1 の力学解析で得られたき裂先端の応力集中を抑制する条件で補修を行う。令和 3 年度と同様に、研磨、その場観察疲労試験、破面解析を行う。

4. 研究成果

本研究では、プラズマ・粒子補修法の延命効果の向上を大きな目的とする。そのために、プラズマ・粒子補修法を用いて補修を行い、保持時間や焼結温度を変化させた際の、界面強度および破面形成に補修が及ぼす影響を調査した。試験材料には SS400 を用いた。CT 試験片を模擬した試験片に鉄微粒子と炭素粉末の混合粉末を充填し、パルス通電焼結を行なった。焼結により、模擬き裂内に焼結物を作成したのち、組織観察、引張試験を行なった。まずは保持温度を 700 度、昇温速度を 0.5 度/sec で一定とした。焼結時間を実験パラメータとして変更した。焼結後、光学顕微鏡と電子顕微鏡を用いて観察を行なった。実験の結果、焼結時間を長くすることで、焼結が進行することが確認された。一方で 30 分を超えた場合は、焼結物、介在物の分布、界面状態に変化がないことが確認された。焼結体中には炭化物が確認された。次に、保持時間を 5 分、昇温速度を 0.5 度/sec で一定とし、保持温度を実験パラメータとして変更した。焼結後、引張試験をおこなった。クロスヘッドスピードは 0.6mm/min である。引張試験では、充填し焼結後、試験片を板状に切り出した試験片を用いた。保持温度を高くすることで、引張強度と破断のびが上昇することが確認された。900 度で保持された試験片の破面には、700 度で確認されなかったディンプルが確認された。また 700 度の破面には多数焼結前の粒子と同じサイズの粒子が観察された。また、同じ試験片においても、模擬き裂部のき裂先端近傍とき裂先端から離れた場所のどこから試験片を切り出すかによって界面強度が異なることが確認された。1 年目は CT 試験片を模擬した試験片に鉄微粒子と炭素粉末の混合粉末を充填し、パルス通電焼結を行なった。焼結により、模擬き裂内に焼結物を作成したのち、組織観察、引張試験を行なった。実験の結果、保持温度を高くすることで引張強度と破断のびが上昇することが確認された。具体的には 900 度で保持された試験片の破面には、700 度で確認されなかったディンプルが確認された。

2 年目においては、補修時の応力をパラメータとして変化させ補修実験および有限要素解析を行なった。補修した試験片に対して組織観察、破面解析を行った。ポイド・析出物の大きさ、形状、分布の応力依存性を明らかにした。解析により補修時のき裂位置毎における温度・応力を可視化し、ポイド・析出物の応力依存性を解明した。最も微視的損傷が少ない補修温度を採用し補修を行なった結果、疲労き裂発生寿命、疲労き裂進展寿命を伸ばすことに成功した。

最終年度は、デジタル画像相関法を用いて CT 試験片先端と焼結体のひずみ発達を可視化した。加えて有限要素法を用いて応力変化の可視化と再現性の確認を行った。その結果、補修された試験片のひずみ幅は小さくなること、焼結物が負荷荷重を一部受け持つことが実験的に明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐々木大輔	4. 巻 64
2. 論文標題 超高齢化社会を支える大型構造物の簡易補修方法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 配管技術	6. 最初と最後の頁 39-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木大輔	4. 巻 10
2. 論文標題 超高齢化社会を支える老朽化した 大型構造物の簡易補修方法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1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
2. 発表標題 老朽化した大型構造物の簡易補修技術を実証・展開したい！
3. 学会等名 独立行政法人国立高等専門学校機構主催 KOSEN EXPO
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP

https://note.com/kurume_asm/n/n50e532006437

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------