

高経年構造物の疲労寿命延命に向けたプラズマ・粒子法の実用化

久留米工業高等専門学校 材料システム工学科 助教 佐々木 大輔

1. 緒言

近年、我が国の高度経済成長期に建設され、産業・経済を支えてきた橋梁をはじめとする大型構造物の老朽化が社会的問題となっている¹⁾。大型構造物の補修・補強作業は部品や機械も大型であり、補修は長期にわたり多くの人材と費用が必要とされる。そのため、これら全ての橋梁の大掛かりな補修・補強作業を行うことは難しい。そこで、短期間で実施が可能でかつ人手、費用を抑えた簡易的き裂補修方法の開発が求められている。

既存の補修方法には、例えば溶接補修法、ストップホール法、当て板補修法などがある。これら3つの補修法は簡便かつ短時間で可能な施工をすることで、き裂進展の遅延、抑制をすることが出来る。

これらの補修法をもってしても、補修が難しい場合が存在する。不純物元素 (S, P) を多量に含み、数 cm に及ぶ長く幅広いき裂に対する補修である。

簡易補修で特に課題となることは、耐用年数を超える橋梁に使用される高経年鋼材のき裂補修である。高経年鋼材は、近年大型構造物に使用されている鋼材に比べ、不純物元素となる S, P の含有量が多い²⁾。また橋梁によっては使用鋼材の化学組成を確認できないものも存在する。そのため溶接補修法では、溶接時の熱の影響によってより MnS の形成や P 偏析が生じ、高温割れが発生する可能性が高い。

そこで、我々の研究グループは高経年鋼材の長く幅広いき裂に対する簡易き裂補修方法としてプラズマ・粒子補修法を提案する。プラズマ・粒子補修法は金属微粒子をき裂面内に充填した後、パルス通電焼結を行う簡易き裂補修法である³⁾。

本研究では、老朽化した大型構造物の補修という社会的ニーズを達成すべく、高経年鋼材に対するプラズマ・粒子補修法のき裂補修効果について明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2-1 供試材

本研究で使用した中炭素鋼高経年材（铸造材）の化学成分を Table 1 に示す。中炭素鋼高経年材は、1928 年に建設された鉄道橋に使用されていた鋼材の化学成分を参考に作製した。Table 2 に参考にした高経年鋼材の化学成分を示す⁹⁾。

補修に用いた鉄微粒子は直径が 3.9 から 5.2 μm であった。また、Table 3 に鉄微粒子の化学成分を示す。補修に用いた炭素微粒子は純度 99.0% のものを用いた。この報告に基づき体積比で鉄粉:炭素粉=7:3 に混合した粉末を用いた。

Table 1 Chemical Composition of aged steel (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
0.28	0.02	0.35	0.024	0.03	0.14	0.04	0.028	0.01	<0.001	<0.0005

Table 2 Chemical Composition of steel used in the bridge (built in 1928) (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
0.275	0.004	0.367	0.019	0.031	0.142	0.040	0.028	0.004	0	0

Table 3 Chemical composition of iron particle (mass%)

Fe	O	C	N
Min97.8	0.15-0.40	0.75-0.90	0.65-0.90

試験片形状は Fig. 1 に示す. 試験片は高さ 67.2 mm, 幅 70 mm, 厚さ 14 mm である. ワイヤ放電加工により 9.75 mm の模擬き裂を導入している. CT 試験片を模した形状とした.

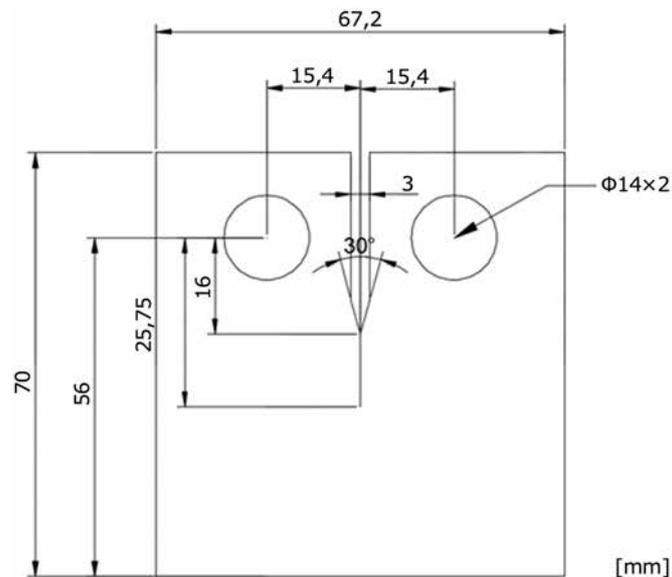


Fig.1 Specimen configuration

中炭素鋼高経年材の試験片は4種類の補修条件のものを用意した。模擬き裂部に鉄炭素混合粉を充填し460℃と700℃でそれぞれパルス通電焼結を行った試験片（以下、460度補修材、700度補修材）、模擬き裂部をTIG溶接によって接合した試験片（以下、溶接材）、模擬き裂部に鉄炭素混合粉の充填や溶接、パルス通電焼結を行っていない試験片（以下、未処理材）の4つである。

2-2 パルス通電焼結と溶接、疲労試験

パルス通電焼結は真空中（20 Pa 以下）にて行われた。パルス電流は模擬き裂に対して法線方向に流れ、460度補修材の時およそ900 A、700度補修材の時およそ2,200 A 流れている。室温から焼結を開始し、昇温速度は0.5℃/secとした。熱電対により計測される温度を補修材は550℃、460度補修材は460℃、700度補修材は700℃で5分保持した。

通電後、試験片両表面は1500番まで乾式研磨を行った。最終研磨方向は応力負荷方向に平行とした。研磨後、疲労試験を最大荷重14,000 N、周波数0.7 Hz、応力比 $R = 0.05$ の条件で行なった。試験終了は試験片破断時とした。き裂進展の様子はデジタルカメラを用いて撮影し、500 cycle 毎に試験片表面を撮影し、き裂長さを測定した。溶接材は溶接前に予熱はしていない。溶接後は溶接ビード周りの研磨が難しいため、溶接前に1500番まで試験片両表面を乾式研磨した。溶接後はそのまま疲労試験を行なった。

3. 高経年鋼材の実験結果および考察

3-1 疲労試験結果

Table 4 に破断繰返し数を示す。Fig.2 にき裂長さに対するき裂進展速度を示した。

Table 4 Number of cycles to fracture

Specimen	Number of cycles to fracture
Without treatment	5,540
With low temperature repair	5,581
With high temperature repair	5,712
With weld	6,986

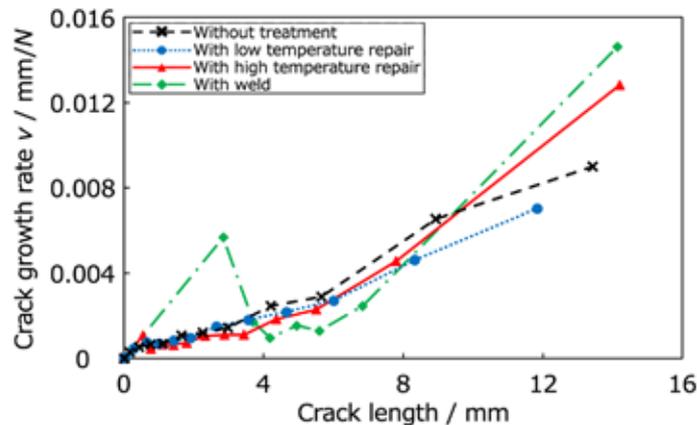


Fig.2 Cycle length and Crack growth rate (aged steel)

460 度補修材と未処理材のき裂進展速度に有意な差は確認出来なかった。また2つの試験片の疲労寿命の差は 41 cycle であり、補修効果はなかったと考えられる。疲労試験後、模擬き裂面内に充填した焼結物の一部が粉末状であり、模擬き裂部から崩れ落ちていることを確認した。補修時の焼結温度が 460 °C と低いため、焼結が不十分であったと考える。したがって補修効果が確認できなかった理由は、混合粉が十分焼結しておらず、焼結物の硬さが低く、焼結物/き裂界面の結合力も低いため、焼結体による塑性変形抑制効果が小さかったためであると考えられる。

700 度補修材はその場観察により 1 cycle 目にき裂が大きく進展したことが確認されたが、破断サイクルは 5,712 cycle と約 3 % 疲労寿命が延びた。Fig.2 より、き裂長さが約 1 mm から 6 mm の範囲でき裂進展を抑制していたことが確認された。この結果より、全繰り返し数のうち 90 % 以上で焼結物がき裂進展を抑制していたということが分かった。また、700 度補修材は模擬き裂部に充填した混合粉が一部緻密な焼結体となっていた。これらの実験結果および観察事実に基づき、焼結体によるくさび効果によって、き裂進展が抑制され、疲労寿命が延命したと考えられる。

3-2 硬さ測定結果

硬さ試験は、マイクロビッカース硬さ試験を荷重 490.3 mN で行なった。未処理材、460 度補修材、700 度補修材の硬さはほとんど同じであった。

700 度補修材は、疲労試験の 1 cycle 目に大きなき裂進展があったが、模擬き裂先端付近 (0 mm) の硬さが高いことは確認できなかった。

3-3 組織観察結果

光学顕微鏡を用いた模擬き裂先端部の組織観察写真を Fig.3 に示す。模擬き裂は写真の上部で、疲労き裂は左から右に進展している。組織写真の黒い組織はパーライト、白い組織はフェライトを示している。

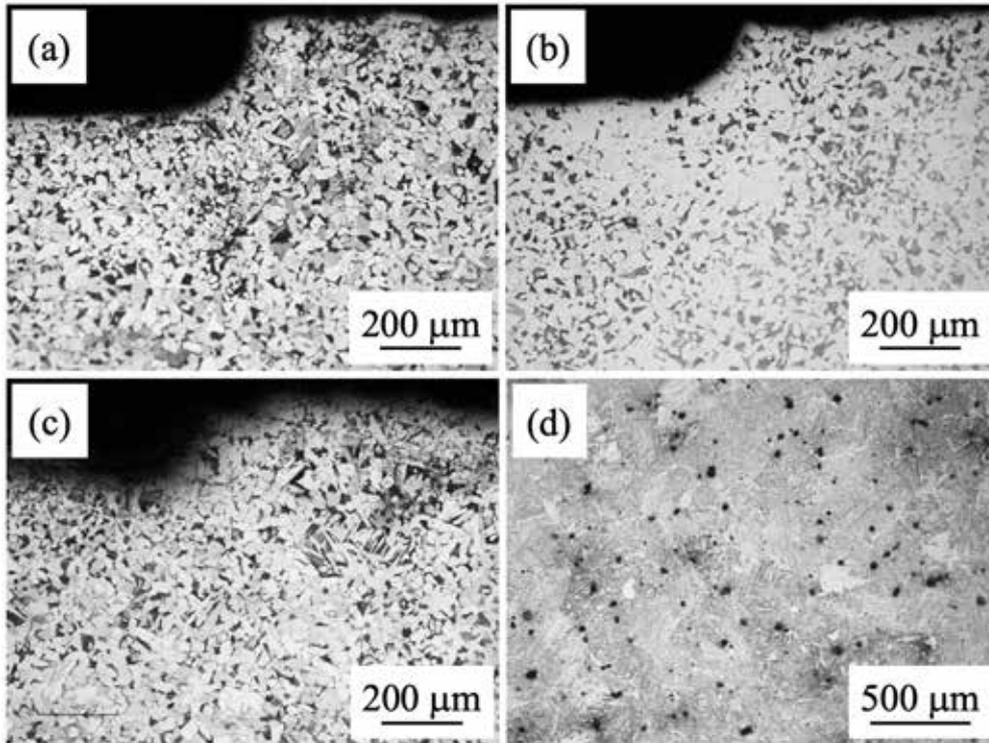


Fig.3 Structure near the tip of simulated crack (aged steel)

(a) Without treatment, (b) With low temperature repair,
(c) With high temperature repair, (d) With weld

模擬き裂部近傍のパーライト量と離れた箇所のパーライト量に差を確認できない。模擬き裂部に充填した混合粉中の炭素粉による浸炭はないと考える。未処理材、460度補修材、700度補修材の結晶粒の大きさに差は確認できない。焼結による母材部への熱の影響はないと考える。また700度補修材は、疲労試験の1 cycle目に大きなき裂進展があったが、組織、結晶粒サイズ等に原因と見られる結果は得られなかった。

3-4 破面観察と破面解析結果

試験片の疲労試験後の破面を Fig.4 に示す。700度補修材は疲労試験後、模擬き裂界面全体に焼結体が付いていることを確認した。破断したもう片方の模擬き裂界面にも同様に焼結体が付いていたため、疲労き裂は焼結体内部を進展したと考えられる。

SEM を用いて破面観察および撮影をした。模擬き裂先端を撮影した写真を Fig.5 に示す。SEM で撮影した破面の場所は厚さ 14 mm の試験片の中央部である。

破面解析において、700度補修材の模擬き裂先端において脆性破面が全体に確認できた。疲労試験時、1 cycle目の大きなき裂進展は、破面観察結果より、脆性的なき裂進展であることが確認された。

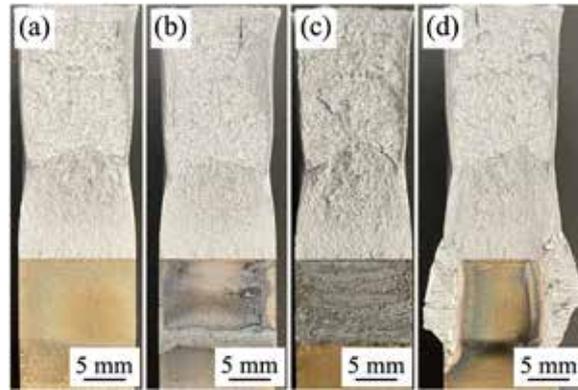


Fig.4 Fracture surface (aged steel)

(a) Without treatment, (b) With low temperature repair,
(c) With high temperature repair, (d) With weld

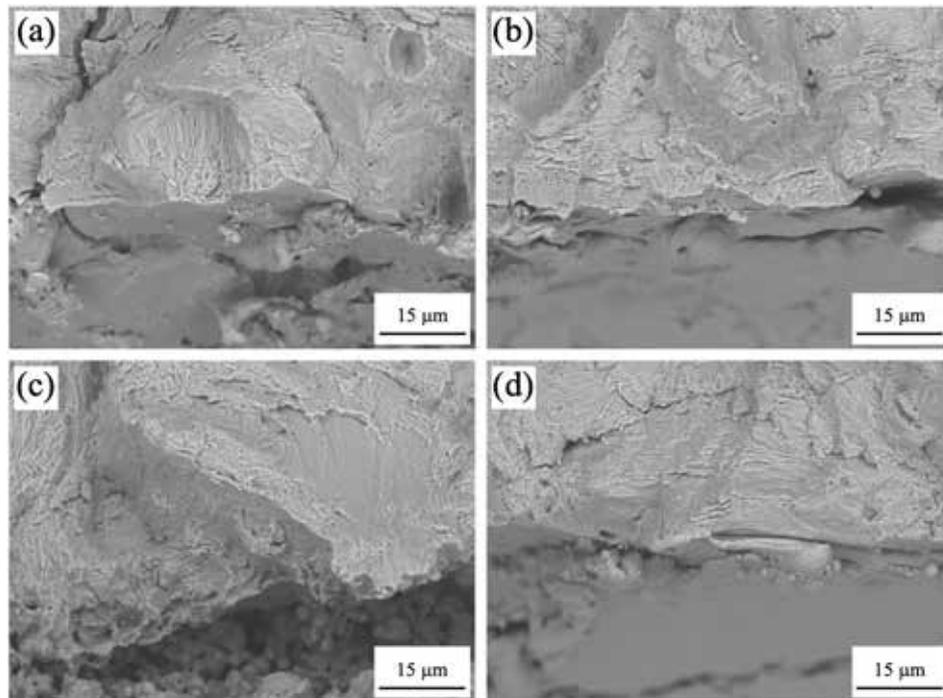


Fig.5 Fracture surface (at 0 mm) (aged steel)

(a) Without treatment, (b) With low temperature repair,
(c) With high temperature repair, (d) With weld

破面解析結果より、試験片ごとのストライエーション幅には有意差は確認できなかった。また700度補修材において延性破面率は最も高く、脆性破面率は最も低いことを確認した。補修材の疲労寿命の伸びは焼結体によるくさび効果によってき裂進展速度が抑えられたことも要因と思われるが、脆性破面が少ないことも一つの要因であると思われる。

3-5 EDS 分析結果

試験片の模擬き裂先端(at 0 mm)と模擬き裂先端から 1 mm 先(at 1 mm)の破面に対して EDS 分析を行った。未処理材の破面の写真と分析結果を一例として Fig.6 に示す。

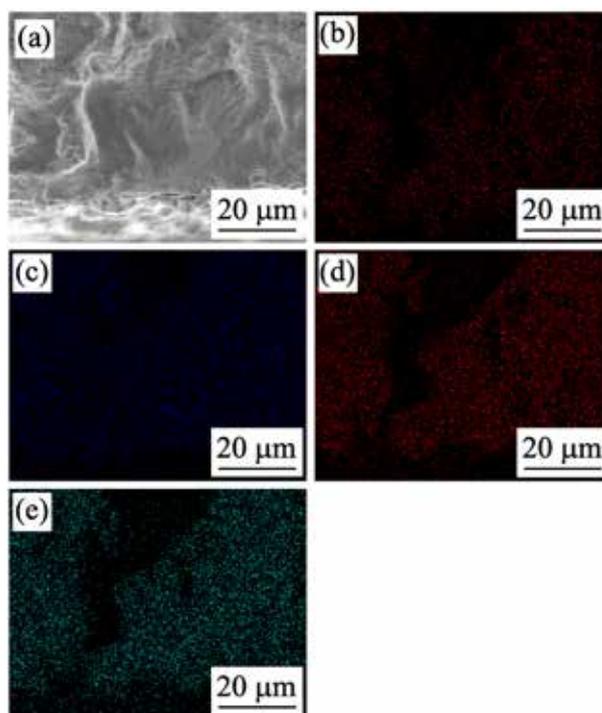


Fig.6 EDS results for Without treatment (at 0 mm)

(a)Structural photo, (b)C, (c)Mn, (d)S, (e)P

EDS 分析結果より、どの試験片も C 偏析、P 偏析は確認されなかった。また 460 度補修材は MnS 析出も確認されなかった。未処理材において模擬き裂先端から 1 mm の破面で MnS が複数個確認できた。700 度補修材は模擬き裂先端から 1 mm 先の破面で MnS 析出が確認された。しかし、その数は未処理材と同程度であるため、プラズマ・粒子補修法によるネガティブな熱影響はないと思われる。また、脆性破面が広がっていた模擬き裂先端で MnS は確認出来なかった。疲労試験の 1 cycle 目に脆性的なき裂進展が生じた要因は現時点では解明できていない。

4. 結言

本研究では、高経年鋼材の模擬き裂を有する試験片に対して、プラズマ・粒子補修法による簡易き裂補修を行い、その疲労特性に及ぼす効果を明らかにした。得られた知見を以下に示す。

1. 疲労寿命は未処理材が 5,540 cycle, 460 度補修材が 5,581 cycle, 700 度補修材が 5,712 cycle, 溶接材が 6,986 cycle であった。

2. 700 度補修材は，混合粉が一部緻密な焼結体となっておりき裂は焼結体内部を進展していった．一方 460 度補修材では，充填した粉末が焼結体になっていなかった．
3. 460 度補修材と未処理材のき裂発生や進展速度，疲労寿命に有意差はなかった．
4. 700 度補修材は疲労試験の 1 cycle 目に大きなき裂進展が確認された．破面観察より脆性的なき裂進展の発生が確認された．
5. 700 度補修材の疲労寿命には，焼結体による塑性変形抑制効果，延性破面率，脆性破面率も影響を与えたと考える．
6. EDS 解析結果より，補修による C 偏析，P 偏析，MnS 析出は確認されなかった．

以上，本研究では，疲労寿命とき裂進展に関して，プラズマ・粒子補修法のネガティブな影響は確認されなかった．今後は，模擬き裂部に充填する粉末の充填率の上昇と，焼結温度依存性など，疲労寿命の延命効果が高い条件を解明する．

参考文献

- (1) 国土交通省資料：老朽化の現状・老朽化対策の課題
- (2) M.Hirohata, “Material Properties and Weldability of Steels Used in Aged Bridges”, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.103 No.11(2017), pp.629-635.
- (3) 池田練太，佐々木大輔，川上雄士，“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”，材料とプロセス（2020）．

謝辞

本研究は，「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成のご支援のもと実施されました．ここに深く感謝の意を示します．