

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06548

研究課題名（和文）くさび補強型ストップホールによる疲労き裂の簡易補修法に関する研究

研究課題名（英文）Study on simple repairing methods of fatigue cracks using wedge-reinforced stop holes

研究代表者

高橋 一比古（Takahashi, Ichihiko）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30425748

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）： 構造物で疲労き裂が発見された場合、応急処置としてき裂先端部に円孔（ストップホール）を開けて補修することが多いが、条件によっては円孔端からき裂が再発してしまうこともある。そこで本研究では、くさび補強型ストップホールを提案し、き裂を片側からでも簡便かつ効果的に停止/抑制できる簡易補修法について検討した。具体的には、考案した斜面型くさび部材を平板試験片に適用して疲労試験を行い、くさび部材なしの場合と比較したところ、円孔端が平滑な場合にはき裂は再発せず、疲労寿命は20倍以上に延伸された。更に、円孔端に設けた切欠きからき裂を再発させた場合にも顕著なき裂進展抑制効果を示し、疲労寿命は12倍超となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

経年構造物の損傷事例に占める疲労損傷の割合は高く、き裂補修の重要性については言を俟たないが、現場補修の自由度は限られており、応急的にストップホールを用いる場合が多い。ストップホールの補強法は種々提案されているが、施工に時間と手間がかかる、裏側にアクセスできない箇所には適用できない等の課題があり、き裂を片側からでも簡便かつ効果的に停止/抑制できる簡易補修法が待望されるところである。本研究の成果はそのような現場のニーズに応えるものであり、片側施工の容易さに加え、き裂再発防止と再発き裂の進展抑制のいずれにも有効である、実施工用に大幅なコンパクト化が可能である等々、数々のメリットを有するものである。

研究成果の概要（英文）： When a fatigue crack is found in structures, the most commonly used emergency measure is making a stop-hole at the crack tip, whereas cracking may reinitiate from the hole edge under certain stress conditions. In the present study, a wedge-reinforced stop-hole, which reduces the stress amplitude at the hole edge by applying a wedge load, was newly proposed and a simple repair method was examined, which is performable from one side and capable of easily and effectively halting or restraining fatigue cracks.

Specifically, a slope-type adaptive wedge member was newly designed and applied to plate specimens for fatigue tests. No reinitiation of crack was observed for the smooth hole edge and the fatigue life increased at least 20-fold by the adaptive wedge member. On the other hand, when a crack was intentionally reinitiated from a notch at the hole edge, remarkable suppression of crack growth was observed and the fatigue life increased at least 12-fold by the adaptive wedge member.

研究分野：金属疲労、海洋工学

キーワード：疲労き裂 補修法 ストップホール 再発き裂 くさび荷重 斜面型くさび部材 適応くさび部材 耐疲労スマートペースト

1. 研究開始当初の背景

船舶、橋梁等の構造物において疲労き裂が発見された場合の応急処置として最も一般的に用いられるのは、き裂先端部に貫通孔、所謂ストップホールを設けて応力集中を低減する方法であるが、き裂が長い場合や十分なホール径を確保できない場合などでは、ストップホールの孔端部からき裂が再発してしまうことがある。これを防ぐため、ストップホールを高力ボルトで締め付けて摩擦力により補強する方法等が提案されており、一定の有効性が示されているが、溶接線に沿って進展するき裂や狭隘部、板の裏側にアクセスできない箇所には適用しにくい、施工に時間と手間がかかるなどの課題があった。

ストップホールからき裂が再発してしまう原因としては、上述のような場合の他にも、ドリル孔の仕上げが不十分であった場合や、ドリルの狙い位置が不適当で、き裂の先端部を除去しきれなかった場合などがあり、特に後者においてはストップホールの施工自体が無意味化してしまう。これらの再発原因を現場で直ちに特定するのも困難であるし、き裂の再発は維持管理担当者にとって工期(工法)的にも心理的にも大きな負担となるため、簡便かつ有効な対策が望まれるところであった。

2. 研究の目的

本研究では、くさび荷重の付与により孔端部の応力変動幅を抑制するくさび補強型ストップホールを用いて、構造物中を進展する疲労き裂を片側からでも簡便かつ効果的に停止または抑制できる簡易補修法について検討を行う。具体的には、まず、考案した数種類の方式のくさび部材について強度や安全性、施工性等の面から検討を加え、最も実現可能性の高いものに絞り込む。次に、設計・試作したくさび部材を小型の平板試験片に適用して静的載荷試験および疲労試験を行い、上記補修法の有効性を検証する。特に、くさび部材の設置後に作用する引張の過大荷重によるストップホールの変形にもくさび部材が自動的に追従して伸長し、弛緩することなく常に適切なくさび荷重を保持するような適応くさび部材の構成を実現し、くさび部材なしの場合と比較して、円孔端の歪・応力レンジや疲労寿命に及ぼす影響を評価する。

更に、ストップホールの孔端部からき裂が再発した場合を想定したき裂進展試験を行い、くさび部材を用いてストップホールを補強した場合、再発き裂の進展に対しても抑制効果を発現できるかどうかについて実験的に検証する。加えて、研究代表者らがこれまで提案してきた耐疲労スマートペーストをくさび部材と併用した場合についても疲労試験を実施し、き裂の進展抑制効果および目視検出支援効果について検証する。

3. 研究の方法

3.1 くさび部材の選定

まず初めに、考案した数種類のくさび部材候補について、強度や安全性、施工性等の面から検討を加えた。その結果、単純ねじ型くさび部材、テーパねじ型くさび部材、パンタグラフ型くさび部材、熱膨張型くさび部材については、剛性の確保や、円孔の変形に追従して自動的に延伸する機構の実現に難点がある等の理由により、本研究では棄却することとした。

最終的に選定したのは斜面型くさび部材であり、これは、図1に示す通り、部品Aの上に部品Bが互いの平滑な斜面同士を接して重なった構造となっている。部品Aの雌ねじに嵌合して先端が突き出したボルトを締め込む方向に回転させると、ボルト先端が部品Bの側面を押圧して斜面上をせり上がらせ、上下の孔端部にくさび荷重を付与することができる。一度せり上がった部品Bは、斜面角度 α を適切に設定しておくことにより、斜面間の摩擦力の作用によって元の方向に滑って戻ることはなく、適切なくさび荷重が維持される。

本方式は、

- ・構造が比較的単純で、くさび部材としての剛性を確保しやすい。
- ・くさび荷重の殆どが斜面間の抗力によって受け持たれるため、ボルトのねじ部に無理な力が加わらない。
- ・施工後もボルト部に一定の締め込み方向のトルクをかけておくことにより、円孔の変形に追従してくさび部材を自動的に延伸する機構が実現できる。

等の利点を有しており、FE解析を用いた事前検討でも比較的良好な結果が得られたため、本研究で用いるくさび部材は斜面型くさび部材に絞ることとした。

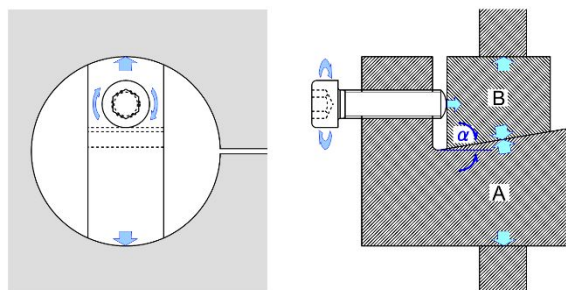


図1 斜面型くさび部材

3.2 斜面型くさび部材を平滑なストップホールに適用した場合

3.2.1 供試材および試験片

平板試験片の供試材はSM400B鋼板で、形状・寸法は図2に示す通りである。試験片中央部に25 mmの円孔および幅1 mmのスリットを加工した。スリットは板厚貫通疲労き裂を、円孔はき裂先端に設けたストップホールを、それぞれ模擬したものである。

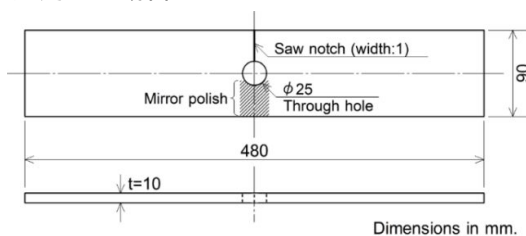


図2 平板試験片（ノッチなし）

3.2.2 斜面型くさび部材およびトルク負荷機構

斜面型くさび部材（以降、くさび部材）に用いた材料はSUS316ステンレス鋼であり、形状寸法は図3に示す通りである。

本研究では、くさび荷重を最初に付与するのみで追従機能を有さないくさび部材のことを単純くさび部材（略号SW）と呼び、ストップホールの変形に対する自動追従・伸長機能を有するくさび部材のことを適応くさび部材（略号AW）と呼ぶことにし、種々の試験を通して両者の比較検討を行った。

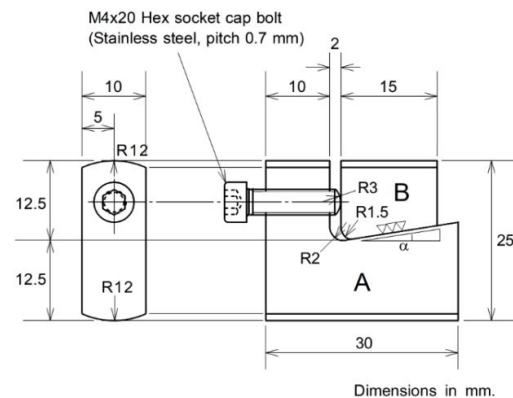


図3 斜面型くさび部材

まず、単純くさび部材は、載荷前の平板試験片の円孔部に嵌め込んだくさび部材のボルトを、レンチを用いて手指で初期締め込みすることにより実現した。締め込みの際には、レンチの回転角度や円孔端等の歪測定値を適宜記録した。

次に、適応くさび部材は、斜面型くさび部材とボルトを嵌入したプーリーおよび糸、錘を組み合わせたトルク負荷機構を用いた構成により実現した。図4は、適応くさび部材の構成を模式的に示したものである。

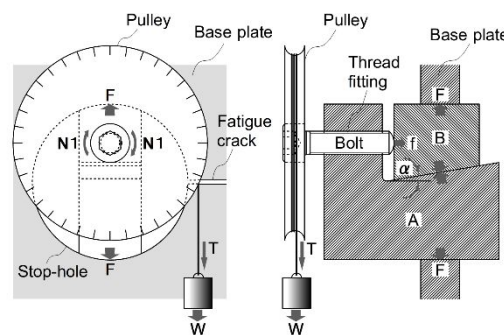


図4 適応くさび部材

3.2.3 静的載荷試験

まず、くさび部材を用いない場合（略号NW）、単純くさび部材SW、および適応くさび部材AWの各々について静的載荷試験を行い、引張荷重と歪計測値の関係を調べた。なお、最も歪が集中する円孔端の塑性変形がほぼ無視できる範囲（弾性域）で試験を行うため、載荷する最大引張荷重は $P_{max}=14.5$ kNとした。

3.2.4 疲労試験

疲労試験はすべて荷重比 $R=0$ の引張側完全片振り軸方向荷重制御（荷重周波数3.6 Hz）で行った。疲労試験中は各位置における歪を連続的に計測し、荷重データとともに適宜記録した。

3.2.5 有限要素解析

くさび部材による歪・応力レンジの抑制効果の検証や、歪計測値との比較検討を行うため、有限要素法による歪・応力解析を行った。解析には、汎用構造解析コードMarc/Mentatを用いた。解析方法は接触要素を用いた平面応力解析とし、くさび部材の伸長を模擬するために一部の要素については熱膨張解析を行った。

3.3 斜面型くさび部材を再発き裂に適用した場合

3.3.1 供試材および試験片

平板試験片の供試材はSM400B鋼板で、形状・寸法は図5に示す通りである。スリットは板厚貫通疲労き裂を、円孔はき裂先端に設けたストップホールを、EDMノッチはストップホール端部から再発した疲労き裂を、それぞれ模擬したものである。

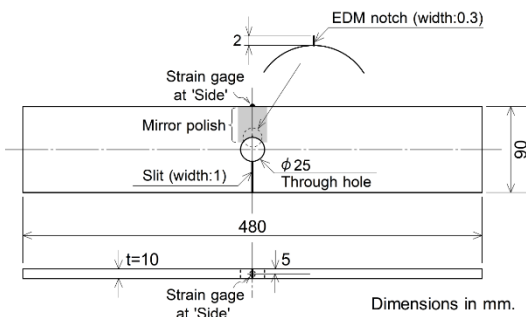


図5 平板試験片（ノッチあり）

3.3.2 斜面型くさび部材およびトルク負荷機構

斜面型くさび部材は3.2.2項で示したもの（図3）と同一である。適応くさび部材は、図4における錘をワイヤー式変位計のワイヤーに置き換えた構成とした。

3.3.3 疲労試験

疲労試験はすべて荷重比 $R=0$ の引張側完全片振り軸方向荷重制御（荷重波形は周波数4.1 Hzの正弦波）で行った。疲労試験中は試験片側面における歪を連続的に計測し、荷重データとともに適宜記録した。

3.3.4 耐疲労スマートペーストの調整および塗布

耐疲労スマートペースト中に分散してき裂内のくさびとして作用する微細粒には、平均粒径 $15.2 \mu\text{m}$ のアルミナ粒子を用いた。一方、アルミナ粒子を混合するバインダーには、低粘度の灰白色シリコングリースを用いた。この両者を卓上ミキサーによって均質で滑らかな状態になるまで攪拌混合し、ペーストを調整した。ペーストを塗布する際には、まず円孔内のノッチ端部近傍に絵筆を用いて塗布し、続いて表裏面のき裂進展予想経路周辺に塗布した。

3.3.5 有限要素解析

くさび部材による歪・応力レンジの抑制効果の検証や、歪計測値との比較検討、更には応力拡大係数 K 値の算出を行うため、EDM ノッチやき裂を含む FE モデルを作成し、3.2.5 項と同様の歪・応力解析を行った。

4. 研究成果

4.1 斜面型くさび部材を平滑なストップホールに適用した場合

4.1.1 静的载荷試験および FE 解析結果

静的载荷試験では、単純くさび部材、適応くさび部材ともに、斜面勾配 $\tan \alpha = 1:10, 1:7, 1:5$ の 3 通りについて試験を行った。孔端部における歪レンジに着目すると、くさびなしの場合の歪レンジと比較して、単純くさび部材を用いた場合は 6 割程度に抑制され、適応くさび部材を用いた場合は 5 割以下にまで大幅に抑制されることが判明した。

次に図6は、くさび部材なしの場合および単純くさび部材を用いた場合のそれぞれについて、

FE解析で求めた試験片の変形および载荷方向応力のコンター図を示したものである(変形量は10倍に拡大して表示)。まず(a)は、くさび部材なしの場合の初期状態だが、引張荷重がゼロの時、孔端部の引張応力はゼロである。これに対して、試験片に最大引張荷重 $P_{max} = 14.5 \text{ kN}$ が作用すると、試験片の形状および载荷方向応力の分布は(b)のようになり、孔端部には最大引張応力 318 MPa が生じ、くさび部材なしの場合にはそれがそのまま応力レンジ $\Delta\sigma$ となる。

一方、(c)は、単純くさび部材を用いた場合について、FEモデルのくさび部材を所定量だけ伸長させた時の状態を示しているが、引張荷重がゼロの時でも、くさび荷重が孔部に作用して、スリット部分は若干開き、孔端部には初期引張応力 201 MPa が生じている。この状態から、最大引張荷重 $P_{max} = 14.5 \text{ kN}$ が作用すると、孔端部には最大引張応力 335 MPa が生じるが、応力レンジ $\Delta\sigma$ は(c)の初期引張応力 201 MPa との差分 134 MPa となり、くさび部材なしの場合の 318 MPa と比べて大幅に抑制(約42%)されていることがわかる。

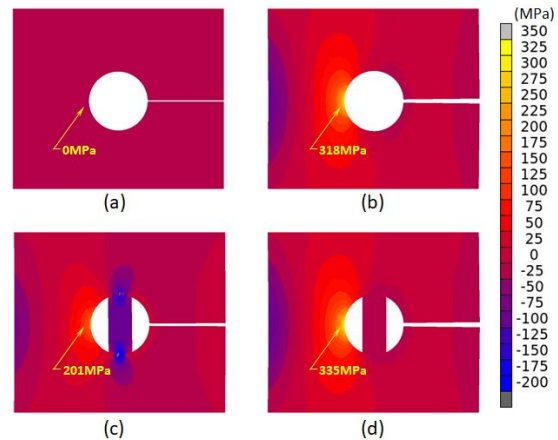


図6 FE解析による応力コンター図

4.1.2 疲労試験結果

(1) 疲労試験条件および結果

疲労試験は、くさび部材なしの NW1~9、斜面勾配 $\tan \alpha = 1:7$ の単純くさび部材を用いた SW1~3、斜面勾配 $\tan \alpha = 1:7$ の適応くさび部材を用いた AW1~3 のそれぞれについて実施した。本研究では、サイクル数 N が 10^7 回を超えた時点で run out と見なし、適当なサイクル数で試験を停止した。run out とならなかったのは高荷重レンジ条件の NW4~9 と SW1 および 3 であり、これらはすべて孔端部から発生・伝播したき裂により破断した。他方、run out となったその他の試験において、き裂は発生しなかった。

図7は、NW シリーズと SW、AW シリーズについて、荷重レンジ ΔP と破断寿命 N_f の関係を示したものである(但し ΔP が最小の NW1 は除く。矢印の付いたプロットは run out したものの)。試験片が破断した高荷重レンジ域における NW シリーズのデータ(印)と比較すると、

単純くさび部材を用いて部品 A を保持した SW2 と、適応くさび部材を用いた AW シリーズで寿命延伸効果が現れており、特に AW シリーズはいずれも破断寿命 N_f が 20 倍以上に延伸されていることがわかる。他方、単純くさび部材を用いたが部品 A を保持しなかった SW1 と、単純くさび部材を用いて部品 A を保持したが最大の荷重レンジ条件で試験した SW3 の結果はくさび部材なしの場合とほぼ同等であり、寿命延伸効果は認められなかった。

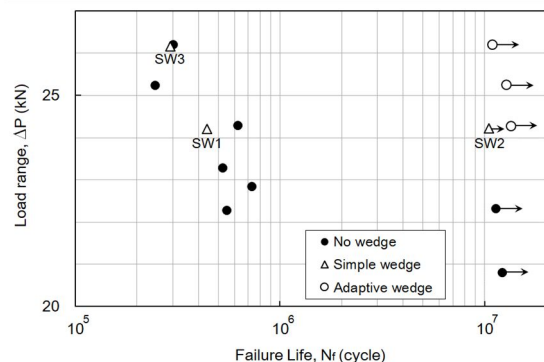


図7 荷重レンジ ΔP と破断寿命 N_f の関係

(2) 疲労試験中の荷重 - 歪応答

図 8 は、AW2 について疲労試験中の荷重 - 歪応答を示したものである。AW2 では、試験の最初から周波数 3.6 Hz の動的载荷を行った。载荷後、第 1 サイクルの除荷過程について孔端部歪レンジの初期値 $\Delta\varepsilon_{AW(init)}$ を求めると、 $\Delta\varepsilon_{AW(init)}=0.246\%$ であった。これは、くさび部材なしの NW8 における安定時の歪レンジ 0.297 % の約 83% に相当し、第 1 サイクルではまだくさび部材が十分に効いていないことを示している。その後、荷重サイクルを重ねるにつれて、まず低荷重域側から荷重 - 歪曲線の傾きが大きくなり、くさび部材の効きが增して円孔部の剛性が高まっていく様子が見てとれる。10 サイクル目ぐらいになると曲線の傾きは安定してほぼ一定となり、以降は繰り返し载荷による円孔の塑性変形の漸増に伴って曲線が少しずつ右側に移動している。 $N=36000$ 回における孔端部歪レンジ $\Delta\varepsilon_{AW}$ を求めると、 $\Delta\varepsilon_{AW}=0.109\%$ であり、くさび部材なしの場合の歪レンジ 0.297 % の 36.9 % にまで大幅に低減されていた。なお、繰り返し载荷による円孔の塑性変形はこれ以上進むことはなく、疲労試験が run out するまで荷重 - 歪曲線はほぼ同じ軌跡を描き続けた。

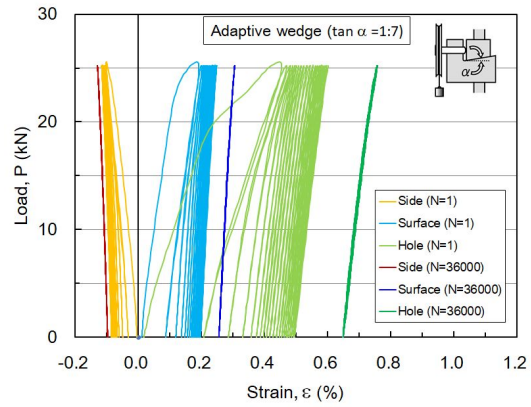


図 8 AW2 における荷重-歪応答

4.2 斜面型くさび部材を再発き裂に適用した場合

4.2.1 疲労試験結果

(1) 疲労試験条件および結果

疲労試験は、くさび部材なしの NW1・2、単純くさび部材を用いた SW1、適応くさび部材を用いた AW1~3、適応くさび部材および耐疲労スマートペーストを併用した AWP1 のそれぞれについて実施した。図 9 は、き裂長さ a とサイクル数 N の関係を示したものである。但し、ペーストを塗布した AWP1 については、ペースト中に形成された凹みの先端までの長さ L_c をもって一部 a に代用している（灰色プロット部分）。なお、各プロットの上側に同色で示した点線は破断寿命を表している。

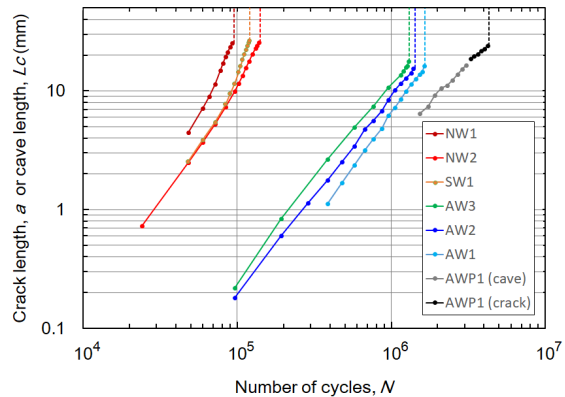


図 9 き裂長さ a または凹み長さ L_c とサイクル数 N の関係

図 9 を見ると、単純くさび部材の SW1 では効果がないのに対し、AW シリーズではサイクル数にしてほぼ 1 桁以上の進展抑制効果が認められる。ペーストを併用した AWP1 では更に AW シリーズの 3 倍程度の抑制効果が現れており、破断寿命は NW シリーズの 36.6 倍となった。

(2) 疲労試験中の歪応答

図 10 は、実施した全ケースについて、試験片側面における歪レンジ $\Delta\varepsilon$ とサイクル数 N の関係を示したものである。まず、NW1・2 では、 $N=4 \times 10^4$ 回を超えた辺りから $\Delta\varepsilon$ が急激に上昇し、程なく破断に至っている。また、単純くさび部材を用いた SW1 のプロット曲線は NW2 の場合とほぼ同等であり、歪レンジ抑制効果は認められなかった。

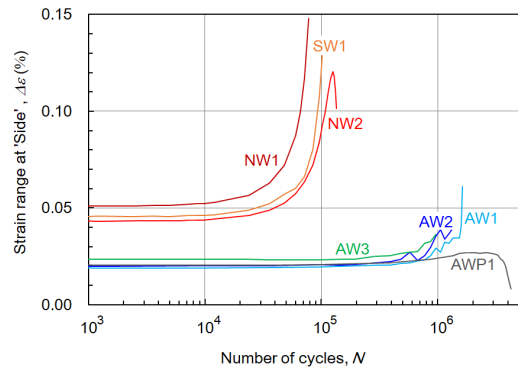


図 10 歪レンジ とサイクル数 N の関係

一方、適応くさび部材を用いた AW シリーズでは $N=10^3 \sim 5 \times 10^5$ 回の範囲で、また適応くさび部材とペーストを併用した AWP1 では $N=10^3 \sim 3 \times 10^6$ 回の範囲で歪レンジ $\Delta\varepsilon$ の値は安定的にくさびなしの場合の $N < 10^4$ 回における値の 1/2 程度まで抑制されており、顕著な歪レンジ抑制効果が現れている。

4.2.2 き裂の目視検出

図 11 は、AWP1 において、き裂の進展に伴いペースト中に形成された凹みと黒発色域の様子を示している（サイクル数 $N=2.496 \times 10^6$ 回）。黒発色と白色のペーストとのコントラストは顕著で、ある程度離れた位置からでも目視により容易に視認することが可能であり、耐疲労スマートペーストの有するき裂の目視検出支援機能を確認することができた。

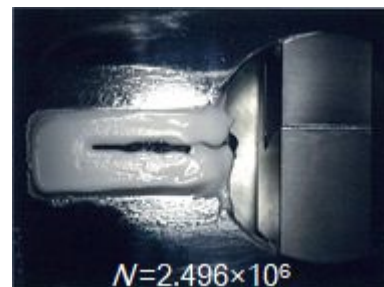


図 11 き裂進展に伴う凹みと黒発色域の形成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 高橋一比古	4. 巻 37巻2号
2. 論文標題 くさび補強型ストップホールを用いた疲労き裂の簡易補修法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 81-97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.37.81	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 高橋一比古	4. 巻 38巻4号
2. 論文標題 くさび補強型ストップホールを用いた疲労き裂の簡易補修法 - 再発き裂への適用性と耐疲労スマートペーストの効果 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 335-350
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.38.335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ichihiko Takahashi	4. 巻 34
2. 論文標題 A simple repair method of fatigue cracks using stop-holes reinforced with wedge members	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Welding International	6. 最初と最後の頁 185-209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09507116.2021.1915565	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 Ichihiko Takahashi	4. 巻 published online
2. 論文標題 A simple repair method of fatigue cracks using stop-holes reinforced with wedge members: applicability to reinitiated cracks and effects of an anti-fatigue smart paste	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Welding International	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/09507116.2021.1915567	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 高橋一比古
2. 発表標題 くさび補強型ストップホールを用いた疲労き裂の簡易補修法
3. 学会等名 一般社団法人 溶接学会 溶接疲労強度研究委員会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 疲労亀裂の補修用くさび部材の取り外し機構、疲労亀裂の補修用くさび部材の装着方法、及び疲労亀裂の補修用くさび部材の取り外し方法	発明者 高橋一比古	権利者 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6864203号	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 疲労亀裂の補修方法及び補修用部材	発明者 高橋一比古	権利者 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6703280号	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

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