

(解説)

疲労き裂の進展抑制による鋼構造物の延命化技術

Technology for Prolonging Life of Steel Structures by Restraining Fatigue Crack Growth



河本恭平*¹ (博士(工学)) 山田岳史*² (博士(工学)) 大塚雄市*³ (博士(工学))
Dr. Kyohei KAWAMOTO Dr. Takeshi YAMADA Dr. Yuichi OTSUKA

Factory equipment with a steel structure may suddenly stop due to aging. In order to secure the safety of such equipment, it is important to perform efficient maintenance including inspection and repair. Kobe Steel developed a technology for decelerating the growth of fatigue cracks to enable the stable operation of such equipment. This paper introduces the results of a technology assessment performed on a real machine and the mechanism of the technology, which employs a paste comprising a mixture of fine alumina particles and oil. When applied to a surface with cracks, the paste penetrates into the cracks. Then the fine particles contained in the paste exert a so-called "edge effect," by which cracks are inhibited from opening/closing, decelerating their growth. The verification of benefits will continue on actual structures to enable this technology to be used for the maintenance of various steel structures.

まえがき = 当社工場内の各種の生産設備・搬送設備は、工場の開所より長期間にわたって供用され、老朽化が原因と考えられる損傷が散見されている。そのトラブル防止は全社共通の課題と考えられる。設備トラブルが生じた場合、災害に結びつく可能性がある上に、相応の機会損失や設備更新費が発生するため、現有の老朽化した設備を安定稼動・長期使用するための効率的な点検・メンテナンス技術が必要と考えられる。

設備の主たる損傷要因の一つに、金属疲労によるき裂発生が挙げられる。本稿では、繰り返し応力を受ける鋼構造物を対象に、発生したき裂に適用することによってその後の疲労き裂の進展速度を抑制し、設備の安定稼動に寄与する技術について紹介する。

1. 開発した疲労き裂進展抑制技術の概要と既往の研究

疲労き裂進展抑制技術には、高硬度かつ微細粒であるアルミナ、およびアルミナをき裂内に輸送するための工業用オイルなどを混合させて製作したペースト状の物質を用いる(図1)。この物質をき裂表面に塗布するとペーストがき裂先端に浸透し、アルミナ粒子がくさびとして作用することによってき裂先端の繰り返し変形(開閉口)を抑制し、進展速度を低減させる。

この技術の基本的なコンセプトは、実験室レベルでの取り組みが以前より報告されてきたものである。疲労き裂の進展が遅くなる要因の一つとして、破面同士が擦れて発生した摩擦粉がき裂内に堆積してき裂開閉口を妨げ

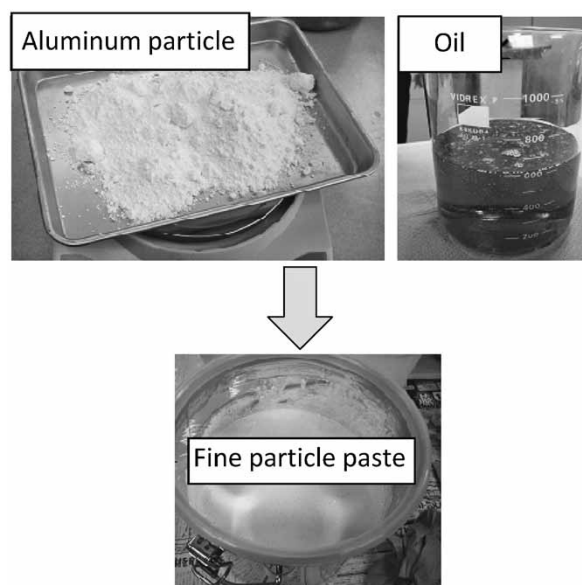


図1 微細粒ペーストの製作方法
Fig. 1 Production method of fine particle paste

るくさび効果と呼ばれる現象¹⁾があることが古くより知られている。このくさび効果を強制的に発現させてき裂進展速度を低下させた例として、接着剤をき裂内に注入する手法が報告された²⁾。しかしながら、接着剤は注入して間もなくき裂内で硬化するため、その後にき裂が再び進展を開始すると徐々にその効果が失われることが問題であった。その後、高橋らによりアルミナ微細粒をオイルに混合させることで流動性を与え、粒子をき裂先端に運ぶ方法が報告された³⁾。アルミナは硬質の物質で

*¹ 技術開発本部 機械研究所 *² 技術開発本部 開発企画部 *³ 長岡技術科学大学 システム安全系

あるため、き裂の内部に浸透した後、き裂の閉口過程においても容易に潰れることはなく、早期にき裂を閉口させるものと推察されている。また、流動性を付与することによって、ペーストの導入後にき裂が進展した場合でもアルミナ粒子がオイルの流れとともにき裂の先端に向けて輸送され、き裂の進展抑制効果が持続することを狙っている。

当社は、後で述べる幾つかのパラメータスタディとメカニズムの調査を通じて本技術の信頼性を向上させるとともに、実構造物レベルでの効果検証などを通じて実用化に向けた取り組みを行った。

2. き裂進展抑制メカニズム

本技術が効果を発揮するプロセスは、ペーストがき裂内に浸入するステップと、そのペーストに含有される微細粒が疲労き裂の進展を抑制するステップで説明される。それぞれのステップについて、取得したラポデータ^{4), 5)}を紹介しながら概説する。

2.1 き裂内への微細粒ペーストの浸入メカニズム

疲労き裂の表面に塗布された微細粒ペーストはき裂内に浸入し、き裂先端に到達する。この微細粒をき裂先端に運ぶための媒体としてオイルを使用しており、アルミナ粒子との混合比率を調整することにより輸送性を確保している。

図2は、ラボ実験でペーストを塗布した試験片の疲労破面の例である。板状の試験片において、各写真の中央上側に初期欠陥（ドリル孔）を設けており、当該部より発生した疲労き裂が半円状に進展して最終破断に至っ

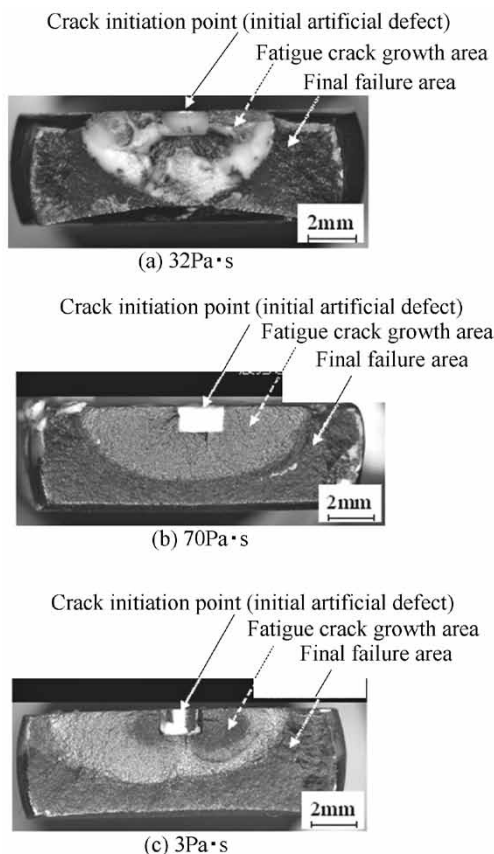


図2 微細粒ペーストを適用した疲労破面
Fig. 2 Fatigue fracture surface applied aluminum paste

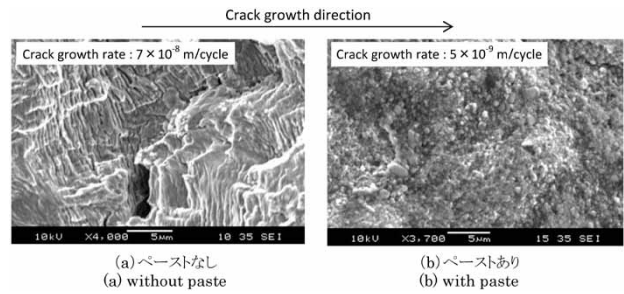


図3 疲労破面 (SS400, $\Delta K=19\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $R=0.05$)
Fig. 3 Fatigue Fracture surfaces (SS400, $\Delta K=19\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $R=0.05$)

たものである。

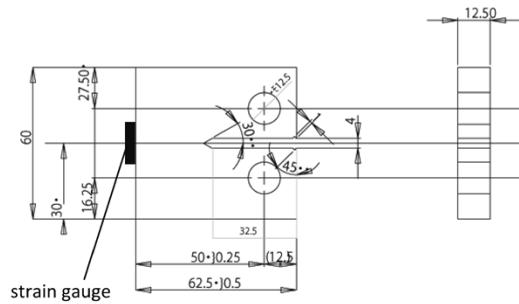
図2 (a) は、適正な条件として粘度 $32\text{Pa}\cdot\text{s}$ のペーストを適用した場合の疲労破面である。疲労き裂が進展した部位は白色になっており、試験片の表面に塗布されたペーストが流入していることが分かる。図3には、このペーストを適用した場合と適用していない場合の疲労破面の例を示す。適用していない場合(a)と比較すると、ペーストを適用した(b)の疲労破面には、粒径 $0.3\sim 1\mu\text{m}$ 程度の粒子が点在している。これは、ペーストに混ぜたアルミナの粒径に等しいことから、アルミナ粒子が浸入したものと考えられる。この破面が形成されたときのき裂進展速度は、ペーストなしの条件では $7\times 10^{-8}\text{m/cycle}$ に対して、ペーストありの条件では $5\times 10^{-9}\text{m/cycle}$ と $1/10$ 以下に抑制されている。

これに対して、図2 (b) の $70\text{Pa}\cdot\text{s}$ では粘度が高くペーストが加工穴に固着し、疲労き裂の内部へ浸入していなかった。また、図2 (c) の $3\text{Pa}\cdot\text{s}$ では粘度が低くペーストが試験片表面から流出しており、き裂に浸入していない。(b), (c) のペーストの浸入が認められないケースは両者ともに、き裂進展速度はペーストを適用しない場合と大差なかった。これらの結果より、アルミナ粒子とオイルとの混合比率の適正化を図ることによって粘性を調節し、輸送性を確保することがポイントになると推定される。

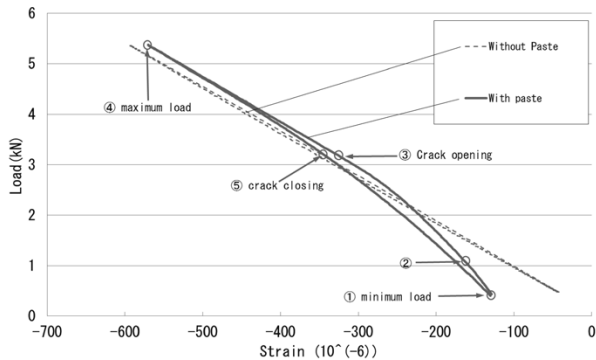
2.2 浸入した微細粒による疲労き裂進展抑制メカニズム

き裂内に浸入した微細粒が、き裂先端の開口変位を小さく抑えることによってその進展速度を小さくする。このメカニズムに関して、実験的に明らかにした内容を説明する。

図4に、微細粒の浸入によるき裂近傍のひずみの変化を示す。この実験および次の段落で述べるき裂開口変位を調べる実験では、現象論の解明のために通常は用いていない平均 $39\mu\text{m}$ の大粒径のアルミナを用いたペーストを使用している。供試材はSS400である。(a)は用いた試験片の形状であり、き裂進展試験に供されるCT試験片と称されるものである。二つの孔に入れたピンを介して繰り返し荷重を与えることによって、スリットの先端より疲労き裂を発生させた。その後、試験片の背面に貼付したひずみゲージによりひずみの推移を計測した。(b)は、その「荷重-背面ひずみ」の測定結果である。まず、ペーストを適用した場合の試験結果(図の実線)を用いて一般的な荷重-背面ひずみの関係を説明する。負荷過程では、①②間はき裂が完全に閉じているため線



(a) 試験片形状とひずみゲージ貼付位置
(a) Specimen shape and strain measurement point



(b) 荷重 - ひずみ曲線
(b) Load - strain curve in one cycle.

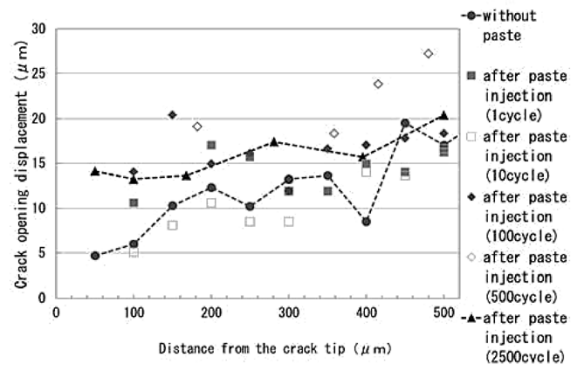
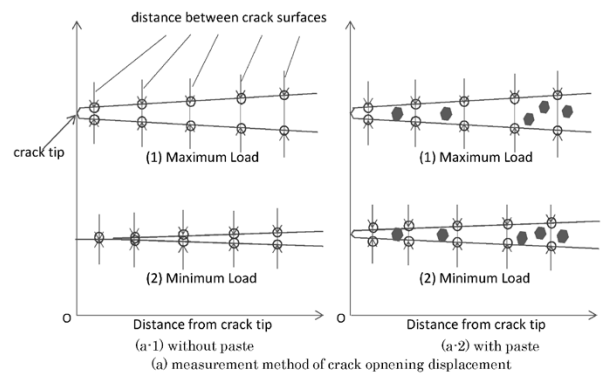
図4 パースト注入によるヒステリシスループの変化
($\Delta K=30.7\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $R=0.05$)

Fig. 4 Changes in the shapes of hysteresis loops by applying paste ($\Delta K=30.7\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $R=0.05$)

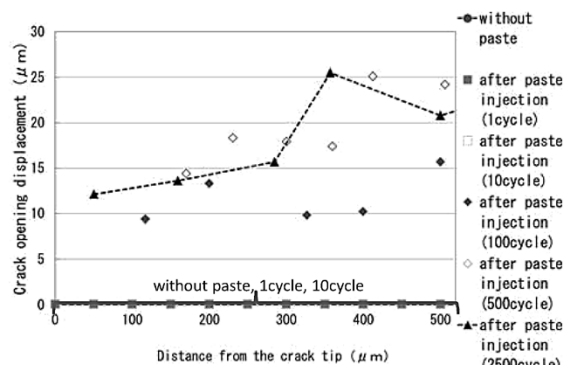
形関係にあり、その勾配はき裂がない場合の弾性係数と一致する。曲線②③は、き裂が閉じた状態から開口していく過程であり、点③でき裂先端まで開口する。③④では、き裂が完全に開口しているため荷重-ひずみは再び線形関係となっている。荷重が低下する除荷過程では、④⑤はき裂が完全に開口している範囲であり、⑤でき裂先端が閉じ、①まで閉じた状態にある。

ペーストを適用しない試験結果 (図の破線) を見ると、荷重-背面ひずみの関係はほぼ線形であり、き裂は最小荷重近傍でのみ閉じている可能性はあるが、ほぼ全荷重範囲で開口している状態となっている。一方、ペーストを適用した試験では、除荷過程において途中までは荷重とひずみの変化は線形に近いが、荷重3.2kNより低荷重側では背面ひずみの変化が線形関係より小さい。このことから、ペーストを導入したことによって、き裂進展に対して有効な荷重範囲が小さくなること分かる。

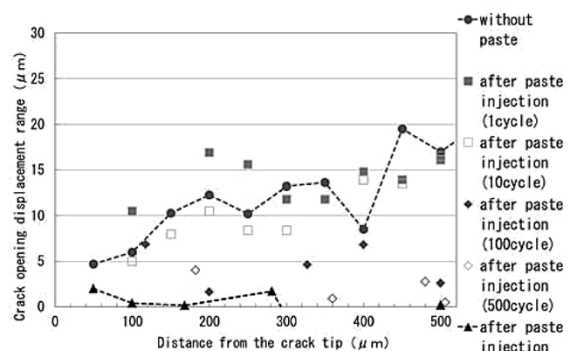
また、き裂進展速度と直接的に関係のあるき裂先端の開口変位 (1サイクル中の開口量の変化) に及ぼす微細粒の影響を調べた結果を図5に示す。図4と同様の疲労試験において、実体顕微鏡を用いてき裂先端近傍の状況をペースト封入前から封入後2500サイクルまで観察し、適宜動画撮影した。図5(a)には、き裂開口形状の計測に関する概念図を示す。撮影した動画から最大荷重時と最小荷重時の画像を切り出し、最大荷重時の画像よりき裂先端の位置を特定し、き裂先端近傍数箇所でのき裂面間の距離を測定した。なお、ペーストを注入した場合についても、き裂内に堆積したアルミナ粒子の寸法を差し引くことなく、き裂面間の距離を計測した。図5(b)



(b-1) 最大荷重時 (応力拡大係数 $K=32.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
(b-1) At maximum loading (stress intensity factor $K=32.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)



(b-2) 最小荷重時 (応力拡大係数 $K=1.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
(b-2) At minimum loading (stress intensity factor $K=1.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)



(b-3) 1サイクル中のき裂開口変位
(b-3) Net crack opening displacement ranges in 1 cycle

(b) き裂開口形状の測定結果
(b) Measurement result of crack opening shape.

図5 疲労き裂先端近傍の開口形状 ($\Delta K=30.7$, $R=0.05$)

Fig. 5 Crack opening shapes near crack tip. ($\Delta K=30.7$, $R=0.05$)

は測定結果であり (b-1) と (b-2) が、それぞれ最大荷重時と最小荷重時におけるき裂先端近傍の開口量である。(b-3) は、最大荷重時と最小荷重時の開口量を差し引いたものであり ((b-1)-(b-2)), 1サイクル中のき裂開口変位である。なお、ペースト注入後

100サイクル以降では、試験片表面にペーストがあふれ出したため定点測定を行うことが困難であった。このため、測定可能な位置で開口量を測定し、データを内挿することにより開口変位を算出した。測定結果より、(b-1)の最大荷重時はペーストの有無によらず同程度の開口量となっている。それに対して(b-2)と(b-3)は、試験開始から10サイクル後までは最小荷重時ではき裂が閉じた状態となっており、開口変位としてはき裂の先端から後方まで変動している状態にあることが分かった。これに対して、ペーストを適用後100サイクル以降では、(b-2)の最小荷重時の開口変位が(b-1)とほぼ同じ開口形状のままになっており、その結果、(b-3)の開口変位は変動がほとんどない状態である。これらのことから、開口したときにき裂内に進入した微細粒が、荷重の低下に伴うき裂の開口形状の変化を抑制して、1サイクル中のき裂先端の開口変位を小さくすることにより、き裂進展速度を低下させているものと考えられる。

なお、き裂の進展抑制効果を十分に引き出すためには、微細粒の寸法を適切に選択することが望ましいといえる。図6には、アルミナ粒径をパラメータとしてCT試験片を用いて得たき裂進展速度の調査結果を示す。き裂の進展速度はいずれのペーストを適用した場合でも低下しているが、平均粒径0.5~5 μm の場合に効果が大きくなっている。実際の鋼構造物への適用にあたっては、き裂の開口量が小さい場合から大きい場合まで、広い条件下で効果が発現できるように広い粒度分布を有するアルミナを使用することが望ましいと考えられる。つぎに、図7にS45C焼入れ焼戻し材における試験結果と、200 $^{\circ}\text{C}$ までの高温下でのSUS304鋼における試験結果を示す。いずれの結果においても疲労き裂の進展速度は1/10程度に低下しており、鋼種および環境温度が本技術の効果に与える影響は小さいものと推定される。最後に、図8は、当社工場内の大型の実構造物に適用した場合のき裂進展推移であり、ペーストを適用するまでは平均0.58mm/日(60日で35mm)の進展速度であったのに対して、適用後は平均0.06mm/日(48日で3mm進展)となっている。ペーストの適用によってき裂の進展ペースが1/10程度に低下し、計画されていた設備更新を行

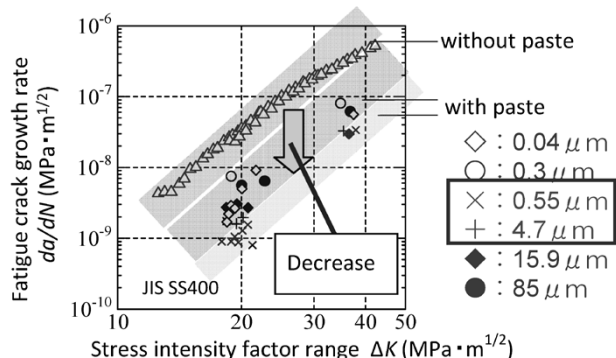


図6 疲労き裂進展試験の結果-1 (アルミナ粒径の影響)

Fig. 6 Results of Fatigue crack growth test -1 (effect of size of aluminum particles)

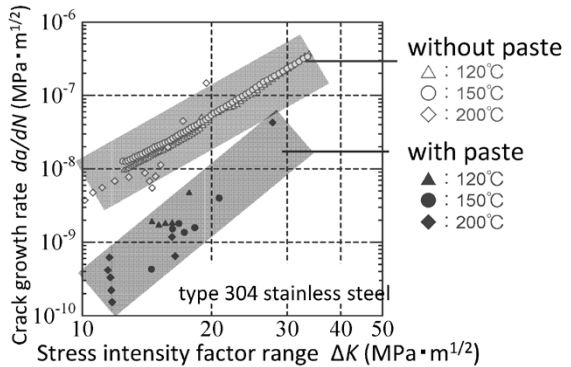
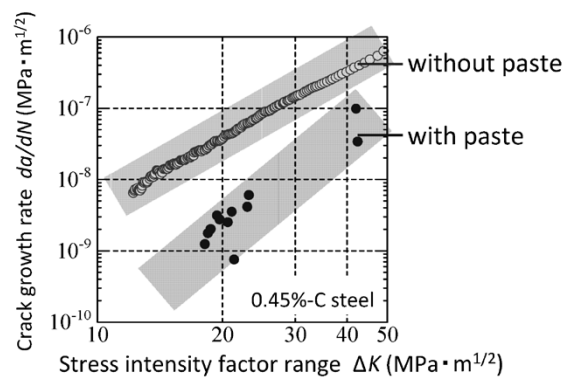


図7 疲労き裂進展試験の結果-2 (鋼種と環境温度の影響)

Fig. 7 Results of Fatigue crack growth test -2 (effect of steel grade and temperature)

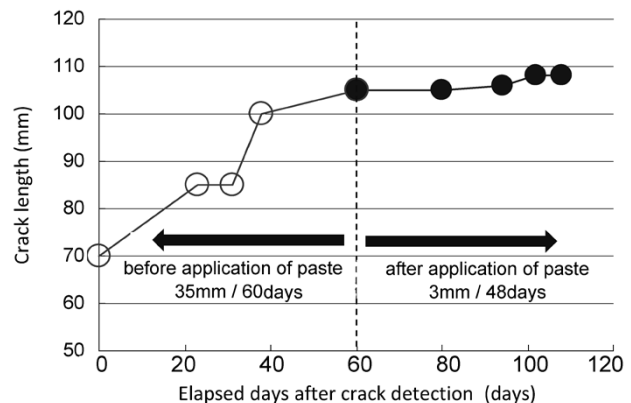


図8 実構造物に適用した場合の疲労き裂の進展推移

Fig. 8 Fatigue crack growth plots before and after application of aluminum paste in actual equipment

うタイミングまで延命しながら操業に供し続けることができた事例である。

むすび=疲労き裂進展抑制技術には、広く採用されている溶接補修と比べて、短時間の施工により疲労き裂の進展を遅らせることができるという特長がある。ただし、溶接補修と異なってき裂がなくなるわけではないことから、鋼構造物の保全体制に適切に組み込んで活用する必要がある。たとえば、図8の例のように、き裂の定期検査と組み合わせて活用し、き裂を発見した段階から補修・更新に至るまでの余寿命を長くとることができれば、有効な延命手段となり得ると考えられる。

一方、き裂の発生形態や応力条件によっては、施工方法を適切に選択する必要があることが分かっている⁶⁾。適用条件に応じて、技術の有効性および施工法を見極め

ることがポイントとなる。現在，従来確立されている設備保全体制に対しての当技術の効果的な組み込み方，ならびに，工場内のダストや湿度などのペーストの劣化要因となり得る雰囲気影響を除外できる施工方法を検討している。今後，実構造物での施工と効果検証を積み増しながら，老朽化した鋼構造物の保全技術として展開を進めていく所存である。

参 考 文 献

1) 城野政弘ほか. 疲労き裂. 大阪大学出版会, 2005, p.17-18.

- 2) H. Kitagawa et al. Proceedings of International Conference on Fracture Mechanics in Engineering Applications. 1979, p.281-293.
- 3) 高橋一比古ほか. 日本造船学会論文集. 1998, Vol.184, p.361-367.
- 4) 河本恭平ほか. 日本機械学会M&M2010材料力学カンファレンスCD-ROM論文集. 2010, p.359-360.
- 5) 大塚雄市ほか. 日本機械学会 2012年度年次大会講演論文集. 2012.
- 6) 佐藤 京ほか. 土木学会 第68回年次学術講演会講演概要集. 2013, I-560.