

亀裂を有する極薄ステンレス鋼板を用いた 疲労損傷度モニタリングセンサーの開発

公門 和樹¹・森 猛²・成 本 朝雄³・平山 繁幸⁴・阿部 允⁵

¹正会員 工修 株式会社ビーエムシー (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6WBGマリブウエスト25F)

²正会員 工博 法政大学工学部土木工学科教授 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

³正会員 工博 川鉄テクノリサーチ株式会社 (〒260-0835 千葉県千葉市中央区川崎町1)

⁴学生員 工修 法政大学大学院工学研究科建設工学専攻 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

⁵フェロー会員 株式会社ビーエムシー代表取締役 (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6WBGマリブウエスト25F)

鋼構造物の経年による損傷の多くは腐食と疲労に起因している。このうち疲労亀裂は、設計で想定している許容応力より低い応力でも発生する可能性があること、また一度発生すると急進性を伴うこともあり、非常に危険な損傷形態といえる。したがって、疲労による重大事故を未然に防ぐには、疲労亀裂を初期の段階で発見することが肝要である。本研究では、亀裂を有する極薄ステンレス鋼板を疲労損傷度モニタリングセンサーとして提案する。これは、構造部材が受けた応力範囲とその頻度を、センサーの亀裂進展量として検出し、構造部材の疲労損傷度をモニターするものである。これにより、疲労損傷に対する安全性確保のための合理的な維持管理支援を目指す。

Key Words : *fatigue damage, bridge, monitoring, sensor, crack propagation*

1. はじめに

(1) 開発の目的

鋼材は、高強度で軽量であり、延性に富み加工性も優れることから、規模の大小や構造形式を問わず橋梁材料として広く用いられている。また、リサイクル性に優れた材料でもある。しかし、コンクリート構造に比べ、変動荷重が荷重全体に占める割合が高くなるために疲労の影響を受けやすく、また塗装が劣化した場合に腐食の影響を受けやすいという特徴がある。

腐食については、適切な塗装を定期的に行うことで損傷の発生や進行を防ぐことができる。また、劣化速度自体も通常的环境下では緩慢であり、対策に緊急性を要することはほとんどないため、構造物を最終的な破壊に至らしめる恐れは低い。一方疲労については、断面設計に用いる許容応力以下の応力でも疲労亀裂が発生することがあるうえに、ある程度進行した段階で脆性破壊あるいは延性破壊に移行して構造物を破壊に至らしめる恐れもあるため、腐食

に比べて危険な損傷形態といえる。しかし、微小な疲労亀裂の発生が、部材や構造物全体の崩壊に直ちにつながることはなく、疲労亀裂が小さい段階で適切な対策を講じることにより、十分な安全性を確保することができる。したがって、疲労損傷による重大事故を防止するためには、定期的な検査を行い、疲労亀裂を微小な段階で検出することが肝要である。

鋼橋の検査は目視により行うのが通常であり、高度な専門知識と多くの経験が必要であるうえ、高所作業など危険を伴う場合も多い。詳細な検査を頻繁に行うことで疲労損傷が重大事故につながることを未然に防ぐことも考えられるが、疲労損傷の増加、技術者の不足や維持コストの高騰など、多くの問題が存在する。低コストでしかも容易に疲労損傷あるいはその可能性をモニターできれば、構造物の安全性を保ちつつ検査業務の効率化が図れるものと考えられる。その1つに犠牲試験片がある。犠牲試験片とは、疲労損傷が生じる危険性のある箇所にあらかじめ貼付し、構造物本体に先行して損傷する試験片である。すなわち、構造物と同じ環境下で、先に損傷

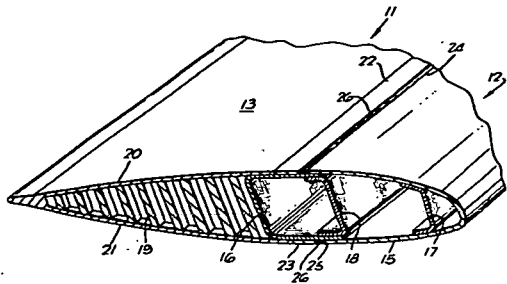


図-1 Westらの疲労損傷監視装置
(図中の25と26がセンサー)

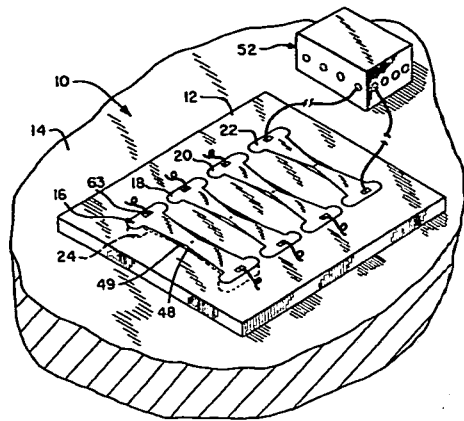


図-2 Perezらの疲労試験方法
(図中の16,18,20,22がセンサー)

する犠牲試験片の様子を観察することで、構造物に将来生じる損傷を予測しようとするものである。

疲労破壊が生じるか否かは、応力の変動範囲（応力範囲）とその頻度に依存する。そのため、応力範囲の大きさと頻度を実橋で計測することもなされている。そこでは、着目部にひずみゲージを貼付し、その出力をヒストグラムレコーダで解析することにより、応力範囲の大きさと頻度が測定される。これを用いることにより、2章(3)項で示す疲労損傷度を求めることができる。

応力範囲頻度分布を用いた疲労評価では、頻度測定に用いるヒストグラムレコーダの他、それを駆動するための電源も必要となる。また、ある期間の頻度測定結果をもとに疲労評価を行う場合には、長期的な応力範囲頻度分布との関係が明らかでなければならない。道路橋のように荷重の長期的な変動が無視できない場合には、継続的に数多くの橋を対象に診断するのは困難なのが現状である。

著者らは、このような問題を解決するために、亀裂を有する極薄ステンレス鋼板を実橋に貼り付け、亀裂の進展量で応力範囲とその頻度を計測できないかと考えた。ここでは、これを疲労損傷度モニタリングセンサーと呼ぶ。このセンサーの特徴は、構造物材に生じる疲労亀裂を直接検知するのではなく、センサー内の亀裂の進展量から構造物材の応力範囲とその頻度を検知し、部材の疲労損傷度を予測することにある。したがって、センサーの実用化にあたっては応力範囲とその頻度と、センサーの亀裂進展量の関係を定量的に明らかにする必要がある。

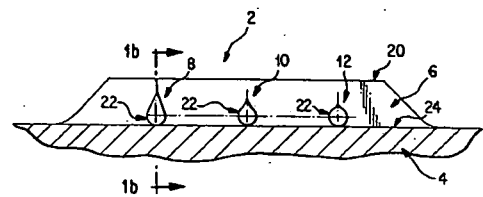


図-3 Füssingerらの疲労強度モニター装置
(センサー本体は20で、そこに設けた欠陥8,10,12が順に破壊起点になる)

国の特許を2001年7月に調査した。図-1は、Westらが考案したヘリコプターのローターブレードの疲労亀裂を監視する装置である。ヘリコプターのローターブレードの組み立て溶接部に沿って塗料を封入した管を貼付することで、ローターブレード本体に発生した疲労亀裂とその部位を、亀裂によって破断した管から出る塗料で監視するものである。塗料を封入した管をあらかじめ疲労亀裂の発生が想定される部位に確実に設置しなければならないが、溶接線上の疲労亀裂の監視には有効な手段であると思われる。

図-2は、Perezらの考案した複数の犠牲試験片を埋め込んだ疲労センサーである。形状の異なる犠牲試験片を構造物に埋め込み、繰返し荷重により破断していく犠牲試験片の本数をモニターすることで、構造物の受けている疲労損傷を診断しようというものである。図-3は、Füssingerらの考案した構造物の疲労損傷をモニターする装置である。疲労強度に対応した欠陥をセンサーに組み込み、構造物に貼付することで、構造物の疲労損傷をモニターするものである。

(2) 海外のセンサーの事例(米国における特許の例)

疲労損傷を検知するためのセンサーについて、米

(3) 国内のセンサーの事例

国内でも、疲労損傷を検知するセンサーについての研究が行われている。藤本ら¹⁾は、犠牲試験片によ

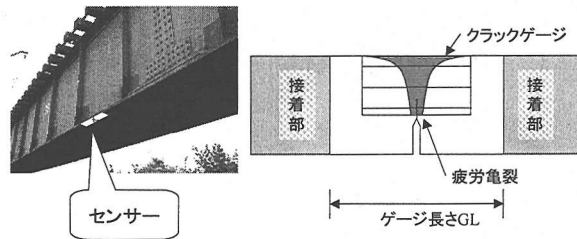


図-4 提案する疲労損傷モニタリングセンサーの概要

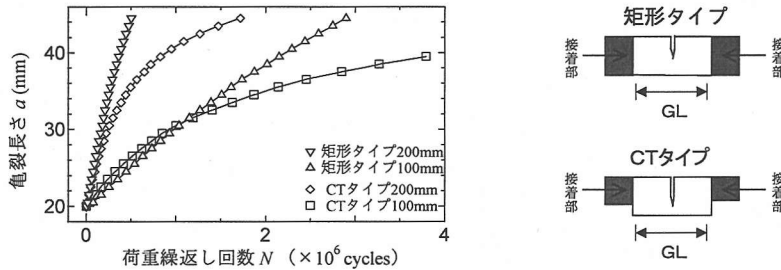


図-5 疲労亀裂進展試験結果（応力範囲 100N/mm²、センサー形状の比較）

り構造物の疲労損傷を予測する研究を行っている。これは、あらかじめ切欠きを導入した犠牲試験片を亀裂の発生が予測される継手部の近傍に貼付し、犠牲試験片内の切欠きからの亀裂進展量で、着目する継手部からの亀裂発生を監視するものである。犠牲試験片の切欠き先端での応力集中係数を、着目する継手部の応力集中係数よりも高くすることで、継手部よりも犠牲試験片内の亀裂発生が早期に生じるようにし、着目継手部の疲労損傷予測を可能としている。仁瓶ら²⁾は、ベース材にスリット入りのニッケル箔を蒸着したセンサーにより、船舶の疲労損傷を推定する研究を行っている。部材が疲労破壊する前に、センサーにあらかじめ設けたスリットから亀裂を発生させ、部材の疲労損傷を推定するものである。崎野ら³⁾は、橋梁部材が受ける累積疲労を、犠牲試験片の亀裂進展で監視することの可能性について検討している。犠牲試験片の亀裂進展量から、部材の受けた累積疲労を推定しようというもので、この考え方は著者らの考案したセンサーと同じである。

これらのセンサーは、いずれも構造部材が受ける疲労損傷をセンサー内の亀裂の発生や進展量から推定しようとするものである。センサーの亀裂進展量と疲労損傷度の関係については実験から求めることとされている。

(4) 著者らのこれまでの研究成果と本研究の目的

図-4は著者らの考案したセンサーの概要である。

センサーは接着剤で構造部材に貼り付けられる。センサーにはあらかじめ疲労亀裂を設けており、構造部材が受ける応力変動によってセンサー内の亀裂が進展していく。この亀裂の進展量から構造部材の疲労損傷度を推定しようとするものである。著者らは疲労試験を実施し、センサーの形状および材質について検討してきた。図-5はセンサーの形状について検討した結果である。センサーは板厚0.5mmのステンレス鋼の薄板で、矩形のセンサーと、CT試験片を模したCT型センサーについて疲労試験を行っている。その結果、矩形のセンサーはCT型のセンサーに比べ、亀裂進展量と荷重繰返し数の関係に線形性があり、センサーとして優れた特性を有することを明らかにしている⁴⁾。このようなセンサーの特性に基づき、また作業性を考慮し、矩形で、材質をステンレス鋼とした薄板をセンサーとして提案している⁴⁾。著者らは、矩形センサーの亀裂進展量と荷重繰返し数の線形関係は、センサーの亀裂先端の応力拡大係数が亀裂長さに依存しない変位拘束型引張モデルで表すことができるためではないかと考え、それを用いてセンサーの疲労亀裂進展速度を整理している⁵⁾。また、疲労試験の結果から、センサーには亀裂進展を安定させるため切欠先端に疲労亀裂をあらかじめ導入するとともに、応力履歴の影響が生じないように応力除去焼鈍処理を施す工夫がなされている⁵⁾。写真-1はセンサーを設置する様子を示している。ヒーター付きの専用治具を用いてセンサーを設置することで

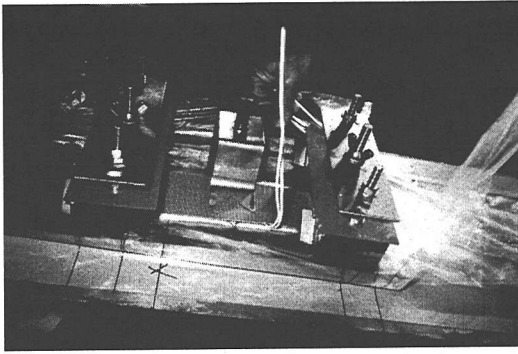


写真-1 センサー設置の様子

取付のための接着剤の硬化を促進させるとともに、センサーと構造物に温度差を与え、センサー内に引張の残留応力を導入している。これにより、疲労亀裂進展の応力比依存性をなくし、安定した感度を得るとともに、作業性の向上と作業の標準化を図っている⁶⁾。

本研究では、著者らの研究成果をもとに、センサー内の亀裂の進展量と、モニターする部材の疲労損傷度の関係を理論的、定量的に明らかにし、評価手法を具体化するとともに、センサーの適用範囲と精度について検討する。

2. 疲労損傷度モニタリングセンサーの原理

(1) センサーの概要

疲労損傷度モニタリングセンサーは、従来のヒストグラムレコーダによる応力範囲頻度測定に代わり、構造物の疲労損傷度をセンサーの亀裂進展として収録し、疲労診断を定量的に行おうとするものである。すなわち、図-6に示すような亀裂を有する極薄のステンレス鋼板の両端を橋梁のフランジ等に接着剤で貼付し、センサー内の亀裂の伸びを観察する。本センサーは、亀裂進展という非可逆現象で応力履歴をとらえることから、コストが低く、また記録に電力を使う特別な装置も必要としないことから、橋梁モニタリングに適していると考えられる。

(2) センサーの応力拡大係数と疲労亀裂進展速度

本センサーは非常に薄く、構造物に作用する応力をほとんど分担しないため、図-7に示すように両端を構造物に固定した変位制御型の挙動を示すものと考えられる。長さ $2H$ 間で変位制御下にある幅広の板に、長さ a の亀裂が存在する場合、応力拡大係数 K は亀裂長さによらず次式で表される⁷⁾。

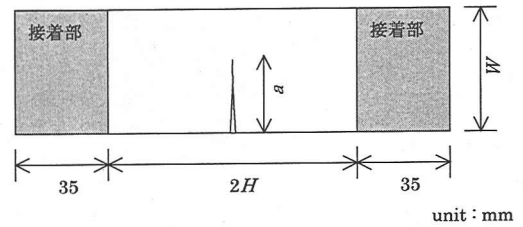


図-6 センサーの形状

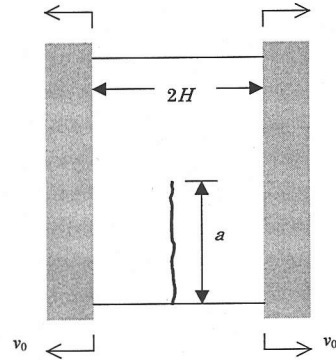


図-7 帯板の変位拘束型引張モデル

$$K = E \cdot v_0 / \sqrt{H} = \sigma \sqrt{H} \quad (1)$$

ここで、 E : ヤング率

v_0 : 制御方向の変位量

H : 固定間長さの半分

σ : 公称応力

国際溶接協会 (IIW) の疲労設計指針では、鋼材の疲労亀裂進展速度 da/dN を式(2)で与えている⁸⁾。

$$\begin{aligned} da/dN &= 3.0 \times 10^{-13} (\Delta K)^3 & \Delta K \geq \Delta K_{th} \\ da/dN &= 0 & \Delta K \leq \Delta K_{th} \end{aligned} \quad (2)$$

da/dN : (mm/cycle) ΔK : (N/mm^{3/2})
 ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲

亀裂進展速度は亀裂先端の応力場ではなく、ひずみ場に依存するという考え方もあり、 ΔK の代わりに $\Delta K/E$ をヤング率 E で除した $\Delta K/E$ で整理されることもある。 $\Delta K/E$ はひずみ拡大係数範囲と呼ばれている。ひずみ拡大係数範囲が基本疲労亀裂進展特性を支配しているとの考えに基づき、これを用いて様々な金属材料の進展速度を同一の式で表現できると考えられている⁹⁾。本センサーの疲労亀裂進展速度もこれに従うとし、センサーを貼付する鋼材のヤング率を

$E_{stl}(2.06 \times 10^6 \text{N/mm}^2)$, センサーのヤング率を E_{sen} , これらの比(E_{sen}/E_{stl})をヤング率比 R_E とおけば, センサーの疲労亀裂進展速度表示式は式(3)で与えられる.

$$\begin{aligned} da/dN &= (3.0 \times 10^{-13}/R_E^3) \cdot (\Delta K)^3 & (3) \\ da/dN : (\text{mm/cycle}) \quad \Delta K : (\text{N/mm}^{3/2}) \end{aligned}$$

本センサーを鋼材表面に貼付した場合のような変位拘束型の応力拡大係数範囲は, 式(4)で与えられる.

$$\begin{aligned} \Delta K &= \Delta \sigma_{sen} \sqrt{H} = \Delta \sigma_{stl} (E_{sen}/E_{stl}) \sqrt{H} \\ &= R_E \Delta \sigma_{stl} \sqrt{H} & (4) \end{aligned}$$

$\Delta \sigma_{sen}$: センサーに生じる応力範囲(N/mm²)

$\Delta \sigma_{stl}$: 鋼材に生じる応力範囲(N/mm²)

E_{sen} : センサーのヤング率(N/mm²)

E_{stl} : 鋼材のヤング率(N/mm²)

H : 固定間長さの半分(mm)

式(4)を式(3)に代入すると, センサーの疲労亀裂進展速度は次のようになる.

$$\begin{aligned} da/dN &= (3.0 \times 10^{-13}/R_E^3) (R_E \Delta \sigma_{stl} \sqrt{H})^3 \\ &= 3.0 \times 10^{-13} (\Delta \sigma_{stl} \sqrt{H})^3 & (5) \end{aligned}$$

したがって, 亀裂進展速度が亀裂先端のひずみ場に依存すると考えられる金属材料をセンサーに用いれば, センサーの材質に関係なく, 鋼材に生じる応力範囲と鋼材の疲労亀裂進展速度表示式から, センサーの疲労亀裂進展速度を求めることができる.

(3) センサーの疲労亀裂進展と疲労損傷度の関係

疲労寿命は, 対象部位に生じる応力範囲の大きさに依存することから, 日本鋼構造協会 (JSSC) の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」(以後JSSC指針と呼ぶ) では応力範囲と疲労寿命の関係 (疲労設計曲線) を次式のように与えている¹⁰⁾.

$$\Delta \sigma^3 \cdot N = C_0 & (6)$$

ここで, $\Delta \sigma$: 応力範囲

N : 疲労寿命

C_0 : 疲労強度等級を表すための定数

そして, 種々の継手の疲労強度を表すために, AからHの8つの強度等級を定義し, それぞれに対して図-8に示す疲労設計曲線を与えている.

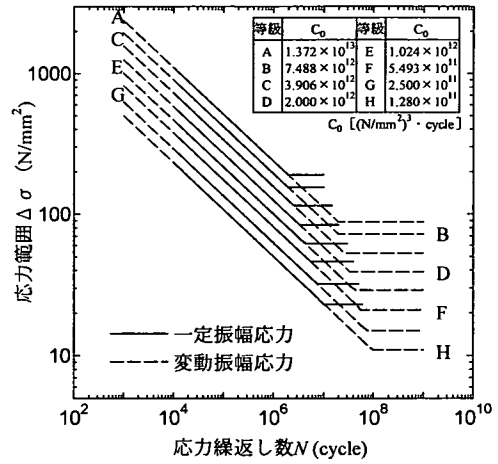


図-8 JSSC 指針の疲労設計曲線

変動振幅を受ける継手の疲労評価は, 一般に線形累積被害則あるいはマイナー則と呼ばれる方法で行われる. そこでは, 変動振幅応力にレインフロー法などの応力範囲計数法を適用し, 応力範囲の頻度分布を求める. 応力範囲頻度分布を構成する応力範囲成分 $\Delta \sigma_i$ のみが作用した場合の疲労寿命を N_i とし, $\Delta \sigma_i$ の頻度を n_i とすると, そのときの損傷比 D_i は式(7)で与えられる.

$$D_i = (n_i/N_i) & (7)$$

式(7)に式(6)を代入し, すべての応力範囲成分を考慮して累積損傷比 D を計算すると, 式(8)が得られる.

$$D = \sum D_i = \frac{\sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i)}{C_0} & (8)$$

そして, 累積損傷比 D が1となったときに疲労破壊が生じるとする. 解釈を変えれば, $\sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i)$ が C_0 に達したときに疲労破壊が生じるといえる. そのため, $\sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i)$ は疲労損傷度とも呼ばれており, これをモニターできれば, 疲労に対して構造部材がどのような状態にあるかを知ることができ, 検査の要否の判断に有用な情報となる.

式(5)より, センサー内の亀裂が a_0 から a_1 まで進展するのに必要な繰返し数 n は, 式(9)で与えられる.

$$\begin{aligned} n &= \int_{a_0}^{a_1} da / (3.0 \times 10^{-13} \cdot \Delta \sigma_{stl}^3 \cdot H^{3/2}) \\ &= (a_1 - a_0) / (3.0 \times 10^{-13} \cdot \Delta \sigma_{stl}^3 \cdot H^{3/2}) & (9) \end{aligned}$$

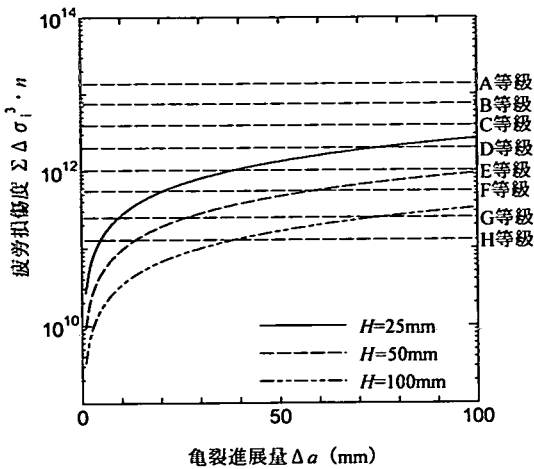


図-9 亀裂進展量と疲労損傷度との関係

これを亀裂進展量 $\Delta a (=a_1 - a_0)$ で整理すれば、式(10)が得られる。

$$\Delta a = 3.0 \times 10^{-13} \cdot H^{3/2} \cdot \Delta \sigma_{sl}^3 \cdot n \quad (10)$$

式(10)の右辺の $\Delta \sigma_{sl}^3 \cdot n$ が疲労損傷度である。したがって、この式でセンサーの亀裂進展量と疲労損傷度を関係づけることができる。

式(10)は、一定振幅応力について示したものであるが、変動振幅応力下においても修正マイナー則(応力範囲の打ち切り限界を0とする)を適用すれば、式(11)が得られる。

$$\Delta a = 3.0 \times 10^{-13} \cdot H^{3/2} \cdot \sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i) \quad (11)$$

変動振幅応力下の疲労亀裂進展については、応力履歴の影響を強く受けるとされている。しかし、このセンサーには、貼付時に温度差を利用して、高い残留応力を導入しており⁴⁾、このような高い引張残留応力場では応力履歴の影響は無視できるほど小さいことが実験的に確かめられている^{11), 12)}。

式(10)あるいは式(11)の関係をを用い、センサーの長さ H をパラメータとして、疲労損傷度とセンサーの亀裂進展量の関係について計算した結果を図-9に示す。センサーの固定間長さの半分 H は、25mm、50mm、100mmとして計算している。 $H=25$ mmのセンサーでは、亀裂が5mm進展すると強度等級Hに、9mm進展すると強度等級Gに相当する疲労損傷度が蓄積されたことになる。このようなセンサーの亀裂進展量と

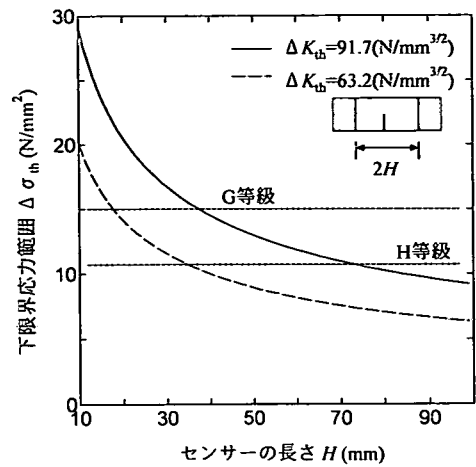


図-10 センサー長さ と下限界応力範囲の関係

疲労損傷度の関係を利用することで、合理的な検査時期の判断が可能になるものとする。

(4) センサー内の疲労亀裂が進展可能な応力範囲

式(2)に示すように、 ΔK が下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} 以下になると亀裂は進展を停止し、 $da/dN=0$ になることが知られている。IIW指針では、 ΔK_{th} を応力比 R を考慮した式(12)で求めることとしている。

$$\Delta K_{th} = 189.7 - 144.2 \cdot R \quad (12)$$

$$\Delta K_{th} : (\text{N/mm}^{3/2}) \quad \text{ただし} 63.3 \text{以上}$$

JSSC指針では、鋼材の疲労亀裂進展速度を示す最安全設計曲線で $\Delta K_{th}=63.3 \text{ N/mm}^{3/2}$ 、平均設計曲線で $\Delta K_{th}=91.7 \text{ N/mm}^{3/2}$ を用いることとしている。式(1)に示すとおり、センサーの応力拡大係数はゲージ長さ と応力範囲により与えられるので、所定の ΔK_{th} に対応するセンサーのゲージ長さ と亀裂が進展する下限界応力範囲 $\Delta \sigma_{th}$ (下限界応力拡大係数範囲に対応する応力範囲) の関係を求めることができる。その関係を示したのが図-10である。図中の実線は $\Delta K_{th}=91.7 \text{ N/mm}^{3/2}$ 、破線は $\Delta K_{th}=63.3 \text{ N/mm}^{3/2}$ とした場合の関係である。また、横に引いた点線はJSSC指針のGおよびH等級の継手の変動振幅応力下の応力範囲の打ち切り限界(疲労損傷に寄与しない応力範囲の限界値：それぞれ 15 N/mm^2 、 11 N/mm^2)である。 $H=50$ mmでは、 $\Delta K_{th}=91.7 \text{ N/mm}^{3/2}$ に対応する $\Delta \sigma_{th}$ が 13 N/mm^2 程度となっている。すなわち、センサーの応力範囲が 13 N/mm^2 程度までの応力履歴を検知することになり、疲労強度等級Gの継手に対しても危

陰側の評価を与えることはないといえる。また、ゲージ長さを調整することにより、所定の感度のセンサーを作成することも可能である。

3. センサーの応力拡大係数範囲

センサーを鋼材に貼付した状態を変位制御にモデル化したとき、応力拡大係数は式(1)のように与えられる。ただし、この式は固定間長さに対して幅が無限であるという仮定のもとに得られたものである。ここでは、有限要素法とエネルギー法を利用して応力拡大係数の解析を行い、式(1)の適用範囲について検討する。

(1) 解析対象

解析対象は図-7に示した形状のステンレス鋼板である。解析では、センサーの中央、切欠部から亀裂が進展することを想定した。センサーの幅 W と固定間長さ $2H$ を表-1に示すように変化させ、4つのモデルを作成した。

(2) 解析方法

解析には有限要素法解析ソフト(POPLAS/FEM5)を用いた。センサーの公称応力が 100N/mm^2 となるようにセンサーの長さ方向に強制変位を与え、拘束点の節点反力を求めた。要素寸法はセンサーの幅の $1/100$ とした。これは、予備的な解析から、応力拡大係数の算出精度について検討した結果に基づいて設定したものである。ステンレス鋼の一般的な機械的性質を参考にして、センサーのヤング率を $1.97 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比を 0.24 とした。解析は、センサーが 0.5mm と薄いことを考慮して平面応力条件下で行った。対称性を考慮して $1/2$ モデルを対象とし、亀裂の進展は対称面の節点拘束を解放することにより模擬した。

亀裂長さが a から δa だけ進展したとき、つまり $a + \delta a/2$ での応力拡大係数 K は以下の手順で求めた¹³⁾。まず、強制変位を与えた節点の変位量と反力から、亀裂長さ a でのひずみエネルギー $U(a)$ を求める。

表-1 解析モデルの幅と長さの組み合わせ

幅 $W(\text{mm})$	長さ $H(\text{mm})$
50	25
50	50
50	100
100	100

$$U(a) = \sum \frac{1}{2} P_i \cdot \Delta_i \quad (13)$$

P_i : 節点反力
 Δ_i : 強制変位

ただし解析モデルは $1/2$ モデルとしているので、強制変位を2倍している。同様に亀裂長さ $a + \delta a$ でのひずみエネルギー $U(a + \delta a)$ を求める。亀裂が δa 進展したことによるエネルギー解放率 g は、式(14)から求められる。

$$g = \frac{U(a + \delta a) - U(a)}{\delta a} \quad (14)$$

応力拡大係数は、平面応力下におけるエネルギー解放率との関係を利用し、式(15)より求める。

$$K = \sqrt{Eg} \quad (15)$$

E : ヤング率

(3) 解析結果

図-11は $W=50\text{mm}$ で一定として、 $H=25, 50, 100\text{mm}$ と変化させた場合のセンサーの応力拡大係数と亀裂長さの関係と比較したものである。式(1)から当然のことではあるが、 H が大きい場合ほど応力拡大係数は大きくなっている。また H が小さいほど、応力拡大係数がほぼ一定となる亀裂長さの領域が広がっている。

図-12はセンサーの幅が応力拡大係数に及ぼす影響を調べるために、 $H=100\text{mm}$ として、 $W=50\text{mm}$ と $W=100\text{mm}$ の応力拡大係数と W で無次元化した亀裂長さ a/W の関係を比較したものである。 $W=50\text{mm}$ に比べ、 $W=100\text{mm}$ で応力拡大係数がほぼ一様となる a/W の領域が広がっている。

図-13は $W=50\text{mm}$ とした3つのモデルの応力拡大係数解析より得られた ΔK を、式(1)から求められる $\Delta K(\Delta \sigma \sqrt{H})$ で無次元化した $\Delta K/\Delta \sigma \sqrt{H}$ と、亀裂長さ a の関係を示したものである。この値がほぼ1となれば、応力拡大係数範囲を近似的に $\Delta \sigma \sqrt{H}$ で求めてよいといえる。

図-14は、 $H/W=1$ の2つのモデル($H=W=50\text{mm}, 100\text{mm}$)の $\Delta K/\Delta \sigma \sqrt{H}$ と、センサーの幅で無次元化した亀裂長さ a/W の関係を比較したものである。両者の関係は一致しており相似則が成り立つと言える。

以上より、幅広の短いセンサーを用いれば、 ΔK を $\Delta \sigma \sqrt{H}$ から求められる亀裂長さの領域を広く取

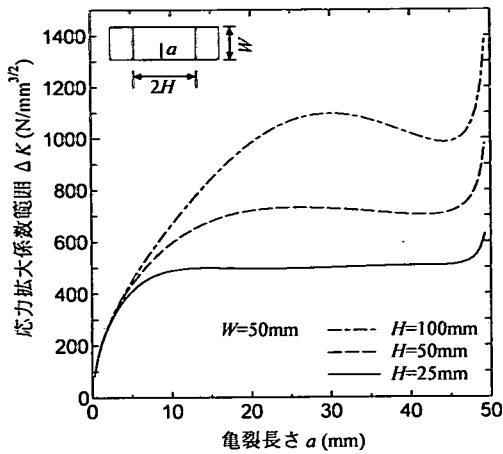


図-11 応力拡大係数解析結果（長さの影響）

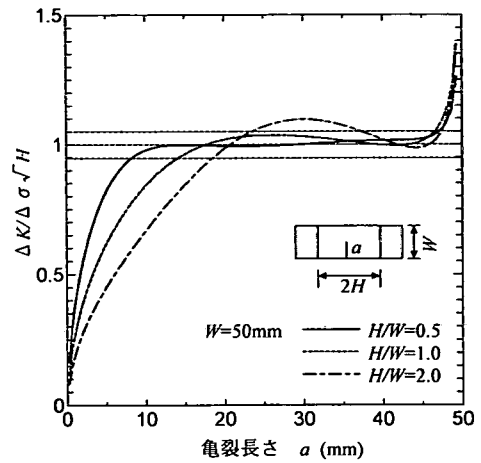


図-13 応力拡大係数解析結果（適用範囲）

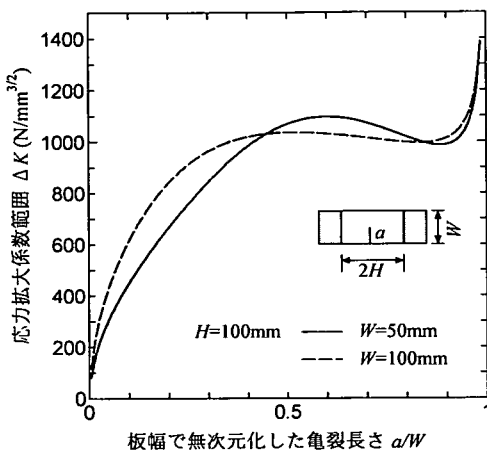


図-12 応力拡大係数解析結果（幅の影響）

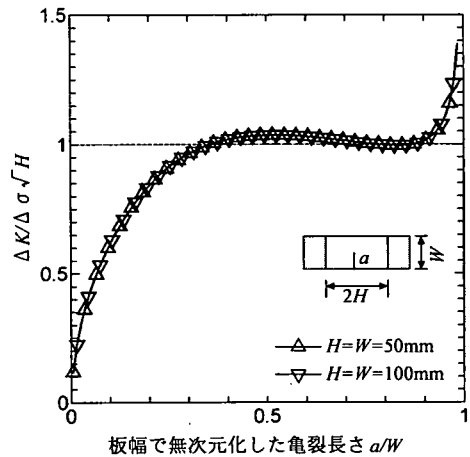


図-14 応力拡大係数解析結果（相似則の確認）

ることができる。すなわち $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{H}$ が成立する範囲は H/W に依存し、その値が小さいほど広がる。また、 H/W が同じであれば、 $\Delta K / \Delta \sigma \sqrt{H} - a/W$ 関係は H や W によらない。図-13に示した3つのモデルの中では、 $H=25\text{mm} \cdot W=50\text{mm}$ ($H/W=0.5$) のモデルで $\Delta K / \Delta \sigma \sqrt{H}$ がほぼ1となる領域が最も広く、亀裂長さ11~40mm ($a/W=0.22 \sim 0.80$) の範囲で $\Delta \sigma \sqrt{H}$ から求めた ΔK は、解析より求めた ΔK とほぼ一致しており、その誤差は1.5%以下にすぎない。5%までの誤差を認めるとすれば、 $H=25\text{mm}$ ($H/W=0.5$) では亀裂長さが9~47mm ($a/W=0.18 \sim 0.94$)、 $H=50\text{mm}$ ($H/W=1.0$) では14~46mm ($a/W=0.28 \sim 0.92$) で亀裂進展量測定が有効となる。式(1)の適用範囲をある程度以上確保することを考えると、 H/W は小さい方が望ましいといえる。

4. センサーの変位制御状態の確認

(1) 試験方法

疲労損傷度モニタリングセンサーの変位制御状態を確認するために、亀裂進展に伴うセンサー表面でのひずみの変化を調べた。試験に用いたセンサーの形状・寸法は図-15に示すとおりである。材質はステンレス鋼で板厚0.5mm、接着部の長さはそれぞれ35mmである。センサー中央部を切欠加工してその先端に疲労亀裂を導入した後、応力除去焼鈍処理を施して疲労亀裂進展に対する予亀裂導入時の応力の影響が生じないようにしている。試験を行う際には、図-16のように鋼材の表面にセンサーを貼り付けている。鋼構造部材を想定してセンサーを貼付した鋼材は板厚19mmの溶接構造用圧延鋼材SM490YBであ

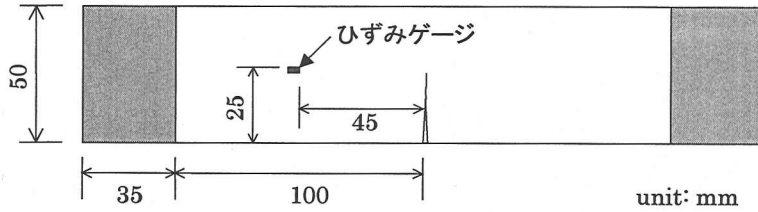


図-15 ひずみゲージ貼付位置

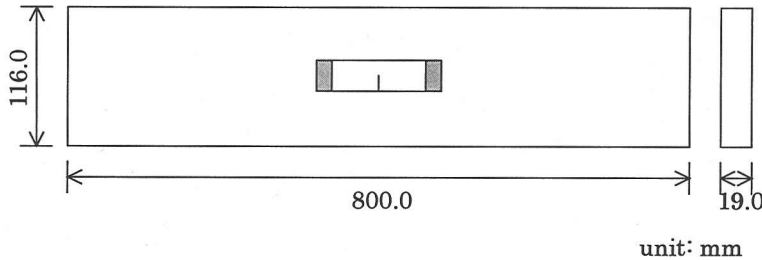


図-16 試験体の形状と寸法

る。センサーの幅と長さは、 $W=50\text{mm}$ 、 $2H=200\text{mm}$ としている。センサーは鋼材の黒皮を除去し、貼付面を研磨したうえで、エポキシ樹脂接着剤で接着した。センサーはヒーターで 70°C 程度に加熱しながらマグネットスタンドで固定し接着している。これは接着剤の硬化を促すとともに、先述のようにセンサーに引張残留応力を導入するためである。センサー表面には図-15に示す位置にひずみゲージを貼付し、センサーの亀裂進展に伴う最大荷重時のひずみ変化を測定した。なお、最大荷重は鋼材の公称ひずみが 500μ となるように設定した。

(2) 試験結果

亀裂進展に伴う最大荷重時のひずみ変化の測定結果を図-17に示す。図中には同センサーを対象として、有限要素応力解析により求めた荷重一定条件下あるいは変位一定条件下で求めたひずみ-亀裂長さ関係も示している。解析方法は、前章で示したのと同じである。図中の実線は変位制御条件下の解析結果、点線は荷重制御条件下の解析結果である。ひずみ測定結果は変位制御の解析結果とほぼ一致しており、センサーは変位制御型の挙動をしていると言える。

5. センサーの疲労亀裂進展速度

(1) 試験方法

試験に供したセンサーは3体で、4章で用いたも

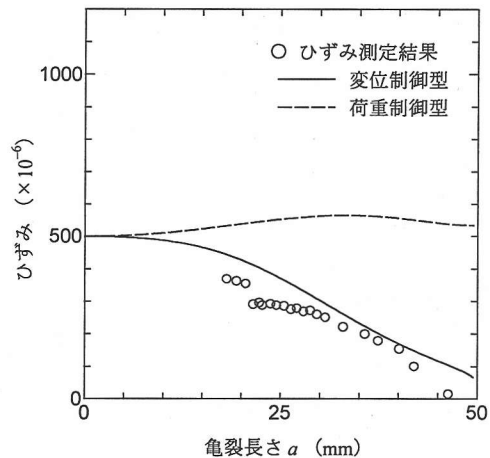


図-17 ひずみと亀裂長さの関係

のと同じである。疲労試験は動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて行った。疲労試験の様子を写真-2に示す。荷重波形は正弦波で、繰返し速度は $10\sim 20\text{Hz}$ とした。亀裂長さの測定には、測定精度 0.01mm の読み取り顕微鏡とデジタルマイクロスコープ($\times 100$)を用いた。疲労亀裂進展試験は、疲労亀裂進展の限界値である下限応力拡大係数近傍の疲労亀裂進展特性も明らかにする目的で、下限荷重を一定とし、亀裂が約 0.25mm 程度進展するごとに5%ずつ荷重範囲を減少させる荷重範囲漸減条件下で行った。なお、下限荷重はほぼ0としている。

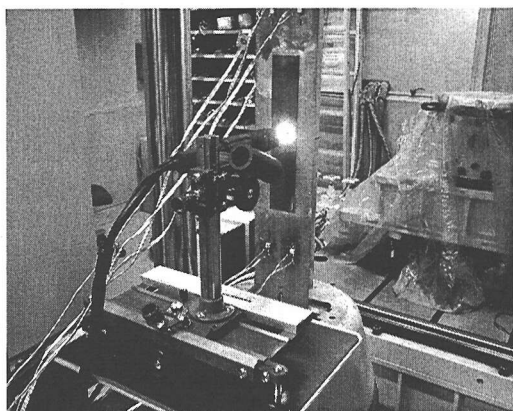


写真-2 疲労試験の様子

(2) 試験結果

図-18は疲労亀裂進展試験結果である。前述のように、ここでは3体の試験片を用いているが、図中のマークは試験体により変えている。図の縦軸は疲労亀裂進展速度 da/dN 、横軸は応力拡大係数範囲 ΔK である。なお、ここでの ΔK はエネルギー法で求めたものである。疲労亀裂進展速度 da/dN は、亀裂が Δa 成長するのに要した繰返し数を Δn とした場合、 $da/dN = \Delta a / \Delta n$ として求めている。図中の実線は、式(4)で示しているIIWの鋼材の疲労亀裂進展速度表示式で、破線はJSSC指針の平均疲労設計曲線である。センサーの亀裂進展速度は鋼材に比べ若干低くなっているものの、その差は小さい。また、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} もJSSC指針とほぼ一致している。したがって、センサーの疲労亀裂進展速度は鋼材の疲労亀裂進展速度表示式を用いて求められるといえる。

6. まとめ

亀裂を有する極薄ステンレス鋼板を構造部材に貼付し、亀裂の進展で構造部材に蓄積される疲労損傷度を測定しようとする疲労損傷度モニタリングセンサーについて、亀裂の進展量と疲労損傷度の関係ならびにセンサーの適用範囲と精度について検討し、以下の結果を得た。

1. センサーの亀裂進展量 Δa と疲労損傷度 $\Delta \sigma^3 \cdot N$ の関係は次式で与えられる。

$$\Delta a = 3.0 \times 10^{-13} \cdot H^{3/2} \cdot \Delta \sigma^3 \cdot N$$

Δa : センサーの亀裂の伸び(mm)

H : センサーの固定間長さの半分(mm)

$\Delta \sigma$: 応力範囲(N/mm²)

N : 応力の繰返し数(cycle)

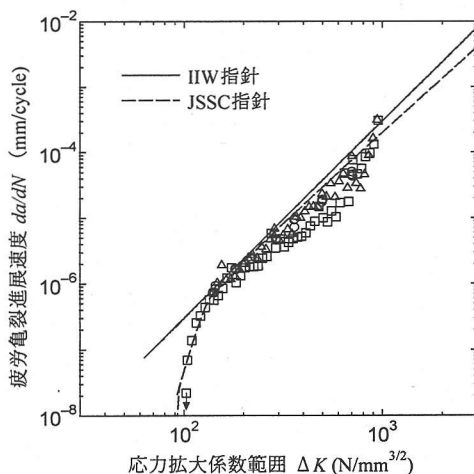


図-18 da/dN - ΔK 関係

2. 変位制御条件下で解析した亀裂進展に伴うセンサー表面のひずみの変化と、疲労亀裂進展試験において測定したひずみの変化はほぼ一致したが、センサーは変位制御型の挙動をするとと言える。
3. 応力拡大係数範囲が $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{H}$ で与えられる領域は H/W に依存し、 H/W が小さいほど広い。また H/W が同じであれば、 $\Delta K / \Delta \sigma \sqrt{H} = a/W$ 関係は H や W によらない。たとえば ΔK の $\Delta \sigma \sqrt{H}$ に対する誤差を5%まで認めれば、 $H/W=0.5$ では、 $a/W=0.18 \sim 0.94$ の範囲で測定が有効である。
4. センサーの疲労亀裂進展速度は、鋼材に対して与えられている亀裂進展速度表示式を用いて算出できることを疲労試験により確かめた。
5. センサーの応力拡大係数範囲は $\Delta \sigma$ と H に依存するので、 H を調節することで継手の疲労強度等級に対応した感度を設定することができる。またセンサーの亀裂進展の下限界応力範囲から H を調節すれば、任意の応力範囲の打ち切り限界を設定することができる。

謝辞：疲労亀裂進展試験の準備と実施には、法政大学工学部土木工学科の技術嘱託であった長橋巨通氏に協力を頂いた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 新宅英司: 犠牲試験片を用いた溶接構造物の応力および損傷モニタリング, 溶接構造シンポジウム'99講演論文集, pp.611-618, 1999.
- 2) 仁瓶寛太, 村上彰男, 西村五郎, 尾野英夫, 小林朋平, 公江茂樹: 既存船の疲労損傷度推定に関する研究一疲

- 労センサーの研究一、関西造船協会春期講演会論文集、pp.189-190, 2000.
- 3) 田口達也, 堀川浩甫, 崎野良比呂: 橋梁部材に働く累積疲労荷重の犠牲試験片によるモニタリング, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第1部(A), pp.418-419, 1999.
 - 4) 阿部允, 伊藤裕一, 三木千壽, 杉館政雄, 成本朝雄: モニタリングセンサーの定ひずみ試験におけるき裂の進展性, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第1部(A), pp.376-377, 1998.
 - 5) 公門和樹, 阿部允, 杉館政雄, 成本朝雄, 三木千壽: 疲労損傷モニタリングセンサーの開発, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第1部(A), pp.416-417, 1999.
 - 6) 公門和樹, 阿部允, 成本朝雄, 杉館政雄, 三木千壽: 活荷重履歴モニタリングセンサーの開発, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 第7巻, pp.189-194, 1999.
 - 7) 岡本弘之: 線形破壊力学入門, 培風館, p.219, 1997.
 - 8) 国際溶接協会(溶接疲労強度研究委員会訳): 溶接構造の疲労設計, 溶接学会, p.62, 1999.
 - 9) 太田昭彦, 廻俊夫, 鈴木直之: 基本疲労亀裂伝播特性に及ぼすヤング率の影響, 溶接学会全国大会大会講演概要第47集, pp.362-363, 1990.
 - 10) 日本鋼構造協会: 構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, pp.5-6, p.53, 1993.
 - 11) 榊原淳, 堀川浩甫: 溶接引張残留応力場における繰返し変動荷重下の疲労き裂伝播挙動(低 ΔK 領域において), 溶接学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.715-722, 1986.
 - 12) 三木千壽, 村越潤, 坂野昌弘: 道路橋における疲労亀裂進展, 土木学会論文集, No.386/I-8, pp.155-164, 1987.
 - 13) 矢川元基: 破壊力学, 培風館, pp.11-36, 1990.

(2002.10.30受付)

DEVELOPMENT OF FATIGUE DAMAGE MONITORING SENSOR USING CRACK PROPAGATION IN THIN STAINLESS PLATE

Kazuki KOMON, Takeshi MORI, Asao NARUMOTO,
Shigeyuki HIRAYAMA and Makoto ABE

If fatigue damage or its possibility can be estimated easily and economically, the efficiency of maintenance inspection for steel bridges is considered to be drastically advanced. For this purpose, a system in which thin stainless steel with a crack is stuck on a bridge to measure crack propagation and the cumulative amount of fatigue damage has been developed. In this study the quantitative relationship between an amount of crack propagation and the fatigue damage has been made clear, and the applicability of the fatigue damage monitoring sensor and its accuracy have been examined through an analysis of stress intensity factor range and a fatigue crack propagation test.