

# 疲労損傷度モニタリングセンサーの高感度化

森 猛<sup>1</sup>・公門 和樹<sup>2</sup>・小高 弘行<sup>3</sup>・成木 朝雄<sup>4</sup>・阿部 允<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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)

E-mail:mori@k.hosei.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)ピーエムシー (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6WBGマリブウェスト25F)

<sup>3</sup>学生員 法政大学大学院工学研究科建設工学専攻博士前期課程 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

<sup>4</sup>正会員 工博 川鉄テクノリサーチ(株) (〒260-0835 千葉県千葉市中央区川崎町1)

<sup>5</sup>フェロー会員 (株)ピーエムシー代表取締役 (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6WBGマリブウェスト25F)

著者らは、疲労損傷を対象とした点検・検査の効率化を図る目的で、応力範囲とその頻度からなる疲労損傷度をモニターするためのセンサーを開発している。この疲労損傷度モニタリングセンサーは亀裂を有する極薄ステンレス鋼板であり、疲労損傷度は非可逆的な量であるセンサー内の亀裂の進展量として計測される。本研究では、亀裂進展部に切欠きを設けることによるセンサーの高感度化の評価式を示すとともに、その妥当性について疲労亀裂進展試験と応力拡大係数解析を行うことにより検討する。

**Key Words :** cumulative fatigue damage, high sensitive monitoring sensor, crack propagation

## 1. はじめに

2002年3月に改訂された道路橋示方書<sup>1)</sup>において、鋼橋の耐久性を支配する因子の一つである疲労についても、同時に発刊された「鋼道路橋の疲労設計指針」<sup>2)</sup>などを参考にして、陽な形で照査するように規定された。疲労照査は、設計供用期間内に着目部に生じる応力の変動履歴を応力範囲頻度分布として捉え、それを着目部の疲労強度と比較することによって行われる。具体的には、修正マイナー則などの線形累積被害則を適用し、以下のように行われるのが通常である<sup>3)</sup>。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{\sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i)}{C_0} \leq 1 \quad (1)$$

$\Delta \sigma_i$  : 応力範囲頻度分布を構成する応力範囲成分

$n_i$  :  $\Delta \sigma_i$ の頻度

$N_i$  :  $\Delta \sigma_i$ のみが作用した場合の疲労寿命

$C_0$  : 疲労強度等級を表すための定数

$$\Delta \sigma^3 \cdot N = C_0$$

$\Delta \sigma$  : 応力範囲,  $N$  : 疲労寿命

式(1)は、 $\sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i)$ と $C_0$ と比較することにより疲労照査が行われることを意味している。 $\sum (\Delta \sigma_i^3 \cdot n_i)$ 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、点検時期の判断に有用な情報となる。

従来、疲労損傷度は、着目部に貼付したひずみゲ

ージの出力をヒストグラムレコーダで解析して得られる応力範囲頻度分布をもとに求められている。著者らは、このような従来の方法にかわり、長期間に渡って構造部材に蓄えられる疲労損傷度を低コストで容易に計測するためのセンサーを開発している<sup>4)</sup>。この疲労損傷度モニタリングセンサーは、図-1に示すような亀裂を有する薄いステンレス鋼板であり、疲労損傷度は非可逆的な量であるセンサー内の亀裂の進展量として計測される。センサー内の亀裂の進展速度と応力拡大係数範囲の関係を利用して、亀裂進展量 ( $\Delta a$ ) と疲労損傷度の関係を式(2)のように提案し、疲労亀裂進展試験を行うことによりその妥当性を確かめている<sup>4)</sup>。

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

$H$  : センサーのゲージ長さ (図-1参照)

式(2)から求められる疲労損傷度と亀裂進展量の関係を図-2に示す。このように、ゲージ長さ $H$ を100 mm程度とすれば、点検時期を判断するために十分な感度をセンサーは有している。しかし、中間期(数ヶ月～数年)のモニタリングで構造部材に蓄えられる疲労損傷度を把握するためには、さらにセンサーの感度を高める必要がある。感度を高める一つの方法としては、式(2)から明らかかなようにセンサーのゲージ長さ $H$ を大きくすることが考えられる。しかし、センサーを長くすることは、その取り扱いを考えた場合、おのずと限界がある。ここでは、センサーの亀裂を有する部分(亀裂が進展する部分も含む)に

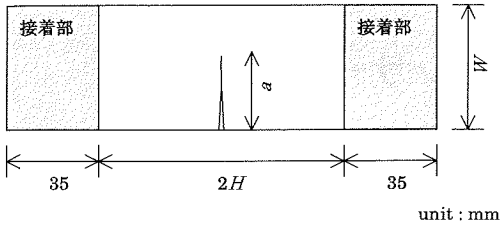


図-1 疲労損傷度モニタリングセンサー

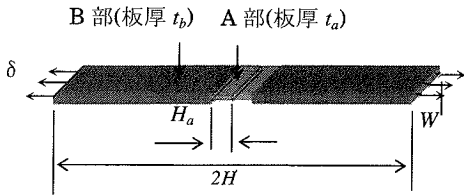


図-3 矩形溝形切欠き付きセンサー

切欠きを設け、センサーの一部を減厚することでセンサーの感度を高めることを考えた。

本研究では、センサー内の亀裂進展部分を減厚することによる疲労損傷度モニタリングセンサーの高感度化を提案するとともに、感度向上度の評価式を示す。また、その妥当性をエネルギー法に基づいた応力拡大係数の解析と疲労亀裂進展試験を行うことにより検証する。

## 2. 高感度センサーの感度向上度

提案する高感度疲労損傷度モニタリングセンサーは、図-3に示すように亀裂が進展する部分に矩形の切欠きを設け、その部分の厚さを減じたものである。この減厚により、以下のようにセンサーの高感度化が実現するものと考えた。

このセンサーを図-3に示すようにA部（切欠き部）、B部（一般部）に分け、それぞれの位置での平均ひずみを  $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_b$  とおくと、これらのひずみとそれぞれの位置での板厚 ( $t_a$ ,  $t_b$ ) の関係は次式ようになる。

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} = \frac{t_a}{t_b} \quad (3)$$

センサー全体の伸びを  $\delta$ 、A部の伸びを  $\delta_a$ 、B部の伸びを  $\delta_b$  とおくと、

$$\delta = \delta_a + \delta_b \quad (4)$$

である。センサー全体の平均ひずみを  $\varepsilon$  とおくと、各部の伸びとひずみの関係は以下の式で与えられる。

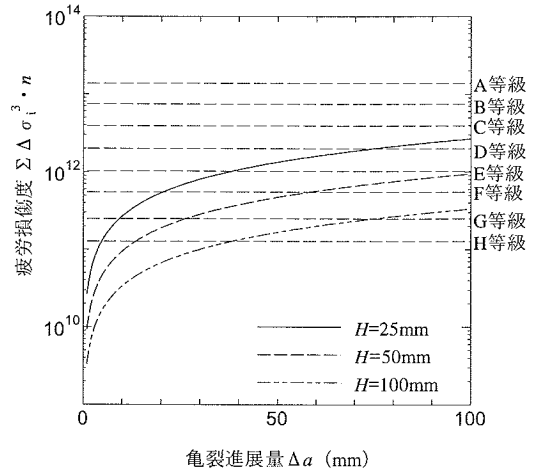


図-2 疲労損傷度と亀裂進展量の関係

$$\begin{cases} \delta = \varepsilon H \\ \delta_a = \varepsilon_a H_a \\ \delta_b = \varepsilon_b (H - H_a) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入することにより次式が得られる。

$$\varepsilon H = \varepsilon_a H_a + \varepsilon_b (H - H_a) \quad (6)$$

また、式(3)を式(6)に代入し、整理することにより、

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} = \frac{H t_b}{t_a (H - H_a) + H_a t_b} \quad (7)$$

が得られる。このようなセンサー内のひずみの相違により、切欠き部に設けた亀裂の挙動は、切欠き部の平均ひずみ  $\varepsilon_a$  とセンサー全体の平均ひずみ  $\varepsilon$  の比だけゲージ長さが大きくなった場合と同じになると考えられる。このように換算したセンサーのゲージ長さを  $H_c$  とおけば、次式が得られる。

$$H_c = \frac{H t_b}{t_a (H - H_a) + H_a t_b} \cdot H \quad (8)$$

この  $H_c$  と  $H$  を比較することにより、切欠きを設けることによる応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の増大倍率と疲労亀裂進展速度  $da/dN$  の加速倍率を以下のように表すことができる。

既報<sup>4)</sup>で示したように、等厚センサーの応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は近似的に式(9)で与えられる。

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{H} \quad (9)$$

同様に、高感度センサーの応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は近似的に式(10)で与えられるものと考えられる。

表-1 解析対象

解析モデル	$H_a$ (mm)	$t_b$ (mm)	$H_c$ (mm)
①	50	1.0	133.3
②	50	1.5	150.0
③	50	2.0	160.0
④	10	1.0	181.8
⑤	10	1.5	250.0
⑥	10	2.0	307.0
⑦	0	0.5	100

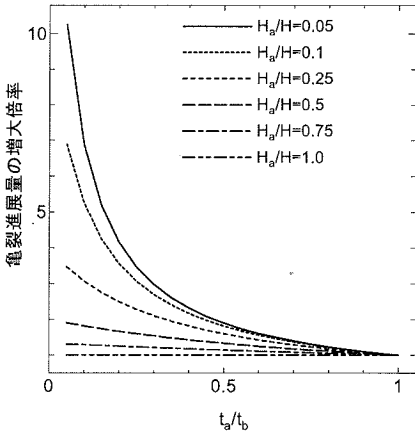


図-4 亀裂進展量の増大倍率と  $t_a/t_b$

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{H_c} \quad (10)$$

したがって、ここで提案する高感度センサーの応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の増大倍率は、

$\Delta K$  の増大倍率=

$$\frac{\sqrt{H_c}}{\sqrt{H}} = \sqrt{\frac{H t_b}{t_a(H - H_a) + H_a t_b}} \quad (11)$$

で与えられる。また、疲労亀裂進展速度  $da/dN$  が、国際溶接学会の進展速度表示式<sup>3)</sup>のように、 $\Delta K$  の3乗に比例するとすれば、

$da/dN$  の加速倍率=

$$\left(\frac{\sqrt{H_c}}{\sqrt{H}}\right)^3 = \left(\frac{H t_b}{t_a(H - H_a) + H_a t_b}\right)^3 \quad (12)$$

となる。同様に同じ疲労損傷度に対する高感度センサー内の亀裂進展量の等厚センサーの亀裂進展量に対する比率は式(13)で与えられる。

$$\text{亀裂進展量の増大倍率} = \left(\frac{H t_b}{t_a(H - H_a) + H_a t_b}\right)^3 \quad (13)$$

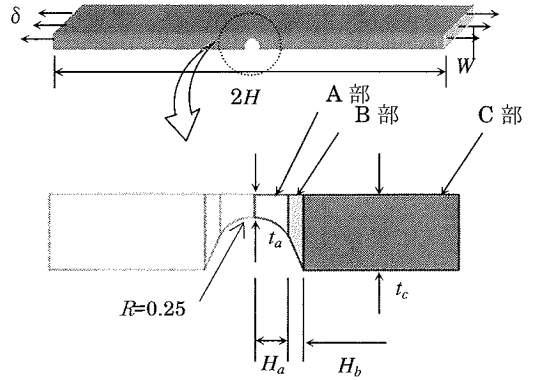


図-5 Vノッチシャルピー形切欠き付きセンサー

式(13)より求めた亀裂進展量増大倍率と  $t_a/t_b$  の関係を、 $H_a/H$  をパラメータとして図-4 に示す。亀裂進展量増大倍率は、 $t_a/t_b$  が小さくなるにしたがって、また  $H_a/H$  が小さくなるにしたがって、大きくなっている。例えば、亀裂進展部分のセンサー厚を標準部の1/3とし、減厚部分の半分をセンサーのゲージ長さの1/10とすれば、同じ疲労損傷度に対する高感度センサーの亀裂の伸びは等厚センサーの約4倍となる。すなわち、1/4の期間で同じ亀裂進展量が生じることになる。

加工の容易さを考えて、図-5に示すように切欠きをVノッチシャルピー形とすれば、同様の検討により、換算ゲージ長さ  $H_c$  として式(14)が得られる。

$$H_c = \frac{H^2}{t_a \left[ -\frac{3\pi}{8} + \frac{2}{\sqrt{1-F^2}} \tan^{-1} \left( \frac{1+F}{\sqrt{1-F}} \tan \frac{3\pi}{16} \right) \right] + \frac{t_a H_b}{t_c - t_b} \log \frac{t_c + t_a}{t_b + t_c} (H - H_a - H_b)} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \begin{cases} R = 0.25mm \\ H_a = R \sin 3\pi/8 \\ H_b = \frac{(t_c - t_b)}{2} \tan \frac{\pi}{8} \\ F = \frac{R}{t_b + R \cos 3\pi/8} \\ t_b = t_a + R(1 - \cos 3\pi/8) \end{cases} \end{aligned}$$

### 3. 応力拡大係数の解析

ここでは、有限要素法とエネルギー法を利用して高感度センサーの応力拡大係数の解析を行い、感度向上評価式の妥当性について検討する。

#### (1) 解析対象と解析方法

解析対象は図-3に示した矩形溝形の切欠きを有するステンレス鋼板である。解析では、センサーの中央の切欠き部から亀裂が進展することを想定した。センサーの幅は50mm、ゲージ長さ  $H$  は100mm、切欠き部の板厚  $t_a$  は0.5mmで一定とし、板厚  $t_b$  と切欠き長さ  $H_a$  を表-1に示すように変化させている。ま

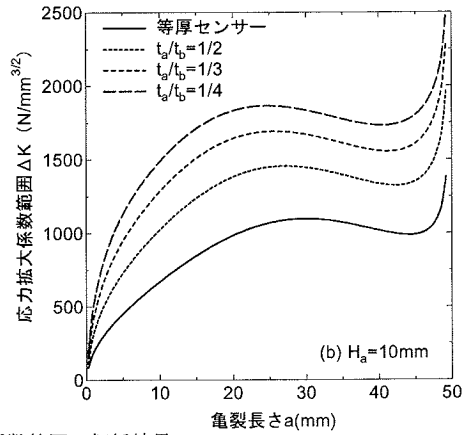
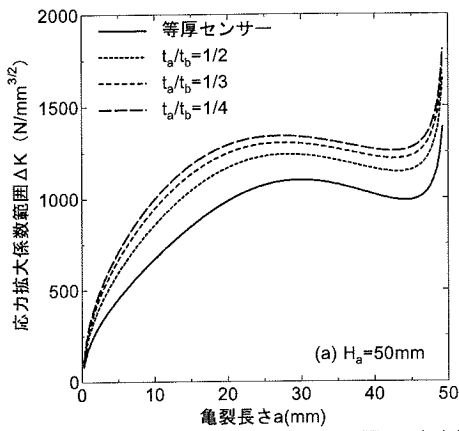


図-6 応力拡大係数範囲の解析結果

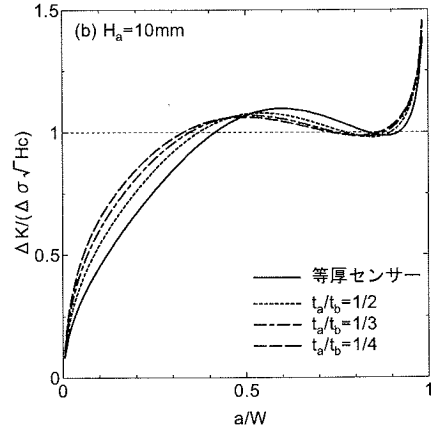
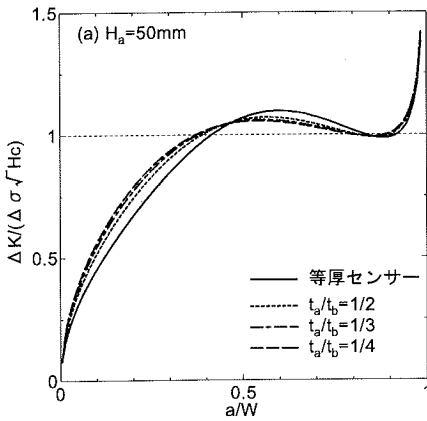


図-7 無次元化した応力拡大係数範囲

た、切欠きがなく、厚さが一般的な等厚センサーも解析対象とした。表-1 中には、それぞれのモデルに対して式(8)から計算される  $H_c$  の値も示している。

解析には汎用有限要素法解析ソフト (FEMAP, CAEFEM) を用いた。解析は、センサーの形状の対称性を考慮して 1/2 モデルに対して行い、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。また、センサーの公称応力が  $100\text{N}/\text{mm}^2$  となるようにセンサーの長手方向に強制変位を与え、拘束点の節点反力を求めた。最小要素寸法はセンサーの幅の  $1/50$  である  $1\text{mm}$  とした。また、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  $1.97 \times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2$ 、ポアソン比を  $0.24$  とした。

応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は、有限要素解析から求めた拘束点の反力を利用して、各亀裂長さにおけるひずみエネルギー、さらにエネルギー開放率を求めることにより、計算した<sup>4)</sup>。

## (2) 解析結果

解析によって得られた応力拡大係数範囲  $\Delta K$  と亀裂長さ  $a$  の関係を図-6 (a), (b) に示す。図 (a) は  $H_a$  を  $50\text{mm}$ 、図 (b) は  $H_a$  を  $10\text{mm}$  としたときの応力拡大

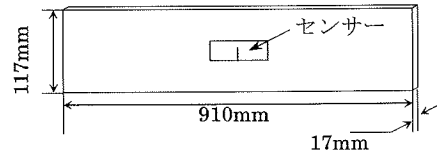


図-8 亀裂進展試験に用いた試験体

係数範囲と亀裂長さの関係を  $t_a/t_b$  をパラメータとして示している。図中には、等厚のセンサーを対象とした解析結果も示している。いずれの場合も、等厚センサーに比べて、切欠き付きセンサーの  $\Delta K$  は大きくなっており、 $t_a/t_b$  の値が小さいものほど  $\Delta K$  が大きくなっている。また、図 (a) に示す  $H_a=50\text{mm}$  の場合に比べて、図 (b) に示す  $H_a=10\text{mm}$  での  $\Delta K$  は大きくなっている。

図-6 (a), (b) に示した応力拡大係数範囲  $\Delta K$  を式 (8) から計算した  $H_c$  を利用して求めた  $\Delta\sigma\sqrt{H_c}$  で無次元化した  $\Delta K/\Delta\sigma\sqrt{H_c}$  と亀裂長さ  $a$  をセンサー幅  $W$  で無次元化した  $a/W$  との関係を図-7 (a), (b) に示す。等厚センサーの  $\Delta K/\Delta\sigma\sqrt{H_c}$  ( $H_c=H$ ) の値が 1 に近い領域では、切欠き付きセンサーの  $\Delta K/\Delta\sigma\sqrt{H_c}$  の値もほぼ 1 となっており、2 章で示したセンサーの感

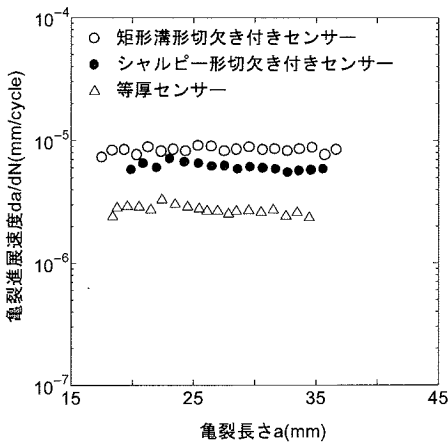


図-9 亀裂進展速度 (荷重範囲一定試験)

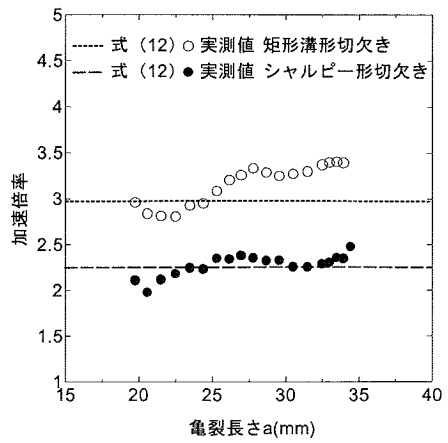


図-10 加速倍率

度向上評価式は妥当であったといえる。また、等厚センサーに比べて  $\Delta K / \Delta \sigma \sqrt{H_c}$  の値がほぼ 1 となる領域が広いことから、式(10)の適用できる亀裂長さの領域が等厚センサーよりも広いといえる。

#### 4. 亀裂進展速度 (荷重範囲一定試験)

##### (1) センサー試験片

荷重範囲を一定とした疲労試験には、矩形溝形切欠き付きセンサー ( $H=50\text{mm}$ ,  $W=50\text{mm}$ ,  $H_a=3\text{mm}$ ,  $t_a=0.23\text{mm}$ ,  $t_b=0.51\text{mm}$ )、V ノッチシャルピー形切欠き付きセンサー ( $H=50\text{mm}$ ,  $W=50\text{mm}$ ,  $t_a=0.71\text{mm}$ ,  $t_c=1.21\text{mm}$ ) と等厚センサー ( $H=50\text{mm}$ ,  $W=50\text{mm}$ ,  $f=0.50\text{mm}$ ) を用いた。式(8)あるいは式(14)から計算されるから矩形溝形切欠き付きセンサーの  $H_c$  は  $103.3\text{mm}$ 、V ノッチシャルピー形切欠き付きセンサーの  $H_c$  は  $85.8\text{mm}$  となる。また、亀裂進展速度の加速倍率は、それぞれ、2.97、2.25 となる。

##### (2) 試験方法

図-8 に示すように、長さ  $910\text{mm}$ 、幅  $117\text{mm}$ 、厚さ  $17\text{mm}$  の鋼板の中央に先に述べたセンサーを添付し、動的能力  $500\text{kN}$  の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて疲労亀裂進展試験を行った。荷重範囲は  $61\text{kN}$ 、応力比は  $0.5$ 、荷重波形は正弦波で、繰返し速度は  $20\text{Hz}$  とした。センサー内の亀裂長さの測定には、デジタルマイクロスコープ ( $\times 175$ ) を用いた。これらの条件は 3 つのセンサーですべて同じである。

##### (3) 試験結果

疲労亀裂進展試験の結果を図-9 に示す。図の縦軸の疲労亀裂進展速度  $da/dN$  は、亀裂が  $\Delta a$  成長するのに要した繰返し数  $\Delta n$  とし、 $da/dN = \Delta a / \Delta n$  として求めている。横軸は亀裂長さであり、図-6 と図-7 に示したように、亀裂進展速度を測定した亀裂長さ

の領域ではほぼ式(9)、式(10)が成り立ち、亀裂長さによらず応力拡大係数範囲  $\Delta K$  の値はほぼ一定となる。いずれのセンサーにおいても、亀裂進展速度はほぼ一定であり、等厚センサーでは  $2.7 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ 、V ノッチシャルピー形切欠き付きセンサーでは  $5.6 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ 、矩形溝形切欠き付きセンサーでは  $8.3 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$  程度となっている。

V ノッチシャルピー形切欠き付きセンサーと矩形溝形切欠き付きセンサーで測定した亀裂進展速度の 5 点平均値を等厚センサーの 5 点平均亀裂進展速度で除した亀裂進展速度の加速倍率を図-10 に示す。なお、5 点平均亀裂進展速度とは、測定された連続する 5 つの進展速度を平均したものである。加速倍率を求める際の 5 点平均速度は、加速センサーで求めたものを基準とし、等厚センサーについては加速センサーで求めた亀裂長さの範囲と最も近い亀裂長さ領域での 5 点平均値を用いている。

図中には、2 章で示した方法で求められるそれぞれのセンサーの加速倍率も示しているが、それらは実験結果とほぼ一致している。このように、実験結果からも 2 章で示したセンサーの感度向上評価式は妥当であったといえる。

#### 5. 亀裂進展速度 (荷重範囲漸減試験)

##### (1) 試験片と試験方法

試験片は矩形溝形切欠き付きセンサー ( $H=50\text{mm}$ ,  $W=50\text{mm}$ ,  $H_a=3\text{mm}$ ,  $t_a=0.23\text{mm}$ ,  $t_b=0.51\text{mm}$ ) である。

荷重範囲一定試験と同じ材料試験機を用いて荷重範囲漸減下で疲労亀裂進展試験を行った。荷重波形は正弦波で、繰返し速度は  $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$  とした。荷重範囲漸減は、上限荷重を一定とし、亀裂が約  $0.25\text{mm}$  程度進展するごとに 5% ずつ荷重範囲を減少させることによって行った。なお上限荷重は  $400\text{kN}$  としている。

(2) 試験結果

図-11 に疲労亀裂進展試験結果を示す。図の縦軸は亀裂進展速度  $da/dN$ 、横軸は応力拡大係数範囲  $\Delta K$  である。 $\Delta K$  は 3 章で示したエネルギー法により求めたものを用いている。図中には、同様の条件で求められた等厚センサーの亀裂進展速度<sup>4)</sup>、そして日本鋼構造協会 (JSSC) の疲労設計指針<sup>3)</sup>とで定められている平均設計曲線 (平均  $da/dN$ - $\Delta K$  関係) と国際溶接学会 (IIW) の疲労設計指針<sup>5)</sup>で規定されている  $da/dN$ - $\Delta K$  関係も示している。

矩形溝形切欠き付きセンサーで得られた  $da/dN$ - $\Delta K$  関係は、 $\Delta K$  が比較的高い領域で、等厚センサーの関係よりも上に位置しているものの、その差は小さく、2 つの指針で示されている関係ともほぼ一致している。また、下限界応力拡大係数範囲近傍の  $da/dN$ - $\Delta K$  関係も、等厚センサーおよび JSSC 疲労設計指針の平均設計曲線で示される関係とほぼ一致している。

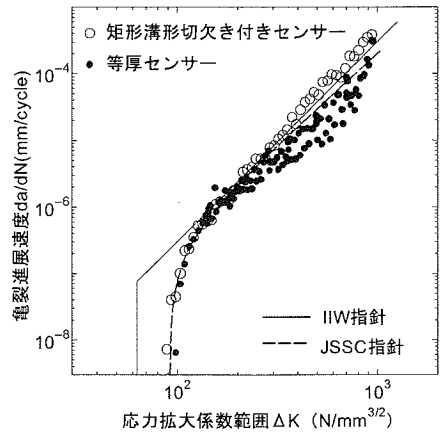


図-11  $da/dN$ - $\Delta K$  関係

6. まとめ

- (1) センサー内の亀裂進展部分を減厚させることによるセンサーの高感度化を提案し、その感度向上評価式を示した。
- (2) 感度向上の評価式の妥当性を有限要素法とエネルギー法を用いた応力拡大係数解析により確かめた。
- (3) 高感度化センサーの疲労亀裂進展試験を行い、疲労亀裂進展速度を測定することにより感度向上評価式の妥当性を確かめた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，2002。
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002。
- 3) 日本鋼構造協会：構造物に疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993。
- 4) 公門和樹，森猛，成本朝雄，平山繁幸，阿部允：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，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.245-255，2003。
- 5) 国際溶接学会（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，1999。

(2004. 2. 10 受付)

DEVELOPMENT OF HIGH SENSITIVE FATIGUE DAMAGE MONITORING SENSOR

Takeshi MORI, Kazuki KOMON, Hiroyuki ODAKA, Asao NARUMOTO and Makoto ABE

If fatigue damage or its possibility can be estimated easily and economically, the efficiency of maintenance inspection for steel bridge is considered to be drastically advanced. For this purpose, a system was developed, in which thin stainless steel with a fatigue crack is stuck on a real bridge to measure crack propagation and the cumulative amount of fatigue damage. In this study, high sensitive monitoring sensor is proposed in order to accumulate the crack propagation and shorten the monitoring period, and an evaluation formula for estimating the acceleration is developed. Furthermore, the validity of the formula is examined through stress intensity factor analyses and fatigue crack propagation tests.