

薄鋼板による疲労損傷パラメータ推定法の提案

A proposal of estimating method of fatigue damage parameter by shin steel plate

崎野 良比呂*
Yoshihiro SAKINO金 裕哲**
You-Chul KIM堀川 浩甫***
Kohsuke HORIKAWA

* 博士(工学) 大阪大学助手 接合科学研究所 (〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)

** 工博 大阪大学教授 接合科学研究所 (〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 11-1)

***工博 大阪大学 名誉教授 (〒143-0023 大田区山王 2-6-2)

Thin steel plates, which have initial cracks at the center, are used as the Sacrificial Test Pieces in this study. "The Sacrificial Test Piece" is attached to the member of a main structure in order to evaluate the damage before appearance of a crack in the member of main structure. The purpose is to show the practical applicability of "the Sacrificial Test Piece" for monitoring the fatigue damage parameter on bridge members. In this research, it is elucidated that the applicable range of crack length, and the crack propagation properties of the Sacrificial Test Pieces to evaluate the fatigue damage parameter are obtained. And it is clarified that the fatigue damage parameter under constant amplitude loading can be estimated by the Sacrificial Test Piece accurately.

Keywords: Sacrificial test piece, fatigue damage parameter, thin steel plate, crack growth

キーワード: 犠牲試験片, 疲労損傷パラメータ, 薄鋼板, き裂進展

1. 緒言

橋梁の疲労損傷度を評価する際、任意の評価対象部が一定期間に受ける疲労損傷パラメータを推定する必要がある。そのための方法として、評価対象部に犠牲試験片を取付け、犠牲試験片の損傷状況から評価対象部の疲労損傷パラメータを求める手法が考えられる。犠牲試験片とは評価対象部材に疲労損傷が発生する前に、評価対象部材に先行して損傷する試験片を指す。

現在、犠牲試験片として、高 Ni 不変鋼インバー箔にスリット付純ニッケル箔を微少抵抗溶接したもの¹⁾、SUS304 の板中央部を V ノッチシャルピー形に精密機械加工で減厚したもの²⁾、純銅を 0.5mm の薄板から一体整形して中央部を 0.1mm にしたもの³⁾、薄鋼板の中央部をフッ化樹脂フィルムで巻いた後に 2 枚の透明エポキシ樹脂薄板に挟んで接着したもの⁴⁾および工業用銅薄板を 2 枚のガラス入繊維入りエポキシ薄板で挟んで接着したもの⁴⁾を用いた研究が進行しており、その適用性の検討がなされてきている。

筆者らは、橋梁部材に適用する犠牲試験片として、

中央に疲労き裂を有する薄鋼板を用いた一連の研究を行ってきた^{5)~7)}。誰もが容易かつ安価に準備可能な薄鋼板が疲労損傷パラメータの推定に用いることが出来れば、疲労損傷度の評価が安価かつ広範囲に行えると思われる。本研究で用いているはがきサイズの薄鋼板を用いた犠牲試験片では、ホットスポット応力のような局部的な疲労損傷の評価は難しいが、橋桁全体に作用する全体的な疲労損傷の推定には有効であると考えられる。よって、薄鋼板を複数の橋桁の中央に取り付け、疲労損傷の監視や補修順序の決定等の判断に用いる用途等が考えられる。また、後述する促進ジグによりユーザーが感度を任意にかつ容易に変更できれば、短期から長期まで、モニタリング期間を任意に設定することが可能となる。

本報では、この薄鋼板のき裂進展量から評価対象部の疲労損傷パラメータを推定する手法と、感度および測定期間を任意に変更するための促進ジグ、および犠牲試験片を実橋に適用するための取付け方法の提案とその効果の確認を行い、本手法によるモニタリングに必要なき裂進展特性と適用範囲の把握を行った。さらに、一定振幅荷重下における本手法によるモニタリングの妥当性について検討した。

2. 犠牲試験片による疲労損傷パラメータのモニタリング

2.1 疲労損傷パラメータと犠牲試験片

変動荷重を受ける部材のダメージを表す値として、一般に疲労損傷度 D が用いられる。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

ここに、

n_i : $\Delta\sigma_i$ の繰返し数

N_i : $\Delta\sigma_i$ のみが作用したときの疲労寿命

$\Delta\sigma_i$: 変動荷重のうちの i 番目の応力範囲 (MPa)

マイナーの線形被害則によると、 $D=1$ となったとき、つまり、各応力範囲における繰返し数の疲労寿命に対する割合を全応力範囲で合計したものが 1 となった時、部材に疲労損傷が発生するとされている⁸⁾。

疲労限界以上での応力範囲と疲労寿命の関係を表す(2)式は(3)式のように式変形できる。

$$\log \Delta\sigma_i = -1/m \cdot \log N_i + C \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_i^m N_i = C_0 \quad (3)$$

ここに、

$-1/m$: S-N 曲線の傾き

C : S-N 曲線の切片 $C_0 := 10^{m \cdot C}$

(3)式を(1)式に代入すると次式を得る。

$$D = \frac{\sum (\Delta\sigma_i^m n_i)}{C_0} \quad (4)$$

(4)式の分子

$$\sum (\Delta\sigma_i^m n_i) \quad (5)$$

が疲労損傷パラメータと呼ばれている⁹⁾。

この式より、部材における疲労損傷評価対象部位の疲労等級などから C_0 が与えられていれば、疲労損傷パラメータをモニタリングすることにより累積損傷度が推定できる。逆に言えば、評価部材の疲労損傷度を推定するためには、評価部材が受けた疲労損傷パラメータをモニタリングする必要がある。

通常この疲労損傷パラメータは、ひずみゲージと計測器等を用いて応力波形を計測し、レインフロー法等によって評価部材の応力振幅成分 $\Delta\sigma_i$ と、応力振幅成分 $\Delta\sigma_i$ 毎の作用回数 n_i を導く事によりモニタリングされている。

一方の犠牲試験片による疲労損傷パラメータの

モニタリング手法の理論的背景を説明する。

薄鋼板を用いた犠牲試験片の疲労き裂の進展量はパリス則

$$da_i / dn_i = A (\Delta K_i)^m \quad (6)$$

ここに、

a_i : $\Delta\sigma_i$ によるき裂進展量 (m)

ΔK_i : 応力拡大係数範囲 (MPa · m^{1/2})

A : 材料によって決まる定数

に従うと仮定する。ここでの m は対数で示した応力拡大係数とき裂進展速度の関係の傾きを示し、(3)式に示した m と等しい。

犠牲試験片が部材に比べて十分に薄く、き裂の進展による剛性変化が無視できる場合、き裂先端近傍の応力状態を示す応力拡大係数に、き裂直角方向変位が剛体により拘束された帯板の応力拡大係数“帯板の平面応力状態での変位完全拘束型応力拡大係数”¹⁰⁾

$$\begin{aligned} \Delta K_i &= \frac{E}{\sqrt{1-\nu^2}} \frac{v_0}{\sqrt{H}} = \sqrt{1-\nu^2} \sqrt{H} \cdot \Delta\sigma_i \\ &= B \Delta\sigma_i \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、

v_0 : 変位を完全拘束する剛体の変位

$$= \frac{\Delta\sigma_i (1-\nu^2) H}{E} \quad (\text{cm})$$

$2H$: 変位を完全拘束する剛体の間隔 (cm)

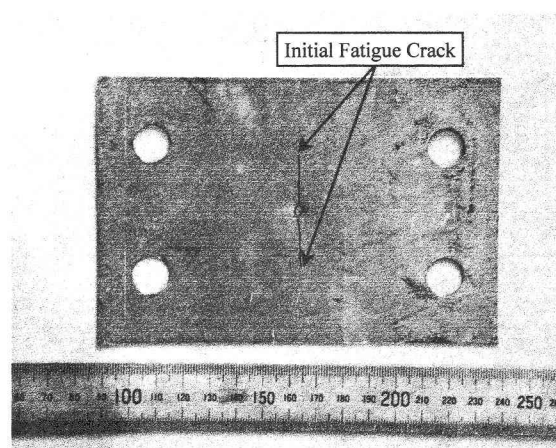
E : ヤング率 (MPa), ν : ポアソン比

B : H によって決まる定数 $= \sqrt{1-\nu^2} \sqrt{H}$

が適用できると考えられる。以下、これを変位拘束型応力拡大係数と称す。これをパリス則(6)式に代入すると、

$$da_i / dn_i = A (B \Delta\sigma_i)^m \quad (8)$$

が得られる。



図一 薄鋼板を用いた犠牲試験片

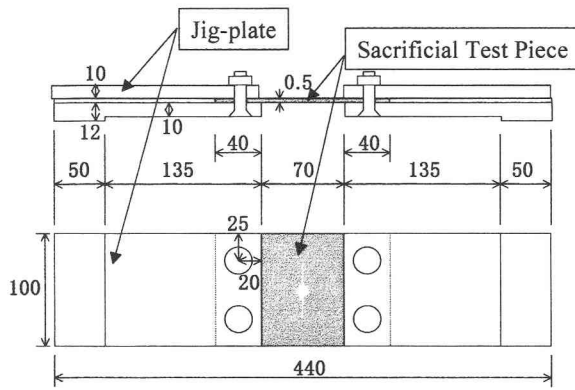


図-2 促進ジグの形状および寸法

この式を変形し、各応力成分によるき裂進展量が相互に影響を及ぼさないと仮定すると、トータルのき裂進展量 a は、

$$a = AB^m \sum (\Delta \sigma_i^m n_i) \quad (9)$$

で表される。(9)式より疲労損傷パラメータは、

$$\sum (\Delta \sigma_i^m n_i) = a / AB^m \quad (10)$$

で表され、 A, B, m は事前に実験等により既知とすることが出来るので、き裂進展量 a のみを計測することにより疲労損傷パラメータがモニタリングできる。

本研究では犠牲試験片として、図-1に示す中央き裂入りの葉書サイズの薄鋼板を用いる。このような軟鋼板を用いるのは、誰でもが容易かつ安価に準備できることと、評価部材と犠牲試験片の線膨張係数が違うことにより温度変化によって生じる熱応力振幅がき裂先端に付加されるのを防ぐためである。また、薄板としたのは、変位拘束型応力拡大係数を用いるためには、部材に比べ犠牲試験片の板厚が十分に薄いという条件を満たす必要があるためである。後述するように、変位拘束型応力拡大係数を適用可能とすることにより、モニタリングが非常に簡便となる。

2.2 犠牲試験片の取付け方法

犠牲試験片の考案においては、評価部材への取付け方法に様々な工夫がなされてきた¹⁾⁴⁾。本研究では、犠牲試験片を実橋に適用する事を考え、以下の3つの条件を満たす犠牲試験片取付け法を検討した⁵⁾⁶⁾。

① き裂進展を促進する事で感度が調整でき、計測期間を任意に設定することができること。

これを満足するため、図-2に示すき裂促進ジグを考案した。これは、厚さ 0.5mm の犠牲試験片を厚さ 10mm のジグではさんで皿ボルトで締め、両端下ジグの厚さが 12mm となった部分のみを評価部材に固定させるものである。この方法を用いると、犠牲試験片はジグの

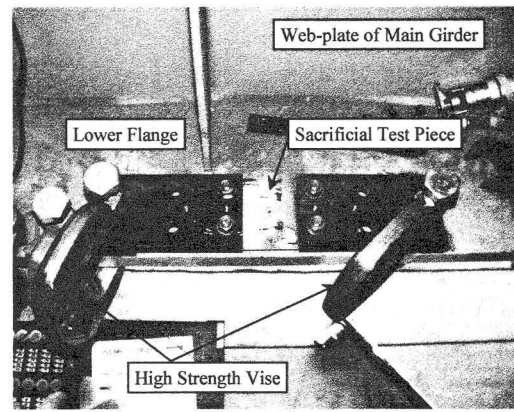


図-3 取付け方法の実橋への適用実験

部分に対し十分薄く剛性が低いため、部材への固定点間（今回のジグの場合約 340mm）の評価部材の伸びが犠牲試験片に集中する。これにより、犠牲試験片には評価部材と比較して数倍の応力が作用することになる。本研究では促進ジグによる応力の増加率を応力増幅率 α と呼ぶこととする。(9)式に(11)式を代入すると(12)式が得られる。

$$\Delta \sigma_i = \alpha \cdot \Delta \sigma_{Bi} \quad (11)$$

$$a = \alpha^m \cdot AB^m \sum (\Delta \sigma_{Bi}^m n_i) \quad (12)$$

ここに、

$\Delta \sigma_{Bi}$: 評価部材の応力範囲

(12)式から分かるように、犠牲試験片のき裂の進展量は、この促進ジグにより応力増幅率 α の m 乗倍促進される。促進ジグの寸法を任意に決定し、増幅倍率を操作することで、感度を適宜設定することも可能となり、計測期間を任意に設定する事が可能となる。

(10)式に(11)式を代入することにより、促進ジグを用いた犠牲試験片のき裂長さとして評価対象部材の疲労損傷パラメータの関係は、(13)式の様に表すことができる。

$$\sum (\Delta \sigma_{Bi}^m n_i) = a / (AB^m \alpha^m) \quad (13)$$

② 供用下の橋梁にも適用できるように、プレテンションを付加する。

供用下の橋梁で犠牲試験片を使用する場合、橋梁に作用している荷重が取り付け時の荷重より小さくなると犠牲試験片には圧縮力がかかる。この圧縮力はき裂進展に寄与しないばかりか犠牲試験片の損傷につながる。そこで、熱膨張を利用して②を満足させることとした。

今回の実験の場合、促進ジグを取り付けた犠牲試験片全体を携帯型溶接棒乾燥用電気炉で 50℃ 程度に温め、電気炉から取り出し評価対象部材の所定の位置に仮置きした。その後、犠牲試験片の温度が評価対象部材の温度より約 10℃ 高い状態まで下がった時点で評価対象部材に固

定した。この10℃の温度差で生じる温度差応力により犠牲試験片にプレテンションを付加した。1℃の温度差により犠牲試験片に導入されるプレテンション量は2.4MPaの応力増幅率 α 倍であり、温度差10℃の場合には24MPaの α 倍となる。これ以上の圧縮応力が犠牲試験片に作用する可能性がある場合には、犠牲試験片固定時の温度差を大きくする必要がある。

③ 新たな応力集中部を作らずに確実に部材に固定させる。

これを満足させるために、高張力万力による摩擦接合を用いた。犠牲試験片の固定方法としては、接着剤¹⁾³⁾やボルト⁴⁾、溶接等が考えられるが、接着剤は測定が長期間にわたる場合の耐久信頼性に不安があり、ボルトや溶接では新たな応力集中部ができるとともに、評価対象部材を損傷させるという問題がある。高張力万力による摩擦接合は、応力集中部や損傷を作らず、かつ仮設構造物の固定等で用いられる耐久信頼性の高い接合法である。

これらの取付け方法の有効性を検証するため、実験室と実橋での適用実験を行った。高速道路高架橋での適用実験の写真を図-3に示す。その結果、促進ジグにより応力振幅が増幅すること、プレテンションが提案した方法で導入できることが確かめられた。

3. 犠牲試験片の変位拘束定数の検討

3.1 実験

本研究で用いる犠牲試験片の応力拡大係数範囲 ΔK_I は、(7)式で表され、犠牲試験片が受ける応力範囲 $\Delta \sigma_i$ に比例する。この比例定数であるB値は、

$$B = \sqrt{1 - \nu^2} \sqrt{H} \quad (14)$$

で表せる。(14)式から分かるように、B値は変位拘束される距離、つまり促進ジグにより犠牲試験片が剛体に固定されたと見なせる点から犠牲試験片中央までの距離H（“有効犠牲試験片長さ”と称す）の関数である。本研究ではこのB値を変位拘束定数と呼ぶこととする。

犠牲試験片と促進ジグとは皿ボルトによって固定されている。ボルト固定であるため、ジグにより犠牲試験片が剛体に固定されたと見なせる点は明確ではない。そこで実験によりHの値を求め、B値

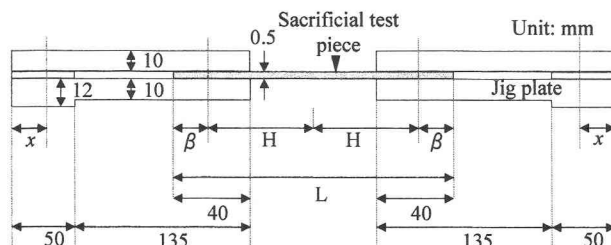


図-4 L, H, β , x の定義

を決定することとした。

図-4に示すように、犠牲試験片として用いる薄鋼板の長さをL、薄鋼板端部からジグにより固定されたと見なせる点までの距離を β とすると、もし β がLによらず一定であると仮定すると、

$$H = \frac{L}{2} - \beta \quad (15)$$

となり、LとHの関係は傾きが0.5の直線となるはずである。一方、促進ジグが高張力万力により対象部材に固定されたと見なせる点までの距離をxとすると、促進ジグによる犠牲試験片の応力増幅率 α は、

$$\alpha = \frac{L + 29 - 2x}{1.95H + \frac{(L+19) \times 0.05}{2} + 2x \times \frac{0.05}{2.2}} \quad (16)$$

で表され、

$$H = \frac{L + 29 - 2x - \alpha \left\{ (L+19) \times \frac{0.05}{2} + 2x \times \frac{0.05}{2.2} \right\}}{1.95\alpha} \quad (17)$$

と変形できる。

そこで、実験によりLを変えたいくつかの犠牲試験片で応力増幅率 α を測定し、(17)式に代入してLとHの関係を求める。その傾きが0.5であることから、x, H, β が求められ、B値を決定することができる。

実験変数である長さLを、10cm, 20cm, 25cm, 30cmの4段階とした薄鋼板犠牲試験片を作成し、実験に供した。写真を図-5に示す。ただし、予き裂は入れていない。

断面600×300×12×19mm、支点間長さ4,000mmのH形鋼を桁に見立て、桁中央の対称となる位置に長さ

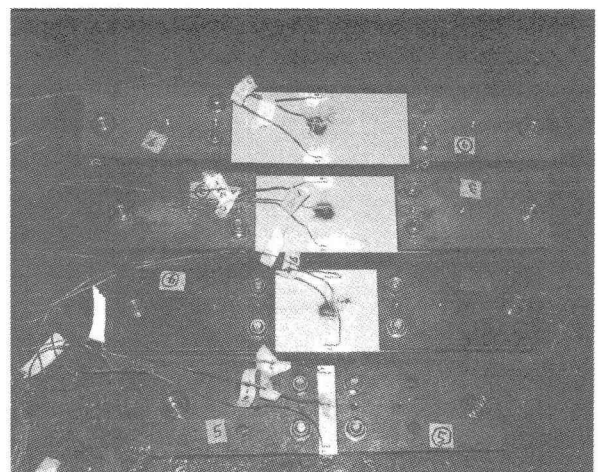


図-5 変位拘束係数検討用試験片

の異なる4枚の犠牲試験片を2.1節で述べた方法で取付けた。この桁に500kN三点曲げ試験機により静荷重を与え、試験体と桁型供試体の犠牲試験片中央にあたる部分に貼付したひずみゲージの値を測定し、促進ジグによる応力増幅率 α を計算した。載荷は0kNから400kNまで50kNピッチで3回行い、各荷重ステップで歪み倍率を求めた。

4.2 実験結果

Lと実験により計測された応力増幅率 α から換算されたHの関係を図-6に示す。プロットは各載荷毎の平均値を示しており、実線は傾きを0.5とした回帰直線

$$H = 0.5L - 0.84 \quad (18)$$

である。実験結果のばらつきが小さく、回帰直線とよく一致していることが分かる。

この結果より、回帰直線の傾きを0.5とする条件により、 $x = 1.46\text{cm}$ が、回帰直線の切片より $\beta = 0.84\text{cm}$ が求められる。これらにより、本研究で用いる犠牲試験片(L=15cm)の場合、 $H = 6.66\text{cm}$ となり、これを(13)式に代入して、変位拘束定数 $B = 0.246$ が得られる。

また、結果が直線になったことは、薄鋼板端部からジグにより固定されたと見なせる点までの距離 β が犠牲試験片として用いる薄鋼板の長さLによらず一定であるとの仮定が正しいことを示している。よって、板厚0.5mm、板幅100mmの薄鋼板を犠牲試験片として使用する場合、どのような長さとした場合でも、変位拘束定数Bは次式で容易に計算することができる。

$$B = \sqrt{1 - \nu^2} \sqrt{0.5L - 0.84} \quad (19)$$

4. き裂長さの適用範囲の検討

4.1 目的と実験概要

薄鋼板を用いた犠牲試験片の特徴は、評価部材に

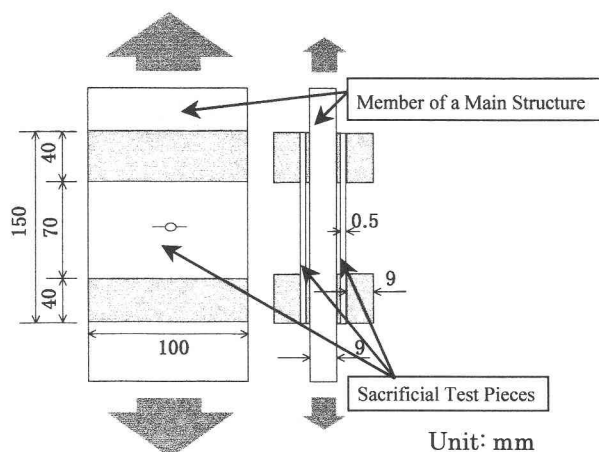


図-7 適用範囲確認実験の模式図と写真

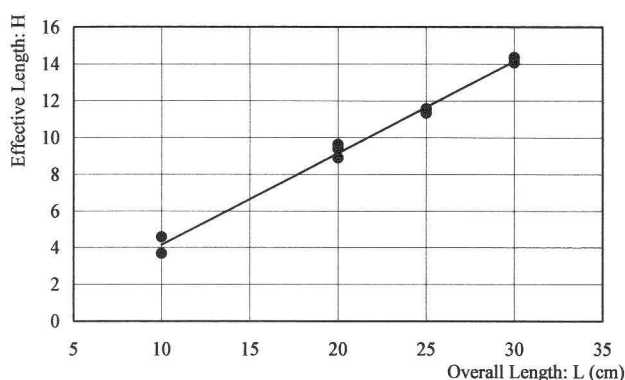
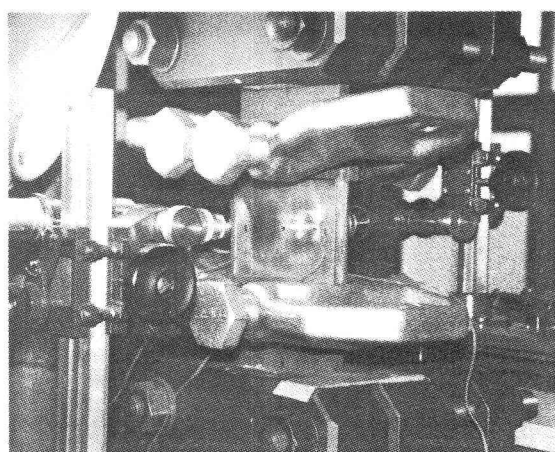


図-6 犠牲試験片の長さLと有効犠牲試験片長さHの関係

より変位拘束されることである。変位拘束される部材の応力拡大係数は破壊力学の理論より(7)式のように導かれる。この式から分かるように、犠牲試験片のき裂先端の応力拡大係数はき裂長さに依存しないため、犠牲試験片の感度はき裂長さによらず常に一定である。しかし、この応力拡大係数はき裂長さが半無限、き裂前方の部材の領域も半無限に広がるという仮定のもとで成立する。本犠牲試験片は変位拘束されるが、き裂長さも板幅も有限である。そこで、本試験片のき裂長さの適用範囲を確認するため実験を行う⁷⁾。

実験の模式図と実験の様態を図-7に示す。厚さ9mmの主材に犠牲試験片を表裏2枚取付けた。試験機の構造上の問題から促進ジグは用いていない。犠牲試験片を取付ける際は犠牲試験片に当て板をし、その上から高張力万力で締付けた。主材の材質は軟鋼である。

一軸疲労試験機により主材に一定荷重振幅を一万回載荷する毎に片側き裂進展量を計測し、き裂が犠牲試験片端に達するまでこれを続けた。なお、き裂長さの計測には読み取り顕微鏡を用いた。載荷は完全片振りとし、60MPa、80MPa、120MPaの3種類の応力振幅で行った。各応力振幅の応力比は上記の順に0.33、0.27、0.2である。応力振幅60MPaおよ



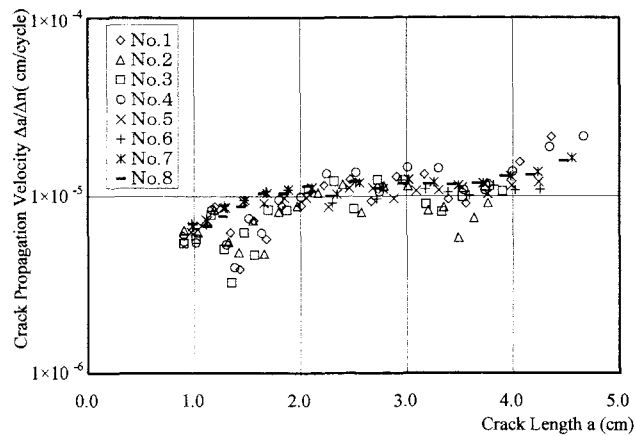


図-8 き裂長さと進展速度の関係
($\Delta\sigma=120\text{MPa}$)

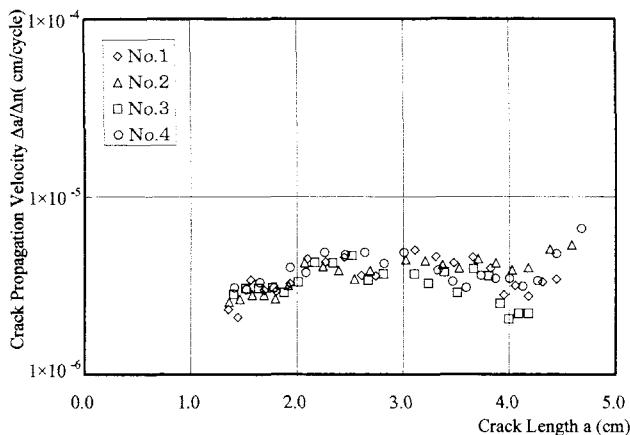


図-9 き裂長さと進展速度の関係
($\Delta\sigma=80\text{MPa}$)

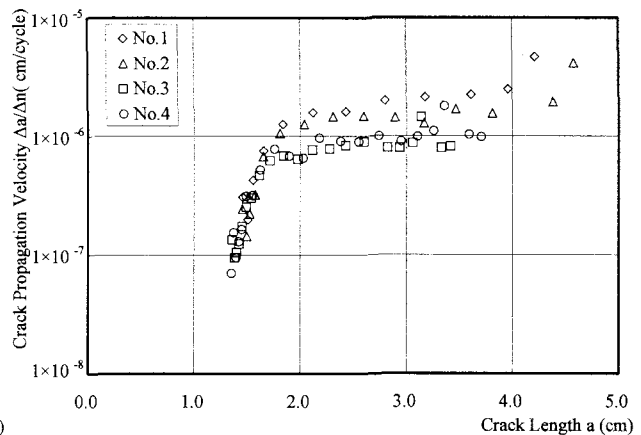


図-10 き裂長さと進展速度の関係
($\Delta\sigma=60\text{MPa}$)

び 80 MPa の試験は 1 シリーズ (犠牲試験片 2 枚)、
応力振幅 120MPa の試験は 2 シリーズ (犠牲試験片
4 枚) 行った。

4.2 実験結果

各応力振幅でのき裂長さ a とき裂進展速度 da/dN の関係を図-8~10 に示す。図中、No.1 と No.2 は主材の表に取付けた中央切り欠き入り薄鋼板の左右それぞれのき裂のき裂進展速度、No.3 と No.4 は主材の裏に取付けた中央切り欠き入り薄鋼板の左右それぞれのき裂のき裂進展速度である。図-8 中の No.5~8 は、第 2 シリーズでの同様のき裂進展速度である。

先に述べたように、変位拘束型応力拡大係数はき裂成長の影響を受けないため、一定変位振幅のもとではき裂進展速度は一定となる。よって、実験結果のき裂進展速度が一定となる範囲が適用範囲となる。結果によると、各応力振幅とも片側き裂長さが 2cm から 4cm の範囲では進展速度がほぼ一定である。き裂長さが片側板幅の 2/5 に相当する 2cm 以下の範囲では、き裂長さが短すぎるため、き裂長さが半無限の条件を満たしていないためであると考え

られる。また、板端部から板幅の 1/5 に相当する 1cm 以内の範囲では、き裂前方の部材幅が短すぎるため、き裂前方の部材の領域が半無限の条件を満たしていないためであると考えられる。

これにより、本研究で用いた幅 10cm の薄鋼板を用いた犠牲試験片においては、片側き裂長さが 2cm から 4cm の範囲が適用範囲とすることにより、犠牲試験片の感度が一定となり、疲労損傷パラメータの推定が非常に簡便となる。

5. 一定荷重振幅下でのき裂進展速度の検討

5.1 実験

(13)式を用いて犠牲試験片のき裂進展量 a より疲労損傷パラメータを求める場合、3 章で求めた変位拘束定数 B の他に、材料により決まる定数 A および m を求める必要がある。これらの定数は、異なる応力範囲でのき裂進展速度を計測することによって求まる。そこで、実験によりこれらの定数を求めた。実験は、H 形鋼からなる桁の中央部対称となる位置に促進ジグに取り付けた犠

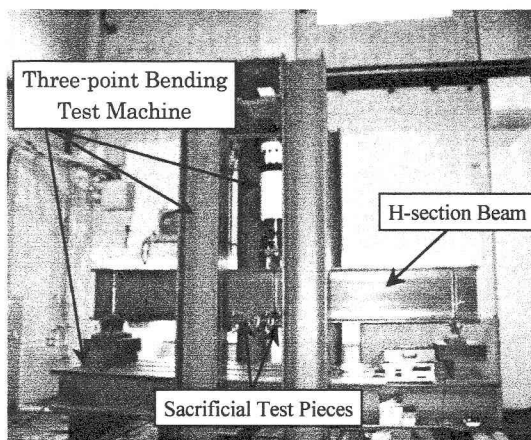


図-11 3点曲げ疲労試験機による
単調荷重疲労試験

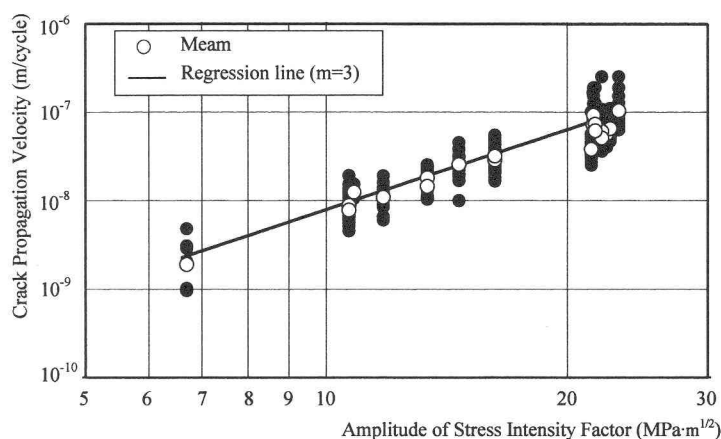


図-12 応力拡大係数範囲と
き裂進展速度の関係

犠牲試験片を2.1節で述べた方法で取り付けた。促進ジグの寸法も図-2と同様である。この桁に500kN三点曲げ疲労試験機により繰り返し荷重を載荷した。実験の様子を図-11に示す。

犠牲試験片に用いる薄鋼板の機械的性質の違いによるき裂進展特性の違いを調べるため、製造ロットの異なる2種類の薄鋼板を用い、1シリーズに犠牲試験片4セットずつ、5シリーズの実験を行った。Series 1, 3, 4が同ロット、Series 2, 5が同ロットの薄鋼板を用いている。

Series 1~3は、一定荷重振幅でほぼ1万回繰返した後にマイクロスコープでき裂の進展量を計測する事を10~15回行い、その後、桁に作用する応力範囲 $\Delta\sigma_B$ を変えて同様の計測を2,3回繰返した⁷⁾。

Series 4,5は、き裂先端に貼付したピッチ0.5mm、有効長さ20mmのクラックゲージによりき裂長さを計測した。

なお、Series 1~3には、3章と同様の断面600×300×12×19mm、支点間長さ4,000mmのH形鋼を桁部材として用い、Series 4,5には、断面488×300×11×18mm、支点間長さ4,000mmのH形鋼を桁部材として用いた。また、Series 2の試験片No. 2は取付け時に損傷したため省いている。

5.2 実験結果

各疲労荷重振幅から計算される応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係を図-12に示す。ロットの異なる2種類の薄鋼板ではき裂進展特性に大きな差異は見られなかったため、図中では区別していない。材質・形状が同じであれば共通の値を用いて良いと考えられる。

IIW¹¹⁾やJSSC¹²⁾の疲労設計指針をはじめとした多くの疲労設計指針において m は3として組み立てられている。そこで、 $m=3$ を固定して回帰式を求めると、

$$\log(da/dn) = 3.000 \cdot \log(\Delta K) - 11.148 \quad (19)$$

が得られる。図中の実線が(19)式の回帰直線である。実験結果はこの回帰直線と非常によく一致している。よって、薄鋼板のき裂進展においても $m=3$ としたパリス則(6)式が成り立っており、薄鋼板を用いた犠牲試験片の m 値として3を用いても問題ないと考えられる。そこで、定数 A を求めるための回帰直線として(19)式を用いることとし、(19)式を(6)式の形に変形することにより $A = 7.94 \times 10^{-12}$ が得られる。

以上により、薄鋼板を用いた犠牲試験片のき裂進展実験により、き裂進展速度から求めるべき定数、 $m=3$ と $A = 7.94 \times 10^{-12}$ が求められた。

6. 一定荷重下での犠牲試験片の適用性

3~5章において、(13)式を用いて疲労損傷パラメータを求めるための定数および薄板を用いた犠牲試験片の適用範囲が求められた。これにより、き裂の進展量のみから疲労損傷パラメータが計算できる。そこで、5章の一定荷重振幅下におけるき裂進展速度実験のデータから、応力振幅毎のき裂進展量から求めた疲労損傷パラメータ(Sacrificial Test piece)と、実際に計測した応力振幅と繰返し回数から計算した疲労損傷パラメータ(Stress Measurement)を比較した。試験シリーズ毎に図-13~17に示す。また、全シリーズの結果を横軸に応力振幅毎のき裂進展量から求めた疲労損傷パラメータを、縦軸に応力振幅と繰返し回数から計算した疲労損傷パラメータで整理したものが図-18である。

Series 1~3では、梁中心から犠牲試験片までの距離を4つの試験片であわせているため応力振幅は4つの試験片すべて等しいが、Series 4と5では、犠牲試験片の取付け位置がそれぞれ若干ずれているため、応力振幅が多少異なっている。また、き裂進展量から疲労損傷パラメータを求める際に用いる応力増幅率 α は、計算上は4.3程度となるが、今回の実験では一定振幅荷重載荷前に桁および犠牲試験片に貼付したひずみゲージによりあらかじめ求めた。Series 1~3の場合 Series 1~3でのすべての試験片での平均値

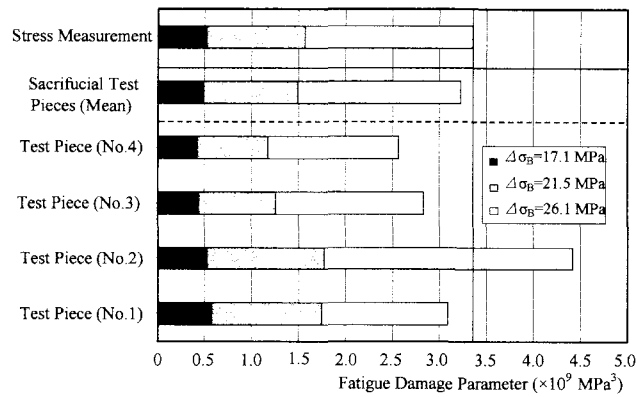


図-13 疲労損傷パラメータの比較
(Series 1)

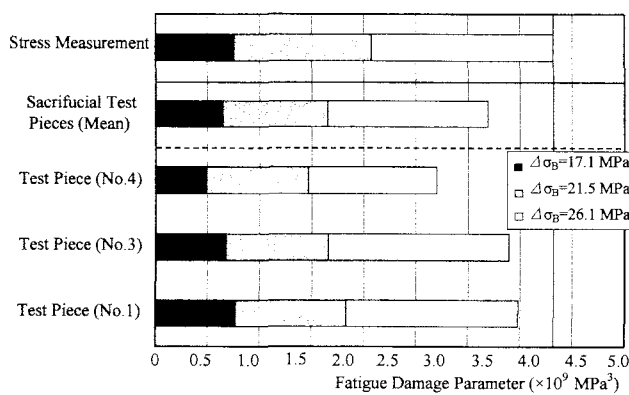


図-14 疲労損傷パラメータの比較
(Series 2)

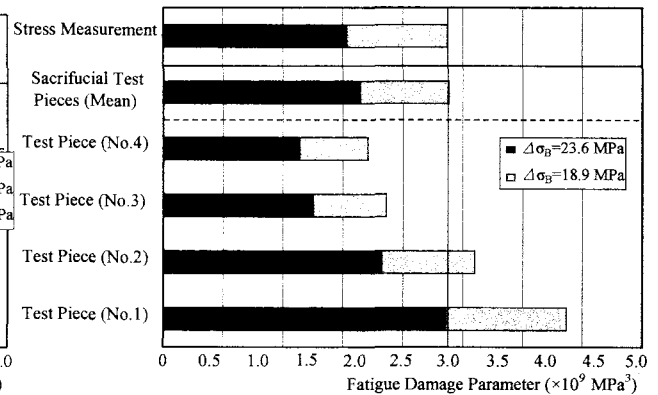


図-15 疲労損傷パラメータの比較
(Series 3)

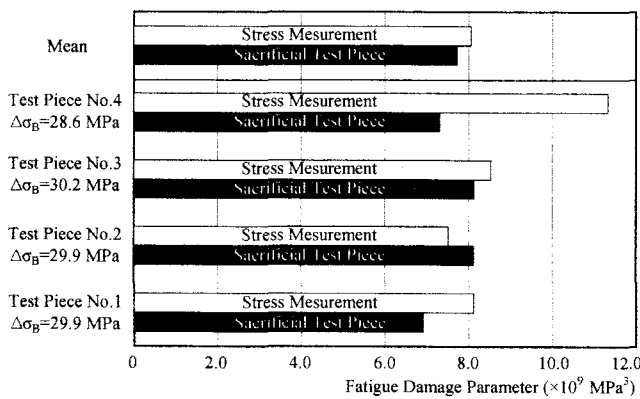


図-16 疲労損傷パラメータの比較
(Series 4)

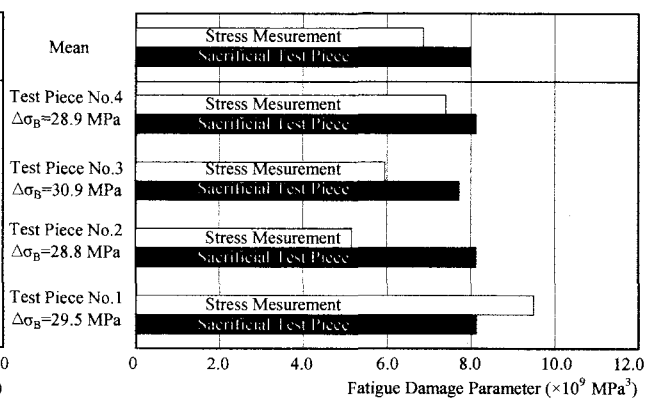


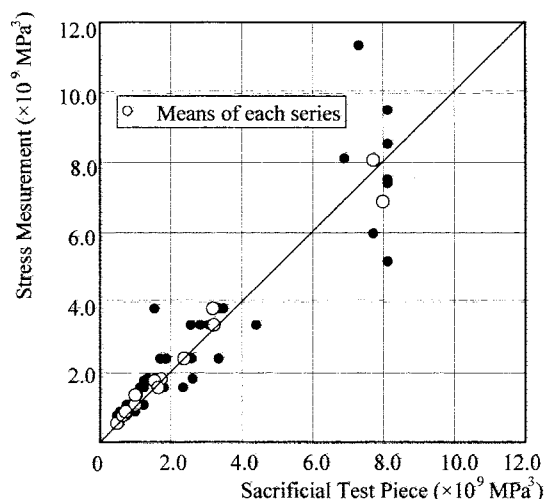
図-17 疲労損傷パラメータの比較
(Series 5)

$\alpha = 2.55$ を、Series 4,5 では Series 4,5 でのすべての試験片の平均値 $\alpha = 2.75$ を用いた。これらのばらつきは、取り付け方法によって生じると考えられるため、応力増幅率 α の安定した取り付け方法が今後の課題である。

各シリーズともに多少ばらつきは見られる。これは、試験片毎に応力増幅率 α がばらついていること、および桁にねじれが生じていることの影響が考えられる。しかし、両者の推定値は疲労損傷パラメータの推定値としては比較的良くあっているといえる。特に、

シリーズ毎の試験片の平均値は、すべての疲労損傷パラメータの値の範囲でよい精度で一致している。

これにより、一定振幅荷重下においては本手法が成立し、本犠牲試験片による疲労損傷パラメータの推定が実用的な範囲で可能であることが確かめられた。



図一18 疲労損傷パラメータの比較
(ALL)

7. 結言

容易かつ安価に疲労損傷パラメータを推定するための中央切欠き入り薄鋼板を用いた犠牲試験片による推定手法と、測定精度と測定期間を自由に調整するため促進ジグおよび実橋梁に適用するための取付け方法を提案し、推定に必要な定数と適用範囲を実験により求めた。さらに、一定振幅荷重下における本手法によるモニタリングの妥当性について検討した。

得られた知見は以下の通りである。

- (1) 実橋においても、提案した促進ジグおよび温度差と高張力万力を用いた取り付け方法によって犠牲試験片に作用する応力が増幅され、プレテンションが導入されることが確かめられた。また、板厚 0.5mm、板幅 100mm の薄鋼板を犠牲試験片として使用する場合、促進ジグを用いた場合の犠牲試験片き裂先端の応力拡大係数と応力との比例定数 B が、犠牲試験片の全長 L とポアソン比 ν を用いて、

$$B = \sqrt{1-\nu^2} \sqrt{0.5L-0.84}$$
 で与えられる。
- (2) 中央切り欠き入り薄鋼板を用いた犠牲試験片では、板中央から片側板幅の $2/5$ の範囲と、板端部から片側板幅の $1/5$ の範囲を除いた $2/5$ の範囲が“帯板の平面応力状態での変位完全拘束型応力拡大係数”の適用範囲であり、この範囲内では犠牲試験片の感度はき裂長さによらず一定である。よって、本研究で用いた片側板幅 5cm の薄鋼板の場合、片側き裂長さが 2cm から 4cm の範囲が疲労損傷パラメータを推定するための適用範囲である。
- (3) 犠牲試験片の薄鋼板のき裂進展においても $m=3$ としたパリス則が良い精度で成立し、き裂進展速度から求まる定数 $A = 7.94 \times 10^{-12}$ を得た。

- (4) 応力振幅と繰返し回数から計算される疲労損傷パラメータと、研究により得られた定数とき裂長さから得られる疲労損傷パラメータの比較を行った。その結果、一定振幅荷重下においては、薄鋼板のき裂長さによる疲労損傷パラメータの推定が実用的な範囲で可能であることがわかった。特に、評価対象部材に犠牲試験片を 4 セット取付け、それらのき裂進展量の平均値を用いて推定すると良い精度で推定できる。

謝辞

本研究の一部実験に協力頂いた田口達也氏（現経済産業省）、向井信吾氏（現岩水開発）、堀健吾氏（現大阪市）、中辻義弘技官（大阪大学接合科学研究所）に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 松田博和, 村岸治, 仁瓶寛太: 疲労センサによる実構造物の余寿命評価, 溶接構造シンポジウム 2004 講演論文集, p.105-116, 2004.11
- 2) 森猛, 公門和樹, 小高弘行, 成本朝雄, 阿部充: 疲労損傷度モニタリングセンサーの高感度化, 日本溶接学会第 201 回溶接疲労強度研究委員会, 講演会資料 FS-1092-04, 2004.4
- 3) 伊藤久, 藤本由起夫: 基礎継手疲労試験による疲労センサーの適用性の検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会, P.875-876, 2003.9
- 4) 藤本由起夫, 伊藤久, 新宅英司: 溶接構造物の疲労損傷予測のための高感度犠牲試験片の開発, 溶接構造シンポジウム 2002 講演論文集, p.509-516, 2002.11
- 5) 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, I-A209, p.418-419, 1999.9
- 6) 崎野良比呂, 堀川浩甫, 田口達也: 累積疲労荷重推定に用いる犠牲試験片のき裂進展特性, 溶接構造シンポジウム 2002 講演論文集, p.517-520, 2002.11
- 7) 向井信吾, 崎野良比呂, 坂田誠一郎, 堀川浩甫: 犠牲試験片のき裂進展特性が累積疲労荷重の推定精度に与える影響, 溶接学会全国大会, 講演概要第 66 集, p.448-449, 2000.9
- 8) 森猛: 繰返し荷重を受ける溶接構造物の寿命予測, 溶接学会誌, 8(66), p.6-10, 1997
- 9) 大倉一郎: 鋼橋の疲労, 東洋書店, 126p, 1994
- 10) 岡村弘之: 線形破壊力学入門, 倍風館, 219p, 1976
- 11) INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING: IIW Fatigue Design Recommendations, XIII-1539-94 / XV845-94, 1994.9
- 12) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.4

(2004 年 9 月 17 日受付)