構造物の疲労損傷予知のための犠牲試験片の開発

正員 藤本 由紀夫* 正員 新宅 英司*
 正員 濱田 邦裕* 藤井 堅*
 学生員 黄 飛** 西川 貴則****
 藤井 健二***

Development of Sacrificial Specimen for Fatigue Damage Prediction of Structures

by Yukio Fujimoto, *Member* Eiji Shintaku, *Member*
 Kunihiro Hamada, *Member* Katashi Fujii*
 Hi Huang**, *Member* Takanori Nishikawa****
 Kenji Fujii***

Summary

Sacrificial specimen is a small sized fatigue specimen which is designed so that fatigue crack may be produced in the specimen sufficiently earlier than in the structural member when it is fixed to the structural member. The purpose is to predict a timing at which fatigue damage will actually appear in a structural member on the basis of information obtained by monitoring a fatigue damage condition of the sacrificial specimen.

The main body of the sacrificial specimen developed in this study is a thin plate which has an artificial crack in the center of the specimen. The main body has a length of 60 mm, a width of 10 mm and a thickness of 0.25 mm and is made of the same material as the structural member. Very thin Teflon film is wound around the central portion of the main body including the artificial crack. After that, the main body is sandwiched between two thin epoxy resin plates and cemented together by means of adhesive agent. The total thickness of the completed sacrificial specimen is about 1 mm.

The sacrificial specimen is cemented on the surface of smooth specimen and notched specimen using the same adhesive agent, and fully reversed fatigue tests are carried out under axial loading. It is found that the developed sacrificial specimen shows good performance in the fatigue test. Followings are made clear throughout the fatigue test.

- 1) Buckling and peeling do not take place during the fatigue test under the fully reversed stress amplitude.
- 2) Stress concentration factor of sacrificial specimen is about 5.0 for crack initiation life. Fatigue life prediction is possible when it is applied to the location at which stress concentration is less than 5.0.
- 3) The sacrificial specimen has an enough monitoring period from crack initiation to failure.

1. 緒 言

疲労損傷は構造物に比較的多く生じる損傷であるが、その正確な損傷時期の予測は、疲労メカニズムの複雑さ、疲労寿命が外力に敏感なこと、構造解析精度の問題などから非常に困難とされている。このため最近、疲労安全性に対する使用中検査¹⁾や疲労モニタリングへの関心が高まってきている^{2),3),4),5)}。その意図するところは、疲労損傷を早期に発見する、あるいは的確に予知することにより、合理的な

* 広島大学工学部

** 広島大学国際協力研究科

*** 広島大学大学院工学研究科

**** 広島県庁（研究当時広島大学大学院工学研究科）

メンテナンスを行う点にある。また、検査やモニタリングで得られた情報を将来の設計改良にフィードバックしようという点も重要である。

本研究は疲労損傷モニタリングの一つである、犠牲試験片取付け法について検討を行ったものである。犠牲試験片取付け法とは、構造部材の応力が拡大伝達されるように工夫した小型試験片を、構造物のホットスポット近傍に設置して一定期間モニタリングを行い、犠牲試験片に生じた疲労損傷の状態から、構造物の疲労損傷時期を推定する方法である。この考えは従来から提案されているが、実用可能な犠牲試験片が開発されていない。そこで筆者らは文献^{6,7)}において、部材表面に接着で取付ける方式の犠牲試験片を新しく提案した。

本研究では形状をそろえた犠牲試験片を多数作製し、構造物の疲労損傷予知への適用性を検討する目的で、平滑材、切欠き材および橋桁モデルに犠牲試験片を設置して疲労試験を行った。本研究はまず、試作した犠牲試験片の構成と、犠牲試験片を用いた構造物の疲労寿命の予知手法について説明する。次に疲労試験を通じて得られた知見に基づいて、犠牲試験片の特性と問題点を明らかにする。

2. 犠牲試験片取付け法

疲労信頼性確保には図1に示すように、亀裂検出法（疲労亀裂を早期に検出、補修することにより安全性を維持する方法）と疲労予知法（将来の疲労損傷の発生時期を予知して、合理的な保守点検或使用期間決定を行い安全性を確保する方法）とがある。犠牲試験片取り付けは亀裂予知法にあたる。

犠牲試験片取付け法とは、構造部材の応力が拡大伝達されるよう工夫した小型試験片を、構造物のホットスポット近傍に設置して一定期間モニタを行い、犠牲試験片に生じた疲労損傷の状態から、構造物の疲労損傷時期を推定する方法である。

この考えは従来からあったが、実用可能な犠牲試験片が

Fig.1 Several means available for sustaining fatigue safety.

開発されていない。犠牲試験片を構造物にボルトや溶接で接合する方法は、構造物に余計な応力集中箇所を生む恐れがあること、また設置時の残留応力の問題が生じる。一方、接着で取付ける方法は構造物に無害であるが、以下のいずれかの問題が実用化のネックとなっている。

- 1) 犠牲試験片は構造物のホットスポット近傍に設置するため小型のものが望ましい。しかし小型のもののほど接着で伝達できる荷重は小さい。その結果、接着部強度が不足し、接着部に剥離などを生じやすい(接着強度の問題)。
- 2) 接着部の負担を軽減するために、犠牲試験片の断面積を小さくすると、十分な応力集中が得られなかったり、亀裂発生から破断までの期間がごく短い形状となり、モニタリング期間が限定される(応力集中の確保とモニタリング期間の問題)。
- 3) 犠牲試験片と構造物の素材が異なる場合、犠牲試験片の疲労寿命が得られたとしても、素材の疲労特性の差異から、構造物の寿命を推定することは困難である(累積被害則の問題)。
- 4) 犠牲試験片は引張と圧縮の両歪が作用するが、圧縮歪に対する犠牲試験片の座屈防止対策が困難な場合がある(座屈の問題)。

本研究ではこれらの問題を克服できる犠牲試験片を開発する。

3. 提案する犠牲試験片

3.1 犠牲試験片の形状と構成

犠牲試験片は実構造物に設置して、1ヶ月から1年間程度モニタを行い、試験片に生じた疲労損傷状況から、構造物の損傷時期を予知することを目的とする。提案する犠牲試験片では次の事柄を考慮した。

- 1) 犠牲試験片本体に構造部材と同一材料を用いることにより、素材の疲労特性を一致させる。
- 2) 犠牲試験片の取付けは接着とし、部材表面に設置したとき凹凸が少ない構造とする。
- 3) 犠牲試験片の断面積を小さくし接着部剥離を防止する。同時に座屈を防止する工夫をする。
- 4) 犠牲試験片の断面積が小さくても、高い応力集中が確保でき、ホットスポットよりも早期に疲労損傷が生じる形状とする。
- 5) 疲労の進行状態をモニタするため犠牲試験片は亀裂伝播型とする。また進行状態を見落とさないように、長い亀裂伝播期間が確保できる形状とする。

本研究で提案する犠牲試験片の構成を図2に示す。また犠牲試験片の適用イメージを図3に示す。

- 1) 犠牲試験片本体は、中央に人工亀裂を有する薄い平板(約0.25 mm厚さ)である。左右の穴は樹脂をピンとするピン穴である。
- 2) 本体には構造物と同じ素材を用いる。薄板加工はワイ

Fig. 2 Shape and dimension of sacrificial specimen.

Fig. 3 Application image of sacrificial specimen to structural members.

ヤカット（放電加工）で行う。人工亀裂とピン穴もワイヤカットで加工する。その後表面をエメリー紙で研磨して仕上げる。

- 3) 犠牲試験片の人工亀裂を含む中央部 20 mm の間を透明のテフロンフィルムで巻く。テフロンフィルムは樹脂と接着されないで、この部分は接着後も独立して伸縮できる。
- 4) 2 枚の透明エポキシ樹脂薄板を作製し、その間に犠牲試験片を挟んで接着する。接着には樹脂板と同じ樹脂（コニシポンド E セット M）を使用した。接着後の犠牲試験

片の全体厚さは約 1 mm である。

- 5) エポキシ樹脂板に挟んで接着するのは、犠牲試験片をたるみ無く部材に接着するため、圧縮歪による犠牲試験片の座屈を防止するため、および極薄い犠牲試験片本体の取扱いを容易にするためである。
- 6) 接着材が乾燥した後、長さが約 70 mm、幅が約 20 mm の大きさに切り出す。
- 7) これを構造部材のホットスポット近傍に接着して使用する。接着には同じエポキシ樹脂を用いる。亀裂伝播は現場顕微鏡などを用いて透明樹脂の上から観察する。
- 8) なお、犠牲試験片のサイズ、人工亀裂長さ、テフロン巻き部分の長さ、樹脂板の厚さを変化させることにより、犠牲試験片への荷重伝達率と応力集中率を変化させることができる。

3.2 犠牲試験片を用いた寿命推定法

図 4 に犠牲試験片の疲労損傷状況から、構造物の疲労損傷時期を推定する手順を示す。犠牲試験片の設置箇所の部材応力を S 、ホットスポット部応力を $S_{\max}$ とし、ホットスポットの応力集中率 $K_{tm} = S_{\max}/S$ を定義する。犠牲試験片の人工亀裂先端に生じる応力振幅 $\sigma_{\max}$ が $S_{\max}$ より大き

Stress distribution near hot spot

S-N curve of structural member and sacrificial specimen

Fig. 4 Fatigue life estimation of structural members using sacrificial specimen.

ければ、犠牲試験片に亀裂が早期に発生伝播する。

K_{tm} は構造解析あるいは歪計測により明らかにし、事前にS-N線図を予測しておく。犠牲試験片は平滑材に設置して疲労試験を行い、S-N線図を求めておく。犠牲試験片に損傷が生じたときの荷重繰返し数 N_{sac} を犠牲試験片のS-N線図に代入すると応力振幅 S が求まる。この S を構造部材のS-N線図に代入すると、ホットスポット寿命 $N_{Memb.}$ を推定できる。

変動応力振幅下でも、構造部材が受ける荷重頻度分布(例えば指数分布)のもとで疲労試験を行い、犠牲試験片S-N線図と構造部材のS-N線図の寿命の比率を実験的に求めておけば、同様の寿命推定が可能と考えられる。ただしこの場合、犠牲試験片が破断するまでに受ける荷重頻度分布が、構造部材に作用する長期荷重頻度分布と同一な分布とみなせるかどうかの判断が必要である。

このように犠牲試験片取付け法による寿命推定は、累積被害則を介入させることなく、S-N線図から直接的に構造物の寿命を推定する点に特徴がある。なお、犠牲試験片を挟んだ樹脂は、犠牲試験片が破断した後も損傷を生じないため、犠牲試験片破面の清浄性が保たれる。その結果、破面のストライエーション間隔の計測などを通じて構造物の荷重履歴も推定できる。

4. 疲労実験

構造物には部材によって、種々の応力比のランダム荷重が負荷される。一般には応力比 R が $R=-1.0$ から $+0.5$ 程度の範囲を考えておく必要がある。犠牲試験片は薄板であるため圧縮応力による座屈が懸念される。そこで本研究では、座屈に対して最も厳しい $R=-1.0$ の条件下で疲労実験を行うことにした。荷重はランダム荷重を考える必要があるが、まず一定応力振幅で実験することにした。

なお、エポキシ樹脂板の作製、接着および乾燥は全て室温で行い、犠牲試験片を接着後の乾燥期間は1週間以上とした。また、犠牲試験片の作製に用いたのと、同じエポキシ樹脂から平滑試験片を作製し、静的引張り試験を行った結果、今回作製した樹脂板のヤング率は約2.20 GPa、ポアソン比は約0.42であった。

4.1 平板試験片での実験

疲労試験は図5のように、犠牲試験片(SS 400材で作製)を平滑試験片(SS 400材)に貼付けて、完全両振り一定応力振幅の軸力で行った。荷重繰返し速度は1 Hzから5 Hzである。試験には10トンおよび20トンの油圧サーボ式疲労試験機を用いた。Photo 1は作製した犠牲試験片の写真である。

亀裂観察は犠牲試験片の透明樹脂の上から、倍率50倍のビデオカメラで、定期的に犠牲試験片の人工亀裂部を撮影しビデオテープに記録した。試験は犠牲試験片の人工亀裂から疲労亀裂が発生し、成長して最終的に犠牲試験片が破

Fig. 5 Adhesion of sacrificial specimen on the smooth specimen.

Photo 1 Sacrificial specimen.

断する時点まで行った。実験終了後、ビデオテープを観察して亀裂長さを測定した。図6は犠牲試験片の亀裂成長曲線の一例である。

実験した応力レベルは振幅にして、49 MPaから176 MPaの間である。この範囲で疲労試験中に犠牲試験片の接着部の剝離や座屈は全く生じなかった。また応力レベルが49 MPaの場合は亀裂が成長の途中で停留した(図6参照)。この理由は犠牲試験片が一定変位型に近いと考えられるが、詳細は明らかでない。

疲労試験結果を図7のS-N線図に示す。図中には犠牲試験片に長さ0.2 mmの亀裂が発生した時の繰返し数を●印、0.5 mmに達したときを◆印、および犠牲試験片が破断した時を★印で示している(左右の亀裂長さの平均値)。また文献から得た、SS 400材の平滑材および応力集中率が3.0の切欠き材のS-N線図も比較のため示している。

図より犠牲試験片の応力集中率は0.2 mmの亀裂発生に対して5程度あることがわかる。従って、 K_{tm} が3ないし4の箇所を設置すれば、構造部材よりも早期に犠牲試験片

Fig.6 Examples of fatigue crack growth curve of sacrificial specimen applied to smooth specimen.

に亀裂が生じ、ホットスポット寿命を予知できると考えられる。また犠牲試験片に0.2mmの亀裂が生じた後、破断するまでの期間が寿命にして1オーダー程度有り、十分長いモニタリング期間が確保できることがわかる。

以上の実験では犠牲試験片の本体厚さを0.25mmとしたが、本体の厚さが0.35mmの犠牲試験片も一部作製して同様の実験を行った。図8はその結果を示す。図より本体の厚さが0.35mmの場合の方が0.25mmの場合よりも寿命は長くなっている。これは犠牲試験片が厚くなると、接着部の荷重伝達率が悪くなるためと考えられる。このことは平行して行った有限要素法解析でも確認されている。

また有限要素法解析で、その他のいくつかの条件についても検討したところ以下の事柄が明らかになった。

- 1) 同一荷重条件の場合、テフロン巻き部長さが長いほど人工亀裂先端の応力は大きくなる。
- 2) 下層樹脂厚さは薄いほど荷重の伝達率が良い。
- 3) 上層樹脂厚さは人工亀裂先端の応力にあまり影響しない。

Fig.7 S-N curve of sacrificial specimen under fully reversed stress loading.
(thickness of sacrificial specimen : 0.25 mm)

Fig.8 S-N curve of sacrificial specimen under fully reversed stress loading.
(thickness of sacrificial specimen : 0.35 mm)

4.2 切欠き試験片への適用

犠牲試験片の構造物への適用性を検討するためには、構造要素モデルなどに設置した実験が必要である。そこで図

9に示す突合わせ溶接継手を模擬した切欠き試験片（切欠底半径は約0.8 mmで、応力集中率は約2.1）に、犠牲試験片を貼付けて疲労試験を行った。犠牲試験片は切欠きから離れているので、設置位置には応力集中は作用していない。荷重は軸力の完全両振り、荷重繰返し速度は1 Hzから2 Hzである。試験は犠牲試験片が破断した後も続行し、切欠き試験片が破断した時点で終了した。

図10のS-N線図は犠牲試験片と切欠き試験片の実験結果を示す。また図11は犠牲試験片の亀裂成長曲線を示す。切欠き試験片は犠牲試験片設置側と反対側の2箇所、亀裂発生可能性があるが、疲労亀裂は反対側から発生した。切欠き試験片の亀裂発生寿命は正確に捉えることが出来なかったため、破断寿命のみをプロットしてある。

図10を見ると犠牲試験片の寿命は、図7の3本の破線の

Fig. 9 Adhesion of sacrificial specimen on notched specimen.

Fig. 10 S-N curve of sacrificial specimen and notched specimen under fully reversed stress loading.

Fig. 11 Fatigue crack growth of sacrificial specimen applied to notched specimen.

上に良く乗っている。切欠き試験片の破断寿命は、応力集中率にして2.1付近にある事がわかる。また、犠牲試験片の破断寿命は切欠き試験片の破断寿命の約1/20である。0.2 mmの亀裂発生はそれよりさらに1オーダ短く、切欠き試験片の破断寿命の約1/200である。この寿命差は、

- 1) 犠牲試験片が1ヶ月で破断したとすると、切欠き試験片は約2年で破断する、
 - 2) あるいは、犠牲試験片に1ヶ月で微小亀裂が発生したとすると、約20年で切欠き試験片が破断する、
- という関係であり、疲労損傷予知に十分な差と考えられる。一般には溶接継手近傍の応力集中率が2から3程度の場所に犠牲試験片を設置すれば、継手の亀裂発生寿命の1/20から1/200の年数で犠牲試験片に亀裂が発生すると推測される。

4.3 橋桁モデルでの実験

犠牲試験片は、図12に示す長さ6 mの橋桁モデルに設置して4点曲げ疲労試験を行った。犠牲試験片は図中に示すように、長さ方向のほぼ中央部にあたる、下フランジ表

Fig. 12 Shape of bridge girder model and cracked locations after fatigue test.

Photo 2 Four points bending fatigue test using bridge girder model.

面に2枚貼付けた。荷重はフランジ下面が引張りになるように、完全片振りの曲げ応力範囲 105 Mpa（材料力学で得られる下フランジ表面の応力範囲）を荷重した。試験装置の写真を Photo 2 に示す。

荷重を約 20 万回繰返した時点で犠牲試験片に 0.2 mm の亀裂が発生し、数 70 万から 90 万回荷重した時点で犠牲試験片は 2 枚とも完全に破断した。亀裂観察はフランジ下面からルーペを用いて行い、大まかな亀裂成長曲線を求めた。図 13 はその結果と亀裂成長曲線を示す。

Fig. 13 Fatigue test result of bridge girder model.

荷重を 200 万回荷重した時点で、橋桁モデルの外面に疲労亀裂が発見されなかったため、内部を磁粉探傷で詳しく調べたが亀裂は発生していなかった。そこで応力範囲を図に示すように 151 Mpa に上げて試験を続けた。その結果、さらに 45 万回荷重した時点で、ダイヤフラムと下フランジの溶接止端部にフランジ内側から亀裂が 4 箇所発生し、そ

のうち2箇所はフランジ外面に貫通していた(図12参照)。

日本鋼構造協会では溶接継手のS-N線図の勾配に $m = -1/3$ を用いている。この勾配を考慮すると、応力範囲151 Mpaにおける45万回は、応力範囲105 Mpaに換算すると約150万回に相当する。すなわち応力範囲105 Mpaで試験が続行されたとすると、繰返し数350万回で橋桁モデルに亀裂が発見されたことになる。犠牲試験片の亀裂発生は約20万回であるから、橋桁モデルの寿命350万回の約1/17、犠牲試験片の破断寿命は約80万回で350万回の約1/4である。

以上述べたように、今回試作した犠牲試験片は3種類の試験で、いずれも安定した疲労特性を示した。作製にあたっては、できるだけ均一状態の接着を心掛けてはいるが精度的には問題もある。この点を規格化した製作を行えば一層信頼性の高いものになると考えられる。

5. 考 察

人工亀裂を設けた薄板を犠牲試験片として用いるアイデアは、従来から提案されている。しかしそれらは、犠牲試験片の片面のみを構造物に接着する方式を用いている。

片面のみを接着した場合、荷重は樹脂を介して片面のせん断力のみで伝達される。したがって圧縮荷重が作用するような条件下では、犠牲試験片は構造物と離れる側に面外変形を生じる可能性がある(図14参照)。また、片面のみを接着する方式には接着時の問題もある。接着強度を考えると犠牲試験片本体は自ずから薄くせざるを得ないが、このような薄板を構造物に曲げやたるみなく接着するのは、実際の問題としては容易ではない。図15に示すように少しでも曲げやたるみがあると、犠牲試験片には正確に荷重が伝達されない。

これに対して提案した犠牲試験片は、犠牲試験片本体が

Fig. 14 Possibility of out of plane bending deformation by the compressive loading.

Fig. 15 Possibility of initial bending deformation at the installation of sacrificial specimen.

平面のまま2枚の樹脂板に挟んで接着してあるので、現場で構造物に接着する場合に曲げやたるみを生じない。犠牲試験片自身の曲げ剛性も大きくなっているため、接着時の取り扱いも容易である。また荷重は構造物側の面だけでなく、反対側の面および4箇所のピン穴からも伝達される。つまり片面を接着する方法と比べて曲げ変形を生じにくい構造になっている。樹脂板は圧縮荷重が作用した際の面外変形を抑える役目も果たしている。

6. 結 言

本研究では疲労損傷を対象にした構造モニタリングとして、部材表面に接着で設置する方式の犠牲試験片を開発した。提案した犠牲試験片は、長さ60 mm、幅10 mm、厚さ0.25 mmの人工亀裂を有する薄板を本体とし、人工亀裂を含む中央部20 mmの間を透明のテフロンフィルムで巻き、さらに全体を2枚の透明エポキシ樹脂薄板に挟んで接着したものである。完成後の犠牲試験片厚さは約1 mmである。これを構造部材のホットスポット近傍に接着して使用する。設置後一定の期間、犠牲試験片の亀裂成長をモニタリングし、犠牲試験片に生じた疲労損傷の様子から構造物の疲労損傷時期を予測する。

犠牲試験片は平板試験片、切欠き試験片および橋桁モデルに設置し、疲労試験を行ってその性能を検討した。得られた主な結果は次のようである。

- 1) 試作した犠牲試験片は平板試験片、切欠き試験片、橋桁モデルで全て期待した疲労特性を示した。
- 2) 完全面振りの軸力疲労試験において、犠牲試験片は応力振幅が50 MPaから180 MPaの範囲で座屈や剥離を生じることなく機能する。
- 3) 犠牲試験片の応力集中度は亀裂発生に対して約5程度あり、応力集中度が2から4程度の部材に設置すれば、疲労損傷予知に使用できる。

4) 試作した犠牲試験片は、亀裂発生から破断に至るまでの伝播時間が長いので、十分なモニタリング期間が確保できる。

なお今後の課題として、犠牲試験片の小型化と、より低応力振幅下でも機能するものに改良することがあげられる。

謝辞

本研究の一部は、日本造船研究協会第 SR 233 研究部会 WG 3 での分担研究として実施したものである。部会長、東京大学工学部伏見彬教授、WG 3 主査、九州大学工学部香川洸二教授を始め、有益なご討論をいただいた委員の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Goranson, W. G., Rogers, J. T.: Elements of damage tolerance verification, Proc. 12th int. committee on aeronautical fatigue symposium, (1983), pp. 1. 8/1-8/50.
- 2) Marshall, P. W., Larrabee, R. D., Burk, J. D., and Egan, G. R.: The Cognac Fatigue Experiment, OTC 4522, (1983), p. 83-92.
- 3) Gerardi, T. G.: Health Monitoring Aircraft, US-Japan Workshop on Smart/Intelligent Materials and Systems, (1990), pp. 82-93, Technomic.
- 4) Smith, B.: Fatigue Indicators, Proc. of Conf. on Fatigue of Welded Structures, The Welding Institute, Vol. 2, (1970), pp. 369-384.
- 5) 藤本由紀夫他：船舶のヘルスマニタリング・システムに関する研究，日本造船学会論文集，第 174 号，(1993)，pp. 697-705.
- 6) 藤本由紀夫，新宅英司，金成燦，高本大世，構造モニタリングによる疲労損傷の感知と予知，日本造船学会論文集，第 178 号，(1995)，pp. 523-533.
- 7) Fujimoto, Y., E. Shintaku, E., Kim, S. C.: Structural Monitoring for Fatigue Crack Detection and Prediction, Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 4, (1996), pp. 227-235.