Uリブすみ肉溶接のルートき裂を対象とした板曲げ疲労試験

Plate bending fatigue tests for root crack of trough rib of orthotropic steel deck

山田健太郎,Ya Samol Kentaro YAMADA^{*},Ya Samol^{**}

*PhD,名古屋大学教授,環境学研究科都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) **工修,名古屋大学大学院博士課程後期課程,環境学研究科都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Fatigue tests were carried out for fillet-welded specimens simulating fatigue cracks emanating from fillet weld root and propagating to deck plate of orthotropic steel deck. A newly developed fatigue testing machine for plate bending was used for the specimens of 300mm wide. Fatigue cracks initiated and propagated from root and propagated perpendicular to the applied stress to penetrate the deck plate in semielliptical shape. Failure occurred when crack from other side of deck plate of about 2 mm long joined the crack from the root. The test data was compared with previous test results of similar type. The one mm method was used to predict S-N curves of such details of different configurations. The test data was summarized as S-N diagram to be used for fatigue life predictions of existing orthotropic steel decks.

Key Words: orthotropic steel deck, fatigue test, deck plate, trough rib, fatigue crack キーワード: 鋼床版,疲労試験,デッキプレート,Uリブ,疲労き裂

1. はじめに

本論文では、鋼床版のデッキプレート貫通型の疲労き 裂を再現する板曲げ疲労試験を行った結果を報告する. この種の疲労き裂に対しては、この数年各所で実物大モ デルの疲労試験や実橋での応力測定が行われている.こ こでは、幅 300mm の試験体を用いて板曲げ疲労試験を 行い、その U リブのすみ肉溶接ルートからの疲労き裂 の発生・進展挙動を把握するとともに、疲労寿命予測に 用いる基本的な S-N 線図を求めた.また、過去の実験 値と比較するとともに、板曲げを受ける場合の 1mm 法 による疲労強度の予測方法についても検討した.

鋼床版は、コンクリート床版に比べて軽量であること から、わが国では長大橋や都市内高架橋に多く用いられ てきた^{1,2)}. 1980 年代には、本四架橋のための鋼床版の 研究に基づいてUリブを用いた鋼床版の構造詳細が提案 され、その後部分的な修正を加えて、標準的な構造とし て多用されてきた. すなわち、板厚 6mmか 8mmのUリ ブを、板厚 12mmのデッキプレートにすみ肉溶接した構 造である. 通常、70~80mmのアスファルト舗装がその 上に設置される. Uリブは閉断面であるためねじり剛性 が期待でき、またUリブの外側を片側すみ肉溶接するの で、バルブプレートやフラットプレートを用いる開断面 リブより溶接量が減り経済的な設計が可能になる.初期 の頃のUリブのすみ肉溶接は、必要な脚長を確保する観 点で規定が作られていたが、その後Uリブの板厚の 75%以上の溶け込み量の基準が設けられた.このよう な鋼床版のディテールに対しては、道路橋示方書では疲 労耐久性が確保されているとみなして、疲労照査を省略 できる構造としている^{1.2)}.



写真-2 疲労き裂が発生した部位の舗装の状況

2000 年代に入ってUリブとデッキプレートの溶接部か らデッキプレートを貫通する形の疲労き裂の発生が報告 されるようになった^{4,18)}. 写真-1 の例では,舗装が写 真-2 のように劣化したので部分打ち替えのために舗装 をはがした段階で疲労き裂の存在が分かった.舗装は網 目状に割れているが,舗装の下の疲労き裂は,舗装をは がすまで見えない.また,この疲労き裂はUリブの内側 から発生・進展するため,鋼床版下面からも見ることが できない.目視点検に代わる非破壊検査手法の適用も研 究されているが,検出精度や点検すべき溶接延長が長い などの問題があり、実用化には少し時間がかかる⁵⁾.

この種の疲労き裂の発生原因や補修・補強対策に関し ては、土木研究所や国総研、高速道路会社、橋建協など が実物大モデルによる疲労試験や実橋の応力計測、解析 などを行って検討が進んできている^{4,10,11,12,16)}.この研 究では、これらの研究との比較や、計測などで既設鋼床 版の耐久性を評価する場合に必要な継手の基本的な疲労 挙動やS-N線図について、板曲げ疲労試験を行って検討 した.

2. 疲労試験体の製作と疲労試験

2.1 Uリブとデッキプレートのすみ肉溶接試験体の形状

疲労試験体は、デッキプレートが輪重載荷により板曲 げを受けることをモデル化したもので、その概念を図-1 に示す.疲労き裂は、図-1に示すようにルートから デッキプレート方向に進展するき裂①と溶接ビード方向 に進展するき裂②があり、本研究では、デッキプレート 方向に進展するき裂を対象としている.これは、FEM 解析の結果、デッキプレート貫通型の疲労き裂の発生、 進展には、デッキプレートの曲げが支配的になることを 反映したものである⁸⁾.試験体の形状と寸法を図-2、 3 に示す.鋼床版のデッキプレートを模した板厚 12mm, 幅 300mmの主板に、Uリブの板厚 6mmと 8mmに相当す るリブを角度 78°ですみ肉溶接したものである.

試験体は、2回に分けて製作した. 図-2は、応力範囲比 R=-1(両振り)、図-3は R=0(片振り)で実験したもので、後者は試験体の縁に予荷重を載荷するコイルばねとロッドを設置するための長孔がある. 鋼材は JIS G3106 SM400Aを用いた. その機械的特性と化学成分は付録1に示した.

すみ肉溶接は,道路橋示方書の仕様を満たすように, Uリブ板厚の 75%の溶け込みを目標とした¹⁾.溶接は, 必要な溶け込み量を得るため開先をとり,炭酸ガスアー ク溶接(溶接棒はYM26)で溶接した.また,デッキプ レートとリブの間は 0.5mmあけた状態で溶接し,脚長 は 6mmとした.溶接する際には,両端にエンドタブを 用いて,溶接の開始点と終点(始終端)が試験体に残ら ないようにした.溶接では,図-2,3に示すように, 30mmの長さの組立て溶接(仮付け溶接, tack welds)を 用いた.疲労き裂の発生や進展に影響を及ぼすことも考 えられるので,その位置は試験体に示した.なお,実橋 では,組立て溶接の長さは40mm以上とする.

試験体の名称は、デッキプレート厚 12mm、リブ厚 6mm と 8mm を用いて、例えばリブ厚 6mm の試験体は D12R6 試験体とした.



2.2 疲労試験の概要

疲労試験には、簡便な板曲げ振動疲労試験機を用いた. この試験機は、偏心錘を回転させる市販の加振機を用い て試験体に繰返し応力を発生させるもので、図-4にそ の概略図を示す¹⁷⁾.右側に逆L形の治具と台の間にコイ ルばねを取り付け、そのコイルばねで下方に押すことで 試験体に静的な曲げ(予荷重)を与えて、片振り疲労試 験を可能にした.最初のR=-1(両振り)の実験では、 この予荷重のシステムを使っていない.

実際のUリブは閉断面であり、図-4に示す部分リブ とは拘束条件は異なる.ここで用いた試験体は、デッキ プレートの曲げ応力範囲をあわす試験体となっている. Uリブに作用する曲げ応力も作用させると、より実橋に 近くなるが、その値は輪重の走行位置によっても異なる. Uリブからの力がデッキプレート貫通型の疲労き裂に及 ぼす影響は、デッキプレートの曲げの影響に比べて10% 以下であることを、FEM解析によって確認している¹⁹⁾.

この試験機は、荷重制御ではないため、実際に試験体 に発生する応力範囲の動的な計測が必要となる.そこで ひずみ範囲を、図-2、3に示した位置に貼ったひずみゲ ージで計測した.ゲージ長1mmのひずみゲージを、R= -1の試験体では4枚、R=0の試験体では8枚貼って計測 した.これらは、疲労試験中の応力範囲の確認、疲労き 裂の発生と進展状況の把握、および溶接残留応力の分布 を推定するために用いた.さらに、この試験では、イン ターバルタイマーを製作して、疲労試験中の8~15分

(20Hzの載荷速度で1~2万回程度の繰返し数)に2秒程 度ひずみ波形を計測した.疲労試験中のひずみを連続計 測するとデータ量が膨大になるが、この方法によってデ ータ整理が簡略化された.



図-4 板曲げ振動疲労試験機の概要

2.3 疲労き裂の発生・進展挙動の追跡

疲労き裂の発生・進展挙動は、継手の疲労挙動を調べる上で、重要な情報となる.そこで、ダイマーク試験と ビーチマーク試験を併用して、疲労破面に痕跡を残すこ とを試みた.また、試験体の裏面に銅線(0.04mmφ) を貼って、疲労き裂が板厚を貫通したら試験機を停止さ せるようにした.ダイマーク試験については,対象にし ている疲労き裂が溶接ルート部から発生し,リブの端か ら 2mm 程度奥まった位置の疲労き裂であることから, インクが十分に疲労き裂に浸透しなかった.このため, 破断面にダイマークはほとんど残せなかった.また,ビ ーチマーク試験では,試行的に,応力範囲の低減分を 10~40%,載荷回数を 5 万~10 万回とした.その結果, 後述するようにいくつかの試験体の疲労破面にビーチマ ークを残すことができた.なお,今回の実験は,板曲げ 疲労試験であり,応力範囲を減らすと最大値が低下する ため,ビーチマークが見えない試験体も多かった.今後 の検討課題である.

3. Uリブ溶接部の板曲げ疲労試験の結果

3.1 疲労き裂の発生・進展挙動

1) 両振り(R=-1)で行った疲労試験

前述したように、疲労試験は 2 回に分けて行なった. 1 回目の疲労試験では、D12R6 試験体 6 体と D12R8 試 験体 3 体を、応力比 R=-1 (両振り)で行なった.その うち 7 体は溶接のルートに、残りの 2 体はすみ肉溶接の 止端に疲労き裂が発生した.疲労破面の端部を残して断 面を切り出し、マクロ写真を撮ったものを写真-3 に示 す.疲労き裂の進展方向を調べたもので、疲労き裂はす み肉溶接のルート部から発生してデッキプレートを貫通 する方向にほぼ直角に進んだことがわかる.



写真-3 溶接部のマクロ写真と疲労き裂

疲労き裂は、すみ肉溶接のルートがリブ端から奥にあ るため、疲労試験中は見えない.そこで、疲労試験終了 後に疲労破面を観察した情報と、疲労試験中に計測した ひずみの変化の情報から、疲労き裂の進展を推測した. 疲労破面の例を、図-5,6に示す.図-5では、溶接 ルート部に近い所にうすくダイマークが見え、ビーチマ ークも3本判別できる.図-6では、2本のビーチマー クが見える.いずれも、疲労き裂は、ルートに沿って複 数発生している.複数個発生した疲労き裂は合体して、 細長い半だ円形状のき裂となって進展した.き裂が板厚 方向に進展し板厚貫通まで1~2mmを残して、リブの 反対側の鋼板表面からき裂が発生して、それがリブから のき裂と合体して破断した.今回の疲労試験では、リブ と反対の側にも銅線を貼ってあるので、その時点で試験 機が停止して、疲労試験を終了した.

疲労き裂は、ほとんどが試験体の幅の中央辺りから発 生している.しかし、いくつかの試験体では、溶接時に マークした組立て溶接付近からき裂が発生した.本研究 では、組立て溶接が疲労寿命に与える影響は検討してい ないが、今後の検討課題である.

2) 片振り(R=0) で行った疲労試験

最初に行った R=-1の試験では、後述するようにリブ を溶接したことによる作用応力方向の引張残留応力があ まり大きくなく、作用応力の一部が圧縮側に入る懸念が あったため追加したものである.この試験では、コイル ばねを用いて予荷重を与え、応力比 R=0 で実験を行な った.

疲労き裂の発生,進展挙動は, R=-1 で行った実験で 見られた挙動とほぼ同じであり,応力比が異なることの 違いは見られなかった.

3.2 疲労き裂の大きさとひずみの変化の関係

疲労試験中に定期的にひずみ計測した結果の例を, 図-7に示す. ここでは、ひずみ範囲の変化を疲労試 験開始時のひずみ範囲に対する比で示している.ひず みゲージは、リブの端から5mmの位置に4枚ないし8枚 貼っている. (図-2,3参照) このひずみ範囲の変化 が生じるのは次の理由による. ①疲労き裂がそのひず みゲージの前面に発生した場合には、その部分の応力 の伝達量が減少するために応力範囲が減少する. ②疲 労き裂が少し離れた位置で発生した場合、疲労き裂が 進展してひずみゲージに近づくと、き裂先端近傍の応 力集中によって応力範囲が増大する. さらに進展して ひずみゲージを通り過ぎると、①と同じ理由で減少す る. ③この疲労試験機の特性として,疲労き裂が大き くなると試験体の剛性が低下し,疲労試験の最終段階 では加振器の振動が大きくなるので応力範囲が増大す る.



逆側から発生したき裂



図-5 ルート部から発生し、デッキプレートを貫通する疲労破面の例



図-6 ひずみゲージの位置とビーチマークの関係がわかる例



図-7に示すのは、図-6に示す破面に残されたビーチ マークとひずみの変化を示す例である.ひずみゲージの 位置に疲労き裂がひずみゲージdとeの間のdに近いとこ ろで発生し、上記②の理由でdの応力範囲が増大するが、 その後①の理由で減少していることが分かる.

3.3 ひずみの変化から推定した溶接残留応力

疲労試験体には、リブを溶接したとき生じる残留応力 が存在する.この疲労試験を計画したとき、溶接部には 十分に高い引張残留応力が存在し、疲労試験で与える外 力は、R=-1(両振り)の板曲げだが、溶接部は引張残 留応力によって片振りになると考えていた.これを確認 するため、ひずみの変化量から溶接残留応力の大きさを 推定した.

この原理は、疲労き裂が発生・進展すると、残留応力 が開放される、すなわち残留応力測定に用いられる切断 応力開放法と同じ結果が得られることにある.図-8に 示すように疲労試験中に定期的に計測したひずみの変化 は、疲労き裂の発生・進展によって、残留応力が開放さ れた分シフトする.そこで、ひずみの変化量から残留応 力を計算し、ひずみゲージの貼付位置で示したものを図 -9に示す.ただし、この計算ではリブ端から 5mm 程 度離れた位置のひずみゲージの値を用いており、疲労き 裂の発生したルート部から、7~10mm 離れていること を付記する.

図に示されるように、3 枚または 5 枚のひずみゲージ から推定した残留応力は、中央部で引張、両側で圧縮と なる分布をしている. その値は、中央部で約 40~ 80MPa, すなわち降伏点の約 1/7~1/3.5 程度の引張残留 応力が生じ、それにつり合うように幅方向 100mm の位 置では、約-40~-80MPa の圧縮残留応力となってい る(図-10).

試験体中央部の引張残留応力を考慮して,実際に溶接 部に作用する応力は,図-11に示すようになる.すな わち残留応力にバラツキがあるものの,この試験では応 力比 R=-1 の場合,引張残留応力を考慮しても,外力 として与えた応力範囲の一部が圧縮側になっている可能 性がある.応力範囲の内で,圧縮側の分は疲労き裂発生, 進展に影響しないと仮定すると,圧縮分だけ応力範囲が 減ったことになり,長寿命側の結果となる.後述するよ うに実験結果をみると,応力範囲が低い場合に長寿命の 結果が得られており,このことを間接的に裏付けている. 溶接継手の基本的な疲労強度は,完全引張の応力範囲 を作用させた疲労寿命をベースに求める必要がある.す なわち,高い引張残留応力の存在の元で両振りの疲労試 験を行うか,片振りの状態にして疲労試験を行う必要が ある.そのためもあって,D12R6の試験体を新たに 6 体追加して,R=0で疲労試験を行った.



図-9 溶接ルート部における残留応力の分布





4. 疲労試験結果と S-N 線図

4.1 疲労試験結果

この疲労試験では、前述したように疲労き裂の進展と ひずみゲージの変化をモニターした.そこで、S-N線図 に示す繰返し数を、いずれかのひずみゲージの示す応力 範囲が5%減少した時をN5、15%減少した際の繰り返し 数をN15と定義し、付録-2に示す.前述したように、 ばらつきはあるものの、N5では疲労き裂は板厚の約 15%進展し、N15では板厚の約1/2まで疲労き裂が進展 していると思われる.なお、*印を付けた試験体は、試 験体を設置する際に、過荷重を与えた可能性がある試験 体である.また、>印は、その繰返し数まで疲労き裂の 発生が確認されなかった.その試験体は、応力範囲をあ げて再試験し、試験体番号にRを付した.疲労き裂が発 生したルートの位置の応力範囲は、図-12に示すように 板曲げによる応力が分布するので、試験体に貼付したひ ずみゲージの値から内挿して求めた.

このようにして求めたS-N線図を,図-13に示す.(a) は応力範囲が5%減少したとき,(b)は15%減少したとき, (c)は,試験体が破断したときのS-N線図である.

図-13(a)では、両振り(R=-1)、応力範囲を166MPa で試験した3体は、70~150万回程度であるが、少し応力 範囲を下げて140MPaでは、疲労き裂が1000万回を超え ても発生しないデータがある.これが前述したように、 両振りで試験した場合、引張残留応力が十分大きくなく、 作用応力範囲の一部が圧縮側に入ると想定されたデータ である.これに比べて、片振り(R=0)で実験したものは、 120MPa程度の応力範囲で400~700万回で疲労き裂が生じ た.それ以下では、疲労き裂が生じなかった.

リブの板厚が8mmの試験体は、3体実験し、そのうち1 体はすみ肉溶接止端側から疲労き裂が発生した.そのデ ータも含めて、板厚8mmのリブの試験体は、6mmのも のより長寿命側の結果が得られた.

図-13(b)にN15, すなわち応力範囲が 15%低下したと きのデータを示す.基本的には,図-13(a)の場合と同 等である.これをみると,ルート部から発生した疲労き 裂のデータのほとんどは、日本鋼構造協会(JSSC)の疲労 設計指針のB等級とC等級の線の間にある⁶⁾.また, D12R6 試験体に限って見ると,高い応力範囲での試験 結果は少し短い寿命を示すが,いずれも疲労設計指針



(c) 試験体が破断したとき

図‐13 S-N 線図

のB等級からC等級の線の間にばらついていることが分かる.

D12R6とD12R8試験体の結果を比べると,D12R8は結 果に大きなばらつきが見られるが,D12R6よりも疲労寿 命が長くなる結果が得られた.

図-13(c)に,疲労き裂が板厚を貫通して疲労試験を 終了したときの繰返し数で S-N 線図を示した.これか らも板厚を貫通するまでのデータは,JSSC の B 等級と C 等級の間にあることがわかる.

4.2 1mm法による疲労強度の推定と試験結果との比較

本研究では、1mm法を用いて実験に用いた継手の疲労 強度の推定を行った⁷⁾.この方法は、ホットスポット 応力法と同じ考え方であり、すみ肉溶接止端から発生す る疲労き裂に対して、疲労き裂の進展方向に溶接止端か ら1mmの深さの応力を求め、基準とするリブ十字形す み肉溶接継手の疲労寿命と比較することで、S-N線図を 予測する.1mmの深さの応力を参照する応力とするの は、溶接止端の凹凸による局部的な影響を除外するため である.

ここでは、溶接ルート部から板曲げ応力によって発生 する疲労き裂に対して適用することにした.まず、すみ 肉溶接のルートから発生する疲労き裂が、溶接止端から 発生する疲労き裂と同じ挙動をすると仮定した.そして、 基準とする継手として、過去に行われた幅 200mm と 160mm のリブ十字すみ肉溶接継手の S-N 線図の平均線 と平均±2S の線を用いる.それを板曲げの場合の基準 S-N線図 (Reference detail) として、図-15にそれぞれ 実線と破線で示す.この仮定については、今後実験デー タなどで検証する必要がある.

疲労試験で用いた試験体を、図-14に示すようにモデ ル化して、FEM解析を行って溶接ルート部の1 mmの深 さの点の応力集中係数を算出した. ここでは, 公称曲げ 応力を基準(1.0)とした.その結果, D12R6, D12R8の 応力集中係数はともに0.79となった.基準S-N線図の200 万回疲労強度を参照して、この応力集中係数を考慮する と、この継手の200万回疲労強度は、平均が132MPa、-2Sが104MPa, +2Sが166MPaとなり, 図-15に実線と破 線(prediction)で示すS-N線図となる. 疲労寿命の予測曲 線は、JSSCのB等級からD等級程度の範囲となり、今回 の疲労試験データと比較して, 少し低めの疲労強度を予 測していることがわかった.一般に溶接継手の板曲げの 疲労試験を行う場合,曲げによる応力勾配があるため, 疲労き裂がある程度進展したところで疲労き裂の進展が 遅くなる傾向がある.1mm法は、止端から1mmの深さ の位置の応力集中係数で評価するため、この疲労き裂進 展が遅くなる影響を考慮していないため,寿命を短めに 予測したと考えられる.

4.3 過去の実験値との比較

過去に図-16 に示す形状の試験体を用いた疲労試験が 行われている.リブの片側をすみ肉溶接した試験体も含 めて,疲労き裂がルート部から発生した疲労試験結果を 比較するとともに,1 mm 法による解析結果とも比較し た.

森ら⁹⁾によって行われた疲労試験は、図-16(a)のよう に、主板にリブを垂直に取り付けた試験体で、4 点で板 曲げを行う疲労試験で,最大応力を 243MPaで固定して 実験を行っている.この実験では、溶接部の溶け込み量 の異なる2種類の試験体を作成し、溶け込み量が疲労強 度に与える影響を検討したが、溶け込み量によって疲労 強度に差がでる結果は得られていない. また, 横河ブリ ッジ(YBC)では、非破壊検査のキャリブレーションに用 いるため、図-16(b)に示す試験体で疲労き裂を発生さ せる試験を行っている³⁾.この実験では、疲労き裂が発 生し, ある程度進展させた状態で疲労試験を中断してい る. また, IHIで行われた図-16(c)の試験があるが, こ の試験は3点で板曲げを行い、応力範囲が溶接ルート部 で 100MPaとなるように載荷している¹³⁾. 載荷方法は図 -16(c)のように拘束条件を変えたA, B, Cの 3 通りあ り、ひずみゲージで応力範囲をモニタリングし、それが 15%減少した時を疲労寿命とし、S-N線図を求めている. ルートからの疲労き裂発生が確認できたのは、Bタイプ の疲労試験であった.

図-16(d)は、英国溶接研究所(TWI)のMaddoxによる試 験である¹⁴⁾.応力比RはR=-2 である.この応力比は、 実橋のひずみ計測から求められたものと思われるが、詳 細は不明である.S-N線は、疲労き裂が主板を貫通した ときの繰り返し数で整理されている.



図-14 FEM 解析のモデル



図-15 1mm 法を用いた疲労寿命の予測





図-17 1mm 法による予測と過去の疲労試験データ

これらの疲労試験の結果を、図-17 に示し、今回の 疲労試験結果、及び1 mm 法による疲労寿命予測と併せ て示す.森らによる疲労試験結果と、YBC、IHI(B)の結 果は、1mm 法で予測したものと比較的よく一致してい る.この理由としては、溶接部に作用する応力が引張の 曲げ応力のみ(R>0)となるため、1mm 法で用いた基 準とする継手と同様の疲労試験の状態であると考えられ る.逆に、Maddox による疲労試験は、圧縮側が主とな る応力範囲で試験がされていたために,疲労強度が高い 結果が得られている.

5. まとめと今後の課題

本研究では、鋼床版のデッキプレート貫通型の疲労き 裂を対象に、幅300mm、板厚12mmのデッキプレートに 板厚6mmと8mmのUリブを模したリブを溶接した試験体 で、板曲げ疲労試験を行った.Uリブとデッキプレート のすみ肉溶接の溶け込み量は、道路橋示方書を参考に、 Uリブの板厚の75%を目標とした.この実験では、継手 の形と作用応力の方向を単純化するため、デッキプレー トが曲げ応力を受ける場合に限定して疲労試験を行った. 疲労試験は、名古屋大学で開発した板曲げ振動疲労試験 機を用いた.

疲労試験は、2回に分けて行った.最初は、Uリブの板 厚6mmのもの6体と、8mmのもの3体を実験した.この 実験では、応力比R=-1の両振りで疲労試験した.また、 疲労き裂がすみ肉溶接のルート部から発生するように、 すみ肉溶接止端側をディスクグラインダーで仕上げた. ただし、仕上げが不十分なため止端から疲労き裂が発生、 進展した試験体が2体あった.

2回目の試験では、Uリブの板厚6mmのものを6体製作し、R>0の片振り試験条件で疲労試験した.

疲労き裂は、試験体幅の中央部の溶接ルート部から発 生し、扁平な半だ円形の形状で板厚方向に進展した.ま た、疲労き裂が板厚の80~90%進展した段階で、デッ キプレート面に発生した疲労き裂と合体して、板厚貫通 き裂となった.この疲労き裂の途中までの進展挙動は、 実橋で見られたデッキプレート貫通型の疲労き裂と類似 したもので、その疲労き裂進展挙動を板曲げ疲労試験で 再現できた.ただし、輪重移動載荷試験(輪重の通過位 置は固定)の破面とは、板厚を貫通する段階が異なる. 移動載荷では、板厚貫通に近くなった段階で疲労き裂が 曲がり、すぐに貫通しないような挙動を示した.

両振りで行った1回目の試験では、応力範囲の小さい 範囲で長寿命側のデータが得られ、1000万回を超えて も疲労き裂が発生しないデータがいくつか出た.この理 由に、最初予想したほどの引張残留応力が存在しなかっ たことが考えられた.そこで、板曲げ試験機にコイルば ねを用いて予荷重を与えて応力比を変えられるような改 造を行なった.予荷重を与えて、片振り(R=0)で行なっ た疲労試験では、応力範囲で114-120MPaでも、450~ 750万回で疲労き裂が発生した.疲労試験中に計測した ひずみの変化から推定した引張残留応力が40~80MPaで あり、これをキャンセルするような片振りの疲労試験を 行ったためと考えられる.

疲労試験の結果から、この継手の板曲げによる疲労強度は、継手のルートでの曲げの応力範囲で評価した場合、 JSSCの継手等級でC等級程度であった.

あとがきと謝辞

本研究では、Uリブ継手部をできるだけ単純化した継 手の板曲げ疲労試験で、この継手の基本的な疲労挙動を 検討する試みを行った.このような基本的なS-N線図と FEM解析や実橋での実働応力範囲の計測データを用い て、鋼床版デッキプレート貫通型の疲労耐久性が評価で きる.ただし、この試験では、実鋼床版で生じるような 疲労き裂が発生した後の輪重の移動による疲労き裂の進 展はモデル化できていない.

本研究を遂行するにあたり、トピー工業技術研究所の 山田聡氏には板曲げ疲労試験機の開発と改良から始まっ て,疲労試験体の製作などに協力していただいた.名城 大学の小塩達也氏(前名古屋大学助手)や名古屋大学の 佐々木裕,小薗江朋尭,白彬氏らには,試験機の改良や 実験全般に渡って協力いただいた.また,この研究の一 部は,名古屋高速道路公社の委託研究として行なった. ここに記して感謝の意を表します.

付録-1 試験体に用いた鋼材の機械的性質と化学成分

Plate	Yield	Ultimate	Elongation
thickness	strength	strength	(%)
(mm)	(MPa)	(MPa)	
12	281	424	31
6			
8	367	473	24

Plate thickness	Chemical composition (%)				
(mm)	С	Si	Mn	Р	S
12	0.16	0.14	0.5	0.0011	0.004
6	0.15	0.13	0.56	0.0015	0.003
8	0.14	0.14	0.8	0.0019	0.006

付録-2 疲労試験結果のまとめ

試験体	$\Delta \sigma$	N(cycles) (x 10^3)		き裂位置
NO.	(MPa)	N5	N15	
D12R6- 1	167	1,433	1,475	root
-2	165	700	781	root
-3*	141	4,945	5,285	toe
- 4	166	1,259	1,362	root
-5*	115	-	>7,419	runout
-5R	141	6,836	6,960	root
-6	145	2,953	2,996	root
D12R8- 1	141	6,130	6,186	root
-2	143	-	>12,080	runout

-2R	159	5,895	5,990	toe
-3	145		>15,150	runout
-3R	169	4,917	5,212	root
PD12R6 -7	100	-	>10,000	runout
-7R	144	2,318	2,520	root
-8	86	-	10,000	runout
- 8R	138	2,944	2,990	root
-9	119	-	>15,000	runout
-9R	135	-	6,110	root
-10	120	4514	4693	root and toe
-11	114	7570	7728	root
-12	122	-	6673	root

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書,鋼橋の疲労設計指針,丸 善,2002 年
- 鋼構造委員会,鋼床版の疲労小委員会:鋼床版の疲労, 土木学会論文集,第410号/I-12,1989年10月.
- (横河ブリッジ:鋼床版の疲労き裂の検出に関する基礎研究,社内資料,2003年
- 4) 三木千壽、菅沼久忠、富澤雅幸、町田文孝:鋼床版箱桁 橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因、土 木学会論文集、No.780/I-70、57-69、2005.1.
- 5) 有馬敬育,村越潤,藤木修:鋼床版デッキプレート進展 亀裂の超音波探傷法に関する実験的検討,土木学会第 60 回年次学術講演開, pp.329-330, CD-ROM, 2005.9.
- 6) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針同解説, 1993年,技報堂出版,(英語版1995年).
- Xiao, Z-G., Yamada, K.: A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of welded joints, International Journal of Fatigue, pp.1277-1293, 2004
- Ya, S., Fatigue durability evaluation of welded joints used in orthotropic steel deck bridge, Master Thesis, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2006
- (4) 森猛:片面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する溶接溶け込み深さの影響,鋼構造論文集,第 10 巻第 40 号,2003.12.
- 10)岩崎雅紀,永田考,西川武宏,小塩達也,山田健太郎:アスファルト舗装が鋼床版の疲労に及ぼす影響,土 木学会論文集,No.563/I-39,pp.161-171,1997.4.
- 11)Miki, C.: Fatigue damage in orthotropic steel bridge decks and retrofit works, Steel Structures 6, pp.255-267, 2006.
- 12)井口進, 寺尾圭史, 西野崇史, 村越潤:鋼床版 SFRC 舗装施工前の静的載荷試験, 土木学会第 60 回年次学術 講演会, 平成 17 年 9 月.
- 13)猪瀬幸太郎, 齊藤史朗, 倉田幸宏, 中西保正: 鋼床版 Uリブ接合部ルート疲労き裂を模擬する小型供試験体の 検討、土木学会第 61 回年次学術講演会、pp.1187-1188, CD-ROM、2006
- 14)Maddox S.J.: Fatigue of welded joints loaded in bending, TRRL Supplementary Report 84 UC, Crowthorne, Berkshire, 1974
- 15)Yamada, K. : Some new approaches to fatigue of steel

bridges, Steel Structures 6, pp. 319-326, 2006.

- 16)井口進,山田健太郎,川畑篤敬:オランダにおける鋼 床版疲労損傷の補修・補強事例の調査、橋梁と基礎、 pp.43-48、2006.6
- 17)山田聡, 渡辺直起, 山田健太郎, 小薗江朋尭, 中野 隆: 簡易型振動疲労試験機の開発、トピー鉄構技報、 no.22、2006.

18) 土木学会鋼構造委員会:鋼床版の疲労損傷とその対策,

第 10 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 2007 年 8 月, 土木学会.

19)Ya, S., Yamada, K.: Fatigue tests of welded joints of trough to orthotropic steel deck plate in bending, 土木学 会第 62 回年次学術講演会, 平成 19 年 9 月

(2007年9月14日受付)