

(論文)

疲労抑制鋼板 EX-Facter™ による鋼床版デッキプレート・Uリブ溶接継手の疲労耐久性向上

伊藤孝矩*¹(博士(工学))・高嶋康人*¹(博士(工学))・杵渕雅男*¹(博士(工学))・松下政弘*²・田畑晃人*³・山口徹雄*⁴

Improving Fatigue Durability of U-rib to Deck Welded Joints of Orthotropic Steel Decks with EX-Facter™ Fatigue Crack Initiation Resistant Steel

Dr. Takanori ITO · Dr. Yasuhito TAKASHIMA · Dr. Masao KINEFUCHI · Masahiro MATSUSHITA · Akito TABATA · Tetsuo YAMAGUCHI

要旨

鋼床版のデッキプレート・Uリブ溶接継手に発生するデッキプレート貫通型疲労き裂の抑制を目的に、固溶強化元素 (Si, Cu, Ni, Cr) を最適添加した疲労抑制鋼板 EX-Facter の疲労寿命延長効果を検証した。対象の疲労き裂は、母材と溶接金属の境界近傍に存在する溶接熱影響部 (HAZ) において発生する。そのため、HAZ の疲労強度向上が疲労寿命の改善において重要である。まず、熱サイクル試験で再現した HAZ 組織を用いた疲労試験により、汎用鋼と比べて EX-Facter の疲労強度が大きく向上することを確認した。さらに、継手模擬材を用いた検証でも有効性を実証し、橋梁構造物の長寿命化に寄与する鋼板である可能性を示した。

Abstract

The fatigue life extension effect of the EX-Facter, a fatigue crack initiation resistant steel plate with an optimal addition of solid solution strengthening elements (Si, Cu, Ni, Cr), has been investigated to suppress fatigue cracks that occur in U-rib to deck welded joints of orthotropic steel decks. These fatigue cracks appear in the heat-affected zone (HAZ) of welding, which is the region of the base metal adjacent to the weld metal. Therefore, improving the fatigue strength of the HAZ is vital for improving the fatigue life. First, fatigue tests using HAZ structures simulated by heat cycle tests have confirmed that the fatigue strength of the EX-Facter has been significantly improved compared with conventional structural steels. Furthermore, its effectiveness has been verified using joint-simulation specimens, and it has been shown that the EX-Facter is a steel plate that can contribute to the extension of the fatigue life of bridge structures.

検索用キーワード

疲労, 疲労寿命, 疲労き裂発生, 固溶強化, 溶接熱影響部, 鋼床版, 溶接継手

まえばき = 橋梁は、社会インフラを構成する重要な構造物であり、生活基盤や経済活動を支える役割を担っている。しかし、日本では高度経済成長期に建設された多くの橋梁が耐用年数を迎え、老朽化が顕在化している¹⁾。例えば、長大橋や都市部の高架橋などで使用される鋼橋においては軽量化のために鋼床版形式が多く採用されるが、車両の繰り返し走行に起因する疲労損傷が大きな問題となっている。鋼床版は図1に示すように鋼製の床板(デッキプレート)と橋軸方向および橋軸垂直方向の補剛材である縦リブ(Uリブ)と横リブから主に構成される。鋼床版の疲労損傷²⁾のなかでも、デッキプレートとUリブ溶接のルート部を起点に発生し、デッキプレートを貫通するき裂(以下、デッキ進展き裂)は、路面変状を引き起こす危険があるため、とくに問題視されている^{3)~5)}。デッキ進展き裂は、定期点検で実施される鋼床版下部からの目視点検では発見が難しく、路面上部から一度舗装を除去して確認する必要がある⁶⁾。そのため、交通規制を伴う点検および補修が不可避であり、通行止めや車線規制による交通渋滞、物流遅延といった社会的影響が生じる。

このような溶接部の疲労損傷に対しては、一般的に以

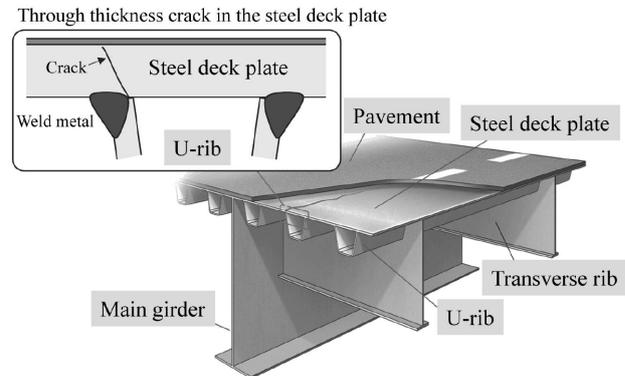


図1 鋼床版の模式図

Fig.1 Schematic diagram of an orthotropic steel deck

下の対策の適用が検討される。すなわち、①作用応力の低減、②溶接止端形状の改善、③引張残留応力の除去が講じられることが多い。①は、同一外力条件に対して、厚肉化などにより応力を低減する。②は、応力集中箇所である溶接止端をグラインダーなどにより滑らかにすることで、応力集中を防ぎ、き裂の発生を抑制する⁷⁾。③は、ピーニング処理などにより溶接部に圧縮応力を導入することで、引張残留応力によるき裂の発生を抑える⁸⁾。

*¹ 技術開発本部 材料研究所 *² 鉄鋼アルミ事業部門 厚板ユニット 厚板商品技術部 *³ 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部
*⁴ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

①～③は構造設計および後工程の工夫で疲労損傷軽減を図るものであり、一定の効果が見込まれる。しかしながら、デッキプレート・Uリブ溶接継手のルート部に②や③を適用するのは難しく、①も鋼重全体の増加を招き、鋼床版のメリットである軽量性が損なわれる。そこで、疲労特性の向上を実現するためには、設計や工程処理以外のアプローチも検討する必要がある。当社では、固溶強化元素を活用した疲労き裂発生抑制技術を駆使して、それを厚鋼板で実現し、疲労抑制鋼板としてEX-Facter[®] (EXcellent Fatigue Crack Initiation Resister, 以下、開発鋼と呼ぶ)を開発した⁹⁾。開発鋼を溶接構造物に適用するには、溶接継手における疲労寿命延長効果を明らかにする必要がある。本稿では、開発鋼の設計思想について述べるとともに、デッキプレート・Uリブ溶接継手における疲労改善効果を検証した結果について報告する。

1. 疲労抑制鋼板EX-Facterのコンセプト

1.1 疲労寿命改善に向けたこれまでのアプローチ

金属疲労は、材料に繰り返し応力が作用することで、材料表面で発生した微視的き裂が成長し、最終的に破断へと至る現象である。この過程は、疲労き裂の発生、疲労き裂の進展、終局破壊の三つの段階に分けられる。橋梁などの溶接構造物では、溶接時の急速な加熱・冷却によって材料内部に局所的な引張残留応力を形成する場合があります。き裂発生の駆動力となり得る。さらに、溶接止端部などでの応力集中部では外力により塑性変形が発生しやすく、その結果、き裂の発生が促進される。すなわち、供用時の周期的な応力によって、残留応力や応力集中が存在する部位でき裂が発生し、材料内部に進展する。疲労寿命の延長には、き裂発生を抑制あるいは、き裂進展速度を遅延させることが重要である。これに対応するアプローチの一つとして、き裂進展抵抗を高めた耐疲労鋼^{10)~12)}が開発された。これらの耐疲労鋼は、軟質相中に硬質相を微細分散させた組織設計となっている。材料中を進展する疲労き裂が硬質相に到達することで、進展経路に変化が生じ、一時的な停留や進路の迂回が引き起こされる。これにより、き裂進展速度が低下し、疲労寿命の向上に寄与することが報告されている^{13), 14)}。

1.2 疲労き裂発生に着目したEX-Facterの開発

開発鋼は、疲労き裂発生までの損傷に着目し、き裂発生を抑制することに重点を置いている。従来技術が、疲労き裂発生後の進展を抑制することを主な目的としてい

るのに対し、当社の技術は添加元素による疲労き裂の発生を防ぐことを目的としている点で、明確な違いがある。添加元素であるSiやCuなどのマトリックスへの固溶は、疲労中の転位組織に影響を与え、疲労特性を改善することが報告されている^{15), 16)}。開発鋼では、これらの固溶強化元素に着目し、Si, Cu, Ni, Crの添加量を最適化した。代表的な化学組成と機械的性質を表1¹⁷⁾に示す。今回、開発鋼の疲労強度を検討するために、開発鋼 (Developed) と同等強度の汎用鋼 (Conventional) を用意した。両鋼板の組織は、フェライトを主体とする組織であり、引張強度は490 MPa級に分類される。汎用鋼と開発鋼のき裂発生寿命とき裂進展寿命を調査した結果を図2 (a)⁹⁾に示す。ここでは、試験開始からき裂発生までのサイクル数をき裂発生寿命、それ以降の破断までのサイクル数をき裂進展寿命と定義している。疲労試験は応力比R (繰り返しの最小応力/最大応力) が-1の同じ大きさの引張と圧縮の応力を交互に繰り返し与える両振りを実施した。いずれの応力条件においても、汎用鋼に比べて開発鋼のき裂発生寿命が改善していた。図

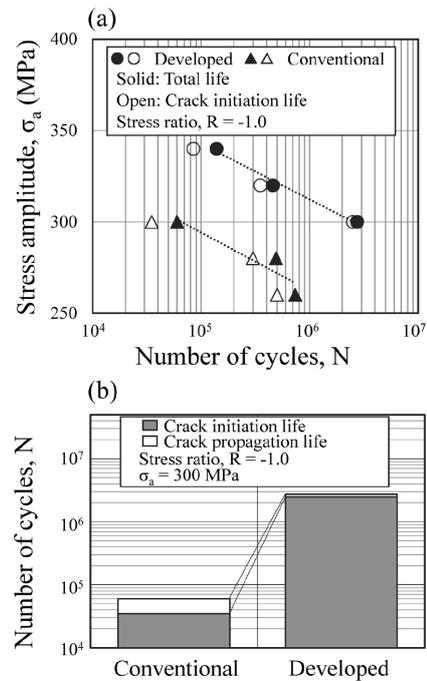


図2 (a) 汎用鋼と開発鋼の疲労試験結果
(b) $\sigma_a=300$ MPaでのき裂発生寿命とき裂進展寿命の比較
Fig.2 (a) Fatigue test results of conventional and developed steel
(b) Comparison of crack initiation life and crack propagation life at a stress amplitude of 300 MPa

表1 鋼材の代表的な化学組成と機械的性質
Table 1 Typical chemical composition and mechanical properties of steels

	Chemical composition / mass%						Mechanical properties	
	C	Mn	P	S	Si + Cu +Ni+Cr	Others	YS (MPa)	TS (MPa)
Conventional	0.15	1.01	0.016	0.003	0.20	-	476	529
Developed	0.05	1.56	0.007	0.001	0.97	Nb, Ti	554	571

脚注) EX-Facterは当社の登録商標 (第6676446号) である。

2 (b)⁹⁾ に応力振幅が300 MPa での疲労寿命を比較した結果を示す。疲労寿命に占めるき裂発生寿命の割合は汎用鋼と開発鋼でそれぞれ58%, 91%であり, 半分以上をき裂発生寿命が占めていた。き裂発生寿命に着目すると, 開発鋼は汎用鋼の約70倍であり, 著しく改善していることが示された。また, 汎用鋼と開発鋼の疲労寿命はそれぞれ 6.4×10^4 回, 2.7×10^6 回であった。したがって, 開発鋼は, 汎用鋼よりもき裂発生寿命が改善し, 長寿命化していることが明らかとなった。

2. 溶接ルート部の再現組織を用いた疲労特性評価

2.1 再現HAZ組織の作製と評価方法

デッキ進展き裂の発生起点となる溶接ルート部付近は, すみ肉1パス溶接による熱影響を受けている。すみ肉1パス溶接は, ほぼ直行する部材のすみ部分に対し, 1回で溶接する方法である。この溶接により, 溶接金属の周囲には熱影響部 (Heat Affected Zone, 以下, HAZ) が形成される。

図1で述べたようにルート部の疲労き裂は, 主にHAZから発生するため, HAZでのき裂発生を抑制することが重要となる。今回の強度クラスの鋼材では溶接熱により, 溶接部に隣接する母材組織がオーステナイト域まで加熱・急冷されるため, 母材組織がフェライトからベイナイト主体の組織に変化する。固溶強化元素によりき裂発生までの疲労損傷を遅らせる開発鋼では, 組織が変化したとしてもマトリックス中に含まれる固溶元素は変わらないと考えられるため, デッキプレート・Uリブ溶接継手の疲労耐久性の向上が期待できる。いっぽうで, 溶接継手には溶接金属を含め様々な組織が混在している¹⁸⁾ ため, 評価対象のHAZ組織におけるき裂発生抑制効果の検証が困難である。加えて, 溶接継手は溶接止端などでの応力集中や残留応力の影響があるため, 組織単独の評価をすることが難しい。そこで, 継手形式での評価前に, 溶接熱を模擬した再現熱サイクル試験装置を用いてHAZ相当の組織を再現し, 固溶強化元素を活用した開発鋼の疲労改善効果が発現するか調査した。

表1¹⁷⁾ で示した汎用鋼と開発鋼から11.5 mm × 33 mm × 70 mmの試験材を採取した。溶接部の熱履歴を模擬可能な再現熱サイクル試験装置を用いて, すみ肉1パス溶接時に想定される熱影響を試験片に付与した。図3¹⁷⁾ に付与した熱サイクルを示す。すみ肉1パス溶接の温度履歴に近い条件A, Bと, 結晶粒径の変化を狙った条件C, Dを用意した。ただし, 汎用鋼では条件Dでの試験は実施していない。熱サイクル後の試験材から, 図4 (a) に示す直径4 mmの丸棒試験片を採取した。試験片表面はエメリー紙で#1200まで順次研磨を施し, 平滑に仕上げた。その後, 電気油圧サーボ疲労試験機を用いて, 荷重制御下での軸力疲労試験を実施した。なお, 平均応力 (最大応力と最小応力の平均値) の影響を除外し, 材料単独の影響を見るために, 応力比Rは-1とした。

また, 15 mm × 80 mm × 75 mmの大型の試験材も採取した。その後, 条件Bでの再現熱サイクル試験を実施し, 図4 (b) に示すCT試験片に加工した。電気油圧

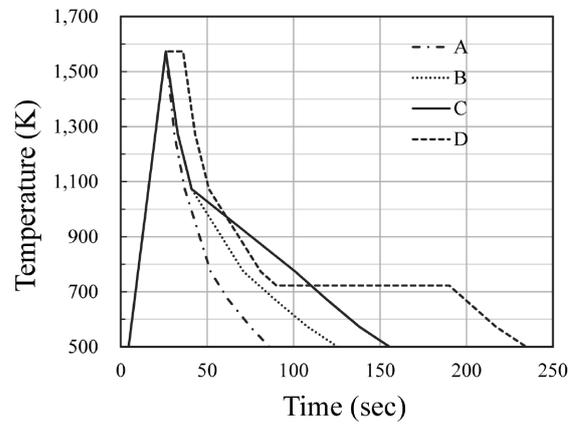


図3 再現熱サイクル試験の熱履歴

Fig.3 Thermal profile of the simulated thermal cycling test

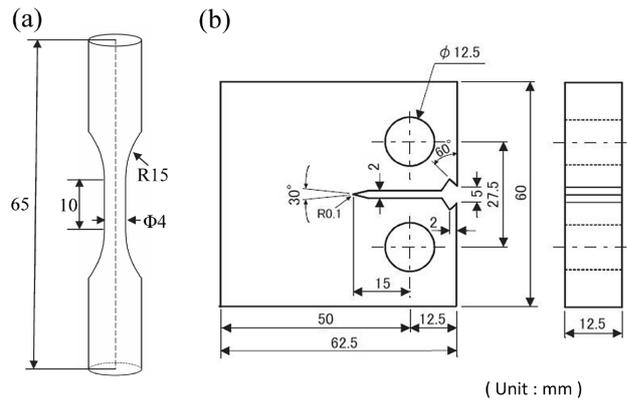


図4 (a) 丸棒疲労試験片と (b) CT試験片の形状

Fig.4 Shape of (a) round bar specimens and (b) compact tension (CT) specimens for fatigue testing

サーボ式疲労試験機を使用し, 応力比Rは0.1としてき裂進展試験に供した。今回, コンピュータ制御により自動的に荷重を減少させる荷重漸減法により疲労き裂進展試験を行った。き裂進展試験中の最大応力での応力拡大係数と最小応力での応力拡大係数の差を応力拡大係数範囲 (ΔK) として算出した。また, 1回の応力振幅によりき裂が進展する大きさを表すき裂進展速度 (da/dN) も測定した。

組織観察はナイタルでエッチングした組織を, 光学顕微鏡にて観察した。加えて, 走査型電子顕微鏡に搭載された後方散乱電子線回折 (EBSD) を用いた結晶方位解析を行い, 平均結晶粒径 \bar{d} を測定した。

2.2 再現HAZ組織と疲労特性

鋼床版のデッキプレート・Uリブ溶接継手を模擬した試験体のすみ肉1パス溶接部の組織写真を図5 (a) に示す。デッキプレートには開発鋼を使用している。図中の点線は溶融線を示しており, この線を境にHAZと溶接金属 (WM) が存在している。溶融線に隣接する領域は粗粒HAZに相当し, ベイナイト組織が形成されていた。粗粒HAZの平均結晶粒径 (\bar{d}) は $20 \mu\text{m}$ であった。再現熱サイクル試験の条件Aにより得られた組織を図5 (b) に示す。組織は粗粒HAZに酷似しており, 平均結晶粒径は $23 \mu\text{m}$ であった。再現熱サイクル試験片の組織 (以下, 再現HAZ組織) は, すみ肉溶接に実際に形成されるHAZ組織と形状・平均結晶粒径が同等である

と判断した。

図6に汎用鋼および開発鋼の再現HAZ組織におけるき裂進展速度 (da/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) の関係を比較した。両鋼ともに、き裂進展速度は ΔK の減少とともに急激に低下し、ある ΔK 値を下回るとき裂が進展せずに停止する。この時の ΔK は、 ΔK_{th} (下限界応力拡大係数範囲) と呼ばれ、き裂進展が始まるかどうかの指標となる。本研究では、 da/dN が 1.0×10^{-10} m/cycleに到達した時点の ΔK を ΔK_{th} と設定し、汎用鋼では $4.0 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 、開発鋼では $4.1 \text{ MPa}\sqrt{m}$ という測定結果が得られた。図中にも示すとおり、両者の ΔK_{th} および ΔK_{th} 近傍の da/dN に大きな差異は認められなかった。したがって、き裂進展抵抗に関しては両鋼とも同等の特性を示すことが確認された。

つぎに、再現HAZ組織材の平滑丸棒疲労試験結果を図7¹⁷⁾に示す。試験は条件A~Dの異なる熱履歴を付与した試験体で実施した。破断材のプロットから算出した対数近似線から100万回強度を求め、疲労強度 (σ_w) と定めた。

開発鋼は、熱サイクル条件に関わらず、汎用鋼と比較して σ_w が高い傾向を示した。また、両鋼ともに熱サイクル条件に起因する σ_w の差が見られ、熱サイクル条件ごとの強度や組織変化が疲労寿命に影響を及ぼしていることが示唆された。一般に、疲労強度は材料の強度、と

くに引張強度に大きく依存することが知られている¹⁹⁾。本研究においては引張試験が困難であったため、代替手法として、引張強度と相関性の高いビッカース硬さ (HV) を用いて材料強度の指標とした。

σ_w をビッカース硬さで整理した結果を図8に示す。図中の点線は、 σ_w とビッカース硬さの比例関係の直線であり、傾きが1.2から1.9の範囲で描いた。熱サイクル条件の違いによらず、汎用鋼および開発鋼はそれぞれ傾きが1.5もしくは1.8程度の直線関係になった。両鋼の各熱サイクル条件における疲労強度の差は、主にビッカース硬さの違いに起因することが明らかとなった。いっぽうで、汎用鋼と開発鋼の疲労強度の違いは硬さだけでは説明できないことがわかった。金属材料における疲労特性は材料強度だけではなく、微細組織の状態にも依存する。たとえば、結晶粒径は材料の強度と相関があるだけでなく、結晶粒界からき裂発生する^{15), 20)}など強度以外の影響も示唆されている。疲労強度と結晶粒径の関係はHall-Petch則に類似し、 \sqrt{a} の逆数に比例するとされる²¹⁾。また、疲労限度を引張強度で規格化した指標は疲労限度比と呼ばれ、強度の異なる材料間の比較に使われる。ここでは、 σ_w をビッカース硬さで規格化した値を疲労限度比 (σ_w/HV) として用いた。 σ_w/HV と \sqrt{a} の逆数の関係を図9¹⁷⁾に示す。汎用鋼、開発鋼ともに \sqrt{a} が変化しても疲労限度比はほとんど変わらなかった。一般的に、結晶粒径微細化により材料強度は増加する。すなわち、結晶粒径の微細化は、材料の硬さ増加により

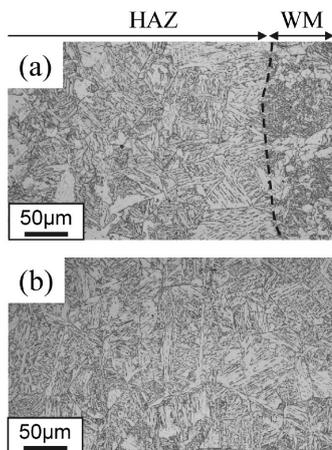


図5 (a) すみ肉溶接ルート部における溶接金属近傍のHAZ組織 (b) 再現熱サイクル試験片の組織
Fig.5 (a) Microstructure of the HAZ adjacent to the weld metal at the root of the fillet weld (b) Microstructure of the simulated thermal cycling specimens

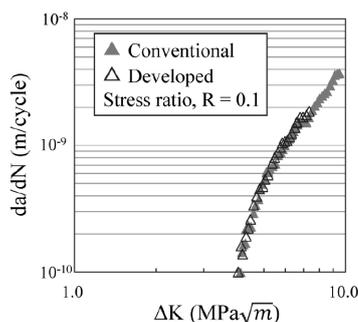


図6 下限界応力拡大係数範囲近傍の亀裂進展挙動
Fig.6 Crack propagation behavior near the threshold stress intensity factor range (ΔK_{th})

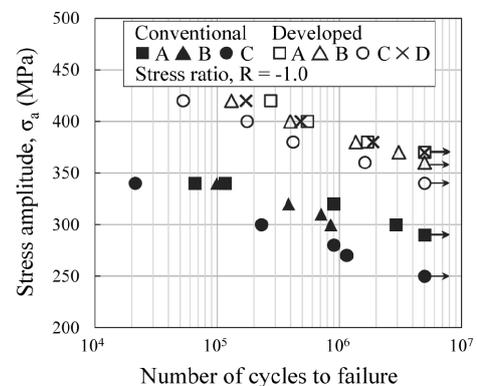


図7 汎用鋼および開発鋼の再現熱サイクル片における疲労試験結果
Fig.7 Fatigue test results of simulated thermal cycling specimens for conventional and developed steel

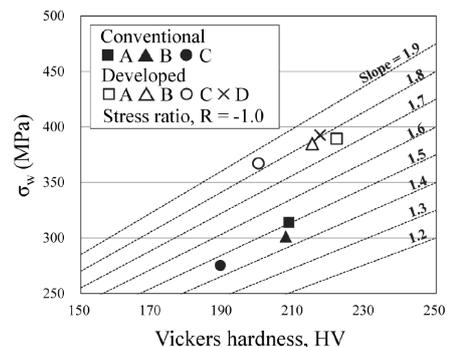


図8 100万回疲労強度とビッカース硬さの関係
Fig.8 Relationship between fatigue strength at one million cycles and Vickers hardness

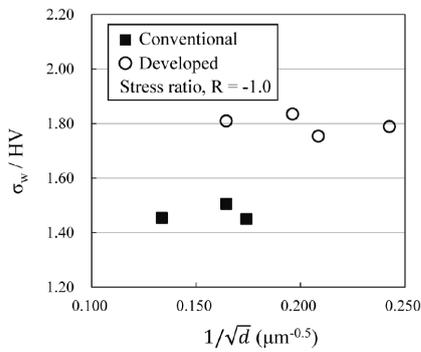


図9 汎用鋼および開発鋼の疲労限度比と結晶粒径の関係

Fig.9 Relationship between fatigue limit ratio and grain size for conventional and developed steel

疲労限度に影響を与えたのみであり、それ以外の影響は認められなかった。また、汎用鋼に比べて、開発鋼の方が疲労限度比は高く、この違いは結晶粒径の影響でも説明できなかった。

以上のことから、開発鋼は組織や硬さが異なる再現 HAZ 組織においても、汎用鋼に対して優れた疲労特性を示しており、固溶強化によって疲労特性が改善したと考えられる。

3. 溶接継手における疲労特性評価

3.1 デッキプレート・Uリブの溶接継手を模擬した試験体の作製と評価方法

前章の検討により、溶接工程を模擬した熱サイクル試験で作製した再現 HAZ 組織においては、開発鋼が疲労特性に優れていることを確認できた。そこで本章では、開発鋼の効果をさらに実構造に近い条件下で検証した。評価には図10に示す対象溶接継手を模擬した試験体を用意した。疲労試験はデッキプレートには板厚16mmと25mmの400~490 MPa級鋼を用いた。溶接は軟鋼用フラックス入りワイヤを用いてすみ肉1パス溶接を実施した。この時、Uリブ板厚方向に対して溶け込み深さが板厚の75%以上となるようにした。デッキプレート端上部に設置された可搬型アクチュエータを用いて片持ち曲げ方式で実施した。図10の矢印部で応力比 $R=0.1$ で繰り返し荷重を荷重し、打ち切り回数は1,000万回に設定した。ただし、結果には100~500万回程度で中断したデータも含まれる。横リブ交差の影響の無い一般部(図10中のa, bまたはe, f)のひずみ勾配を用いて、模擬Uリブ位置まで線形外挿した値を公称応力範囲 $\Delta\sigma$ と定義した。また、き裂発生の検知は、山田らの検討²²⁾を参考にして、リブ近傍のひずみゲージ(図10中のd)で測定し、ひずみ変動範囲が初期値から5%低下したときの繰り返し数を疲労き裂発生寿命 $N_{5\%}$ と定義した。

3.2 継手模擬試験体の疲労特性

疲労試験の公称応力範囲 $\Delta\sigma$ と疲労き裂発生寿命 $N_{5\%}$ の関係について、デッキプレートに汎用鋼を用いた継手の結果を図11に示す。板厚25mmの継手における $N_{5\%}$ は、板厚16mmの継手における $N_{5\%}$ と明確な差はなかった。図中の破線は、き裂発生した全ての結果に対して、JSSC疲労設計曲線($\Delta\sigma^m \cdot N_{5\%} = C_0$)²³⁾を参考に傾き $m=3$ と

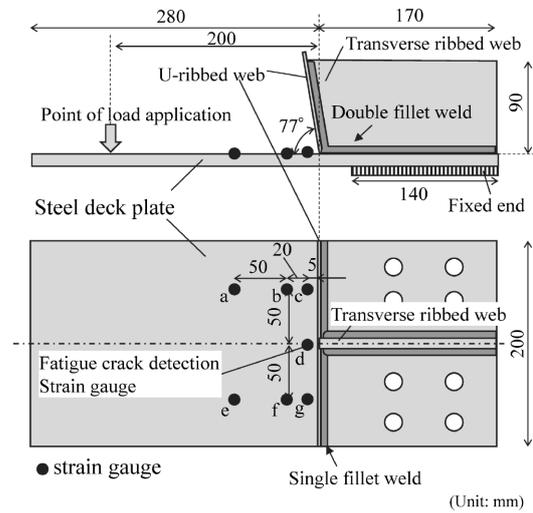


図10 デッキプレート/Uリブ溶接部を模擬した継手試験体

Fig.10 Joint specimen reproducing the deck plate/U-rib welded joint

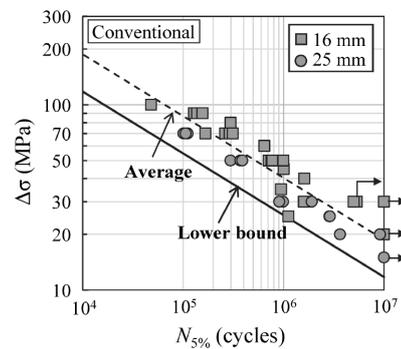


図11 汎用鋼を用いた継手疲労試験結果

Fig.11 Fatigue test results of joints specimens using conventional steel

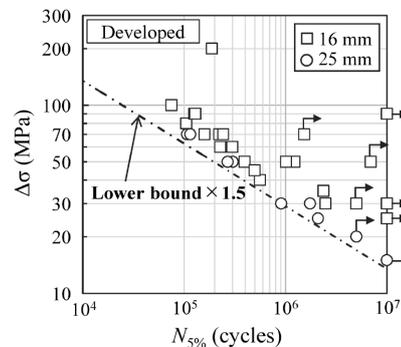


図12 開発鋼を用いた継手疲労試験結果

Fig.12 Fatigue test results of joints specimens using developed steel

して両対数で直線回帰した平均線(以下、 $S-N_{5\%}$ 線とする)を表す。標準偏差 σ を用いて、平均 -2σ (97.5%下限)を寿命下限と定義し、実線で示した(以下、 $S-N_{5\%}$ 下限線とする)。つぎに、デッキプレートに開発鋼を用いた場合の疲労試験結果を図12に示す。汎用鋼の場合と同様に、板厚による $N_{5\%}$ の違いは見られなかった。図中における一点鎖線は汎用鋼継手の $S-N_{5\%}$ 下限線の1.5倍の寿命を表している。各応力での開発鋼の寿命は $S-N_{5\%}$ 下限線の1.5倍以上となっていることがわかった。

以上の結果から、高いき裂発生抵抗を有する開発鋼を用いることで、デッキプレート・Uリブ溶接継手における疲労耐久性が向上した。本稿では、デッキプレート・

Uリブ溶接継手に関する取り組みを報告したが、開発鋼は板厚12 mmのグラインダー処理を施した面外ガセット継手での疲労耐久性向上にも効果があることが報告されており¹⁷⁾、汎用鋼に比べて疲労限度が高くなることが明らかとなっている。これにより、たとえば垂直補剛材との溶接部などにおける疲労き裂発生を抑制することも期待される。

むすび = 疲労き裂の発生抑制をコンセプトとするEX-Facterを開発し、鋼床版のデッキ進展き裂を題材に疲労改善効果を検証した。再現HAZ組織材の検討から、溶接熱影響により組織が変化した場合でも、汎用鋼に対するEX-Facterの優位性が確認された。EX-Facterの高い疲労特性は、材料強度や結晶粒径の違いによるものではなく、固溶強化元素の影響によると考えられる。また、デッキプレート・Uリブ溶接継手を模擬した継手試験体での試験から、継手の疲労特性も改善することが明らかとなった。

本研究を遂行するにあたり、鋼床版の溶接部を模擬した継手の評価に関して多大なる技術的助言を頂いた関西大学 石川敏之教授に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省. 令和4年版国土交通白書 第2部第2章.
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/pdfindex.html>, (参照2025-04-15)
- 2) 公益社団法人土木学会. 鋼橋の疲労対策技術, 丸善出版, 2013, p.39-52.
- 3) 山田健太郎. 土木学会鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集. 2007, Vol.10, p.11-18.
- 4) 平林泰明ほか. 土木学会鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集. 2007, Vol.10, p.39-53.
- 5) 田畑晶子ほか. 阪神高速グループ技報. 2006, Vol.23.
- 6) 柿崎捷吾ほか. 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集. 2020, p.109-114.
- 7) 平山繁幸ほか. 鋼構造論文集. 2005, Vol.12, No.45, p.111-121.
- 8) 丹下 彰ほか. 圧力技術. 2000, Vol.38, No.4, p.216-223.
- 9) 伊藤孝矩ほか. 日本機械学会第30回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2023). 2023-9-27/29, 日本機械学会, 2023.
- 10) 誉田 登ほか. まてりあ. 2004, Vol.43, No.2, p.148-150.
- 11) 中島清孝ほか. 溶接学会論文集. 2009, Vol.27, No.1, p.21-27.
- 12) 伊木 聡ほか. JFE技報. 2004, No.5, p.13-18.
- 13) 伊木 聡ほか. JFE技報. 2014, No.33, p.55-61.
- 14) 徳力 健ほか. 鋼構造論文集. 2011, Vol.18, No.69, p.9-16.
- 15) 潮田浩作ほか. 鉄と鋼. 2008, Vol. 94, No.8, p.321-330.
- 16) T. Yokoi et al. Journal of Materials Science. 2001, Vol.36, p.5757-5765.
- 17) 田畑晃人ほか. 構造工学論文集. 2025, Vol.71A, p.449-457.
- 18) 一般社団法人溶接学会. 溶接・接合, 産報出版, 2015, p.154-163.
- 19) 長谷川典彦ほか. 材料. 1990, Vol.39, No.442, p.859-863.
- 20) 兼子佳久ほか. 金属疲労の基礎とメカニクス 結晶学と力学から読み解く金属の疲労, 内田老鶴圃, 2024, p.111-116.
- 21) 横幕俊典ほか. 材料. 1991, Vol. 40, No.458, p.1415-1421.
- 22) 山田健太郎ほか. 構造工学論文集. 2008, Vol.54A, p.675-684.
- 23) 社団法人日本鋼構造協会. 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 -, 技報堂出版, 2014, p.25.