

分配横桁ウェブギャップ板上端部の疲労対策に関する実験的検討

Experimental study on retrofitting method against fatigue cracking at the upper end of web gap plates on load distribution cross beam ends

岡田 康暉*

坂野 昌弘**

小西 日出幸***

小山 雅弘****

Koki OKADA*

Masahiro SAKANO**

Hideyuki KONISHI***

Masahiro KOYAMA****

ABSTRACT Retrofitting method against fatigue cracking at the upper end of web gap plates under RC slab is investigated. In this method, TRS (Thread Rolling Screw) is used to attach angle steel to upper flange, and HTB (High Tension Bolt) is used to connect angle steels to web gap plate. The effectiveness of the method is investigated through fatigue tests using a beam specimen with the web gap detail of the same size as the actual bridge. As a result, the method can reduce the local stress concentration at crack initiation points to about 50~60 %, and extend fatigue crack initiation life more than 2~6 times and fatigue crack propagation life more than 100 times after grinding away fatigue cracks.

Keywords: ウェブギャップ, 疲労試験, スレッドローリングスクリュー (TRS), 予防保全
web gap, fatigue test, Thread Rolling Screw (TRS), preventive maintenance

1. はじめに

鋼 I 桁橋では、分配横桁取合い部の主桁上フランジ下面とウェブギャップ板上端部との溶接部や、対傾構取付け部の主桁上フランジ下面と垂直補剛材上端部との溶接部において、疲労き裂の発生が多数報告されている[1,2].

その対策として、RC 床版をはつり高力ボルトを用いて上フランジと補剛材を当て板で連結する工法や、再溶接などが考えられるが、RC 床版をはつる場合には交通規制が必要であり、再溶接の場合にはき裂が再発する可能性がある。また、ウェブギャップ板に半円孔を明けることで応力を緩和する方法も提案されているが[2~4], 微小なき裂が生じている場合には、き裂が進展する可能性がある[5].

「鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する研究」プロジェクト[6]の一環として、分配横桁上部のウェブギャップ部と対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労き裂に対し、交通規制が不要な下面からの補強工法であるジャッキアップによる当て板工法

*関西大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 博士前期課程 (研究当時)

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

**第 2 種正会員

工博 関西大学 環境都市工学部 教授

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

***博 (工) 日本橋梁建設協会

(〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-8-2)

****国土交通省 近畿地方整備局 姫路河川国道事務所

(〒670-0947 兵庫県姫路市北条 1-250)

と、タッピングボルト(スレッドローリングスクリュー; TRS)[7,8]を用いたアングル材工法の二つの工法が提案され[9,10], 実橋において試験的に施工された[11].

本研究では、それらの内の分配横桁上部のウェブギャップ部を対象とした TRS を用いたアングル材工法について、予防保全と事後保全対策の効果を実物大の試験体を用いて実験的に検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体の形状と寸法

図 1 に試験施工された橋梁[11]の断面図を示す。主桁高は 1800mm, 主桁間隔は 3000mm である。図中の (a) 部を対象に試験体を製作した。

図 2 に分配横桁試験体の形状と寸法、ひずみゲージ貼付位置および当て板取付け位置を示す。試験体の主桁高は 1050mm, 主桁間隔は 1200mm と試験機容量を考慮して実橋より縮小しているが、主桁上フランジやウェブギャップ部の部材寸法は実物と同一である。主桁は 3 本設け、中央の桁の左右のウェブギャップ板上端部に、図 1 (1) に示すように、走行、追越車線を交互に車両が通行する際に生じる交番応力を再現することを試みた。

図 3 に当て板の形状と寸法を示す。当て板は、165mm×100mm×9mm のアングル材を用いた。試験部 A, B に 2.2 で述べる TRS を用いたアングル材工法を施して、予防保全効果の検証を行った。

(2) (a)部拡大

(3) 断面图(A-A)

(3) 断面图(A-A)

– 10 –

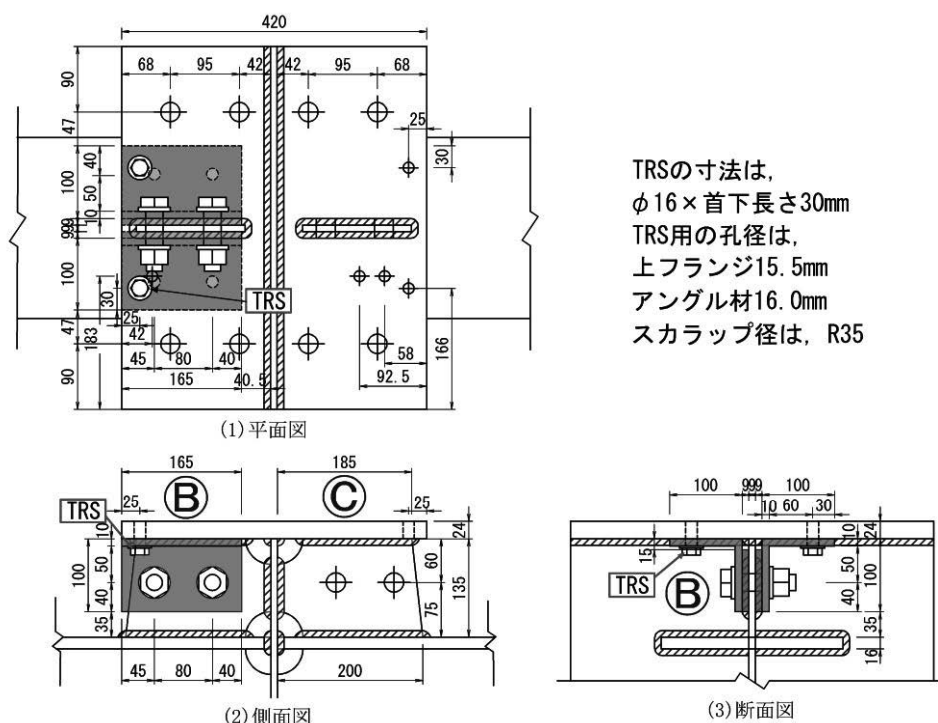


図3 当て板の形状と寸法

表1 使用鋼材の機械的性質 (ミルシート値 () 内は規格値)

使用部材	材質	板厚 (mm)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	シャルピー (J)
主桁下フランジ	SM490YBTMC	36	404(≥355)	534(490~610)	26(≥19)	302(≥27)
主桁上フランジ	SM490YB	24	401(≥355)	538(490~610)	28(≥19)	270(≥27)
横桁フランジ	SM490YATMC	16	411(≥365)	529(490~610)	21(≥15)	—
主桁ウェブ		9	411(≥365)	516(490~610)	23(≥15)	—
主桁垂直補剛材	SM400A	9	292(≥245)	440(400~510)	31(≥18)	—
横桁ウェブ						
横桁ウェブギャップ板						
横桁垂直補剛材						

表2 使用鋼材の化学成分 (ミルシート値 () 内は規格値)

使用部材	材質	板厚 (mm)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
主桁下フランジ	SM490YBTMC	36	14(≤20)	26(≤55)	127(≤165)	13(≤35)	2(≤35)
主桁上フランジ	SM490YB	24	16(≤20)	39(≤55)	141(≤165)	16(≤35)	5(≤35)
横桁フランジ	SM490YATMC	16	15(≤20)	20(≤55)	109(≤165)	12(≤35)	3(≤35)
主桁ウェブ		9	15(≤20)	20(≤55)	111(≤165)	14(≤35)	4(≤35)
主桁垂直補剛材	SM400A	9	16(≤23)	14(—)	67(≥250×C)	17(≤35)	5(≤35)
横桁ウェブ							
横桁ウェブギャップ板							
横桁垂直補剛材							

表1に試験体に用いた鋼材の機械的性質を、表2に化学成分を示す。使用鋼材は実橋と同様に、主桁のフランジに SM490YB、横桁フランジ、主桁ウェブに SM490YA、主桁垂直補剛材、横桁ウェブ、ウェブギャップ板、垂直補剛材には

SM400A を使用した。

表3に溶接条件を示す。溶接方法は CO₂ ガスシールドアーク溶接で、上フランジ下面とウェブギャップ板上端部の間にはギャップを 2mm 程度設けて溶接した。

表3 溶接条件

溶接方法	適用箇所	脚長 (mm)	ワイヤ径 (mm)	パス数	電流 (A)	電圧 (V)	ガス流量 (l/m)	速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/cm)
ガスシールド アーク溶接 (CO ₂ 半自動 溶接)	組立用溶接 補剛材等の溶接 横桁の溶接 主桁ウェブとフランジの溶接	6～9	1.2	1	240～ 330	24～ 40	20～30	15～50	6.9～53

2.2 予防保全対策

TRS でアングル材を主桁上フランジ下面に押し付け、アングル材に荷重を分担させることで、ウェブギャップ板上端部にかかる荷重を低減する工法である（写真1,2）。上フランジからの荷重は、水平方向の HTB による摩擦接合で、アングル材からウェブギャップ板に伝達する。このように、本工法では、ウェブギャップ板上端縁部の応力集中を、アングル材によってウェブギャップ板全体に分散させるため、ウェブギャップ板下部の応力集中も低減されることが考えられる。

TRS を用いた当て板対策の施工手順を以下に示す。

① 孔あけ

アングル材の孔（ $\phi 24.5 \times 2$ ヶ所、 $\phi 16 \times 1$ ヶ所）に合わせて、ウェブギャップ板に $\phi 26.5$ （拡大孔）の孔を2ヶ所あけ、上フランジに $\phi 15.5$ の孔を1ヶ所あける。このとき、ウェブギャップ板側の仮締めした HTB が TRS 締め付け器具と干渉しないように孔あけ位置を決定した（図3）。

② アングル材仮止め

アングル材を上フランジに押し付けながら、ウェブギャップ板側の HTB を仮締めする。

③ TRS 締め付け

TRS を締め付けて、アングル材を上フランジ下面に押し付ける。

④ HTB 本締め

ウェブギャップ板側の HTB2 本を本締めする。

2.3 事後保全対策

き裂発生後に、短いトウき裂に対してはき裂全体を削除し、長いルートき裂に対してはき裂先端を削除する。削除にはバークグラインダを使用した。その後、2.2 と同様の手順で TRS を用いてアングル材を取付ける事後保全対策を施した。疲労試験終了後、アングル材を取り外し磁粉探傷試験（MT）によってき裂の進展状況を確認した。

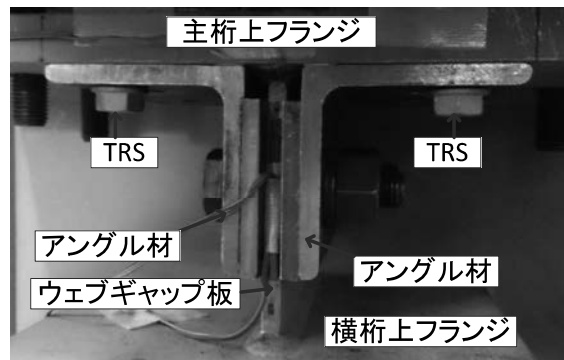


写真1 TRSを用いた当て板施工状況（断面）

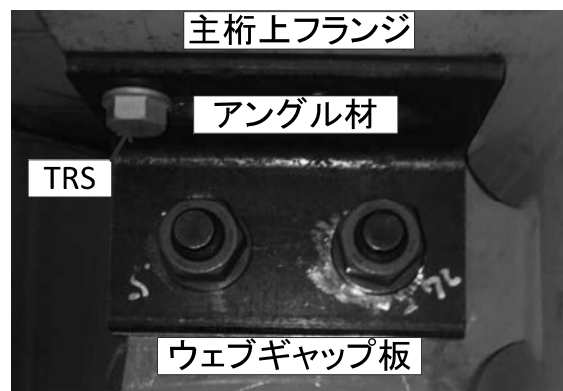


写真2 TRSを用いた当て板施工状況（側面）

2.4 静的載荷試験方法

2.4.1 載荷方法

図4に載荷方法を示す。走行車線と追越車線とを交互に車両が通行することによる応力の交番を再現するために、アクチュエータを2本使用して載荷した。アクチュエータ No.1 により G1 側の試験部 A と B、アクチュエータ No.2 により G3 側の試験部 C と D に載荷した。なお、実橋では床版のたわみの他に主桁間のたわみ差の影響も考えられるが、主桁のたわみ差は分配横桁の端部の疲労損傷に影響すると考えられるので[12]、本研究では、補剛材上端の疲労損傷の原因と考えられる床版のたわみに着目した。

図5に図4の（b）部の拡大を示す。ウェブギャップ板コバ面の上フランジとのすみ肉溶接止端から下に10mmの位置に1軸ゲージ（ゲージ長1mm）を、その上の溶接ビード表面に1軸ゲージ（ゲージ長5mm）をそれぞれ鉛直方向に貼付した。

2.4.2 載荷位置の検討

載荷位置によって試験部にかかる応力が変化するため載荷位置を検討した。図4, 5に示すように、ウェブギャップ板上端部コバ面直上付近で10mm×10mm×220mmの載荷棒の位置を変えて4ケース検討した。載荷位置の検討では、アクチュエータNo.1を使用し、載荷荷重は $P_{max}=120kN$, $P_{min}=20kN$ ($\Delta P=100kN$) に設定した。

2.4.3 同位相と逆位相の比較

図6に両アクチュエータの逆位相の載荷波形を示す。アクチュエータNo.1とNo.2を使用して同位相と逆位相とで載荷を行い ($P_{max}=140kN$, $P_{min}=20kN$)、応力分布および応力範囲を比較して、位相の影響について検討した。

2.4.4 対策ありとなしの応力分布の比較

全試験部A~Dで対策なしの場合と、試験部A, Bは対策あり、試験部C, Dでは対策なしの場合でのウェブギャップ板上端部コバ面の応力分布を比較した。載荷は逆位相で行った。

2.5 疲労試験方法

疲労試験では走行車線と追越車線とを交互に車両が通行することによる応力の交番を再現するために、アクチュエータを2本使用し、逆位相で載荷を行った。載荷速度は3~4Hzとし、載荷荷重の大きさは、静的載荷試験で決定した。

表4に疲労試験ステップを示す。ステップ1では、試験部A,BでTRSとアングル材による予防保全対策を、試験部C,Dでき裂の再現を行った。ステップ2では、試験部A,Bでアングル材を取外しき裂の再現を、試験部C,Dでき裂の削除とTRSとアングル材による事後保全対策を行った。

表面き裂に対してはMTにより検出し、内部き裂に対してはビード表面のひずみ変化からき裂の発生および進展挙動を推定した[13]。

また、疲労試験終了後、ウェブギャップ板上端部のコア抜きを行い、き裂の発生位置と進展状況の確認、およびウェブギャップ板と上フランジの溶接部の溶け込み状況やルートの幅と高さなどの寸法計測を行った。

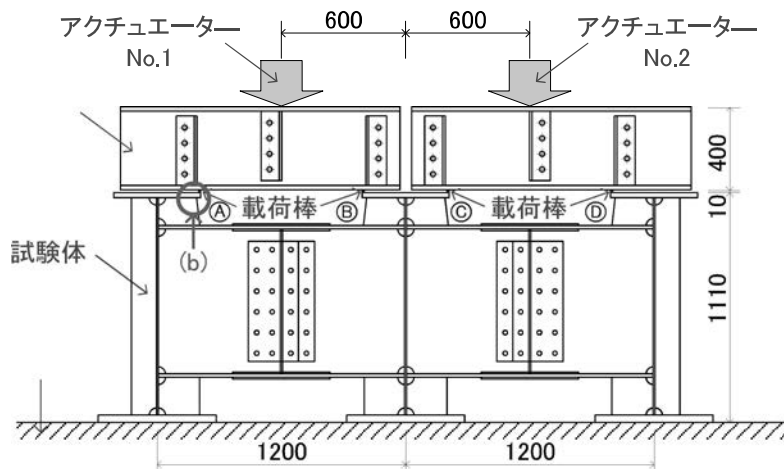


図4 載荷方法

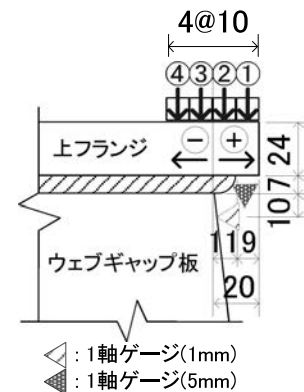


図5 (b)部拡大

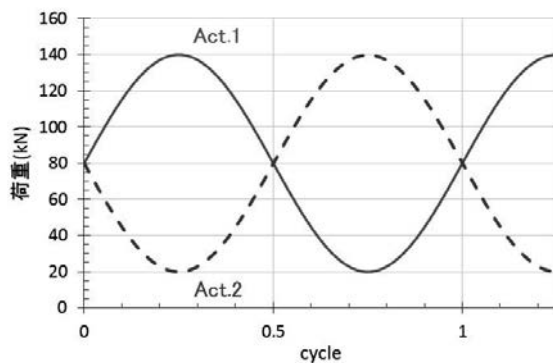


図6 2本のアクチュエータの載荷波形

表4 疲労試験ステップ

ステップ	試験部	A	B	C	D
1	目的	予防保全		き裂再現	
	対策	TRS		無し	
2	目的	き裂再現		事後保全	
	対策	無し		き裂削除+TRS	

3. 実験結果

3.1 静的荷重試験結果

3.1.1 荷重位置の検討

図7に荷重位置検討結果を示す。荷重位置が上フランジ縁側(図5に示す最も+側)になるほどウェブギャップ板コバ面の応力は大きくなることから、この試験体(試験施工した橋梁)では、上フランジの張出しが小さいことから、荷重位置は最も上フランジ縁側(+側)のケース①に決定した。

図8に荷重荷重と各試験部の応力範囲分布の関係を示す。 $\Delta P=110\sim 130\text{kN}$ は $\Delta P=100\text{kN}$ を1.1~1.3倍して推定したものである。

実橋でのコバ面の応力値は最大 170MPa [11]程度であるが、疲労試験では、このコバ面の応力が降伏点(292MPa)以下の範囲で最大となるように、荷重荷重範囲 ΔP を 120kN ($P_{\max}=140\text{kN}$, $P_{\min}=20\text{kN}$)に設定した。

3.1.2 同位相と逆位相の比較

図9に同位相と逆位相の最大および最小荷重時の応力分布を、図10に同位相と逆位相の応力範囲分布を示す。荷重ケースは、同位相はNo.1= 80kN , No.2= 80kN の1ケース、逆位相はNo.1= 20kN , No.2= 140kN とNo.1= 140kN , No.2= 20kN の2ケース、合計3ケース行った。ただし、同位相の($20\text{kN}, 20\text{kN}$)($140\text{kN}, 140\text{kN}$)は($80\text{kN}, 80\text{kN}$)の結果から推定した。

実橋では、ウェブギャップ板上端で大きな圧縮応力と小さい引張応力が生じている[11]。図9より中桁(試験部B, C)では、最大荷重時には同位相荷重時に左右で打消しあうために逆位相よりも応力の絶対値が小さくなり、最小荷重時には逆位相荷重時に荷重の反対側で実橋と同様に引張側の応力が発生している。そのため、図10に示すように、中桁では、逆位相の方が同位相と比べて応力範囲が1割程度大きくなっている。なお、ここでは、最小荷重を 20kN に設定しているため、逆位相最小荷重時の応力は圧縮になっている。

以上により2本のアクチュエータを用いて逆位相で荷重を行うことによって、走行車線と追越車線とを交互に車両が通行することによる応力の交番を再現することが可能となる。

3.1.3 対策ありとなしの応力分布の比較

対策前後で2本のアクチュエータを同時に使用して、逆位相での荷重を行った。図11に対策前後の各位相での応力分布を比較したものを示

す。対策を施したA, Bでは応力の絶対値が小さくなっているのに対し、対策を施していないC, Dでは、応力はほとんど変わっていない。

図12に対策前後の逆位相での応力範囲分布を示す。図12よりTRSを用いたアングル材工法によって、試験部Aでは約5割、試験部Bでは約6割まで応力を低減できることが確認された。

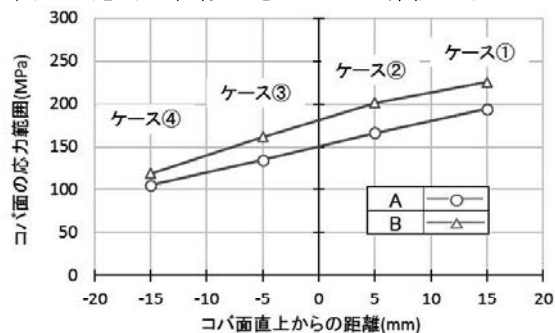


図7 荷重位置の検討

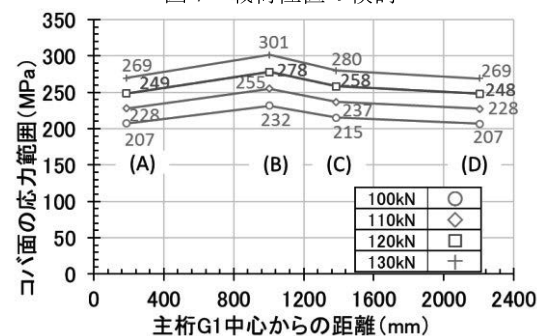


図8 荷重荷重の検討

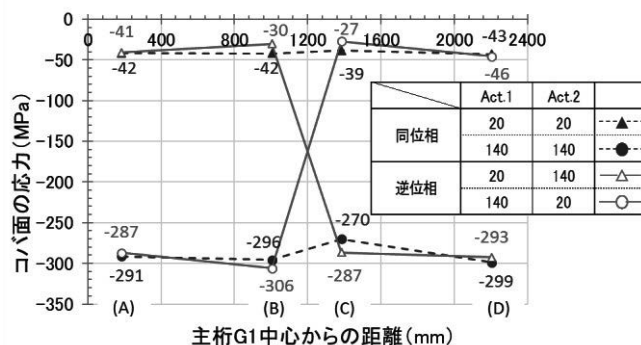


図9 同位相と逆位相の最大および最小荷重時の応力分布

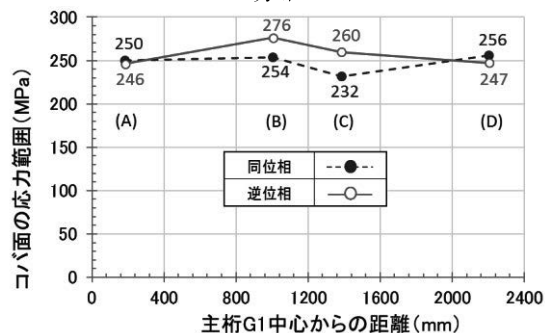


図10 同位相と逆位相の応力範囲分布

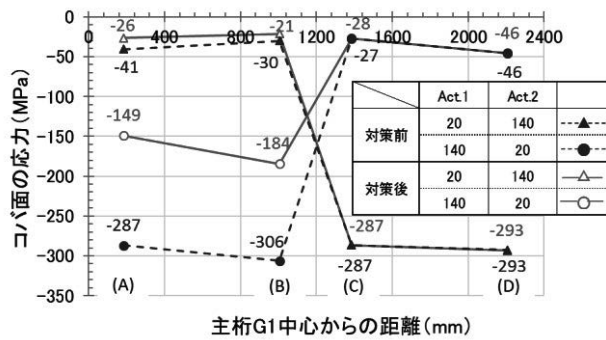


図 11 対策前後の最大および最小荷重時の応力分布
(A,B のみ対策)

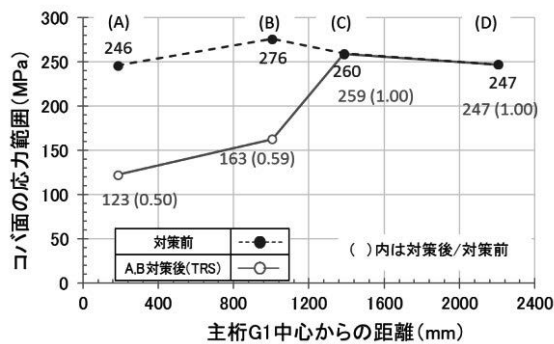


図 12 対策前後の応力範囲分布 (A,B のみ対策)

3.2 疲労試験結果

図 13 にウェブギャップ板上端部のビード表面のひずみ範囲の変化を示す。Ns は、ルートキ裂がビード表面で発見された場合に、ビード表面のひずみが荷重初期を除いて 2×10^{-6} 以上低下または増加し始めて元に戻らないくり返し回数で定義したルートキ裂発生寿命, Nd(T)はトウキ裂を MT で発見したくり返し回数で定義したトウキ裂の発見寿命, Nd(R)はルートキ裂が表面に現れたくり返し回数で定義したルートキ裂の発見寿命である。また、図中におけるひずみの違いは、ビードの寸法や形状とゲージ位置との関係の違いなどによるものと考えられる。

図 14 に荷重回数とき裂表面長さの関係を示す。き裂表面長さはウェブギャップ板のコバ面と両側面のき裂表面長さの合計で定義した。表 5 に各試験部の対策と疲労試験結果を、表 6 に各試験部の予防保全と事後保全の対策効果を示す。

以下で、図 13, 14 と表 5, 6 を用いて各ステップごとに疲労試験結果を考察する。

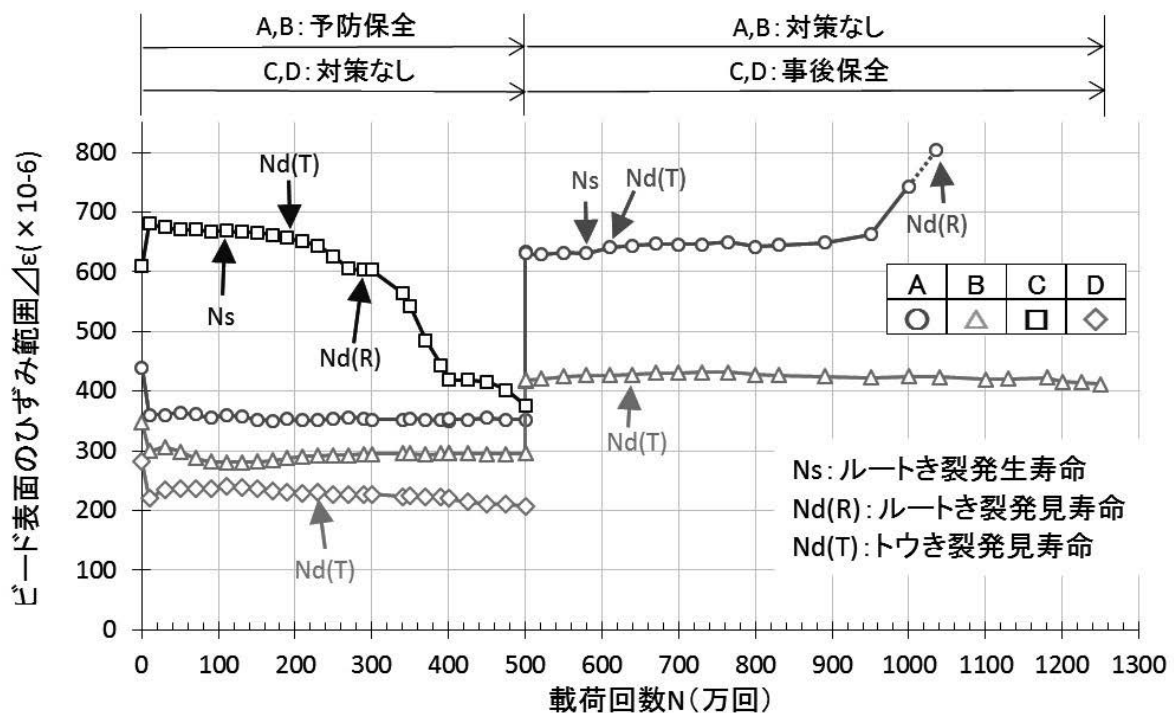


図 13 ウェブギャップ板上端ビード表面のひずみ範囲の変化

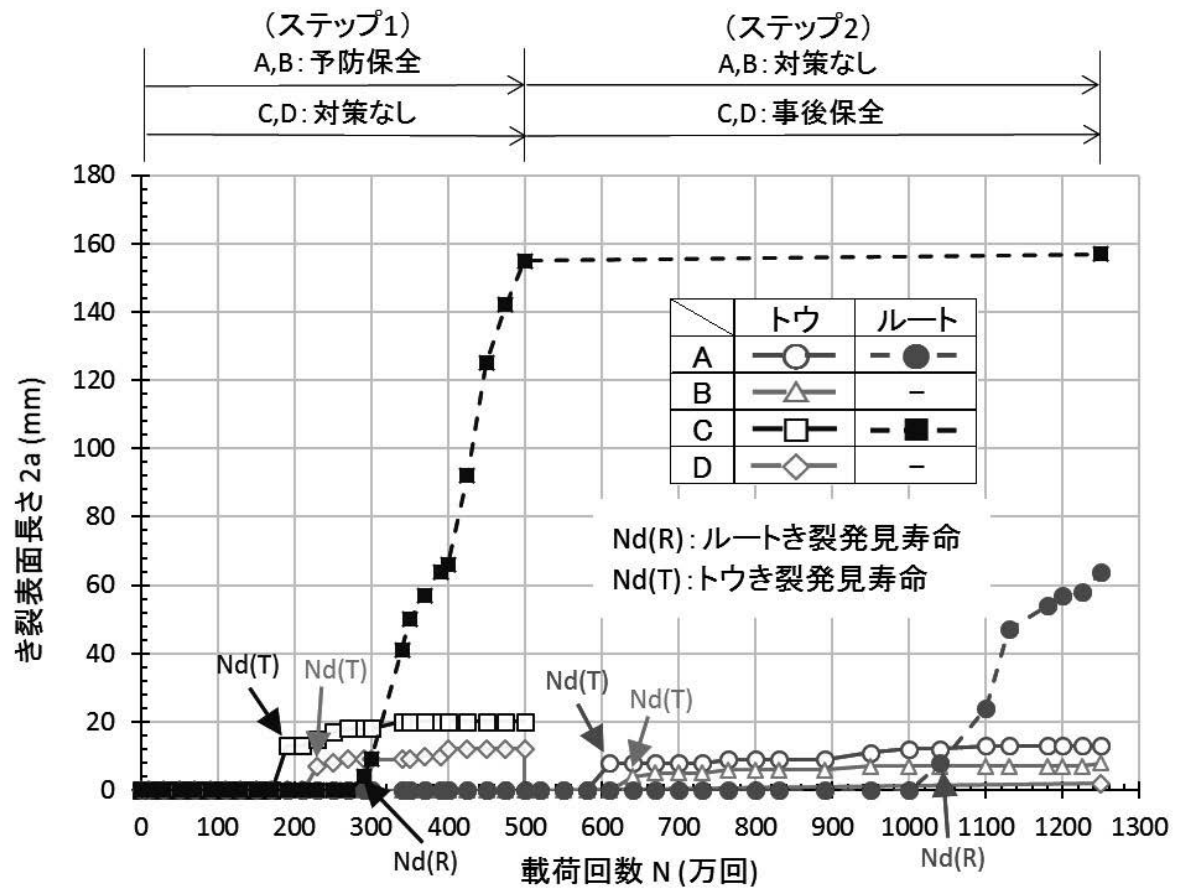


図 14 載荷回数とき裂表面長さの関係

表5 各試験部の対策と疲労試験結果

試験部	対策	疲労寿命(万回)			最大き裂長さ(mm) トウ(ルート)	
		Ns	Nd(R)	Nd(T)	発生時	最終
A	予防	>500	>500	>500	-	-
	なし	80	540	110	8 (8)	13 (64)
B	予防	>500	>500	>500	-	-
	なし	>750	-	140	4	8
C	なし	110	290	190	13 (4)	20 (155)
	事後	>750	>750	>750	-	20 (157)
D	なし	>500	-	230	7	12
	事後	>750	>750	>750	-	2

表6 各試験部の対策効果

試験部	疲労寿命 (Ns, Nd (T) の最小値)		予防保全効果		き裂進展速度		事後保全効果
	ステップ①	ステップ②	AB/C, D (①)	①/②	ステップ①	ステップ②	①/②
A	>500万回	80万回	—	>6.3倍	—	—	—
B		140万回	—	>3.6倍	—	—	—
C	110万回	>750万回	>4.5倍	—	13mm/25万回	2mm/750万回	200倍
D	230万回		>2.2倍	—	7mm/20万回	2mm/750万回	130倍

3.2.1 ステップ1

(1) き裂再現 (試験部 C,D)

試験部 C では、図 13 に示すように、N=110 万回でビード表面のひずみが低下し始め、180 万回以降急激に低下したので、Ns と推定した。さらに、写真 3 に示すように、N=190 万回で長さ 12mm と 13mm の 2 本のトウき裂を発見し (Nd(T))、写真 4 に示すように、N=290 万回で長さ 4mm 程度のルートき裂が表面に現れた (Nd(R))。N=500 万回でトウき裂は表面長さ 20mm まで進展し、ルートき裂も表面長さ 155mm まで進展した (写真 5,6)。

図 14 に示すように、トウき裂はほとんど進展せず、それに比べてルートき裂は表面に現れてから急速に進展することがわかる。

試験部 D では、写真 7 に示すように、N=230 万回で長さ 6mm と 7mm の 2 本のトウき裂を発見したが (Nd(T))、図 13 に示すようにビード表面のひずみには試験部 C のような大きな変化が見られないことから、ルートき裂は発生していないと推定した。N=500 万回でトウき裂が表面長さ 12mm まで進展した (写真 8) が、図 14 に示すように、試験部 C と同様にトウき裂はほとんど進展していない。

(2) 予防保全 (試験部 A,B)

予防保全対策を施した試験部 A,B では、図 13, 14 に示すように、500 万回まで繰返し载荷を行ったが、ビード表面で大きなひずみ変化が見られないことからルートき裂は生じていないと推定され、また、止端部等でのき裂の発生も確認されなかった。それに対して (1) で述べたように、対策なしの試験部 C, D では、N=110 万回でルートき裂が発生し、N=230 万回でトウき裂が発見されたことから、表 6 に示すように TRS を用いた予防保全対策によってき裂発生寿命は 2.2 (500 万回/230 万回) ~4.5 (500 万回/110 万回) 倍以上となることが明らかとなった。



写真3 発見時のトウき裂 (試験部 C 北側, 190 万回)

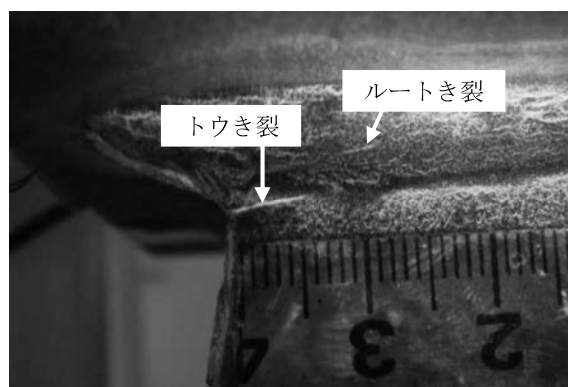


写真4 進展中のトウき裂と表面に表れたルートき裂 (試験部 C 北側, 290 万回)

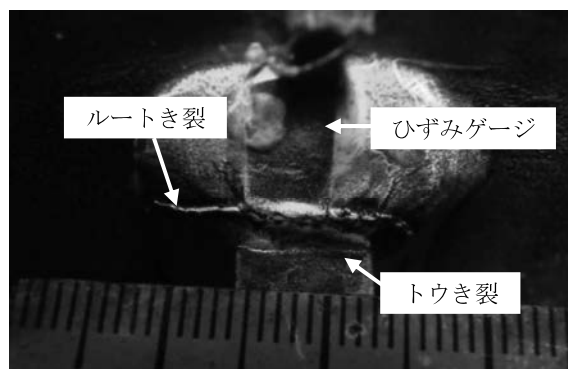


写真5 進展したトウき裂とルートき裂 (試験部 C コバ面, 500 万回)

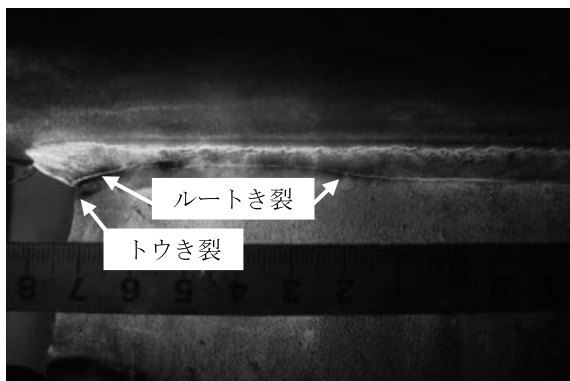


写真6 進展したトウキ裂とルートキ裂
(試験部C北側, 500万回)

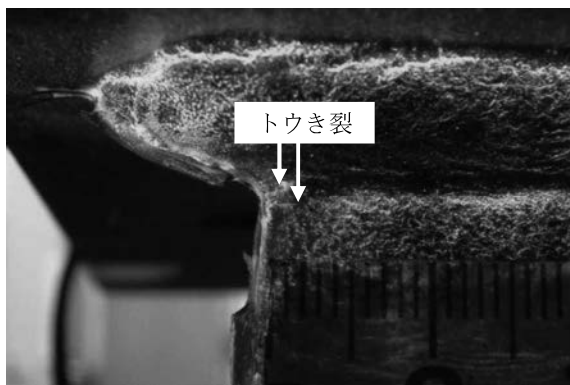


写真7 発見時のトウキ裂 (試験部D南側, 230万回)

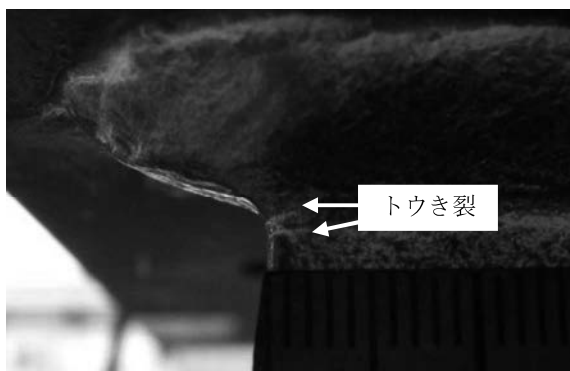


写真8 進展したトウキ裂
(試験部D南側, 500万回)

3.2.2 ステップ2

(1)き裂再現 (試験部A,B)

試験部Aでは、図13に示すように、 $N=580$ 万回(ステップ2では80万回)でビード表面のひずみが増加し始めたので、 N_s と推定した。 $N=610$ 万回(ステップ2では110万回)で長さ8mmのトウキ裂が発見され(写真9)、 $N=1040$ 万回(ステップ2では540万回)で表面に長さ8mmのルートキ裂が現れた(写真10)。このとき裂がひずみゲージに近づいたため、図13でビード表面のひず

みが無限大となり計測不能となったものと考えられる。 $N=1250$ 万回(ステップ2では750万回)でトウキ裂が表面長さ13mmまで進展し、ルートキ裂は表面長さ64mmまで進展した(写真11,12)。

なお、ステップ1の試験部Cでは、ビード表面のひずみが低下しており、試験部Aでは逆に増加している。これは、試験部Cではき裂がひずみゲージの下側にそって進展したが(写真5)、試験部Aではひずみゲージに向かって進展した(写真10)ためと考えられる。図14に示すように、ステップ1と同様にトウキ裂はほとんど進展しないのに比べて、ルートキ裂は急速に進展している。

試験部Bでは、図14に示すように、 $N=640$ 万回(ステップ2では140万回)で長さ4mmのトウキ裂が発見されたが(写真13)、図13に示すようにビード表面のひずみにはほとんど変化が見られず、ルートキ裂は発生していないと推定した。 $N=1250$ 万回(ステップ2では750万回)でトウキ裂が表面長さ8mmまで進展した(写真14)。

ステップ2で、試験部A、Bでき裂が発生したのが $N=80\sim140$ 万回なので、ステップ1の予防保全対策ありの場合のき裂発生寿命500万回以上と比較すると、表6に示すように予防保全によりき裂発生寿命は3.6(500万回/140万回)～6.3(500万回/80万回)倍以上となることが明らかとなった。

(2)事後保全 (試験部C,D)

試験部Cでは、写真6に示すルートキ裂に対し、事後保全対策として写真15に示すようにき裂の先端を削り込みにより除去した。その後、アングル材を取付け750万回の疲労試験を行った後、図14と写真16に示すように、北側側面の削り込み部の前方に長さ2mm程度のき裂が再発した(図14では155+2mm)。ただし、進展速度は2mm/750万回で、対策なしの場合の13mm/25万回に比べて1/200程度となり、表6に示すようにき裂進展寿命は200倍程度となる。

試験部Dでも、写真7に示すトウキ裂に対し、写真17に示すように、事後保全対策としてき裂全体を削り込みにより除去した。その後、アングル材を取付け、750万回の疲労試験を行った後、図14と写真18に示すように、北側側面の削り込み部に長さ2mm程度のき裂が再発した。ただし、進展速度は2mm/750万回で、対策なしの場合の7mm/20万回に比べて1/130程度で、表6に示すようにき裂進展寿命は130倍程度となる。

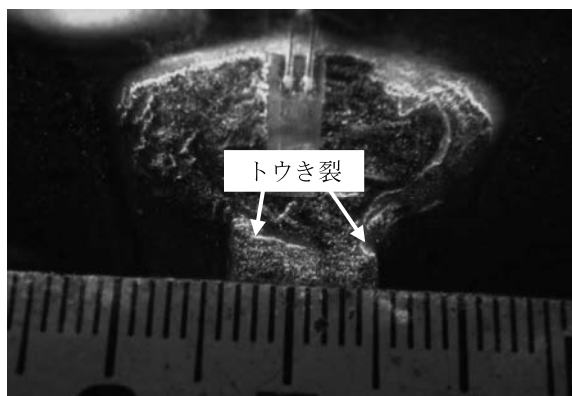


写真9 発見時のトウき裂
(試験部Aコバ面, ステップ2で110万回)

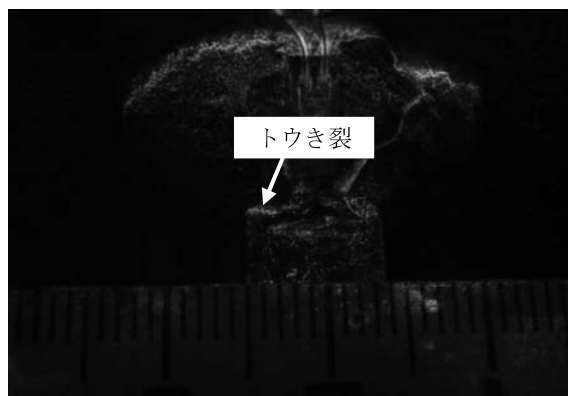


写真13 発見時のトウき裂
(試験部Bコバ面, ステップ2で140万回)

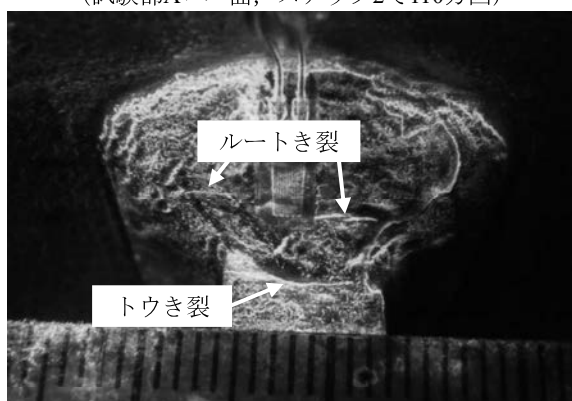


写真10 進展中のトウき裂と表面に表れたルートき裂
(試験部Aコバ面, ステップ2で540万回)

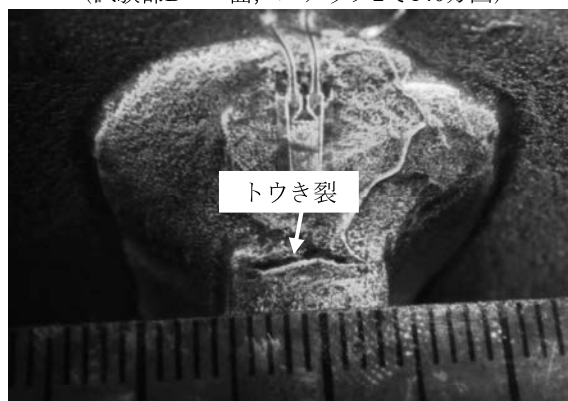


写真14 進展したトウき裂
(試験部Bコバ面, ステップ2で750万回)

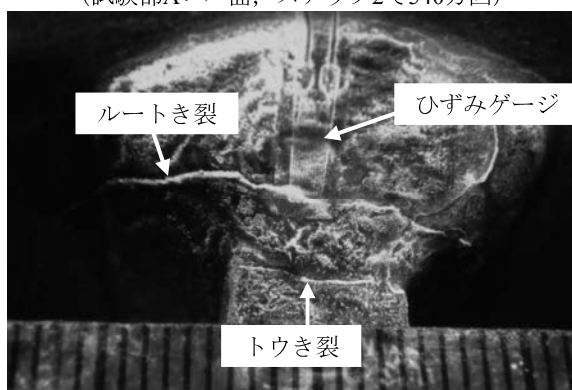


写真11 進展したトウき裂とルートき裂
(試験部Aコバ面, ステップ2で750万回)

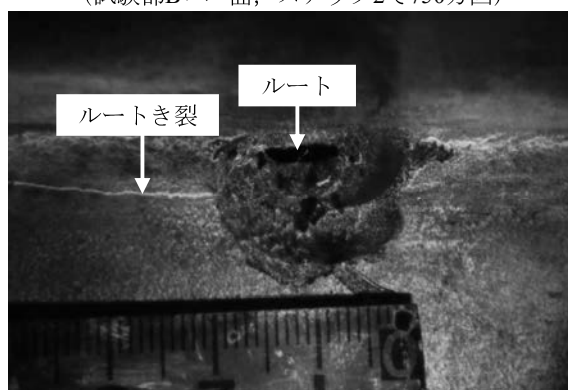


写真15 き裂先端削除後 (N=500万回) (試験部C北側)

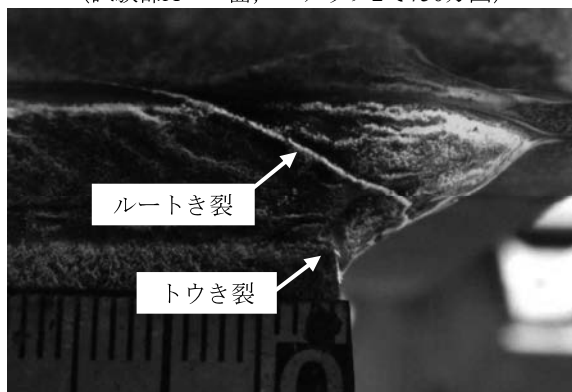


写真12 進展したトウき裂とルートき裂
(試験部A南側, ステップ2で750万回)

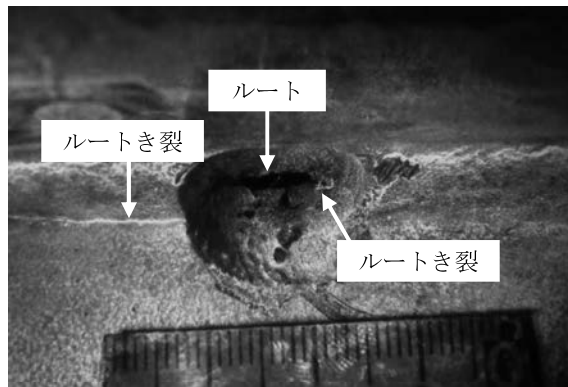


写真16 事後保全後 (ステップ2で750万回载荷)
(試験部C北側)

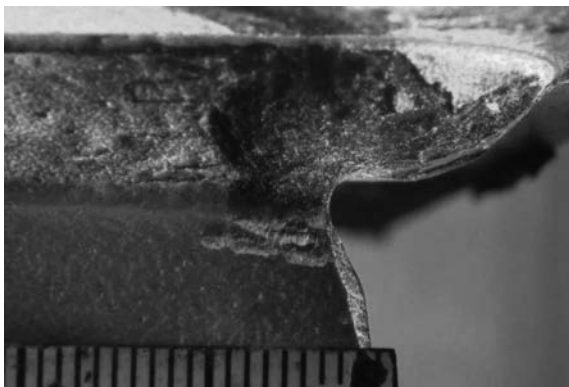


写真17 き裂削除後 (N=500 万回) (試験部 D 北側)

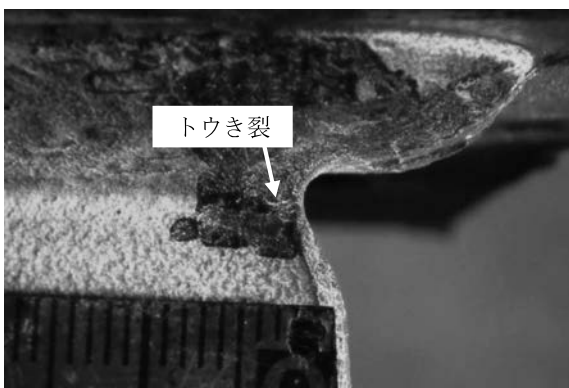


写真18 事後保全後 (ステップ2で750万回载荷)
(試験部 D 北側)

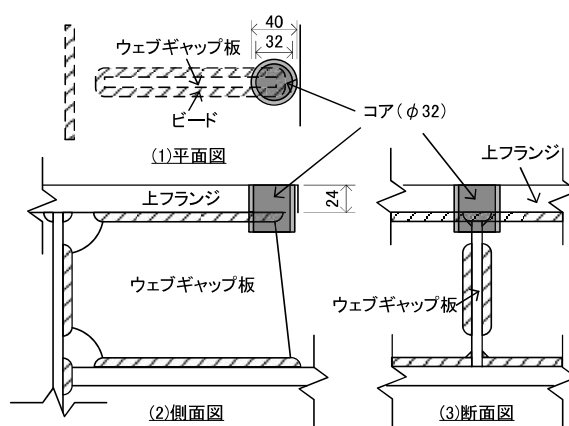


図15 コア抜きの位置

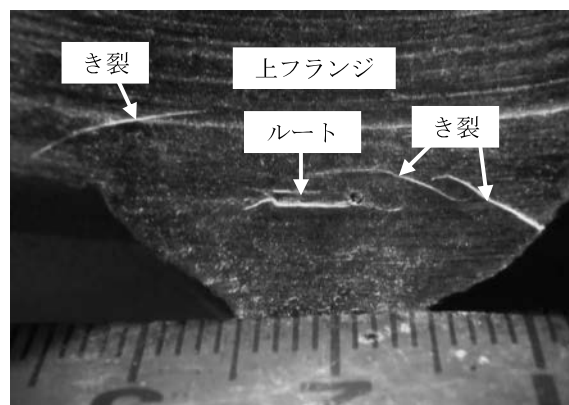


写真19 コア孔 (試験部A)

3.3 コア抜きによる試験部の観察

図15にコア抜きの位置を示す。コアは、上フランジ上面側からウェブギャップ板上部のき裂発生部を狙って採取した。コアの下端側は、回転式切断砥石により切断した。

試験部Aでは、写真19より、ギャップが最大0.7mm、幅5.1mmのルート部から発生したき裂と、ビード表面に貫通し上フランジに進展したき裂が確認できる。試験部Bでは、写真20に示すように、ギャップが最大1.6mm、幅2.6mmとルート部が小さく、左側から長さ1~2mm程度のき裂が発生しているが、表面には貫通していない。試験部Cでは、写真21に示すように、ギャップが最大1.3mm、幅5.5mmのルート部から左右にき裂が発生し、ビード表面に貫通している。試験部Dでは、写真22に示すように、ギャップは最大1.4mmで、幅は2.7mmと小さく、ルート部からのき裂発生は認められない。

図16に溶接部の各寸法の定義を示す。のど厚は図のように定義した。

表7と図17に各試験部の溶接寸法と疲労寿命を示す。表7と図17より、脚長、のど厚、ルートギャ

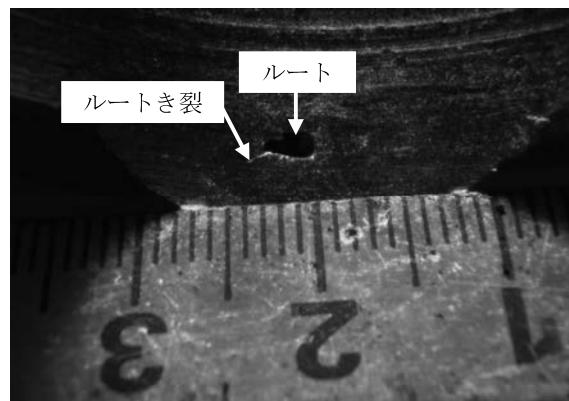


写真20 コア孔 (試験部B)

ップは各試験部でほとんど変わりがなく、疲労寿命との関係もみられない。ルート幅のみ各試験部で違いがみられ、脚長、のど厚、ルートギャップが変わらない場合にはルート幅が大きい（溶け込みが小さい）方がルートき裂が発生しやすい傾向があることが認められた。

なお、ウェブギャップ板上端部以外の補強板取付孔や、ウェブギャップ板下部などにおいて、き裂発生は認められなかった。

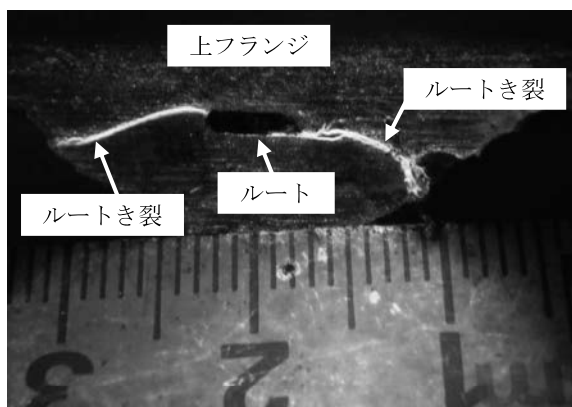


写真21 コア孔 (試験部C)

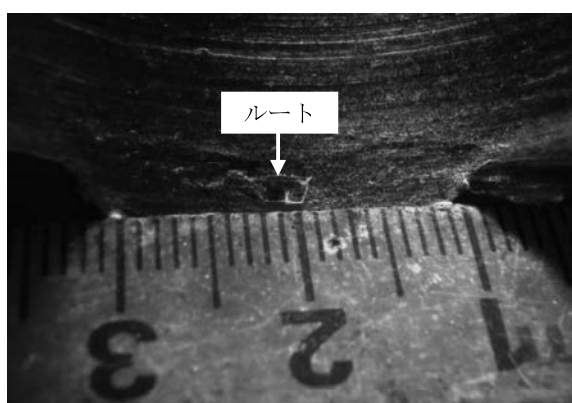


写真22 コア孔 (試験部D)

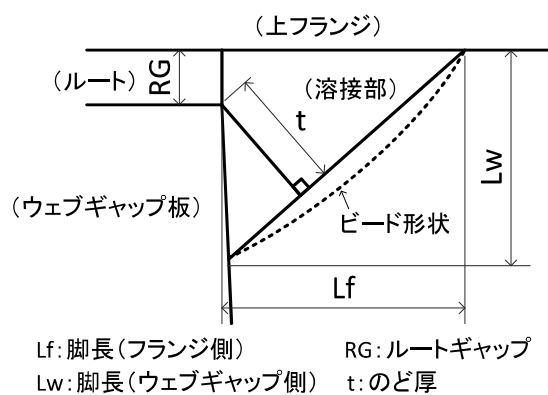


図16 溶接部の寸法の定義 (ウェブギャップ板端部)

表7 各試験部の溶接寸法の比較

試験部	A	B	C	D
脚長(f) (mm)	11.2	11.8	11.1	11.3
脚長(w) (mm)	6.9	7.4	7.0	7.3
のど厚 (mm)	5.3	4.9	4.8	5.0
ルート幅 (mm)	5.1	2.6	5.5	2.7
ルートギャップ (mm)	0.7	1.6	1.3	1.4
Ns (万回)	80	>750	110	>500
Nd(R) (万回)	540	-	290	-
Nd(T) (万回)	110	140	190	230

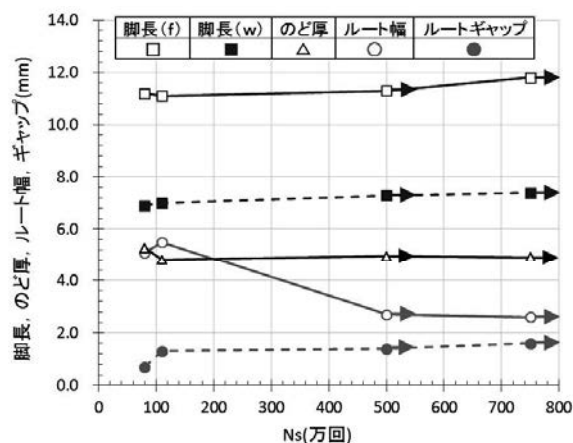


図17 脚長, のど厚, ルート幅, ギャップと疲労寿命の関係

4. まとめ

分配横桁ウェブギャップ板上端部の疲労き裂を対象とし、TRS を用いたアングル材工法の疲労対策効果について実物大の試験体を用いて実験的に検討した。得られた結論は、以下のとおりである。

(1)静的載荷試験結果

- ・逆位相で載荷することにより、同位相で載荷する場合と比較して中桁のき裂発生位置付近の局部的な応力範囲が1割程度大きくなった。
- ・TRS を用いたアングル材工法によりき裂発生位置付近の局部的な応力集中を5~6割程度まで低減することができた。

(2)疲労試験結果

- ・対策なしの場合、80~110 万回の繰返し載荷でルートき裂が、110~230 万回の繰返し載荷でトウき裂が発生した。脚長, のど厚, ルートギャップが変わらない場合にはルート幅が大きい (溶け込みが小さい) 方がルートき裂が発生しやすい傾向があった。
- ・予防保全対策として、TRS を用いたアングル材工法を施すことにより、500~750 万回繰返し載荷を行ってもき裂は発生せず、対策なしの場合と比較して、き裂発生寿命が2.2~6.3 倍以上延びた。
- ・事後保全対策として、き裂の削除とTRS を用いたアングル材工法を施した後、トウき裂、ルートき裂ともに長さ2mm程度のき裂が再発したが、き裂進展寿命は対策なしの場合の100 倍以上と著しく長くなった。

謝辞

最後に、「鋼橋の疲労き裂調査の効率化に関する研究」プロジェクトのメンバーには、貴重なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

溶接部のビード貫通き裂の再現実験，第七回
道路橋床板シンポジウム論文報告集，
pp.67-72，2012.6

(2017 年 1 月 25 日原稿受理)

参考文献

- [1] 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- [2] 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策（三訂版），2012.3
- [3] 貝沼重信，山田健太郎，西岡敬治，中村一平，石井博典：鋼 I 桁橋の主桁上フランジと横桁の取合部の応力緩和による疲労強度向上法，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1025-1032，1997.3
- [4] 山田健太郎，貝沼重信，香川直輝，石井博典，西岡敬治：鋼 I 桁橋ウェブギャップ部の疲労試験と応力緩和による疲労寿命向上効果，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.267-278，1999.4
- [5] 高田佳彦，川上順子，酒井優二，坂野昌弘：半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補剛材上端溶接部の疲労対策，鋼構造論文集，第 16 巻，第 62 号，pp.35-46，2009.6
- [6] 坂野昌弘：鋼橋の疲労亀裂調査の効率化に関する研究プロジェクト（その 2），土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，CS6-001，2016.9
- [7] 楠元崇志，奥村淳弘，坂野昌弘，小林義弘，溝上善昭：U リブ鋼床版のビードき裂に対する補修方法の検討，土木学会第 70 回年次学術講演会，CS4-008，2015.9
- [8] 金澤高宏，貴志友基，溝上善昭，森下元晴，西山圭介，坂野昌弘：U リブ鋼床版のビード亀裂に対する下面補修，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，CS6-003，2016.9
- [9] 田辺篤史，松本理佐，小山雅弘，坂野昌弘：主桁と分配横桁・対傾構との交差部の疲労対策による応力低減効果の解析的評価，土木学会第 71 回年次学術講演会，CS6-005，2016.9
- [10] 坂本千洋，岡田康暉，坂野昌弘，小西日出幸，小山雅弘：対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労対策に関する実験的検討，土木学会第 71 回年次学術講演会，CS6-004，2016.9
- [11] Luiza H. Ichinose，小山雅弘，坂野昌弘：応力頻度測定による分配横桁・対傾構取合い部の疲労対策効果の検証，鋼構造年次論文報告集，第 24 巻，pp.693-700，2016.11
- [12] 河島信義，福田誠，森野真之，坂野昌弘：RC 床版鋼鈑桁橋分配横桁取合部の実橋応力測定及び疲労対策検討，鋼構造年次論文報告集，第 16 巻，pp.471-478，2008.11
- [13] 西田尚人，坂野昌弘，田畑晶子，杉山裕樹，迫田治行，丹波寛夫：鋼床版 U リブとデッキ