

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

Experimental Study on Retrofitting Method against Fatigue Cracking at the Upper End of Vertical Stiffeners connected with Sway Bracings

坂本 千洋* 坂野 昌弘** 小西 日出幸*** 小山 雅弘****

Chihiro SAKAMOTO* Masahiro SAKANO** Hideyuki KONISHI*** Masahiro KOYAMA****

ABSTRACT In this study, we propose two types of retrofitting methods against fatigue cracking at the upper end of vertical stiffeners under RC slab. They are steel plate reinforcement using a jack-up jig, and angle steel reinforcement using thread rolling screw (TRS). The effectiveness of those two types of retrofitting methods are experimentally investigated through fatigue tests using a large specimen with three main girders under alternative loading using two actuators. As a result, both retrofitting methods can reduce the local stress concentration at the crack initiation point to about half of that before reinforcement, and can prevent fatigue cracking.

Keywords: 垂直補剛材, 疲労き裂, タッピングボルト (TRS), ジャッキアップ
vertical stiffener, fatigue cracking, Tapping bolt, jack up

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。そこで、交通規制が不要な、当て板をジャッキアップで上フランジに押し付ける工法が提案されている[3-7]。しかし、応力低減効果や疲労寿命延長効果については十分に検証されていない。

このたび、「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[8]の一環として、対傾構取付け垂直補剛材上端部と分配横桁上部のウェブギャップ部の疲労き裂に対し、2つの対策工法が提案され[9,10]、実橋において試験的に施工された[11]。それらの工法は、ジャッキアップ治具を用いた当て板工法と、タッピングボルト(スレッドローリングスクリュー; TRS)[12-14]を用いたアングル材工法の2つである。

本研究では、上記2箇所の対象部の内の対傾構取付け垂直補剛材上端部を対象とし、2種類の疲労対策工法の予防及び事後保全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。

2. 実験方法

2.1 試験体の形状と寸法

図1に試験体のモデルとした実橋[11]の形状と寸法を、図2に対傾構試験体の形状と寸法を示す。試験体の寸法については、試験機の寸法の制限から、主桁高と主桁間隔を実橋より縮小したが、主桁の上フランジ、垂直補剛材、対傾構の断面は実橋と同じとした。主桁は3本設け、中央の桁の左右の垂直補剛材上端部に、図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。

* 関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科

(〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35)

** 第2種正会員

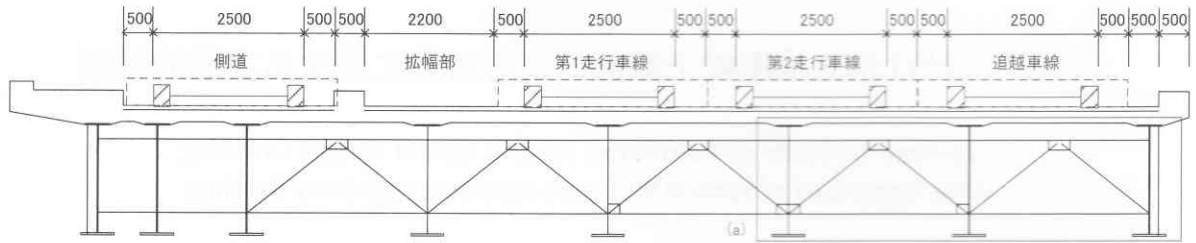
工博 関西大学 環境都市工学部 教授
(〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35)

*** 工博 日本橋梁建設協会

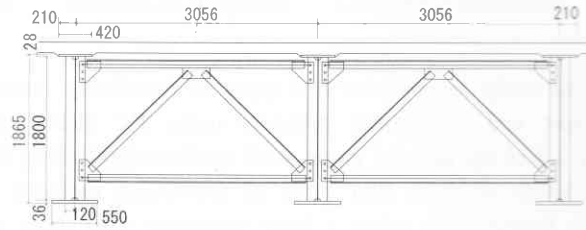
(〒550-0005大阪府大阪市西区西本町1-8-2)

**** 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)



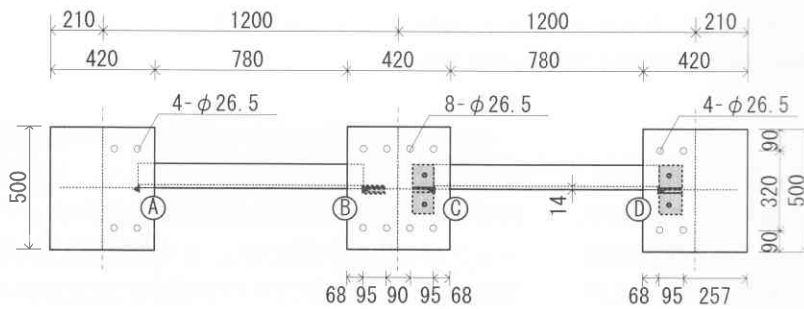
(a) 上部工断面図



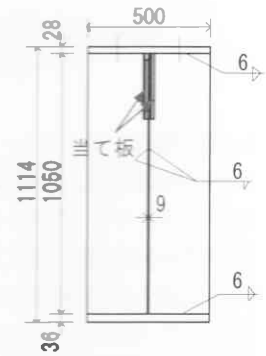
(単位 : mm)

(b) a 部詳細図

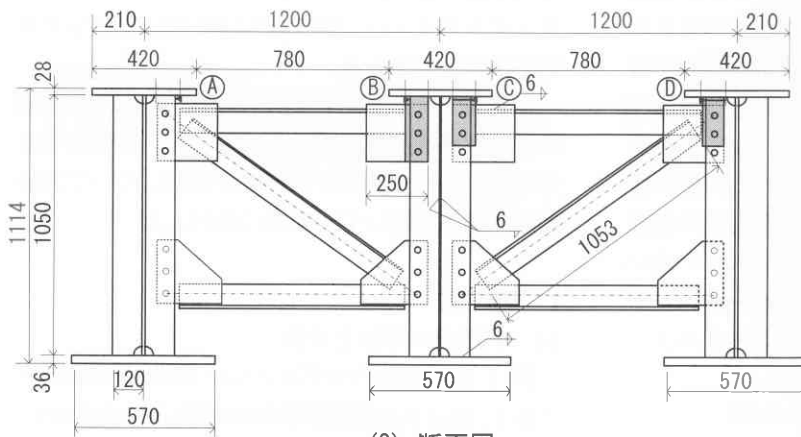
図1 実橋の形状と寸法



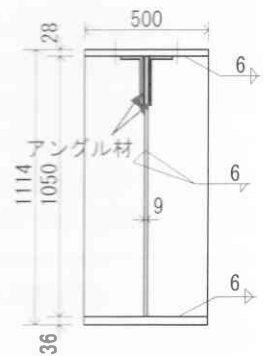
(1) 平面図



(3) 側面図 (試験部B)



(2) 断面図



(4) 側面図 (試験部C, D)

(単位 : mm)

図2 試験体の形状と寸法

表1 試験体の主要鋼材の機械的性質と化学成分 (ミルシート値)

使用箇所	材質	YP	TS	EL	vE	化学成分 ×100 (%)											
		MPa	MPa	%	J	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	
主桁	UFG	SM490YB	452	566	27	242	16	24	104	21	5	1	11.0	2	0	1.35	0.22
	Web	SM490YB	411	516	23		15	20	111	14	4	1	1.2	3	0	1	0.35
	LFG	SM490YB	404	534	26	302	14	26	127	13	2	1.37	3.0	2	0	1	0.21
	Vstiff.	SM490YA	411	516	23		15	20	111	14	4	1	1.2	3	0	1	0.35

* vE : 0°Cシャルピー吸収エネルギー

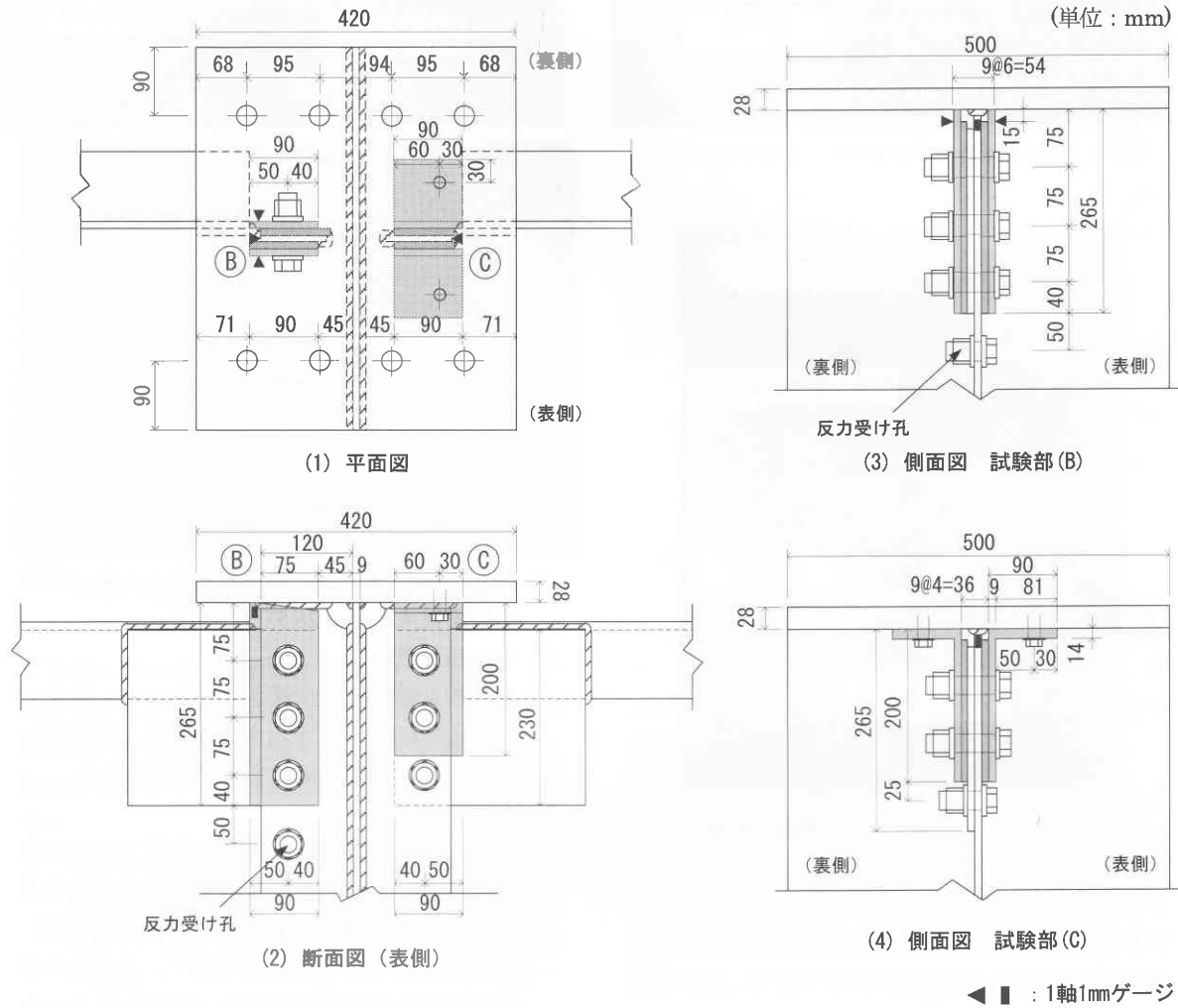


図3 当て板の形状と寸法, 当て板の効果検証用ひずみゲージ貼付位置

表2 試験体の溶接条件

電流 I (A)	電圧 E (V)	溶接速度 v (cm/min)	入熱量 Q (J/cm)
240~330	24~40	15~50	6900~53000

表1に試験体に用いた鋼材の機械的性質と化学成分を、表2に垂直補剛材上端部の溶接条件を示す。鋼材は実橋で用いられているものと同等のグレードを用いた。溶接方法はCO₂ガスシールドアーク溶接で、上フランジ下面と補剛材上端の間にはギャップを2mm設けて溶接した。

図3に当て板の形状と寸法、および当て板の効果検証用ひずみゲージ貼付位置を示す。試験部Bにはジャッキアップ治具を用いた当て板工法を、試験部C, DにはTRSを用いたアングル材工法を施して、補剛材コバ面での応力低減効果と疲労寿命延長効果の検証を行った。ひずみゲージは、垂直補剛材上端部コバ面のすみ肉溶接止端から下に10mmの位置に局部応力計測用に、当て板上端から下に10mm、当て板縁から水平に10mmの位置にジャッキアップ時の当て板上端への導入応力計測用に、それぞれ1軸1mmゲージを貼付した。

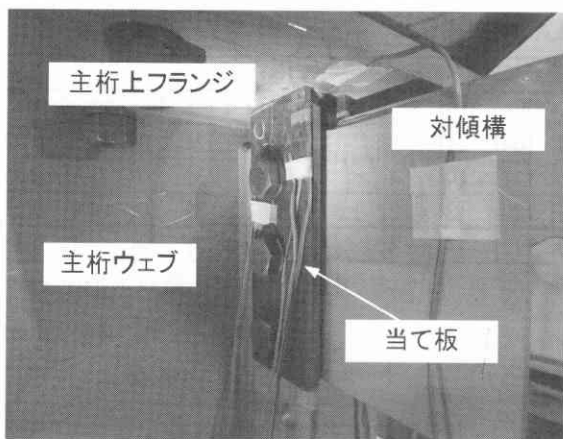


写真1 ジャッキアップによる当て板施工後の状況

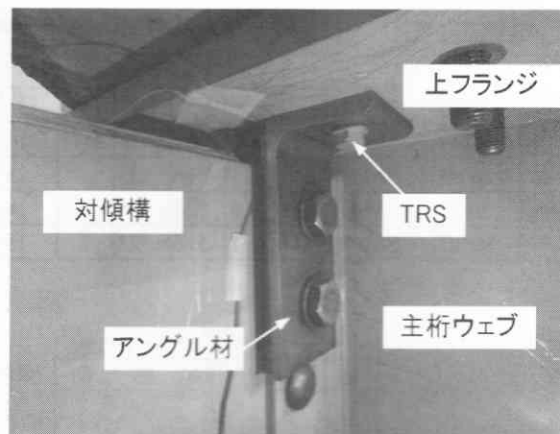


写真3 TRSによるアンゲル材施工後の状況

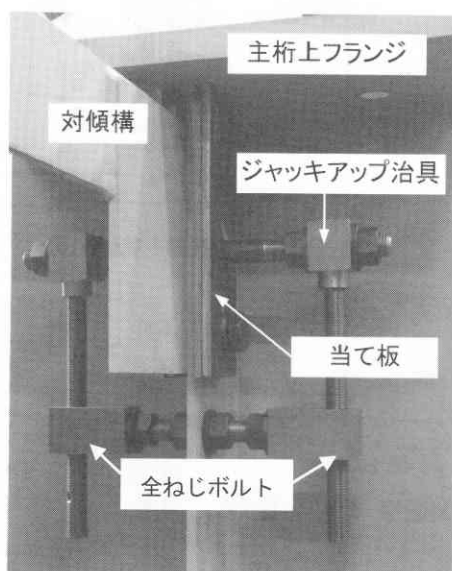


写真2 ジャッキアップ治具のセット

なお、ここで用いている局部応力は応力集中部である溶接止端部近傍の局部的な応力という意味である。また、応力はひずみにヤング係数(200GPa)を乗じて算出した。

2.2 ジャッキアップ治具を用いた当て板工法

写真1にジャッキアップによる当て板工法の施工後の状況を示す。写真2に示すような治具を用いて当て板をジャッキアップし、上フランジ下面に当て板を押し付け高力ボルト(HTB)によって補剛材に固定することで、当て板に荷重を分担させ、補剛材上端部にかかる荷重を低減しようとする工法である[7]。補剛材上端に導入する引張応力はジャッキアップ時のトルクにより管理した。

ジャッキアップによる当て板工法の施工手順を以下に示す。

- ① 既設のHTB取外し
ガセットを垂直補剛材に固定しているHTB3

本を取外す。なお、実橋では、HTBを取外すことによりガセットが変位する可能性があるため、面内についてはドリフトピン、面外については万力等で拘束する必要がある。なお、HTBが2本以下の場合には別途検討が必要である。

- ② 削孔
ガセット下方の補剛材にジャッキアップ治具の反力受け孔(φ24.5mm)をあける(図3参照)。ジャッキアップ治具を通す上から2番目の孔を拡大孔(φ26.5)にする。
- ③ 当て板仮止め
当て板を補剛材に密着させ、上から1番目と3番目のHTBをジャッキアップに支障のない程度にレンチ等を使わず手で仮止めする。
- ④ ジャッキアップ
ジャッキアップ治具を所定の位置(写真2参照)にセットし、下部を六角に加工した全ねじボルトを六角ナット付きのトルク計を用いて回転させて当て板を持ち上げ、当て板を主桁上フランジに押し付ける。回転力はトルク計を用いて管理する。(トルク値については、3.1 ジャッキアップ試験結果参照。)
- ⑤ HTB本締め(1番上)
ジャッキアップ後、仮締めしていた一番上のHTBを本締めする。
- ⑥ ジャッキアップ治具撤去
ジャッキアップ治具を撤去する。
- ⑦ HTB本締め(残り)
上から2番目と3番目のHTB2本を締め付ける。

2.3 TRSを用いたアンゲル材工法

写真3にTRSによるアンゲル材工法施工後の状況を示す。これは、TRSでアンゲル材を上フラン

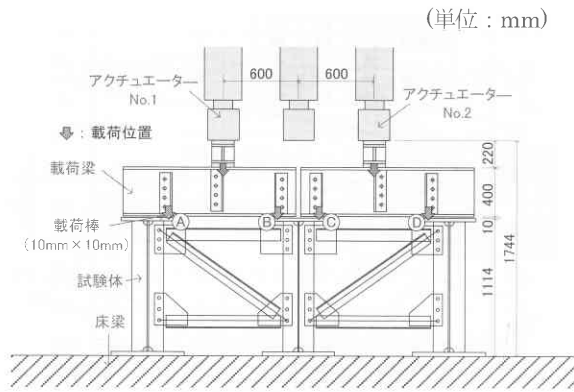


図4 載荷方法

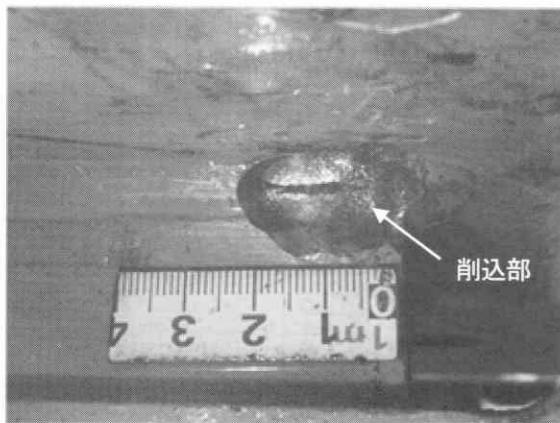


写真4 削り込み状況，試験部A (70万回)

ジ下面に押し付け，HTBで補剛材に固定することにより，アングル材に荷重を分担させ，補剛材上端部にかかる荷重を低減する工法である。

TRSを用いたアングル材工法の施工手順を以下に示す。

- ① 既設のHTB取外し
垂直補剛材にガセットを固定している3本のHTBのうち，上の2本を外す。(1番下の1本は残置。)
- 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，補剛材側のHTBを仮締めする。
- ③ 上フランジ削孔
アングル材の孔(φ16mm)をガイドにして上フランジにφ15.5mmの貫通孔をあける。このとき，補剛材側のHTBが削孔機具に干渉しないように孔あけ位置を決定した(図3参照)。
- ④ 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。
- ⑤ HTB本締め
補剛材側のHTB2本を本締めする。
また，事後保全対策として，長いき裂に対して

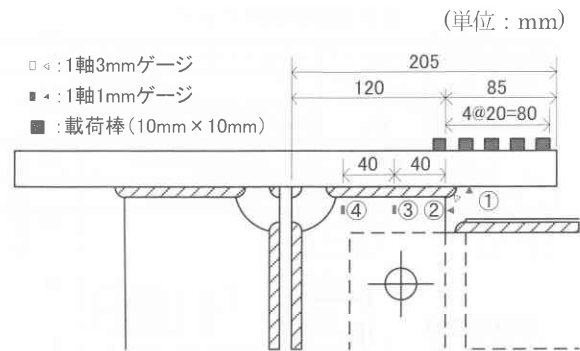


図5 載荷位置検討時の載荷棒移動位置

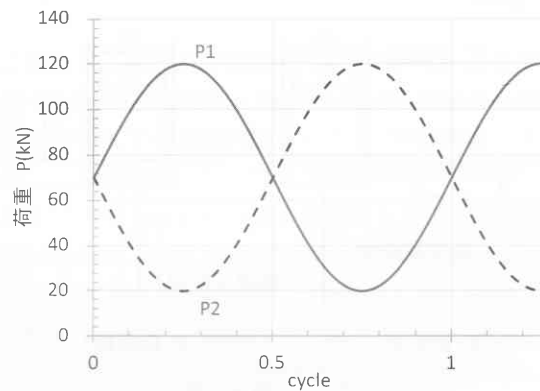


図6 2本のアクチュエータの逆位相の載荷波形

は先端のみ，短いき裂に対してはき裂全体をバーグラインダーを用いた削り込みにより除去し，アングル材を取り付ける。写真4に長いき裂に対する削り込み状況を示す。

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により試験部AとBに(P1)，No.2により試験部CとDに(P2)載荷した。載荷荷重はT荷重の片側を想定し， $P_{max}=120\text{kN}$ ， $P_{min}=20\text{kN}$ ($\Delta P=100\text{kN}$)に設定した。

2.4.2 載荷位置の検討

図5に載荷位置とひずみゲージ貼り付け位置を示す。ひずみゲージは，上フランジ下面のすみ肉溶接止端から水平に10mm(①)の位置に，また垂直補剛材上端部コバ面のすみ肉溶接止端から下方に10mm(②)の位置に局部応力計測用に1軸1mmゲージを貼付した。載荷位置により試験部の応力が変化することが予想されるため，載荷位置を橋軸直角方向に20mmずつ移動させて上フランジ下面(①)，補剛材のコバ面(②)と側

表3 疲労試験ステップ

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

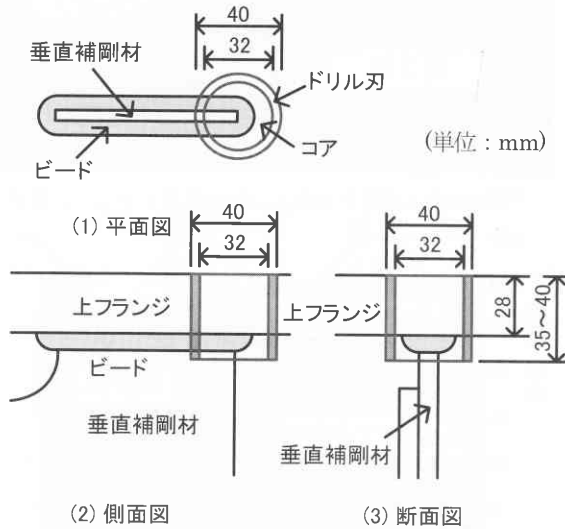


図7 コア抜き位置

面(③④)の応力を計測した。その結果に基づき、疲労試験時の载荷位置を決定した。

2.4.3 载荷の位相の比較

図6に両アクチュエータの逆位相の载荷波形を示す。2本のアクチュエータを用いて同位相と逆位相とで载荷を行い、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 対策前後の応力分布の比較

全試験部で対策を行わなかった場合(対策前)と、試験部Aでは対策なし、試験部B~Dでは対策を施した場合(対策後)とで、応力分布の比較を行った。これにより、補剛材コバ面の応力の低減効果を確認した。载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、逆位相で载荷を行った。载荷速度は3~4Hzとした。表3に実験ステップを示す。ステップ1では、試験部Aは対策なしでき裂の再現を行い、試験部Bはジャッキアップ治具を用いた当て板工法を、試験部C, DはTRSを用いたアングル材工法による予防保全対策を施した。対策ありとなしを比較することにより、予防保全対策の効果を検証した。

ステップ2では、試験部Aについては、ステッ

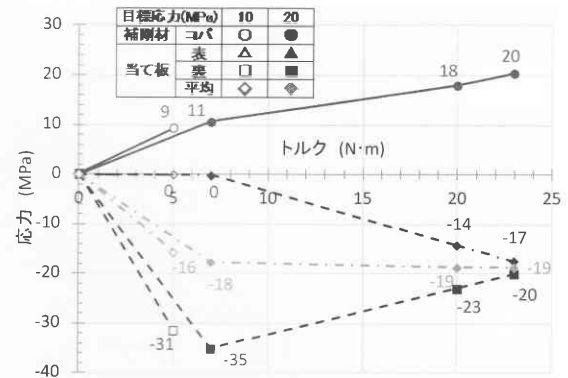


図8 ジャッキアップによる応力導入状況

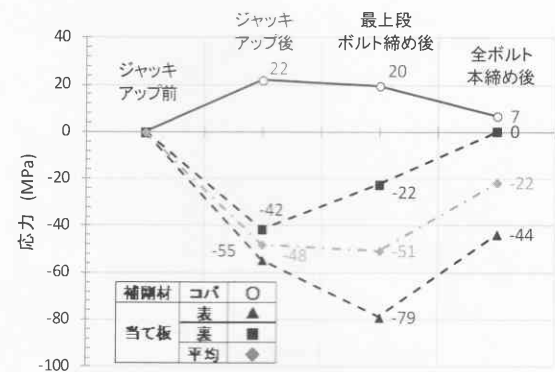


図9 ボルト締め付け時の補剛材と当て板の導入応力の変化

プ1で発生したき裂の全体または先端を削除し、TRSを用いたアングル材工法を施して事後保全対策を施した。試験部B~Dについては当て板とアングル材を外して対策なしでき裂の再現を行った。事後保全効果については対策ありのAとなしのB~Dを比較することで、予防保全効果についてはB~Dのステップ1の対策ありとステップ2の対策なしを比較することで、両方の対策効果を検証した。

き裂の検出には、表面き裂に対しては磁粉探傷試験(MT)を用い、内部き裂に対しては図5に示すように、すみ肉溶接部表面にき裂発生・進展検知用に貼布した1軸3mmゲージにより推定した[15]。

また、疲労試験終了後、図7に示すように、上フランジ上面から垂直補剛上端部のコア抜きを行い、き裂の発生・進展状況の確認と垂直補剛材と上フランジの溶接部の形状や溶け込み、ルートの幅と高さなどの溶接寸法の計測を行った。ただし、試験部Aでは事後保全対策でき裂先端部の削り込みを行っていたため、補剛材端部直上から50mm主桁ウェブ側に移動した位置にて再度コア抜きを行い、溶接形状を計測した。

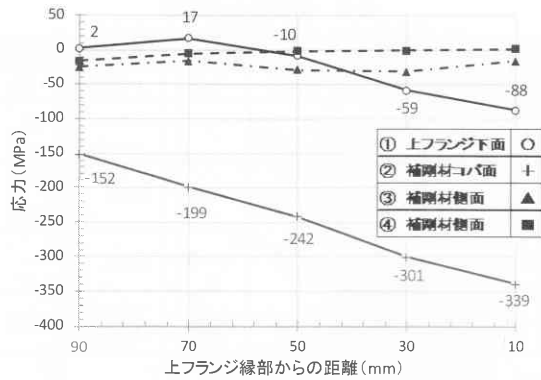


図10 荷重位置による応力変化

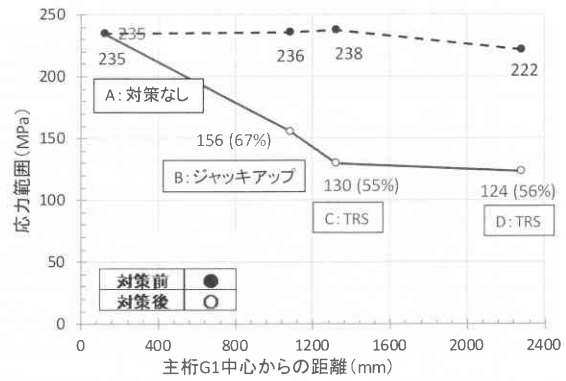
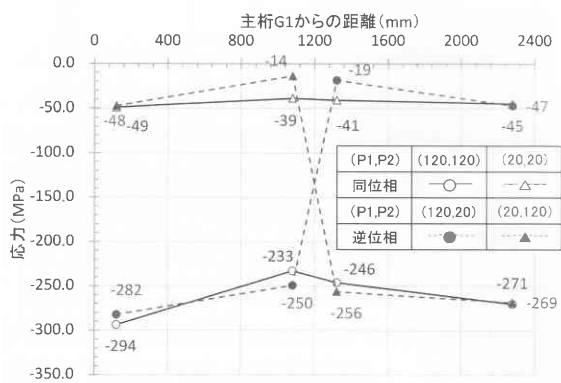
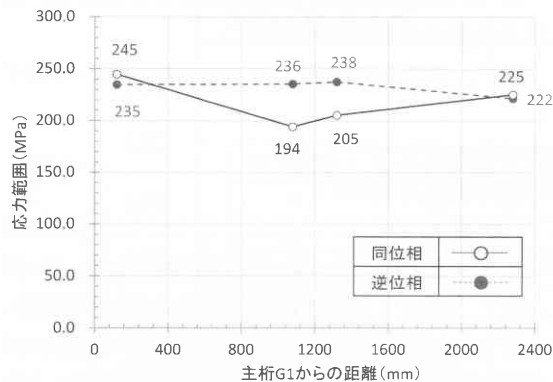


図12 対策前後の静的荷重時の各試験部の応力範囲



(a) 最大および最小荷重時の応力分布



(b) 応力範囲分布

図11 同位相と逆位相荷重時の応力分布

3. 実験結果

3.1 ジャッキアップ試験結果

図8にジャッキアップ時のトルクと補剛材上端部と当て板の導入応力の関係を示す。目標応力は、当て板を上フランジに密着させることを目的に10~20MPaと設定した。この程度の引張応力(補剛材の降伏応力240MPa以上の1/10以下)であれば補剛材上端部の疲労挙動にほとんど影響しないと考えた。ジャッキアップトルクと補剛材上端

に導入される応力の関係は、トルクが5N・m程度で10MPa程度、20N・m程度で20MPa程度の引張応力が導入でき、当て板を上フランジに密着できることが明らかとなった。

図9にボルト締め付け時の補剛材と当て板の応力変化を示す。一番上のHTBを本締めした後、ジャッキアップ治具を取り外し、残りの2本のHTBを本締めする際に、補剛材コバ面と当て板に導入されていた応力はともに3~4割程度まで減少した。最終的にはHTB3本でボルト締めされるので、板曲げの影響はないと考えられる。以上より、20N・m程度のトルクでジャッキアップすることにより、当て板を上フランジに密着できることが明らかとなった。

3.2 静的荷重試験結果

3.2.1 荷重位置の検討

図10に荷重位置による変化を示す。荷重位置を上フランジ縁側に移動させるにしたがって補剛材コバ面と上フランジ下面に生じる応力は大きくなるが、コバ面に比べて上フランジ下面は1/4以下と小さい。また、補剛材コバ面から離れた側面では、荷重位置を移動させても実橋と同様に[6]ほとんど応力は発生しないことが確認された。補剛材コバ面の実測応力(160MPa程度)[11]以上で、実橋の補剛材(SS400)の降伏点(245MPa以上)を超えないように、疲労試験体の荷重位置を補剛材コバ面直上から40mm(上フランジ縁部から50mm)と設定した。なお、下フランジで17MPaの引張応力が生じているが、これは上フランジが荷重位置直下で局部的にたわんでいることによるものと考えられる。実橋ではRC床版があるのでこのような引張応力は生じないと考えられる。

3.2.2 荷重の位相の比較

図11に同位相と逆位相荷重時の各試験部補剛材コバ面の最大および最小荷重時の応力分布と

表4 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)			き裂全長 (mm)	
		Ns	Nd(R)	Nd(T)	発見	最終
A	無し	10	60	-	24	-
	TRS	-	-	-	-	46
B	Jack up	> 205	> 205	> 205	-	-
	無し	335	355	160	(3)	(6) 16
C	TRS	> 205	> 205	> 205	-	-
	無し	40	335	120	(4)	(56) 179
D	TRS	> 205	> 205	> 205	-	-
	無し	140	160	-	12	49

Ns: ルートき裂発生寿命 ()付きはトウき裂長さ
Nd(R): ルートき裂発見寿命
Nd(T): トウき裂発見寿命

力範囲分布を示す。最大荷重時には、同位相での荷重の時に左右反対側の荷重によって生じる引張応力の分だけ圧縮応力が小さくなり、最小荷重時には、逆位相の小さい荷重側で引張側の応力が発生するため、逆位相の中桁の応力範囲が同位相に比べて2割程度増大している。なお、同時荷重の最小荷重 20kN は死荷重に相当するので、それを基準にすれば、逆位相荷重では試験部 B,C で 20MPa 程度の引張応力が生じている。これらは実橋で計測された引張応力[11]15~30MPa と同程度である。

以上のように、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走行することにより実橋で生じている応力の交番(引張 15~30MPa 程度、圧縮 100~130MPa 程度) [11]を再現することが可能となった。

3.2.3 対策前後の応力分布の比較

図12に対策前後の各試験部の応力範囲を示す。対策前後で、2本のアクチュエータを同時に使用し、逆位相荷重を行った。その結果、ジャッキアップ治具を用いた当て板工法で67%、TRSを用いたアングル材工法で55~56%まで応力範囲が低減できることが確認された。実橋では[11]、応力範囲がジャッキアップで98%、TRS工法で70%までしか低減されておらず、実験結果の方が大きな低減効果が得られている。実橋と実験とで応力低減効果に差が出た原因としては、ジャッキアップ工法についてはトルク計の不具合等により、TRS工法については実橋における縦断および横断勾配により、それぞれ当て板を上フランジに十分に密着できなかった可能性があると考えられる。また、当て板補強に関するほかの補強工法と比較すると、垂直補剛材上端部コバ面の補強後の応力は文献

表5 疲労寿命の比較

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 ステップ②	事後保全効果 D/A
	ステップ①	ステップ②	B,C,D/A	①/②		
A	10	-	-	-	22mm / 530万回	-
B	-	160	-	>1.3倍	-	-
C	>205	40	>20.5倍	>5.1倍	-	-
D	-	140	-	>1.5倍	31mm / 20万回	37倍

[4]では60%程度まで、文献[5]では50%程度まで低減されており、本工法はそれらと同程度の応力低減効果が得られている。

3.3 疲労試験結果

表4に各試験部の対策ごとの疲労試験結果を、表5に疲労寿命の比較を示す。図13に疲労試験中のビード表面ひずみ範囲の変化を示す。Nsはひずみが安定しない荷重直後を除いて、ビード表面のひずみが非可逆的に変化し(低下し始めて元に戻らない)回数で定義したルートき裂発生寿命、Nd(R)はルートき裂が表面に貫通した時の回数で定義したルートき裂発見寿命、Nd(T)はMTでトウき裂を発見した時の回数で定義されたトウき裂発見寿命である。

図14は荷重回数とき裂表面長さの関係を示す。図15はき裂長さの定義を示す。

以下、これらの図表を用いて実験結果を考察する。

(1)ステップ1

a)き裂再現 (試験部 A)

試験部Aでは、図13に示すようにN=10万回以降でビード表面のひずみが急激に減少した。N=60万回で、図14と写真5に示すようにビード表面に全長24mm程度のルートき裂が現れた(Nd(R)=60万回)。試験終了後に行ったコア底面の観察により、写真6に示すように、き裂はルート部から発生し、ビード表面に貫通していることが確認できる。したがって、N=10万回でひずみが低下し始めた時点で、すでにルート部からき裂が発生していたものと推定できる(Ns=10万回)。また、コアとコア孔の観察により、幅5.2mm(写真6)、高さ1.5mm(写真7)のルート部が確認できた。

b)予防保全 (試験部 B,C,D)

予防保全対策としてジャッキアップ治具を用いた当て板工法を施した試験部Bと、TRSを用いたアングル材工法を施した試験部C,Dでは、図13と図14に示すようにN=205万回まで繰り返し載

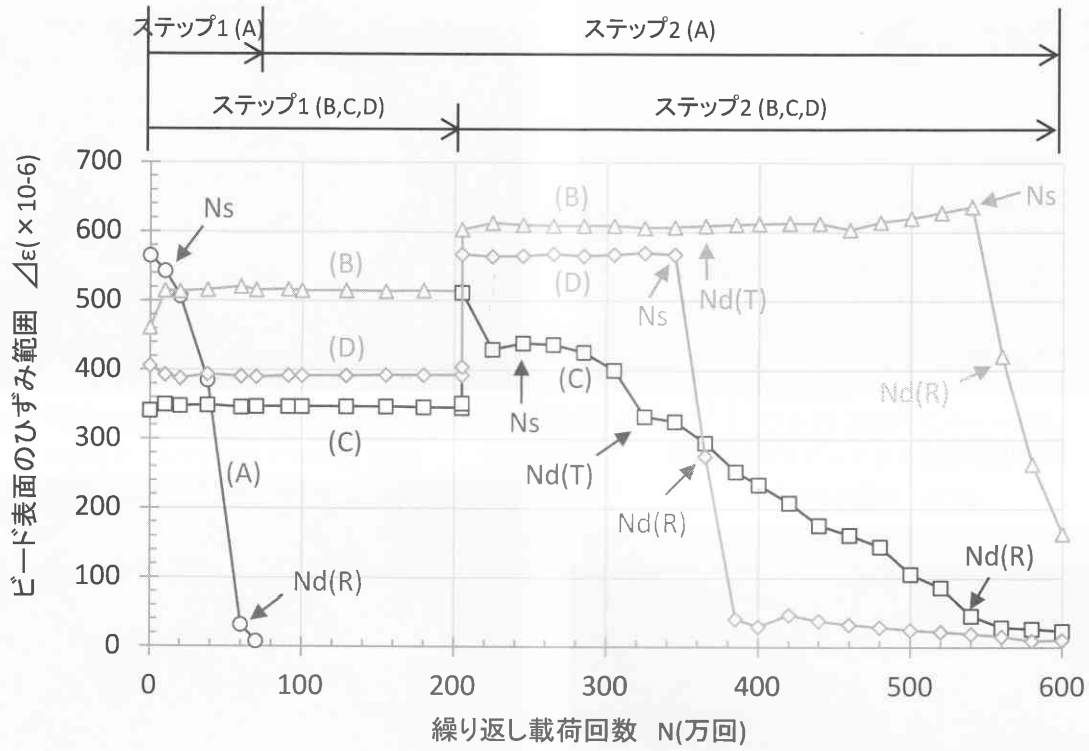


図13 疲労試験時のピード表面ひずみ範囲の変化

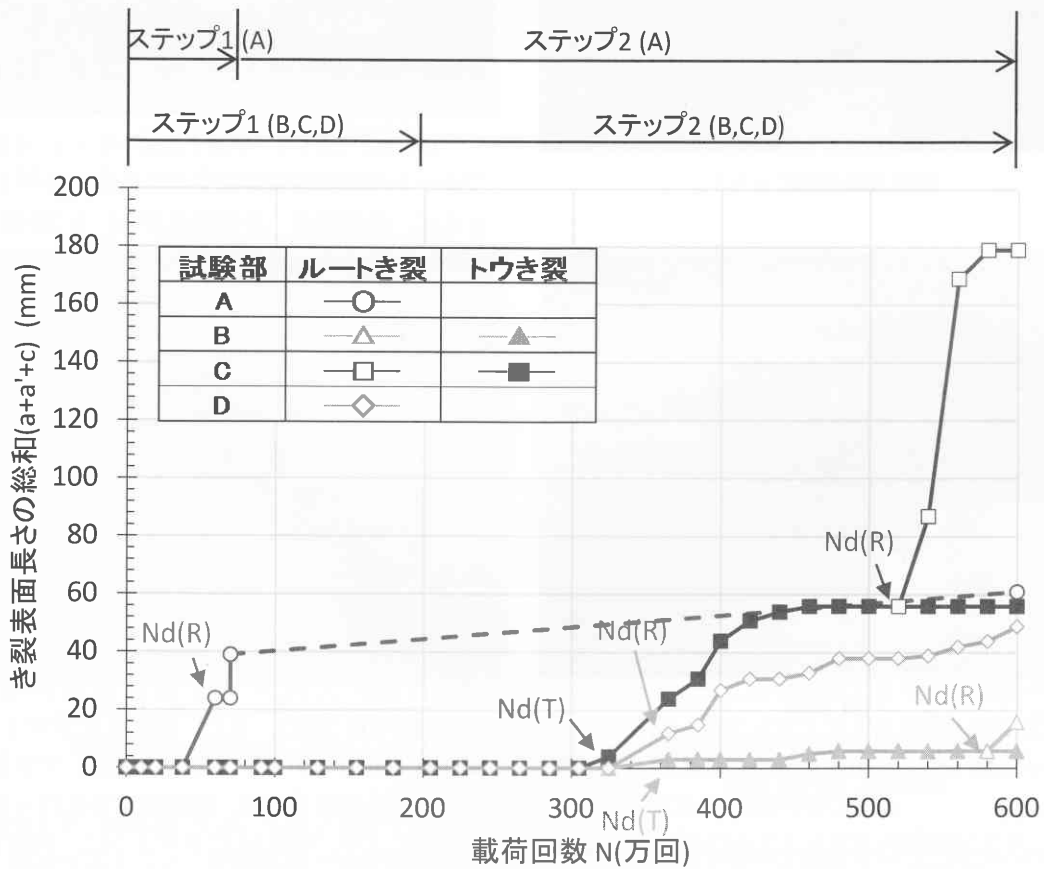


図14 荷回数とき裂長さの関係

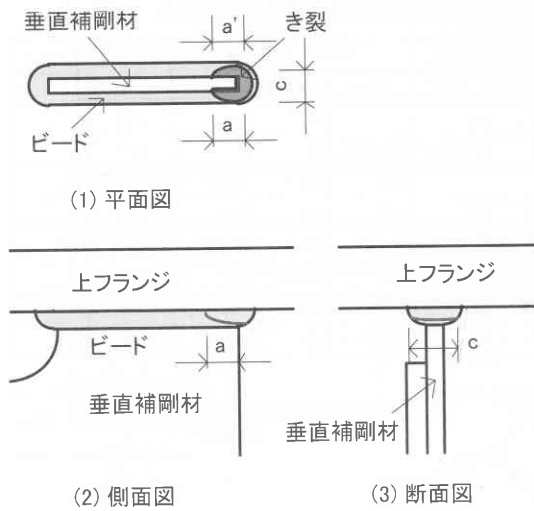
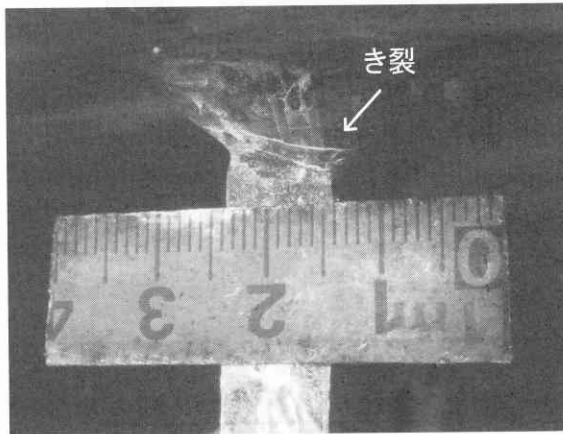
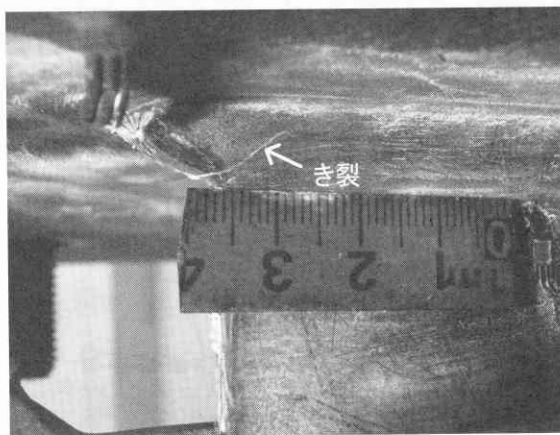


図 15 き裂長さの定義



(a) 正面



(b) 裏側

写真 5 表面に現れたルートき裂
試験部 A (N=60 万回)

荷を行ったが、ビード表面でのひずみ変化も MT によるビード表面でのき裂発生も認められなかった。一方、対策なしの試験部 A では N=10 万回

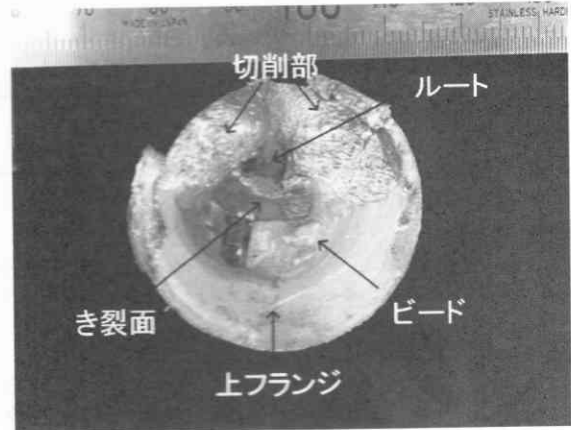


写真 6 コア底面, 試験部 A (N=600 万回)

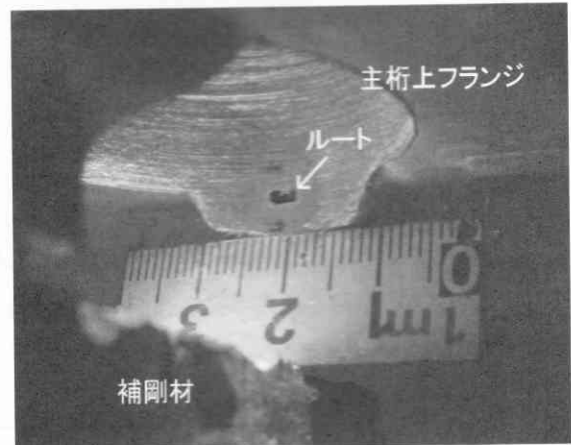


写真 7 コア孔, 試験部 A (N=600 万回)

でルート内部にき裂が発生したことから両工法ともに、疲労寿命(き裂発生寿命)を 20 倍(205 万回/10 万回)以上向上できることが明らかとなった。

(2)ステップ 2

a)き裂再現(試験部 B,C,D)

試験部 C では, 図 13 に示すように N=245 万回(ステップ 2 で 40 万回)でビード表面のひずみが低下し始めた。その後, ひずみは減少し, 図 14 に示すように, N=325 万回(ステップ 2 で 120 万回)で長さ 5mm のトウき裂を発見した(Nd(T)=120 万回)。その後, 写真 8 に示すように, トウき裂は上フランジに向かって進展し, 540 万回(ステップ 2 で 335 万回)でルートき裂が表面に現れた(Nd(R)=335 万回)。また, 写真 9 に示すように, N=580 万回(ステップ 2 で 375 万回)でき裂がビード全長を破断させた。試験終了後に行ったコアの観察により, 写真 10 に示すように, き裂は止端部とルート部から発生して, ビード表面に貫通していることが確認できる。したがって, N=40 万回でひずみが低下し始めた時点で, ルート部からき

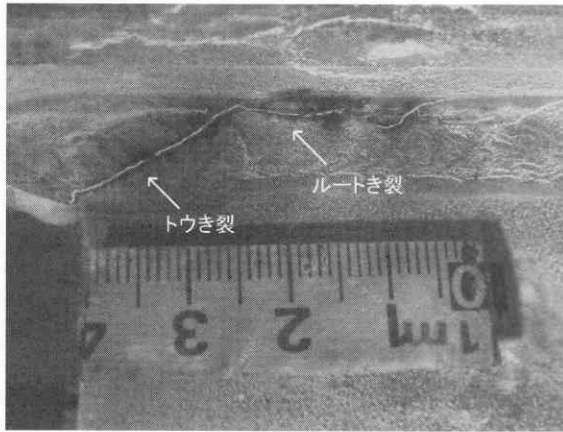


写真8 進展したトウき裂と表面に現れたルートき裂
試験部C (ステップ2でN=335万回)

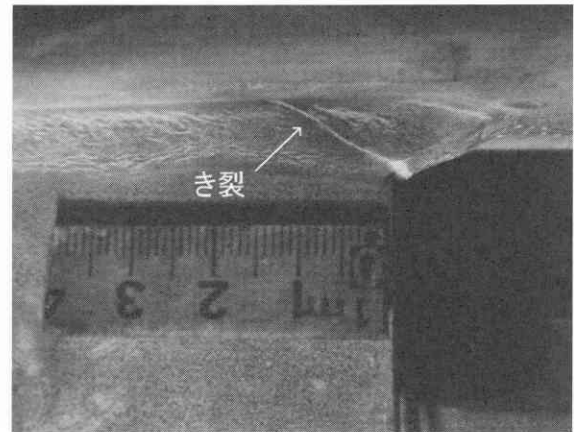


写真11 上フランジに進展したルートき裂,
試験部D (ステップ2で395万回)

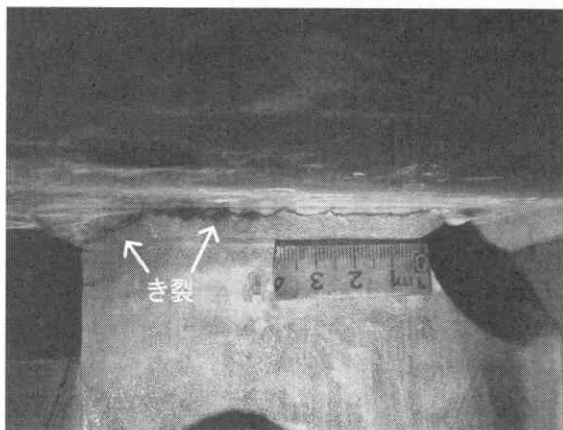


写真9 ビードを破断したルートき裂, 試験部C
(ステップ2でN=375万回)

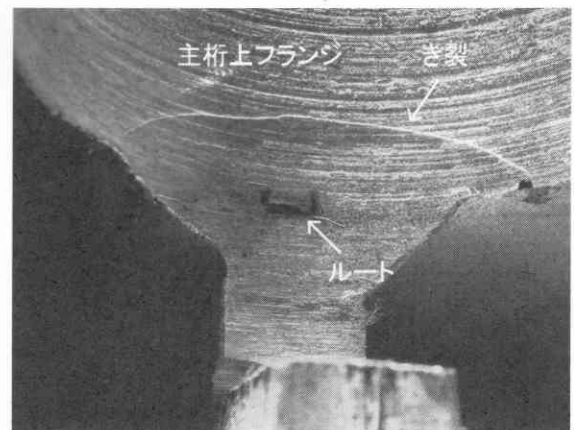


写真12 コア孔, 試験部D
(ステップ2で395万回)

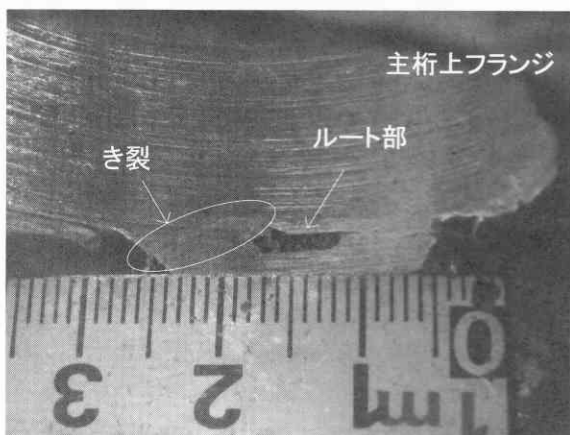


写真10 コア孔, 試験部C
(ステップ2でN=395万回)

裂が発生した ($N_s=40$ 万回) ものと推定できる。
なお、後述するように、試験部Bでは止端き裂が
発生してもビード表面のひずみは変化していない

ことから、トウき裂発見前のビード表面のひずみ
変化はルートき裂の発生、進展によるものと考え
られる。また、写真10に示すように、コアとコア
孔の観察により、高さ1.2mm、幅6.9mmのルート
部が確認できた。

試験部Dでは、図13に示すようにN=345万回
(ステップ2で140万回)でビード表面のひずみ
が急激に減少した。その後、図14に示すように、
N=365万回(ステップ2で160万回)でビード表
面に長さ13mmのき裂が現れた($N_d(R)=160$ 万回)。
写真11に示すように、ルートき裂は上フランジ内
に進展していることが確認できる。したがって、
N=345万回(ステップ2で140万回)でひずみが
変化した時点で、ルート部からき裂が発生したも
のと推定できる($N_s=140$ 万回)。

また、写真12のコアとコア孔の観察により、高さ
1.1mm、幅4.1mmのルート部が確認できた。

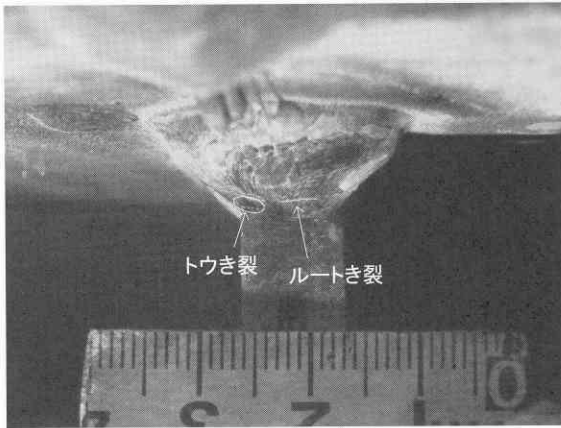


写真13 進展中のトウき裂と表面に現れたルートき裂
試験部 B (ステップ2で N=375 万回)

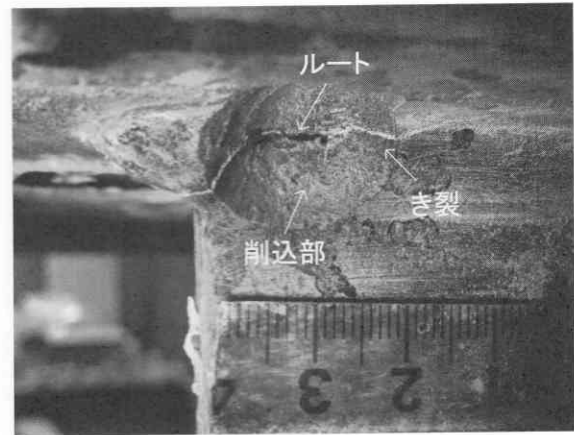


写真15 き裂再発状況, 試験部 A
(ステップ2で N=530 万回)



写真14 き裂先端削り込み状況, 試験部 A
(N=70 万回)

試験部 B では、図 13 と図 14 に示すようにひずみ変化がほとんど見られなかったが、N=365 万回 (ステップ2で 160 万回) で、溶接止端部に長さ 3mm のトウき裂が発見された (Nd(T)=160 万回)。その後、N=540 万回 (ステップ2で 335 万回) で急激に減少し、N=560 万回 (ステップ2で 355 万回) で、写真 13 に示すように、ビード表面に長さ 9mm のルートき裂が現れた (Nd(R)=355 万回)。したがって、N=540 万回 (ステップ2で 335 万回) でひずみが急激に減少した時点で、ルート部からき裂が発生したものと推定できる (Ns=335 万回)。試験終了後に行ったコアの観察により、き裂はルート部からも発生したことが確認できる。また、コアとコア孔の観察より、高さ 1.8mm、幅 3.3mm のルート部が確認できた。

b)事後保全 (試験部 A)

試験部 A では、N=70 万回の繰り返し载荷を行ったのち、写真 14 に示すようにき裂先端をバググラインダーを用いて削り込み除去し、TRS でアングル材を取り付けて、事後保全対策を施した。その後、530 万回の繰り返し载荷を行った後 (N=600 万回) にアングル材を取り外し、MT によりビード削込部のき裂を確認した。その結果、写真 15 に示すように、垂直補剛材の両面で約 22mm (7mm+15mm) のき裂の再進展が確認された。表 5 に示すように、き裂の進展状況を見ると、0~530 万回で 22mm (39mm→61mm) 程度であり、同程度のルートき裂長さの進展状況であった試験部 C のステップ2 (対策なし) のき裂進展状況 315~335 万回で 31mm (56mm→87mm) と比べると、進展速度は 1/37 程度に小さく (進展寿命は 37 倍程度長く) なっている。したがって、き裂先端を削除し、TRS と HTB でアングル材を取り付け、事後保全対策を施すことにより、き裂は再発するものの、進展寿命は 37 倍程度長くなることが明らかとなった。

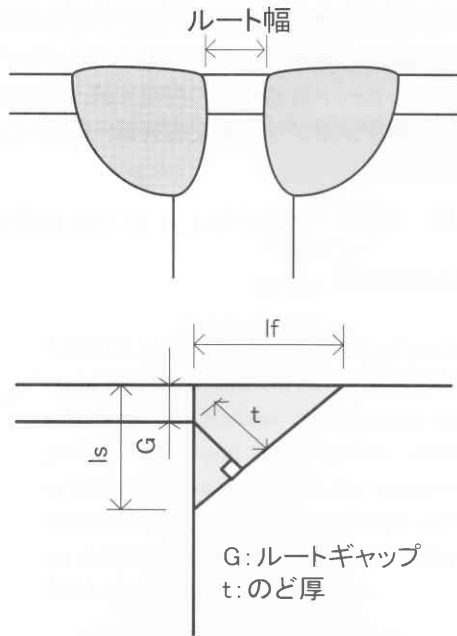
(3)溶接形状と疲労寿命の関係

表 6 と図 16 には、コアおよびコア孔で計測した各試験部の溶接寸法と疲労寿命の関係を示す。のど厚やルートギャップに関してはほぼ一定で違いがみられないが、ルート幅が 5~7mm 程度の試験部 A と C では 10~20 万回程度でルートき裂が発生し、ルート幅が 3~4mm 程度の試験部 B と C では、140~255 万回でルートき裂が発生している。以上より、ルート幅が大きい方がルートき裂が早期に発生しやすい傾向が認められた。

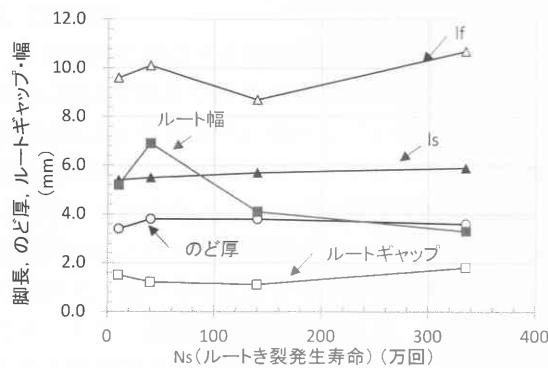
表6 各試験部の溶接形状の比較

試験部	A	B	C	D
lf	9.6	10.7	10.1	8.7
ls	5.4	5.9	5.5	5.7
のど厚	3.4	3.6	3.8	3.8
ルートギャップ	1.5	1.8	1.2	1.1
ルート幅	5.2	3.3	6.9	4.1
Ns	10	335	40	140
Nd(R)	60	355	335	160
Nd(T)	-	160	120	-

Ns : ルートき裂発生寿命
Nd(R) : ルートき裂発見寿命
Nd(T) : トウき裂発見寿命



(a) 溶接形状の定義



(b) 溶接形状と疲労寿命の関係
図16 各試験部の溶接形状の比較

4. まとめ

対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労き裂を対象とし、ジャッキアップ治具を用いた当て板工法と、TRSを用いたアンゲル材工法の2種類の疲労対策工法について実物大の試験体を用いて実験的に検討した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1)静的载荷試験結果

- ・ 逆位相で载荷を行うことで、実橋において走行車線と追越車線とを交互に車両が通行する際に生じる応力の交番を再現できた。
- ・ ジャッキアップ治具を用いた当て板工法で60数%程度まで、TRSを用いたアンゲル材工法で50数%程度まで、き裂発生部付近の局所的な応力を低減できることが明らかになった。

(2)疲労試験結果

- ・ 対策なしの場合、10~335万回の繰り返し载荷でルートき裂が120~160万回でトウき裂が発生した。なお、のど厚やルートギャップが同程度の場合には、ルート幅が大きい方がルートき裂が発生しやすい傾向が認められた。
- ・ 予防保全対策として、ジャッキアップ治具を用いた当て板工法と、TRSを用いたアンゲル材工法を適用した場合、両工法とも、205万回繰り返し载荷してもルートき裂もトウき裂も発生せず、き裂発生を防止できることが明らかになった。
- ・ 事後保全対策として、ルートき裂先端を削り込みで削除し、TRSとHTBでアンゲル材を取り付けることにより、き裂は再発生したが、進展寿命は30倍以上長くなった。

以上により、対傾構取付け部垂直補剛材上端部の疲労損傷に対する予防および事後保全対策効果について検証した。ここで提案した2つの対策工法はすでに実橋で試験的に施工されているが、今後ほかの橋梁に対しても適用させることを期待する。

謝辞

本研究を行うにあたり、新都市社会技術融合創造研究会の「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、また、関西大学学生の岡田康暉氏、海司瑞輝氏には実験にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

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] 小芝明弘，宮西正人，八島博昭，相田亨，宮原幸春：鋼橋の疲労損傷に対する応力低減工法の現場適用例，土木学会第58回年次学術講演会，pp.1093-1094，2003.9.
- [4] 原田英明，森猛，平山繁幸，櫻井勇人：鋼床版垂直スチフナー溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法，土木学会第64回年次学術講演会，pp.269-270，2009.9.
- [5] T.Kendo, A.Koshiba, M.Sakano, T.Kamizono and H.Namiki：Reinforcing procedure for fatigue damage of stiffener ends in steel bridges, The third international conference on bridge maintenance, safety and management, Seoul, Korea, 2008.7.
- [6] 河島信義，福田誠，森野真之，坂野昌弘：RC床版鋼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.
- [7] 森野真之，福永昭彦，坂野昌弘：鋼桁橋垂直補剛材上端部の疲労損傷対策に関する一提案，鋼構造年次論文報告集第18巻，2010.11.
- [8] 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.
- [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，pp.693-700，2016.11.
- [12] 鈴木博之：スレッドローリングねじで接合された継手の強度に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.61A，pp.614-626，2015.3.
- [13] 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.
- [14] 金澤高宏，溝上善昭，森下元晴：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，CS6-003，2016.9.
- [15] 西田尚人，坂野昌弘，田畑晶子，杉山祐樹，迫田治行，丹波寛夫：鋼床版Uリブとデッキ溶接部のビード貫通亀裂の再現実験，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4月12日原稿受理)