

接着材と高力ボルトを併用した疲労損傷部の添接補強実験

An experimental study of strengthening method for fatigue crackings using both adhesive bond and bolted splice

一宮 充*, 岩崎 雅紀**, 村中 昭典***, 皆田 理***

Mitsuru ICHIMIYA, Masanori IWASAKI, Akinori MURANAKA and Osamu MINATA

- * 株式会社 横河ブリッジ 技術本部 研究所 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)
 ** 工博 株式会社 横河ブリッジ 技術本部 研究所 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)
 *** 広島工業大学 工学部 建設工学科 (〒731-5143 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)
 **** 工博 広島工業大学 工学部 建設工学科 (〒731-5143 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)

In plate girder bridges, fatigue crackings have been occurred in the web penetration of main girder and cross beam flange. This report shows the two series of tensile test results to clarify the effect of strengthening for those fatigue cracking using both adhesive bond and bolted splice. First is the fundamental tensile test. Second is the fatigue tests which have been conducted to compare the fatigue crack growth rate using the web penetration model fatigue specimens. Those test results are follows.

- (1) The stress, which was strengthened using adhesive bond and bolted splice, reduce than that of using bolted splice only.
- (2) In case of boxing weld details, the fatigue strength of the web penetration is JSSC-G class, and in case of scallop details, that is JSSC-H class.
- (3) In case of strengthening details using bolted splice only, the fatigue strength is induced JSSC-D class. On the other hand, the strengthening details using adhesive bond and bolted splice, the fatigue strength is induced JSSC-C class.

Key Words: fatigue crackings, strengthening, adhesive bond, high strength bolt

キーワード: 疲労損傷, 補強, 接着材, 高力ボルト

1. はじめに

近年、鋼橋において疲労損傷の報告がされるようになり、それに対する補修・補強方法が検討されてきた。これらのうち、図-1(a)に示す主桁ウェブと荷重分配横桁下フランジとの交差部（以下、主桁-横桁取合部という）の主桁ウェブに発生する疲労損傷¹⁾の補強方法としては、

文献 2),3)で検討されているとおり、横桁下フランジと主桁ウェブの両方をL型部材を用いて添接補強する方法（図-1(b)参照）が最も効果的であり、発生応力が約30~40%に低減されることがわかっている。しかし、実橋においてL型部材を取り付けるには、主桁ウェブと横桁下フランジに対して孔明加工や高力ボルト締めなどの危険な部位での作業と多大な労力を要する。

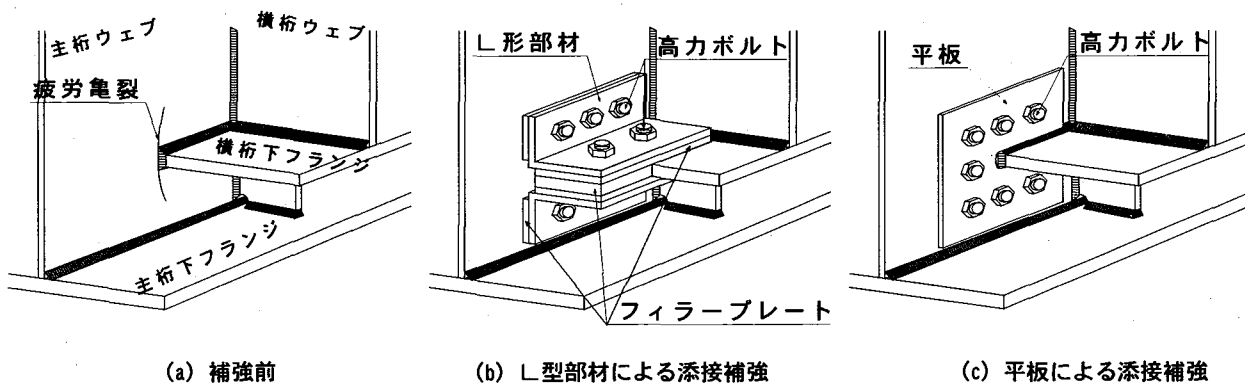


図-1 主桁-横桁取合部の模式図（埋戻形式）

表-1 基礎試験供試体諸元

供試体	tm (mm)	ts (mm)	接着材
A-1	16	9	無
A-2	9	9	無
B	16	9	有

表-2 供試接着材の物性

主成分	主 剤	硬 化 剤
混合比	変性エポキシ樹脂	ポリアミドアミン
可使時間	1:1 (質量比)	
引張せん断 接着強さ	約 50 分 (20°C, 1kg) 19.6 N/mm ² (鋼-鋼, 養生 7 日間/20°C)	

ところで、文献2),3)では他にも補強方法が検討されている。中でも主桁ウェブのみに横桁下フランジをかわす形の平板で添接補強する方法(図-1(c)参照)は、約50~60%の応力低減効果となっている。補強による応力低減効果は高い方が望ましいことは当然であるが、横桁下フランジへの施工がなく、発生応力の低減効果も大きい主桁ウェブのみを添接する補強方法は、さらなる合理化により実現可能と考えられた。

上記の添接補強は、高力ボルトを用いた摩擦接合であるが、文献4)では、接触面に接着材を塗布した高力ボルト継手の引張試験が報告されており、すべり係数で0.7程度相当にすべり耐力が上昇すると報告されている。これは、接着せん断抵抗によってすべり耐力を上昇させることの他に、継手の応力伝達機構にも影響を及ぼしていることによるものと推定された。すなわち、通常、高力ボルト継手の応力伝達は、高力ボルトの締付けによってボルト位置、すなわちワッシャで圧せられている範囲程度の鋼板間の強い圧力によって行われている⁹⁾。高力ボルト継手の鋼板接触面間に接着材を塗布することにより、ボルト孔近傍に集中していた主材と添接材の応力伝達が接触面全体に分布し、結果として主材の応力低減効果を高めると考えられた。

鋼構造物の接合に接着材を用いる方法に関しては、研究報告例⁹⁾はあるものの、その施工性、耐久性、維持管理上の問題に関してはまだ不明な点が多い。しかし、高力ボルト摩擦接合の応力伝達機構に及ぼす接着材併用の影響については、その継手効率を高める効果を有するものと考えた。そこで本報告は、鋼橋の疲労損傷部の補強方法として、接着材を併用した添接補強方法の補強効果について、主桁と横桁下フランジ取合部を模擬した単純引張供試体を用いた疲労試験を実施することにより検討したものである。

2. 接着材・高力ボルト併用補強鋼板の基礎試験

2.1 試験方法

接着材と高力ボルトを併用した添接補強の力学的挙動を把握するために、基礎試験を実施した。基礎試験は図

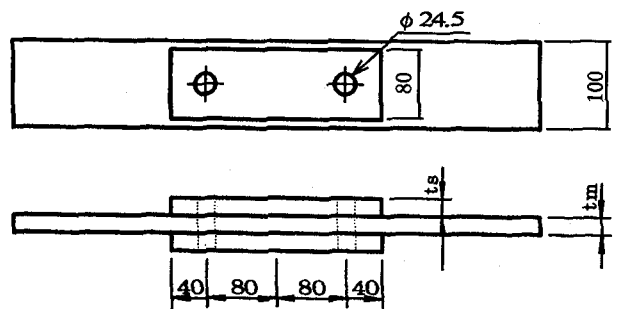


図-2 基礎試験供試体

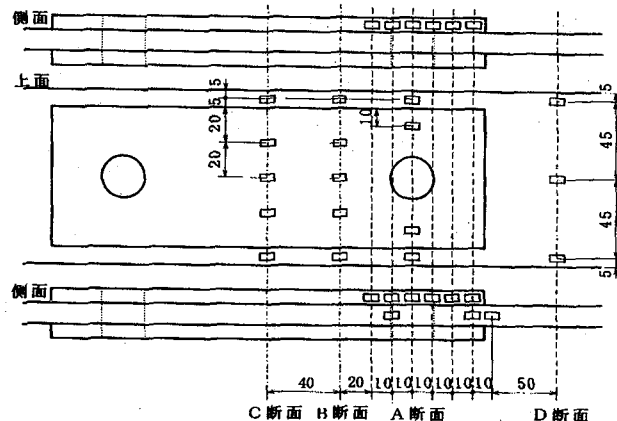


図-3 ひずみゲージ貼付位置

2-2に示す小型単純引張供試体を用い、万能試験機により単調引張載荷した。試験は表-1に示すように、接触面の接着材の有無、主材の板厚を変化させた計3種類の供試体について行った。まず、供試体Aで高力ボルト単独での添接補強方法の基本挙動を確認し、接触面に接着材を塗布した供試体Bと比較することにより、接着材の応力伝達機能に及ぼす影響を調べた。供試体Aは主材の板厚が変化した場合についても調査した。

供試材料はSS400であり、高力ボルトはF10T(M22)を使用した。接着材は表-2に示すように2液常温硬化型エポキシ樹脂系接着材であり、公称せん断接着強度は、約20N/mm²である⁷⁾。接着材による接合は、常温にて施工と養生(24時間)を行った。供試体には図-3に示すように主要な部位にひずみゲージを貼付し、継手の応力分布を調べた。

2.2 試験結果

載荷試験によって得られた載荷荷重と試験機のクロスヘッド間変位の関係を図-4に示す。各供試体とも主材の降伏と同時に高力ボルト継手部のずれが発生し、その後主材がボルト孔位置で破断し、終局状態に至った。主材純断面の応力を計算し、供試体のミルシート値とともに表-3にまとめた。供試体Aシリーズ(高力ボルト単独補強)では、主材の板厚によらず降伏応力はミルシート値に対し1.08~1.09倍となった。一方、供試体B(接

表-3 実験結果

供試体	ミルシート		実験値				実験値／ミルシート	
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	純断面降伏 応力(MPa)	純断面最大 応力(MPa)	降伏応力	最大応力
A-1	293	446	381	556	316	460	1.08	1.03
A-2	327	441	242	315	356	463	1.09	1.05
B	293	446	530	683	438	565	1.50	1.27

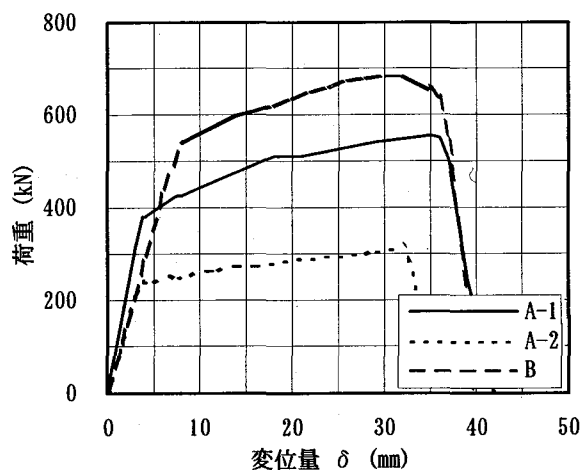


図-4 荷重-変位関係

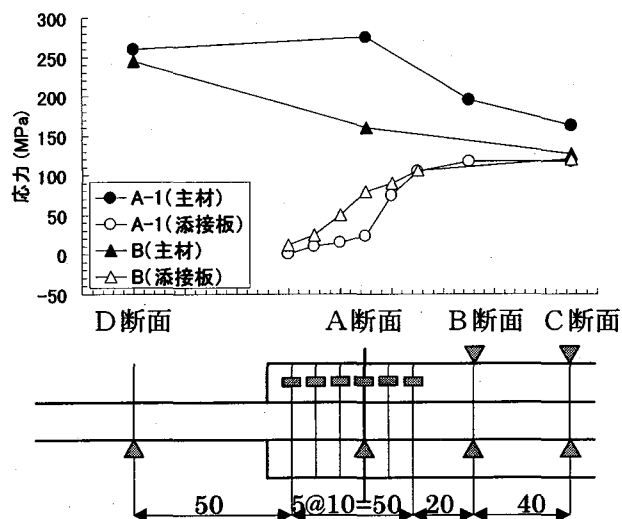


図-5 応力分布

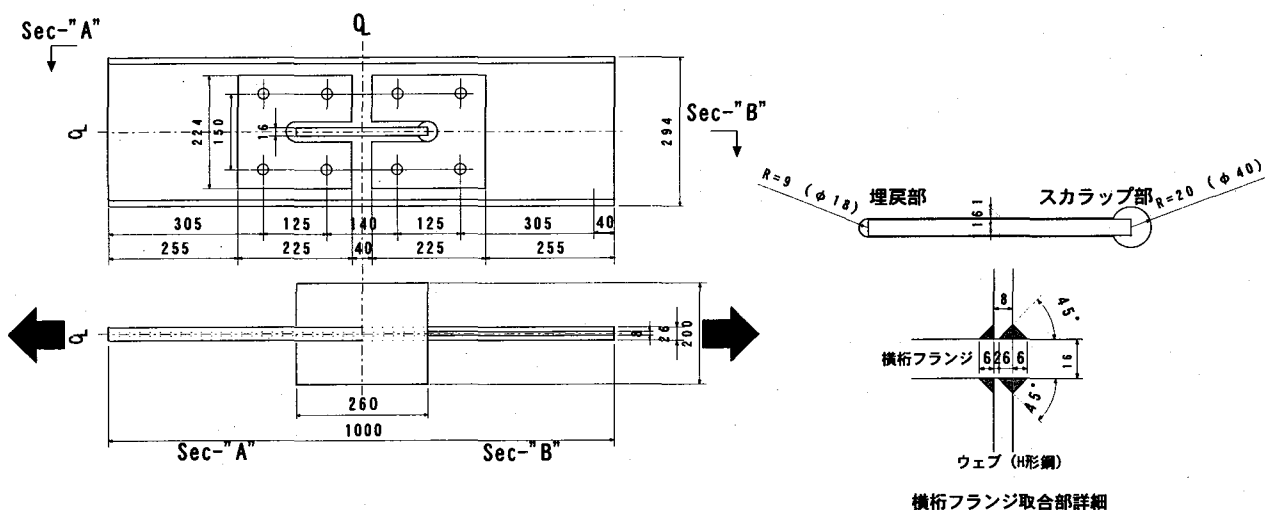


図-6 主桁-横桁取合部供試体

着材併用補強)の降伏応力はミルシート値に対して1.50倍に達する高い値となった。同様に最大荷重についても、供試体Aシリーズは1.03～1.05倍であるのに対し、供試体Bは1.27倍に上昇した。

図-2に示す位置に貼付したひずみゲージの測定結果から求めた弾性範囲(载荷荷重294kN)での主材及び添接板の応力分布を図-5に示す。接着材を併用することにより弾性範囲内では添接板への応力伝達がよりスムーズに行われ、主材と添接板がより一体化していることがわかる。この結果、供試体Bの降伏荷重が供試体Aに比べて高くなり、また、最大荷重も高くなったと考えられる。すなわち、接着材を併用することによりボルト孔位

置で降伏により生じる主材と添接板のずれ変形が、供試体Aでは添接板全体のすべりとなって添接板への応力伝達が行われないのに対し、供試体Bでは降伏によるずれ変形が部分的な領域に限定され、他の領域で添接板への応力伝達が行われるために最大荷重も高くなったものと推定される。

以上、基礎試験の結果より、接着材を併用することにより主材と添接板がより一体化できることが明らかになった。そこで、次節ではより実橋に近いモデルを用いた疲労試験を実施し接着材併用の効果について検討することとした。

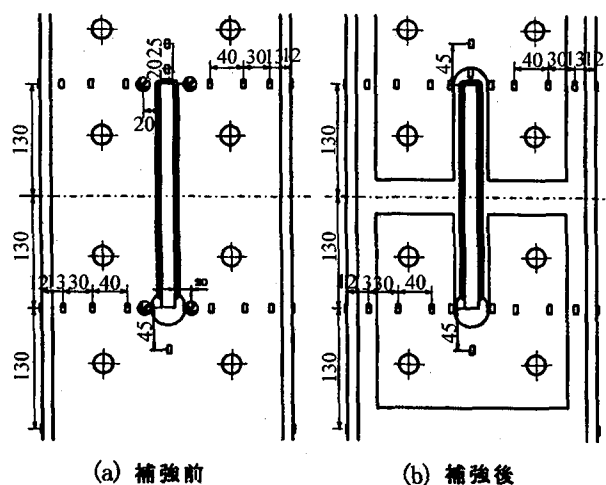


図-7 ひずみゲージ貼付位置

3. 主桁-横桁取合部モデルの静的・疲労試験

3.1 供試体

鋼1桁の主桁-横桁取合部は、主桁系の曲げ応力に加えて横桁系の応力も作用する2軸応力状態下になる。疲労損傷がこの部位に発生した場合、主桁系の応力は主桁を崩壊させる主要因となるものと考えられるため、主桁系の面内応力による亀裂伝播を防ぐ必要がある。まず、図-6に示すように、主桁-横桁取合部をモデル化した供試体を用い、1軸単純引張荷重下における応力状態を確認することにより、添接補強効果を確認することとした。供試体は横桁下フランジが貫通した主桁ウェブを模擬したものである。取合部のディテールは、ウェブにレ型開先を施した被覆アーク溶接とした。回し溶接部の処理方法には種々の方法があるが、ここでは一方の回し溶接部をR20のスカロップ構造（以下、スカロップ部という）、もう一方は埋戻し（以下、埋戻部という）として1つの供試体から2つのデータを収集した。主桁ウェブ相当材はH形鋼（H300×200×8/12）とし、荷重装置の制約からフランジを幅26mmに切削して製作した。主桁ウェブの取合部への添接補強板は、取合部をはさみ形の板厚9mmの平板であり、高力ボルト（F8T-M20）と接着材で添接した。接着材は、“2”で用いたエポキシ樹脂系接着材と同じものを用いた。高力ボルトの間隔は、接着材の有無の影響を顕著に比較することと、孔加工の施工性を考慮し、通常の約2倍とした。これは、接着材を併用することにより大きな補強効果が期待し得ることから、高力ボルト本数が低減できると考えたためである。添接補強板の接触面は、ブラスト処理とした。

3.2 静的荷重試験

疲労亀裂はスカロップ部、ならびに埋戻部から発生し荷重軸直角方向に進展するものと考えられたので、図-7

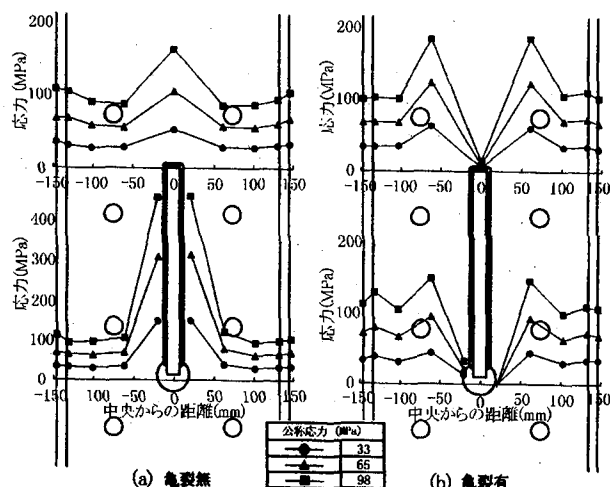


図-8 補強前 応力分布

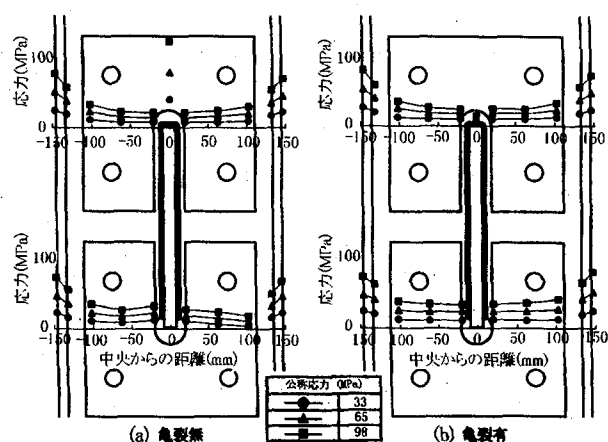


図-9 高力ボルト単独補強 応力分布

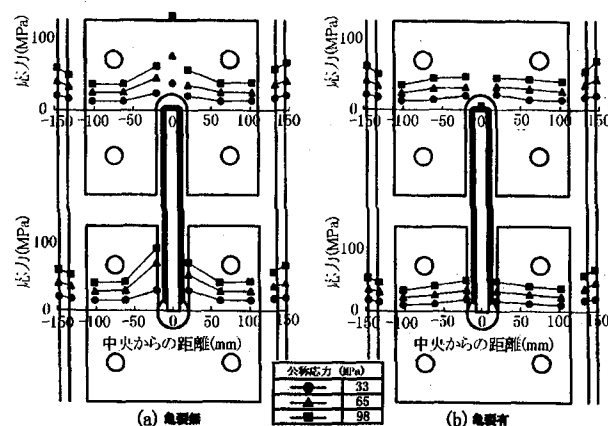


図-10 接着材併用補強 応力分布

に示す位置にひずみゲージを貼付し、静的荷重試験を実施した。さらに疲労亀裂発生後の応力状態を確認するために、補強前の状態で疲労試験を行い、スカロップ部および埋戻部から片側約20mm長の疲労亀裂を進展させ、この状態で添接補強したときの静的荷重試験も実施した。一般に疲労損傷の補修は、疲労亀裂を溶接によって埋戻

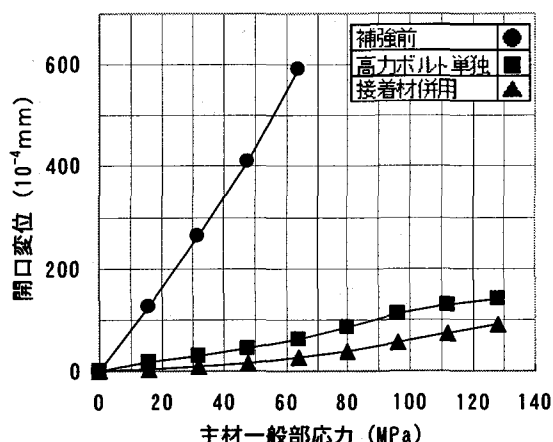


図-11 スカラップ部疲労亀裂開口変位挙動

し、その後補強対策が講じられるが、本検討では、亀裂の補修溶接を行わない場合の補強効果に着目した。添接補強方法は、高力ボルトのみ（以下、高力ボルト単独という）と、接着材と高力ボルトを併用（以下、接着材併用という）した場合であり、試験ケースは、補強前、高力ボルト単独補強、接着材併用補強の3ケースを亀裂のない場合とある場合と比較した、全6ケースである。補強後の応力は主材が添接補強板で覆われている部位については添接板表面で測定したひずみから求めた。

静的荷重試験結果で得られた応力分布を図-8～10に示す。当然のことながら図-8に示す補強前、亀裂無しの状態ではスカラップ部と埋戻部の溶接止端部に、亀裂発生後は亀裂先端に高い応力が発生する。特に、亀裂無しの状態でのスカラップ部の応力が非常に高い。

図-9、10より、亀裂の有無に関わらず接着材併用補強は高力ボルト単独補強に比べて、添接板の応力が大きいことがわかる。これは、“2”で言及したように接着材により添接板への応力伝達が向上したためと考えられる。

補強前、高力ボルト単独補強、接着材併用補強の3ケースにおける、スカラップ部から発生した疲労亀裂の鋼板表面における開口変位を測定した。各ケースでの亀裂長さはすべて同じである。主材一般部の断面（添接部位外）における応力を公称応力とし、開口変位との関係を図-11に示す。開口変位は高力ボルト単独、接着材併用のいずれの添接補強方法においても約90%以上低減されている。接着材の併用効果は、図-11の▲印で示した接着材併用補強の開口変位が■印の高力ボルト単独補強より低いことからわかるが、これを高力ボルト単独補強の開口変位で無次元化したものを図-12に示す。主材一般部の作用応力が低いほど、接着材の併用効果が高いことがわかる。一般に、実橋での補強工事は死荷重作用下で実施されるため、本補強方法は活荷重に対する補強対策である。したがって、活荷重の設計荷重に対して占める割

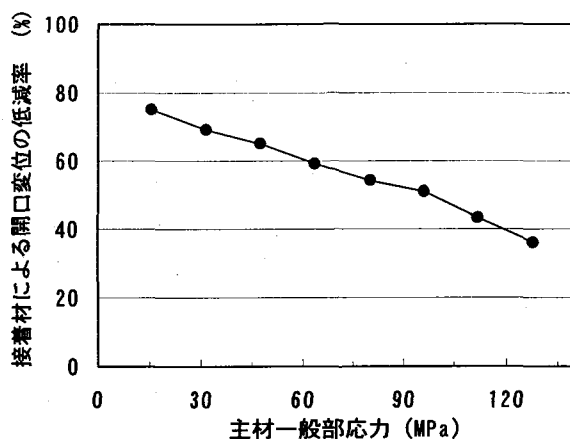


図-12 接着材併用補強による補強効果

合が小さい場合には、作用応力が低いほど補強効果が高い本補強方法は、活荷重による応力低減に対して有効であるといえる。

3.3 疲労試験

疲労亀裂が発生、進展した場合の添接補強効果について調査するために、疲労試験を行った。添接補強を行う供試体の疲労試験は、補強前の亀裂無しの状態で繰返し荷重を載荷し、スカラップ部および回し溶接部から片側約20mmの疲労亀裂を発生させて試験を中断し、添接補強を行った後疲労試験を再開した。

添接補強後は、主材の亀裂進展挙動が確認できなくなる。そこで、第1に各添接補強ケースについてピーチマーク試験を行い、その疲労破面から亀裂進展量を測定した。試験方法は、補強前の供試体では、応力範囲109MPaで片側の亀裂長さ10mmまで載荷し、応力範囲55MPaで 1×10^5 回のピーチマークを導入した。添接補強後のピーチマーク試験方法は、公称応力範囲を147MPaとし、高力ボルト単独補強では 5×10^5 回、接着材併用補強では、 1×10^6 回載荷した後に、応力範囲74MPaで 2×10^5 回のピーチマークを導入した。

試験後の埋戻部における疲労破面のスケッチを図-13～15に例示し、疲労亀裂進展速度と亀裂長さの関係を図-16に示す。

図-13の補強前では、ピーチマークは約10mmごとに導入されているが、当然のことながら、亀裂進展に伴って繰返し回数は少なくなり、亀裂進展速度は速くなった。

補強後は、いずれの補強方法も亀裂の進展に伴い、進展速度が低下している。これは添接補強により主材に作用する応力が添接補強板に伝達されるために、亀裂先端への応力集中が低減され、亀裂進展速度が低下したものと考えられる。図-15の接着材併用補強で、載荷回数が多いにも関わらず高力ボルト単独補強に比べて亀裂進展量が少ないことは、接着材併用の補強効果が高いことを

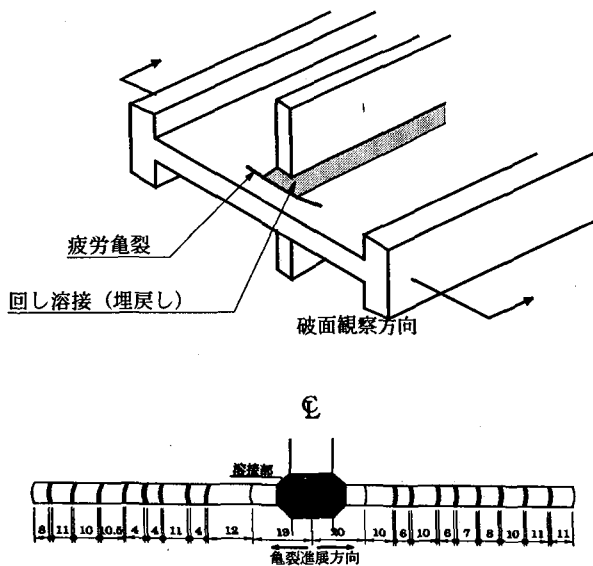


図-13 補強前の疲労破面

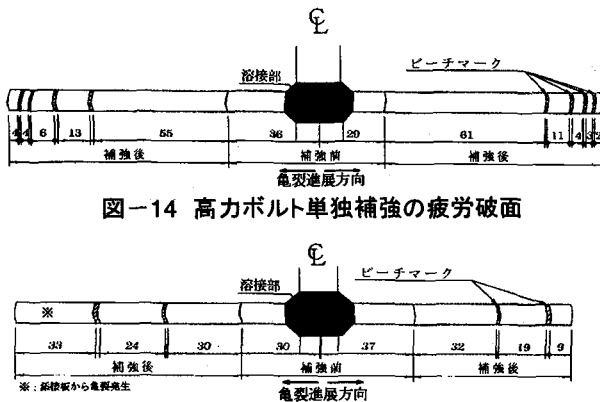


図-14 高力ボルト単独補強の疲労破面

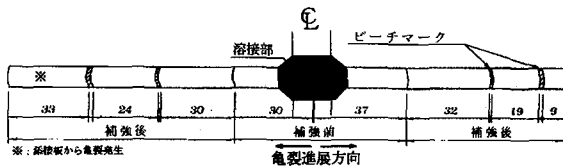


図-15 接着材併用補強の疲労破面

裏付けているものと考えられる。なお、スカラップ部のピーチマーク試験では、亀裂進展量が微少であったために確認できなかった。

第2に、一定振幅応力で疲労試験を実施した。試験方法は、ピーチマーク試験と同様にまず補強前の状態で荷重し、スカラップ部・埋戻部のいずれも片側約20mmの疲労亀裂が発生・進展した段階で添接補強を行った。供試体全10体中高力ボルト単独補強で4体、接着材併用補強で6体に添接補強をした。添接補強後、荷重回数 $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$ 回を目途に実験を終了した。図-17に疲労試験結果を示す。

無補強時の亀裂長さ片側約20mm進展までの疲労寿命は、“3.2”で述べたように高い応力集中が発生するためにスカラップ部の方が埋戻部に比べて低いことがわかる。また、疲労亀裂発生後に添接補強をした場合の疲労強度は著しく向上している。接着材併用補強方法での 2×10^6 回疲労強度は約100MPa以上であり、この応力範囲以下では疲労亀裂は進展しなかった。

添接補強を行った疲労試験では主材の疲労亀裂の進展量が目視で確認できないため、試験終了後に供試体を解体して疲労破面から調査した。補強ケース別の亀裂進展

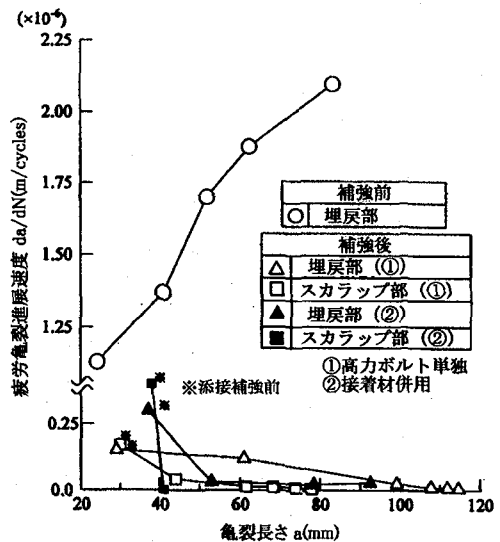


図-16 亀裂進展速度-亀裂長さ関係

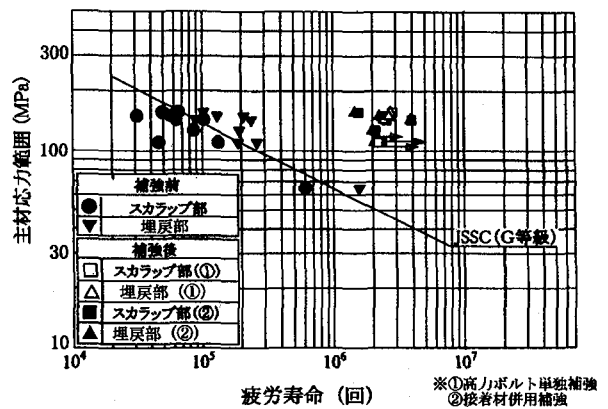


図-17 疲労試験結果

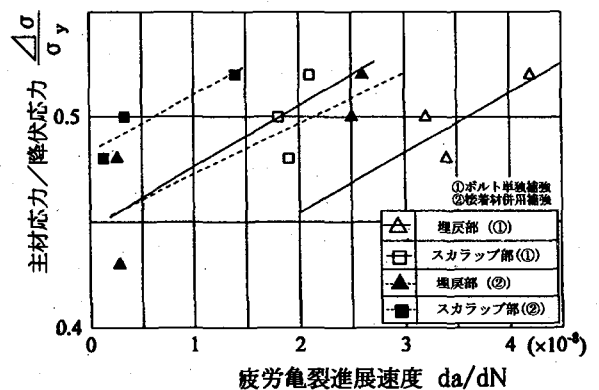


図-18 無次元化応力-疲労亀裂進展速度関係

速度を図-18に示す。図の縦軸は主材断面の応力を降伏応力で無次元化したものであり、横軸は添接補強後の亀裂進展速度である。▲と■印で示した接着材併用補強の進展速度は、△と□印で示した高力ボルト単独補強のそれに比べて約40%低下している。

このように、亀裂進展速度は補強方法によって異なる。このことを考慮した疲労寿命を破壊力学の手法により算出し、各補強ケースの疲労強度を推定した。疲労寿命は、

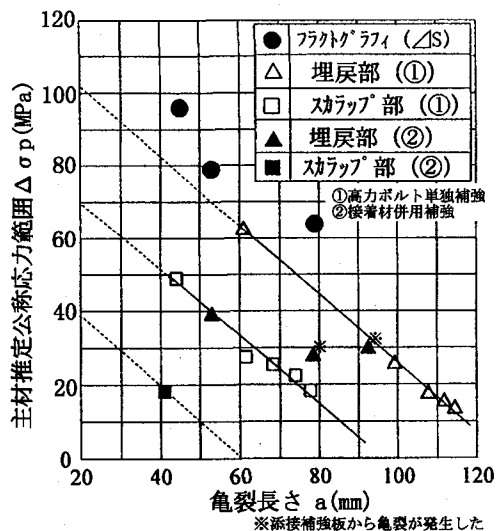


図-19 主材推定公称応力範囲 $\Delta\sigma_p$ —亀裂長さ a 関係

疲労亀裂の長さが供試体中央から90mmの距離に達したときを補強効果の喪失と仮定し、これを疲労亀裂進展解析により算出した。ただし、前述したように、添接補強後の疲労亀裂進展速度は、主材の応力が添接補強板に伝達されるために減速している。すなわち、主材に作用している応力は、疲労亀裂の進展とともに減少する。そこで本供試体の疲労亀裂進展解析は、添接部主材に作用している応力範囲（以後、主材推定公称応力範囲 $\Delta\sigma_p$ という）を考慮して算出した応力拡大係数範囲 ΔK を求め、これを疲労亀裂進展速度 da/dN との関係⁹⁾（式-1）に代入し算出した。なお、応力拡大係数の算出の際は、亀裂を板厚貫通亀裂と仮定し、簡便式⁹⁾を用いた。これは、図-13～15に例示したような亀裂がほぼ板厚に均等な進展性状を示していることによる。

$$da/dN = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (\text{式-1})$$

$$C = 1.5 \times 10^{-11}, n = 2.75, \Delta K_{th} = 2.9 (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dN : \text{m/cycles}, \Delta K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

主材推定公称応力範囲 $\Delta\sigma_p$ の算出は、まず、ピーチマーク試験によって得られた疲労亀裂進展速度 da/dN と式-1の関係から、各亀裂長さに対する応力拡大係数範囲 ΔK を求めた。そして、応力拡大係数範囲 ΔK を算出する簡便式から、主材推定公称応力範囲 $\Delta\sigma_p$ を算出した。図-19に主材推定公称応力範囲 $\Delta\sigma_p$ と亀裂長さ a の関係を示す。高力ボルト単独補強である△印の埋戻部と□印のスカラップ部については、回帰直線で近似した。接着材併用補強については、▲印の埋戻部は添接板から疲労亀裂が発生した※印のデータを除外して□印の高力ボルト単独補強スカラップ部の関係式と同じとし、■印のスカラップ部は、傾きのみを同直線と同じとした。

なお、●印は△印の高力ボルト単独補強の埋戻部の疲労破面のSEM（走査型電子顕微鏡）観察結果からストラ

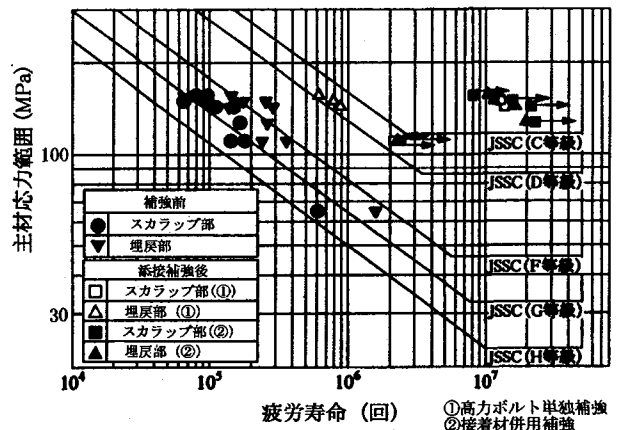


図-20 解析結果

イエーション間隔を用いて算出した $\Delta\sigma_p$ である。ピーチマーク試験の結果に比べてやや高いものの、 a の増加に伴って $\Delta\sigma_p$ が低下する傾向は同様であった。

解析結果に基づき、疲労試験結果を再整理した結果を図-20に示す。補強前の疲労強度は、スカラップ部でJSSC疲労強度等級のH等級、埋戻部でG等級相当であり、文献9)の結果と一致している。添接補強後は、スカラップ部においては、高力ボルト単独補強、接着材併用補強ともにC等級を上回る。埋戻部は、接着材併用補強ではC等級を上回るが、高力ボルト単独補強ではD等級に相当する。

4. まとめ

接着材と高力ボルトを併用した添接補強について基礎試験およびモデル供試体の疲労試験によりその効果について検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 接着材を併用した添接補強方法は、接着材により添接補強板への応力伝達がスムーズに行われ、主材の応力分担が低下する。また、ボルト部で降伏・ずれが発生しても部分的であると推定されるため、他の健全な領域で接着材による応力伝達が行なわれる。
- (2) 接着材と高力ボルトを併用することによる応力の低減効果は、作用荷重が低いほど大きい。
- (3) 疲労損傷部に対する添接補強効果は、接着材を併用することによって疲労亀裂を埋戻さなくても得られる。
- (4) 接着材と高力ボルトを併用した添接補強方法により、疲労強度は、JSSCの疲労強度等級で3～4等級向上する。

なお、接着材と高力ボルトを併用することによる主材から添接板へのスムーズな応力伝達は、一般的な高力ボルト継手の合理化につながる可能性が期待できるとの知見が得られた。すなわち、一つは添接板端部から第1高力ボルト列までの応力伝達機能が期待できることであり、

現行の道路橋示方書¹⁰⁾で規定されている引張フランジの孔引きによる断面控除が緩和できる可能性がある。もう一つは、接着材による応力伝達効果が高力ボルト摩擦接合に加算されることにより、必要とする高力ボルト本数が低減できる可能性があることである。

このように、接着接合は、合理化・省力化につながる新たな接合方法として期待できるが、接着接合には、施工性、耐久性、維持管理上の問題に関して不明な点も残っている。これらの点に関して、更なる研究を進める予定である。

謝辞：本研究の実施に際しては、研究当時広島工業大学大学院生であった中村竜二氏には多大なる協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 米倉徹, 長沼俊彦, 丸山悟, 羽子岡爾朗: 鋼鈑桁の横桁下フランジ損傷部調査報告, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集 I-215, pp.428~429, 1994.9.
- 2) 鈴木博之, 中村一平, 西岡敬治, 岩崎雅紀, 石井博典: 鋼 I 桁の主桁-横桁取合い部の補強方法に関する解析的検討, 構造工学論文集 Vol.43A, pp.1033~1040, 1997.3.
- 3) 梶原仁, 小田桐直幸, 谷中聡久, 一宮充: 既設鋼 I 桁橋の横桁下フランジ貫通部の添接補強効果に関する室内実験検討, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 I-A329, pp.656~657, 1997.9.
- 4) 岩崎雅紀, 北村明彦, 明橋克良, 深沢誠: 磁気浮上式鉄道に用いる低磁性絶縁ボルト継手の開発研究, 横河ブリッジ技報 No.22, pp.93~102, 1993.1.
- 5) 田島二郎: 高力ボルト摩擦接合概説, 技報堂, pp.83~97, 1966.5.
- 6) 日本鋼構造協会: 鋼構造物への接着接合の適用 - 接着接合研究小委員会報告 -, JSSC テクニカルレポート No.26, 1993.5.
- 7) コニシ株式会社: PRODUCT GUIDE & TECHNICAL DATA, ボンド E250, 1997.3.
- 8) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, pp.51~57, 1993.4.
- 9) 町田文孝, 三木千壽, 吉岡明彦: 主桁ウェブ貫通型横桁取り合い部の疲労特性, 土木学会論文集 No.612/I-46, pp.349~357, 1999.1.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 丸善, pp.196~197, 1996.12.

(1999 年 9 月 17 日受付)