

疲労劣化した鋼構造物の補修・補強技術

Repair Practice of Steel Bridges Damaged due to Fatigue

松本 好生*

Yoshio MATSUMOTO

ABSTRACT Since 1980's a number of steel highway bridges in Japan have experienced fatigue cracking. Many maintenance works have been executed. Recently, unforeseeable damages have been detected due to the increase of traffic volume and load. This paper provides a review of many types of fatigue cracking and many practices for repairs that have been developed in steel highway bridge members.

KEYWORD : 鋼道路橋、疲労亀裂、非破壊検査、補修、補強

steel highway bridge, fatigue crack, non-destructive testing, repair, retrofit

1. まえがき

鋼道路橋の疲労問題は1980年代初頭より報告されており、疲労損傷の補修については補修実績において約20年を経過したところである。1980年代以降多くの疲労損傷の報告が出され、それらに対する補修方法の提案、補修施工の報告などが行われてきた^{1)~3)}。また、近年、従来確認されていなかった新たな損傷が確認されてきている。本文においては、疲労損傷の代表的な事例についてその補修対策がどのように計画実施されてきたかについて概説し、設計施工上の留意点について述べる。

2. 疲労損傷事例と補修・補強方法

2-1. 鋼鈑桁の損傷

(1) 対傾構取合部および分配横桁

ウェブギャップ板の損傷^{4)~7)}

これらの損傷は道路橋の疲労損傷として最も早く顕在化した損傷の1つである(図-1~2)。比較的早期に存在が明らかになったことより、その対策についても種々の検討が加えられてきた。これら検討により、損傷の原因としては、床版のたわみによる主桁の首振り変形の拘束と主桁相互の相対変位であり、垂直補剛材上端部およびウェブギャップ板上端部では床版たわみの影響が大きく、ウェブギャップ板下端部では主桁相対たわみの影響が大きいと考えられている。床版剛性の小さい昭和30年~

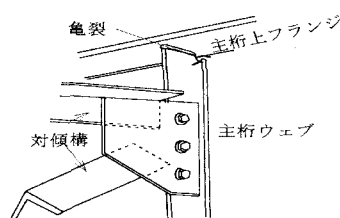


図-1 対傾構取合部の亀裂

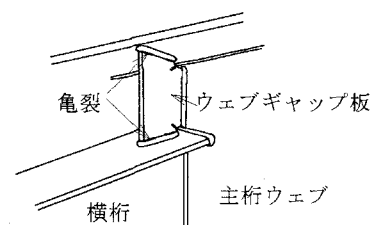


図-2 ウェブギャップ板の亀裂

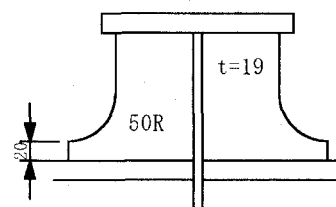
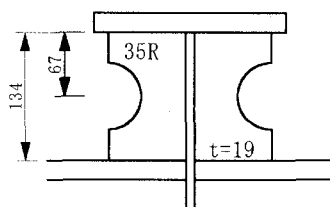
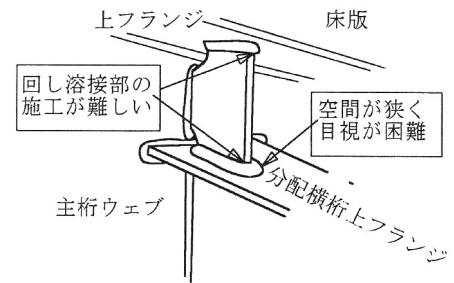


図-3 ウェブギャップ板の形状の改良例

*横河工事(株) 技術開発本部 技術二部 (〒170-8452 東京都豊島区西巣鴨4-14-5)

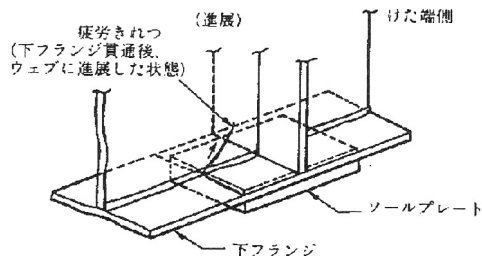
40年代の橋梁については床版補強が逐次施され、垂直補剛材上端部の発生応力は大きく低減している。しかし、ウェブギャップ板においては、上端部の発生応力は縦桁補強により低減するが、下端部の発生応力は主として主桁相互の相対たわみに起因すると考えられるため、縦桁補強後においても応力の低減が比較的少ない。このため、ウェブギャップ板については、増厚を行うとともに図—3に示すように、形状改良を行うことが望ましいと考えられる。また、このような構造的な応力低減とともに、すみ肉溶接の完全溶け込み溶接化と止端仕上げによる疲労強度の向上が行われる。止端仕上げにおいては、TIG仕上げによる方法と機械的切削による方法があるが、機械的切削と比較し比較的短時間にて行えることより、TIG仕上げが多用される。しかし、TIG溶接は橋梁関係の溶接作業には比較的なじみの薄い手法であり必ず施工者の技量確認を行う必要がある。また、作業姿勢は基本的に上向きであり、対傾構支材、ガセット等が支障し溶接姿勢が自由にとれないことにより溶接品質を確保することが困難となりやすい。特に、TIG仕上げの継ぎ目が補剛材の角部に位置し一番重要な部位の形状改良が行えていない場合があり施工において十分注意する必要がある（図—4）。このように、施工姿勢の厳しい場合においては、必ずしもTIG仕上げにこだわらずロータリーソーその他を使用した機械的切削を併用することも有用である。



図—4 ウェブギャップ板の施工困難部

(2) 主桁ソールプレート部の損傷（図—5）

ソールプレート部の損傷の主要因としては支承の拘束によるソールプレート前端への応力の集中が考えられている。損傷の補修補強は、亀裂の補修、回転機能の失われた支承の取り替えによる拘束力の低減、ソールプレートを溶接取り付けよりHTB取り付けに変更することによる損傷原因の除去が基本的な手法として考えられる^{8)~11)}。



図—5 ソールプレート前端部の損傷



写真—1 溶接による補修状況

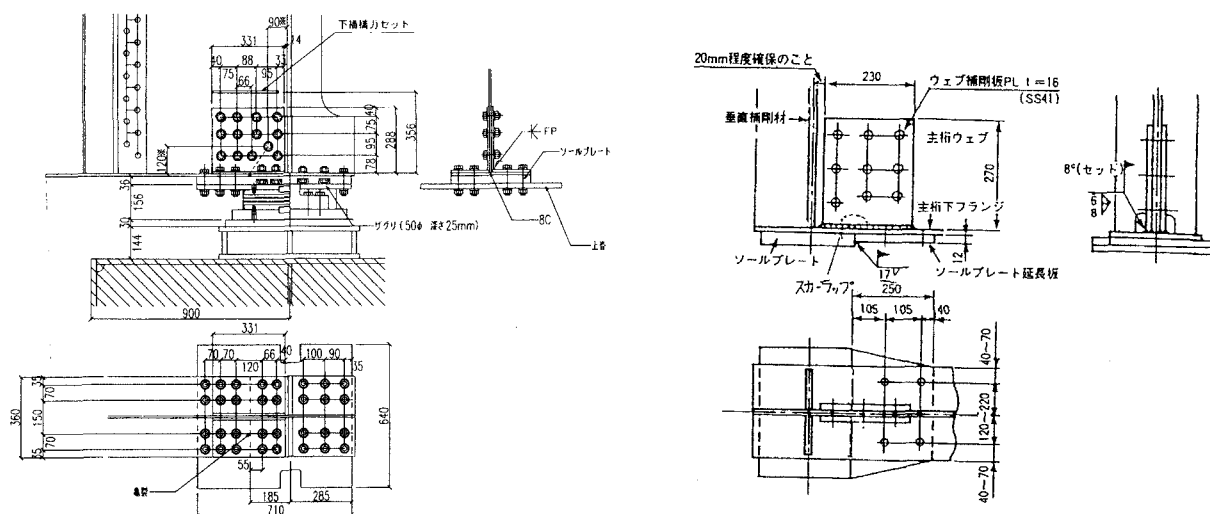
①亀裂の補修

亀裂の補修方法としてはHTBによる添接補修と溶接による補修の2種が提案されている。溶接補修の適用に当たっては桁下空間の確認と溶接手順の検討、溶接後における検査方法の検討を十分に行っておく必要がある。支承部の補修溶接では桁下空間が狭く溶接施工が困難な場合が多いので基本的にはHTBによる補修を行うことが好ましい。HTBによる補修では亀裂先端部にストップホールを設置することが行われる。ストップホールの施工に当たっては、磁粉探傷により亀裂先端部を明らかにし、ストップホール施工後に孔壁を磁粉探傷し亀裂の取り逃しがないことを確認する必要がある。また、溶接補修においても、磁粉探傷により亀裂先端を明らかにし亀裂先端部を残すことがないように施工しなければならない。

②支承の取り替えとソールプレートの取り替え（図—6）

支承はゴム支承に取り替えることが多いが、ゴム支承はその寸法が従来の鋼製支承と比較し大きくなるのが一般的であり、空間が不足し取り替えを行うことが困難な場合がある。その時にはBPB支承が用いられることが多い。また、桁下の空間その他の物理的な要因により支承の取り替えを行えない場合には、溶接によりソールプレートの延長が行われる場合がある。このような施工は溶接姿勢が上向き溶接になる

とともに、作業空間が非常に狭く良好な溶接を行うことが困難な場合が多く、適用に際しては作業空間等について十分検討する必要がある（写真－1）。



ソールプレートを取り替える場合

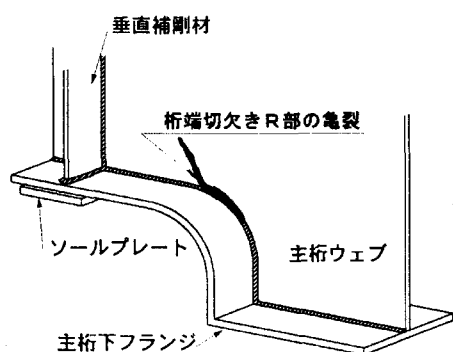
ソールプレートを取り替えない場合

図－6 ソールプレート部亀裂の補修方法

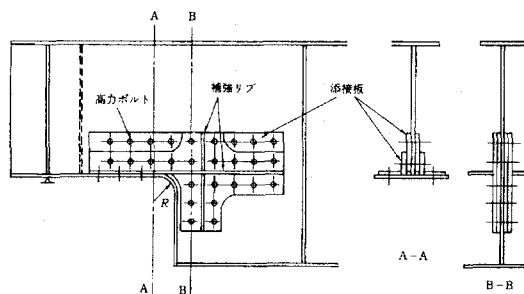
(3) 桁切欠き部、ゲルバーヒンジ部の損傷

桁端の切欠き構造は、建築限界の関係より桁下空間を確保する目的にて使用されたり、ゲルバー構造の橋梁の架け違い部、上路アーチ橋の側径間桁との連結部などに広く用いられている。この部位に対する損傷も比較的早期に確認された損傷であり、亀裂は切欠きR部に添って進行した後、腹板部に進み、桁を破断することが確認されている（図－7）。切欠き部の構造としては曲がりフランジを用い切欠き部に補強を施していない構造において発生が多い。また、亀裂発生部の溶接はすみ肉溶接であることが多く、製作上においてもルートギャップを発生させやすい構造であり、これらが亀裂発生の大きな要因となっている場合がある。亀裂部の溶接補修においては溶接による亀裂進展の防止のため、切欠き部の近傍にて仮受け等をおこない亀裂先端部の応力の解放を行っておく。また、溶接による補修では、亀裂を残置しないことが重要であり亀裂先端部にて磁粉探傷を行い亀裂の除去を確認することが必要である。

添接板補強は現行の設計同様に、フランジ力を円滑に腹板に伝達するよう、添接板上に水平方向および鉛直方向の補強リブを設置し、水平リブの端部を下フランジと高力ボルト接合することを基本としている（図－8）¹²⁾¹³⁾。しかし、実構造においては下フランジと補強リブの接合が困難な場合が多い。このような場合には十分な補強効果が得られない場合があり応力計測などにより有効度を確認しておく必要がある。また、アーチ側径間部のゲルバーヒンジ部の補強工においては、補強実施後に応力計測を実施し十分な補強効果が得られていないことが明らかになったため、ゲルバーヒンジ部の連続化施工を行った事例も報告されている（図－9）。



図－7 桁切欠き部の亀裂



図－8 桁切欠き部の補強要領

2-2. アーチ橋の損傷

アーチ橋は構造体としての変形が比較的大きく補剛桁とアーチ弦材との相対変位により、これら両者を結ぶ垂直材の上下端部などに多くの損傷の発生が報告されている。これら損傷については、垂直材上下端部において局部補強を行い損傷部位の局部的な応力低減を行うことが行われている。しかし、全体変形が大きい場合には、局部補強のみでは対応が困難であり抜本的な応力低減法としてアーチ部に斜材を添加し構造全体の剛性を高める方法が多く採用されている（図-9）^{14)~16)}。このようにアーチ構造においては全体構造の変形が構造部材の連結部に設計上想定していない二次応力を発生させ損傷の原因となることがあるので十分注意しなければならない。

図-10に示す下路アーチ橋においては、床版の損傷にともないRC床版を鋼床版に取り替え、床版の健全化を図るとともに自重の低減により活荷重耐荷力の向上を図った。しかし、鋼床版とそれを支えるアーチ部床組構造との接合部の垂直補剛材上端部に亀裂の発生が認められた。また、アーチ主構と床組とを連結しているブレーキトラス部に亀裂の発生が確認された。これらは、損傷により取り替えられたRC床版が補剛桁と連結されており補剛桁の一部として機能していたのに対し、置き換えた鋼床版が主構横桁と鋼床版縦桁との交点のみで支持されたため、床組剛性が主構造に寄与せず主構の変形量が増加し、相対変位により構造接合部に損傷を発生させたものと考えられた。これより、着目橋梁では応急的に損傷垂直補剛上端部の溶接部を完全溶け込みとするとともに止端部の仕上げを行い疲労強度の向上をはかるとともに、ブレーキトラス部では活荷重による主構と床桁との相対変位に抵抗できるように部材の増強を行った。しかし、損傷の主要因である主構の変形量の低減は行われていず、継続的に損傷状況を監視するとともに全体補強の必要性が検討されている。

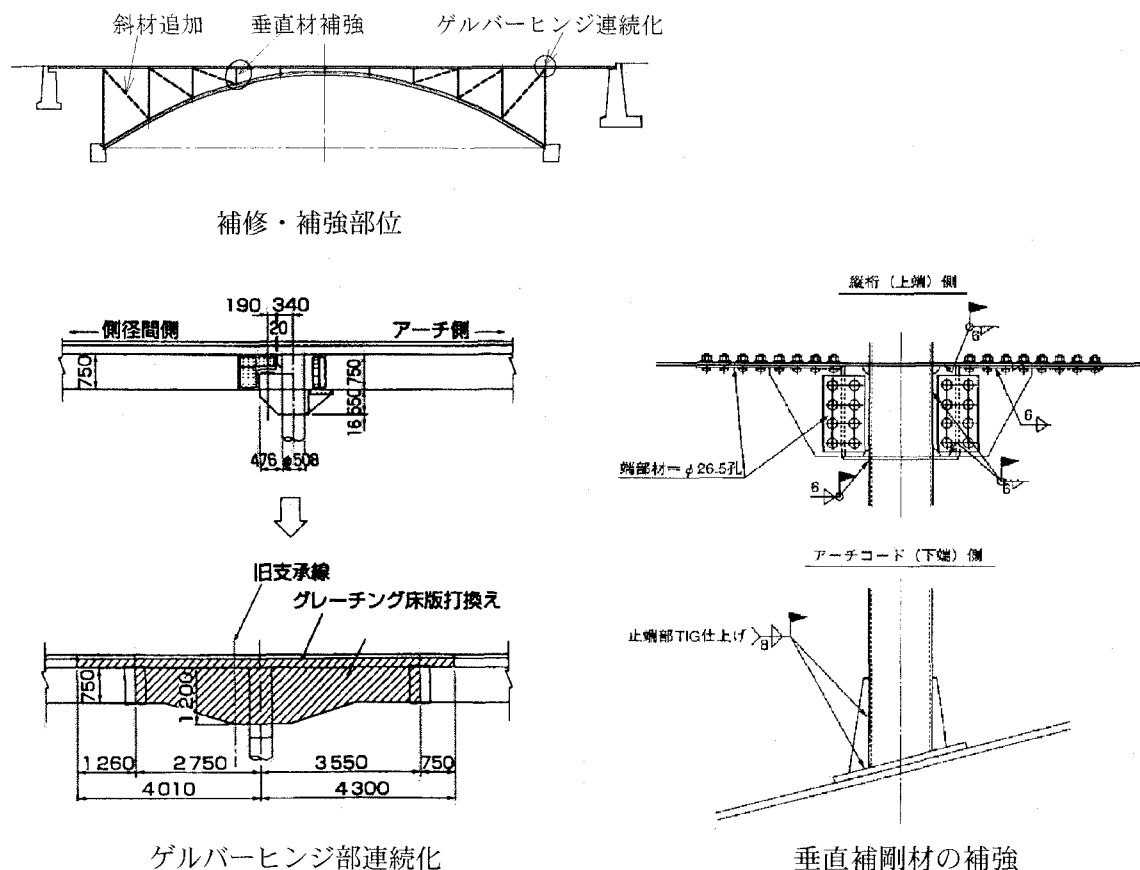
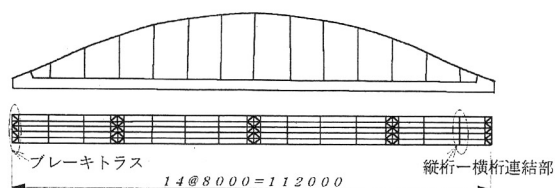
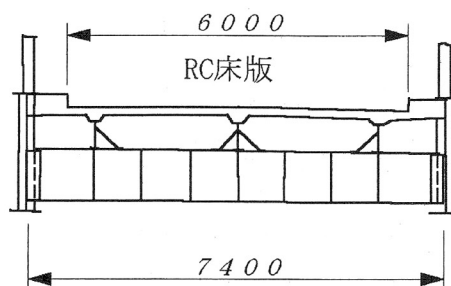


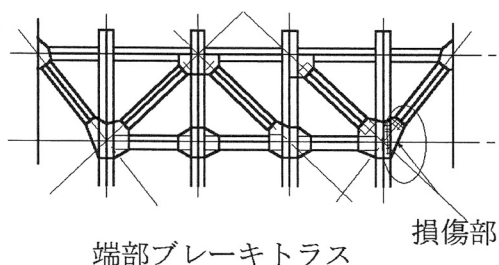
図-9 アーチ橋の補強



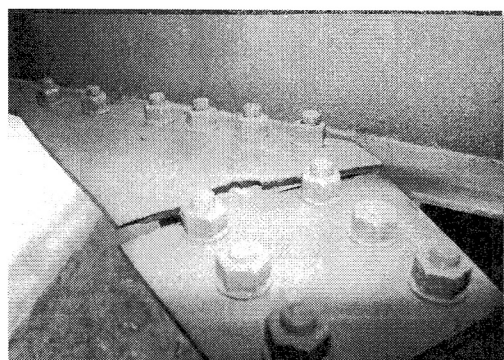
一般図



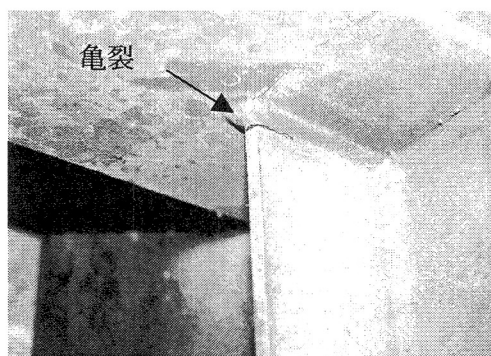
床版取り替え前



床版取り替え後



端部ブレイキトラスの損傷

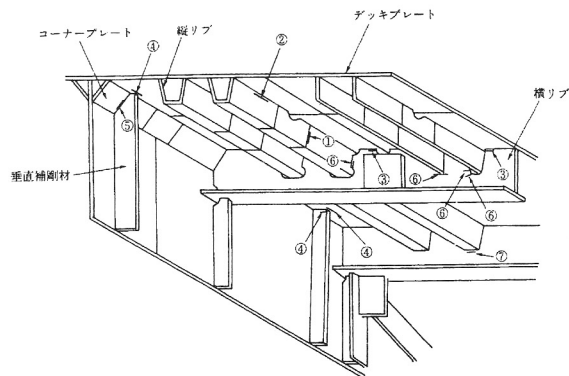


鋼床版連結部の損傷

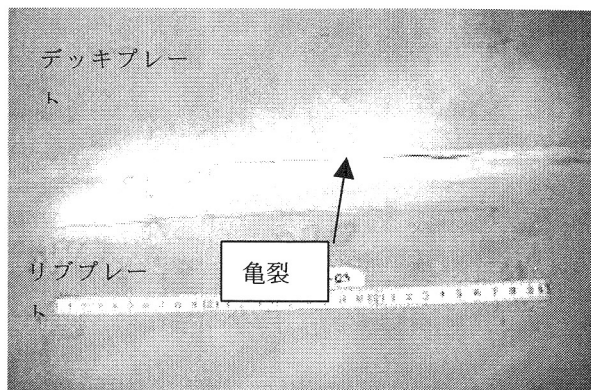
図一 10 床版取り替えアーチ橋の損傷

2-3. 鋼床版の損傷

鋼床版部は直接輪荷重を受ける部位であり、道路橋示方書においても疲労に対する考慮が最も早く取り入れられた。鋼床版における主要な損傷部を図一 11 に示す。従来、多く観察された損傷は、垂直補剛材上端での亀裂 (④)、縦リブ-横リブ交差部の亀裂 (⑥、⑦)、縦リブ溶接部の亀裂 (①)、等であった。しかし、近年、縦リブとデッキプレート間の縦溶接線での亀裂 (②) の発生が報告されている (写真一 2)。従来の亀裂発生箇所は比較的限定された部位であり、点検においても着目部位が比較的明確であった。一方、縦リブとデッキプレートの溶接部においては車輪直下のリブのみに着目するとしても非常に長い溶接線を対象としなければならず、また、これらの亀裂が鋼床版側へ進行する事例もあり、その補修方法については、点検手法を含め今後検討していかなければならない課題であると考えられる¹⁷⁾。



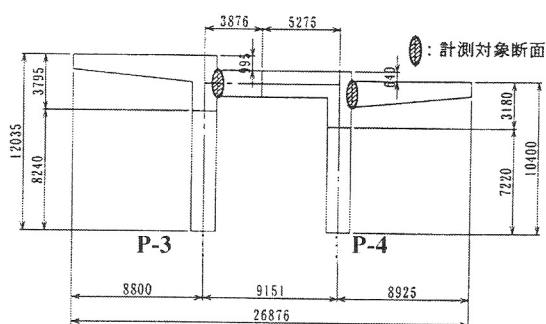
図－１１ 鋼床版亀裂発生部位



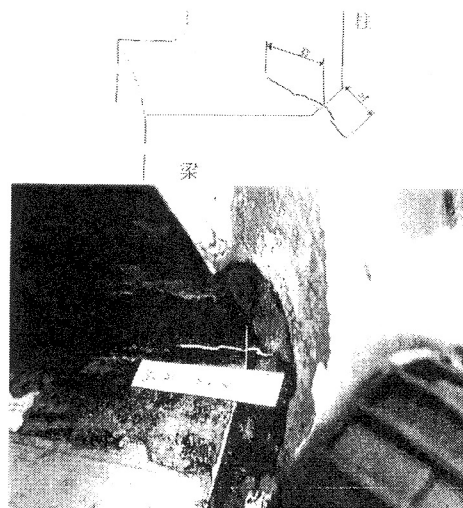
写真－２ デッキプレート，縦リブ溶接線の亀裂(②)

２－４．鋼製橋脚隅角部の損傷

鋼製橋脚の隅角部の損傷は、近年、明らかになった損傷であり、現在その補修補強方法の検討が行われている^{18),19)}。鋼製橋脚の隅角部の損傷は、構造的な冗長性が非常に低い部位の損傷であり重大な損傷と考えられている（図－１２，写真－３）。鋼製橋脚の隅角部は、各々の部材を構成する板が複雑に組み合わせられる部位であり、製作上も種々の板組が採用されている。鋼製橋脚の製作時点においては道路橋に疲労の影響は考慮されていず、板組み合わせ面に対する配慮も十分でなかったため、構造的に最も応力の集中する隅角部に未溶着面が残存しその部位より亀裂を発生したものと考えられる。補修・補強方法としては当て板補強等の補強（写真－６）を施した後、溶接補修を行うことが検討された。鋼製橋脚の継手は十字溶接継手であり未溶着部より発生した亀裂を除去した後、完全溶け込み溶接とすることが計画された。しかし、補修対象の橋脚は昭和５０年以前に製作された橋脚であり、鋼材の成分とくに s 含有量は現在の鋼材と比較し高いものが多く、板厚方向引張試験における絞り値（ ϕ_z ）も低く、溶接補修においてラミネーションを発生する危険性が高いことが明らかとなった（図－１３）。これより、鋼製橋脚の補修溶接の検討に当たっては、補修対象橋脚よりコアを採取しあらかじめ鋼材の z 方向絞り値を計測し溶接性の確認を行うことが推奨されている。



図－１２ 損傷鋼製橋脚例



写真－３ 亀裂発生状況

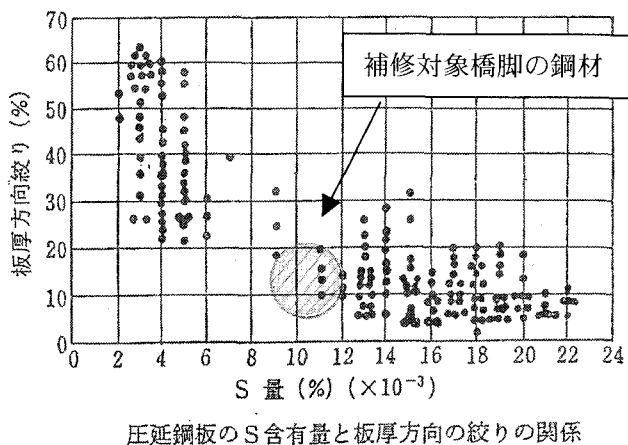
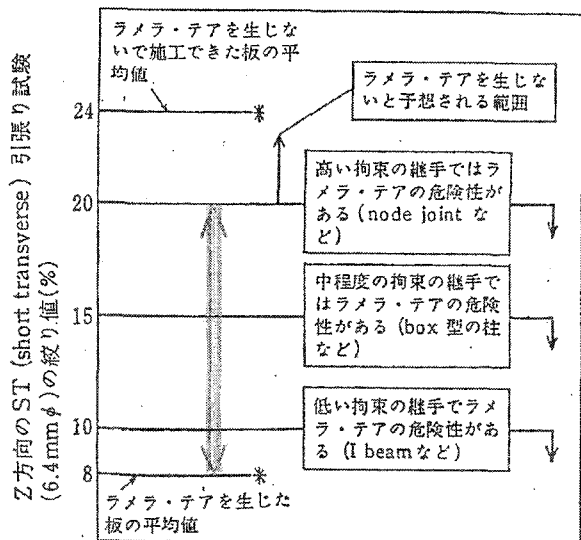


図-13 鋼材の溶接性²⁰⁾



種々の拘束状態の溶接継手においてラメラ・テアを生じないための限界絞り値の提案。降伏応力 40 kg/mm² 以下の鋼に適用 (Welding Institute)

3. 補修・補強に必要な技術

3-1. 調査技術

疲労亀裂は非常に微細なものであり、それらを的確に発見し亀裂の除去を完全に行うことが補修の施工において非常に重要なことである。疲労亀裂は溶接止端部などの表面より入るものばかりでなく、溶接ルート部、未溶着部など内部より亀裂が発生する場合もあり、表面亀裂の状況のみでなく溶接内部の状況も把握しなければならない。このような、亀裂に対する調査・探傷技術は土木技術者にとって比較的なじみのうすい項目であり、とかく検査担当者まかせとなりやすい。補修設計および施工にあたる技術者は、各調査方法の特性をよく理解し損傷状況を的確に把握し、補修工事を進めていく必要がある。以下に代表的な調査手法の施工上の留意点について述べる。

(1) 表面亀裂調査

疲労亀裂は通常、塗膜面の目視調査により塗膜の亀裂、発錆により表面亀裂として発見される。補修の開始に当たっては、その亀裂の寸法、発生位置等を正確に把握することが重要となる。表面亀裂の探傷手法としては、通常浸透探傷検査と磁粉探傷検査の二種が用いられる。現場溶接部の検査においては電源を必要としないなどの機器の手軽さより浸透探傷検査が比較的広く用いられている。しかし、疲労亀裂のように開口幅の狭い亀裂に対して浸透探傷は磁粉探傷検査と比較し探傷精度が劣る²¹⁾。疲労亀裂のように微細な亀裂の確認を行う場合には磁粉探傷検査を用いるのがよい。また、溶接部においてはアング-カットその他の溶接欠陥と亀裂との識別が困難な場合もあり、そのようなときは溶接部を軽く切削し再度探傷するなどの注意も必要である。検査を行う場合には、その検査特性を十分に理解した検査技術者とともに、着目部位を明確にし調査を実施する必要がある。

(2) 超音波探傷調査

損傷内部状況の調査には超音波探傷が用いられる。超音波探傷には種々の手法があるが、橋梁の溶接部検査においては1探触子による斜角探傷が広く用いられている。1探触子による探傷精度は反射源(溶接欠陥その他)の形状に大きく影響され、図-14に示すような完全な平面状の欠陥では探傷面の角度によって反射エコーを1探触子にて捕らえることは困難である。通常、1探触子による斜角探傷を実施する場合には溶接施工時の

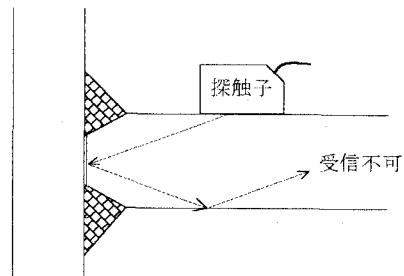
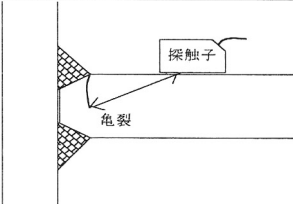
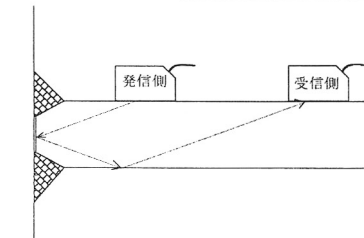
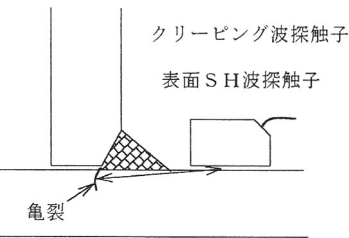


図-14 1探触子法による斜角探傷

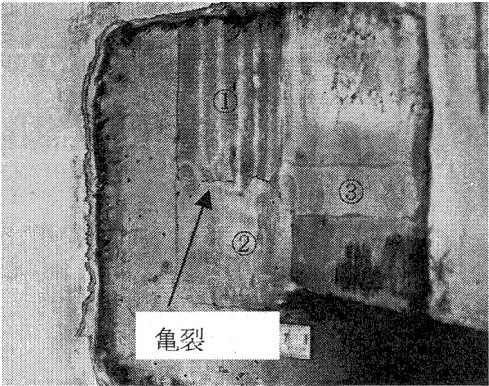
開先情報などをあらかじめ知ることにより、開先形状に応じた探傷角度を設定するなど適正な検査条件を選定し実施する。しかし、既設構造においては溶接開先に対する正確な情報を得ることは困難であり、通常の1探触子法による斜角探傷のみでは、部分溶け込み溶接を完全溶け込み溶接と判定するなど大きな誤りを犯す場合がある。既設構造の探傷においては2探触子法、端部エコー法、表面SH波、クリーピング波^{22),23)}等の方法を組み合わせ用いるなど種々の損傷の可能性を想定した探傷を行うことが必要である。また、同種の調査を多数実施する場合には、直接損傷部を切削調査するなどして超音波探傷技術者と共に探傷結果の確認を行い、探傷要領を作成していくことが重要である。各探傷方法の特徴を取りまとめ表―1に示す。

表―1 超音波探傷法の概要

探傷法	探傷概要	
端部エコー法		亀裂先端部よりの反射エコーを捕まえることにより、亀裂の先端部位置を推定する。亀裂の先端を捕らえるのに熟練した技術が必要とする。
2探触子法		通常の1探触子法においては、探傷角度により平面的な亀裂とか未溶着面の探傷が困難であり、2つの探触子を発信側、受信側として使用することにより、未溶着面の探傷を容易にする。探傷走査に時間を要する。
クリーピング波		表面近くを伝播する縦波であり、表面近傍の亀裂の探傷性能に優れている。試験体中を横波も同時に伝播することより反射源の位置を特定しにくい場合がある。
表面SH波		クリーピング波同様に表面近傍を探傷する方法であるが、探触子より直接横波を発生し表面近傍を探傷する。反射エコーの安定に時間がかかり探触子の走査が困難である。

(3) マクロ、ミクロ組織の調査

疲労亀裂は通常溶接部近傍において発生する。マクロ試験を行うことにより亀裂発生部の溶接状況を明らかにするとともに、亀裂が溶着鋼、母材、ボンド部のいずれに入っているかを確認し損傷原因の推定および補修方法の選定の助けとする。また、ミクロ組織の観察はより詳細に亀裂近傍の金属組織の状況を観察し、割れの位置と性状を確認する目的にて行う。実構造物においては、構造物より試料を直接採取することが困難な場合が多く、スンプ試験にて金属表面のレプリカを採取することが行われる。写真―4は亀裂発生部に対してマクロ組織検査を行った事例であり、マクロ組織検査より亀裂発生部においては①～③の3つの溶接が合わさっており、亀裂は①と②の溶接の境界部に発生していることがわかる。



写真―4 溶接部マクロ調査例

3-2. 補修技術

補修・補強の手段としては、切削、孔明けによる亀裂の除去、HTBによる部材の添加補強、溶接による亀裂補修、部材添加等の方法が用いられる。通常、疲労損傷の補修には切削、孔明けによる亀裂の除去とHTBによる部材の添加補強を組み合わせ実施することが好ましいと考えられる。しかし、HTB補強においては部材設置が空間的に困難である場合が多く、溶接補修が比較的安易に採用される場合が多い。

(1) HTB補修

HTBによる補修は荷重作用下においても比較的安定した施工を行うことが出来る。通常 HTB 接合としては、摩擦接合用の HTB が用いられる。しかし、補修工事においては通常の摩擦接合方式のHTBだけではなく、打込み式高力ボルト、ワンサイドボルトなどの接合手段についても、個々の状況に応じ選定していく必要があるものと考えられる。ワンサイドボルト、打込みボルトの特徴および使用例を以下に示す。

①ワンサイドボルト（写真-5）

- ・閉断面部材にたいして摩擦ボルト接合の適用を可能とする。
- ・ボルトの機構が複雑であり、価格が高い。

②打込みボルト（写真-6）

- ・継手の許容力が通常の摩擦ボルトの1.5倍程度と大きい
- ・既設部材に初期不整があり、摩擦接合としての強度に不安が残る場合においても支圧接合として安定した強度を期待することが出来る。
- ・孔の精度管理が必要であり、打込みに労力を必要とする。

(2) 溶接補修

溶接補修は部材材端寸法の影響などを受けることなく、自由な補修・補強設計を行うことが可能であり、設計者にとっては非常に魅力に富んだ手法と言える。しかし、溶接補修においては施工上あらかじめ考慮しておくべき点が多くある。設計者が考慮すべき諸点を取りまとめ以下に示す。

①補修溶接は実働荷重下での溶接である

- ・脆性破壊、温度応力による亀裂進展の可能性
- ・開先の開口変位による溶接部の割れに対する配慮
- ・圧縮側への溶接施工による変形の増大

②補修溶接は高拘束度下の溶接である

- ・溶接低温割れの可能性
- ・十字溶接部におけるラミネーションの発生

③古材に対する溶接である

- ・鋼材の成分、性能が現在の鋼材とは異なる
- ・溶接施工性の確認を行うことが困難

④現場における溶接である

- ・溶接作業空間、溶接手順、溶接姿勢に配慮した設計
- ・溶接施工管理者の適切な管理
- ・技量の高い溶接工による施工

このように、溶接補修は設計自由度の高い手法ではあるが、その性能を発揮させるためには多くの管理すべき項目があり、施工後においても適切な非破壊検査を行うことが必要である。設計者は、これらの問題点の解決を施工管理者、施工者に任せるのではなく、設計時点より考慮した設計を行うことが、よりよい補修を行う上で重要なことと考えられる。

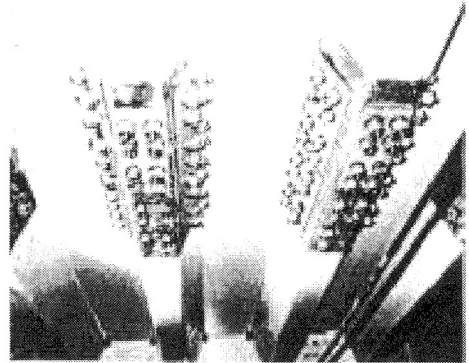


写真-5 ワンサイドボルト
(トラフリブの補強)

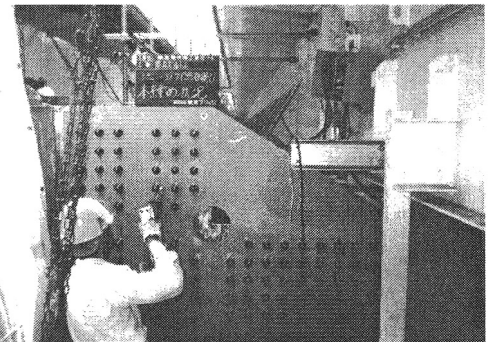


写真-6 打込みボルト
(橋脚隅部当て板補強)

4. あとがき

補修施工の事例を取り上げて、補修施工を行う上での留意点について簡単に述べてきた。補修工事は既設構造物に対しての作業であり、施工環境、施工対象が個々異なるため、その工法、設計の有効性、問題点を一般論として述べることは困難である。補修工事は個々の構造物のおかれている状況を正確に捉え、設計、施工を進める必要があり、それらの業務に携わる技術者は設計、工場製作、検査、現場施工など幅広い知識を身につけるようにしていかなければならないと考えられる。

参考文献

- 1) 西川：道路橋における疲労問題と補修補強 橋梁と基礎、1983.8
- 2) 社団法人 日本道路協会：鋼橋の疲労
- 3) 名取、浅岡、稲田：鋼橋の補修・補強 横河ブリッジ技報 第21号 1992.1
- 4) 寺田・溝口：主桁・対傾構取合部局部応力の検討 横河橋梁技報 No15 1986.1
- 5) 木暮、青山、古閑：合成I桁橋の局部応力に与える縦桁増設の影響 土木学会第45回年次講演会 平成2年9月
- 6) 首都高速道路公団 保全施設部：鋼I桁の疲労損傷に対する点検・補修要領（案） 平成6年5月
- 7) 石井、堀江、新名、貝沼、山田：補修溶接がウェブギャップ部の疲労性状におよぼす影響 構造工学論文集 Vol.45A 1999.3
- 8) 三木、妹尾、森：鋼橋支承部ソールプレート端に生じた疲労損傷と局部応力についての考察 構造工学論文集 vol.36A(1990年3月)
- 9) 中島、青山、坂元、小林、須藤、曾我：鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷（上） 橋梁と基礎 91-5
- 10) 一桙、青山、木暮、鹿野、松本：鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷（下） 橋梁と基礎 91-9
- 11) 館石、名取、三木：プレートガーダー支承部の疲労損傷とそのディテール改良に関する研究 土木学会論文集 No.489/I-27 1994.4
- 12) 前田、幸佐：鋼桁切欠部の疲労試験と評価、阪神高速道路公団技報、第3号、1984.3
- 13) 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領（第1部 鋼構造物）、1990.6
- 14) 松村、千葉、細井、越谷：既設鋼上路式アーチ橋の疲労に対する補強について 日本構造物診断協会 構造物の診断と補修に関する第12回・研究発表会論文集 2000.11
- 15) 西川、松村、大西、細井：山神橋（疲労損傷を受けた上路式鋼アーチ）の補修検討 橋梁と基礎 2001.8
- 16) 稲盛、岩田、越谷、江野澤：鋼上路式アーチ橋の疲労損傷に対する補強工事報告 横河ブリッジグループ技報 第31号 2002.1
- 17) 吉川、伊東、大塚、町田、三木：Uリブを用いた鋼床版の疲労損傷事例 土木学会第57回年次学術講演会
- 18) 森河、下里、三木、市川：箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策 土木学会論文集 No.703/I-59 2002.4
- 19) 三木、市川、坂本、田辺、時田、下里：鋼製箱形断面ラーメン橋脚隅角部の疲労特性 土木学会論文集 No.710/I-60 2002.7
- 20) 佐藤、向井、豊田：溶接工学 理工学社刊
- 21) 三木、深沢、加藤、大畦：表面疲労き裂検出に対する各種非破壊検査の適用性 土木学会論文集 No.386/I-8 1987.10
- 22) 池ヶ谷：SH波用探触子とその応用 非破壊検査第52巻1号 2003年
- 23) 南：溶接部検査用探触子 非破壊検査第52巻1号 2003年