

論文・報告

四ツ木陸橋鋼製橋脚のレトロフィット工事

～梁・柱交差部の当て板補強とき裂処理～

Structural Retrofit Work of Steel Piers at YOTSUGI Overpass

安部 数人 *1
Kazuto ABE勝俣 盛 *2
Mori KATSUMATA山岸 俊一 *3
Toshikazu YAMAGISHI小松 和憲 *4
Kazunori KOMATSU大江 宏司 *5
Hiroschi OOE

東京国道事務所管内には鋼製橋脚の橋梁が11橋あり、2002年度に実施された『鋼製橋脚隅角部の疲労損傷緊急点検』で、四ツ木陸橋を含む7橋でき裂が見つかった。しかし、いずれの損傷とも、緊急対応を要するレベルではないと診断されたため、詳細監視を行ってきた。国土交通省は有識者からなる委員会を設立して、これまで補修・補強対策の必要性和工法の選定を個別に検討してきた。特に、四ツ木陸橋では支点直下ダイヤフラム部など、梁と柱が接合する隅角部以外にもき裂が多数検出されていた。また、き裂部の切削調査の結果から、ラメラテアに起因した損傷も報告されており、通常の隅角補強とは異なる対応が求められた。本工事の主要工種は、支承取替工、隅角補強工、ダイヤフラム補強工、縁端拡幅設置工およびき裂処理であった。本文では、主にき裂調査結果とその処置方法、補強部材の取り付けに関わる問題点と解決策について概説する。

キーワード：隅角補強、ダイヤフラム補強、FEM解析、動ひずみ計測、き裂処理

1. はじめに

都市高速道路の鋼製橋脚隅角部（梁・柱の接合部）外面のエッジに重大なき裂損傷が見つかったのを受けて、2002年度、直轄国道を対象に「鋼製橋脚隅角部の疲労損傷緊急点検」（以下、一斉点検とする）が実施された。この結果、点検橋脚334基に対して125基でき裂模様の報告があった。このとき、東京国道事務所管内の四ツ木陸橋で検出された損傷事例を写真1に示す。

いずれの損傷とも、早急な補修・補強が必要ないレベルと診断され、詳細監視を行い、適当な対策を講ずることになった。これらの追跡点検の結果をもとに、学識経験者からなる「鋼製橋脚隅角部疲労損傷点検結果検討委員会」（以下、つくばWGとする）を設立して、き裂損傷の補修・補強対策の必要性和工法の選定を個別に検討してきた。

東京国道事務所は、つくばWGの助言を受けながら、2006年度より疲労補修工事に着手した。初めて実施した隅角部補強は、管内橋梁補修工事¹⁾において、一般国道4号線・千住大橋(新橋)の円柱断面のT型橋脚であった。なお、この工事で四ツ木陸橋の既設縁端拡幅装置を撤去

している。

本工事は、これの継続工事として、四ツ木陸橋鋼製橋脚の機能回復、長寿命化を目的に、総合評価落札方式による一般競争入札で発注された。主要工種は、き裂調査工、き裂処置工、当て板補強工および耐震補強工であった。また、耐震補強工では、支承取替え時にベースプレートとソールプレートも合わせて取り替えている。

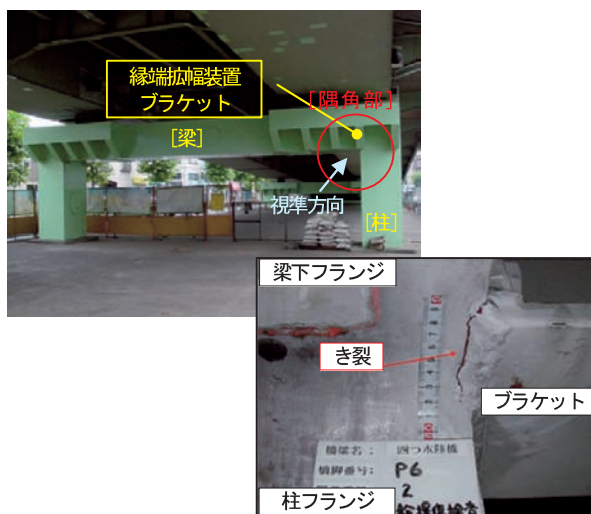


写真1 一斉点検で見つかった隅角部の損傷事例

*1 川田建設(株)保全事業部工事課 係長
*2 川田工業(株)技術研究所 主幹
*3 川田建設(株)保全事業部技術課 課長

*4 川田建設(株)保全事業部技術課
*5 川田建設(株)保全事業部工事課

本文は、このうちき裂調査の結果とき裂処置の方法、および隅角部、支点直下のダイヤフラムの当て板補強工事について概説する。

2. 工事概要

以下に工事概要を示す。

(1) 工事概要

工 事 名：H20 四ツ木陸橋他補修工事
 発 注 者：国土交通省関東地方整備局
 路 線 名：一般国道 6 号線
 工事場所：東京都葛飾区四つ木 4 丁目他
 工 期：2008 年 8 月 26 日～2010 年 1 月 29 日
 施工箇所：P2～P7 橋脚 (図 1)

(2) 橋梁諸元

構造形式：P1 橋脚 RC 門形ラーメン
 P2～P7 橋脚 鋼製門形ラーメン
 完成年月：1967 年 1 月
 適用指針：道路橋示方書・同解説 (1964 年 6 月)
 交 通 量：平日 12 時間 36 611 台
 (大型車混入率 18.5%)
 平日 24 時間 59 871 台

(3) 主要工種

き裂調査工：磁粉探傷検査 404m
 き裂処置工：き裂切削除去 44.7m
 き裂先端除去 588 孔
 当て板補強工：隅角部 24 箇所
 ダイヤフラム 12 箇所
 耐震補強工：支承取替 20 基
 縁端拡幅装置取付け 16 箇所

(4) 施工フロー

橋脚毎の施工手順を図 2 に示す。施工状況は、工種により、上部構造反力あり (Step1～4, Step12～15) と上部構造反力なし (Step5～11) に大別できる。

支点直下のダイヤフラム補強や支承取替は、上部構造をベントで仮受けしなければ施工できない。また、この状態であれば、活荷重による繰返し応力がき裂に作用しないので、切削作業を行っても、脆性破壊を誘発する危険性が低い。

一方、隅角部補強は供用下で施工する。補強材の要求性能は、①隅角部に発生する活荷重重力範囲が 50% 程度以下になること、②レベル 1 地震動に対し健全性を損なわず、レベル 2 地震動に対しては限定的な損傷にとどめることである。このため、反力作用下の施工が合理的である。このとき、補強材と母材の接合は、やせ馬による肌隙が懸念されるため、支圧接合用打込み式高力ボルト[B10T] (以下、打込みボルトとする) を適用する。

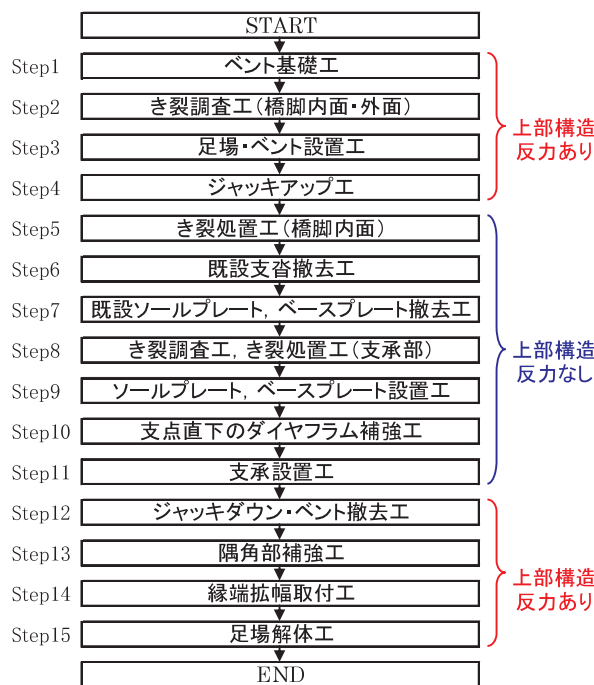


図 2 施工手順

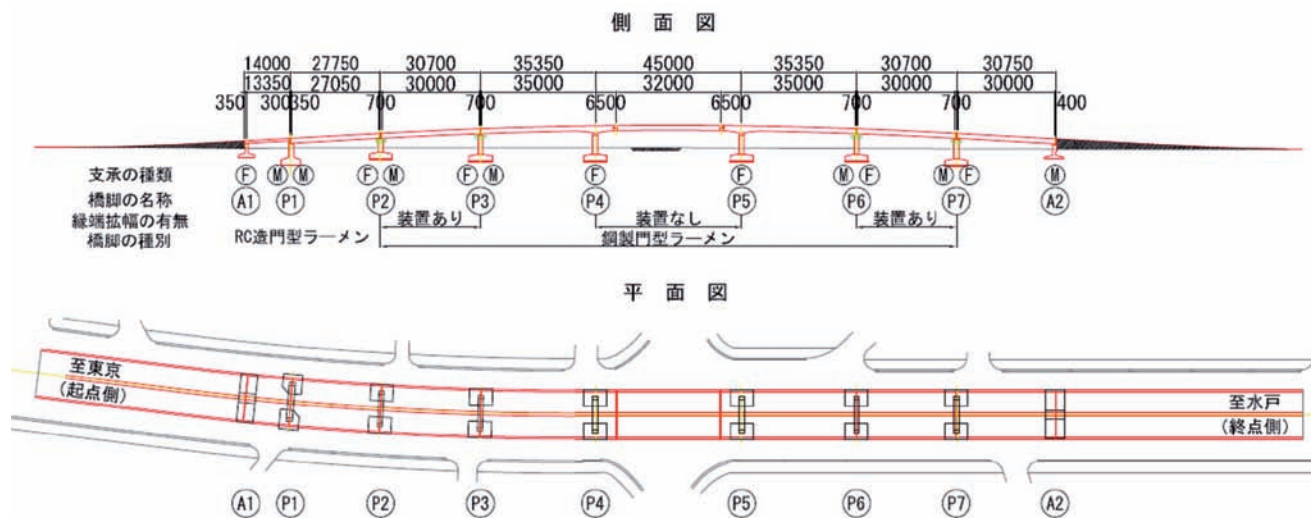


図 1 橋梁一般図

打込みボルトは摩擦ボルトと比較して、せん断耐力が大きいので、ボルト本数を低減できるメリットがある。ただし、この施工方法は予めFEM解析によって、ボルト配置、施工手順およびボルトに過大なせん断力が作用しないことを確認する必要がある²⁾。

3. き裂調査工

(1) 磁粉探傷検査の結果

図3に示した溶接線①～⑥を対象に、進行性き裂の有無を確認するため、磁粉探傷検査を行った。検査は、ブラックライト照射で発光する蛍光磁粉を用いて、湿

式法を適用した。この検査方法は、取り扱いが容易で視認性に優れる³⁾。

損傷事例を写真2に示す。写真中、黄色の指示模様が損傷で、朱色が防錆塗料である。写真2a), b)のき裂部に凹みを見て取れるが、これらは既往詳細点検にてき裂起点を調査した切削跡である。

2004年度の点検結果と比較したところ、隅角部のき裂は延伸がなく、進行性でないことが確認できた。一方、支点直下のダイヤフラム上端部や柱フランジ上端部は、明らかに延伸が認められ、進行性のき裂と判断した。

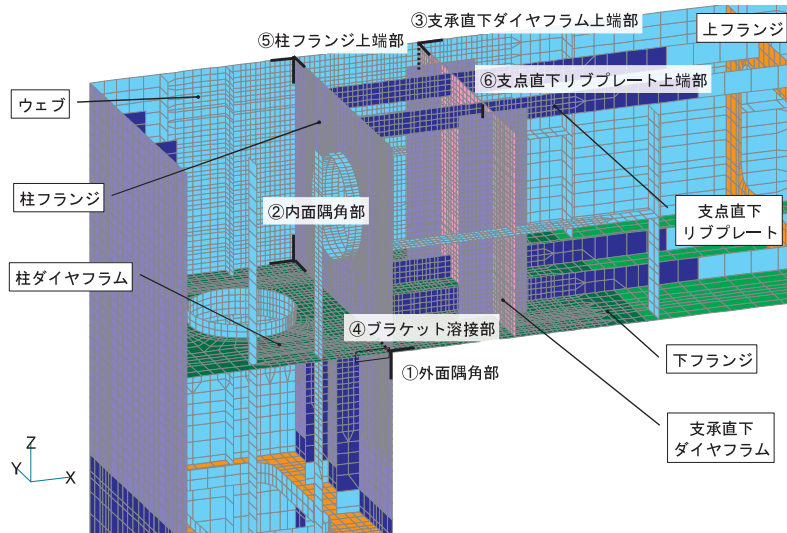


図3 検査対象

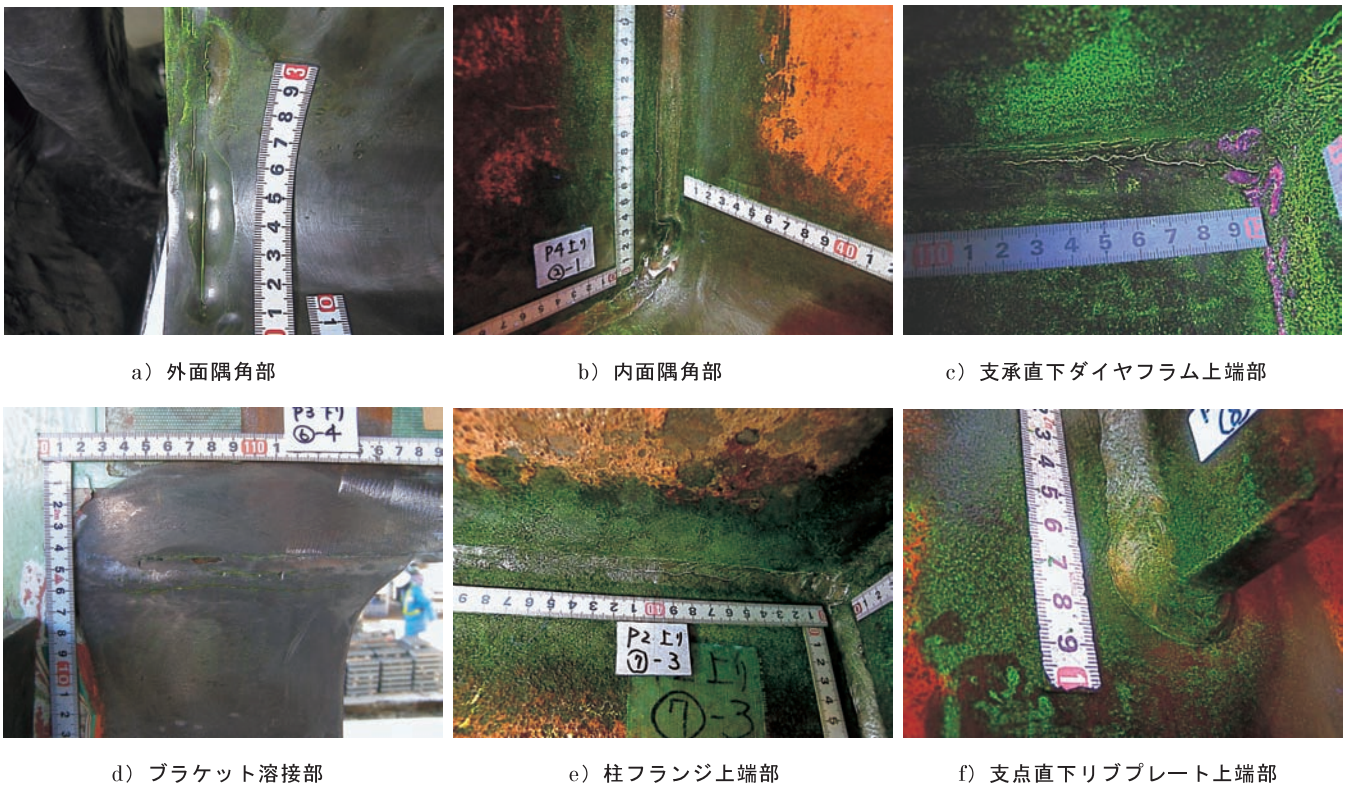


写真2 損傷事例

(2) 損傷部位の考察

a) 内面隅角部

既往詳細調査で実施した、内面隅角の3線溶接交差部を超音波探傷した事例を図4に示す。調査対象は、縁端拡幅装置が取り付けられない橋脚のため、ブラケット溶接の影響がない。

この結果から、ウェブ面のすみ肉溶接部は溶着量が確保されているものの、外面の部分溶込み溶接部は明らかに溶け込み不足である。また、十字継手部はウェブと未溶着であることがわかる。

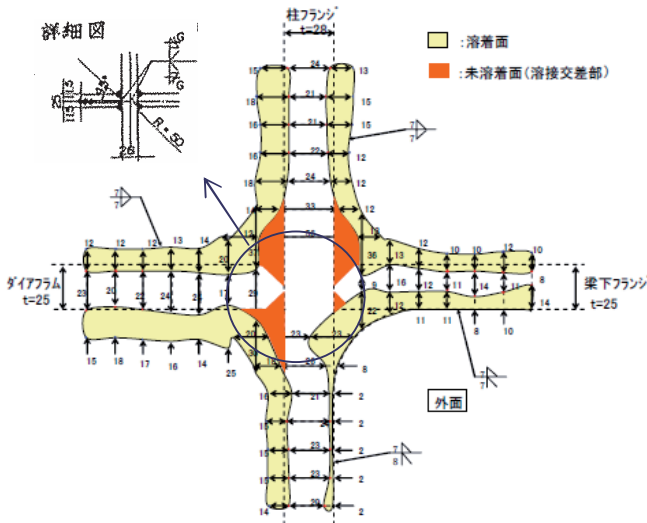


図4 内面隅角部の検査事例

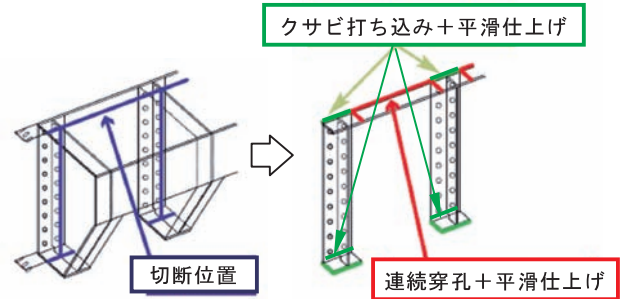
b) ブラケット溶接部

既設の縁端拡幅装置は、1996年度の耐震補強工事に取り付けられたものであった。鋼製ブラケットの上下を部分溶込み溶接、中間部をM22の高力六角ボルト[F10T]で橋脚母材に接合していた。一般的に、継手を併用する場合は溶接に対する拘束を小さくし、また溶接に伴う変形によって滑り耐力が低下しないように、溶接完了後にボルトを締め付ける。この順序で施工すれば、当該部位の残留ひずみが卓越することはない。また、建設年代から推定すると、使用鋼材は硫酸化物の含有量が多く、柱ウェブ面の溶接部はT継手となるため、余熱管理を十分に行わないとラメラテアが懸念される。

2006年度の補修工事で、この装置が撤去された。撤去手順を図5に示す。まず、部材端から約100mm位置でガス切断し、高力ボルトを緩め、次に溶接金属近傍を磁気ボール盤で連続穿孔した。その後、凹凸面をディスクグラインダーで平滑に仕上げた。一方、ブラケット溶接部はクサビを打ち込んで溶接金属を脆性的に破断させた後に、同様に仕上げたようである。

超音波厚さ計(帝通電子;UDM-550)で板厚を計測

したところ、ブラケット溶接跡に指示模様が認められない箇所でもウェブ板厚のおよそ半分でエコー反射が認められた。したがって、柱ウェブの破断面は、T継手下でラメラテアが生じており、クサビ打撃時に脆性破断したと考えられる。



a) ガス切断 b) 切削+平滑仕上げ

図5 縁端拡幅装置の撤去手順

c) その他

溶接部の微細な指示模様は、製作時に発生したと思われる。使用鋼材や当時の溶接技術から、その多くが避けることが困難な表面傷と考える。また、溶接われの検査は、肉眼で行うのが基本である。磁粉探傷検査しなければ検出できない程度の微細な指示模様は、工場製作時に発見できなかったと推察できる。

阪神高速道路の調査研究報告⁴⁾によれば、隅角部端部以外の箇所においては、磁粉指示模様の長さにかかわらず深さ3mm程度以下のものが多く、マイクロ組織試験結果より、粒界割れを確認している。この粒界割れは、溶接熱影響域に有り、また表面直下にも潜在しているなど、典型的な低温割れの特徴を示したもので、疲労に起因するものではないと考察している。

4. き裂処置工

(1) き裂処置箇所の選定

費用対効果、工期から、き裂全数を処置することは適当でなかった。しかし、き裂先端の応力集中箇所を残置することは、当て板補強後にもその伝播が危惧された。そのため、当て板による効果が乏しいき裂損傷を選定した。また、当て板取り付けに伴い、これの背面になり追跡調査が不能になるき裂も含めた。

処置は切削除去⁵⁾を基本に、き裂先端の応力集中箇所を縁切りするき裂先端除去にて対応した。なお、母材に進展したき裂はストップホールを計画したが、対象は無かった。

(2) き裂切削除去

溶接止端などに発生した表面き裂を対象に、切削除去を目的に実施した。

ハンドグラインダーなどの電動工具に超硬カッターや砥石を装着して、き裂端を狙って切削を行った。切削深さは最深2mm程度として、溶接ゲージを用いて深さ管理しながら、0.5mm毎に磁粉探傷検査を行い、指示模様の有無を判定した。なお、切削部の状態を確認するため、必要に応じてマクロ試験も行った。

一般的に、き裂外観から、それが表面き裂であることを判定することは困難である。しかし、**図6**に示すように、表面き裂破面は半楕円であり、深くなるに伴い外観長が短くなる。したがって、き裂端を切削して外観長が短くなれば、表面き裂の可能性が高い。また、切削深さ2mm程度であれば、溶接熱影響部と考えられる。さらに、マクロ試験を併用することで追加切削の是非をわかりやすく判断できた。

き裂切削除去前後の事例を**写真3**に示す。いずれも磁粉探傷検査の状況である。切削前は溶接棒継ぎ部の止端に指示模様が見て取れる。熱影響に沿って伝播しており、切削により除去できたのは深さ2.5mmであった。この時のマクロ試験の結果を**写真3b)**に示す。母材到達前の熱影響部で除去できたことがわかる。

なお、外観長が切削に伴い延伸するようであれば、直ちに切削を中止して、き裂先端除去に移行した。

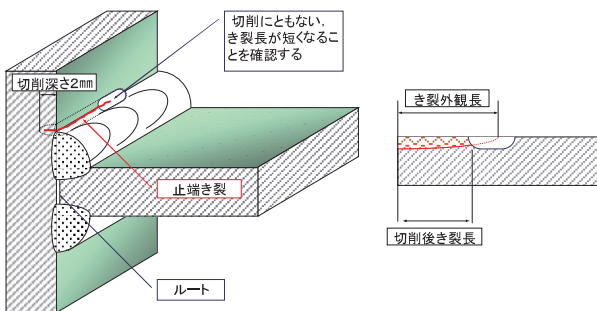


図6 切削除去の要領

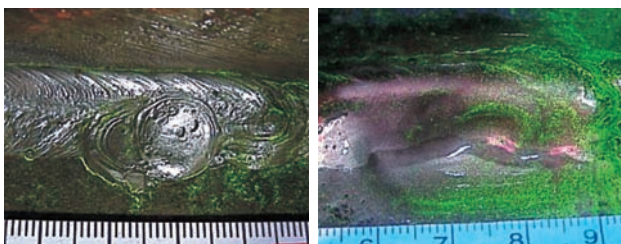


写真3 き裂切削除去の事例

(3) き裂先端除去

ルートを起点にのど断面を貫通して、溶接金属を破断する方向に進展するルートき裂を対象に、き裂進展方向の応力集中箇所を除去する目的で、き裂先端を切削除去した。

ハンドグラインダーなどの電動工具に超硬カッター

や砥石を装着して、外観的なき裂端から50mm離れた位置の溶接金属をルート露出まで切削した。次に、き裂伝播方向の溶接金属壁面に指示模様が残存しないことを磁粉探傷検査で確認した。進行方向の壁面に指示模様がなくなるまでこれを繰り返した。このとき、溶接金属の壁面が曲面であると、着目部に溶接金属の薄皮が残る、指示模様と疑似模様の判別が困難になる。模様判定を容易にするため、壁面を直角にするのがよい。

図7に示すように、ルートき裂は表面き裂とは逆に、外観長よりもルート起点側が長い。したがって、き裂端から離れた位置を切削しなければ、壁面にき裂が残存して、応力集中箇所を除去したことにならないので注意が必要である。

3線溶接交差部を起点に伝播した事例を**写真4**に示す。起点側の壁面に指示模様が残存するが、伝搬側の壁面には模様がない。これより、き裂先端の応力集中箇所が除去できたといえる。

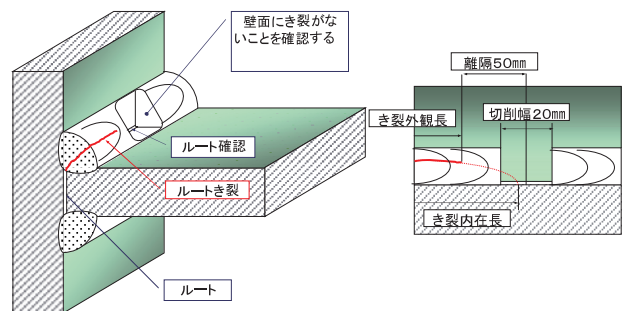


図7 先端除去の要領

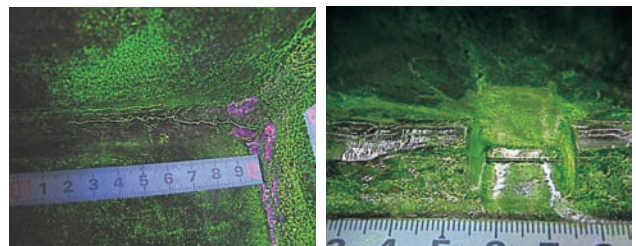


写真4 き裂先端除去の事例

5. 当て板補強工

(1) 隅角部

a) Δゾーン

一般的に、隅角部の補強は、当て板と併用してスカラップを設置することでき裂伝播を予防する。しかし、**図4**からわかるとおり、本橋脚のΔゾーンには、大きな不溶着が内在する可能性が高かった。また、縁端拡幅装置のブラケット溶接跡はラメラテアで剥離状に割れているのが明らかだった。

したがって、当該部位にスカラップを設置するため

には、これらのわれを完全に切削除去しなければならなかった。結果として母材に相応な開口を設けることになり、維持管理上好ましくない。このため、当て板に観察窓を設けて経過観察を継続することとした。

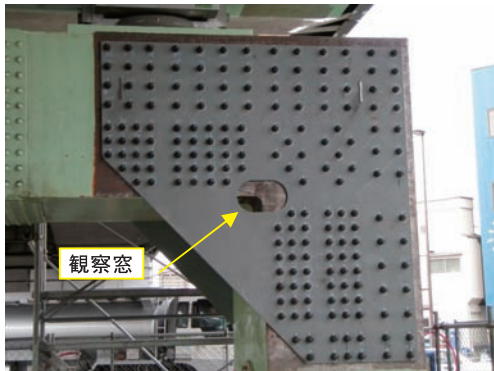


写真5 当て板補強後の外観（縁端拡幅装置なし）

b) 打込みボルト

隅角部の当て板は、打込みボルトで母材と接合する。一般的に、ボルト頭をハンマーで叩き、母材に密着するまで完全に打ち込む。摩擦が切れてから支圧に移行するため、導入軸力の管理が必要である。ナット部塗装の暴露環境を考慮すると、橋脚内から締結するのがよい。しかし、ボルト孔は工場製作の当て板を基準に、橋脚外から母材にM22[B10T]孔を当てもむ。一方、既設ボルト孔M22[F10T]も利用するため、橋脚内からM24[B10T]に拡孔しなければならない。また、このボルト施工は、ボルト1本毎に“当てもみ→打込み→一次締め→本締め”を繰り返すことから、橋脚外からの締結に統一した。狭隘部での煩雑な作業であり、一日当たりの施工数量は、当てもみから本締めまで、作業員3人で30本/日程度であった。

施工に際しては、当て板のシワ寄り防止とせん断力が均一に作用するように、ボルトを同心円状に順次締結する。施工途中で、過大なせん断力が作用しないことをFEM解析により、予め確認しておく必要がある。施工順序は、1日当たりの計画数量を考慮して、図8のとおり6回に分けた。

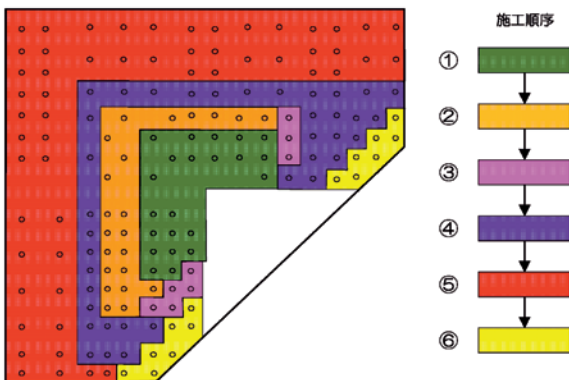


図8 打込みボルトの施工順序

打込みボルト打撃時は相応の騒音が伴う。このため、沿道住民や道路利用者に配慮して、無騒音打込み治具（ニチワ；たたかんゾー、写真6）を採用した。しかしながら、反力がとれない、治具が納まらないなどの理由により、治具適用箇所は施工数量3 976本に対して3割程度に留まった。



写真6 無騒音打ち込み治具と打込みボルト

c) 動ひずみ計測

FEM解析の整合性を検証するため、図8に示した施工順序毎に動ひずみを計測した。計測箇所を図9に示す。計測は、大型車両が単独走行する裁荷状態時を狙って実施した。これを、支間満載になるように乗じて、発生応力を推定した。

この結果、せん断力最大になる施工順序でも、ボルト近傍には過大なひずみが発生しないことを確認した。また、当て板補強後は、隅角母材のひずみが6割以上低減しており、その効果も確認できた。なお、観察窓のコバに比較的大きなひずみが発生するが、予め弱点になる可能性をFEM解析により把握していたので、製作時に機械傷等が残存しないように注意した。

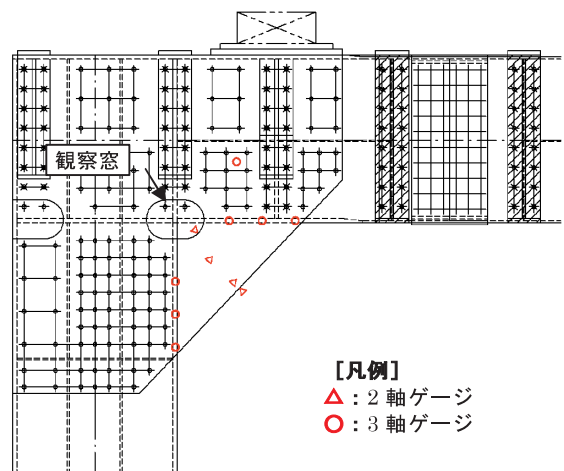


図9 動ひずみ計測箇所

(2) ダイヤフラム

支点直下のダイヤフラムと（板厚22mm）と横梁上フ

レンジ（板厚25mm, 36mm）は脚長6mm（実寸12mm程度）のすみ肉溶接で接合されていた。この部位は垂直補剛材（板厚28mm, 25mm）も配置されている。首都高速道路の鋼製橋脚⁶⁾とは異なり、リブプレートがダイヤフラムで不連続となるため、交差部にはスカラップがない。

溶接補修は、狭隘部での上向き姿勢で、完全溶け込み溶接が要求される。当時の鋼材は硫黄酸化物の含有量が多く、完全溶け込み溶接の品質管理が難しい。このため、ダイヤフラム上フランジ垂直補剛材の3線溶接交差部の損傷は、溶接ではなく当て板で補強した。

支取替えに伴い、ベースプレート、ソールプレートも取り替えた。このため、上面接合はベースプレート母材-当て板を重ねてボルト締結した。また、側面接合は当て板-ダイヤフラム-当て板、あるいは当て板-垂直補剛材-当て板を重ねて締結した。このため、組み付け精度、部材製作精度の向上から、当て板は3面拘束部材から2面拘束部材の組合せに変更した（**図10**）。その際、狭隘部での穿孔精度確保が困難であることから、接合には打込みボルトではなく、トルシア形高力ボルト[S10T]を採用した。なお、実寸大の模型を製作して、施工場所に取り込むなど、可搬性、作業性を考慮して寸法、形状を決定した（**写真7,8**）。

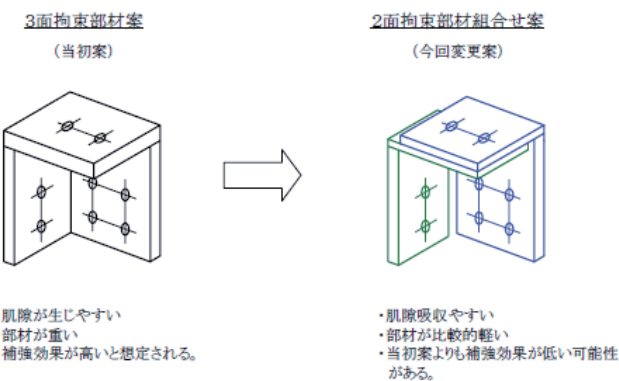
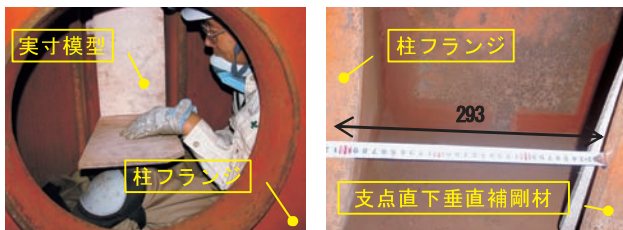


図10 支点直下ダイヤフラムの当て板



a) 部材搬入試験

b) クリアランス

写真7 構成部材と設置場所

5. まとめ

鋼製橋脚の疲労補修は、既に特別な工事ではなくなった。しかし、き裂損傷を個別に考察、処置しなければならず煩雑な作業が伴う。ともすれば、損傷を助長あるいは誘発しかねない。今後、同種工事を計画する際になどに、

本報告が一助になれば幸いである。

謝辞：快適職場推進計画認定事業として、無事故無災害で竣工を迎えることができました。ひとえに、国土技術政策総合研究所、東京国道事務所および亀有出張所の皆様のご指導の賜として深く感謝致します。

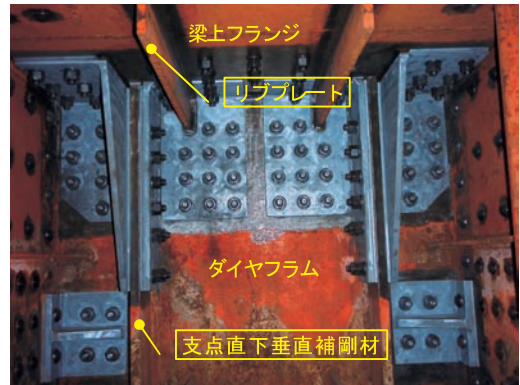


写真8 支点直下ダイヤフラムの補強（当て板；グレー板）



写真9 本工事完了後の外観（2010年2月撮影）

参考文献

- 1) 前島, 安部, 小林: 鋼製橋脚疲労き裂対策の隅角部補強工事, 川田技報, Vol.27, 2008.
- 2) 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, 177-183, 2002.4.
- 3) 国土交通省道路局国道課: 鋼製橋脚隅角部の疲労損傷臨時点検要領, 2002.5.
- 4) 阪神高速道路(株)・鋼製橋脚隅角部に関する調査研究委員会: 阪神高速道路の鋼製橋脚隅角部損傷, 2002年度調査研究報告書
- 5) 首都高速道路(株)・鋼製橋脚補修検討委員会: 鋼製橋脚補修検討委員会報告書, 2004.3.
- 6) 穴見, 溝江, 八木, 梶原: 鋼製橋脚横梁支点直下ダイヤフラムの疲労損傷に対する補修・補強検討, 構造工学論文集, Vol.53A, 2007.3.