

鋼床版箱桁橋の垂直補剛材まわし溶接部のき裂 に対するICR処理の試験施工と追跡調査結果

長谷川秀也¹・瀬谷千恵²

¹名古屋高速道路公社 整備部企画整備課（〒453-0804 名古屋市中村区黄金通7丁目28-1）

²名古屋高速道路公社 経営企画部企画課（〒462-0844 名古屋市中村区清水4丁目17-30）

名古屋高速道路では、鋼床版箱桁橋の垂直補剛材まわし溶接部のき裂への対策として、疲労き裂の近傍の母材を叩いて疲労き裂の表面を閉口することにより疲労寿命を向上させる工法(衝撃き裂閉口処理:ICR処理)に着目し、ICR処理の現場適用性およびき裂の補修効果の確認を目的とした試験施工を実施した。その試験施工から2年経過後の追跡調査によって得られた結果および知見について報告する。

キーワード：ICR処理、鋼床版、疲労き裂、疲労寿命向上、試験施工

1. はじめに

鋼床版はRC床版と比較して重量が軽いことから、都市内高架橋や長大スパンの鋼橋で多く用いられている。名古屋高速道路(以下、名高速)でも昭和54年の第一期供用から鋼床版箱桁橋を採用しており、高架橋全延長の74.9kmのうち30%以上を占めている。

近年、鋼床版構造においては多数の疲労損傷事例が報告され、全国的な問題となっている。名高速においても同様の損傷が点検で確認されており、その中でも垂直補剛材とデッキプレートのまわし溶接部に発生するき裂(以下、タイプⅠき裂)が最も多く、名高速で確認されている305箇所の子裂のうち、124箇所を占めている(平成26年3月時点)。この損傷は発生しても直ちに落橋に繋がる恐れはないが、疲労き裂が進展し、デッキプレートを貫通すれば、舗装の割れや段差を引き起こし、道路交通に多大な被害を与える可能性がある。今後も同じような構造部位から疲労き裂が発生することが十分に考えられるので、それらを低コストで簡易に補修できる合理的な方法が望まれる。

名高速では、低コストで比較的容易に施工が可能である衝撃き裂閉口処理(Impact Crack Closure Retrofit Treatment, 以下、ICR処理)^{1)~10)}に着目し、ICR処理の現場適用性の検討およびき裂の補修効果の確認を目的とし、ICR処理の試験施工を実施した。

本稿では、その試験施工から2年経過後のICR処理の効果確認を目的とした追跡調査によって得られた結果お

よび知見について報告するものである。

2. ICR処理の原理

ICR処理は、図-1および図-2に示すように、発生した疲労き裂近傍の母材を叩き、開口部を塑性流動させて疲労き裂の表面を閉口させることで延命化を図る工法である。溶接止端に発生した疲労き裂に対しては、き裂の前面の母材を叩いてき裂を閉口させる。

ICR処理による延命効果の原理は、疲労き裂の表面に塑性変形を与えて載荷荷重によっても開かない程度に閉口させることで、破壊力学で定義されるき裂先端の応力拡大係数範囲 ΔK が小さくなり、疲労き裂の進展が遅延されるため、疲労寿命が向上することにある。

破壊力学を用いた疲労き裂進展速度は式(1a)、図-2に示す開口したき裂を考えた場合の応力拡大係数は式(1b)で表現される。

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m \right) \quad (1a)$$

$$\Delta K = F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1b)$$

ここで、 C 、 m は材料定数、 ΔK_{th} は疲労き裂進展速度の閾値、 F は補正係数、 $\Delta \sigma$ は作用応力範囲(MPa)を示す。応力拡大係数範囲を低減させれば、式(1b)の m 乗に逆比例して疲労き裂進展寿命 N_p が長くなる。さらに、 ΔK を ΔK_{th} 以下にすることができれば、き裂進展を停留させる

ことも可能になる。

また、き裂が発生していない場合は、ICR処理面とその近傍に圧縮残留応力を導入することで、疲労強度を向上させる効果がある。

3. ICR処理の追跡調査

(1) 対象橋梁の諸元

今回の追跡調査対象とした橋梁は、小牧線下り3径間連続鋼床版箱桁の側径間部の小89～小90間である。この橋梁の諸元等を表-1、一般図を図-3、断面図を図-4に示す。断面図に示すように、垂直補剛材直上付近が輪荷重

載荷位置である。

この区間の交通状況は、平成22年度センサスより、上下4車線の24時間の断面交通量が41,211台/日、大型車混入率は21.7%である。

(2) 過年度における点検結果および対策経緯

今回の追跡調査対象の垂直補剛材29箇所のうち10箇所において、平成20年度の初回点検でタイプⅠき裂が発見

表-1 橋梁諸元等

形 式	3径間連続鋼床版箱桁
橋 長	320.0m
支間長	80.5m+123.5m+116.0m
橋 幅	10.0m
舗 装	アスファルト舗装 (t=8cm)
デッキプレート	SM490YA, SM570 (t=12～23mm)
供用年月	平成13年10月
適用基準	道路橋示方書(平成6年2月), 鋼構造物設計基準(名古屋高速道路公社 平成7年10月)

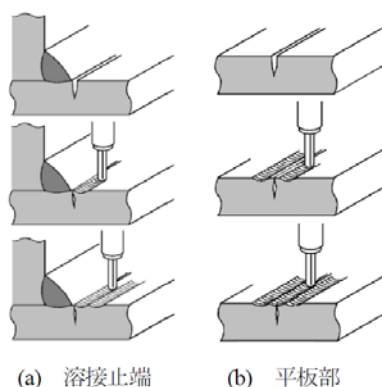


図-1 ICR処理の手順



図-2 表面き裂をICR処理によって内部き裂とみなす概念図

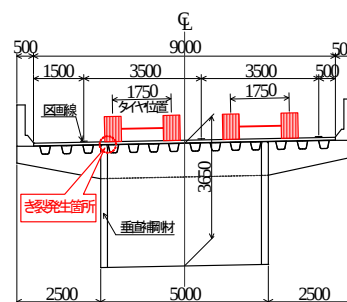
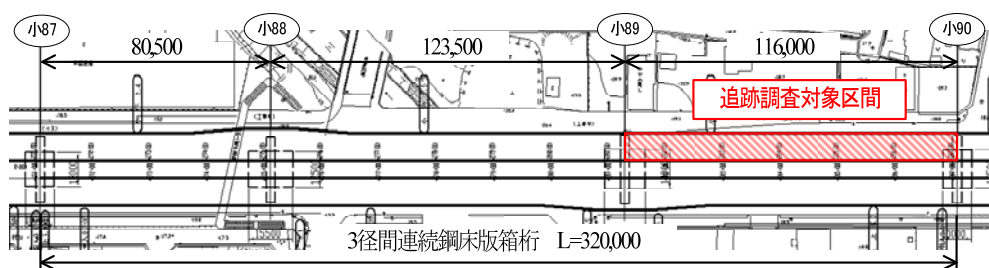
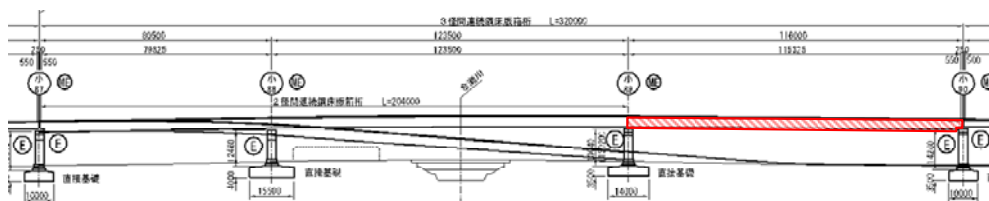


図-4 断面図



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-3 対象橋梁の一般図

された。対象橋梁の垂直補剛材の部材の形状は図-5に示すとおり、板幅×板厚の寸法が200×16と250×20の2種類あり、いずれもその上端の板幅はUリブとの取り合いから180mmとなるようカットされ、デッキとの溶接のサイズはそれぞれ4mm、6mmである。き裂の発生はいずれの形状でも確認された。

平成22年に疲労き裂の進展抑制および予防保全を目的とし、垂直補剛材29箇所中28箇所に $R=50\text{mm}$ の半円孔を設けた¹¹⁾が、その後の追跡調査でき裂の進展が確認されたため、平成24年12月に追加対策としてICR処理の試験施工を実施した。なお、ICR処理直前の磁粉探傷試験による調査では、垂直補剛材29箇所中17箇所でき裂の発生を確認した。

き裂の発生状況は、き裂が垂直補剛材側溶接止端部から発生し、き裂先端が溶接ビード内に留まっている段階(以下、 N_{vb})が2箇所、き裂が垂直補剛材側溶接止端部から発生し、デッキプレートに5～17mm進展した段階(以下、 N_{vd})が5箇所、き裂がデッキプレート側溶接止端部から発生し、まわし溶接部止端からデッキプレートに進展し始める前もしくは数mm程度進展し始めた段階(以下、 N_{db})が2箇所、 N_{db} が更に進展して溶接止端から5～26mm進展した段階(以下、 N_{dd})が8箇所、き裂が発生していない段階(以下、 N_0)が12箇所であった。

(3) ICR処理の施工手順

N_{vb} 、 N_{db} 、 N_0 の段階の垂直補剛材に対しては、図-6(a)に示すようにまわし溶接部止端に沿ってICR処理を行った(以下、 $N_{vb}+ICR$ 、 $N_{db}+ICR$ 、 N_0+ICR)。

N_{vd} 、 N_{dd} 程度のき裂の大きさに対しては、図-6(b)のようにデッキプレートに進展したき裂を①～③の順に処理し、その後まわし溶接止端に対して④の処理を行った(以下、 $N_{vd}+ICR$ 、 $N_{dd}+ICR$)。なお、垂直補剛材止端部から発生した N_{vb} 、 N_{vd} の垂直補剛材コバ面や溶接ビード部のき裂に対しては、ICR処理を施していない。

溶接止端に沿ったき裂に対しては、き裂先端から溶接止端に沿って50mm先まで、デッキプレートへ進展したき裂に対しては、き裂先端からき裂進展方向へ20mm先までICR処理を行った。

品質管理基準を、き裂から2.0mm離れの位置でのICR

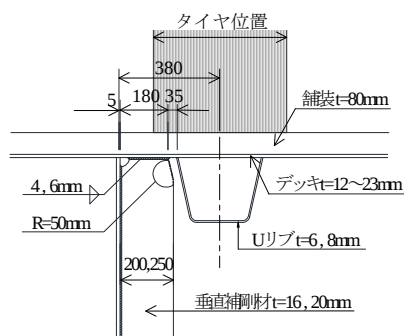


図-5 部材寸法

処理による凹み量が0.10mm以上かつ仕上がり面が均一であることとし¹⁰⁾、それを満たすよう施工した。 N_{dd} に対してICR処理を施した状態を図-7に示す。鋼材が凹んでいる部分がICR処理で叩いた範囲である。

(4) ICR処理後の追跡調査

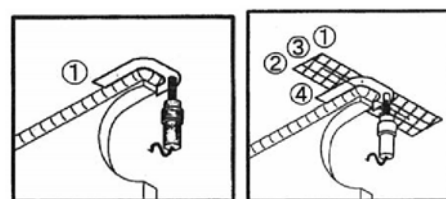
ICR処理の試験施工から2年後の平成26年12月に追跡調査を実施した。

き裂進展の遅延効果を確認するため、進展調査を実施することとした。また、ICR処理の特長は、十分な圧縮残留応力を与え、き裂を閉口させることによる応力拡大係数の低減であることから、ICR処理により閉じたき裂の再開口にも着目した。

き裂の検出は浸透探傷試験(以下、PT)を基本として実施することとしたが、ICR処理による鋼材表面の凹凸でき裂検出の精度に影響を及ぼす可能性があることから、PTの有効性を検証するため、更に磁粉探傷試験(以下、MT)とひずみ測定を実施した。調査内容と調査位置を図-8に示す。なお、予防保全を目的にICR処理を実施した垂直補剛材No.9、No.23～No.29については、PTおよびMTとは別に、き裂検出材により目視確認を行った。

a) PTおよびMT結果

PTおよびMTの調査結果の一例として、垂直補剛材No.16($N_{dd}+ICR$)の調査でき裂の指示模様が検出された範囲を、比較のためICR処理前のMTにより検出されたき裂長と2年経過後の調査により検出されたき裂の指示模様の範囲を重ね、図-9および図-10に示す。2年経過後のMTで、まわし溶接の止端とデッキ部表面にき裂の指示模様が検出された。指示模様が明瞭に現れている範囲は、ICR処理により閉口したき裂の部分で、内在しているき裂を検出しているか、き裂が再開口している可能性が考えられる。また、図-9“a”部では、終点側のまわし溶接部止端に沿って、ICR処理前では確認されていない範囲で指示模様が検出されたが、この範囲はMTの指示模様



(a) N_{vb} 、 N_{db} 、 N_0 (b) N_{vd} 、 N_{dd}

図-6 ICR処理の施工順序³⁾



(a) ICR処理前 (b) ICR処理後

図-7 ICR処理前後の状態

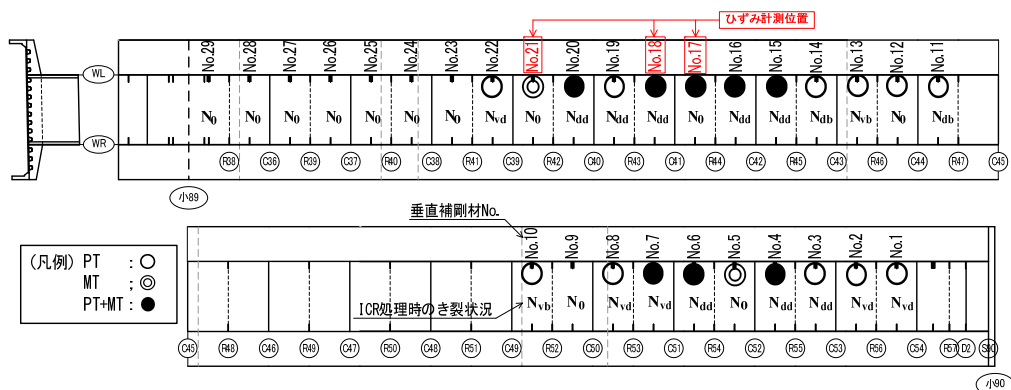


図-8 追跡調査位置図

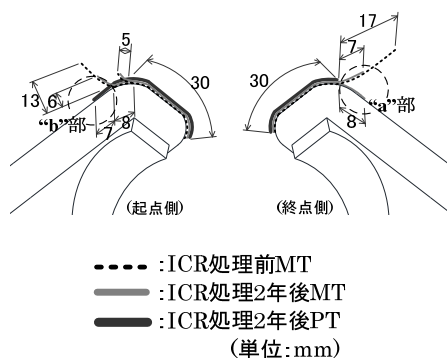


図-9 垂直補剛材No. 16 ($N_{db}+ICR$) 調査結果

が明確ではなく、PTによるき裂の検出もないことから、一概にき裂の進展と判断しづらく、ICR処理によって生じた表面の凹凸部に磁粉が集中することで検出した疑似模様の可能性も考えられる。

図-9“b”部では、まわし溶接の止端に沿ってPTでき裂を検出した。起点側のまわし溶接止端では、ICR処理前のMTではき裂が確認されていない範囲で指示模様が検出された。この範囲はMTの指示模様は検出されていないことから、溶接止端の凹凸やICR処理により生じた凹凸に浸透液が入り検出された可能性が考えられる。

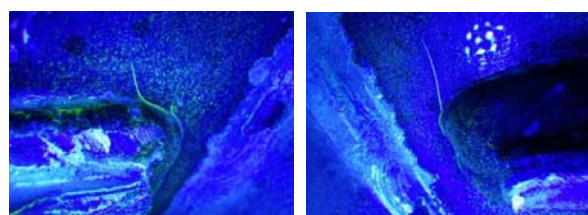
以上のPTおよびMTの結果を総合的にみて、垂直補剛材No.16($N_{db}+ICR$)は、ICR処理前からのき裂の進展はなく、まわし溶接部でき裂の一部が再開口しているが、デッキ部表面におけるき裂の再開口はないと推測される。

PTおよびMTの比較から、き裂の進展や再開口はPTを基本とすることで概ね判断できると考えられる。しかし、き裂が進展した際や指示模様が不明瞭な場合には、MTも適用し判断することが望ましい。

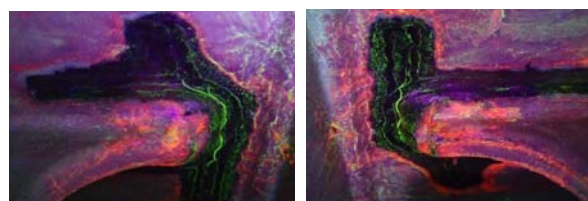
b) ひずみ測定

測定の対象箇所は垂直補剛材No.17, No.18, No.21とした。

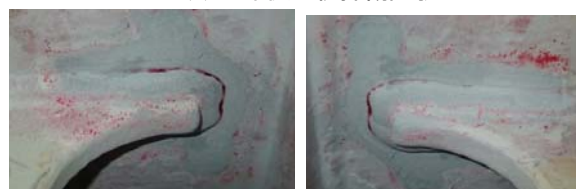
過年度においてICR処理前後で応力伝達の回復を確認するため、き裂のないNo.17(N_0)とき裂があるNo.18(N_{db})を選定し測定結果を比較したが、ICR処理から2年経過後にNo.17(N_0+ICR)でき裂が検出されたため、今回の測



(起点側) (終点側)
(a) ICR処理前磁粉探傷試験



(起点側) (終点側)
(b) 2年後磁粉探傷試験



(起点側) (終点側)
(c) 2年後浸透探傷試験

図-10 垂直補剛材No. 16 ($N_{db}+ICR$) 調査写真

定ではき裂のないNo.21(N_0+ICR)をあらたに選定し、比較対象とした。3箇所の計測位置は最大で11.6m離れているが、対象区間は直線なので、大型車のタイヤはほぼ同じ位置を通過すると考えられる。

き裂の再開口を検証するため、ICR処理から2年経過後の大型車の走行によって生じるひずみの変動を計測し、ICR処理前後の計測結果と比較した。ひずみゲージの貼り付け位置および方向は、図-11に示すまわし溶接部止端から5mm離れた橋軸直角方向とし、測定にはゲージ長1mmの単軸ひずみゲージと動ひずみ測定器を用いた。サンプリング速度は200Hzとし、通過荷重に対して30分程

度計測を行った。

なお、垂直補剛材No.18($N_{dd}+ICR$)のPTおよびMT調査結果は、両調査でまわし溶接部にき裂の指示模様が検出された。

c) ひずみ測定結果

大型車の通過交通によってまわし溶接止端から5mmの位置に生じるひずみ波形の一例を図-12に示す。No.17, No.18, No.21は計測位置が離れているため、図では前輪が通過した際の時間を合わせてひずみ波形を示している。

No.18(N_{dd})では、ICR処理前は前後輪が通過する際に引張ひずみが発生しているが、ICR処理直後のNo.18($N_{dd}+ICR$)では前輪が通過する際に引張ひずみ、後輪が通過する際に圧縮ひずみが発生し、 N_0+ICR と同様の波形に回復している。これは、ICR処理によりき裂表面が閉口し圧縮残留応力が導入されたことで、ひずみが伝達されるようになったと考えられる³⁾。

ICR処理2年経過後の結果は、No.18($N_{dd}+ICR$)のひずみ波形が、前後輪が通過する際に引張ひずみが発生しており、ICR処理前のひずみ伝達状態に戻りつつある。このことから、No.18($N_{dd}+ICR$)は、再開口していると考えられる。

(5) 追跡調査結果のまとめと考察

PT, MT, ひずみ計測の結果を総合すると、PT, MT

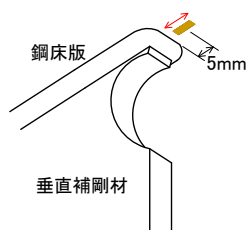
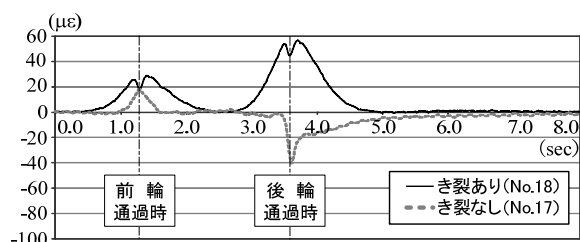


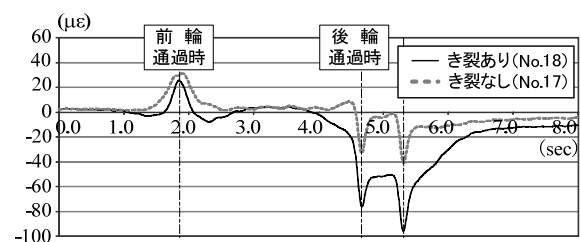
図-11 ひずみ測定位置

でまわし溶接部にき裂が検出された場合は、き裂の再開口が疑われる。PT, MT, き裂検出材の結果を総合してき裂が進展した範囲、もしくはICR処理後に再開口した範囲を判断し、調査結果をまとめた一覧を表-2に示す。

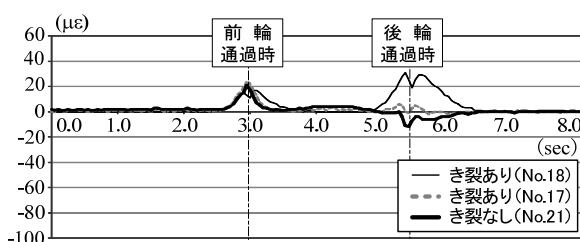
事後対策として実施した $N_{vb}+ICR$, $N_{vd}+ICR$, $N_{db}+ICR$,



(a) ICR処理前



(b) ICR処理直後



(c) 2年経過後

図-12 ひずみ測定結果

表-2 ICR処理パターンと追跡調査結果

	事後保全対策（き裂発生後の対策）				予防保全対策
	$N_{vb}+ICR$	$N_{vd}+ICR$	$N_{db}+ICR$	$N_{dd}+ICR$	N_0+ICR
き裂発生位置	垂直補剛材側溶接止端部		デッキプレート側溶接止端部		未発生
き裂先端位置	溶接ビード内	デッキプレート	まわし溶接部	デッキプレート	未発生
き裂形状とICR処理範囲					
箇所数	2箇所	5箇所	2箇所	8箇所	12箇所 ^{※1}
ICR処理前からき裂が進展した箇所数	なし	なし	なし	なし	1箇所
ICR処理部が再開口した箇所数	0箇所	3箇所	1箇所	8箇所	

※1 半円孔未実施（ICR処理のみ）1箇所を含む

$N_{dd}+ICR$ の17箇所、ICR処理前のき裂長を超える進展は確認されなかった。

一方、予防保全対策としてICR処理を実施した N_0+ICR の12箇所のうち、1箇所でき裂の発生を確認した。表面を若干切削しMTを実施しても指示模様が検出されたことから、疑似模様ではなくき裂と判断した。き裂の段階は N_{db} である。また、事後対策として実施した $N_{vd}+ICR$ 、 $N_{db}+ICR$ 、 $N_{dd}+ICR$ の12箇所、き裂の一部再開口が確認された。

$N_{vd}+ICR$ は、5箇所中3箇所でき裂の一部が再開口していることを確認した。反応を確認した範囲は、いずれも溶接止端から5mm以内で、この範囲はICR処理の図-6(b)④の工程でき裂を開く方向にひずみが導入される⁹⁾ため、ICR処理後の再開口の可能性だけでなく、施工時に開口した可能性も考えられる。

$N_{db}+ICR$ は2箇所中1箇所、 $N_{dd}+ICR$ は、8箇所すべてでき裂の一部が再開口していることを確認した。このうち、まわし溶接部の範囲のみで再開口していたものが4箇所、まわし溶接部および止端から離れたデッキ部まで再開口していたものが5箇所確認された。デッキ部の再開口と考えられる範囲は止端から数mm程度である。

対象橋梁では、垂直補剛材に隣接するUリブとの間隔が図-5に示すように35mmしかなく、フラックスチップをUリブと垂直補剛材の間を通すことが出来ないため、図-6(a)①の工程および(b)④の工程のICR処理が一度に施工できず、まわし溶接部先端で止めて2回に分けて叩いた。そのため、まわし溶接部先端に圧縮残留応力が十分導入されていない可能性がある。

また、まわし溶接部には、車両通過時のデッキの面外変形により圧縮の応力集中が発生する¹²⁾。文献5)に、過圧縮荷重がまわし溶接止端部に作用すると、局所的に降伏し、疲労強度が低下することが報告されていることや、文献6)で、ICR処理により閉口したき裂に、過圧縮荷重が作用することで開口することが報告されている。まわし溶接部には構造的な応力集中が発生することから、過積載車両の通行等により過圧縮荷重が作用し、疲労強度が低下した可能性やき裂が開口した可能性が考えられる。

いずれの場合でもデッキ部にみられる再開口の長さは短く、次の対策を講じるような状態には至っていない。

4. 今後の検討方針と課題

ICR処理から2年経過後でもICR処理前と比べてき裂が進展していないことから、現時点においてはICR処理による一定の延命効果が確認できたと考える。

ただし、ICR処理を施したまわし溶接部で一部き裂の再開口が確認された。再開口した要因として考えられるのは、①構造的な応力集中部であるまわし溶接部に過圧縮荷重が作用したこと、②狭隘部のため施工困難であり、

十分な圧縮残留応力が導入されていなかったことである。き裂が一部開口した場合の延命効果を応力拡大係数の低減率を算出して評価することは困難である⁷⁾。しかし、文献9)で、垂直補剛材のまわし溶接部を模した面外ガセットを用いた実験では、まわし溶接部止端の一部がICR処理されていない場合でも延命効果が得られると報告されているように、再開口がみられても直ちに延命効果を失うことはないと考える。従って、最新の研究成果や動向に注視しつつ、引き続き経過観察を続けていくこととする。

参考文献

- 1) 公開特許工法(A)特許出願公開番号 特開2011-106181 名古屋大学
- 2) 山田健太郎, 石川敏之, 柿市拓巳:疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み, 土木学会論文集A, Vol. 65, No. 4, pp. 961-965, 2009. 11.
- 3) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎:鋼床版箱桁橋の垂直補剛材直上き裂へのICR処理の施工試験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 17, pp. 351-358, 2009. 11.
- 4) 石川敏之, 山田健太郎, 柿市拓巳, 李蒼:ICR処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果, 土木学会論文集A, Vol. 66, No. 2, pp. 264-272, 2010.
- 5) 石川敏之, 清水優, 輅一, 河野広隆, 山田健太郎:ICR処理による疲労強度向上効果に圧縮の過荷重が与える影響, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 19, pp. 345-350, 2011. 11.
- 6) 松本理佐, 石川敏之, 服部篤史, 河野広隆, 山田健太郎:圧縮の過荷重がき裂を閉口したストップホールの疲労強度に与える影響, 土木学会第69回年次学術講演概要集, I-456, pp. 911-912, 2014.
- 7) 山田健太郎:疲労き裂の補修・補強に用いるICR処理の破壊力学的考察, 土木学会第68回年次学術講演概要集, I-550, pp. 1099-1100, 2013.
- 8) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎:すみ肉溶接継手の溶接止端に発生した疲労き裂のICR処理による補修・補強, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 665-672, 2013. 3.
- 9) 安福友浩, 山田健太郎, 石川敏之, 村井啓太:Uリブと横リブのすみ肉溶接から発生するき裂へのICR処理の適用, 土木学会中部支部研究発表会I-024, pp. 47-48, 2010. 3.
- 10) 米村大和, 竹市雅人, 中尾健太郎, 瀬谷千恵:鋼床版の垂直補剛材の疲労き裂に対して行うICR処理の品質管理基準の検討, 土木学会第68回年次学術講演概要集, I-552, pp. 1103-1104, 2013.
- 11) 山田健太郎, 小藺江朋堯, 小塩達也:垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 14, No. 55, pp. 1-8, 2007. 9.
- 12) 土木学会:鋼床版の疲労, 丸善, 2010.