

淀川大橋の補修・補強工事に適用した非破壊検査

報告

Non-destructive Tests Applied during Repair Works of the Yodogawa Bridge

○森本 量也* Kazuya MORIMOTO
河野 譲* Yuzuru KOHNO
増田 寛四郎** Kanshirou MASUDA
坂野 昌弘*** Masahiro SAKANO

ABSTRACT A series of studies and site investigations were carried out on an 85 years old truss bridge with the objective of obtaining information concerning its structural health conditions. During inspections carried out in the former year, internal flaws and defects were found in members repaired in the past. The present studies reports on the additional non-destructive tests carried out on these members to find out details of the internal flaws. X-ray was applied to define the geometric shape of the flaw and evaluate the cross-sectional reduction rate. In order to verify the propagation of the flaws magnetic particle tests were carried out. In addition, macro and micro structure analysis were also carried out to verify details of the flaws.

Key words: 亀裂, 非破壊検査, 磁粉探傷試験, マクロ・ミクロ組織試験, X線透過試験
Crack, non-destructive testing, magnetic particle testing, macro micro structure examination, X-ray analysis

1. はじめに

淀川大橋は 1926 年施工の幅員 20.8m, 橋長 723.3m, 30 径間 (中央部 6 径完鋼単純トラス 6@ 32.918m) を有し, 京阪神間の重交通を担う主要国道の 2 号線を支え, 海岸から約 5.5km 地点に位置する橋である。戦時中の航空機による銃撃等で主構部材の損傷箇所を補修・補強している。

高齢化を迎えた長大橋の診断と長寿命化に関する研究の一環として¹⁾ 本橋梁のトラス橋部を対象とした前年度の研究時に, 主構部材のトラス斜材補修箇所 (図 1 参照) の突合せ溶接部に内在不連続部 (内部きず) と横桁の補修箇所に表面き裂を検出していた²⁾。

内部きずに対しては, 断面欠損率を求めるために, 内部きず高さ推定に X 線透過試験を実施し, コア抜きにより内部きずの状況を確認した。

一方, 表面き裂に対してはきずの進展確認と, きず削除のために磁粉探傷試験を適用し, きず詳細確認のためにマクロ・ミクロ組織試験を実施した。



図 1 トラス橋の主構造物状況

* (社)日本非破壊検査工業会 (〒101-0047 東京都千代田区内神田 2-8-1 3F)

** 工修 国土交通省近畿地方整備局大阪国道事務所 (〒536-0004 大阪市城東区今福西 2-12-35)

*** 工博 関西大学環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35) 第 2 種正会員

2. 対応部材概要

2. 1 トラス斜材部概要

X線透過試験の適用箇所は、前年度の研究調査で見つかった、トラス斜材の突合せ溶接部の内部きずが存在する部位の中から3箇所を対象とした。

この部位はいずれも取替部材と旧部材の突合せ溶接部の上に当板が施工されており、超音波探傷試験等で内部きず高さを測定することが不可能な部材配置となっている。継手状況を図2に、撮影箇所部材断面予想を図3に示す。

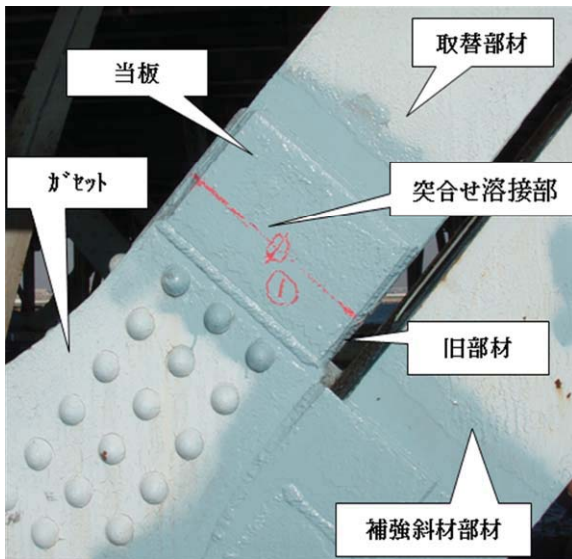


図2 トラス斜材撮影箇所部材状況

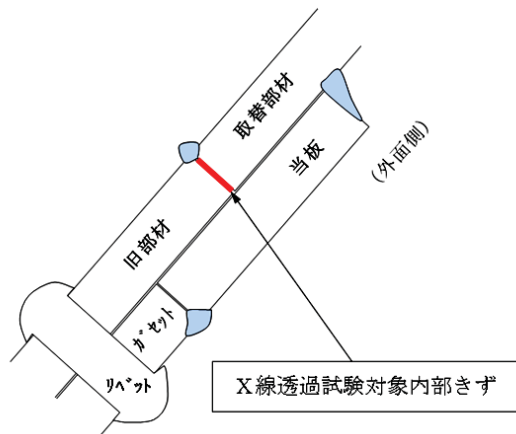


図3 撮影箇所部材断面予想図

2. 2 横桁概要

横桁下フランジの損傷箇所には欠損部を補強するために、旧部材上に隅肉溶接された当板が施工されている。表面き裂検出箇所及び横桁状況を図4に示す。

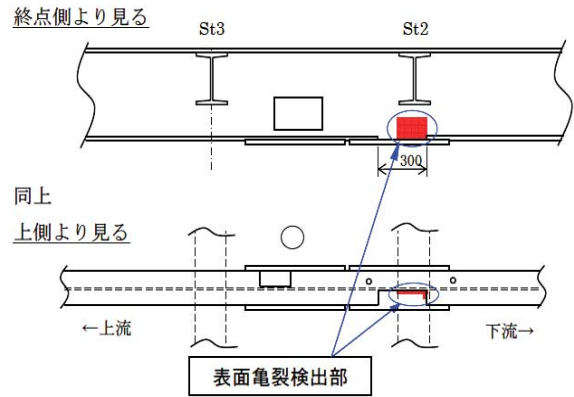


図4 横桁部材状況

3. 方法

3. 1 X線透過試験

トラス橋部の主構部材の新旧突合せ溶接部の内部きず高さを推測するために、X線透過試験(工業用デジタル画像処理システム・イメージングプレート使用)を適用した。

X線発生装置を図5に示す3方向から場所を変えて撮影し、イメージングプレートに記録された内部きず投影画像をデジタル処理でPCモニター上に表示、そして画面上で画像寸法をデジタル計測し推定値を求めるためのデータとした。

撮影配置と内部きず投影画像幅及び内部きず高さの位置関係を図7に示す。X1からの内部きずへのX線照射角度は 15° 以下となり、きず幅が狭く、板厚方向に高さを持つきずを検出を考慮して撮影配置を定めているJIS Z 3104を満足する配置となっている。

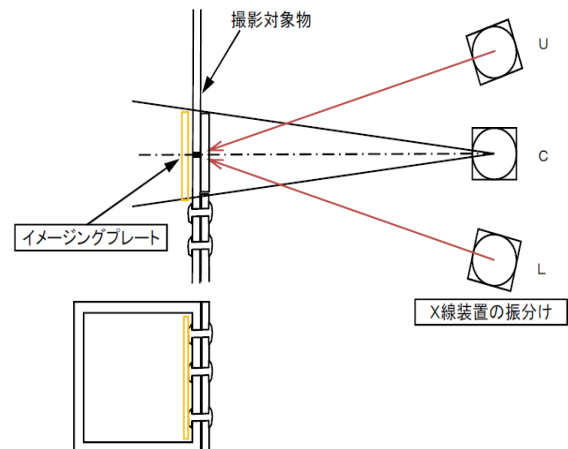


図5 撮影配置



図6 X線透過試験実施状況

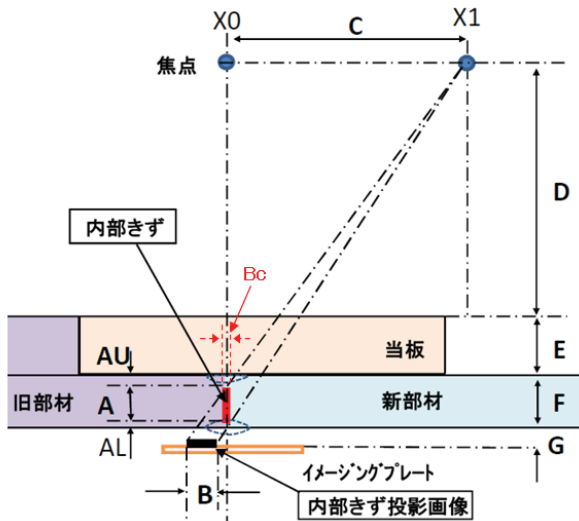


図7 撮影配置符号

- A=内部きず高さ推定値
- B=内部きず投影画像幅
- C=X線装置の移動距離 (200 mm)
- D=部材表面までの距離 (800 mm)
- E=当板の部材厚さ(約15 mm~約8 mm)
- F=取替部材の部材厚さ (約15 mm)
- G=裏波溶接部によるイメージングプレートの浮上り寸法 (約3 mm)
- AU=外面側溶接部の溶込み深さ (3 mmを既知とする)
- AL=内面側溶接部の溶込み深さ (3 mmを既知とする)
- BC=鉛直方向で撮影した内部きず投影画像幅

内部きず高さ推定値Aは式(1)・(2)を用いて計算し、その中の最大値を推定値とする。

式で用いるB(内部きず投影画像幅)は式(3)に示すように、斜め撮影(X1)の画像計測値に補正值(X線装置の焦点寸法と撮影媒体(イメージングプレート)等によるきず端部の画像にボケが発生することで、識別コントラストが低下して、きず投影画像識別幅が小さく測定されることを考慮し、板厚の2%を補正值として導入)を加え、正面(X0)より撮影した内部きず投影画像幅を引いた値とする。

また、現地の状況を考慮して、対象溶接部の内外に施工されている溶接部の溶け込み量をAU, AL共に3 mmを既知として仮定した。

AU = 3 mmを既知と仮定

$$A = \frac{B(D+E+AU)^2}{C(F-AU)+(C-B)(D+E+AU)} \quad (1)$$

AL = 3 mmを既知と仮定

$$A = \frac{B(D+E+F-AL)^2}{(B+C)(D+E+F-AL)+C \times G+C \times AL} \quad (2)$$

$$B = \text{画像計測値} + \text{板厚の2\%} - X0 \text{での} BC \quad (3)$$

X線撮影による内部きず高さ推定値と同一箇所にて採取したコア採取サンプルのマクロ試験により求めるきず高さ(実測)寸法との測定精度の比較を行い、本測定方法の精度を検証した。

3.2 磁粉探傷試験

横桁下フランジの補修溶接部(図8)のき裂を削除するために、表面き裂状況確認の非破壊検査として、磁粉探傷試験(極間法・蛍光湿式・連続法)(図9)を適用した。きず削除の際は磁粉模様を確認しながら棒グラインダーにて研削を行った。また、対象箇所のウェブ裏面側への、き裂進展の有無確認も併せて行った。



図8 横桁補修箇所の磁粉探傷試験実施箇所



図9 横桁表面き裂の磁粉探傷試験状況

3.3 マクロ・マイクロ組織試験

磁粉探傷試験で残置したきずの詳細調査と、X線透過試験での内部きず高さ推定の精度確認用に採取したコア採取サンプルの内部きず状況と、実寸法測定のためにマクロ・マイクロ組織試験を実施した。

4. 結果

4.1 X線透過試験

図5に示す撮影配置で、同一対象箇所から3方向からX線透過試験を行った撮影画像を図10、図11、図12に示す。

撮影画像中央部の○印部（コア採取箇所：直径 $\phi 20\text{mm}$ ）で内部きず画像幅をデジタル計測した。コア採取部に対応した撮影画像の拡大画像を図13に示す。この画像の○印と内部きず投影画像の交点の寸法を計測した。

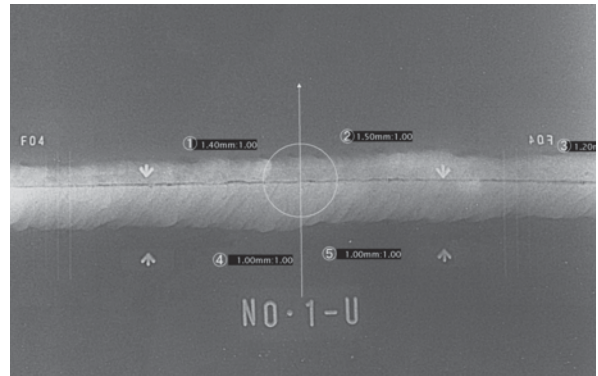


図10 上側(X1)からの撮影画像

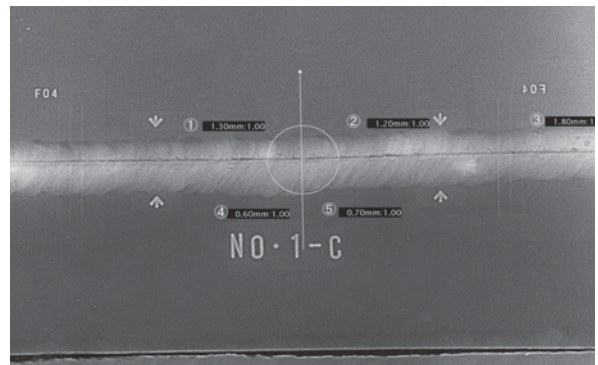


図11 中央部(X0)からの撮影画像

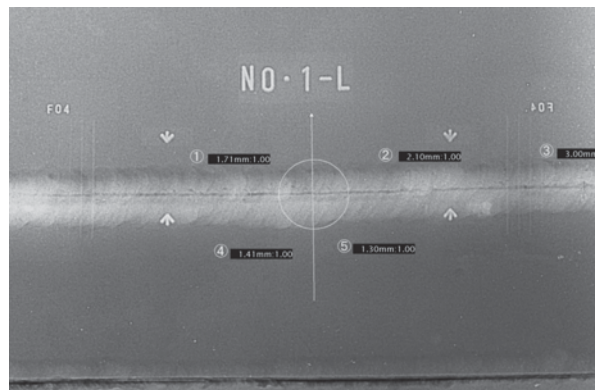


図12 下部(X1)からの撮影画像

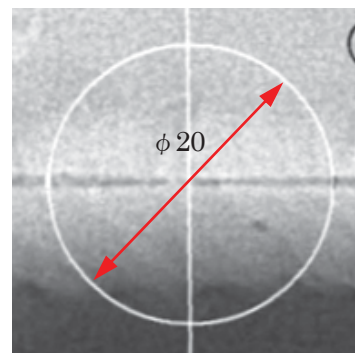


図13 コア採取部のX線画像（拡大）

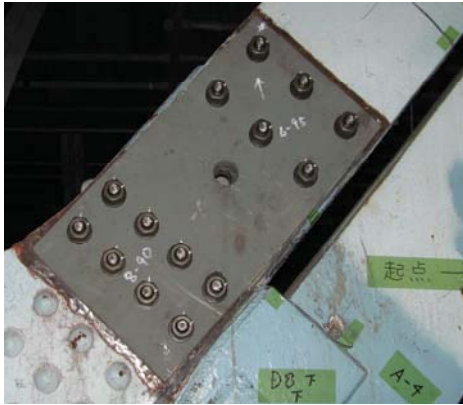


図1.4 補強後のコア採取状況

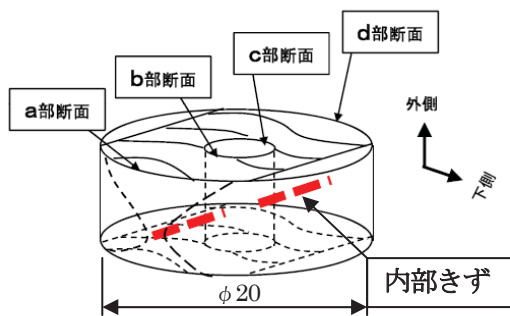


図1.5 採取したコアのマクロ試験箇所符号

補強後(図1.4)で採取したコア採取サンプルの概要を図1.5に示す、a・d部断面でのマクロ試験を行い、きず高さ(実測)を計測した。マクロ試験結果を図1.6～図1.8に示す。

コア採取のマクロ・ミクロ試験より、突合せ溶接の開先形状はK開先と見られ、内部きずは現場溶接施工時に裏ハツリを行わず溶接を完了したことによる溶込み不良と判定した。

また、最大3mmの目違いが存在するコア採取サンプル(図1.7)も見られた、溶接が現場施工であり溶接線が斜めに傾斜しているために、溶接姿勢が悪く、外面にアンダーカットや溶接ビードの不整等も見られた。

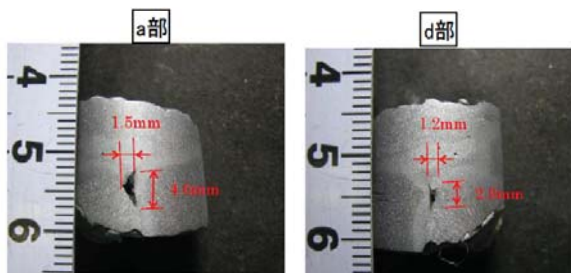


図1.6 ①G1桁-D8-下(撮影箇所:No.1)

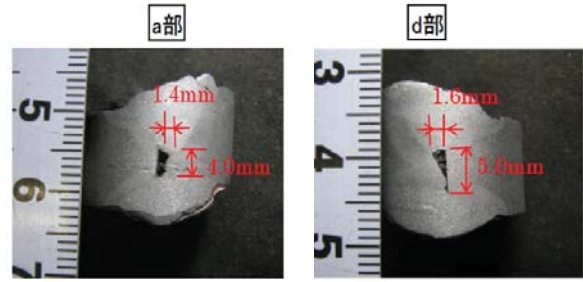


図1.7 ②G1桁-D8-上(撮影箇所:No.9)

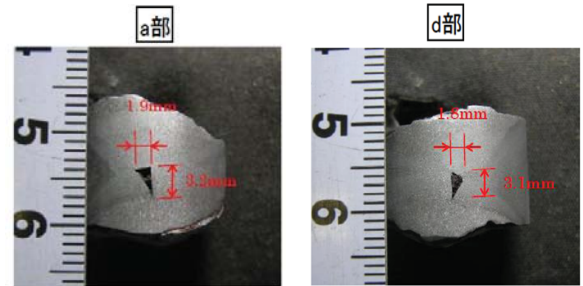


図1.8 ③G1桁-D7-下(撮影箇所:No.11)

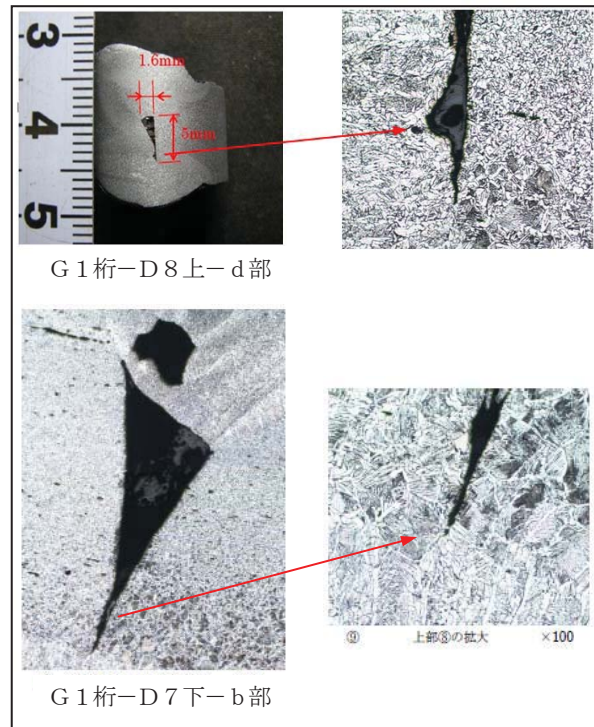


図1.9 内部きず先端部のミクロ組織試験

また、図1.9のミクロ試験結果に示すとおり、いずれのサンプルにおいても、内部きず先端部からのき裂は検出されなかった。

表1 X線透過試験とマクロ試験結果の比較

① G1桁-D8-下-下流側溶接部 (X線撮影箇所番号: No.1)

側	きず高さ (実測)	断面欠損率	X線による推定値	断面欠損率	実測に対する誤差	誤差率
a部	4.6mm	32.6%	5.1mm	36.2%	(+) 0.5mm	+10.9%
d部	2.9mm	20.6%	4.3mm	30.5%	(+) 1.4mm	+48.3%

② G1桁-D8-上-下流側溶接部 (X線撮影箇所番号: No.9)

側	きず高さ (実測)	断面欠損率	X線による推定値	断面欠損率	実測に対する誤差	誤差率
a部	4.0mm	28.4%	3.6mm	25.5%	(-) 0.4mm	-10.0%
d部	5.0mm	35.5%	4.0mm	28.4%	(-) 1.0mm	-20.0%

③ G1桁-D7-上-下流側溶接部 (X線撮影箇所番号: No.11)

側	きず高さ (実測)	断面欠損率	X線による推定値	断面欠損率	実測に対する誤差	誤差率
a部	3.2mm	23.2%	3.1mm	22.5%	(-) 0.1mm	-3.1%
d部	3.1mm	22.5%	3.4mm	24.6%	(+) 0.3mm	+9.7%

内部きず高さ推定値とマクロ試験結果によるきず高さ (実測) の比較を表1に示す。

3箇所の計測結果を比較すると、きず高さ (実測) との最大誤差は+1.4mm~-1.0mm (誤差率: +48.3%~-20.0%), 断面欠損率の最大誤差は9.9%であった。

なお、断面欠損率は肉厚測定で求めた数値の中で、突合せ部材の薄い方の部材厚さで計算した。

きずの形状が三角形をしており、先端になるにしたがい鋭い形状をしているために、先端部分での識別コントラストの低下を考慮した式(3)に示す板厚の2%の補正値は、概ね妥当な数値と考えられる。1箇所の計測値で誤差率が大きくなった原因は計測位置のズレによるものと考えられる。

昭和35年の補修・補強工事で施工されたトラス部材の取替部と旧部材との突合せ溶接部のX線透過試験と、コア採取サンプルのマクロ試験から、トラス斜材補修部の断面と溶接部の開先形状および溶接状態は、図20に示すような形状となる。

取替部材側にK開先加工を行い、旧部材との突合せ溶接(両面余盛り有り)を行ったものであり、

コア採取サンプルで見られた目違いは、開先合せ時の部材寸法差による目違いと推測される。

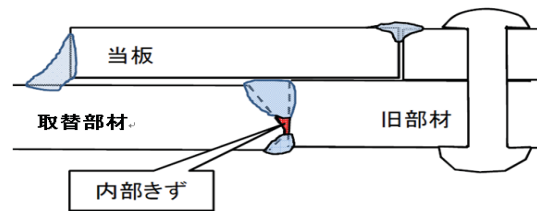
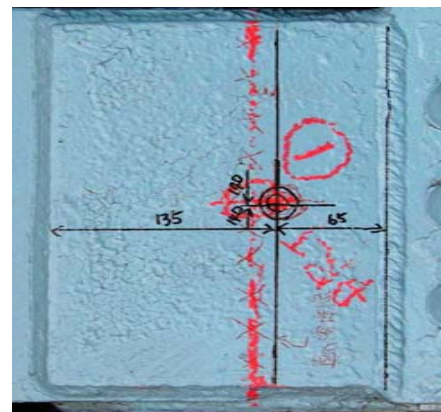


図20 トラス斜材部突合せ状況図

4.2 磁粉探傷試験, マクロ・マイクロ組織試験

横桁の下フランジ欠損部の当板補強隅肉溶接部から母材に入った疲労き裂は図2-1に示す寸法であり, 前年度調査の検査結果と比較して, き裂の進展は見られなかった。

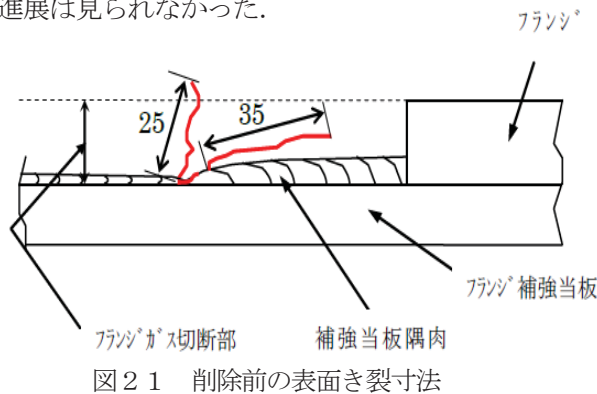


図2-1 削除前の表面き裂寸法

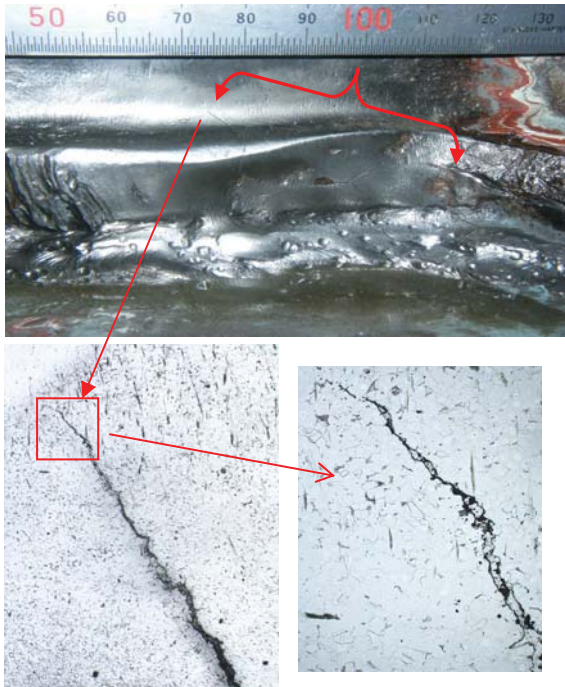


図2-2 削除前の表面き裂状況とマクロ・マイクロ組織

母材に入ったこのき裂を除去するために, バーグラインダー研削と磁粉探傷試験によるきず確認を行いながら削除を実施した結果, き裂は約3mmで除去できた。

しかし, 削除したき裂の両側で新たに検出された下フランジ部のきず(図2-4に示す位置)は, 深さ5mm程度まで削り込んでも圧延方向に層状の線状磁粉模様(図2-5)や空洞の存在が確認できた。

このきずは下フランジの圧延方向に伸びた線状きずであり, マクロ・マイクロ組織試験結果より製造時の内在きずと推定されたために残置した。図2-6にマクロ・マイクロ組織試験結果を示す。



図2-3 削除前の表面き裂磁粉模様

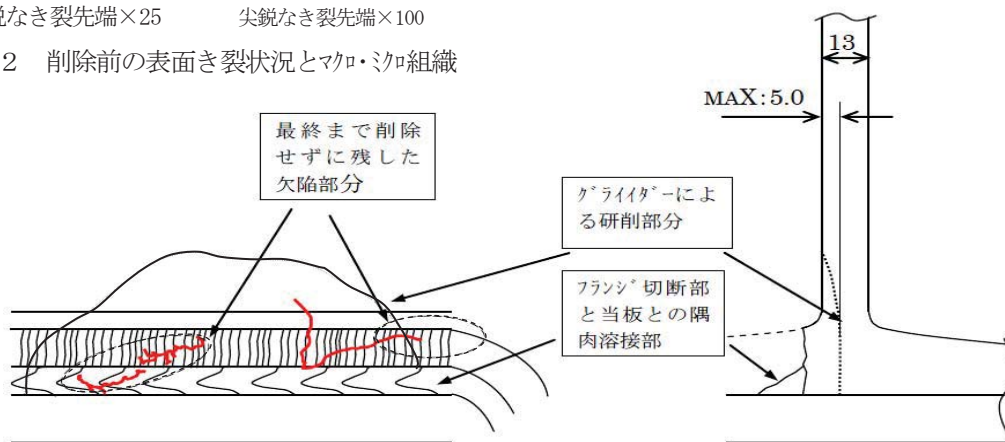


図2-4 横桁補修箇所の新たなきず検出状況



図25 残置したきず磁粉模様

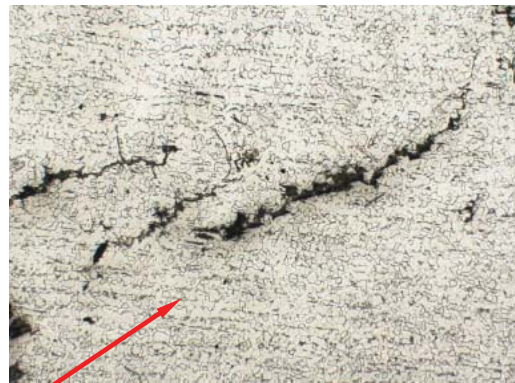


図26 残置したきずのマクロ・マイクロ組織試験

5. まとめ

本研究により以下の結論が得られた。

(1) X線透過試験では、撮影画像幅より求めた内部きず高さ推定値とコア採取サンプルのきず高さ(実測)値との比較において最大誤差は大きいものの、今回のように対象溶接部上に当板が施工され、超音波探傷試験等による内部きず高さ測定が不可能な部位ならびに、部材等に隠れて直接きずを調査することが出来ない箇所に適用できる非破壊試験方法である。

(2) 横桁の補修隅肉溶接部に発生していた疲労き裂は磁粉探傷試験で、きず状況を確認しながら削除を行った。下フランジ母材に現れた板厚方向の層状の微細なきずは、マクロ・マイクロ組織試験により製造時(圧延時)の介在物に起因したものと推定されたため放置した。

鋼構造部材に対して、磁粉探傷試験は表面開口きずの中で疲労き裂等の線状きずの検出感度が高く、きずの検出・確認には非常に有効な非破壊試験である。

また、検出したきずの状況判断を行うために、マクロ・マイクロ組織試験を併用することにより、一層正しいきず判断が可能になると考える。

参考文献

- 1) 坂野：高齢化を迎えた長大橋の診断と長寿命化に関する研究プロジェクト, 第66回土木学会年次学術講演会, CS-7-004, 2011. 9.
- 2) 河野, 増田, 坂野, 夏秋：淀川大橋補修溶接部の非破壊検査および成分分析, 鋼構造年次学術論文報告集, 第19巻, PP, 657-664, 2011. 11.
- 3) 広瀬, 増田, 坂野：淀川大橋の補強設計, 第67回土木学会年次学術講演会, CS-5-007, 2012. 9.
- 4) 夏秋, Ichinose, 増田, 坂野：淀川大橋補修後の動的載荷試験および応力頻度測定, 第67回土木学会年次学術講演会, CS-5-009, 2012. 9.
- 5) 日本工業規格 JIS Z 3104 -1995「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」
- 6) 日本工業規格 JIS Z 2320-1~3-2007「非破壊試験—磁粉探傷試験—第1部~第3部」