

補剛トラス部材溶接継手の疲労亀裂検出に関する実験

STUDY ON FATIGUE CRACK DETECTION IN STIFFENING TRUSS CHORD MEMBERS

飯島武明*・深沢 誠**・三木千寿***・田島二郎****

By Takeaki IJIMA, Makoto FUKAZAWA, Chitoshi MIKI and Jiro TAJIMA

Considering the possibilities of fatigue cracking of the stiffening chord members, periodic inspections appear essential. In this case, cracks need to be detected and measured by non-destructive testing. With the aim of clarifying the applicability and adaptability of non-destructive testing system, cyclic loading test was carried out of the large scale box sectional specimen coated with the paint. Under the cyclic loading, 46 cracks at the different weld joint were detected using the non-destructive testing system which consists of two stages: the preliminary examination through the paint film and a precise examination after removal of paint film.

Keywords: non-destructive testing, fatigue crack, stiffening chord, paint

1. はじめに

本州四国連絡橋の児島一坂ルートは道路鉄道併用橋であり、鉄道荷重が作用するトラス部材については、疲労亀裂の発生および進展を考慮して設計、製作が行われた。疲労亀裂の発生および進展の挙動は現在のところ完全には解明されているとはいえ、進展速度の考え方もあくまで平均的なものである。かど溶接に関しては実際に出現する溶接欠陥は形状も複雑であり、製作時の超音波探傷試験の精度の問題もあり、許容値を超えないと判定した欠陥から亀裂が発生することもある。ダイヤフラム、仕口部等の隅肉溶接についても同様であり、さらに、設計上疲労を考慮しない部材においても構造的な応力集中の影響により疲労亀裂が発生することも考えられる。したがって、供用後において非破壊試験により亀裂の発生を検査することは不可欠であり、維持管理上重要な課題である。供用中の非破壊検査は工場内での部材製作時

の検査とは異なり、検査対象部が縦、横、斜めに組み立てられており、検査姿勢が種々の方向となること、かなり厚い塗装膜があること等の違いがある。各種非破壊試験における疲労亀裂の検出に関する基礎的な試験についてはすでに報告したが^{1)~4)}、本試験ではこれらの試験を総括する意味から、塗膜を施した大型箱断面部材を用いて、各種溶接継手に発生する疲労亀裂の検出について検討した。

2. 供試体

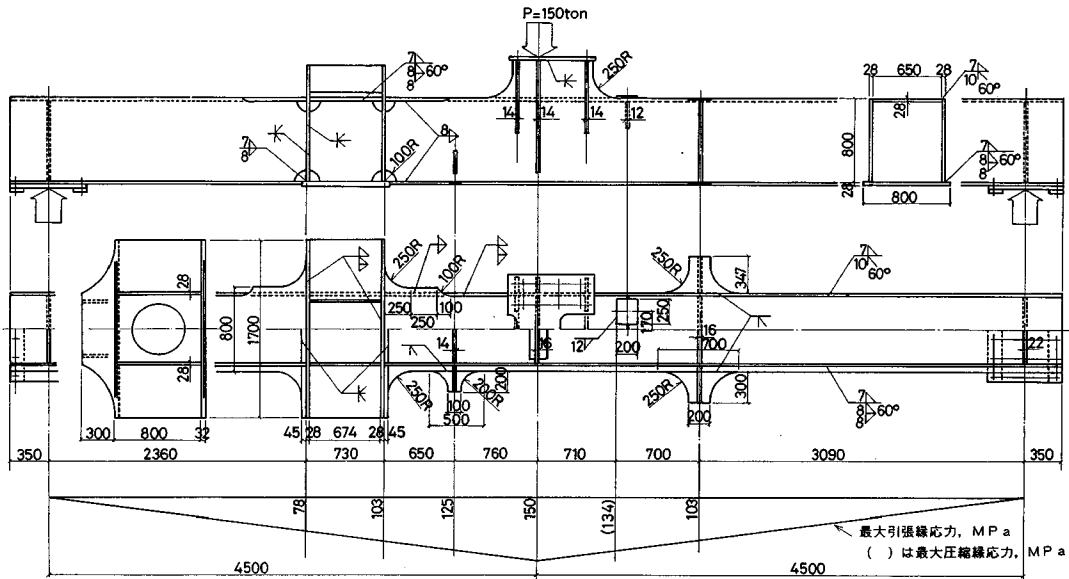
図-1に供試体の一般図を示す。吊橋補剛トラスをモデル化したものである。横桁と主構弦材との仕口部、さらには横桁、主構弦材に取り付け各種の部材を配置してある。溶接完了後、所定の塗装(標準塗膜 255 μm)を行い⁵⁾、1か月屋外に放置し、その後試験に供した。使用鋼材は、箱断面のフランジ、ウェブが SM 58 Q、その他は SM 41 である。各種溶接は、材料、施工方法とも実施工と同じとした。

3. 試験概要

繰返し載荷は最大曲げ縁応力範囲が 150 MPa となる荷重範囲で、3点曲げで行った。図-1中に計算作用応力範囲を示したが、各種の溶接継手はその継手の作用応

* 正会員 本州四国連絡橋公団 (〒105 港区虎ノ門 4-3-20)

** 正会員 工博 (株) 横河橋梁製作所
(〒260 千葉市新港 88)*** 正会員 工博 東京工業大学 土木工学科
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)**** 正会員 工博 埼玉大学教授 建設工学科
(〒338 浦和市下大久保 255)



図一 供試体一般図

力ができるだけ 200 万回基本疲労許容応力値になるように位置させてある。繰返し载荷の途中、各種非破壊試験を実施し、疲労亀裂発生を検出するとともに、進展を追跡した。非破壊試験は基本的にはすべての溶接継手に関して繰返し数 20 万回につき 1 度粗検査することとした。粗検査で亀裂発生が確認された場合は引き続き精密検査を行った。発生後、比較的大きくなった亀裂についてはストップホール、補強板の添接等による補修・補強を行いながら载荷を続行した。繰返し载荷終了後、非破壊試験による亀裂検出部について破壊試験を実施し、各種溶接継手部の疲労亀裂検出に関して検討を行った。

4. 非破壊試験方法

表一に各種溶接継手について疲労亀裂検出のための検査システムを示す。実橋検査においては対象溶接継手が多いことを考え、塗膜上からの粗検査と塗膜を除去して行う精密検査の組合せとした。

縦ビード継手の外面レ形溶接、内面隅肉溶接に発生する亀裂の検出は、自動超音波探傷（自動 UT）による粗探傷と手動超音波探傷（手動 UT）・端部エコー法による精密探傷とした。自動 UT での使用探触子は屈折角 45°, 60°（いずれも 5 MHz, 点集束型）の併用であり、手動 UT は屈折角 45°（5 MHz, 点集束型）である。主構弦材の仕口部などでは、走行レールのセット、探触子ホルダーの大きさの関係から自動 UT ができない部分がある。このような箇所については手動 UT により粗検査を行った。

隅肉溶接、突合せ溶接部の表面に発生する疲労亀裂に

表一 亀裂検出のための検査システム

溶接継手	亀裂位置	粗検査	精密検査
縦ビード溶接継手 (外面レ形溶接 内面すみ肉溶接)	内部亀裂	自動超音波探傷	手動超音波探傷 (端部エコー法)
	表面亀裂 裏面亀裂	一部 手動超音波探傷	
その他の溶接継手 (すみ肉溶接 突合せ溶接)	表面亀裂	目視探傷 渦流探傷	磁粉探傷 手動超音波探傷 (端部エコー法)
	裏面亀裂	手動超音波探傷 (コーナエコー法)	手動超音波探傷 (端部エコー法)

ついては、粗検査として目視探傷 (VT)、渦流探傷試験 (ECT) を行い、亀裂発生が認められた場合には塗膜を除去して磁粉探傷試験 (MT)、手動 UT を行った。

隅肉溶接部に発生する亀裂において、たとえば弦材内部のダイアフラムの溶接などの場合には、密閉構造のために亀裂発生面側からの検査はできない。この場合、亀裂と反対面からの検査となり、超音波探傷試験に頼らざるを得ない。そこで、外面側からの探傷により亀裂と板表面とでできるコーナー部からの反射エコー、および、亀裂端部のピークエコーをつかまえる方法とした。

いずれの非破壊試験方法とも、使用機器、探傷条件等はすでに報告したものと同一である^{2)~4)}。

5. 試験経過

図二に試験経過をまとめて示す。繰返し载荷は、13 回のピーチマーク操作を挿入をしながら 273 万回まで行った。繰返し载荷途中、非破壊試験により、1~46 の

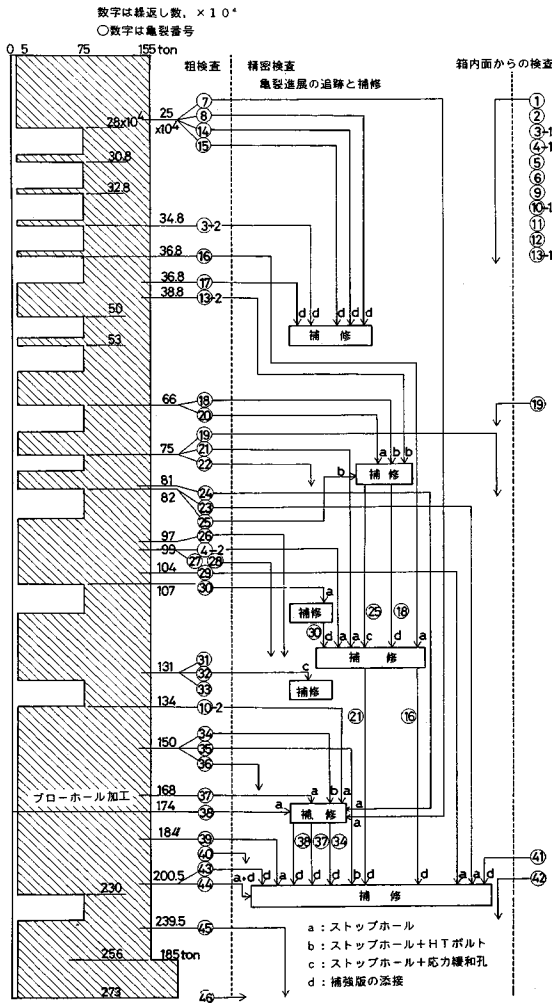


図-2 試験経過

46か所に亀裂が検出された。1~46の数字は亀裂の検出順に付けてある。亀裂検出後、精密検査により進展状況を追跡したが、進展速度が速い亀裂については、図中に示したa~dの4種類の補修・補強を行った。

なお、かど継手の部分溶け込みレ形溶接においては、故意にルート部に自然欠陥を発生させたにもかかわらず、その寸法が小さかったために、自動UTによって亀裂の発生は確認できなかった。そこで、174万回時に作用応力が大きな位置に大きなルートブローホールを想定して、ドリルホールによる模擬欠陥を加工した²⁾。試験の最後において、これらの模擬ブローホールの1つから亀裂が発生していることが確認できた(46)。

6. 各種非破壊試験による亀裂検出性能

図-3に亀裂の発生位置を示す。亀裂番号は図-2の亀裂番号と対応する。また、亀裂47, 48は試験中の非

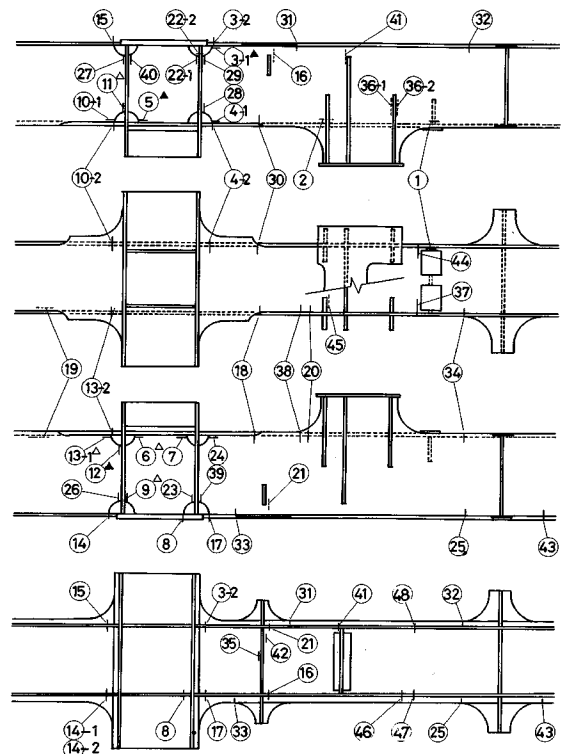


図-3 亀裂発生位置

破壊試験では検出できなかったが、その後の破壊試験でみつかった亀裂である。かなりの亀裂は横桁と主構の仕口部のスカラップまわりに集中しているが、その他の溶接継手にも多くの亀裂が発生していた。これらの亀裂は適用非破壊試験方法、溶接継手に着目すると、図-4に示すようにタイプ分けを行った。基本的には、非破壊試験は箱外面側から行うものとし、まず、探傷面との関係から

- かど継手ルートブローホールから発生した内部亀裂
- 箱外面の溶接継手部に発生した表面亀裂
- 箱内面の溶接継手部に発生した裏面亀裂

の3つに大別し、さらに、表面亀裂、裏面亀裂については継手の特徴ごとに細分した。以下では、亀裂タイプごとに、各種非破壊試験による亀裂検出性能を検討する。なお、試験ではできるかぎり箱内面側からの探傷も行った。箱内面の溶接継手に発生した裏面亀裂の多くは、まず内面からの探傷で検出している。

図-5にはスカラップ回し溶接部に発生した亀裂(Dタイプ)のMTでの進展追跡結果を示す。粗検査の周期は20万回程度としたが、亀裂によってはこの間に大きく進展していることがわかる。すなわち亀裂の検出精

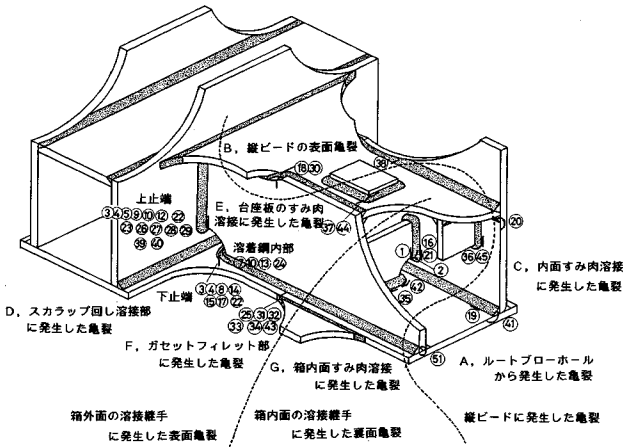


図-4 発生位置に着目した亀裂のタイプ

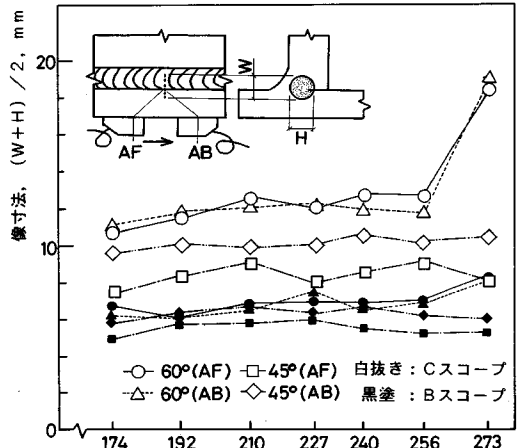


図-7 自動 UT における像寸法の変化 (亀裂 46)

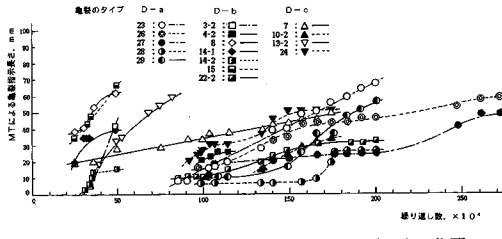


図-5 スカップ回し溶接に発生した亀裂の進展

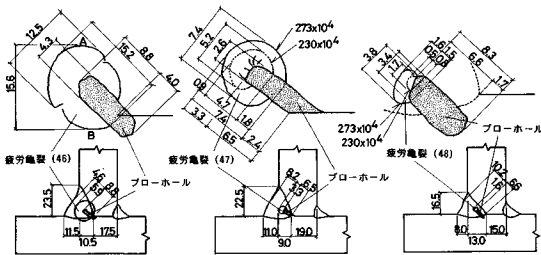


図-6 模擬ブローホールから発生した亀裂の破面スケッチ

度は亀裂進展速度と検査周期とに関係し、ここで述べる検出精度は1つの目安であり、より低応力でゆっくり進展した亀裂においては当然、検出限界寸法は小さくなる。

(1) 縦ビードに発生した亀裂の検出

a) ルートブローホールから発生した亀裂, A

繰返し数 174 万回経過後、かど溶接の外側縦ビードの 10 か所 (下フランジ側 6 か所, 上フランジ側 4 か所) に、模擬ブローホールを加工した。ビード表面よりその先端がルート部に位置するようにドリル孔 (2.5~3.5 φ) を明け、表面側については手溶接により埋め戻した。このうち、下フランジ側の 3 か所 (46, 47, 48) に亀裂が発生した。図-6 に強制破壊後の亀裂破面およびスケッチを示す。46 の亀裂は 12.5 W × 15.2 H, 47 は 7.4 W × 7.4 H, 48 はブローホールの頂部に発生している

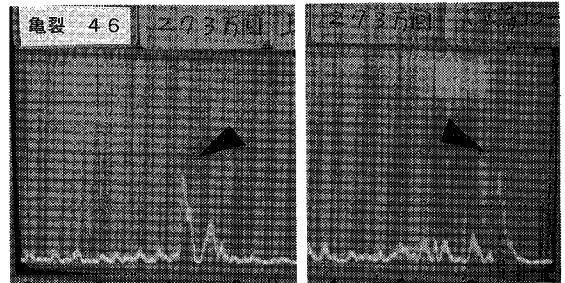
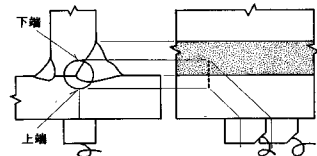


写真-1 亀裂 46 の端部エコー

3.8 W の小さな亀裂である。このうち自動 UT によって、最も大きな 46 の亀裂の発生が確認できた。図-7 には C スコープ, B スコープ像の変化をプロットする。B スコープ像の明確な変化はみられないが, C スコープ像は 273 万回に大きく変化している。

亀裂 46 について、自動 UT で検出後、引き続いて手動 UT・端部エコー法により精密探傷を行った。写真-1 に上下端のピークエコーの CRT 波形を示すが、これにより亀裂の W 寸法は 15.3 mm と推定できた。端部エコーの場合、スケッチ図で示したように A 点および B 点の位置を検出することになるが、この長さは 15.6 mm であり、0.3 mm という非常に良い精度で推定可能であった。

残りの 2 つの亀裂は自動 UT では検出できなかった。模擬ブローホール寸法に比べて亀裂寸法が小さく、欠陥像の変化として現われなかったものと考えられる。今回

の試験では有効なデータが1つであるが、すでに報告した同様な亀裂検出に関する試験を考えあわせると²⁾、縦ビードルート部から発生する内部亀裂の自動 UT は、亀裂がブローホール寸法に対して大きい場合には有効であり、手動 UT・端部エコー法により、正確な寸法推定が可能であるといえる。

b) 縦ビードの表面亀裂, B

縦ビードが部分溶込み溶接から隅肉溶接に遷移する部分の2か所に亀裂が発生した(18, 30)。写真—2に亀裂18のMTの指示模様を(82万回)、図—8に亀裂破面スケッチを示す。亀裂はルートフェース端部を起点として発生している。この亀裂は表面開口後の66万回にVT(指示長さ7mm)、ECTで検出された。75万回での実寸法は14.6mmである。亀裂30も同様であり、表面近傍の溶着鋼内部に発生している微小なブローホールを起点として発生し、107万回に表面に貫通した。この時点で、VT(指示長さ23mm)、ECT(同28mm)で亀裂を検出し、MTでの指示長さは25.5mmであった。

ウェブが立ち上がるフィレット部近傍の縦ビードにも亀裂が発生した(38)。写真—3に亀裂のMT指示模様

を示すが、発生点はビード表面近傍の微小溶接欠陥である。この亀裂は174万回では表面に開口しており、ECT(指示長さ11mm)、VT(同7mm)により検出された。MTでの指示長さは10mmである。

18, 30, 38の亀裂発生位置は自動 UT ができず、内部亀裂検出については手動 UT を、表面亀裂検出についてはVT, ECTを実施した。18, 30は遷移部という特殊な継手形状であり、また、38は表面近傍の溶接欠陥が亀裂発生点という特殊性があるが、一般に手動 UT によるかど継手内部に発生する亀裂の検出は困難であると考えられる。しかしながら、表面貫通後はVT, ECTの粗探傷によって検出が可能であり、検出限界寸法は10mm程度と考えられる。

c) 内面隅肉溶接に発生した亀裂, C

内面隅肉溶接継手には3か所に亀裂が発生していた(19, 20, 41)。いずれも亀裂発生初期においては自動 UT では検出できず、まず内面でのVT, MTで確認し、その後外面からの手動 UT で検出している。

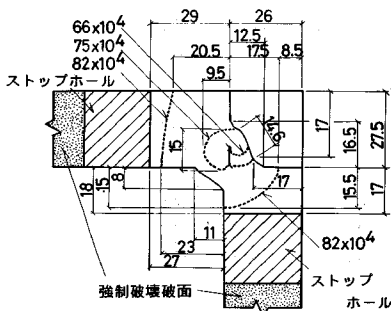
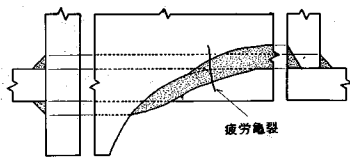
亀裂20, 41は隅肉溶接の棒継ぎ部のグラインダー傷から発生している。20はウェブ側、41はフランジ側止端部近傍が発生点である。写真—4に、亀裂20について内面から行ったMTでの指示模様を示す。MTで亀裂発生確認後、箱外面からのUTでコーナーエコーを検出した。また、82万回には、端部エコーにより亀裂深さが3.3mmと推定できた。

亀裂41の破面を写真—5に示す。亀裂41はかなり大きくなった後の箱外面からの手動 UT で検出した。この亀裂は下フランジからの探傷では不溶着部が、ウェブからの探傷では縦ビードが邪魔をし、フランジ側まで進展しないと検出が不可能である。

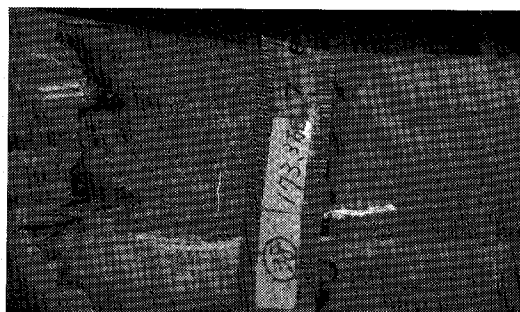
亀裂19は止端部に沿って発生した亀裂である。写真—6にMT指示模様を示すが、試験終了の273万回まで寸法の変化はほとんどなかった(実亀裂長さ10.5mm)。供試体の外面から行ったUTでは、亀裂コーナーからのエコーをつかまえることができたが、端部エコーの検出は不可能であった。深さが1.5mmと浅い亀裂で



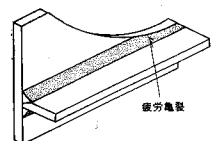
写真—2 縦ビード遷移部に発生した亀裂(亀裂18)

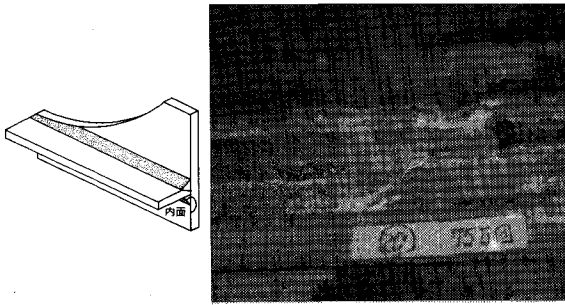


図—8 亀裂18の破面スケッチ

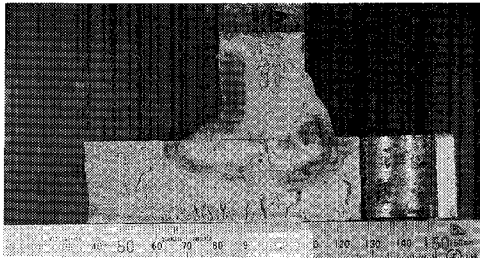
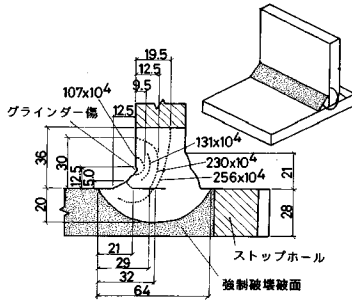


写真—3 縦ビード表面の亀裂(亀裂38)

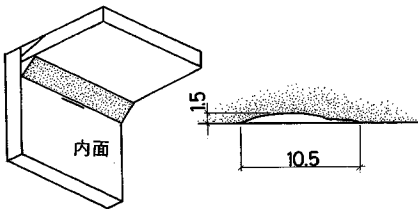




写真—4 内面隅肉溶接に発生した亀裂 (亀裂 20)



写真—5 内面隅肉溶接に発生した亀裂の破面 (亀裂 41)



写真—6 内面隅肉溶接止端部に沿って発生した亀裂 (亀裂 19)

あり、既報の亀裂検出性能結果を考えると、端部エコーの検出は困難である。

(2) 箱外面の溶接継手に発生した亀裂の検出

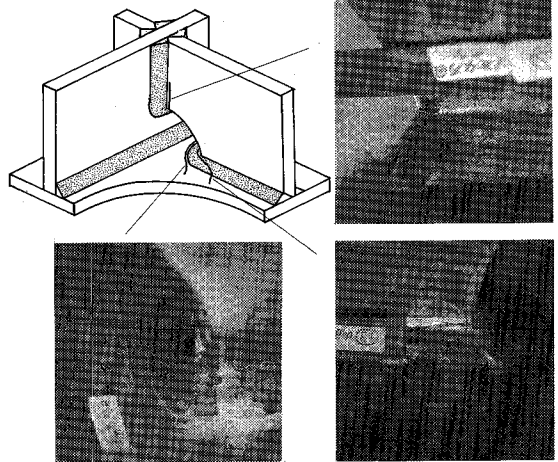
a) スクラップ回し溶接部に発生した亀裂, D

主構と横桁の仕口部のスクラップ回し隅肉溶接部に数多くの亀裂が発生した。これらの亀裂を発生位置でみると、次に示す a~c の 3 つに分けられる。

- 上止端に沿って進展した亀裂 (D-a, 14 か所)
- 下止端から主材方向へ進展した亀裂 (D-b, 7 か所)
- ルートから溶着鋼内部へ進展した亀裂 (D-c, 4 か所)

写真—7 に代表的な亀裂の MT 指示模様を示す。いずれの亀裂も塗膜上からの VT, ECT で検出し、その後、塗膜を除去して MT を行っている。ここで、ルート部から発生した亀裂はまずのど断面を貫通し、その後主材板厚方向へ進展しており、表面に開口するまでは検出は不可能であった。

表—2 にそれぞれのタイプの代表的な亀裂について検出時期および各探傷による推定値を示す。参考のために手動 UT による亀裂長さ、深さの測定結果についても併記する。ここでは、亀裂と板表面とのコーナーからの反射エコーが消失する位置を亀裂端部として寸法を求め



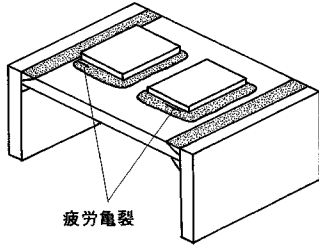
写真—7 スクラップ回し溶接部に発生した亀裂

表—2 亀裂の検出時期および推定寸法

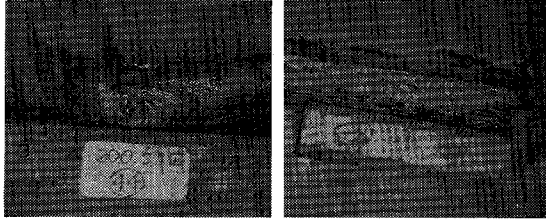
単位: mm

亀裂発生位置	上止端に沿った亀裂						止端から主材へ進展した亀裂					ルートから発生した亀裂																						
亀裂番号	3	9	2	3	2	6	2	7	2	8	2	9	3	2	4	2	8	1	4	1	5	7	1	0	1	3	2	4						
検出時期, ×10 ⁴	18	4	8	2	9	7	9	9	9	10	4	3	4	8	9	9	2	5	2	5	2	5	2	5	1	3	4	3	6	8	8	1		
亀裂長さ	VT	7	10	17	5	5	7	10	9	21	32	12	14	27	11	19	10																	
	ECT	9	9	6	9	13	7	6	13	27	13	16	23	9	21	5																		
	MT	15	8	17	不可	7	11	6	23	38	20	35	30	15	19	12																		
	UT	20	不可	不可	不可	不可	不可	不可	16	8	27	15	27	12	21	43	33																	
亀裂深さ UT	不可	不可	不可	不可	不可	不可	不可	1.8	6.1	3.0	2.9	3.1	不可	2.5	6.4	不可																		

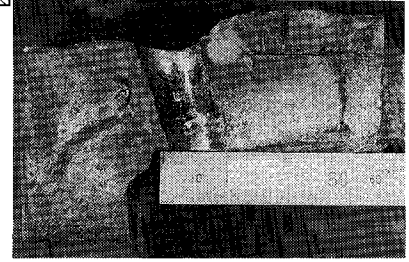
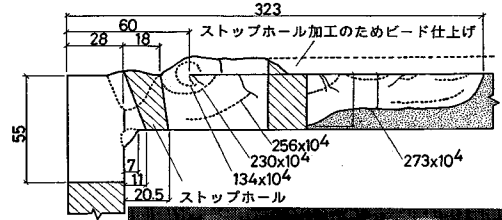
「不可」は検出できなかったもの



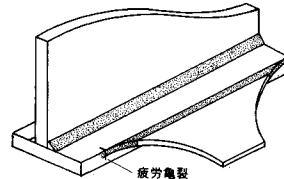
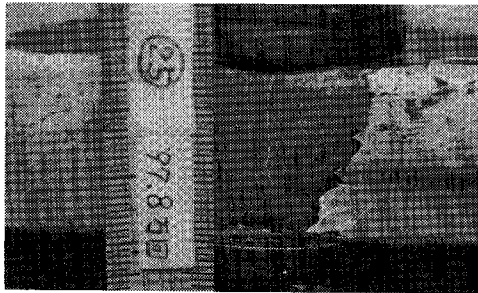
疲労亀裂



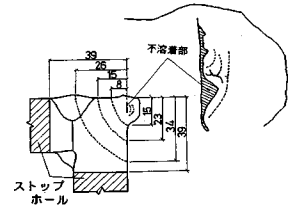
写真—8 台座板隅肉溶接に発生した亀裂 (亀裂 37, 44)



写真—9 亀裂 37 の破面



疲労亀裂

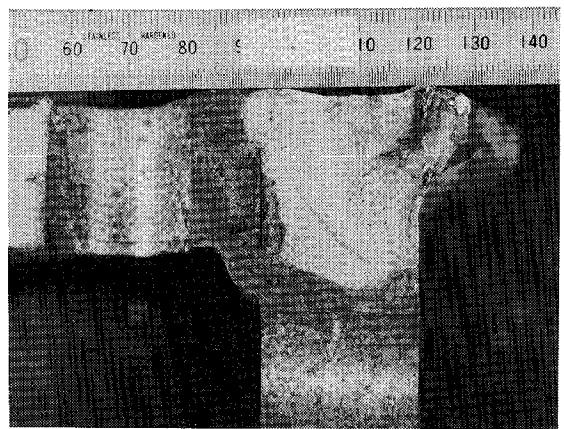


写真—10 ガセットフィレット部に発生した亀裂

た (エコー消失法). 先に行った B-c タイプに相当する亀裂の検出に関する実験室的な試験結果では, 検出限界寸法は VT で 4 mm, ECT で 5 mm であった⁴⁾. これに比べて今回の亀裂検出時の推定寸法は大きくなっている. 先の図—5 に示したように, 亀裂検出限界寸法は亀裂の進展速度と検査周期との関係に依存する. すなわち, 検査をより頻繁に行うならば, 表—2 に示した寸法より小さな亀裂の検出が可能である. 以上のことから, スカップ返し溶接部の検査とは狭隘な位置での探傷となり, 亀裂検出が悪くなることを考えあわせると, 検出限界寸法は亀裂発生位置による差異はなく, 10 mm 程度と考えるのが妥当である.

b) 台座板の隅肉溶接に発生した亀裂, E

圧縮フランジ面に取り付けた台座板の前面隅肉溶接部に亀裂が発生した (写真—8, 37, 44). 写真—9 に亀裂 37 の破面を示す. 亀裂は台座板コーナー部のルートから発生し, 側面隅肉ビードを回り込むようにしてフランジ板厚方向へ進展している. 隅肉溶接ビード表面に貫通した 168 万回に VT (指示長さ 11 mm), ECT (指示長さ 20 mm) で検出し, 塗膜除去後の MT での指示長さ



写真—11 ガセットフィレット部に発生した亀裂破面

は 25 mm であった. この亀裂は表面開口以前に手動 UT を行ったが, 内部亀裂の状態での検出は不可能であった. ルート部近傍の反射エコーが高く, 亀裂との区別ができないためである. 亀裂 44 も同じようであり, 表面に開口した 200.5 万回に, 塗膜上からの ECT (指示長さ 18 mm), VT (同 15 mm) で検出し, MT での

指示長さは20mmであった。すなわち、隅肉溶接ルート部から発生する亀裂は、ビード表面に貫通するまではUTでの検出が難しく、表面に20mm程度貫通した場合、ECT、VTで検出可能であるといえる。

c) ガセット・フィレット部に発生した亀裂、F

フランジに突合せ溶接されたガセットのフィレット部に亀裂が発生した。下フランジ側(25, 31, 32, 33)、および上フランジ側(34, 43)の6か所である。代表的な亀裂の指示模様を写真-10に、また、破面を写真-11に示す。いずれの亀裂も突合せ溶接継手表面近くの微小ブローホールもしくは内部の不溶着部から発生し、その後、表面に開口したものである。表-3はVT、ECTでの検出時期およびその指示長さを示す。VTおよびECTの併用により、亀裂長さが10mmであれば検出が可能である。なお、UTについては、亀裂がこば面近くに発生していることなどから亀裂検出の信頼性は低かった。

(3) 箱内面溶接継手に発生した亀裂の検出

箱内面のダイアフラム、リブの溶接継手に発生した亀

裂は8か所である。いずれも作用応力直角方向の隅肉溶接継手である。

写真-12に箱内面リブの隅肉溶接止端部に発生した亀裂(16, 21, 35)のMT指示模様を示す。亀裂16, 21はまず箱内面からのMTで検出したが、同時に行った外面からのUTにおいても、亀裂長さ(コーナーエコー)、亀裂深さ(ピークエコー)の測定ができた。また、亀裂35も同様に、箱外面からのUTで亀裂のコーナーエコーをつかまえた。

さらに、載荷点台座部の内面リブのスカラップ回し溶接部に、36-1, 36-2, 45の3つの亀裂が発生した。それぞれの亀裂破面スケッチを図-9に示す。亀裂36は箱内面よりMTで検出し、外面からのUTでもコーナーエコーおよびピークエコーが検出できた。亀裂45は箱内面からのVT, ECT, MTで検出し、この時点でMTの指示長さが95mmという非常に大きな亀裂に成長していた。箱外面からのUTでも、指示長さが96mm, 亀裂深さ2.5mmと推定できた。

表-4に、6つの亀裂について初期検出時および試験終了後(もしくはストップホール加工前)での推定寸法

表-3 亀裂の検出時期および推定寸法

亀裂発生位置	下フランジ側				上フランジ側		
	亀裂番号	25*	31	32	33	34*	43
検出時期, x10 ⁴	82	131	131	131	150	200	
亀裂長さ	VT	3+5	9.5	7	12	5+5	5
	ECT	検出可	9.0	6	13	8+5	6
	MT	0+6	10	9+3.5	12	6+4.5	7

*: コーナ部の亀裂であり l_1+l_2 で表した(l_1 :板表面での長さ、 l_2 :こば面側の長さ)

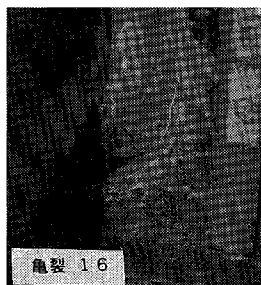
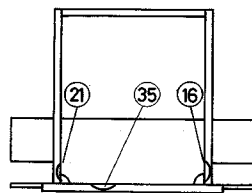
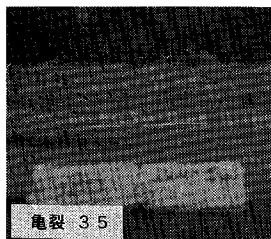


写真-12 箱内面の隅肉溶接止端部から発生した亀裂

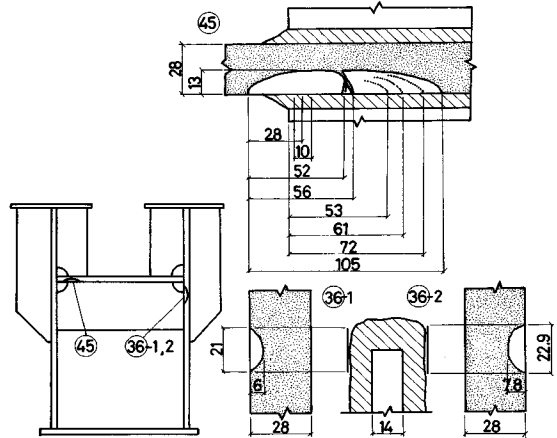


図-9 箱内面の隅肉溶接止端部から発生した亀裂の破面スケッチ

表-4 亀裂の検出時期および推定寸法

亀裂番号	16	21	35	36-1	36-2	45							
繰返数, x10 ⁴	36.8	114	75	114	150	200	150	273	150	273	240	270	
亀裂長さ	-26dB	13.0	23.5	8.0	10.0	15.0	29.0	16.0	20.0	16.0	18.0	96.0	99.0
	-10dB	9.5	23.0	4.0	8.5	14.0	26.0	10.0	14.0	4.0	11.0	40.0	44.0
m m	-6dB	5.0	21.0	3.5	5.5	10.0	16.0	6.0	7.0	3.0	7.0	9.0	12.0
	MT	20.0	不可	10.0	不可	11.0	26.0	15.0	21.0	15.0	23.0	9.5	108
亀裂深さ	実測	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	21.0	不明	22.9	不明	105
	UT	1.1	5.4	不可	1.1	不可	不可	4.7	6.1	4.7	8.2	2.5	11.0
m m	実測	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	6.0	不明	7.8	不明	13.0

「不明」は実亀裂寸法が測定できなかったもの
「不可」は非破壊試験で検出できなかったもの

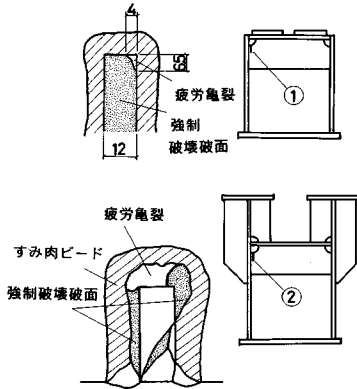


図-10 リブ側の止端、ルートから発生した亀裂

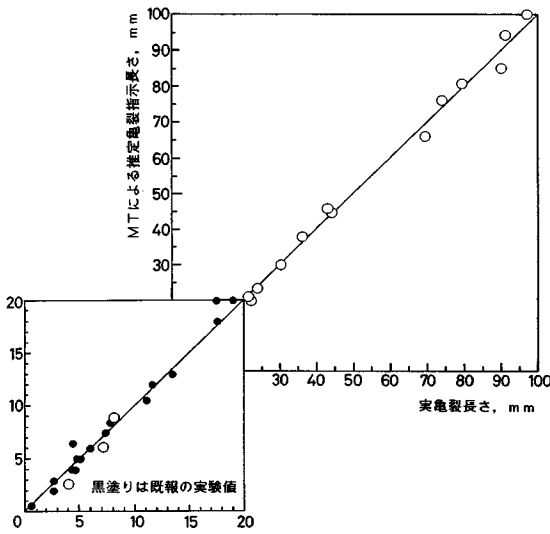


図-11 亀裂の実寸法と MT 指示長さの関係

と実測値を示す。手動 UT による亀裂指示長さは、後の図-12 で示すようにカットレベルを3段階に変えて求めた。-26 dB はエコー消失法である。止端からフランジ、ウェブへ進展する亀裂については、UT によって箱外面からの探傷で検出が可能であるといえる。

内面リブのスカラップ回し溶接部において、リブ側の止端部に沿った亀裂 (1)、ルート部から発生した亀裂 (2) が発生した。図-10 に亀裂破面スケッチを示すが、いずれも、箱内面からの MT で検出されたが、箱外面からの UT では検出することができなかった。

7. 精密探傷

いずれの亀裂も粗検査で検出後、精密検査を行った。長さ測定は、表面亀裂は MT で、裏面亀裂は UT で行った。また、深さ測定は UT 端部エコー法である。

図-11 に亀裂の最終寸法と MT の指示長さの関係を

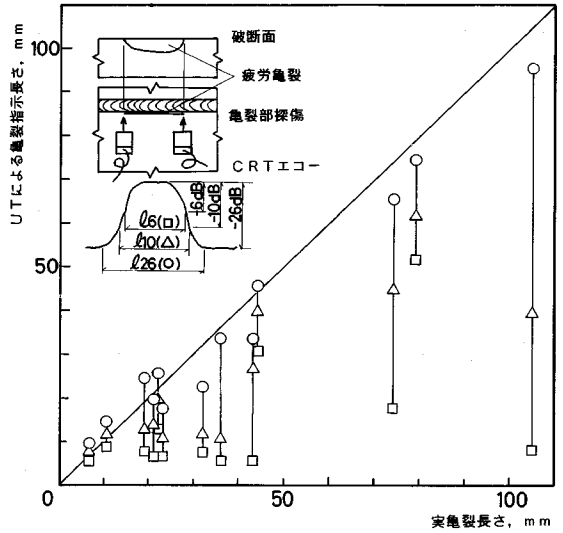


図-12 UT による亀裂長さの推定

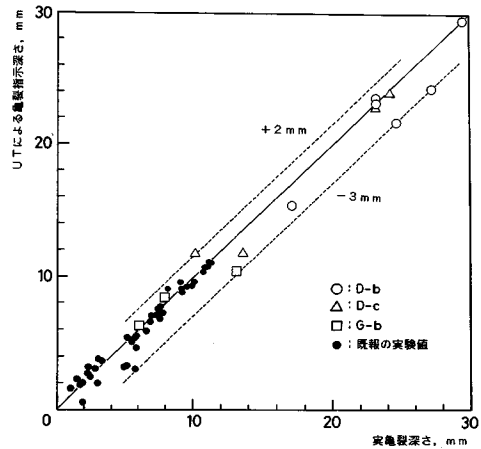


図-13 UT 端部エコー法による亀裂深さの推定

を示す。図中、既報の同様なデータについてもプロットした^{3),4)}。両者は一部を除いて非常によく対応しており、MT による寸法推定精度は±1 mm の範囲に納まっている。なお、手動 UT によっても亀裂長さの測定を行ったが、その際、カットレベルを3種類に変えた。図-12 にはそれぞれのカットレベルによる表面亀裂長さの推定値と実亀裂長さの関係を示す。3種類の測定値はいずれも過小評価の傾向にある。最も信頼の highest のはエコー消失法による値である。

図-13 に手動 UT (端部エコー法) による亀裂深さ測定結果を示す。D-c タイプはビード表面貫通後に主材方向に進展した亀裂である。先の実験結果もあわせてプロットしてある³⁾。最終亀裂深さについてプロットしたものであり、深さが大きい領域のデータとなっている。

今回の UT の深さ測定精度は ± 3 mm 程度であり、実験室的に行った試験結果と比較すると精度が悪くなっている。検査対象部の板厚、作業環境、さらには亀裂進展の複雑性などが影響するが、現場での亀裂深さ推定精度としては妥当な数値と考えられる。

8. まとめ

補剛トラス部材の各種溶接継手を盛り込んだ大型箱断面部材の繰返し載荷を行い、載荷中に発生する各種溶接継手部の疲労亀裂の検出精度について検討した。繰返し載荷は 270 万回まで行い、載荷途中、非破壊試験により 46 か所の亀裂を検出した。それぞれの亀裂について、溶接継手のタイプおよび非破壊試験条件の点からタイプ分けをし、主に、塗膜上からの亀裂検出について考察した。亀裂のタイプにより検出限界寸法は異なるが、今回適用した非破壊検査システムにより、一部の亀裂を除いて、重大な破壊に至る以前の比較的小さな時期に検出が可能であり、適切な補修・補強の処置をとるならば部材の疲労安全性を保つことが可能といえる。検査周期、亀裂の進展速度により検出限界寸法は異なるが、今回の試験結果をまとめて表-5 に示す。すなわち、

(1) 縦ビード継手において、レ形溶接ルート部から発生する亀裂の検出は表面貫通以前に可能であるが、自動 UT ができない継手の場合、内部亀裂の検出は難しい。また、内面隅肉溶接継手に発生する亀裂は箱内面

からの探傷による亀裂の存在の情報がない場合、外面からの手動 UT では、亀裂検出がかなり困難である。特に、形状的に亀裂がかなり大きくならないと検出が不可能な継手もあり、今後の問題として残る。

(2) 箱外面の溶接継手に発生する亀裂は、継手の種類により異なるが、VT, ECT の併用により表面長さが 10~20 mm であれば検出可能である。亀裂が隅肉ルート部、表面近傍の内部欠陥から発生する場合は、表面に貫通するまでは検出が困難である。

(3) 箱内面の隅肉溶接継手に発生する亀裂において、止端からフランジ、ウェブへ進展する場合は UT によって箱外面から検出が可能である。亀裂深さについては 2.5 mm 以上進展すれば測定が可能と考えられる。一方、ルート部から溶着鋼へ進展する亀裂については、主材方向へ進展しない限り検出が難しく、また、リップ側の止端部に沿って進展する亀裂は検出不可能である。

(4) 精密検査において、MT による亀裂長さ測定は ± 1 mm と精度がよいが、UT の場合は不正確である。また、UT 端部エコー法による深さ測定は実験室的に得られた値よりは悪くなるものの、 ± 3 mm の精度で推定可能である。

本試験は建設機械化研究所において実施されたものであり、研究所各位の尽力に深く感謝の意を表す。また、非破壊試験にあたっては構造物品質保証技術協会の方々のご協力を得たことを記してお礼申し上げる。さらに、海洋架橋調査会・併用橋の非破壊検査方法の検討委員会において有益なご意見を頂いた。各委員諸氏に深謝する。

表-5 各種溶接継手に発生する亀裂の検出の可否

溶接継手タイプ	亀裂発生点	亀裂タイプ	検査方法	検出の可否 ^{*1}	
縦ビード継手 外面レ形 溶接	一般部	ルート欠陥	内部亀裂	自動 UT	可(1.2φ)
	遷移部 フィレット部	ルートフェース 内部欠陥	内部亀裂	手動 UT	不可
内面すみ 肉溶接	掃継ぎ部	グラインダー傷	裏面亀裂	手動 UT	可(-) ^{*2}
	一般部	止端部	表面亀裂	VT, ECT	可(1.0mm)
スカラップ直し溶接部	止端部	上止端部	表面亀裂	VT, ECT	可(1.0mm)
		下止端部	表面亀裂	VT, ECT	可(1.0mm)
	ルート部	内部亀裂	手動 UT	不可	
台座板すみ肉溶接部	ルート部	表面亀裂	VT, ECT	可(1.0mm)	
		内部亀裂	手動 UT	不可	
ガセット突合せ溶接継手	内部溶接欠陥	表面亀裂	VT, ECT	可(1.0mm)	
		内部亀裂	手動 UT	不可	
箱内面すみ肉溶接継手	主材側止端部	裏面亀裂	手動 UT	可(-)	
	リップ側止端部	裏面亀裂	手動 UT	不可	
	ルート部	裏面亀裂	手動 UT	不可	

*1 () は検出限界寸法
*2 形状的に検出が不可能な場合あり

参考文献

- 1) Sakamoto, K., Fukazawa, M., Hamano, M. and Tajima, J.: Estimation of Fatigue Crack Growth by Ultrasonic Imaging Method, Proc. of JSCE, Vol. 2, No. 2, 1985.
- 2) 田島・福井・三木・深沢：かど溶接ルート部に発生する疲労亀裂検出に対する非破壊試験の適用性，土木学会論文集，第 386 号，1987. 10.
- 3) 三木・深沢・加藤・大睦：表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性，土木学会論文集，第 386 号，1987. 10.
- 4) 深沢・加藤・大睦・三木：非破壊試験による表面疲労亀裂検出に及ぼす塗膜の影響，土木学会論文集，第 398 号，1988. 10.
- 5) 本四公団：鋼橋等塗装基準・同解説，1983. 4.

(1989. 4. 26・受付)