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

NON-DESTRUCTIVE EXAMINATION METHOD OF CRACK DETECTION IN PAINTED STEEL BRIDGE MEMBERS

深沢 誠*・大畦久雄**・加藤昌彦***・三木千寿****

By Makoto FUKAZAWA, Hisao OHUNE, Masahiko KATOH and Chitosi MIKI

This study summarized non-destructive methods and evaluates their reliability and adaptability for the detection of fatigue cracks in painted steel bridge members. On the painting, it was possible to detect small cracks up to 5 mm length with oxide formation by visual examination. And cracks with length longer than 5 mm were detected by the eddy current examination with the suitable coil and frequency of the current. However, these were poor in the estimation of crack length. A combination of these examination over the paint and the close examination after removing the paint would be a superior detection method. For the estimation of the crack length, the magnetic particle examination was found excellent, allowing the detection of cracks with length longer than 2 mm with accuracy of better than 1 mm provided the paint was removed.

Keywords: non-destructive testing, fatigue crack, fillet welded joint, paint

1. はじめに

鋼橋の部材に疲労亀裂の発生している事例が報告されている^{1)~5)}。図—1に模式的に示したようにウェブギャップの面外変形に起因する隅肉溶接継手の疲労亀裂が多い。亀裂が発見された場合の補修方法としては、ガウジングにより亀裂を除去して再溶接を行うことが多いが、さらに、補強板を高力ボルト接合することもある。しかしながら、このような補修・補強方法は対象箇所が多いことから、実施段階では相当経費を要することになり、何とか経費を節減すべき適切な対策が必要とされている。最近では亀裂を小さいうちに発見してTIG再溶融処理を行い、亀裂の除去とともに止端部の形状改善を行う補修対策が採られた事例も報告されている⁶⁾。一方、このような補修・補強作業の中で、非破壊検査により亀裂を検出して、寸法を推定することが必要となるが、

図—1 鋼橋部材に発生する疲労亀裂

- ① 種々の非破壊試験の信頼性。
- ② コスト的に有利な補修を行うためにどれくらい小さな亀裂を検出できるか。
- ③ さらに、今後の破壊力学による寿命予測を行ううえで、どれくらいの精度で検出できるか。

などの問題点が挙げられている。そこで、著者らは先に図—1のA, Bタイプの亀裂をモデル化した供試体を用いて、塗膜のない状態での基本的な非破壊試験の適用性を検討してきた⁷⁾。ところで、ほとんどの鋼橋部材の場合には塗装が施されており、塗膜上からの非破壊試験の適用性を検討することも重要である。現在、現場での疲労亀裂の検出に対して最も多く用いられ、信頼できる方

* 正会員 工博 (株) 横河橋梁製作所
(〒260 千葉市新港 88)

** 正会員 関西エックス線 (株)
(〒733 広島市西区南観音 4-5-11)

*** 正会員 中国エックス線 (株)
(〒737 広島県呉市 3条 2-4-10)

**** 正会員 工博 東京工業大学助教授 土木工学科
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)

法は熟練者による目視検査であるといわれている。実際に、大部分の亀裂は塗装塗り変え時の錆汁などの異常により発見されることが多い。しかし、このような亀裂はすでにかなり大きく進展しているものであり、微小亀裂においては亀裂表面がほとんど開口していないので目視検査も容易ではない。したがって、その疑いのある部分のペンキや汚れをきれいに取り除かないと発見することは難しく、この場合、亀裂表面をすりつぶしてしまい浸透探傷試験による亀裂検出が困難になった例もある。

そこで、本研究では、対傾構のスティフナ隅肉溶接継手にみられる回し溶接部の止端に沿って発生する表面疲労亀裂（C タイプ）を対象に、各種非破壊試験の適用性および限界を検討するとともに、特に試験結果に及ぼす塗膜の影響について調査した。

2. 試験の概要

工場製作時も含めて、鋼橋によく利用されている非破壊試験方法をまとめて図—2 に示す。鋼橋の現場での検査で使用できる非破壊試験は、表面疲労亀裂に対しては、目視試験（VT）、浸透探傷試験（PT）、磁粉探傷試験（MT）、超音波探傷試験（UT）、渦流探傷試験（ECT）であり、放射線透過試験は疲労亀裂が面状であること、また安全面での管理、撮影に必要な作業空間の有無を考えると現場での検査にはあまり適していない。本研究では塗膜上からの非破壊試験方法としてこの5つの試験方法を取り上げ、特に目視試験（塗膜切れにより発生した錆汁の検出）および渦流探傷試験の適用性について検討した。

供試体は図—3 に示す形状のものであり、塗装後1 か月屋外に放置し、その後繰返し载荷を行った。塗膜は鋼橋に用いられる一般的な塗装系である。表—1 に塗装仕様を示すが、プライマー、鉛系さび止め、フタル樹脂の5 層塗りである。塗装膜厚は表—2 に示すように、いずれの供試体ともおおよそ 100 μm である。繰返し载荷は3°点曲げで行い、隅肉溶接止端部からの種々の大き

図—3 供試体形状

表—1 塗装仕様

工 程	塗料名	標準使用量 (g/m ²)	塗装間隔(20°C)
工場塗装	第1層 エッチングプライマー2種 または3種(鉄けた用)	スプレー 130	12H-3M
	第2層 鉛系さび止めペイント (鉄けた用)	スプレー 170	2D-1M
	第3層 鉛系さび止めペイント (鉄けた用)	スプレー 170	2D-6M
現場塗装	第4層 長油性フタル樹脂塗料 中塗(鉄けた用)	はけ 110	24H-15D
	第5層 長油性フタル樹脂塗料 上塗(鉄けた用)	はけ 105	

表—2 供試体の塗膜厚

マイクロテス III
ELECTRO-PHYSIK
磁気式膜厚測定器
(μm)

	A面						B面						平均
	R			L			R			L			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
G12	160	110	160	100	120	105	115	115	105	75	65	90	110
G13	135	130	130	80	80	120	155	135	165	95	125	100	121
G14	105	90	70	130	105	90	110	85	90	120	145	135	106
G15	115	140	135	105	115	105	110	70	90	90	105	105	106
G16	110	85	90	75	95	110	95	125	95	135	110	85	101
G17	80	100	80	120	100	85	85	60	90	85	115	110	93
G18	85	85	75	125	110	100	130	105	110	110	120	105	105
G19	135	120	160	100	95	95	85	70	85	110	105	100	105
G20	105	120	130	95	130	150	85	120	130	120	105	105	116
G21	85	100	95	85	95	85	85	70	90	90	80	105	89
G22	175	105	140	105	90	75	80	110	115	105	95	95	108

図—2 各種の非破壊試験方法

さの亀裂を発生させた。亀裂は、こば面もしくはコーナー部から発生し、板厚 10 mm を貫通して進展する。亀裂発生部近傍での応力は 100~140 MPa、繰返し数は 25 ~150×10⁴ である。付表—1 には亀裂のタイプおよび寸法をまとめて示す。亀裂発生後さらに 1 か月屋外に放置し、毎日水道水を噴霧して亀裂部より錆汁を発生させた。このような亀裂発生部に対して、まず塗膜上から VT、ECT、MT、PT、UT の 5 つの非破壊試験を行い、その後、塗膜を除去して同様な試験を繰返しした。塗膜除去は、電動グラインダーを使用すると微小亀裂をつぶしてしまう危険性があるために不適当と判断して、塗膜剝離液を用いて行った。非破壊試験終了後、亀裂破面を露呈

して実亀裂寸法と非破壊試験による推定寸法との対応を検討した。

3. 渦流探傷試験

(1) 試験方法

渦流探傷試験⁹⁾は携帯型および搬用型の2種類の装置を用いて、それぞれについて試験コイルを種々かえて亀裂検出能を検討した。表—3に使用装置および試験コイルを示す。試験コイルは市販のD、P、WタイプとF(鉄芯のコイル径14mm)およびS(空芯のコイル径9mm)の5つのタイプであり、F、Sについては試験周波数を

かえて行った。図—4に試験コイルの形状を示す。ここで、Wタイプのコイル形状は不明のために図示していない。Wタイプは止端部のジグザグ操作(溶接止端部に向かって前後走査しながら溶接線に平行に移動する走査)であり、その他は平行操作(前後走査を伴わず溶接止端部に沿って平行に移動する操作)である。塗膜上からの試験では磁粉探傷試験前とし、塗膜除去後の試験は磁粉探傷試験による残留磁気の影響を極力小さくするために、脱磁処理を行った。

写真—1、写真—2には、携帯型および搬用型での探傷状況を示す。渦流探傷はコイルに交流電流を流すことによって、試験体に発生する渦電流が欠陥および材質変化の影響で変化するのを検出する方法である。携帯型(試験コイルD、Pタイプ)では亀裂の有無をヘッドホンの可聴音の有無と音の高低(亀裂発生部の真上では音が高くなる)から判断した。搬用型(W、F、Sタイプ)では、健全部と亀裂発生部から得られるCRT上での位相角の相違から判断した。写真—3に、WおよびFタイプについて健全部と亀裂発生部のCRT波形の例を示す。Wタイプでは健全部のCRT波形はX軸(水平)

表—3 渦流探傷試験装置および条件

装 置	試験コイル		感 度
	分 類	名 称	
携帯型 ブリッジ アンバ ランス方式	単一方式	Dタイプ (鉄心) Pタイプ (鉄心)	ビード止端健全部 においてメータ目盛 りの中央部に設定
搬用型	自己比較方 式	Wタイプ (鉄心) Fタイプ (鉄心 コイル径14mm) Sタイプ (空心 コイル径9mm)	人工スリット 0.2W×2.0H×10Lを Y軸方向に10目盛

写真—1 渦流探傷試験状況(携帯型)

写真—2 渦流探傷試験状況(搬用型)

図—4 渦流探傷試験コイル

写真—3 渦流探傷試験の代表的な CRT 波形

表—4 渦流探傷試験結果

亀裂の有無
○判定 OK
×判定 NO

亀裂		塗膜上からの探傷										塗膜除去後の探傷										試験片
亀裂形状	ℓ mm	D 5 kHz	P 5 kHz	W 100 kHz	F 60 kHz	F 30 kHz	S 30 kHz	S 60 kHz	D 5 kHz	P 5 kHz	W 100 kHz	F 60 kHz	F 30 kHz	S 30 kHz	S 60 kHz	試験片						
亀裂なし		0	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	16LA					
		○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	16LB					
		○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	22RA					
		○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	22RB
	0	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	17LB					
		○	○	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	17LA					
		○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18LA					
		○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	18LB
	0	○	○	○	×	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	13RA					
		○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	13RB					
		○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	22LB					
		○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	18LA					
亀裂あり		0.7	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	22LA					
		1.5	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	19LA					
		1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	18LA					
		1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	12LA					
		2.6	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	21LA					
		3.4	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	15RB					
		5.3	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	19RA					
		5.5	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	20RA
	0.7	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	16RA					
		2.7	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	14LB					
		2.7	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	12RA					
		4.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	14RB					
		4.4	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	14RA					
		4.4	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	17RB					
		4.7	×	×	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	×	○	16RB					
		4.8	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	20RB					
		4.9	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	14LA					
		6.0	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	17RA					
		7.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20LB					
		7.7	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	12RB					
		11.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20LA					
		11.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20RA					
		13.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13LB					
		17.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15LA					
		17.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15LB					
19.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13LA							

上に現われているが、亀裂発生部の波形は Y 軸（垂直）上に認められ、位相角が 90°ずれていることがわかる。一方、F タイプでは W タイプに比べて渦電流の分布範囲が広いため、亀裂発生部の波形は隅肉溶接止端部と亀裂の信号が合成されて現われる。この波形からだけでは亀裂有無の判別を行うことは難しく、位相角の相違が開始める位置と供試体の部材端との相対的な位置関係から判断した。

(2) 試験結果

代表的な亀裂破面を写真—4 に示す。(a)、(b) は板厚を貫通した亀裂であり、それぞれ側面において 11 mm、4.4 mm まで進展している。(c) はこぼ面とコーナ部に亀裂が発生している例である。渦流探傷試験においては、たとえば (a) の亀裂については、A 面からの探傷 (G-20 LA) では長さ 11 mm の亀裂、B 面からの探傷 (G-20 LB) では長さ 7.4 mm の亀裂としている。(c) については直接探傷ができず、ここでは亀裂のないものとして扱った。表—4 に渦流探傷試験結果を示す。探傷は塗膜上および塗膜除去後について 7 種類の試験コイルの条件で行い、亀裂の有無の判定の可否で示してある。表では探傷面側の亀裂の有無に大別し、さらに亀裂に関してはコーナー亀裂、貫通亀裂に分類して大きい順に並べてある。

貫通亀裂についてみると、長さが 10 mm 以上 (写真—4 の (a)) であると、塗膜の有無にかかわらず、いずれのプロープでも検出が可能である。しかし、より小さい亀裂を検出する場合には、W タイプ、F タイプ (周

波数 60 kHz) が適しており、やはり塗膜の有無にかかわらず 4.4 mm (写真—4 の (a)) の亀裂の検出が可能

写真—4 代表的な亀裂破面

表一五 渦流探傷試験による検出率および空振り率

探傷器	プローブ	亀裂の検出率,%		空振り率,%	記録性	作業性
		10<ℓ (5個)	4<ℓ (14個)	(18個)		
携帯型	D (5kHz)	100%	50%	0%	なし	電源不必要
	P (5kHz)	100%	71%	0%		
据用型	W (100kHz)	100%	100%	50%	あり	電源必要
	F (60kHz)	100%	93%	11%		
	F (30kHz)	100%	71%	6%		
	S (60kHz)	100%	64%	6%		
	S (30kHz)	100%	57%	6%		

である。また、コーナー亀裂に関しても、この2つのプローブでは5 mm以上の亀裂の検出が可能である。

一方、亀裂のない場合についてみると、Wタイプでは亀裂ありと判定（空振り）するものが多い。Wタイプは他のプローブと比較して渦電流の分布範囲が狭く、集中していることから端面（こば面）効果の影響が小さく、微小亀裂の検出が可能である。しかしながら、材質の不均一、残留応力、コイルと試験面とのなす角度など、位相角への影響が他のタイプに比べて大きく空振り率も多くなっている。今回の実験においては亀裂と判定した位相角を10°程度（塗膜除去後は20°程度）としたが、設定角度をもう少し大きくするならば空振り率は減少する。ただし、この場合には、検出限界寸法が大きくなる。

また、Fタイプは合致率、空振り率とも他のコイルと比較するとバランスがとれており、良好な結果となっている。しかしながら、Fタイプはリフトオフ信号がWタイプに比べて大きく、また、溶接止端部に沿った平行走査により、コイルと隅肉溶接端部（こば面）の相対位置から亀裂の有無を判定することから、探傷者の技量に左右され、再現性の点では十分とはいえない欠点もある。

今回モデル化したような回し溶接端部から発生する亀裂の渦流探傷試験においては、端部からの疑似信号により亀裂信号がマスクされること、あるいは他の要因による疑似信号の発生などから、亀裂長さの推定値と実亀裂長さの間にはかなりばらつきが大きく、正確な寸法推定は不可能であった（付表一2に推定亀裂寸法を示す）。このようにみてくると渦流探傷は塗膜上からの亀裂の有無を判定する粗探傷として有効な方法と考えられる。

表一五に塗膜上からの探傷について亀裂検出限界寸法を10 mm、4 mmとした場合の各プローブでの亀裂検出率および空振り率を示す。亀裂の検出限界寸法を小さくして、さらに検出率を高めると、空振り率が高くなる傾向にある。したがって、渦流探傷は適用する条件によって適切なプローブを選択する必要がある。たとえば、亀裂検出限界寸法を10 mmとすると、作業性の点からもD、Pタイプがよく、さらに検出限界寸法を小さくする

場合には、空振り率が高くなるもののFタイプ（周波数60 kHz）、Wタイプの使用が適している。この場合、探傷記録を残すことも可能である。

4. 目視、磁粉、浸透探傷試験

(1) 試験方法

渦流探傷試験と同様に、目視、磁粉、浸透探傷試験について、塗膜上、塗膜除去後の亀裂検出性能の検討を行った。目視検査はルーペを用いて亀裂の有無を観察し、特に、塗膜上からの試験では主として塗膜切れ、錆汁の発生をチェックした。磁粉探傷試験、浸透探傷試験は亀裂の検出性能、現場での作業性を考慮して蛍光湿式交流極間法、溶剤除去性染色浸透法とした。表一六、表一七にはそれぞれの探傷条件を示す。

表一六 磁粉探傷試験の装置および条件

ハンディマグナ	小型携帯用
ブラックライト	JIS A2 15/100を明瞭に識別できるもの
磁 粉	エアゾール式蛍光磁粉液
磁化電流の種類	交 流
磁化方法	極 間 法
磁極間の磁場の強さ	30 Oe以上
磁粉適用に対する磁化の時間	連 続 法
通電時間	5-7秒
磁粉の粒度	3μ以下
磁粉の分散媒	エアゾールタイプの油ベース
検査液濃度	1.5g/ℓ
標準試験片	JIS A2 15/100 円形
備 考	磁極の接触状態が十分であることを確かめて通電する。また、溶接止端部に検査液が直接かからないように散布する

表一七 浸透探傷試験の装置および条件

浸透剤	溶剤除去性染色浸透液
洗浄剤	有機溶材の洗浄液
現像剤	速乾式現象剤
方 法	染色溶剤除去性
検査面温度	10~18℃
浸透時間	30~40分
現像時間	5~60分
備 考	亀裂開口部に潜んでいる不純物を除去するため、スプレー式洗浄剤のノズルを出来るだけ開口部分に近づけて散布する。その後の乾燥はドライヤー等を用い、開口部に入り込んだ洗浄剤を完全に除去する。

(2) 試験結果

表-8に試験結果をまとめて示す。目視検査、磁粉探傷試験、浸透探傷試験について塗膜上、塗膜除去後の試験における亀裂検出の有無を表わしたものである（それぞれの推定寸法については付表-3に示す）。表では亀裂をこば面の亀裂、コーナー亀裂、貫通亀裂に分類し、寸法の大きい順に並べてある。なお、表中に渦流探傷試験、超音波探傷試験結果を併記したが、渦流探傷試験に関しては、表-4のFタイプ（60 kHz）のプロブの結果であり、超音波探傷試験については次章で詳細に述べることにする。

こば面の亀裂については、塗膜の有無にかかわらず、いずれの試験方法でも検出は困難である。写真-5に最も大きい亀裂の破面（G-13 R）を示すが、こば面の亀裂は表面長さ、深さとも小さく、また、作業的にもスラップ部の狭い部分に位置するために検出しづらい。なお、超音波探傷試験、渦流探傷試験は探傷が作業上困難なため、対象外としている。

(3) 塗膜上からの亀裂検出

コーナー亀裂と貫通亀裂についての塗膜上からの試験についてみる。いずれの亀裂も長さが3.4 mmで塗膜切れを起こし、その後の暴露により錆汁が発生して目視検査が可能となっている。長さ3.4 mmのコーナー亀裂（G-15 RB）の破面および塗膜上からの試験結果を写真-6に示す。回し溶接部の止端部に沿って錆汁の発生が認められ目視検査での亀裂の確認が可能である。また、磁粉探傷試験、浸透探傷試験でも同様に亀裂指示模

様が現われている。ところで、今回、亀裂が発生していない4か所の回し溶接部のうち、1か所（G-22 RA）において塗膜切れが認められた。写真-7に探傷結果を示すが、この場合磁粉探傷試験、浸透探傷試験でも亀裂指示模様が現われている。塗膜上からの検査では、磁粉探傷試験、浸透探傷試験の結果は塗膜切れによって左右され、試験方法自体の信頼性は低い。

図-5に目視検査による推定亀裂寸法と実寸法の対応を示す。目視検査による寸法推定はかなりばらつきが大きくなっている。したがって、塗膜上からの目視検査のみで亀裂寸法を推定するのは困難であり、現場での亀裂

写真-5 こば面に発生した亀裂（G-13 R）

写真-6 代表的な亀裂の探傷試験結果（G-15 RB）

表-8 探傷結果

亀裂形状	ℓ mm	塗膜上からの探傷						塗膜除去後の探傷						試験片
		VT	MT	PT	UT	ET	VT	MT	PT	UT	ET	VT	MT	
	1.1	×	×	×	—	—	×	×	×	—	—	×	×	17L
	5.3	×	×	×	—	—	×	×	×	—	—	×	×	18R
	5.7	×	×	×	—	—	×	×	×	—	—	×	×	13R
	0.7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	22LA
	1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	19LA
	1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	18LA
	1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	12LA
	2.6	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	21LA
	3.4	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	15RB
	5.3	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	19RA
	5.5	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	21RA
	0.7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	16RA
	2.7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	14LB
	2.7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	12RA
	4.0	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	14RB
	4.4	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	×	×	14RA
	4.4	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	17RB
	4.7	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	16RB
	4.8	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	20RB
	4.9	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	14LA
	6.0	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	17RA
	7.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20LB
	7.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12RB
	11.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20LA
	11.5	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	20RA
	13.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13LB
	17.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15LA
	17.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15LB
	19.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13LA

亀裂の有無
○判定 OK
×判定 NO

写真—7 代表的な亀裂の探傷試験結果 (G-22 RA)

図—5 目視検査による推定寸法と実寸法の関係 (塗膜上)

の有無を確認する粗検査として有効であるといえる。この場合、検出限界はおおよそ 4 mm と判断できる。ただし亀裂発生を伴わない塗膜切れもあり、現場での作業では先の渦流探傷試験を併用するのが良好と考えられる。

(4) 塗膜除去後の亀裂検出

塗膜除去後の検査においては、目視検査、浸透探傷試験とも塗膜上に比べて検出限界寸法が大きくなっている。目視検査では塗膜上からは主に錆汁の発生で判断し、

塗膜切れ部を検出したが、塗膜を除去した場合、疲労亀裂はきわめてシャープであり、ほとんど開口していないためにその識別が困難になるものと考えられる。また、浸透探傷試験に関しても亀裂面への浸透液の浸み込みが十分でないことから亀裂と健全部とのコントラストが低く、小さな亀裂の検出が困難になるものと推定できる。

しかしながら、磁粉探傷試験は目視検査、浸透探傷試験に比べて検出精度が向上し、貫通亀裂で 0.7 mm、コーナー亀裂でも 1.5 mm の微小亀裂の検出が可能である。図—6、図—7 に磁粉探傷試験、浸透探傷試験について、塗膜除去後の推定寸法と実亀裂寸法の関係を示す。磁粉探傷試験は 2 mm 未満のコーナー亀裂の一部は検出できず、検出限界は安全側からみて 2 mm と判断することができる。また、寸法推定精度はほとんどが ±1 mm の範囲内に収まっている。浸透探傷試験は 6 mm 未満の亀裂については検出できない場合があり、検出限界はおおよそ 6 mm となる。寸法推定についても全体に過小評価と

図—6 磁粉探傷試験による推定寸法と実寸法の関係 (塗膜除去後)

図—7 浸透探傷試験による推定寸法と実寸法の関係 (塗膜除去後)

写真—8 塗膜上および塗膜除去後の探傷試験結果 (G-14 LA)

なっている。この傾向は、亀裂のタイプが異なるものの、先に行った図—1 の A, B タイプの亀裂に関する実験と同じである。

写真—8 に代表的な試験結果を示す。長さ 4.9 mm の貫通亀裂 (G-14 LA) に関して、塗膜上、塗膜除去後の目視検査、磁粉探傷試験、浸透探傷試験を比較して並べてある。塗膜上からの目視検査、磁粉探傷試験、浸透探傷試験ではいずれも亀裂を検出しているが、塗膜除去後においては、磁粉探傷試験は明確に指示模様が現われているものの、目視検査、浸透探傷試験では亀裂が検出できていない。

図—8 超音波探傷試験方法

5. 超音波探傷試験

超音波探傷試験に関しては、亀裂の検出および寸法推定、さらに、亀裂形状の確認の可能性を検討した。図—8 に探傷の概要を、表—9 には使用機器および探傷条件を示す。試験に際してあらかじめ塗膜の影響を調査したが、今回の供試体の 100 μm 程度の塗膜は探傷感度にはほとんど影響を及ぼさず、低下量は 0～2 dB であった。したがって、探傷にあたっては塗膜上、塗膜除去後とも同じ感度としている。亀裂の検出は、亀裂と板表面にできるコーナーからのエコーを捕える方法であり、このコーナーエコーが消失する位置を亀裂端部と判断して寸法を求めた。

図—9 に、塗膜上、塗膜除去後のそれぞれについて、推定亀裂寸法と実亀裂寸法の関係を示す。プロットはかなりばらついているが、塗膜上、塗膜除去後の差はほとんどみられない。貫通亀裂の検出限界寸法は 5 mm であり、コーナー亀裂でも長さが 5 mm であれば十分に検出可能である。今回使用した探触子はミニチュアタイプであるが、その幅が 10 mm となっている。したがって、

表—9 超音波探傷試験の装置および条件

探傷器	パルス反射式
探触子	高分解能型ノーマルミニチュア (5MHz, 45°)
探傷感度調整用試験片	スリット試験片 (0.2W×1.0H×10 ℓ)
コーナーエコーの検出	0.2W×1.0H×10 ℓ のコーナーエコーを CRT 上で 100% とし、さらに 20dB 高めた感度とする
端部エコーの検出	0.2W×1.0H×10 ℓ の端部エコーが検出される感度を最低限のレベルとし、実際の探傷においては、ノイズエコーが CRT 上で 10% 程度現れる感度で行う。
周波数	5MHz
屈折角 (公称)	45°
接触媒質	グリセリン 75% 以上

亀裂寸法が 5 mm 未満であると探触子は探傷面から外れてしまう。この場合、探触子を傾けて探傷することになるが、ビームが亀裂面に直角にあたらず、亀裂検出精度が悪くなるものと考えられる。

一方、推定寸法はいずれもかなり過大評価となってお

図—9 超音波探傷試験による推定寸法と実寸法の関係

り、正確な寸法推定は困難であるといえる。亀裂は止端部に沿って発生しており、供試体端部の影響、およびアンダーカットと亀裂との判別が難しいことから、過大評価になったものと考えられる。

なお、コーナー亀裂に対して、端部エコー法による亀裂形状の推定を試みた。今回板厚が薄いこと、亀裂が比較的小さく端部に位置することにより、明確な端部エコーは捕えられなかった。したがって、回し溶接部の材端の止端から発生する亀裂に対しては、超音波探傷試験はコーナーエコーによる亀裂の検出しかできず、この場合、磁粉探傷試験に比べて検出限界寸法、寸法推定精度はかなり悪くなっている。

6. ま と め

塗装が施された鋼橋部材を対象にして、回し溶接端部から発生する疲労亀裂について各種非破壊試験の適用性について検討した。表—10 に、亀裂検出限界寸法および寸法推定精度をまとめて示すが、結論を要約すると以下のとおりである。

(1) 塗膜上からの亀裂検出に対しては、塗膜切れにより錆汁が発生している場合は、目視検査でも 4 mm 以上の亀裂の検出が可能であり、磁粉探傷試験、浸透探傷試験での検出はこの塗膜切れに左右されるものと考えられる。さらに、渦流探傷試験においては、適切なプローブと探傷条件を選ぶならば 5 mm 以上の亀裂の検出が可能である。

(2) 目視検査、渦流探傷試験は正確な寸法推定が不可能であり、塗膜上からの粗探傷として適用し、何らかの亀裂指示が認められた場合には塗膜を除去して精密検査を行うのがよい。

(3) 精密検査としては磁粉探傷試験が優れており、2 mm 以上の亀裂に対して ±1 mm の精度で検出が可能である。浸透探傷試験、超音波探傷試験による亀裂寸法

表—10 各種非破壊試験の亀裂検出限界寸法および精度

	亀裂検出限界寸法,mm		寸法推定精度
	塗膜上	塗膜除去後	
目視検査	4.0	8.0	ばらつき大
磁粉探傷試験	(4.0)	2.0	適正(±1mm)
浸透探傷試験	(4.0)	8.0	過小評価
超音波探傷試験	5.0	5.0	過大評価
渦流探傷試験	5.0	5.0	不可

推定は磁粉探傷試験に比べると信頼性が低い。

なお、ここで述べた非破壊試験の結果は亀裂の開口量に左右され、どのような応力状態によって進展したかによって異なってくる。さらに、探傷者、探傷装置によっても影響を受ける。また、塗膜に関しても、1 か月後のものと数年経過した塗膜とは影響度合も異なる。さらに、室内と屋外の現場との作業環境の違いによってもその度合が異なる。したがって、今後とも、種々の条件のもとで実験を進めるとともに、現場での実作業を行うなかで広くデータを収集して検討していく必要がある。

付表—1 供試体の亀裂寸法

試験片		亀裂形状	亀裂寸法 , mm		
			ℓ_A	ℓ_t	ℓ_B
G-12	R	○	2.7	9.5	7.7
	L	△	1.5	2.8	—
G-13	R	□	—	5.7	—
	L	○	19.0	8.7	13.4
G-14	R	○	4.4	6.1	4.0
	L	○	4.9	9.7	2.7
G-15	R	△	—	5.3	3.4
	L	○	17.4	9.3	17.5
G-16	R	○	0.7	8.9	4.7
	L	なし	—	—	—
G-17	R	○	6.0	9.5	4.4
	L	□	—	1.1	—
G-18	R	□	—	5.3	—
	L	△	1.5	0.8	—
G-19	R	△□	5.3	3.1 + 1.9	—
	L	△	1.5	0.9	—
G-20	R	○	11.5	9.6	4.8
	L	○	11.0	9.6	7.5
G-21	R	△	5.5	1.6	—
	L	△	2.6	2.4	—
G-22	R	なし	—	—	—
	L	△	0.7	8.6	—

付表—2 渦流探傷試験による推定亀裂寸法

亀裂		亀裂長さ, l , mm																試験片
		塗膜上からの探傷								塗膜除去後の探傷								
亀裂形状	l mm	D 5 kHz	P 5 kHz	W 100 kHz	F 60 kHz	F 30 kHz	S 60 kHz	S 30 kHz	D 5 kHz	P 5 kHz	W 100 kHz	F 60 kHz	F 30 kHz	S 60 kHz	S 30 kHz			
コーナ 亀裂	0.7	x	25.0	12.0	x	x	x	x	x	x	21.5	x	x	x	x	22LA		
	1.5	x	12.0	16.0	x	4.0	x	x	x	x	4.0	x	x	2.0	x	19LA		
	1.5	x	x	12.5	x	x	x	x	x	x	x	10.5	x	x	x	18LA		
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	12.0	7.0	x	x	x	x	12LA		
	2.6	x	10.0	x	5.0	x	x	x	x	10.5	5.0	x	x	4.0	x	21LA		
	3.4	x	9.0	7.5	2.0	x	x	x	x	10.0	3.0	x	x	x	x	15RB		
	5.3	14.0	26.5	34.0	4.0	5.0	6.0	7.0	10.0	x	10.0	5.0	7.0	10.0	7.0	19RA		
	5.5	x	14.0	14.0	6.0	4.0	x	x	x	21.5	5.5	5.0	x	6.0	x	20RA		
	0.7	x	x	x	2.0	x	x	x	x	7.0	x	x	x	4.0	2.0	16RA		
	2.7	x	x	x	3.0	x	x	x	x	x	8.0	x	x	x	2.0	14LB		
貫通 亀裂	2.7	x	x	16.0	x	3.0	x	x	x	11.0	5.0	x	x	5.0	x	12RA		
	4.0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	14RB		
	4.4	x	11.5	10.0	x	x	x	x	x	10.0	x	13.0	x	4.0	2.0	14RA		
	4.4	x	x	11.0	3.0	3.0	x	x	x	15.5	10.5	4.0	x	4.0	2.0	17RB		
	4.7	x	x	5.5	3.0	5.0	3.0	x	x	11.6	4.0	4.0	4.0	7.0	2.0	16RB		
	4.8	x	x	6.5	2.0	x	x	x	x	15.5	6.0	3.0	x	3.0	x	20RB		
	4.9	x	x	6.0	4.0	x	x	3.0	x	x	5.5	4.0	4.0	3.0	2.0	14LA		
	6.0	x	x	10.0	5.0	7.0	x	x	8.0	25.0	10.0	7.0	6.0	7.0	x	17RA		
	7.4	10.5	16.0	21.0	11.0	4.0	4.0	7.0	13.3	21.0	10.0	14.0	12.0	9.0	13.0	20LB		
	7.7	x	11.0	16.0	10.0	3.0	2.0	x	10.0	24.0	10.0	7.0	x	4.0	3.0	12RB		
亀裂あり	11.0	13.0	17.5	14.5	15.0	9.0	5.0	6.0	14.0	14.0	8.5	11.0	8.0	11.0	8.0	20LA		
	11.5	13.0	14.5	14.5	6.0	4.0	5.5	6.5	21.0	5.0	11.5	6.0	4.0	5.5	3.4	20RA		
	13.3	18.5	22.0	26.0	14.0	14.0	11.0	11.0	18.0	22.8	17.0	17.0	17.0	17.0	18.0	13LB		
	17.4	19.0	24.0	30.0	21.0	17.0	12.0	12.0	15.0	20.0	17.0	20.0	17.0	19.0	17.0	15LA		
	17.5	18.5	23.0	27.0	18.0	14.0	12.0	12.0	15.0	20.5	17.5	19.0	13.0	15.0	9.0	15LB		
	19.0	20.0	29.5	19.5	16.0	18.0	16.0	16.0	18.0	22.0	24.0	22.0	19.0	18.0	17.0	13LA		

付表—3 各種非破壊試験による推定亀裂寸法

亀裂長さ, l , mm													
亀裂形状	l	塗膜上からの探傷				塗膜除去後の探傷				試験片			
		VT	MT	PT	UT	VT	MT	PT	UT
1.1	x	x	x	—	x	x	x	—	17L			
	5.3	x	x	x	—	x	7.5	x	—	18R			
	5.7	x	x	x	—	x	x	x	—	13R
0.7	x	x	x	x	x	x	x	x	22LA			
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	19LA			
	1.5	x	x	x	x	x	1.5	x	x	18LA			
	1.5	x	2.5	x	x	x	4.0	x	x	12LA			
	2.6	x	x	x	x	x	3.0	x	3.0	21LA			
	3.4	2.5	2.5	2.5	2.5	x	2.2	x	13.0	15RB			
	5.3	4.0	6.0	4.0	8.0	x	4.0	5.0	8.5	19RA			
	5.5	5.5	5.0	5.5	7.0	x	5.0	x	7.5	21RA			
	0.7	x	x	x	x	x	0.5	x	x	16RA			
	2.7	x	x	x	x	x	2.0	x	x	14LB
2.7	x	x	x	5.5	x	3.0	2.5	7.0	12RA			
	4.0	2.5	3.0	2.5	5.5	2.5	2.5	2.0	5.5	14RB			
	4.4	5.0	5.0	5.0	8.5	x	6.5	1.0	8.5	14RA			
	4.4	4.5	9.5	4.6	x	x	4.0	1.5	6.0	17RB			
	4.7	4.0	5.0	4.0	x	x	4.0	x	x	16RB			
	4.8	0.8	6.0	1.0	7.5	2.5	5.0	2.5	6.5	20RB			
	4.9	5.0	5.0	5.0	x	x	5.0	x	5.0	14LA			
	6.0	4.0	7.0	7.0	10.0	x	6.0	3.0	11.0	17RA			
	7.4	11.0	10.0	11.5	26.7	5.5	7.5	7.0	13.0	20RA			
	7.7	8.0	8.0	8.0	11.5	8.0	8.5	7.0	11.5	20LB
11.0	11.0	11.0	11.5	26.0	7.0	10.5	10.5	11.0	12RB			
	11.5	11.0	9.0	11.0	14.5	x	12.0	11.0	14.5	20LA			
	13.4	17.0	15.0	17.0	17.5	11.0	13.0	12.0	17.5	13LB			
	17.4	20.0	20.0	20.0	22.5	17.0	20.0	19.5	22.0	15LA			
	17.5	16.0	17.0	17.0	20.0	12.0	18.0	13.0	20.0	15LB			
	19.0	19.5	20.0	20.0	22.5	17.0	20.0	18.0	20.5	13LA			

参 考 文 献

- 1) 明石：溶接部疲労の現状と研究，土木学会論文報告集，第 350 号，1884. 10.
- 2) 三木：構造物と安全性－疲労と安全，土木技術，Vol. 38, No. 4, 1983. 4.
- 3) 西川：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol. 17, No. 8, 1983. 8.
- 4) 阿部・谷口・阿部：鋼鉄道橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，Vol. 17, No. 8, 1983. 8.
- 5) 谷口・阿部・阿部：鉄道橋の疲労変状－垂直補剛材下端，構造工学論文集，Vol. 33 A, 1987. 3.
- 6) 坂本・阿部・深沢：TIG 処理による疲労亀裂補修の施工試験，土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集，1987. 9.
- 7) 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，土木学会論文報告集，第 386 号，1987. 10.
- 8) 日本非破壊検査協会：非破壊試験概論，1984.
- (1987. 10. 28・受付)