

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*・大睦久雄**・加藤昌彦***・三木千寿****

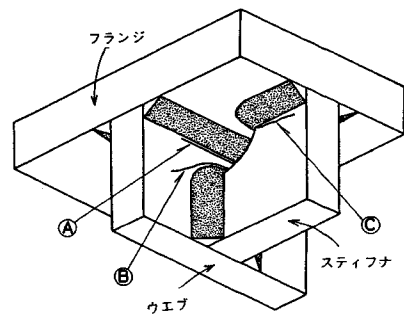
By Makoto FUKAZAWA, Hisao OHUNE, Masahiko KATOH and Chitosi MIKI

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)}。図一1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、



図一1 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、著者らは先に図一1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。実際には、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、その後繰り返し载荷を行った。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。塗膜厚は表-2に示すように、いずれの供試体ともおおよそ100μmである。繰り返し载荷は3°点曲げで行い、隅肉溶接止端部からの種々の大き

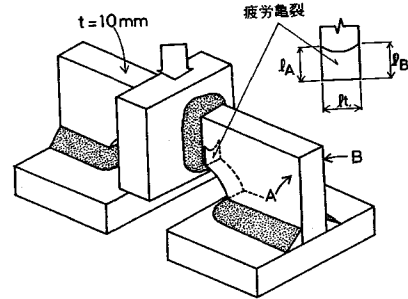
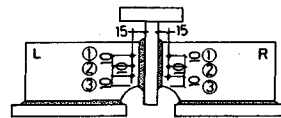


図-3 供試体形状

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



マイクロテストⅢ ELECTRO-PHYSIK 磁気式膜厚測定器 (μm)

	A側						B側						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	90	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

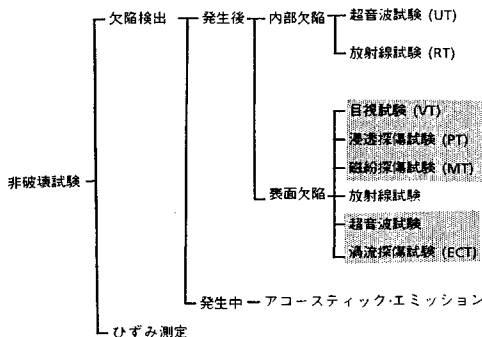


図-2 各種の非破壊試験方法

きの亀裂を発生させた。亀裂は、こぼ面もしくはコーナー部から発生し、板厚10mmを貫通して進展する。亀裂発生部近傍での応力は100~140MPa、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り返した。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相当と判断して、塗膜剥離液を用いて行った。非破壊試験終了後、亀裂破面を露呈

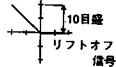
して実亀裂寸法と非破壊試験による推定寸法との対応を検討した。

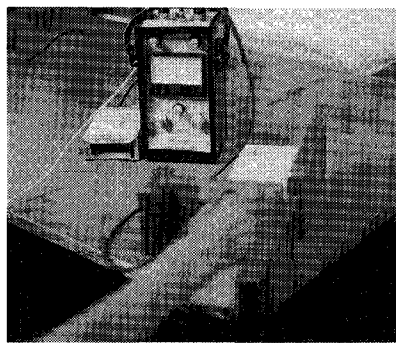
3. 渦流探傷試験

(1) 試験方法

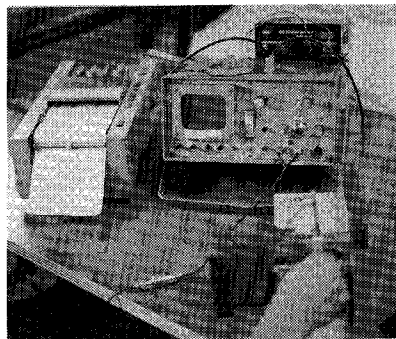
渦流探傷試験⁹⁾は携帯型および搬用型の2種類の装置を用いて、それぞれについて試験コイルを種々かえて亀裂検出能を検討した。表—3に使用装置および試験コイルを示す。試験コイルは市販のD, P, WタイプとF(鉄芯のコイル径14mm)およびS(空芯のコイル径9mm)の5つのタイプであり、F, Sについては試験周波数を

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 (空芯 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 



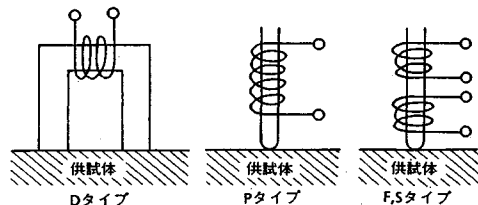
写真—1 渦流探傷試験状況(携帯型)



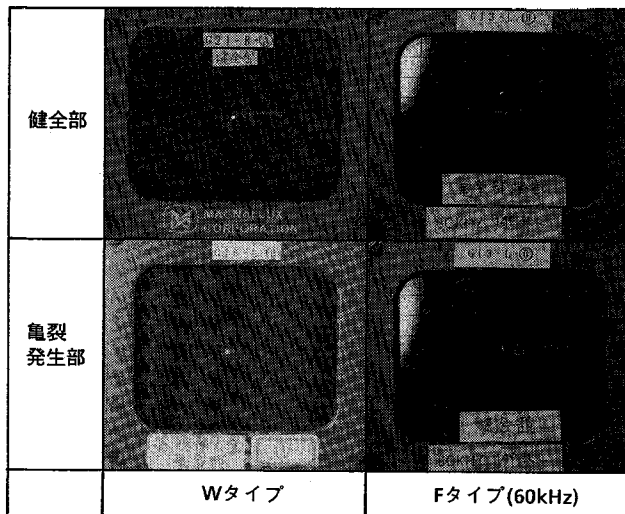
写真—2 渦流探傷試験状況(搬用型)

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)



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

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ので、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す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) はこぼ面とコーナー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。

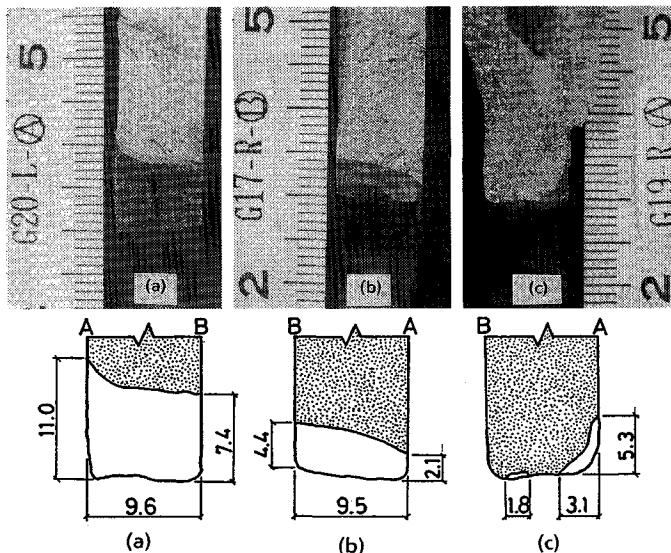
貫通亀裂についてみると、長さが 10 mm 以上 (写真—4 の (a)) であると、塗膜の有無にかかわらず、いずれのプロブでも検出が可能である。しかし、より小さい亀裂を検出する場合には、W タイプ、F タイプ (周

表—4 渦流探傷試験結果

亀裂の有無
○判定 OK
×判定 NO

亀裂	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			
			D 5 kHz	P 5 kHz	W 100 kHz	F 60 kHz	S 30 kHz	D 5 kHz	P 5 kHz	W 100 kHz	F 60 kHz	S 30 kHz				
亀裂なし	+	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16LA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	22RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17LA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18LA	
	-	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13RB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	22LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18LA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12LA	
コーナー亀裂	+	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	21LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19RB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19RB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	21RB	
	-	0	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	22LA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19LA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	18LA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12LA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	19LB
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	21LB
貫通亀裂	+	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14RB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17RB	
	-	0	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16RB
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20RB
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14LA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17RA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20LB
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12RB
貫通亀裂	+	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20LA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20RA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15LA	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15LB	
			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13LA	
	-	0	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16RA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14LB
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12RA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14RB
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14RA
				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17RB

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—5 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,% (18個)	記録性	作業性
		10$\leq\ell$ (5個)	4<math><\ell</math> (14個)			
携帯型	D (5kHz)	100%	50%	0%	なし	電源不必要
	P (5kHz)	100%	71%	0%		
兼用型	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(こぼ面)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(こぼ面)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—2に推定亀裂寸法を示す)。このようにみえ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—5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

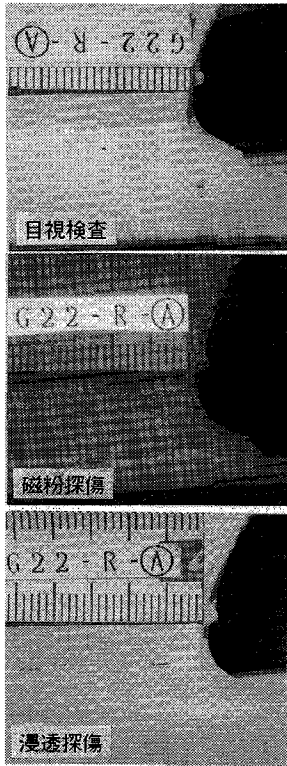
渦流探傷試験と同様に、目視、磁粉、浸透探傷試験について、塗膜上、塗膜除去後の亀裂検出性能の検討を行った。目視検査はルーペを用いて亀裂の有無を観察し、特に、塗膜上からの試験では主として塗膜切れ、錆汁の発生をチェックした。磁粉探傷試験、浸透探傷試験は亀裂の検出性能、現場での作業性を考慮して蛍光湿式交流極間法、溶剤除去性染色浸透法とした。表—6、表—7にはそれぞれの探傷条件を示す。

表—6 磁粉探傷試験の装置および条件

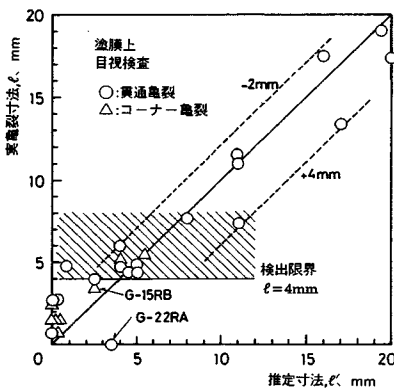
ハンディマグナ	小型携帯用
ブラックライト	JIS A2 15/100を明確に識別できるもの
磁粉	エアゾール式蛍光磁粉液
磁化電流の種類	交 流
磁化方法	極 間 法
磁極間の磁場の強さ	30 Oe 以上
磁粉適用に対する磁化の時間	連 続 法
通電時間	5-7秒
磁粉の粒度	3 μ 以下
磁粉の分散媒	エアゾールタイプの油ベース
検査液濃度	1.5g/ ℓ
標準試験片	JIS A2 15/100 円形
備 考	磁極の接触状態が十分である事を確かめて通電する。また、溶接止端部に検査液が直接かからないように散布する

表—7 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	遠乾式現像剤
方 法	染色溶剤除去性
検査面温度	10~18°C
浸透時間	30~40分
現像時間	5~60分
備 考	亀裂開口部分に滞在して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。



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)

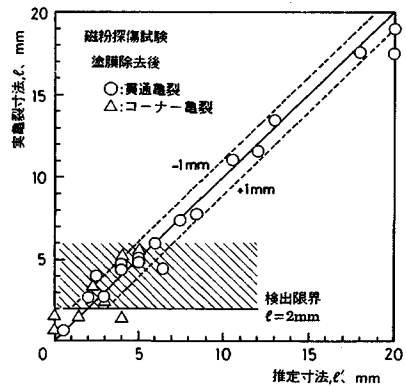
の有無を確認する粗検査として有効であるといえる。この場合、検出限界はおおよそ4 mmと判断できる。ただし亀裂発生を伴わない塗膜切れもあり、現場での作業では先の渦流探傷試験を併用するのが良好と考えられる。

(4) 塗膜除去後の亀裂検出

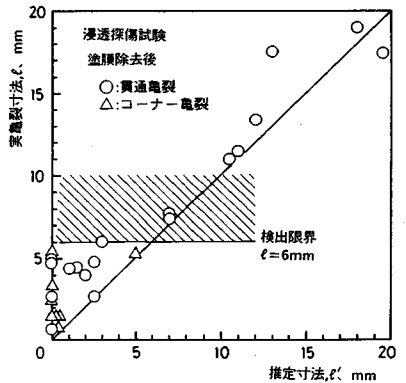
塗膜除去後の検査においては、目視検査、浸透探傷試験とも塗膜上に比べて検出限界寸法が大きくなっている。目視検査では塗膜上からは主に錆汁の発生で判断し、

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。

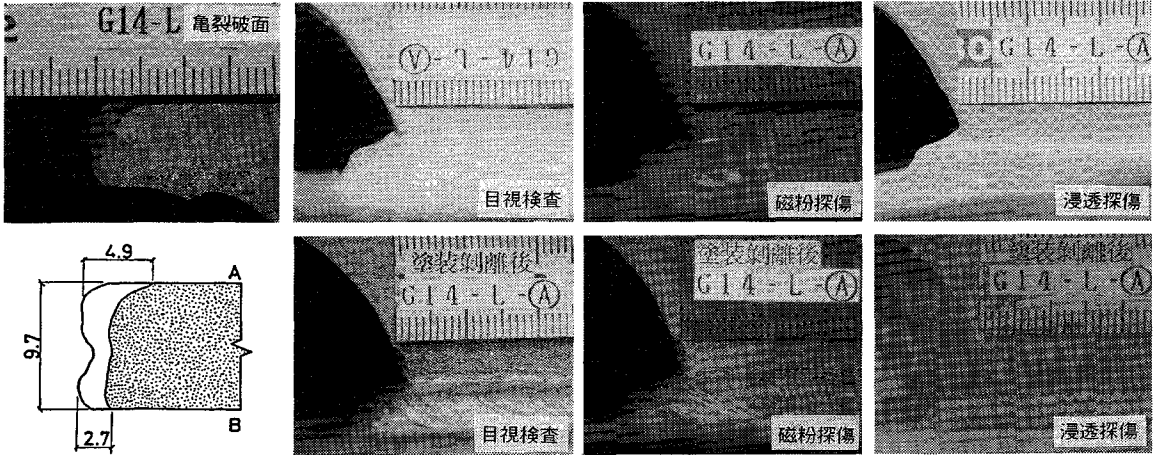
しかしながら、磁粉探傷試験は目視検査、浸透探傷試験に比べて検出精度が向上し、貫通亀裂で0.7 mm、コーナー亀裂でも1.5 mmの微小亀裂の検出が可能である。図—6、図—7に磁粉探傷試験、浸透探傷試験について、塗膜除去後の推定寸法と実亀裂寸法の関係を示す。磁粉探傷試験は2 mm未満のコーナー亀裂の一部は検出できず、検出限界は安全側からみて2 mmと判断することができる。また、寸法推定精度はほとんどが±1 mmの範囲内に収まっている。浸透探傷試験は6 mm未満の亀裂については検出できない場合があり、検出限界はおおよそ6 mmとなる。寸法推定についても全体に過小評価と



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)

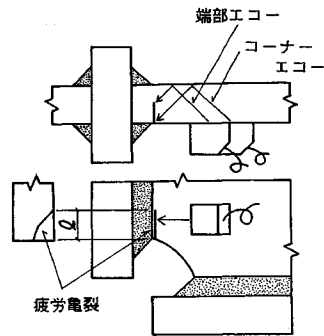
なっている。この傾向は、亀裂のタイプが異なるものの、先に行った図—1のA、Bタイプの亀裂に関する実験と同じである。

写真—8に代表的な試験結果を示す。長さ4.9mm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。

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、



図—8 超音波探傷試験方法

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×10L)
コーナーエコーの検出	0.2W×1.0H×10L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×10L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°
探触媒質	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

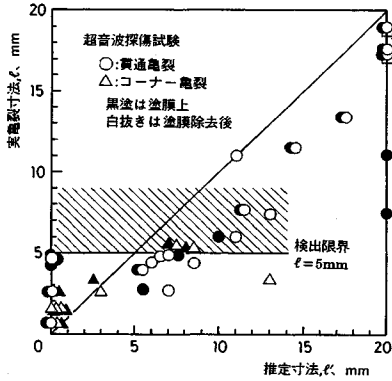


図-9 超音波探傷試験による推定寸法と実寸法の関係

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

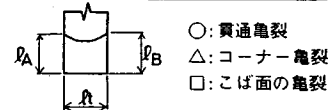
	亀裂検出限界寸法, mm		寸法推定精度
	塗膜上	塗膜除去後	
目視検査	4.0	8.0	ばらつき大
磁粉探傷試験	(4.0)	2.0	適正(±1mm)
浸透探傷試験	(4.0)	8.0	過小評価
超音波探傷試験	5.0	5.0	過大評価
渦流探傷試験	5.0	5.0	不可

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で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

亀裂長さ, ℓ , mm

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
		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	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	221A	
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	191A	
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	181A	
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	121A	
	2.6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	211A	
	3.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	151B	
	5.3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	191A	
	5.3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	201A	
	0.7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	161A	
	2.7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	141B	
貫通 亀裂	2.7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	121A	
	4.0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	141B	
	4.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	141A	
	4.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	171B	
	4.7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	161B	
	4.8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	201B	
	4.9	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	141A	
	6.0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	171A	
	7.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	201B	
	7.7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	121B	
11.0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	201A		
11.5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	131B		
13.3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	151A		
17.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	151B		
19.0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	131A		

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.

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	
D	1.1	x	x	x	x	x	x	x	x	17L
	5.3	x	x	x	x	x	x	x	x	18R
	5.7	x	x	x	x	x	x	x	x	13R
	0.7	x	x	x	x	x	x	x	x	221A
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	191A
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	181A
	1.5	x	x	x	x	x	x	x	x	121A
	2.6	x	x	x	x	x	x	x	x	211A
	3.4	x	x	x	x	x	x	x	x	151B
	5.3	x	x	x	x	x	x	x	x	191A
D	0.7	x	x	x	x	x	x	x	x	161A
	2.7	x	x	x	x	x	x	x	x	141B
	2.7	x	x	x	x	x	x	x	x	121A
	4.0	x	x	x	x	x	x	x	x	141B
	4.4	x	x	x	x	x	x	x	x	141A
	4.4	x	x	x	x	x	x	x	x	171B
	4.7	x	x	x	x	x	x	x	x	161B
	4.8	x	x	x	x	x	x	x	x	201B
	4.9	x	x	x	x	x	x	x	x	141A
	6.0	x	x	x	x	x	x	x	x	171A
D	7.4	x	x	x	x	x	x	x	x	201B
	7.7	x	x	x	x	x	x	x	x	121B
	11.0	x	x	x	x	x	x	x	x	201A
	11.5	x	x	x	x	x	x	x	x	131B
	13.3	x	x	x	x	x	x	x	x	151A
	17.4	x	x	x	x	x	x	x	x	151B
	19.0	x	x	x	x	x	x	x	x	131A

- 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)