

表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性

FEASIBILITY STUDY ON DETECTION OF FATIGUE CRACK IN FILLET WELDED JOINT

三木千寿*・深沢 誠**・加藤昌彦***・大睦久雄****

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

The crack detection ability was compared and investigated using various non-destructive testing methods on the fatigue cracks generated on the fillet welded joint. As a result, for the detection of cracks, the magnaflux examination and the eddy current examination were found effective. However, in the case of dye penetrant examination, even wide cracks on plate surface could not be detected. On the other hand, for the estimation of the crack depth, the peak echo method using the ultrasonic examination was found excellent, allowing the detection of cracks with depth larger than 2.5 mm, with an accuracy of better than 1 mm.

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

1. 緒 言

近年、鋼橋の部材に疲労亀裂の発生している事例がかなり報告されているが^{1)~4)}、そのうち特に、ウェブギャップ（ウェブに取り付けられた横桁や垂直補剛材の端部とフランジとの間に残されたわずかなギャップ）の面外変形に起因する隅肉溶接継手の疲労亀裂の例が多い⁵⁾。このような疲労亀裂の発生は橋梁構造物の中ではきわめて局所的な現象であり、橋梁としての強度にただちに影響を与えるものではないが、長期間放置しておくことと重大な破壊に進展するおそれがある。したがって、それらを早い時期に発見し、適切な補修を行うことが重要である。現在では破壊力学を適用することにより、補修の要否、補修期間の設定のための寿命予測などを定量的に評価することが可能であり^{6),7)}、この場合、疲労亀裂を確実に検出すること、および精度よくその寸法を測定することが必要となる。

橋梁の現場での検査において最も多く用いられ、信頼

できる方法は熟練者による目視検査とされている^{8),9)}。大部分の亀裂は目視によって錆汁を伴った塗膜の割れとして検出され、その後、主に浸透探傷試験を主とする非破壊検査が適用される。この場合、疲労亀裂はきわめてシャープであり、表面亀裂の場合でもほとんど開口しておらず、亀裂がないものと判断されることがある。溶接欠陥に対する非破壊試験についてはすでに十分な経験とデータの蓄積があるが^{10),11)}、疲労亀裂に関するものは少なく、特に橋梁の現場での非破壊検査の系統だった検討となるとアメリカ合衆国のNCHRPのProjectとして行われた例のみである⁹⁾。そこで、本試験では、既設橋梁の現場検査としての各種非破壊試験の適用性および限界を明らかにする目的で、面外変形によって隅肉溶接末端部から発生する疲労亀裂を対象として、それぞれの非破壊試験について最も適した探傷条件を選ぶとともに、亀裂検出限界および精度を比較検討する。

2. 供試体および試験方法

試験には隅肉溶接疲労供試体を用いた。図-1に供試体形状を示す。前面隅肉溶接を対象とした供試体Aと、回し溶接部を対象とした供試体Bの2シリーズである。主材(SM58Q)の幅は50~65mm、板厚は9~24mmであり、いずれも4点曲げ繰返し载荷により止端部から

* 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 (株)横河橋梁製作所 (〒260 千葉市新港88)

*** 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 関西エックス線(株)
(〒733 広島市西区南観音4-5-11)

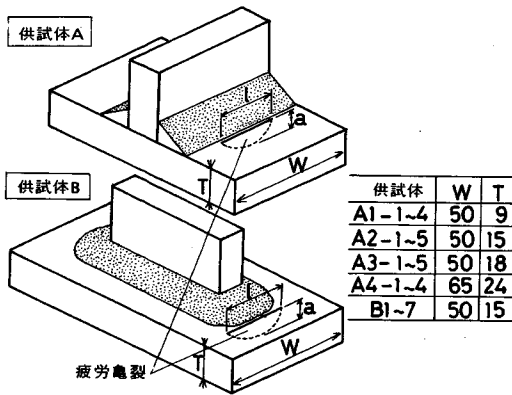


図-1 供試体形状

種々の大きさの亀裂を発生させてある。ここで、供試体 A は隅肉溶接一般部の止端から発生する亀裂をモデル化したものであり、供試体 B は垂直補剛材下端の回し溶接止端部から発生する亀裂に相当する。

非破壊試験はまず、磁粉探傷試験、渦流探傷試験、浸透探傷試験を行い、表面での亀裂長さ (l) を推定した。引き続き、亀裂の存在が確認された部位について超音波探傷試験を行い、亀裂深さ (a) を推定した。亀裂深さについてはあらかじめ幅方向での適当な位置を設定し (1~3 か所)、その位置での深さを求めた。これらの非破壊試験の終了後、亀裂破面を露呈して推定値と実寸法との対応を検討した。なお、それぞれの供試体の実亀裂寸法は付表-1、付表-2 に示す。B6, B7 についてはリブ板側止端部から亀裂が発生しているが、他の亀裂と同様に主材方向に進展していることから、寸法推定にあたっては区別しなかった。

3. 各種非破壊試験による表面亀裂の探傷

素材および溶接部の欠陥を検査する目的で種々の非破壊試験方法が開発され、実用化されている。このうち橋梁の現場での検査といった観点からは使用可能な非破壊試験方法は限られている。ここでは、簡便に適用が考えられる磁粉探傷試験、渦流探傷試験、浸透探傷試験について検討した。

(1) 探傷条件の選定

それぞれの非破壊試験について予備実験を行い、亀裂検出性能、作業性を考慮した適切な探傷条件を設定した。この予備実験では写真-1 にその露呈破面を示す 2 つの亀裂 (A2-1, A2-3) について行ったが、深さが大きい A2-1 の亀裂 (最大深さ; 9.7 mm) の場合にはいずれの試験方法および探傷条件でも検出が可能であった。そこで、主に比較的小さな亀裂 (最大深さ; 2.5 mm) について適正条件の検討を行った。

まず、磁化方法、磁化電流、磁粉の種類を変えて行っ

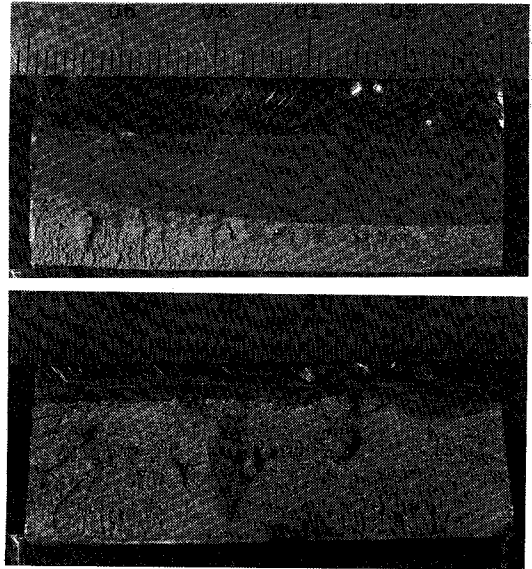


写真-1 予備実験に用いた疲労亀裂破面 (上: A2-1, 下: A2-3)

表-1 各種磁粉探傷試験の亀裂検出能力

磁化方法	磁化電流	磁粉	検出性能
極間法	交流	乾式非蛍光	×
		湿式蛍光	○
ブロード法	交流	乾式非蛍光	×
		湿式蛍光	○
	直流	乾式非蛍光	×
		湿式蛍光	○

表-2 探傷装置および探傷条件

ハンディマグナ	小型携帯用, TE2 磁化電流 交流 磁化方法 極間 極間距離 20mm以下
ブラックライト 磁粉	SC-12 エアースルー式蛍光磁粉液 SY-8000, 3μ以下
標準試験片 通電時間 磁粉適用に 対する磁化時間	JIS A1, 15/100 10秒 連続法

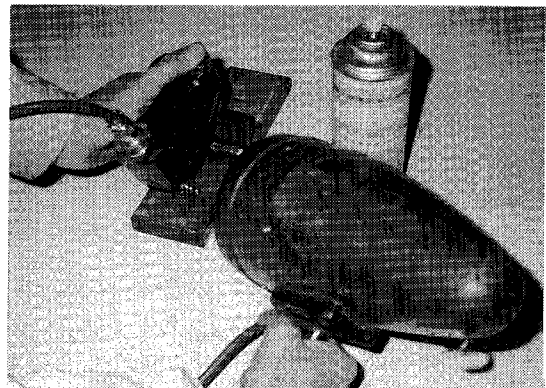


写真-2 磁粉探傷試験状況

た磁粉探傷試験の結果を表一に示す。極間法、プロッド法とも、亀裂検出能力は乾式非蛍光よりも湿式蛍光が優れている。また、実橋での検査の作業効率を考えると、プロッド法は極間距離の設定、アークストライク発生防止などの磁化操作が煩雑であり可搬性も悪く、蛍光湿式交流極間法が最も適している。そこで、試験は表二に示す使用装置および探傷条件で行った。なお、写真二には探傷状況を示す。

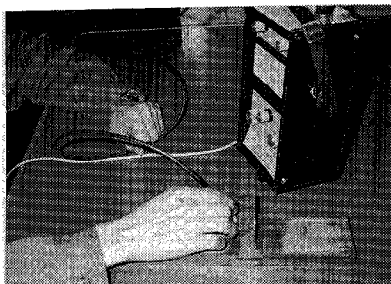
次に、自己比較方式(差動コイルサーフェスタイプ)と単一方式について行った渦流探傷試験の結果を表三に示す。A2-1は亀裂深さが大きく、いずれの条件でも亀裂の存在が確認できた。しかしながら、A2-3については自己比較方式では検出できなかった。この亀裂は長さが12mmであり、試験片端面にまで進展している。コイルの形状、材質の相異から、自己比較方式は単一方式に比べて端面効果によるノイズ(疑似信号)の発生範囲が広く、亀裂信号が探知できなかったものと考えられる。この端面効果は今回の試験片特有のものであり、実橋部材ではほとんど考える必要がないが、試験においては、疑似信号の少ない単一方式が適していると判断した。表四に探傷条件を、写真三に探傷状況を示す。

表一 各種渦流探傷試験の亀裂検出能力

探傷条件		検出性能		
装置	使用コイル	周波数	A2-1	A2-3
ED800	自己比較方法 空心 : 9φ 鉄心丸棒:14φ	10KHz	○	×
		30KHz	○	×
		60KHz	○	×
AMKEC MK IX Type C	単一方法 鉄心馬蹄形 外形寸法:10mm	5KHz	○	○

表二 探傷装置および探傷条件

探傷器 プローブ	AMLEC MK IX Type C 鉄心馬蹄形, 外形寸法:10mm
対比試験片 試験周波数	スリット試験片, 0.2W×1.0H×10 5KHz
探傷感度	スリット部が検出可能な感度を最低レベルとし、実探傷感度は健全部の溶接止端部で異常を示さない感度とする。



写真三 渦流探傷試験状況

浸透探傷試験として、一般に溶剤除去性染色浸透探傷法と水洗性蛍光浸透探傷法の2種類が挙げられる。微小亀裂の検出に対しては、鮮明な指示模様を示すことから水洗性蛍光浸透探傷の方が優れていたが、水道、電源などの使用設備および作業効率の点から、現場でのより簡便な検査方法として溶剤除去性染色浸透探傷法を選んだ。表五に探傷条件を示す。浸透探傷による亀裂検出精度は、主に浸透時間および現像時間に左右される。ここでは、実橋部材の検査であることを考慮してそれぞれ1h, 5minとした。ただし、微小亀裂については現像時間をさらに長くし、12時間後に判定することにした。

表五 浸透探傷試験条件

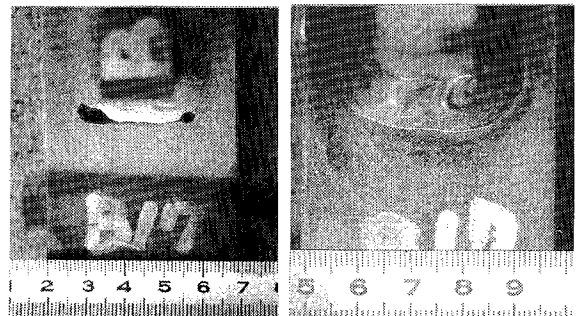
前処理方法	エアゾールタイプ洗浄液 自然乾燥(15分)および ドライヤーにて強制乾燥
浸透液	溶剤除去性染色浸透液
浸透処理方法	ウエスでの拭き取り*
現像方法	速乾性
試験面温度	10~18°C
浸透時間	1時間
現像時間	5分~12時間
観察方法	目視

*本方法で除去出来なかった場合はウエスに少量の洗浄液をつけて除去



浸透探傷試験

磁粉探傷試験



写真四 代表的な亀裂破面および探傷試験結果

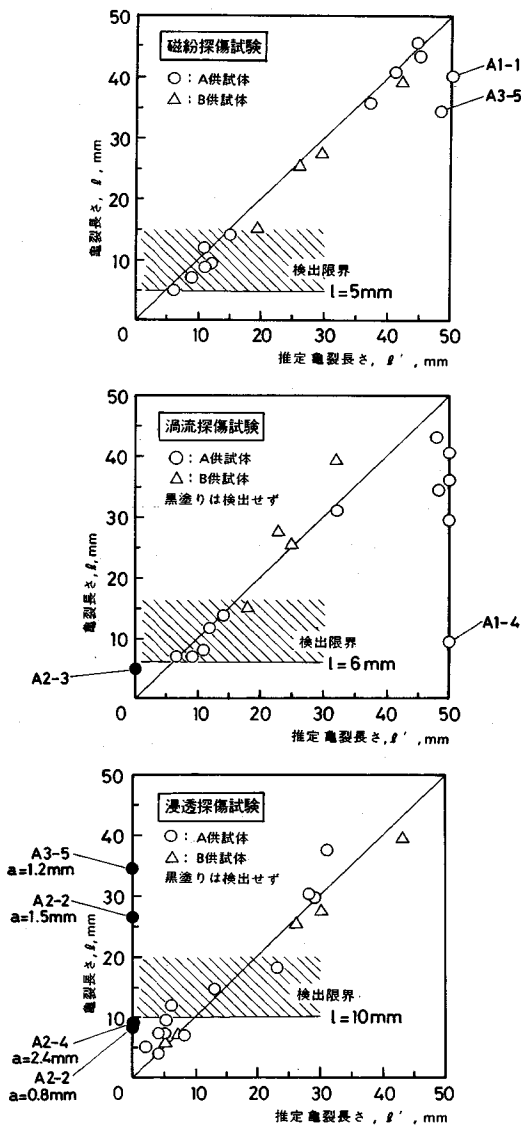
(2) 亀裂長さの推定

写真一4に代表的な亀裂についての露呈破面および磁粉探傷模様、浸透探傷模様を示す。それぞれの探傷により亀裂表面長さを測定し、実際の亀裂長さとの対応を検討した。図一2に実亀裂長さ l と推定亀裂長さ l' の関係を示す。A供試体、B供試体についてそれぞれプロットし、未検出の亀裂は黒塗りで示してある。なお、隣接した亀裂については、連続した亀裂として評価した場合があり、これについては実亀裂寸法も2つの亀裂の両端部の寸法(付表参照)をもって亀裂寸法としている。

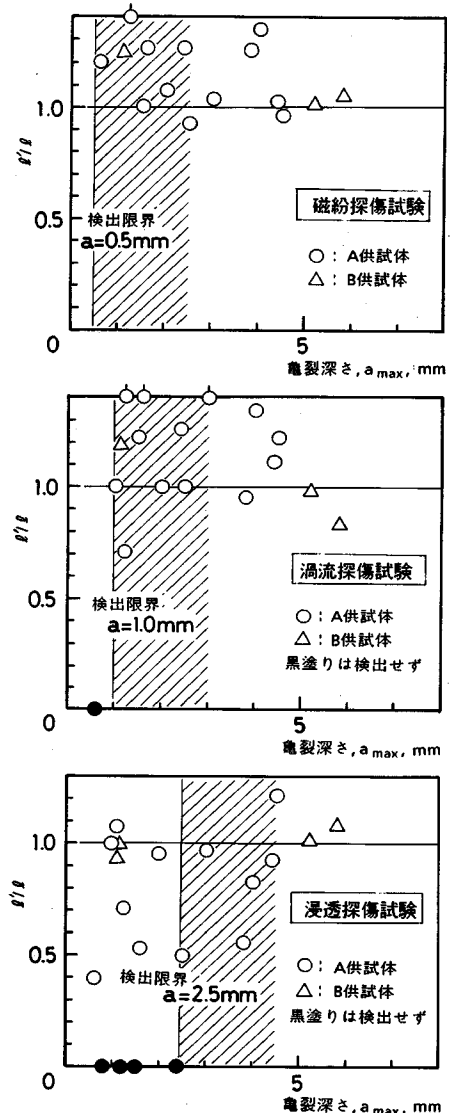
磁粉探傷試験では一部を除いて両者が非常によく対応している。今回の疲労亀裂の最小長さは5mmであり、これをほぼ正確に評価していることから、検出限界長さ

は5mm以下と判断できる。ただし、マークを付したA1-1、A3-5の2つが過大評価となっている。いずれも、他の隅肉ビード止端部に比べて異常はなく、微小なひっかき疵のようなものが影響していたものと考えられるが、実部材の隅肉溶接継手の止端部に発生する疲労亀裂を検出しようとする場合にはこのような誤情報が十分にあり得ることを示している。

渦流探傷試験においては、長さが30mmを越える亀裂が過大評価となっている。いずれも亀裂が試験片端部近傍まで進展しているものである。先に述べたように、試験片端部では渦電流が乱れるために、この疑似信号を亀裂信号と間違えて評価したものである。また、A1-4については止端部に微小アンダーカットが点在してお



図一2 実亀裂長さ l と推定亀裂長さ l' の関係



図一3 亀裂深さに着目した亀裂検出限界

り、これを亀裂と誤評価したものである。このように、渦流探傷はアンダーカットおよび継手詳細に起因する疑似信号の影響を受けるものの、亀裂長さが小さいものについてはA2-3 ($l=5\text{mm}$)を除いていずれも検出しており、検出限界は6mm程度と判断できる。

浸透探傷では、特に小さい亀裂において過小評価となっている。亀裂が小さい場合には、開口幅が狭く、亀裂面内への浸透液の浸み込みが十分でないためと推定できる。図中、未検出の亀裂について供試体マークと亀裂深さを記したが、A3-5は $l=34.5\text{mm}$ と表面が長い亀裂であるにもかかわらず、亀裂深さが1.2mmと浅いために検出できなかった。このことは、現場での目視検査において塗膜上の錆汁により亀裂の存在が予想されても、浸透探傷試験では検出できない現象と同じである。浸透探傷試験は装置の簡便さから広く用いられてきているが、他の探傷方法に比べて信頼性は高くないといえる。

(3) 表面亀裂検出に対する亀裂深さの影響

浸透探傷試験の場合、亀裂検出の可否は表面における開口の程度に依存し、ここで対象としているような亀裂の表面開口量は亀裂深さに関係する。磁粉探傷試験、渦流探傷試験においても同様のことが考えられる。図-3は亀裂深さ a に注目して寸法推定値を整理したものである。

磁粉探傷試験では $a=0.5\text{mm}$ であっても検出可能で

あり、わずかに過大評価の傾向にある。渦流探傷試験では $a=0.5\text{mm}$ の亀裂は検出できず、 $a=1\text{mm}$ から検出可能である。一方浸透探傷試験では $a<2.5\text{mm}$ の亀裂の一部は検出されないことがあり、検出されても過小評価となっている。なお、A 供試体の亀裂 (○印) の場合、前面隅肉溶接継手であることから亀裂の全線にわたって止端部の形状、材質変化の影響を受けやすく、誤差が大きい傾向にある。B 供試体においては回し溶接止端部から亀裂が発生するものの、ある程度進展すれば隅肉溶接部からはずれることから検出精度はよくなっている。

以上の結果をもとに表-6には3種類の非破壊試験についての亀裂検出限界をまとめて示す。さらに、いずれも亀裂深さが大きいと比較的検出しやすいことから、 $a\leq 5\text{mm}$ の亀裂についての長さ推定精度を合わせて示した。

4. 超音波探傷試験による亀裂深さの推定

亀裂深さの測定が可能な非破壊試験としては数種類の方法があるが、ここでは、探傷精度がよく、現場での検査に適している超音波探傷端面エコー法を採用した。深さ推定にあたって、その検出能は使用探触子性能によって異なってくる。そこで、試験に先立って種々の探触子についての性能を調べるとともに、代表的な疲労亀裂についてその検出能を検討した。

(1) 探触子の選定

使用した探触子の形状は汎用型(ノーマル)、点集束型、分割型の3種類、屈折角は45°, 60°, 70°である。表-7に代表的な探触子の性能と亀裂検出能を示す。亀裂検出能は、写真-1にその露呈破面を示す比較的浅い亀裂(A2-3)と深い亀裂(A2-1)について調べたものである。探傷は図-4に示すように、亀裂面表裏より、それ

表-6 亀裂検出限界および寸法推定精度

	検出限界		$a\leq 5\text{mm}$ の亀裂の検出
	l	a	
磁粉探傷	5mm	0.5mm	過大評価の傾向
渦流探傷	6mm	1.0mm	"
浸透探傷	10mm	2.5mm	過小評価

表-7 代表的な探触子の性能と亀裂検出能力

探触子の種類 形式	屈折角 度	サイズ mm	接近限界 長さ mm	分解能				S/N CdB				2.5mmの深さの亀裂検出				7.2mmの深さの亀裂検出			
				a dB	b dB		S/N		表面		表面		表面		表面				
					0.5S	1.0S	0.5S	1.0S	0.5S	1.0S	0.5S	1.0S	0.5S	1.0S	0.5S	1.0S			
点集束	45	10φ	9.0	42	1.2	0	15	12	○	×	△	×	○	○	△	○			
	45	15φ	15.0	44	1.2	0	19	18	○	×	△	×	○	○	△	○			
分割	45	4x9	10.0	-	-	-	-	-	○	×	△	×	○	○	△	○			
	60	4x9	6.0	-	-	-	-	-	×	×	△	×	○	×	○	×			
ノーマル	45	10x10	12.0	46	0	1.2	6	10	○	×	△	×	○	○	△	○			
	60	10x10	11.0	44	不可	不可	10	8.5	×	×	△	×	○	○	×	○			
(ミニ チューブ)	45	6.35φ	6.5	60	4.1	3.3	12	12	○	×	△	×	○	○	○	○			
(超ミニ)	70	4.7x4.7	5.0	-	-	-	-	-	×	×	×	×	○	×	×	×			

接近限界	STBA2 φ15x4	スリット試験片 0.2x10x10 ⁻²	STBA2 φ2x2	A2-3	A2-1

○: 端面エコー検出
△: 接近限界範囲内
×: 検出せず

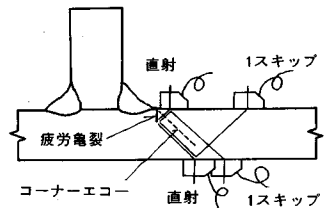


図-4 探傷方法

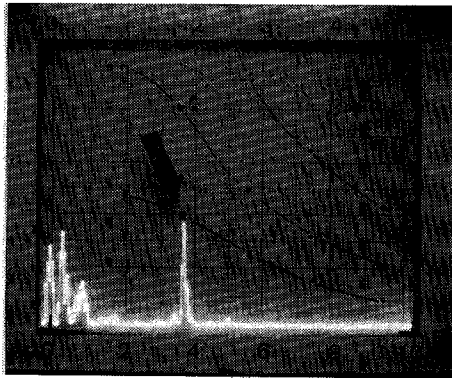
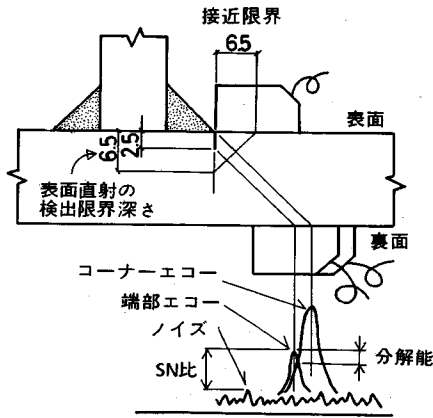


図-5 端部エコー法の概要 (A2-3)

それぞれ直射法, 1回反射法で行った。図-5には端部エコー法の概要を示す (A2-3, ノーマル・ミニチュア 45°)。疲労亀裂を検出するにはできるかぎり多くの方向から探傷の方が信頼性があるが, 表面側からの直射の探傷の場合には接近限界の問題がある。接近限界は振動子寸法, 屈折角で決まるが, 浅い亀裂の場合にはほとんど接近限界内となり, 亀裂検出が不可能である。さらに, 浅い亀裂の深さを精度よく測定するには, コーナーエコーと端部エコーをいかに分解するか (a dB), また, 両エコーが重なりあっても, 各エコー間に生ずる谷間 (b dB) によって決まる。表からわかるように, このような分解能についてはノーマル・ミニチュア・屈折角 45° が最も優れている。さらに, 端部エコーとノイズとの分解も重要であり (C dB, SN比), これは点集束型・屈折角 45° が優れている。しかしながら, 図-5に示した探傷波形からわかるように, 端部エコーの検出にはノーマル・ミニチュアの SN比でも十分である。

なお, 実際の橋梁では, 狭隘な場所に亀裂が発生することが多く, 探触子の走査可能範囲が限定され, 探触子寸法の小さいことが要求される。このようなことから, 今回の試験では分解能が優れており, 接近限界長さの小

表-8 使用装置および探傷条件

探傷器 探触子	パルス反射式, USK-7 高分解能型ミニチュア, MSW-QC 周波数 5MHz, ノーマルタイプ 屈折角 45°
対比試験片 探傷感度	スリット試験片, 0.2W×1.0H×10L 0.2W×1.0H×10Lの端部エコーが検出される感度を最低レベルとし, 実際の探傷においてノイズエコーがCRT上で10%程度現れる感度
接触媒質	グリセリン水溶液 (濃度 75%以上)

さいノーマルタイプのミニチュア探触子 (屈折角 45°) を用いることにした。表-8には, 試験に用いた機器および探傷条件を示す。

(2) 亀裂深さの推定

図-6に実亀裂深さと超音波探傷による推定値との対応を示す。推定寸法は先の図-4に示したように主材表裏各2方法の探傷を行い, 最大の指示深さとした。

$a \geq 2.5 \text{ mm}$ の場合, 推定値は実寸法と比較的よい対応を示しており, 図中に亀裂マークを付した3点を除いて $\pm 1 \text{ mm}$ の誤差範囲に入っている。写真-5にB6の亀裂破面を示す。深さ測定点◎ではちょうど, 亀裂前縁が急激に変化しており, 探触子の首振りを含めて位置情報のわずかな誤差が過大評価につながったものと考えられる。写真-6にはB4の亀裂の破面と浸透探傷模様を示す。亀裂は止端部に沿って発生しており, 亀裂の全線が探傷方向に対して直角ではなく, 複雑な曲線を描いている。また, 写真-7にこの位置での断面のマクロを示すが, 亀裂は主材に対してわずかな傾きをもって進展している。このように隅肉溶接止端部に発生する亀裂は, 主材板面に垂直な平面ではなく, 屈曲した面を形成することがあり, このことが探触子位置, ビーム路程から推定する亀裂端部位置の誤評価の原因になるものと考えられる。

(3) コーナーエコーの検出

$a < 2.5 \text{ mm}$ の亀裂は, 亀裂と板表面にできるコーナー

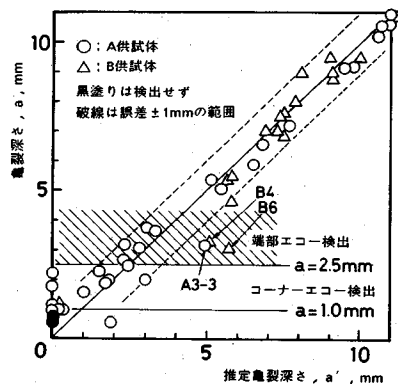
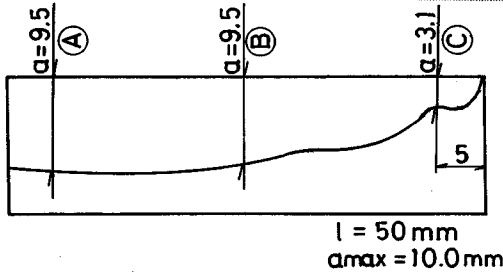
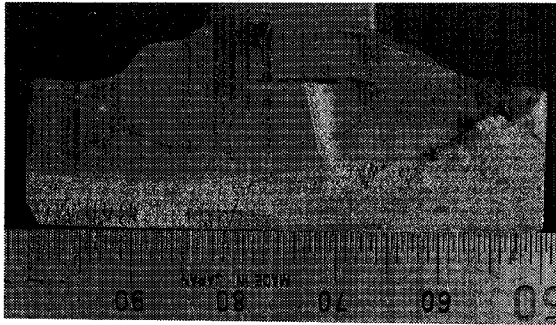


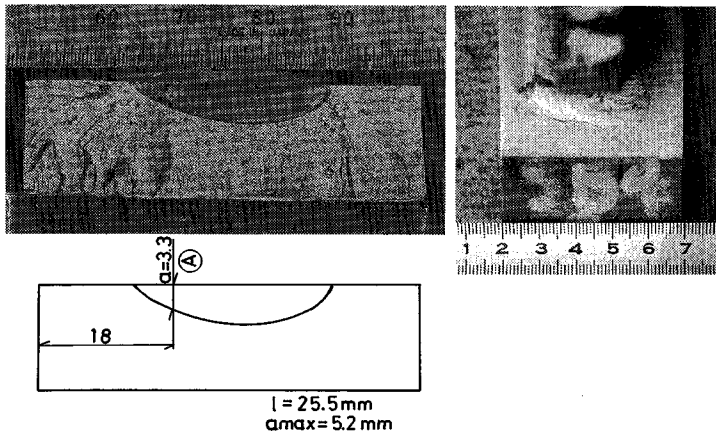
図-6 実亀裂深さと推定値との関係



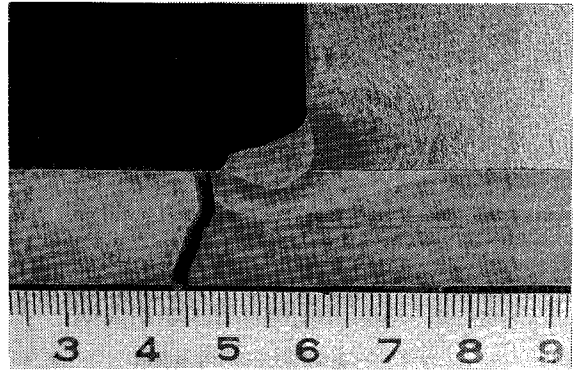
写真—5 亀裂破面 (B-6)

部 (図—5 参照) からの反射エコーによりその存在は確認できたが、亀裂端部エコーが識別できず、寸法推定が不可能なことが多かった。写真—8 に深さ 1 mm の機械スリット (探傷面に直角な幅 0.2 mm の機械加工溝) と疲労亀裂 (B-5) の CRT 写真を比較して示す。機械スリットのコーナーエコー波形は単純であり、深さが 1 mm であれば端部エコーの識別が可能である。これに対し、疲労亀裂の場合には反射エコー波形が全体的に乱れており、コーナーエコーと端部エコーとの識別が困難である。亀裂が深くなればブラウン管上での両者の距離が大きくなり、深さが 2.5 mm 以上になるとおのおのの識別が十分に可能であるといえる。

図—7 には亀裂深さとコーナーエコー高さの関係をプ



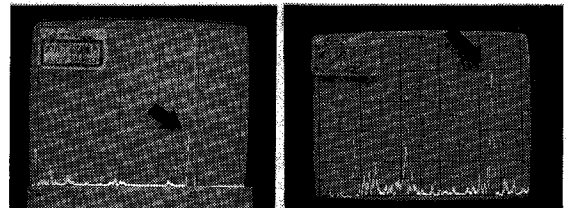
写真—6 亀裂破面と浸透探傷模様 (B-4)



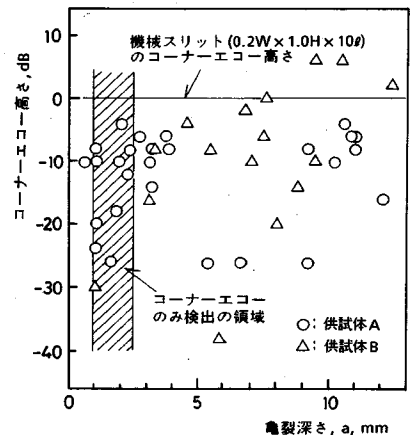
写真—7 亀裂断面のマクロ (B-4)

ロットする。機械スリットについては両者に比例関係が成り立つことが知られているが¹²⁾、今回の疲労亀裂においては明確な関係がみられない。写真—9 には止端部全線にわたって発生している亀裂の磁粉探傷模様を示す。亀裂はビードの波目に沿うように発生しており、コーナー部はビーム入射方向に対して必ずしも直角ではない。さらに前述のように亀裂面では傾斜しているための面反射の影響も考えられ、理想的な関係が得られないものと考えられる。

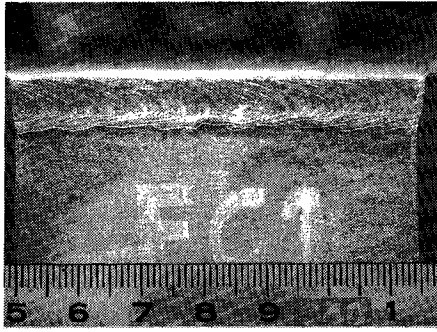
(4) 亀裂深さの寸法推定精度



写真—8 機械切欠きと疲労亀裂の探傷波形 (左:スリット試験片, 右:B-5の疲労亀裂)



図—7 コーナーエコー高さで亀裂深さの関係



写真—9 亀裂表面の磁粉探傷模様

表—9 超音波探傷による亀裂検出限界および精度

	亀裂深さ 検出限界	寸法推定精度
コーナーエコーの検出	1mm	寸法推定不可
端部エコーの検出	2.5mm	±1mm

図—6において、黒塗りのプロットは超音波探傷により亀裂の検出ができなかったものである (A2-2, $a=0.8$ mm および A2-3, $a=0.6$ mm). 亀裂深さが 1 mm より小さい場合には端部エコー, コーナーエコーとも検出が不可能であった. 表—9 には以上の結果をまとめて, 超音波探傷による亀裂深さの検出限界および寸法推定精度を示す. 隅肉溶接止端部から発生する疲労亀裂はミクロ的な形状が複雑であるために機械スリットについて得られる検出限界, 精度より悪くなるものの, 亀裂深さが 1 mm 以上であればその存在が確認でき, 2.5 mm 以上ならば一部の例外を除いて ±1 mm の誤差で寸法推定が可能である. ただし, この数値は今回使用した探触子についてのものであり, 探傷器・探触子が異なれば若干の変動が考えられる.

5. ま と め

隅肉溶接止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を検討した. 非破壊試験による亀裂検出限界は探傷条件によって大きく異なるため, ここでは現場の作業性を考慮して最適な条件を選定した. 試験結果をまとめると以下のようである.

(1) 磁粉探傷試験 (蛍光湿式交流極間法) は長さ 5 mm, 深さ 0.5 mm の亀裂の検出が可能であり, 亀裂表面長さの推定精度はわずかに過大評価となる.

(2) 浸透探傷試験 (溶剤除去性染色法) による疲労亀裂検出はばらつきが大きく, 長さ 10 mm, 深さ 2.5 mm より小さい亀裂は検出不可能の場合がある.

(3) 渦流探傷試験 (単一法, プローブ径 10 mmφ)

は試験片端部の疑似信号, 微小アンダーカットの検出のために一部過大評価となるが, 精度的には先の 2 つの探傷方法の中間と考えられる.

(4) 超音波探傷試験端部エコー法による亀裂深さの測定は深さが 2.5 mm 以上であるならば可能であり, その推定精度は ±1 mm である. また, 深さが 1 mm 以上の亀裂については, 亀裂と板表面に生ずるコーナーからの反射エコーによりその存在が確認できる.

なお, 隅肉溶接継手に発生する亀裂は止端部の形状, 材質変化の影響を受け, 単純な平面ではなく複雑な面を形成しているために, いずれの非破壊試験でも機械切欠きのような理想的な欠陥と比べて検出限界, 寸法推定精度が悪くなるものと考えられる.

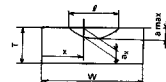
付表—1 供試体 A の亀裂寸法

種, mm	厚, mm	マーク	亀裂長さ l , mm	亀裂深さ a , mm		
				最大亀裂深さ a_{max}	探傷位置 X	実亀裂 a_x
50	9	A1-1	40.5	4.0 (24)	3.8 (36)	3.2 (32)
		A1-2	36.0	3.0 (14)	2.7 (25)	2.3 (21)
		A1-3	14.0	2.0 (32.5)	1.9 (18)	2.0 (20)
		A1-4	9.5	1.6 (23.5)	1.5 (14)	0.6 (6)
50	15	A2-1	49.0	9.7 (6.5)	7.2 (7)	7.2 (7)
		A2-2	26.3 [△]	0.8 (5)	1.5 (20)	1.0 (10)
		A2-3	5.0	2.5 (6.5)	0.6 (19)	0.6 (6)
		A2-4	8.7	2.4 (30)	2.2 (22)	2.2 (22)
		A2-5	7.2	3.8 (3)	1.8 (18)	1.8 (18)
50	18	A3-1	50.0	11.1 (10)	11.0 (11)	10.2 (10)
		A3-2	48.5	11.0 (40)	10.6 (10)	10.6 (10)
		A3-3	50.0	3.9 (26)	3.7 (37)	3.7 (37)
		A3-4	42.0	5.4 (25)	5.3 (49)	5.1 (51)
		A3-5	34.5	1.2 (25)	1.0 (10)	1.0 (10)
65	24	A4-1	65.0	13.5 (15)	13.2 (13)	12.1 (12)
		A4-2	65.0	7.0 (40)	6.8 (68)	6.8 (68)
		A4-3	20.1 [△] 4.0 [△] 31.2 [△] 7.0 [△] 36 [△]	4.5 (10)	3.1 (30)	3.1 (30)
		A4-4	7.4 [△] 30.0 [△] 43.4 [△]	1.1 (40)	1.0 (40)	1.0 (40)
		A4-5	30.0	4.4 (40)	4.4 (40)	4.4 (40)

付表—2 供試体 B の亀裂寸法

亀裂の種類	マーク	亀裂長さ l , mm	亀裂深さ a , mm		
			最大亀裂深さ a_{max}	探傷位置 X	実亀裂 a_x
主材止端部の亀裂	B1	44.6	9.1 (10)	9.0 (25)	7.0 (7)
	B2	39.7	9.0 (14)	8.8 (25)	7.6 (7)
	B3	27.7	5.8 (25)	5.5 (5)	5.5 (5)
	B4	25.5	5.2 (18)	4.6 (33)	3.3 (3)
	B5	7.0 [△] 15.3 [△] 5.3 [△]	1.1 (20)	1.0 (20)	1.0 (10)
リブ板面止端部の亀裂	B6	50.0	10.0 (5)	9.5 (25)	9.5 (9.5)
	B7	50.0	9.7 (10)	7.5 (25)	7.0 (7)

▲: 試験片全幅の亀裂
△: 片側こぼ面に貫通した亀裂



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，1984. 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) Yazdani, N. and Albrecht, P. : Risk Analysis of Extending Bridge Service Life, 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, 1985.
- 7) Kato, S., Yoshikawa, O., Terada, H. and Matsumoto, Y. : Studies on Fatigue Damages Based on Strain Measurements of Highway Bridge, Proc. of JSCE, Vol. 2, No. 2, 1985. 10.
- 8) Fisher, J. W., Hausammann, H., Sullivan, M. D. and Pense A. W. : Detection and Repair of Fatigue Damage in Welded Highway Bridges, National Cooperative Highway Research Program Report 206, 1979. 6.
- 9) 三木・西川・Fisher, J. W. : 鋼橋の疲労損傷とその検査，橋梁と基礎，Vol. 20, No. 5, 1986. 5.
- 10) 藤盛：鋼溶接部の超音波斜角探傷試験における検出レベルについて，日本建築学会大会学術講演梗概集，1973. 10.
- 11) 藤盛：鋼溶接部の超音波斜角探傷試験における欠陥寸法の推定方法について，非破壊検査，第 21 巻，第 12 号，1972. 12.
- 12) 仙田・三好・沢藤・鳥海・廣瀬・山本：溶接欠陥の検出と形状判別に関する調査研究（2）—従来法による欠陥の評価の検討—，NDI 資料，No. 2886, 1981. 11.

(1987. 4. 23・受付)