

## 腹板の疲労クラック調査方法

保全施設部 保全企画課 加藤 修 吾  
大阪管理部 第二維持事務所 松本 雅 治  
大阪管理部 保全第一課 斉藤 博 行

### 要 約

当公団では昭和53年度から、各路線毎に定期ローテーションを定め、床版工・上部工・下部工の各工種をゴンドラ車、足場工等を利用して、定期点検を実施しているが、すべて目視点検によるためにコンクリート構造物・鋼構造物の内部損傷の有無を判定することができないのが実情であった。

最近、上部工鋼桁部の横桁および対傾構取付附近の腹板に疲労クラックと思われる損傷が多量に発生していることが報告されている。これらの損傷は目視点検だけでは塗装膜のクラックなのか、鋼桁腹板部までクラックが入っているのか判別がつかないために、全てが鋼桁クラックの損傷として報告されている。そこで今回、塗装の上から簡単に、しかも正確に損傷の有無を判定ができる方法がないか検討した結果、種々の非破壊検査方法を組合せて調査すればクラックの検出に有効な手法があることがわかり、今回ここに報告するものである。

### まえがき

阪神高速道路は、昭和39年度に一部供用開始して以来、供用延長も131.4kmに達しており、阪神地区の重要な幹線道路の役割をはたしている。道路の大部分は都市高速道路の関係から、高架構造で建設されている。また、供用開始後約20年経過しているため、橋梁構造物の維持管理には、多大の費用と労力を費やしているのが現状である。

近年、橋梁構造物の維持管理については広く関心を集めている問題である。橋梁構造物は、その機能が低下をきたす以前に有効かつ適切な補修・補強をすることが必要であり、そのためには、有害な損傷を一早く発見することが重要となる。

しかしながら鋼桁構造物の損傷に対する研究は、その発生メカニズムの解明および有効な対応策を

含めて、まだ始まったばかりといってよい。一口に損傷といっても、その発生部位、原因、被害の大小もまちまちである。また、損傷の発見については、定期点検、日常点検、臨時点検時や再塗装時に発見されることが多く、この場合にはほとんど目視によっている。このため、内部に存在する損傷あるいは微細な損傷の発見困難な状況である。したがって、これらの損傷も含めて早く、確実に、簡単に、しかも塗装された状態で損傷調査できる手法を見い出すことが急務となっている。

今回ここでは、主として腹板の上フランジとのすみ肉溶接部付近に発生している疲労クラックを対象として、非破壊検査による探傷方法、また、存在したときはその深さ、角度、長さ等を調査する手法を確立することを目的として、あらかじめ人工的にクラックを入れた供試体を用いて、事前調査を行った後、実際に現地調査で確認した結果

とを比較して、報告するものである。

## 1. 事前調査

現地調査に先立ち、非破壊検査による探傷方法の確認のため、事前調査を実施した。

### 1-1 供試体

供試体は、現地で検出しなければならないクラックの最小寸法をL=10mmと考慮して、図-1に示すような人工的にクラックを加工したものを使用した。また、試験は塗装による影響を調査するために、塗装前後に測定を行った。なお、塗装は一般外面塗装(A-1)を行った後、塗装の塗替えのような補修塗装(a-1)の塗装仕様とした。

マーク表			
記号	$\phi$	$d$ (mm)	
0 2	0°	2	
0 4	0°	4	
0 6	0°	6	
20 2	30°	2	
20 4	30°	4	
20 6	30°	6	
45 2	45°	2	
45 4	45°	4	
45 6	45°	6	
90 2	90°	2	
90 4	90°	4	
90 6	90°	6	
90 9	90°	9	

図-1 供試体

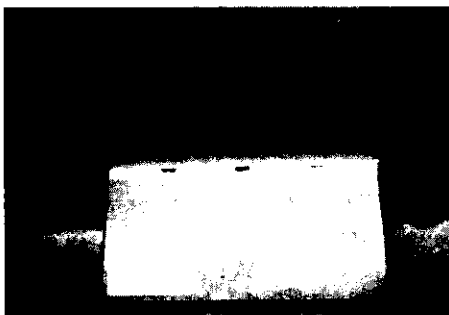


写真-1 供試体

### 1-2 探傷試験方法

今回行った非破壊検査の探傷試験方法は次の4

つである。

- (1) 放射線透過試験 (RT)
- (2) 超音波探傷試験 (UT)
- (3) 浸透探傷試験 (PT)
- (4) 磁粉探傷試験 (MT)

### 1-3 使用装置等

#### 1-3-1 放射線透過試験

- (a) 工業用携帯式X線装置：RF-200 EG-S2 (理学電気K. K)
- (b) フィルム、増感紙：フジ工業用X線フィルム #100, Pb 0.03

#### 1-3-2 超音波探傷試験

- (a) 探傷器：FD-610 (三菱電機K. K)
- (b) 探触子：5 Z 10×10 A 45  
5 Z 10×10 A 60  
5 Z 10×10 A 70  
5 Z 10×10 A 40 (A45を改造)  
5 Z 5×5 A 45  
2 Z 10×10 A 45 (参考)

#### (c) 校正用試験片

- 標準試験片 STB-A3 (JIS Z 2349)  
接触媒質 グリセリン (75%以上)  
基準感度補正用試験片 RB-4A (JIS Z 3060)

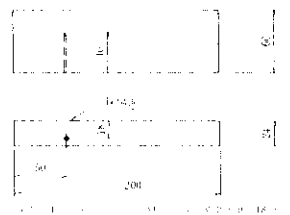


図-2 基準感度用対比試験版 (RB-4A)

#### 1-3-3 浸透探傷試験

- (a) 浸透液：P-ST (特殊塗料K. K)
- (b) 洗浄液：R-ST (特殊塗料K. K)
- (c) 現像液：D-ST (特殊塗料K. K)

1-3-4 磁粉探傷試験

(a) 磁気探傷器 (ヨークタイプ)

Um3A, 3600AT

(電子磁気工業K, K)

(b) 磁粉: 黒色乾式磁粉

塗装面の濃度  $D_1 = 1.72$

非塗装面の濃度  $D_2 = 1.78$

この濃度差(0.06)が塗装の影の濃さとなる。  
この程度であれば判定上ほとんど影響はない。

1-4 放射線透過試験

1-4-1 撮影要領および結果

撮影は供試体から約L-600mmの位置(図-3)からX線を照射して行った。撮影条件を表-1に、また、検出状況を表-2に示す。

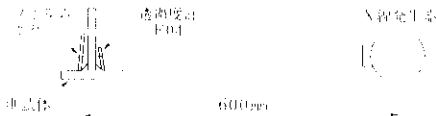


図-3 撮影配置

表-1 撮影条件

	照射時間
塗装前	150KVp 50秒
塗装後	150KVp 60秒

表-2 検出状況

	0°	20°	45°	90°
塗装前	×	×	△	○
塗装後	×	×	×	○

×: 検出不可  
△: 不明瞭  
○: 検出可

1-4-2 考察

(1) クラックの方向と照射線方向との角度が約20°以内であれば、放射線透過試験による検出は可能である。

(2) 塗装による影響については、

- (a) 撮影条件は、塗膜による吸収があるため露出時間を2~3倍にする必要がある。
- (b) 塗装膜があっても損傷検出能力は基本的には変わらない。
- (c) 母材部は塗料に含まれる鉛分のため、多少のムラが生じるが損傷の検出に支障があるほどではない。

(3) 塗装前後で、塗装膜による濃度の影響を調べた結果は次のとおりである。

1-5 超音波探傷試験

超音波探傷試験は、次の目的にかなうように試験方法を決めた。

- (a) クラックの有無を塗装膜の上から調査する。
- (b) クラックの深さを測定する。
- (c) クラックの傾きを測定する。

1-5-1 探傷方法

超音波探傷法は直射法で行うのが原則であるが(S/N比が大きく、測定精度も高い)。しかし、今回の調査では図-4に示すように屈折角45°の探触子はすみ肉溶接のビードに妨げられて直射法の配置ができないため、クラック開口面よりの1回反射法によることとした。屈折角60°および70°では直射法は可能であるが、クラック角度の推定は各屈折角の探傷条件を統一する必要があるため、すべて1回反射法で行うことにした。

探傷時のエコー高さは、図-2に示す専用の基準感度対比試験片(RB-4A)のφ2.4mm孔のエコー高さを基準(0dB)とした相対エコー高きで表示するものとした。

すなわち、相対エコー高き=測定エコー高き-基準孔エコー高きとする。符号は測定エコー高きが基準孔エコー高きより大なる場合は↑、低い場合は↓とする。

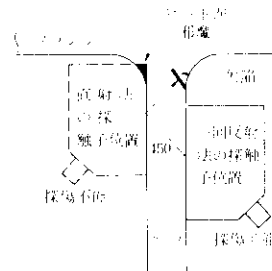


図-4 直射法不能説明図(実寸) 屈折角45°の場合

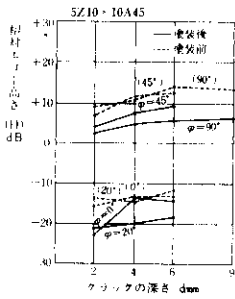


図-5 クラック深さとエコー高の関係(1)

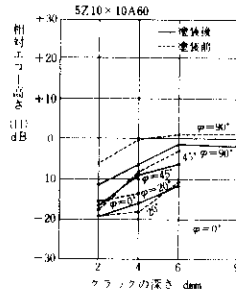


図-6 クラック深さとエコー高の関係(2)

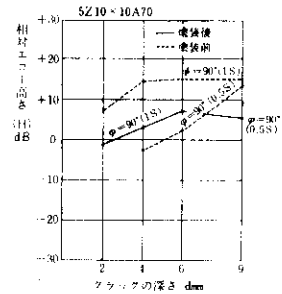


図-7 クラック深さとエコー高の関係(3)

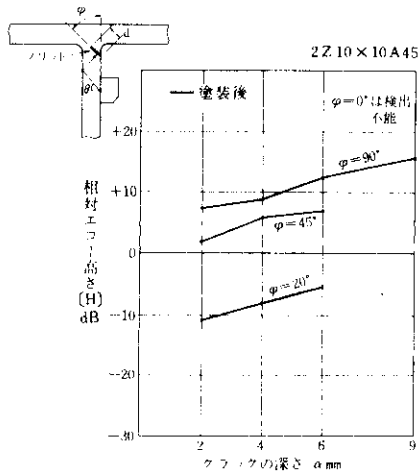


図-8 (参考) クラック深さとエコー高の関係(4)

### 1-5-2 測定結果

探触子の屈折角別にクラック深さとエコー高さの関係を図-5～8に示す。

### 1-5-3 考察

(1) クラックの有無の調査 (図-9)

- (a) 使用探触子：5 Z 10×10 A 45
- (b) 探傷感度：RB-4 A試験片の標準孔エコーを80%に調整する。  
(塗装上より探傷する場合は、さらに10dB感度を上げる)

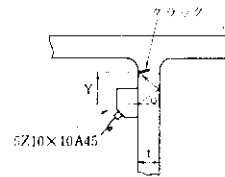


図-9 クラック有無の調査

(c) 探傷方法：

- (ア) 腹板の板厚  $t$  を測定する。
- (イ) クラックが予想される位置より  $Y$  の間隔で溶接線に平行線をけがく。  
 $Y$  は次式により求める。  
 $Y = 2 t \tan \theta$  ( $\theta$  は実測屈折角)
- (ウ) けがき線線上に入射点が一致するように横走査を行う。
- (エ) ビーム路程  $W_1 \pm 2.5\text{mm}$  の範囲を監視範囲とし、10%を検出レベルとして探傷する。 $W_1$  は次の式により計算する。

$$W_1 = \frac{2t}{\cos \theta}$$

(d) ビーム路程の監視範囲 ( $W_1 \pm 2.5\text{mm}$ ) において検出レベルを超えるエコーはクラックである確率が高い。

(2) クラックの深さ(d)

一般的には欠陥寸法が大きくなるほどエコー高さは大きくなる傾向が認められる。しかしながら、

エコーの高さは欠陥の形状、超音波ビームに対する欠陥の傾き、欠陥までの距離（遠くなれば小さくなる）等の要因も影響すること。また図-6に

見られるように深さ $d = 2\text{ mm}$ と $d = 6\text{ mm}$ のそれは、 $1\text{ dB}$ 以下である。これらのことからエコー高さによってクラックの深さを推定することは困難と思われる。

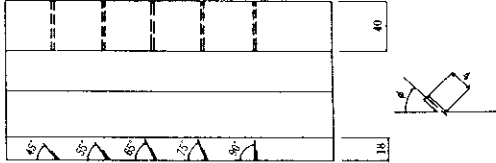


図-10 クラック測定用供試体

(3) クラックの傾き ( $\phi$ )

クラックのような面状欠陥面に超音波が垂直に入射したとき、その欠陥エコー高さは最も高くなり、垂直から角度がきつくなるほど低くなる。傾きの推定はこの原理を利用して行った。すなわち検出されたクラックに対し屈折角の異なる探触子

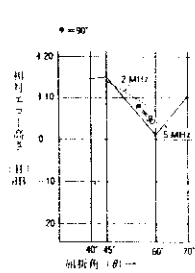


図-11 クラック角度とエコー高の関係(1)

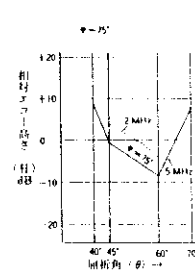


図-12 クラック角度とエコー高の関係(2)

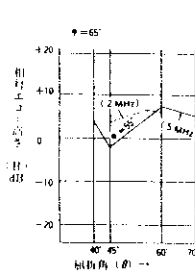


図-13 クラック角度とエコー高の関係(3)

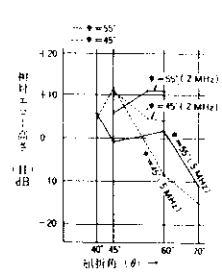


図-14 クラック角度とエコー高の関係(4)

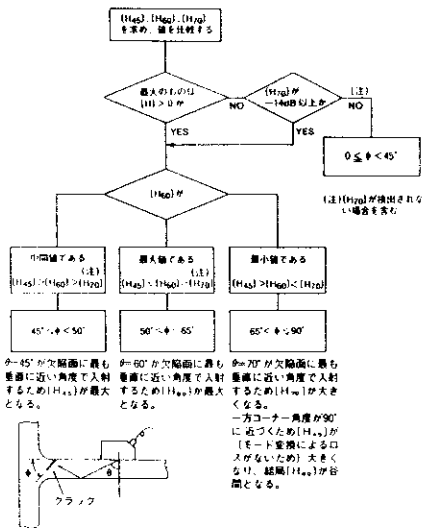


図-15  $[H_{45}]$ ,  $[H_{60}]$ ,  $[H_{70}]$  の比較により  $\phi$  を求めるフローチャート

を用いて異なった方向から超音波を入射して、そのエコー高さを比較することにより傾きを推定することとした。この結果をさらに確認するために、図-10に示す供試体を用いてクラック角度と探触子の屈折角によるエコー高さとの関係を測定した結果を図-11~14に示す。また、これらの結果により、傾きを推定するフローを図-15に示す。

(4) 塗装膜による減衰量

塗装膜による超音波の減衰量を把握するため、塗装面試験片(図-16)を使用して測定を行った。

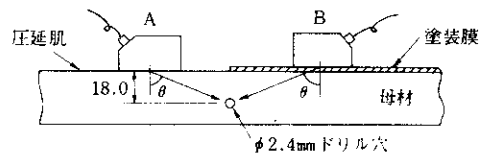


図-16 塗装面の減衰量測定



### 2-1-2 超音波探傷試験

- (1) 探傷器：FD-610（三菱電機K. K）
- (2) 探触子：事前調査と同じ（表-4）
- (3) 接触媒質：グリセリン（原液）
- (4) 標準試験片等：STB-A3（入射点実測屈折角測定角，時間軸調整用）  
RB-4A（事前調査で使用した感度標準試験片）

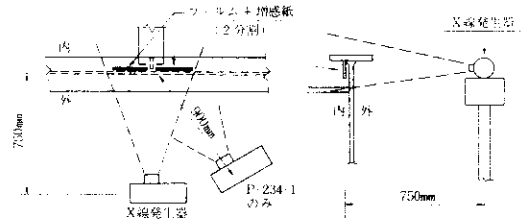


図-19 撮影配置

表-4 探触子

形式	No.	入射点	探測屈折角	基準感度
5Z10×10A45	7831	0	44.5°	36.5 dB
5Z10×10A60	9545	5.0	60.5°	49.0 dB
5Z10×10A70	2374	11.0	69.0°	54.5 dB

- (3) 撮影条件：表-5のとおり

表-5 撮影条件

撮影箇所	フィルム・増感紙 距離	管電圧	露出時間
型S-234-1以外	750mm	195KVp	30秒
型S-234-1	900mm	195KVp	2分

(注) P-234-1は2本のステーのため、斜めより撮影

### 2-1-3 浸透探傷試験

- (1) 浸透液：P-ST（特殊塗料K. K）
- (2) 洗浄液：R-ST（特殊塗料K. K）
- (3) 現像液：D-ST（特殊塗料K. K）
- (4) A形対比試験片：（JIS Z 2343に定めるもの）

### 2-2-2 超音波探傷試験

- (1) 準拠基準：JIS Z 3060-1983  
「鋼溶接部の超音波探傷試験方法および試験結果の等級分類方法」
- (2) 探傷方法：表-6のとおり
- (3) 感度補正：0 dB

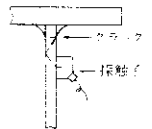
### 2-1-4 磁粉探傷試験

- (1) 極間法磁気探傷器：Um-10（AC100 V，1300AT，極間距離55mm）（電子磁気工業K. K）
- (2) 磁粉：LY-1500（黄緑色）  
（特殊塗料K. K）
- (3) 標準試験片：A1-30/100  
（JIS G 0565に定めるもの）

表-6 探傷方法

探傷項目	探触子	方法	探傷感度
クラックの有無	5Z10×10A45	1回反射法	RB-4A 80%
クラックの向き	5Z10×10A45 5Z10×10A60 5Z10×10A70		

\* クラック有りの場合のみ実施



### 2-2 試験手順

#### 2-2-1 放射線透過試験

- (1) 準拠基準：JIS Z 3060-1983  
「鋼溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類法」
- (2) 撮影配置：図-19のとおり

### 2-2-3 浸透探傷試験

- (1) 準拠基準：JIS Z 2343-1982  
「浸透探傷試験方法および欠陥指示模様の等級分類」
- (2) 試験方法の分類：染色浸透探傷試験
- (3) 現像方法の分類：速乾式現像剤を用いる湿式現像法
- (4) 試験の手順：〔前処理〕-〔浸透処理〕-〔除去処理〕-〔現像処理〕-〔乾燥処理〕-〔観察〕-〔後処理〕

## 2-2-4 磁粉探傷試験

(1) 準拠基準：JIS G 0565-1982

「鋼材料の磁粉探傷試験方法および欠陥磁粉模様の等級分類」

(2) 磁化方法：極間法

(3) 磁化電流の種類：交流

(4) 磁粉の分散媒：乾式法

(5) 磁粉の種類：非蛍光磁粉

(6) 磁粉適用に対する磁化の時期：連続法

(7) 試験の手順：〔前処理〕-〔磁化〕-〔磁粉の適用〕-〔磁粉模様の観察〕-〔磁粉模様の転写〕

## 2-3 試験結果

### 2-3-1 クラック長さの測定結果

クラック長さの測定結果を図-20に示す。図中の超音波探傷試験による欠陥指示長さはエコー消滅法（横走査を行い欠陥エコーが消失する点の探触子間距離を測定する）によった。

また、磁粉探傷試験の欠陥模様を例示する。

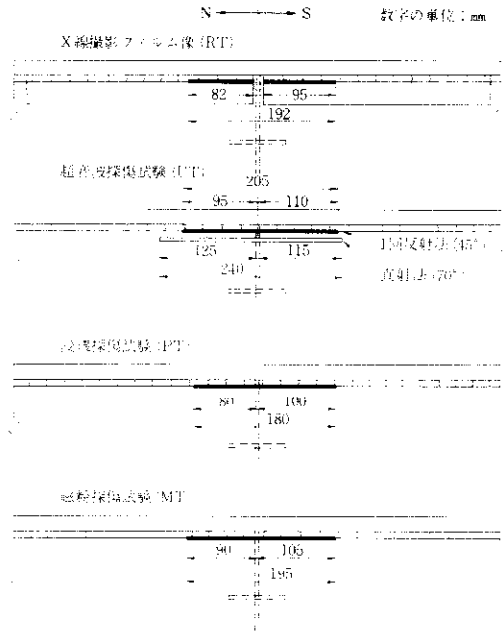


図-20 堺S-187測定結果

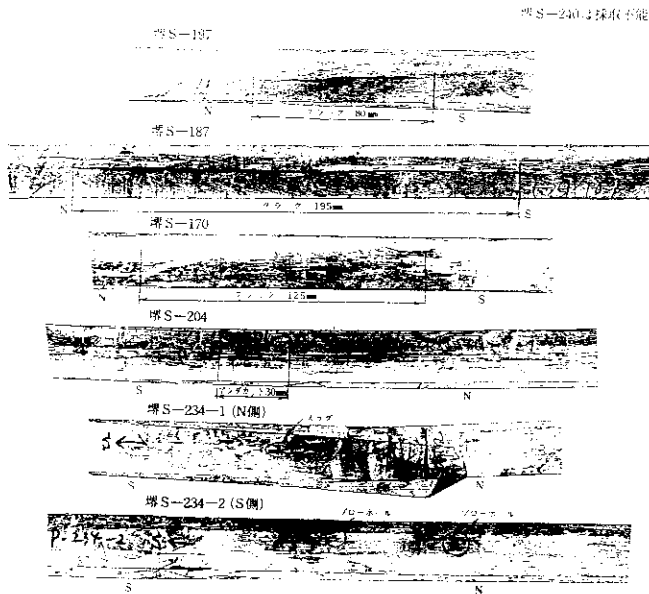


図-21 磁粉探傷試験 (MT) 欠陥磁粉模様



### 2-3-2 クラックの傾き角の推定

クラックの傾きの判定法による判定結果は次のとおりである。なお、欠陥の傾き角 $\phi$ の推定は次のとおりである。

表-7 欠陥の傾き角

	エコー高さ			欠陥 $\phi$ 傾き
	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=70^\circ$	
堺S-240	基準 dB	36.5	49.0	65° < $\phi$ ≤ 90° 推定 90°
	実測 dB	32.5	56.5	
	相対エコー高さ dB	+4.0	-7.5	
堺S-197	基準 dB	36.5	49.0	65° < $\phi$ ≤ 90° 推定 90°
	実測 dB	35.5	66.0	
	相対エコー高さ dB	+1.0	-17.0	
堺S-187	基準 dB	36.5	49.0	65° < $\phi$ ≤ 90° 推定 90°
	実測 dB	41.5	67.0	
	相対エコー高さ dB	-5.0	-18.0	
堺S-170	基準 dB	36.5	49.0	65° < $\phi$ ≤ 90° 推定 90°
	実測 dB	35.5	59.0	
	相対エコー高さ dB	+1.0	-10.0	

$\theta$  : 屈折角

$[H_{45}] = (45^\circ \text{の基準エコー高さ}) - (45^\circ \text{の実測エコー高さ})$

( $\theta = 45^\circ$ の相対エコー高さ)

$[H_{60}] = (60^\circ \text{の基準エコー高さ}) - (60^\circ \text{の実測エコー高さ})$

$[H_{70}] = (70^\circ \text{の基準エコー高さ}) - (70^\circ \text{の実測エコー高さ})$

として、

$[H_{45}] < 0, [H_{60}] < 0, [H_{70}] < -14 \text{ dB}$  ならば、 $0 \leq \phi < 45^\circ$

$[H_{45}] > [H_{60}] > [H_{70}]$  ならば、 $45^\circ \leq \phi < 50^\circ$

$[H_{45}] \leq [H_{60}] \leq [H_{70}]$  ならば、 $50^\circ \leq \phi \leq 65^\circ$

$[H_{45}] > [H_{60}] < [H_{70}]$  ならば、 $65^\circ < \phi \leq 90^\circ$

堺S-204、堺S-234-1、堺S-234-2は超音波探傷試験によるクラックが認められなかったので $\phi$ の推定は行わない。

### 2-4 考 察

- (1) 塗装の上からの放射線透過試験および超音波探傷試験は有効に実施できた。
- (2) 放射線透過試験では腹板面に直角なクラックは検出可能であるが次のような問題点があっ

た。

- (a) 対象箇所がリブをまたいでいる場合は、フィルムを2分割しなければならない。なお、フィルムの貼付けにも工夫を要する。
  - (b) X線発生器を所定の位置にセットする空間が必要なため、外桁しか適用できなかった。
- (3) 超音波探傷試験は屈折角 $45^\circ$ で探傷できるのは探傷面(探触子を当てる面)寄りのクラックに限定されるため、貫通クラックの有無を調べるには屈折角 $70^\circ$ の直射法を採用した。屈折角 $70^\circ$ では一般に雑エコーが多く精密な測定は困難であるが、測定結果を見ると屈折角 $70^\circ$ の指示長さの方が、屈折角 $45^\circ$ のそれより長い傾向が認められる。しかしながら、この原因を究明することにはならなかった。特にクラックが無いことの確認には、屈折角 $45^\circ$ の探触子で両面から探傷した方がよいと思われる。

- (4) 磁粉探傷試験では、今回使用した探傷器Um-10形が形状、重量、磁力(全磁束)ともに最も適していると考えられる。

なお、蛍光湿式と乾式の両方を試行したが後者の方が能率的であり、クラック検出力も十分であると認められた。

クラック指示模様の長さは、いずれも浸透探傷試験より長く出ている。これは、この調査に関するかぎり磁粉探傷試験の方が浸透探傷試験よりすぐれていることを示している。

- (5) 浸透探傷試験はどこでも手軽に使えることが最大の特長であるが、クラック検出能力は一般に磁粉探傷試験に劣る。今回もこのことは実証されたが、電源その他現場の状況に応じて活用すれば、効果のある手法であることは間違いない。

### 2-5 測定箇所別の結果

- (1) 堺S-170

現場の関係でX線撮影ができなかったが、クラックの長さは約 $L=120 \text{ mm}$ と考えられる。超音波探傷の $45^\circ$ 1回反射法による両側のクラック指示

長さが磁粉探傷や浸透探傷の結果と比較して短い理由は明確ではないが、裏面の結果も併せれば合致する。超音波探傷は両面から測定することが必要であると考えられる。

(2) 堺S-187

クラックの長さは約 $L=200$  mmと考えられる。超音波探傷の欠陥指示長さが特に長い。これはクラック端部のギャップが極端に小さい、いわゆるヘアクラックになっているのではないかと考えられる。

(3) 堺S-197

クラックの長さは約 $L=80\sim 85$  mmと考えられる。超音波探傷の $45^\circ$  1回反射法による指示は表面のクラック開口長、 $70^\circ$  直射指示は裏面のクラック開口長と考えてよいが、後者は誤差が相当（恐らく $5\sim 10$  mm程度）あるものと推定している。

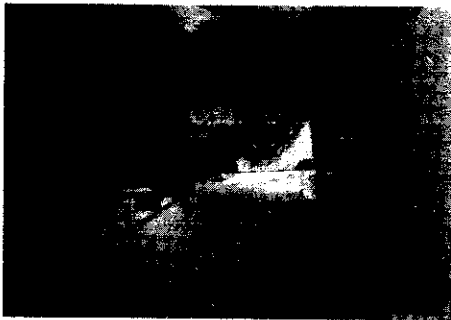


写真-3 堺S-197 現地調査（超音波探傷試験）

(4) 堺S-204

内側からの目視によればアンダーカットが認められたが、クラックは検出されていない。X線撮影フィルムと超音波探傷結果と総合してクラックでないことを確認した。

(5) 堺S-234-1（北側）

クラックは検出されていない。ただし、内側からの浸透探傷・磁粉探傷の結果では溶接欠陥（スラグ巻き込み）と考えられる指示が認められた。そこで再度超音波探傷を行ったところ前記のスラグは検出されたが、クラックのエコーは認められなかった。

(6) 堺S-234-2（南側）

クラックは検出されていない。X線撮影フィルムではリブより北側約 $100$  mmの位置に溶接欠陥（ブローホール）が認められるがクラックは無い。なお、超音波探傷は両面より $45^\circ$  1回反射法による探傷を行い、クラックエコーのないことを確認した。

(7) 堺S-240

クラックの長さは約 $L=160$  mmと考えられる。X線撮影フィルム（南側）に見られるクラックの枝分れは超音波探傷では検出していない。これは、超音波探傷は溶接止端部のみをねらって探傷したため、今後は、この種のクラックの存在が予想される場合は、超音波探傷の走査方法を考えなければならぬと思われる。

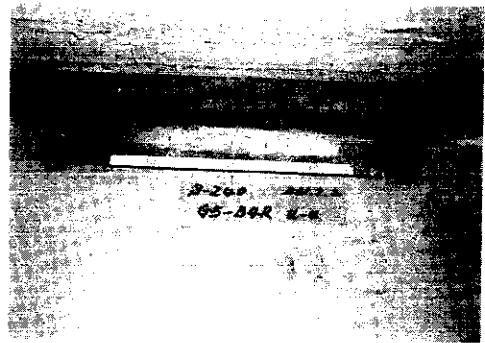


写真-4 堺S-240 現地調査（浸透探傷試験）

## 2-6 探傷手順の見直し

現地測定の結果をふまえて、探傷手順の再検討を行った。

### 2-6-1 方針

現場におけるクラック調査は次の方針によって手順を定める。

- (1) 塗装をした状態で探傷する。
- (2) 能率の高い手順を選ぶ。
- (3) 記録ができる方法を選ぶ。
- (4) 費用を低減する。

### 2-6-2 基本手順

- (1) 探傷は超音波探傷試験および磁粉探傷試験

