

## 9. 鋼床版溶接部の非破壊検査

### (1) 溶接部の一般的な検査方法

溶接部の品質検査には非破壊試験が用いられる。図9-1にはよく利用されている非破壊試験方法を示す<sup>1)2)</sup>。欠陥の検出法はそれが存在する場所によって内部および表面欠陥としてある。欠陥検出には静的な検出法と、欠陥が形成し成長する過程を検知する動的な手法がある。従来の欠陥検出は前者に属し、欠陥の成長挙動を把握する方法としてアコースティックエミッション(AE)法がある。ところで、橋梁部材の溶接継手の検査に適用される一般的な非破壊試験方法はかなり限られたものであり、実際には次のような試験方法である。

#### A. 溶接部表面の検査

- ① 目視試験
- ② 磁粉探傷試験
- ③ 浸透探傷試験

#### B. 溶接内部の検査

- ① 放射線透過試験
- ② 超音波探傷試験

溶接欠陥の検出特性は、非破壊試験方法により異なるものである。したがって、その特性を考慮して適切な試験方法を選択しなければならない。また、使用母材、溶接継手や溶接方法に応じた欠陥発生傾向を考慮して検査仕様を決定しなければならない。

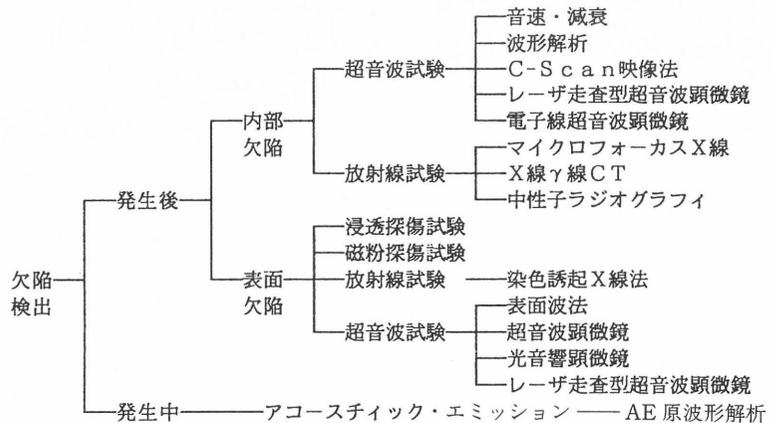


図9-1 各種の非破壊試験方法<sup>1)2)</sup>

目視試験は最も手軽な検査法であり、アンダーカット、オーバーラップ、ピットなどの検査には十分な方法である。磁粉探傷試験には種々の方法があるが、通常、極間式が用いられる。写真9-1に探傷状況を示す。表面もしくは表面直下の、特に線状欠陥の検出に適しているが、磁力線の強さ、磁力線と欠陥の相対する角度などに欠陥検出能力が依存するので、検査要領の設定にあたっては配慮を要する。鉄鋼材料の磁粉探傷試験の要領と等級分類を定める規格としてJIS G 0565がある<sup>3)</sup>。浸透探傷試験として、通常、溶剤除去性染色浸透探傷法が用いられる。表面に開口した欠陥が検出できる。特別な装置や動力源



写真9-1 磁粉探傷検査状況

を要しないから、形状の複雑な継手や被検査部が動力源に遠い場合などの検査に適する。試験法の要領や等級分類を定める規格として JIS Z 2343 がある<sup>4)</sup>。

放射線透過試験としては X 線透過試験が用いられる。写真 9-2 に探傷状況を示す。検査結果が写真という客観的資料の形で残り、欠陥形態が直感的にわかりやすいなどの利点があり、実績ある非破壊試験方法である。反面、検査従事者および周囲の放射線障害防止が必要、試験装置が大型である、撮影から判定までに時間がかかるなどの短所がある。放射線透過試験の要領と等級分類を定める規格として JIS Z 3104 がある<sup>5)</sup>。超音波探傷法には斜角探傷法と垂直探傷法がある。欠陥検出能は放射線透過試験法のそれと比べ、線状あるいは面状欠陥に対してはより鋭敏で、球状欠陥に対しては鈍感といわれている。超音波探傷試験の要領と等級分類を定める規格として JIS Z 3060 がある<sup>6)</sup>。



写真 9-2 放射線透過検査状況

表 9-1 鋼橋における非破壊検査の適用区分<sup>7)</sup>

ゲタの種類	溶 接 部 位	非 破 壊 検 査			
		RT	PT	MT	UT
I ゲタ	フランジの突合せ溶接	○			△
	ウェブの "	○			
	*1 鋼床版の "	○			
	フランジとウェブのすみ肉溶接		△	(△)	
箱ゲタ	フランジの突合せ溶接	○			△
	ウェブの "	○			
	*1 鋼床版の "	○			
	フランジとウェブのすみ肉溶接		△	(△)	
	鋼床版縦ゲタの "		△	(△)	
トラス	上、下弦材で、フランジの突合せ溶接	○			△
	上、下弦材で、ウェブの突合せ溶接	○			
	斜材、鉛直材でフランジおよびウェブの突合せ溶接	○			
	上、下弦材でフランジとウェブのすみ肉溶接		△	(△)	
	斜材、鉛直材でフランジとウェブのすみ肉溶接		△	(△)	
橋 脚	フランジの突合せ溶接	○			△
	ウェブの "	○			
	フランジ、ウェブ材で、板厚方向に応力を受けるもの				○
	箱ゲタ隅角部のかど溶接				○
	板厚方向に応力を受ける部材に取り付けたすみ肉溶接部		△	(△)	
	鋼管または板巻管橋脚のラーメン隅角部		○	(○)	
ふくそうした構造で割れ発生のおそれある部分		○	(○)		
	フランジとウェブのすみ肉溶接		△	(△)	

注) RT：放射線透過試験  
 PT：浸透探傷試験  
 MT：磁粉探傷試験  
 UT：超音波探傷試験  
 ○：仕様書および基準書の規定に基づくもの  
 △：外観検査により割れを発見したときおよび施工主の指示あるとき  
 ▲：素材ガス切断時、発見されたラミネーション部  
 \*1：現場継手は一般に高力ボルト接合が多い

(2) 工場製作時の非破壊検査

表 9-1 は鋼橋製作において溶接部検査に適用されている非破壊検査の項目を示したものである<sup>7)</sup>。放射線透過試験は主要部材の「重要な突合せ継手」に属する板継ぎ溶接の内部欠陥の検査に対して適用されている。この継手は一般にサブマージアーク自動溶接により完全溶け込み溶接が施工され、溶接品質は安定しており、問題になることはほとんどない。表 9-2 はある橋梁製作工場での 8 か月間の X 線検査結果についてまとめたものである。8 か月間の 1 万枚近くの撮影フィルムの内、微小欠陥の 1 級を含めた無欠陥フィルムは 96% であり、2 級～4 級の欠陥フィルムは 4% 程度であ

る。

鋼橋においては上記の板継ぎ溶接継手以外はすみ肉溶接継手か、あるいは部分溶け込み溶接の継手である。したがって、放射線透過試験の適用が困難であり、外観検査が主体となっている。溶接部の外観検査は特に繰返し荷重を受ける場合に重要な品質となる溶接ビード表面の形状やアンダーカットの検査のほか、溶接割れの発見を主眼としている。

1) 放射線透過検査方法<sup>8)</sup>

道路橋においては、主要部材の突合せ継ぎ継手の内部欠陥に関する検査として、表9-3に示す標準以上について放射線透過試験を行うものとしている。試験の結果は、JIS Z 3104により引張り側2級以上、圧縮側3級以上を合格としている。表9-4にはこのJISの欠陥等級分類を示す<sup>9)</sup>。また、鉄道橋においてはJIS Z 3104により放射線透過検査を行うものとし、検査箇所およびその適合等級は、表9-5によると規定している。

2) 超音波探傷検査

鋼橋の受け入れ検査においては、ほとんどが放射線透過試験によるものであるが、鋼橋の多様化により超音波でなければ検査できない対象物や構造について、わずかずつではあるが超音波探傷法が導入されてきている。現在、一般的に用いられている超音波探傷試験はAスコープによるもので、エコーの高さにより欠陥の評価を行っている。超音波検査によって欠陥の種類、長さ、分布状況などを詳細に調べるには、放射線透過試験以上に困難はあるが、放射線透過試験ができないかど継

表9-2 工場突合せ溶接のX線検査結果

期間	撮影枚数	無欠陥	1級		2級		3級		4級		
			BH	SI	BH	SI	BH	SI	BH	SI	C
1月	1496	1364	20	40	21	12	9	10	4	15	1
			60		33		19		20		
2月	983	870	42	31	11	7	2	7	1	12	0
			73		18		9		13		
3月	1295	1187	52	24	11	4	3	6	1	7	0
			76		15		9		8		
4月	1553	1401	71	25	15	7	6	10	5	12	1
			96		22		16		18		
5月	1405	1242	56	37	20	11	6	12	2	17	2
			93		31		18		21		
6月	1358	1239	57	24	14	4	4	6	1	9	0
			81		18		10		10		
7月	731	677	27	13	5	3	1	2	1	1	1
			40		8		3		3		
8月	991	906	38	10	13	3	6	4	0	8	3
			48		16		10		11		
合計	9812	8886 90.6%	363	204	110	51	37	57	15	81	8
			567(5.8%)		161(1.6%)		94(1.0%)		104(1.1%)		

表9-3 道路橋の放射線透過試験適用の標準<sup>8)</sup>

1ゲタ、箱ゲタ、ラーメンなどの引張りフランジ、トラス、アーチなどの引張り部材	1継手につき1枚(クレーター側)
上記部材の圧縮側	5継手につき1枚
1ゲタ、箱ゲタの腹板	2継手につき1枚(引張り側)
鋼床版、ゲタ腹板の水平継手	1継手につき1枚(クレーター側)

表9-4 放射線透過試験(JIS)の欠陥等級分類<sup>6)</sup>

第1種(ブローホールなど)					
試験視野 母材の厚さ mm	10×10		10×20		10×30
	10以下	10を超え	25を超え	50を超え	100を超え
等級					るもの
1 級	1	2	4	5	6
2 級	3	6	12	15	18
3 級	6	12	24	30	36
4 級	欠陥点数が3級より多いもの				

第2種(スラグ巻き込みなど)			
等級	母材の厚さmm		
	12以下	12を超え48未満	48以上
1 級	3以下	母材の厚さの1/4以下	12以下
2 級	4以下	母材の厚さの1/3以下	16以下
3 級	6以下	母材の厚さの1/2以下	24以下
4 級	欠陥長さが3級より長いもの		

第3種(割れ)	
等級	すべて4級

表 9-5 鉄道橋の放射線透過試験の箇所および等級<sup>8)</sup>

撮 影 個 所	撮 影 の 範 囲	等 級	
プレートガーダーなど主として曲げモーメントをうける部材 (注1)	引張りフランジの継手 幅 0.8m未満 幅 0.8m以上、1.7m未満 幅 1.7m以上	全 幅 両端および中央各1枚 両端各1枚を含み、約50%の範囲	1 級
	圧縮フランジの継手 幅 0.8m未満 幅 0.8m以上、1.7m未満 幅 1.7m以上	全 幅 両端および中央各1枚 両端各1枚を含み、約50%の範囲	2級以上
	腹 板 垂直継手	両端各1枚を含み、約50%の範囲	引張り端1枚は1級、その他は2級以上
プレートガーダーなど主として曲げモーメントをうける部材	腹 板 水平継手	両端各1枚 中間については間隔3m以内ごとに1枚	2級以上
トラスの主構材など、主として軸力を受けるものの	引張り部材の継手 圧縮部材の継手	全 幅	1 級
跳ね出し架設のための架設連結構		全 幅	
格子作用を考慮する場合の横ゲタ	ゲタ本体のフランジとガセットプレートとの継手および横ゲタのフランジプレート相互の継手 腹板の垂直および水平継手	全 幅 両端各1枚を含み、約50%の範囲	2級以上
鋼 床 板	橋軸方向の継手	両端各1枚、中間は間隔3m以内ごとに1枚	
	橋軸直角方向の継手	両端各1枚を含み、50%の範囲。ただし、下路プレートガーダーの場合、立ち上がり部分は撮影しない	
	縦リブの継手	全 幅	1 級

注) 1)主として曲げモーメントをうける部材とは、「プレートガーダー」「縦ゲタ」「縦リブ」「横ゲタ」「ラーメン」「受ゲタ」「アーチ類の曲げモーメントおよび軸力を受ける部材」などをいう。

表 9-6 品質確認規定 (首都高速道路公団)<sup>9)</sup>

確 認 方 法	判 定 基 準
外 観 目 視	われ、スラグ、スパッタがあつてはならない。
外観目視及び計測	母材形状及びビード形状については、「道路橋示方書鋼橋編」による。
「道路橋示方書鋼橋編」による放射線透過試験	「道路橋示方書鋼橋編」による。
JISZ 2343 浸透液探傷試験	われがあつてはならない。
JISZ 3060 超音波探傷試験	2級以上合格

溶接種別	部 位	確 認 時 期	確 認 方 法	備 考
板継ぎ溶接	板継ぎ部	板継ぎ終了時	外観 放射線透過試験	
部材組立溶接 及び 部材取付溶接	一般部	部材組立終了時	外観	超音波探傷試験 ラーメン隅角部
	特殊部(1)	部材組立終了時	外観	浸透液探傷試験
	特殊部(2)	部材組立中	外観 浸透液探傷試験	写真撮影

表 9-7 品質確認規定 (名古屋高速道路公社)<sup>10)</sup>

主要部材の閉先溶接は、超音波探傷試験によって内部欠陥に対し超音波探傷検査を行なうものとする。ただし、放射線透過試験を行なう場合を除く。超音波探傷検査は表によるものとする。

表 超音波探傷検査適用基準

項 目	内 容
適 用 範 囲	① 隅角部の完全溶込み溶接部 ② 放射線透過試験に代って行う場合 ③ 上記以外の完全溶込み溶接部(ただし板厚が10mm以下は除く)
適 用 基 準	JIS Z 3060 (鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法)
検 出 レ ベ ル	L検出レベル
抜 取 り 率	① 隅角部は全線 ② 放射線透過試験に代る場合は別の表による ③ 上記以外の箇所は2.0%以上
判 定 基 準	① 隅角部は2級以上 ② 上記以外で引張応力を受ける溶接部・・・2級以上 圧縮応力を受ける溶接部・・・3級以上
抜 取 り 検 査 の 場 合 の 処 理	① 放射線透過試験に代る場合は、別の表による ② その他の抜取り検査の場合は、それと同一継手の残りの箇所を全線検査する。
非 破 壊 検 査 技 術	社団法人日本非破壊検査協会(非破壊検査技術者技量認定規定)の超音波探傷試験部門の2級以上
欠陥部の処理	補修後再検査を行い判定基準を満足すること

表 9-8 現場溶接継手の品質確認規定 (首都高速道路公団)<sup>12)</sup>

溶接品質の確認

確認事項	確 認 方 法	判 定 基 準	確 認 範 囲	
外 部	目視	あつてはならない	全延長	
	浸透探傷試験 JIS Z 2342	あつてはならない	われ発生のおそれのある箇所	
欠 陥	スパッタ スラグ	目視	あつてはならない	全延長
	母材形状 ビード形状	目視および計測	有害な欠陥があつてはならない	全延長
内 部 欠 陥	放射線透過試験 JIS Z 3104	引張側 2級以上 圧縮側 3級以上	突き合わせ溶接の全延長。ただし鋼床版は下表による	
	超音波探傷試験 L検出レベル JIS Z 3060	引張側 2級以上 圧縮側 3級以上	放射線透過試験の適用が困難な箇所	

鋼床版の放射線透過試験

撮 影 枚 数	原則として1溶接線について2.0枚とし、1溶接線が短く2.0枚を必要としない場合は、1溶接線の全長を撮影するに要する枚数。
撮 影 位 置	溶接線の始端および終端(各1枚)ならびに溶接線をほぼ等分する箇所(1.8枚)。
判 定 基 準	1溶接線につき、検査透過写真2.0枚のうち、第2種4級あるいは第3種4級と判定された透過写真が0枚で、かつ第1種3級4級あるいは第2種3級と判定された透過写真が2枚以下の場合、当該溶接線を合格とし、上記欠陥を補修する。不合格の場合は当該溶接線の全長を撮影し、2級以上を合格とする。

手、T継手などには有効である。橋梁の分野においては、放射線透過試験と比べて記録性に乏しいことから、放射線透過検査の困難な現場溶接など一部に限られて使用されているのが現状である。表9-6に首都高速道路公団の溶接部の品質確認規定を示すが、ラーメン部材の隅角部、フランジ貫通部、T型溶接部などの割れ発生の可能性が高い部分に限られている<sup>9)</sup>。また、名古屋高速道路公社においても表9-7に示すように、ほぼ同様な規定が設けられている<sup>10)11)</sup>。しかしながら、最近では徐々にではあるが、現場溶接継手を対象にして超音波探傷試験の適用が試みられ、現場施工マニュアルの中にも規定されるようになってきている<sup>12)13)</sup>。表9-8、9-9にはそれぞれ、首都高速道路公団、阪神高速道

表9-9 現場溶接継手の品質確認規定 (阪神高速道路公団)<sup>13)</sup>

<p>(1) デッキプレートの突合せ溶接部は、放射線透過試験 (JISZ3104) により検査を行なうことを原則とする。 ただし、十分な資料を有する場合は、放射線透過試験のかわりに超音波探傷試験を用いることができる。</p> <p>(2) 撮影箇所は、溶接の終始端、交差部、ワイヤー継部、およびその中間部においては、1mにつき1枚を原則とする。</p> <p>(3) 放射線透過試験による検査は、JISZ3104のにより、引張側2級以上、圧縮側3級以上を合格とする。</p> <p>(4) 放射線透過検査の結果、不合格箇所が出た場合は、その箇所の前後1mについて検査を行なわなければならない。これらの箇所に不合格の欠陥があった場合には、その1継手 (注)の残りの部分を全線検査しなければならない。なお、不合格になった欠陥は補修溶接を行なうものとする。</p>
<p>(1) 鋼製橋脚の突合せ溶接部は、放射線透過試験または超音波探傷試験により検査を行なわなければならない。</p> <p>(2) 検査は、溶接線全長にわたって行なうことを原則とする。</p> <p>(3) 放射線透過試験を用いる場合には、JISZ3104において2級以上を合格とする。また、超音波探傷試験を用いる場合には、JISZ3060において2級以上を合格とする。なお、検出レベルはM検出レベルとする。</p> <p>(4) 不合格になった場合は、補修溶接を行ない、再検査しなければならない。</p>

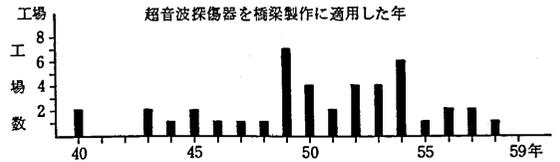


図9-2 超音波探傷試験を橋梁製作工事に適用した年<sup>14)</sup>

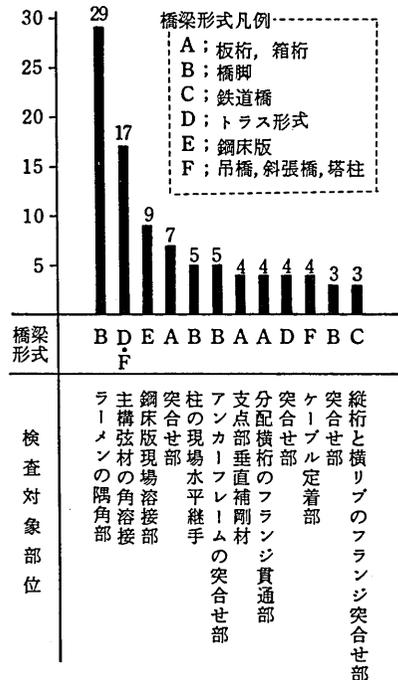


図9-3 超音波探傷試験の適用部位<sup>14)</sup>

表9-10 港大橋の検査適用範囲<sup>8)</sup>

材質	継手	突き合わせ継手	かど継手TK 突き合わせ継手	TKグループ すみ肉継手
HT80	放射線透過試験 引張側全長 圧縮側全長 約30%	放射線透過試験 全長	超音波探傷試験 全延長	液体浸透探傷試験 または磁粉探傷試験 全延長
HT70	同上	同上	同上	同上
SM58 (t > 3.8)	同上 ただし圧縮側は 全長の25%	同上	同上	外観検査
SM58 (t ≤ 3.8)	同上 全延長の25%	同上	同上	同上
SM50	同上	外観検査	同上	同上
SM41 SS41	同上	同上	同上	同上

検査対象部位	橋梁形式
ラーメンの隅角部	B
主構弦材の角溶接	D
鋼床版現場溶接部	E
突合せ部	A
柱の現場水平継手	B
アンカーフレームの突合せ部	B
支点部垂直補剛材	A
分配横桁のフランジ貫通部	A
ケーブル定着部	D
突合せ部	F
縦桁と横リブのフランジ突合せ部	B
	C

路公団の現場溶接の品質規定を挙げる。

ところで、超音波探傷試験が初めて本格的に橋梁工場製作に適用されたのは港大橋である。表9-10に検査適用範囲を示すが、SM 58以上を用いたかど継手のT型、K型の突合せ部分溶込み溶接部に採用された。図9-2に橋梁製作工事に超音波探傷試験を適用した年度のヒストグラムを示す<sup>14)</sup>。このうち、検査対象部位の多い順に並べたのが図9-3である。圧倒的に多いのが橋脚の隅角部および本四架橋に関連した補剛トラス弦材のかど溶接部である。ここ数年の特徴的なこととして、鋼床版現場溶接部の検査が増えつつある。表9-11には発注者別頻度とともに適用される規格と検査対象部位を示す。

一方、超音波探傷試験の自動化は最近開始されたばかりであり、造船、パイプライン、原子力などの分野では、専用装置の開発が行われているようである。しかしながら、NDIS 2407<sup>15)</sup>でも分かるように、その記録方式からしても数種類もあり、それぞれの方法も開発途上にあることから見て、現在の放射線フィルムにとってかわるまでには、いまま少し時間がかかるものと思われる。

### (3) 鋼床版工場製作時の検査

鋼床版の工場製作時の溶接部の検査については、道路橋示方書に基づいて行われている。溶接の検査としては前述の突合せ溶接継手の内部欠陥に対するものの他に、溶接割れ、ビードの外観および形状の検査がある。溶接割れについては「溶接ビードおよびその近傍には、いかなる場合も割れがあってはならない。割れの検査は肉眼で行うのを原則とするが、疑わしい場合は磁粉探傷法または浸透探傷法を用いるのが良い」と規定している。また、溶接ビードの外観および形状については、それぞれ適正な許容量を与えて、客観的な判断が行えるような検査基準を設けている。表9-12には溶接ビード表面のピット、凹凸、アンダーカットなどの規定を示す。

表9-11 発注者別の適用規格と対象部位<sup>14)</sup>

発注先	回答のあった工場数	適用規格	検査対象部位
1 本州四国連絡橋公団	21	JIS Z 3060 (14件) 本四公団規格	主構・塔柱の角溶接、突合せ部 T字・十字形完全溶込み部、アンカーフレーム、端補剛材と下フランジ、鉄道桁首下溶接、その他
2 名古屋高速道路公社	20	JIS Z 3060 (20件)	脚隅角部、梁仕口部、フランジの角継手、横桁仕口部、T継手完全溶込み部、その他
3 日本国有鉄道	17	JIS Z 3060 (16件) 本四公団規格	主構角溶接、縦桁と横リブのフランジ突合せ部、鉄骨仕口部、脚隅角部、埋込み桁フルベネ部、ブラケットの仕口部、その他
4 首都高速道路公団	15	JIS Z 3060 (15件)	脚隅角部、脚現場溶接部、橋梁T継手、ダイヤフラム、アンカーフレーム、脚ベース部、その他
5 阪神高速道路公団	14	JIS Z 3060 (13件) 本四公団規格	主構角溶接、脚隅角部、横桁フランジ貫通部、ケーブル定着部、ダイヤフラム、その他
6 福岡九州高速道路公社	6	JIS Z 3060 (6件)	脚隅角部、主桁と横桁支口の完全溶込み、その他
7 日本道路公団	5	JIS Z 3060 (5件)	突合せ部、ケーブル定着部、端補剛材と下フランジ、鋼床版現場溶接部、その他
8 建設省	5	JIS Z 3060 (5件)	鋼床版現場溶接部、支柱突合せ部、その他
9 都道府県	4	JIS Z 3060 建築学会 (3件)	橋脚隅角部、T継手、トンネルの張板突合せ、その他
10 ゼネコン	3	建築学会	柱と梁の継手部、鉄骨のベース部、T継手、その他

表9-12 溶接ビードの外観および形状の検査 (道路橋示方書)

i) 溶接ビード表面のピット 主要部材の突合せ継手および断面を構成するT継手、かど継手には、ビード表面にピットがあってはならない。その他のすみ肉溶接および部分溶込みグループ溶接には、1継手につき3個、または継手長さ1mにつき3個まで許容するものとする。ただし、ピットの大きさが1mm以下の場合には、3個を1個として計算するものとする。	
ii) 溶接ビード表面の凹凸 ビード表面の凹凸は、ビード長さ25mmの範囲における高低差で表し、3mmをこえる凹凸があってはならない。	
iii) アンダーカット アンダーカットの深さは、次表の値をこえてはならない。	
アンダーカットの位置	許容深さ(mm)
主要部材の材片に働く一次応力に直交するビードの止端部	0.3
主要部材の材片に働く一次応力に平行なビードの止端部	0.5
二次部材のビード止端部	0.8
iv) オーバーラップ オーバーラップはあってはならない。	
v) すみ肉溶接の大きさ すみ肉溶接のサイズおよびの厚は、指定すみ肉サイズおよびの厚さを下回ってはならない。ただし、1溶接線の両端各50mmを除く部分では、溶接長さの10%までの範囲で、サイズおよびの厚ともに-1.0mmの誤差を認めるものとする。	

#### (4) 鋼床版現場突合せ溶接継手の検査

##### 1) 溶接欠陥

鋼床版の現場溶接には自動CO<sub>2</sub>溶接が適用される例も報告されているが、一般には片面サブマージアーク溶接法が最も多く使用されている<sup>16)~28)</sup>。写真9-3に溶接状況を示す。この溶接工法での主な欠陥は、次のとおりである。

- ① ブローホール
- ② スラグ巻き込み
- ③ 割れ
- ④ 裏ビードの不整
- ⑤ 溶け落ち
- ⑥ ウォームホール

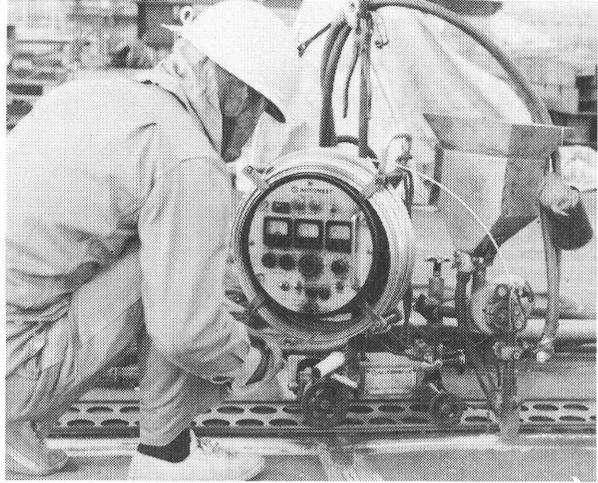


写真9-3 鋼床版現場突合せ溶接状況

最も重大な欠陥である割れのうち、サブマージアーク溶接法における梨形ビードに生ずる高温割れはよく知られているが、片面溶接法ではさらに、拘束による割れおよび終端割れが発生しやすい。ブローホールやスラグ巻き込みは、この溶接方法以外でもみられる欠陥であるが、裏ビードの片寄り、オーバーラップ、裏ビード量の不足などによる裏ビード不整、裏当て材の密着不良による溶接金属の溶け落ち、裏ビード表面に生ずるウォームホールなどは、この溶接工法のみにも生ずる欠陥である。図9-4は一例として欠陥の種類と欠陥率の関係を示す<sup>29)</sup>。これらの欠陥を補修する場合、補修溶接による再度の熱影響や残留応力により、継手の信頼性は必ずしも向上するとはかぎらないので、はじめからこれらの欠陥が生じないように、施工管理を慎重に行うことが重要である。また、できるかぎり欠陥が生じない施工が行えるように、鋼材、構造、および架設についても十分配慮することが望ましい。

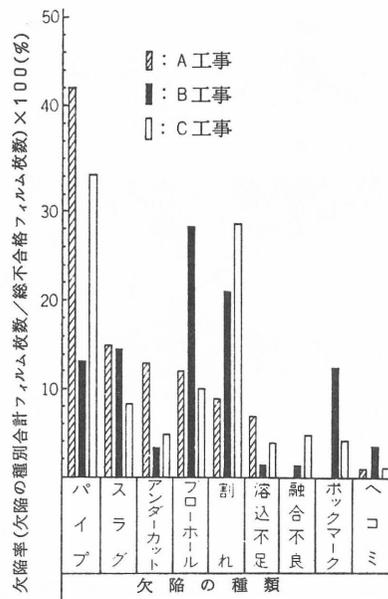
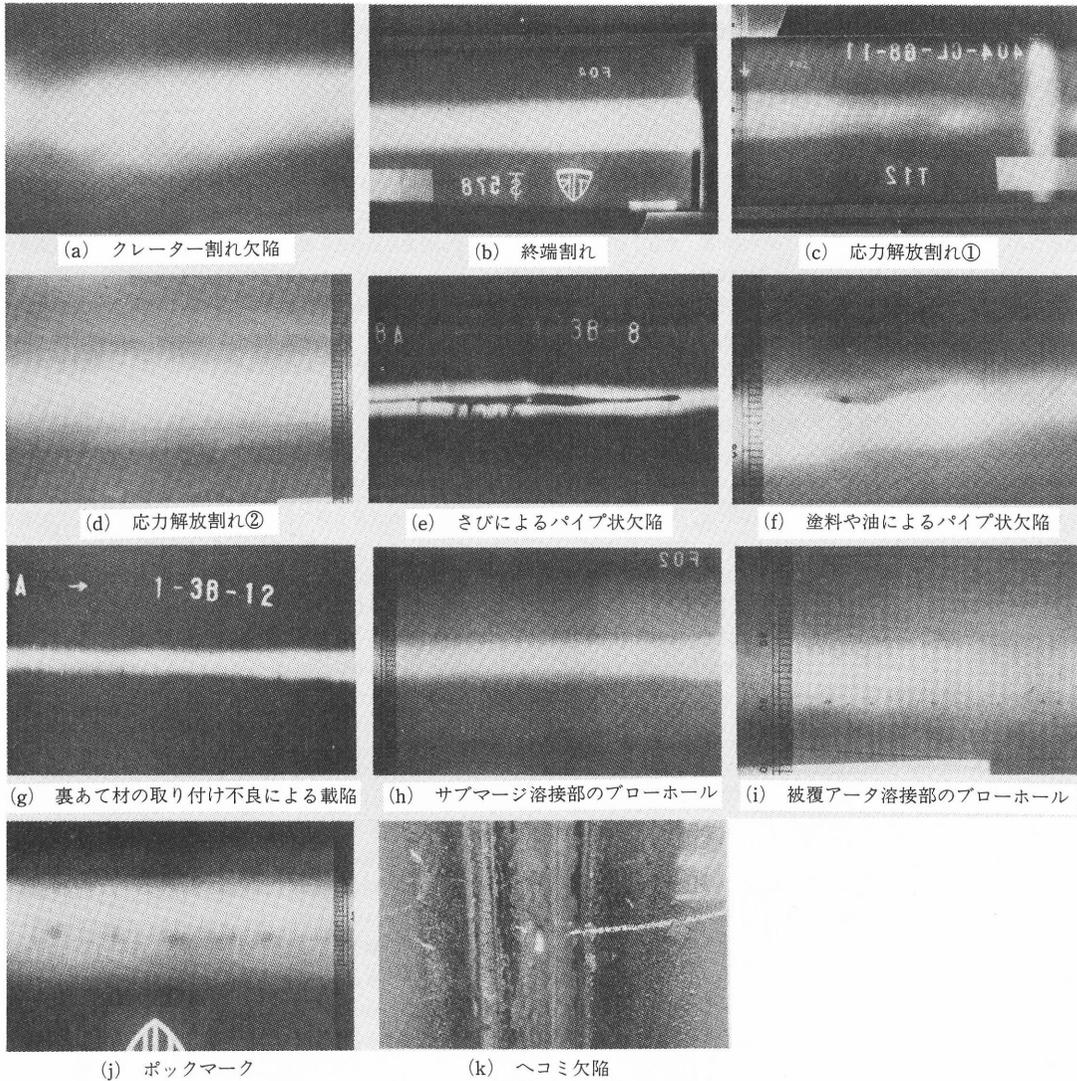


図9-4 欠陥率と欠陥の種類<sup>29)</sup>

##### 2) 検査方法

検査としては、外観検査と内部検査が行われる。ブローホール、割れ、裏ビードの不整、溶け落ち、ウォームホールなどが外観検査の対象となる。一方、内部検査は、主に放射線透過試験により、ブローホール、割れ、スラグ巻き込みなどが対象となる。放射線検査は、通常抜き取りで行われているが、

写真 9-4 X線フィルムの欠陥像<sup>29)</sup>

- ① 橋軸直角方向の溶接部
- ② 外観ビードの不整部
- ③ 溶接始末端部
- ④ 溶接交差部

などが重点的に行われている。写真 9-4 に代表的な X 線フィルムの欠陥像を示す<sup>29)</sup>。それぞれの欠陥像には特徴がある。クレーター割れは表面から 3 ~ 5 mm の深さに発生し、欠陥長さが 20 ~ 30 mm 程度で、割れ部分の中央部の濃度が濃く、両端部が薄い映像となる (a)。終端割れは溶接線の終端部付近に発生し、欠陥長さが 250 ~ 200 mm 程度で、割れ部分の濃度が極めて濃く、直線的である (b)。応力解放割れには 2 種類あり、シーリングビードの裏波ビードまで融合した場合には、その部分に相当する長さだけ割れており、濃度が極めて濃く、直線的である (c)。目違いの修正を行い仮付け溶接されて

いる場合には、仮付け位置から 50~150 mm 工法の位置に発生し、濃度の薄い細い直線状の欠陥である (d)。

パイプ状欠陥には錆による欠陥 (e)、塗料や油による欠陥 (f)、裏当て材取付け不良による欠陥 (g) などがある。また、サブマージ溶接部に発生するブローホールは溶接線と同一方向に直径 0.5~1.5 mm の丸みを有し、X 線における 1 視野で 5~15 個が連続的に発生している。裏当て材の密着不良や錆、油、塗料などの付着が原因であるが、前者は溶接線の片側だけに、後者は溶接線の両側に発生する傾向がある (h)。手溶接部に発生するブローホールはランダムに発生している場合と密集している場合がある。前者は合格範囲内に入るものが多いが、後者はほとんどが不合格となる (i)。ポックマークは裏ビード側に発生することが多く、直径 3~10 mm の円形もしくは楕円形の映像となっている。ポックマークの発生原因についてはフラックスの散布高さや錆、スケールなども考えられるが、特に板表面に塗布してある塗料の影響があると推定されている (j)。その他に溶け込み不足、スラグ巻き込み、アンダーカットなどがあるが、一般の溶接部に発生する欠陥と変わりなく、へコミと呼ばれる片面自動溶接に特有な欠陥を (k) に示す。

表 9-13 に、本州四国連絡橋公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団それぞれの検査規定を比較して示す<sup>31)12)13)</sup>。首都高速道路公団、本州四国連絡橋公団の規定は、基本的には、検査方法、抜取方法、判定基準あるいは合否判定後の処置などについては加藤の研究<sup>30)</sup>に基づいて決められている。すなわち、加藤は、実際の工事の実績調査結果から鋼床版の現場溶接の欠陥発生状況を次のようにまとめている。

・現場施工着手当初における欠陥発生率はかなり高い。

表 9-13 デッキプレートの突合せ継手の検査規定の比較<sup>13)</sup>

	本 四 公 団	首 都 公 団	阪神高速道路公団
検査方法	・デッキプレートの突合せ継手は、JIS Z 3104 により X 線透過試験および検査を行うものとする。	・鋼床版の場合は、1 溶接線ごとの放射線試験による検査	・鋼床版の突合せ継手は、放射線透過試験 (JIS Z 3104) により検査を行なうものとする。ただし、十分な資料を有する場合は、放射線透過試験のかわりに超音波探傷試験を用いることができる。
抜取方法	・検査は溶接線ごとに、JIS K 7521 に示される 84mm X 303mm の大きさの X 線フィルムを使用した 15 枚の X 線透過写真の撮影により行なうものとする。  ・撮影位置は、溶接線の始端および終端から 50cm の長さで撮影できるように連続して 2 枚をそれぞれの位置に配し、残り 11 枚を当該溶接線の残った部分をほぼ等分に配するものとする。 ただし、溶接線の交点がある場合には、その場所に 1 枚配するものとする。また、1 溶接線が短かく、全線の撮影を行なっても撮影枚数が 15 枚以下である場合には、その溶接線の全延長について撮影するものとする。	・撮影枚数は、原則として、1 溶接線について 20 枚とする。ただし、1 溶接線が短かく 20 枚を必要としない場合は、全延長を撮影するに要する枚数とする。  ・撮影位置は、溶接線の始端および終端 (各 1 枚) 並びに溶接線をほぼ等分する箇所 (18 枚) とする。	・(1 案) 首都公団と同じ ・(2 案) 撮影箇所は、始端、終端、交差点、ワイヤー継部およびその中間部においては、1 m につき 1 枚を原則とする。  開先が許容値を超える箇所については、別途抜取方法を協議する。
判定規準	・合否の判定は 1 溶接線ごとに行なう。検査透過写真 15 枚について JIS Z 3104 による等級分類における第 2 種 4 級あるいは第 3 種 4 級と判定された透過写真が 0 枚であって、かつ第 1 種 3 級・4 級あるいは第 2 種 3 級と判定された透過写真が 1 枚以下の場合、当該の、溶接線を合格とする。	・放射線透過試験による検査は、JIS Z 3104 の引張側 2 級、圧縮による等級分類 3 級以上を合格とする。	首都公団方式
不合格の処置	・合格と判定された溶接線において第 1 種 3 級、4 級あるいは第 2 種 3 級の欠陥が検出されている場合には、欠陥の範囲を確認した後に「製作基準」9. 20 により補修を行なうものとする。不合格と判定された溶接線においては未撮影の部分全域について X 線透過写真の撮影を行ない、欠陥の範囲を確認した後に「製作基準」9. 20 により補修を行なうものとする。 これらの場合の合格判定基準は JIS Z 3104 の 2 級とする。	・放射線透過試験の結果、不合格箇所が出た場合は、その箇所の前後の部分について放射線透過試験による検査を受けなければならない。この場合において、溶接欠陥箇所は削り取り、溶接補修を行ない、再検査を受けなければならない。	・放射線透過試験の結果、不合格箇所が出た場合は、その箇所の前後 1 m について検査を行なう。これらの箇所に不合格の欠陥があった場合には、その継手 1) の残り箇所を全線検査する。なお、不合格になった欠陥は補修溶接を行なう。  1) ここで 1 継手とは、溶接の始終端から交点、あるいは交点から交点までを指す。

- ・現場溶接の欠陥発生率は、工場溶接の欠陥発生率に比べて高い。
- ・溶接線上の特異点は、それぞれ特有の欠陥発生傾向を示すが、特異点にのみ着目して検査すればよいといえるほどではない。

したがって、このような発生状況に対する検査方法は、溶接線に要求する品質を明確にしたうえで、溶接線の長さによって検査の厳しさが変動せず、溶接線の全長を平均的にカバーするなどの条件を満たす必要があるというものである。

そこで、例えば本州四国連絡橋公団の基準においては、鋼床版現場溶接継手の要求品質は、工場溶接継手で得られていると推定される品質と同程度の品質確保を目標とし、残存欠陥率期待値を割れ、溶け込み不良のように継手性能に重大な影響をもつ欠陥に対しては2%以下に、プロホール等の比較的影響の度合の小さい欠陥に対しては5%以下としている<sup>31)</sup>。そして、ある確率で欠陥が生じている溶接線を、ある許容欠陥率まで合格とする抜き取り検査することとしている。すなわち、許容欠陥率を超えた場合には不合格とし、さらに全数検査を実施して欠陥を全部補修する。また、許容欠陥率以下の場合には、合格とするが、発見された欠陥は補修することとしている。このとき、残存欠陥率期待値は合格と判定された溶接線に残存する欠陥の期待値ということができる。不合格の溶接線は欠陥がすべて補修されるので、残存欠陥率期待値0となる。

一方、抜き取り数は、従来の定率抜き取り方式(パーセント抜き取り方式)では溶接線の長さ(ロットの大きさ)によって厳しさが変動するので、溶接線の長さにかかわらず一定としている。その数は溶接継手部に要求する品質、すなわち残存欠陥率期待値との関係で決める必要がある。現場溶接線は

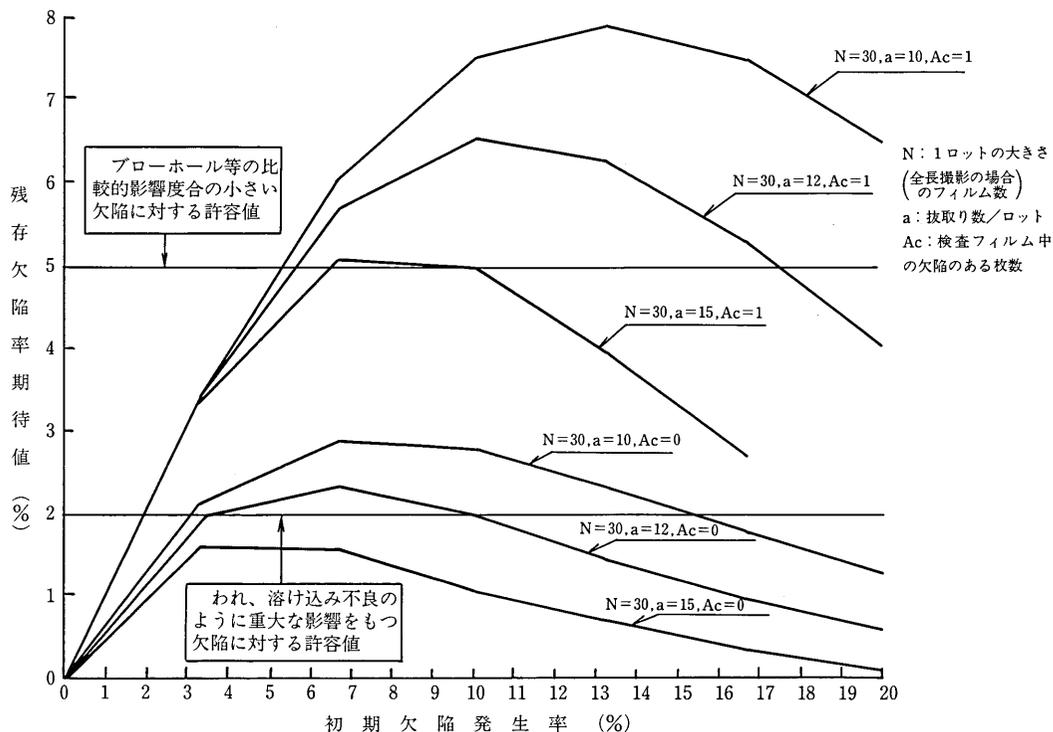
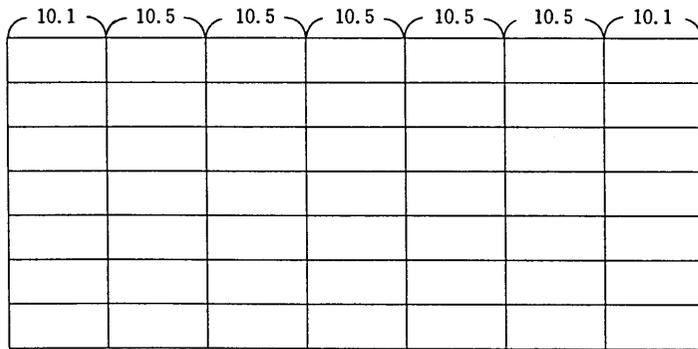


図9-5 抜き取り数による残存欠陥率期待値<sup>31)</sup>

7 m~10 m 前後が多く予想されるところから、1 溶接線のロットの大きさはフィルム長さを 30 cm にすると 25~35 枚程度が予想される。定数抜き取りにした場合、たとえロットの大きさが 25~35 枚の範囲で変化しても、残存欠陥率期待値にほとんど変化がない。そこで、1 溶接線のロットの大きさを仮に 25~35 の中間値である 30 枚で考える。そして、抜き取り数と検査フィルム中の欠陥のある枚数(抜き取り数×許容欠陥率)を変化させて残存欠陥率期待値を計算すると図 9-5 の結果が得られる。

		溶接長		撮影枚数		抜取率		
		C方向	L方向	C方向	L方向	C方向	L方向	全体
L 方向 ジグザグ	首都公団 方式	102m	437m	386枚 (102m)	1112枚 (320m)	100%	73%	78%
	阪神高速 方式	〃	〃	138枚 (41.4m)	488枚 (146m)	41%	33%	35%
C 方向 直線	首都公団 方式	114m	437m	426枚 (114m)	840枚 (252m)	100%	58%	66%
	阪神高速 方式	〃	〃	130枚 (39m)	462枚 (139m)	34%	32%	32%



(C線方向直線の例)

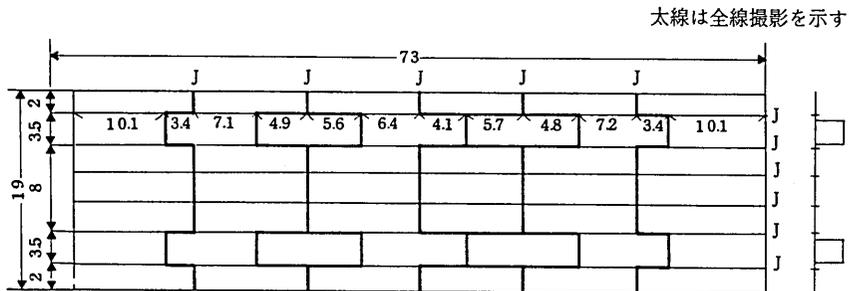


図 9-6 放射線透過試験の抜き取り率の一例<sup>13)</sup>

この結果、重大な影響をもつ欠陥に対しては2%以下とし、比較的影響度合の小さな欠陥に対しては5%以下の残存欠陥率とする品質を得るには、抜き取り数として15枚が適当であると考えられる。この場合、図からも明らかなように、初期欠陥発生率が低い場合には抜き取り数に関係なく所定の品質を得ることができる。

これに対し、阪神高速道路公団の規定では、

- ・ 作業標準、管理基準などが整備されて、最近では非常に安定した品質が得られる
- ・ 強度上大きな影響を及ぼす割れは、溶接の終端あるいは交差部にほぼ限られる
- ・ 検査費は人件費の上昇とともに大きな額になりつつある

ことから、検査箇所については、欠陥の発生しやすい所を重点的に行うこととし、それら以外の箇所については、開先状態、溶接条件などが許容値内に収まっていれば、溶接施工の確認という面から抜取方法を決めている<sup>33)</sup>。図9-6にC方向継手が直線の場合とジグザグの場合の2つのケースについて、首都高速道路公団、阪神高速道路公団方式による抜取率をまとめて示す。

(5) 縦リブ突き合せ溶接継手の検査

鋼床版の縦リブは従来の開断面リブに代わり、軽量化、経済性などから閉断面リブの使用が多くなりつつある<sup>32)</sup>。トラフリブの現場継手は施工上の理由からHTボルト継手とすることもあるが、一般的にははめ込み溶接が行われる。図9-7には現場接合部の一例を、また、図9-8にはエレクションピース形状を示す<sup>33)</sup>。縦リブの裏当て金およびエレクションピースは工場であらかじめ溶接で取り付けられる。現場では架設に際して、まず、エレクションピースをボルトで接合する。その後、はめ込みリブの突き合せ溶接を行い、最後に、縦リブとデッキプレートのはめ込み溶接を行う。

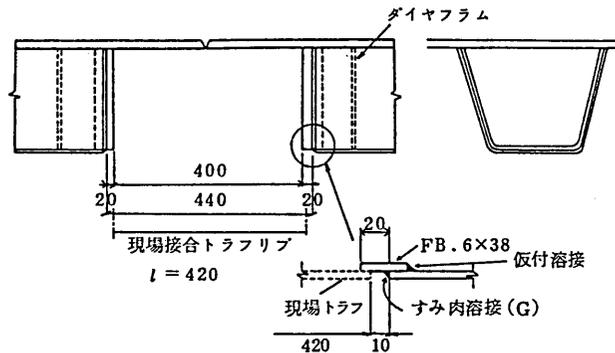


図9-7 トラフリブの現場接合部<sup>33)</sup>

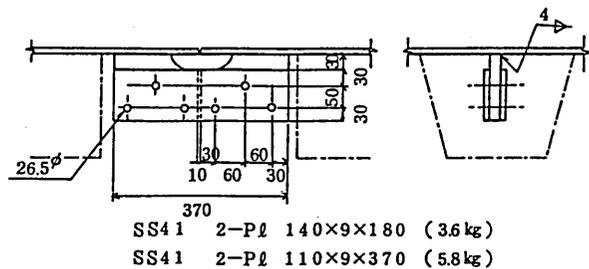


図9-8 エレクションピースの形状<sup>33)</sup>

トラフリブの現場溶接継手は上向きあるいは立向きの溶接姿勢となり、下向き溶接に比べてルート部の溶け込みが悪くなる。縦桁、腹板の近傍では狭い場所での溶接

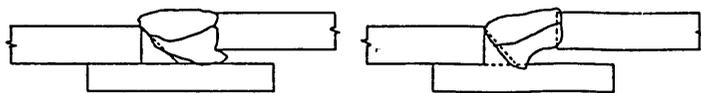


図9-9 目違い部に生じ易い欠陥<sup>33)</sup>

となり、作業性が悪いために欠陥が生ずる可能性がある。したがって、ルートギャップの確保はルート部の不溶着、のど厚不足などの欠陥発生防止の必要条件である。同様に、裏当て金との密着不良も図9-9に示すような欠陥の発生原因となる。

トラフリブの突合せ溶接部は、構造的に放射線透過試験が行えないが、目視検査でも慎重に行えば割れなどの重要な欠陥の有無は十分に調べることが可能である。表9-14に各公団での縦リブ突合せ溶接継手の検査規定を比較して示す。このうち、本四基準において浸透探傷試験を行うことが規定されている。

(6) 施工例における検査結果

かなり古いデータであるが、表9-15にある鋼床版橋梁のX線撮影結果を示す。検査は溶接線全線について行ったものである。表ではL方向継手、C方向継手に分類し、さらに、溶接端部、交差部と一般部に分けて不合格フィルム枚数の割合で示してある。全体の欠陥発生率は7.3%であり、先に示した工場突合せ溶接の欠陥発生率に比べて高くなっている。継手位置について見てみると、まず、L方向とC方向の差違は顕著ではない。また、端部、交差部は一般部と比べて欠陥率が高くなっている。さらに、端部、交差部では割れの発生が多くなっていることがわかる。表9-16、9-17には別の橋梁での検査結果を示す。それぞれ、抜き取り率は20%、8%である。いずれも端部1枚、交差部4枚もしくは5枚、一般部1枚である。全体の欠陥発生率は抜き取

表9-14 縦リブの突合せ継手の検査規定の比較<sup>13)</sup>

	本 四 公 団	首 都 公 団	阪神高速道路公団
検査方法	・縦リブの突合せ継手は、JIS Z 2343により浸透探傷試験および検査を行なうものとする。	な し	
抜取方法	・検査は、突合せ継手部分の全長について行なうものとする。		・10溶接線（トラフ5個）を1ロットとし、1ロットについて溶接線を検査する。
判定基準	・線形指示が現われないこと。 ・円形指示があっても、長さが4.5mmを超えるものが現われないこと。 ・4つ以上の円形指示が直線上に並んでいる場合は、隣接する円形指示の間が1.5mmを超える。 ・面積3750mm <sup>2</sup> の長方形（短辺の長さは25mm以上とする）内に円形指示が10個以上含まれないこと。		
不合格の処置	・上記の規定に不合格箇所は、「製作基準」9.20により補修を行なうものとする。		・不合格になったロットの残り全線を検査する。なお、不合格の欠陥は補修溶接を行なう。

表9-15 放射線透過試験結果（E橋、十字）

継手区分	撮影位置	欠陥種別、個数、( )は%				合計
		ブローホール	スラグ巻込	融合不良	割れ	
橋軸方向 L方向	端部交差部 200	7 (3.5)	4 (2.0)	1 (0.5)	42 (21.0)	54 (27.0)
	一般部 784	3 (0.4)	2 (0.3)	0 (0)	7 (0.9)	12 (1.5)
	小計 984	10 (1.0)	6 (0.6)	1 (0.1)	49 (5.0)	66 (6.7)
橋軸 直角方向 C方向	端部交差部 288	7 (2.4)	3 (1.0)	1 (0.3)	26 (9.0)	37 (12.8)
	一般部 614	22 (3.6)	3 (0.5)	0 (0)	10 (1.6)	35 (5.7)
	小計 902	29 (3.2)	6 (0.7)	1 (0.1)	36 (4.0)	72 (8.0)
合計 1886		39 (2.1)	12 (0.6)	2 (0.1)	85 (4.5)	138 (7.3)

り、端部、交差部では割れの発生が多くなっていることがわかる。表9-16、9-17には別の橋梁での検査結果を示す。それぞれ、抜き取り率は20%、8%である。いずれも端部1枚、交差部4枚もしくは5枚、一般部1枚である。全体の欠陥発生率は抜き取

り率が下がるにつれて大きくなっている。これは、欠陥、特に割れが発生しやすい溶接始端を重点的に抜き取り検査をするためである。抜き取り率を増やすと、欠陥の発生が少ない一般部の撮影が増えることになり、全体の欠陥発生率は減少する傾向にある。

現場溶接の場合、工場突合せ溶接と異なり、種々の条件に左右される。例えば、

- ・ 気象条件
- ・ 横断勾配、縦断勾配の有無
- ・ 開先精度（ルートギャップ、目違い等）
- ・ 開先の清掃状態（防錆塗料も含む）
- ・ バッキング材の取付け状態などがあり、溶接施工においても
- ・ 溶接順序
- ・ 溶接端部の拘束
- ・ 仮付け溶接の有無

表 9-16 放射線透過試験結果 (A 橋, T 字)

継手区分	撮影位置	欠陥種別、個数、( )は%				合計
		ブローホール	スラグ巻込	融合不良	割れ	
橋軸方向 L方向	端部交差部 264	0 (0)	15 (5.7)	1 (0.4)	19 (7.2)	35 (13.3)
	一般部 84	6 (7.1)	0 (0)	3 (3.6)	2 (2.4)	11 (13.1)
	小計 348	6 (1.7)	15 (4.3)	4 (1.1)	21 (6.0)	46 (13.2)
橋軸 直角方向 C方向	端部交差部 192	0 (0)	6 (3.1)	2 (1.0)	5 (2.6)	13 (6.8)
	一般部 128	8 (6.3)	3 (2.3)	1 (0.8)	0 (0)	12 (9.4)
	小計 320	8 (2.5)	9 (2.8)	3 (0.9)	5 (1.6)	25 (7.8)
合計 668		14 (2.1)	24 (3.6)	7 (1.0)	26 (3.9)	71 (10.6)

表 9-17 放射線透過試験結果 (T 橋, 十字)

継手区分	撮影位置	欠陥種別、個数、( )は%				合計
		ブローホール	スラグ巻込	融合不良	割れ	
橋軸方向 L方向	端部交差部 75	2 (2.7)	3 (4.0)	0 (0)	7 (9.3)	12 (16.0)
	一般部 38	0 (0)	0 (0)	1 (2.6)	1 (2.6)	2 (5.3)
	小計 113	2 (1.8)	3 (2.7)	1 (0.8)	8 (7.1)	14 (12.4)
橋軸 直角方向 C方向	端部交差部 126	3 (2.4)	4 (3.2)	1 (0.8)	21 (16.7)	29 (23.0)
	一般部 33	0 (0)	1 (3.0)	0 (0)	2 (6.1)	3 (9.1)
	小計 159	3 (1.9)	5 (3.1)	1 (0.6)	23 (14.5)	32 (20.1)
合計 272		5 (1.8)	8 (2.9)	2 (0.7)	31 (11.4)	46 (16.7)

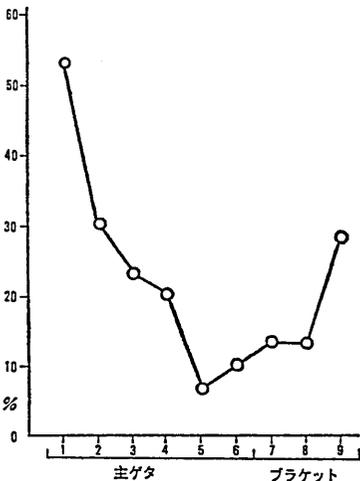


図 9-10 溶接進行と欠陥率<sup>42)</sup>

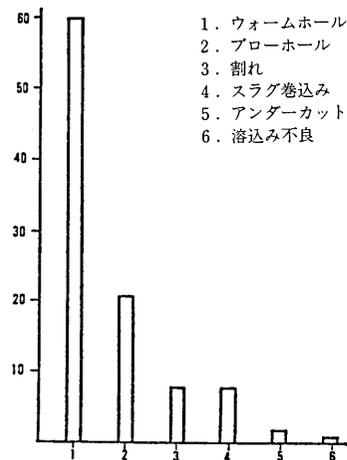


図 9-11 全欠陥中に各欠陥の占める割合<sup>42)</sup>

が影響してくる。すでに鋼床版の現場溶接はかなり多く行われてきており、数多くの報告があるが、それぞれの現場の特徴があり、欠陥発生状態についてもひとまとめに考えるわけにはいかない<sup>34)~67)</sup>。さらに、一つの工事においても、慣れの問題がある。一般には工事初期にはいろいろと失敗もあり、欠陥発生率が高く、最終的には各種欠陥の発生が防止される傾向にある。図9—10は天満橋立体交差橋の現場溶接継手についての、溶接作業の進行に伴う欠陥率の減少を示したものである<sup>42)</sup>。また、図9—11は、全欠陥中に占める各欠陥の割合を示したものである。平均欠陥発生率は19%であるが、これは工事の初期においてウォームホールが多発したためである。直ちに、ウォームホール発生防止の対策を実施した結果、欠陥発生率は減少したと報告されている。

鋼床版現場溶接が採用されるようになってから、すでに20年余り経過しており、その間の技術的改良により当初の溶接欠陥の多発を含む溶接関係のトラブルは少なくなってきている。現在の技術では、後で述べる本四関連の鋼床版現場溶接のように、欠陥発生がほとんどないという実績まで到達している。

### (7) 超音波探傷試験の適用

超音波探傷試験と放射線透過試験を欠陥に対する評価能力という点について比較してみると、欠陥の形状、位置などについてそれぞれ特徴を有していることが判る。すなわち、前者では欠陥の板厚方向の位置を知ることができるが、後者では不可能である。また、平面欠陥が板表面に直交し面内に存在すると後者では発見しにくいか、または過小評価となるが、前者ではタンDEM法などで比較的よく把握できる。また、後者では球状あるいは円筒状の立体的な欠陥の検出には適しているが、前者では入射音波の放射状反射によって探触子に戻るエコーが少なくなり、過小評価の危険がある。また、被検体の形状と探触子寸法の関係からデッドゾーンが存在し、探傷不能の部分が生じる場合がある。表9—18は欠陥の種類に対する両者の検出能についてその特性を比較したものである。このように、両者は欠陥検出特性が異なるために、例えば同じ被検体の検査を行った場合、その結果の相互関連性を得ることは困難な場合が多い。したがって、結果の判定はそれぞれ独立に行う考え方が合理的であろう。

ところで、超音波探傷試験においてCRT波形と欠陥種類との対応性に関する資料は少なく、溶接部の超音波探傷試験は、その適用規格に基づく探傷結果の欠陥評価と欠陥位置の推定で終わっているのが現状である。溶接施工管理の立場では、探傷結果の欠陥評価の情報も重要であるが、溶接欠陥の種類を知ることの方が欠陥発生の原因を探り、対策を講ずる上でより重要である。最近では、CRT波形による溶接欠陥の種類推定の可能性を検討した結果も報告されている<sup>68)</sup>。図9—12に示すように、静止波形および多重走査図形を分類して検討した結果、欠陥の波形および図形の特異性は大きく分けて、次の3種類に分類出来るというものである。

- ・密集欠陥による波形
- ・面状欠陥（スラグ巻込み、融合不良、割れ、溶込み不足）による波形
- ・スラグ巻込み、融合不良、ブローホールなどの小さな単独欠陥による波形

すなわち、密集欠陥および面状欠陥の超音波探傷における特徴は比較的わかりやすいが、現状では、小さなスラグ巻込みと小さな融合不良との分類、あるいはこれらと単独ブローホールとの分類は、静止波形、多重走査図形だけでは判別出来ない。このように、超音波探傷試験は、割れ検出能、検査の

表 9-18 放射線透過試験と超音波探傷試験の欠陥検出特性<sup>7)</sup>

欠陥種類		試験方法		放射線透過試験		超音波斜角探傷試験	
		A	B	A	B	A	B
スラグ巻き込み	層間に入った長いスラグ	◎	◎	○	◎		
	層間に入った短いスラグ	◎	◎	△	○		
	溶融金属に混入した長いスラグ	◎	◎	○	◎		
	溶融金属内に混入した短いスラグ	○	◎	△	○		
	酸化物、窒化物が細かく分布したもの	—	—	×	×		
ブローホール	単独かつ微少なブローホール	△	○	×	○		
	単独かつ大きなブローホール	◎	◎	△	○		
	密集したブローホール	◎	◎	○	◎		
	海綿状に集合したブローホール	◎	◎	○	◎		
	一直線状に連続したブローホール	◎	◎	○	◎		
	ウォームホール	○	◎	○	◎		
	パイプ	◎	◎	△	○		
割れ	板に垂直・直線状の割れ	○	◎	◎	◎		
	板に垂直・蛇行状の割れ	△	○	◎	◎		
	傾斜した割れ	×	△	◎	◎		
融不 合足	密着した融合不足	×	△	◎	◎		
	若干すき間のある融合不足	○	◎	◎	◎		
溶不 込 み足	内部にある溶込み不足	◎	◎	○	◎		
	ルート部の溶込み不足	◎	◎	◎	◎		
	アンダーカット	◎	◎	○	○		
	ピット	◎	◎	△	△		

## 試験条件

放射線透過試験 A JIS Z 3104 普通級

" B JIS Z 3104 特級

超音波斜角探傷 A NDIS 2404-70, 屈折角 70°

" B 上記より 4 倍高い探傷感度

注) ◎ 良 ○ やや良 △ 困難 × 不可能

能率、経済性あるいは厚板への適応性等長所が多いが、ブラウン管に現れた波形をその場で判断しなければならず、オペレーターに判定能力が要求され、記録性、客観性に乏しいという短所をもつ。最近、アナログ 2 次元表示による自動記録など種々の自動記録法が開発されつつあり、これらの欠点を改良し、その利用価値が急速に高まりつつある。

## 1) 実橋での対比結果

表 9-19 に示す橋梁の現場溶接継手について、放射線透過試験と超音波探傷試験を併用し、両者の対比を検討した結果が報告されている<sup>69)</sup>。超音波探傷試験は、自動探傷によりエコーの得られた箇所

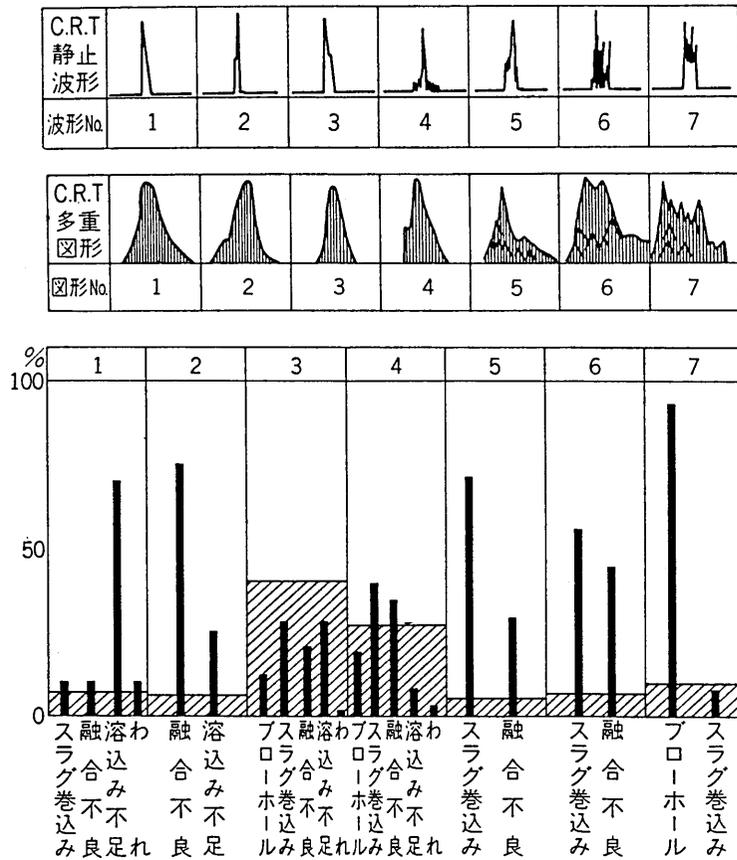


図9-12 CRT 多重走査図形に該当する各種欠陥率<sup>68)</sup>

表9-19 超音波探傷試験を適用した鋼床版橋梁<sup>69)</sup>

工事名	発注者	実施年月日	探傷内容					備考	
			装置名	チャンネル数	使用探触子	探傷感度	記録方法		合否判定方法
阿武隈橋	東北建設省 地方建設局	1981年1月   1981年6月	AUT-2	2チャンネル	5Z10X10A70 2個	JIS-A 2 H線+6dB	ペンレコーダ	レコーダに記録された箇所はすべて手探傷により JIS Z 3060のL検出レベルで2級以上を合格	左右各1回探傷 一部X線検査と併用
大平高架橋	関東建設省 地方建設局	1983年2月   1983年3月	AUT-F2	4チャンネル	5Z10X10A70 4個	JIS-A 2 H線+6dB	ペンレコーダ	レコーダに記録されたエコー高さ20%以上の箇所について手探傷により JIS Z 3060のL検出レベルで2級以上を合格	左右同時探傷 検査速度は阿武隈橋の約2倍 X線検査と併用
立田大橋	愛知県	1983年11月   1984年3月	AUT-F2	4チャンネル	5Z10X10A70 4個	JIS-A 2 H線+6dB	ペンレコーダ	レコーダに記録されたエコー高さ20%以上の箇所について手探傷により JIS Z 3060のL検出レベルで2級以上を合格	溶接クロス部付近はX線検査 その他は超音波自動探傷

(A橋は発生箇所全数、B橋はエコー高さ20%以上)について手探傷で確認を行った。欠陥の等級分類はX線試験についてはJIS Z 3104, また、超音波試験はJIS Z 3060 (L検出レベル)によった。試験箇所の長さについては、X線試験では1箇所フィルム長さ300mm, 超音波試験でも約300mmとした。JISで規定する欠陥等級分類を表9-20に示す。

表9-20 超音波探傷試験の欠陥等級分類 (JIS Z 3060)

等級	領域 板厚 t mm	M検出レベルの場合はⅢ L検出レベルの場合はⅡとⅢ			Ⅳ		
		18以下	18~60	60以上	18以下	18~60	60以上
1級		6mm以下	t/3以下	20mm以下	4mm以下	t/4以下	15mm以下
2級		9mm以下	t/2以下	30mm以下	6mm以下	t/3以下	20mm以下
3級		18mm以下	t以下	60mm以下	9mm以下	t/2以下	30mm以下
4級		3級を超えるもの					

備考 tは開先を取った側の母材の厚さ(mm)。ただし、突合せ溶接で突き合わせる母材の板厚が異なる場合は、薄い方の板厚とする。

表9-21 X線試験と超音波探傷試験結果の比較<sup>69)</sup>

工事名	X線試験結果		超音波試験結果				
	等級	数量	1級	2級	3級	4級	1~4級計
A橋 第1連	1級	966	957	7	2	0	957
	2級	113	90	21	2	0	113
	3級	4	0	3	1	0	4
	4級	25	0	0	8	17	25
	合計	1,108	1,047	31	13	17	1,108
A橋 第2連	1級	673	665	8	0	0	673
	2級	35	33	2	0	0	35
	3級	0	0	0	0	0	0
	4級	0	0	0	0	0	0
	合計	708	698	10	0	0	708
B橋	1級	256	254	2	0	0	256
	2級	40	36	4	0	0	40
	3級	0	0	0	0	0	0
	4級	0	0	0	0	0	0
	合計	296	290	6	0	0	296

表9-22 欠陥発生部のX線試験と超音波探傷試験結果の比較<sup>69)</sup>

種類	2級	3級	4級
A橋 第1連	$\frac{22}{113} \times 100 = 18.6\%$ UT RT	$\frac{1}{4} \times 100 = 25.0\%$	$\frac{17}{25} \times 100 = 68.0\%$
A橋 第1連	$\frac{2}{35} \times 100 = 5.7\%$	—	—
B橋	$\frac{4}{40} \times 100 = 10.0\%$	—	—
合計	$\frac{22}{188} \times 100 = 14.4\%$	$\frac{1}{4} \times 100 = 25.0\%$	$\frac{17}{25} \times 100 = 68.0\%$

X線試験結果と超音波探傷試験結果を対比して表9-21に示す。まず、X線試験結果を基準として等級ごとの合致率を見ると、

$$A1橋 \quad \text{合致数/全数} = 957 + 21 + 1 + 17 / 1108 = 90\%$$

$$A2橋 \quad = \quad 665 + 2 / 708 \quad = 94\%$$

$$B橋 \quad = \quad 254 + 2 / 296 \quad = 87\%$$

となり、10%程度の差が出ている。ただし、このうち多くは1級のものであり、欠陥のある箇所（2～4級と判定された箇所）について見てみると、表9-22のようになる。このように、欠陥の評価（等級）については、一般に知られているとおりあまり合致していない。この対比結果では、現場溶接工法がCO<sub>2</sub>自動溶接であったために<sup>26)</sup>、欠陥内容が殆どブローホールであり（90%）、試験方法の特質から言っても超音波探傷試験の方が甘い判定となっていると考えられる。仮に、X線試験での1種欠陥（ブローホール等球状欠陥）の等級に超音波試験でも同様（同等級）に判定するために、感度、探触子、探傷方法を変更すればある程度まで、X線試験結果に近づける事は可能であるが、溶け込み不足、割れ等の面状欠陥を過大評価する事も考えられる。また、溶接工法がサブマージアーク溶接の場合、割れ、スラグ巻き込み等、面状欠陥の比率が多くなることが予想され、この場合、評価が逆転することも予想される。

このように、X線試験と超音波探傷試験結果との対比を試みたが、欠陥の形状によっては評価が異なることがあり、原理的にも両者の結果を一致させることは困難である。X線試験結果も実体を正確にとらえていないことから、敢えてX線試験結果に近付ける必要はないと考えられる。したがって、検出したい欠陥の種類、工期、作業上での安全性等、目的によりそれぞれの特徴を考慮し、試験方法の決定をすべきである。

## 2) 超音波探傷試験の適用上の問題点

既に述べた事項の中で超音波探傷試験の適用上の問題をまとめると、

- ① 欠陥評価、合否判定基準の設定……………建築鉄骨においてはすでに学会基準が制定され、活用が図られているが、鋼橋製作においても合否判定基準の設定により客観性を付与する必要がある。
- ② 自動記録装置の開発……………現在記録の自動化についての研究開発が進められているが、それも当分は自動探傷の可能な範囲に限られるものと考えられ、手探傷についてはまだ探傷技術者の検査記録によっている。これらの利用にあつては発注者側の受け入れ基準の整備が必要となろう。
- ③ 探傷技術者の資格と能力……………超音波探傷試験は現場の「オペレーター」すなわち「判定」という特性があり、判定結果は探傷技術者の経験、能力ならびに性格等に左右されやすい。特に、溶接継手部の欠陥は構造形式による特徴もあるので、特定の構造に対する豊富な経験や溶接技術への正しい理解も要求され、記録性の問題と合わせて検査技術者の教育による能力向上と資格化への体制が必要である。

## (8) 自動超音波探傷試験

鋼床版の現場突き合わせ溶接継手部の非破壊検査において、超音波探傷試験はあまり使用されてきていなかった。しかしながら、その後の自動超音波探傷試験の発展により、記録が残り、作業性、安

全性、判定の即時性など優れた点を活かし、鋼床版現場溶接継手へ適用する例も報告されてきている<sup>70)71)</sup>。最近では本州四国連絡橋の鋼床版現場溶接継手を対象にして数多くの検討が行われ、D ルートの櫃石島の斜張橋、さらには吊橋 3 橋に適用されている。以下では本州四国連絡橋に関する検討結果および実橋での検査結果について述べる。

#### 1) 鋼床版現場溶接部への自動超音波探傷試験の適用について

放射線透過試験と自動超音波探傷試験について現場での作業性、安全性を対比すると、

- ① 放射線透過試験では放射線作業を野放しで行えば、かなりの危険を伴うものであるため、X 線発生機を中心に半径 5 m 以内の場所は立入り禁止区域となり（線源の進行方向は特に注意が必要）、かつ、管理区域を設ける必要があり、X 線発生中は近辺での作業が安全上著しく制約される。一方、自動超音波探傷検査では安全上の特別な制約を受けないため、通常の出会い作業が可能である。
- ② 放射線透過試験では、「撮影→フィルム現像→フィルム乾燥→等級分類→判定→報告書（補修をした場合には再撮影）」となり、検査時間が多くかかる。1 サイクルでの検査長を 20 m（フィルム 80 枚）と仮定すれば、撮影から判定までの検査日数が 2 日以上かかり、手直しがあると 4 日間以上必要となる場合もある。一方、自動超音波探傷検査では溶接完了後所定の時間が経過し、継手部の整備が終われば直ちに作業が可能であり、他の作業（立入り禁止区域を必要とせず）を干渉することなく並行して進められる。また、検査結果も直ぐ判明し、補修後の再検査結果も同様である。特に、鋼床版の横継手（橋軸直角方向継手）は、非破壊検査結果が合格にならないと縦リブ（U リブ等）の取付け及び溶接が進められないため、検査結果は早期に判定することが望ましい。鋼床版先行架設か後架設か、また、架設工程サイクルによって異なるが検査工期短縮により全体工期短縮への貢献度は極めて高い。
- ③ 自動超音波探傷検査の検査速度（判定まで含めて）は、探傷システムによって異なるが 50～100 m/日であり、非常に早い。逆に 1 日当たりの検査継手延長が少ない場合には、検査費用は割高とならざるを得ない。

となる。

一方、両者の欠陥検出方向の違いは、図 9-13 に示すように放射線透過試験では板厚方向に X 線を照射するため、フィルム上の欠陥形状は平面図形となる。自動超音波探傷試験では、斜角探傷方法のため、欠陥を側面から捕えた側面形状記録となる。また、X 線検査は、母材と欠陥との透過 X 線の吸収差が、フィルムに濃淡として撮影されるため、ブローホール等体積を有する欠陥検出に有効な検査方法であり、一般に欠陥検出限界寸法は、板厚の 2% 以上が目安となっている。超音波探傷検査は、超音波ビームに垂直な面を持つ欠陥、すなわち開先面の融合不良、スラグ巻き込み等の面状欠陥に有効な検査方法であり、一般に欠陥検出限界寸法は、波長の 1/2 程度とされている（探触子 5 MHz の時約 0.3 mm）。

このように、放射線透過試験（平面形状）と自動超音波探傷検査（側面的形状）との探傷原理が本質的に異なるので、同一結果を得ることは期待できないと考えられる。

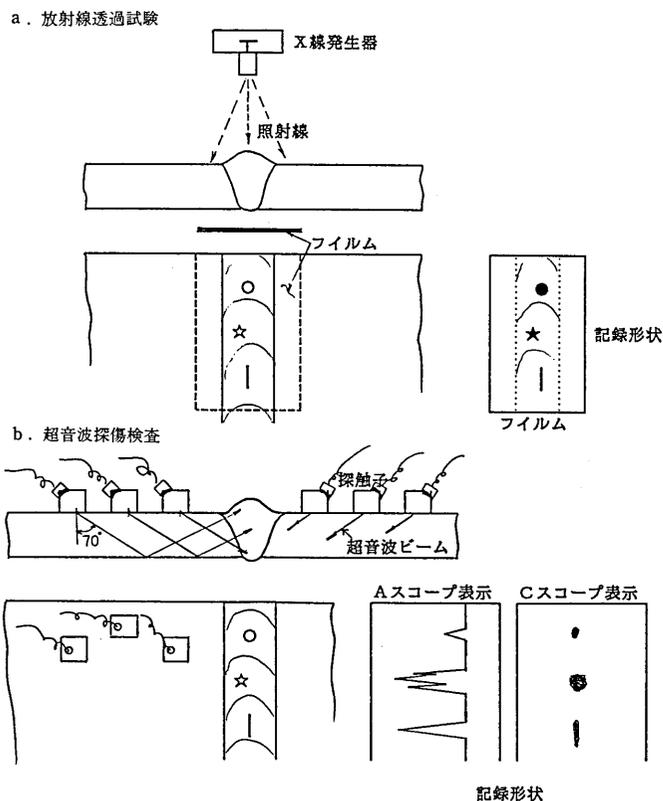


図9-13 欠陥検出方向の違い

2) 本四連絡橋への適用にあたって自動超音波探傷の具備すべき条件

本四連絡橋の鋼床版の突合せ継手部に自動超音波探傷検査を適用するにあたり種々の面からの検討を行い、検査システムとして具備すべき条件を以下のように設定した。

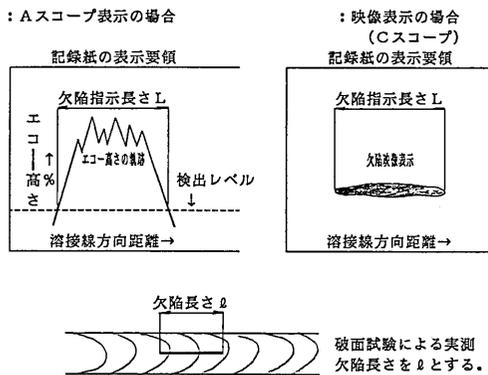
- ① 走査（走行またはスキャン）を自動的に行い、探傷結果は自動的に位置との関係をもって記録できること。
- ② 対象は、板厚 12 mm 以上とし、ルートギャップ  $G$  が  $0 \leq G \leq 10$  mm の V 開先片面溶接継手とし、板面の目違いについては最大 3 mm まで対応できること。
- ③ 少なくとも、表裏の余盛部を除いて溶接部は完全に探傷できること。また、継手交差部および始末端 100 mm 程度は自動探傷適用範囲外としてもよいが、手探傷で同等以上の探傷ができること。
- ④ 探傷記録から、欠陥の種類として、割れ、溶け込み不良、面状欠陥（融合不良、スラグ巻き込み等）、ブローホールが判別できること。また、ブローホールについては、長径 3 mm が判定基準の境界であるため、長径 3 mm 以上か否かの判別が可能なこと。ブローホール以外の欠陥については、JIS Z 3060 に準じて欠陥指示長さが推定できること。
- ⑤ 放射線透過試験による等級判定と同程度の判定級とすること。少なくとも、合否については合致すること。

⑥ 探傷速度は 50 m/day 以上であること。

このような条件を満たす自動超音波探傷検査で推定した欠陥の種類および寸法をもとに、継手の合否を基本的には放射線透過試験と整合させるようにし、JIS Z 3104 の 1 級，2 級を合格とし、表 9-23 に示す判定基準を作成した。この判定基準において、ブローホールと面状欠陥が超音波上判別できることを前提にし、両者の合否をそれぞれ欠陥指示長さ 3 mm，4 mm と分けた。一方、欠陥の種類判別については、各システムのマニュアルによるものとした。なお、表 9-23 で示した欠陥指示長さは図 9-14 の要領で測定するものとした。必ずしも  $l=L$  に対応しないため、各システムでの換算が必要である。そこで、図 9-15 に示すような欠陥指示長さ測定試験片を用いて、欠陥指示長さ  $L$  と欠陥指示長さの関係性を求め欠陥指示長さ  $L$  を推定することとしたとする。図 9-16 は次で述べる自動超音波装置で校正した両者の関係である。

表 9-23 鋼床版現場突合せ溶接の場合の判定基準(案)<sup>74)</sup>

判定	等級	自動超音波探傷検査で推定した欠陥の種類			
		ブローホール	面状欠陥	溶込み不足	割れ
合格	1	基準値以下	長径 $\phi \leq 3\text{mm}$		
	2	長径 $\phi \leq 3\text{mm}$	$3 < \phi \leq 4\text{mm}$	長さに関係なく不合格	長さに関係なく不合格
不合格	3	$3 < \phi \leq 6\text{mm}$	$4 < \phi \leq 6\text{mm}$		
	4	$\phi > 6\text{mm}$	$\phi > 6\text{mm}$		



欠陥長さ  $l$  と欠陥指示長さ  $L$  とは、同一長さではない。(  $l \neq L$  )

図 9-14 欠陥指示長さの測定要領

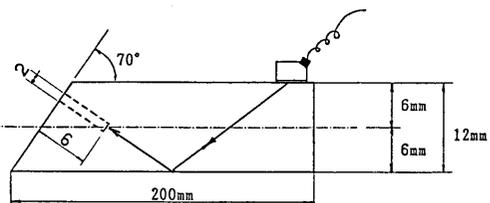
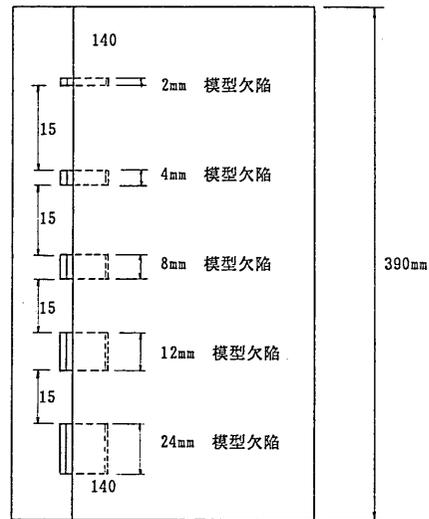


図 9-15 欠陥指示長さ測定用試験片

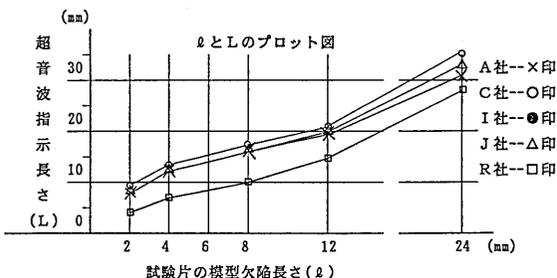


図 9-16 欠陥指示長さの校正

## 3) 鋼床版模型試験体の探傷結果

鋼床版現場溶接継手部への自動超音波探傷試験の適用性を検討するため、模型試験体でその実用性を確認した<sup>72)73)</sup>。図9-17に試験体形状を示すが、長さ5 mの突き合わせ溶接継手を有する試験体である。継手部のルートギャップを0~8 mm、目違いを0~2 mmにテーパ状に変化させてあり、人工的に高温割れ、スラグ巻き込み、ブローホール、ウォームホール、裏波過多、裏波不足の欠陥を発生させた。

実験に供用した探傷検査システムは4種類であり、それらの概要を表9-24に示す。大別すると、走査方法としては平行走査(溶接線做い)、前後走査(方形走査)であり、記録方式はAスコープ表示、Cスコープ、またはBスコープ映像表示及び両者併用表示である。使用探触子としては、斜角探触子でノーマルタイプ、またはフォーカスタイプであり、探触子配置方法としては片面両側と片面片側とに分けられる。探傷感度は感度調整用対比試験片を用いて各システムごとに調整した。

模型試験体の製作後、各探傷システムを用いて探傷した。結果をまとめて表9-25に示す。超音波探傷判定区間としては、放射線透過試験はフィルム有効長250 mmのうち欠陥の一番密に存在する試験視野内(10 mm×10 mm)で等級分類を行い、放射線透過試験に合わせて溶接継手を250 mm区間に等分し、その区間ごとについて等級分類した。放射線透過試験と超音波探傷試験の等級分類及び合

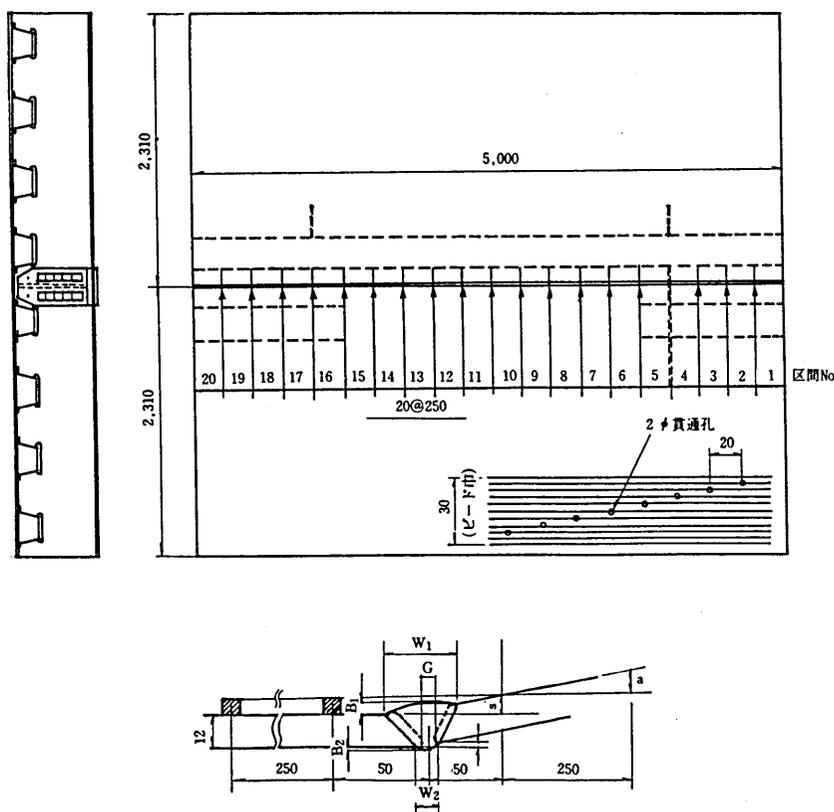


図9-17 鋼床版自動超音波探傷試験のための試験体<sup>72)</sup>

表 9-24 自動超音波探傷装置の概要<sup>72)</sup>

項目		検査会社	A	B	C	D
探 触 子	超音波探傷器		KSE-28	FD-610S	KSE-24 改良型4ch	FD-610
	探傷子個数		6+2(カップリング グチエック用)	2	2(カップリング グチエック付)	3
	探子配置方法		片面両側	同左	同左	片面片側
	探触子配置図				同左	
	探触子形式		5 Z10×10A70	同左	5 Z20A67SF	5 Z10×10A70
	探触方法		ギャップ法	同左	同左	同左
	探触媒質		グリセリン	同左	ソニコート	同左
走 査 方 法	走査方式		平行走査	ジグザグ走査	縦又は横方形走査	平行走査
	標準探傷		—	ジグザグ走査	縦方形走査	—
	確認探傷		—	—	—	—
一 般 部 探 傷 走 査 パ タ ー ン、 走 査 ピ ッチ						
	交差部等の 不可能部探傷		手探傷	同左	同左	同左
	探傷速度(m/hr)		36	54	縦方形25横方形50	24
表 示 方 法 及 び 探 傷 記 録	走行装置		ラックピニオン式	同左	同左	同左
	欠陥表示方法		Aスコープ表示	標準探傷 Aスコープ 確認探傷 Bスコープ	Aスコープ表示 Bスコープ表示 Cスコープ表示	同左
			(注) Aスコープ(欠陥エコー高さ)、Bスコープ(欠陥側断面画像) Cスコープ(欠陥平面画像)			
	位置表示方法		記録紙に250mm ピッチ	同左	記録紙に100mm ピッチ	同左
	記録装置		ペンレコーダー	同左	プロッタ	プリンター
端部探傷不能距離		100 mm	100 mm	50 mm	100 mm	
感 度	基準感度		標準試験片 DP-1 2.4φ横穴 80%+4dB	2.4φ横穴 80%+4dB	2.4φ横穴 80%+6dB	2.4φ横穴 80%+4dB
	評価レベル又は 検査レベル		25%	30%	20%	25%
	欠陥寸法推定方法		欠陥長さ×補正係数	同左	同左	同左

否の合致率を表 9-26 に示す。現場的発想では欠陥は補修するため、種類の判定よりも合否判定が重要であり、合否の合致率が 95% 以上であることから自動超音波探傷は十分実用的であることがわかった。

#### 4) 櫃石島橋への適用

櫃石島橋の架設では面材張り出し架設工法を採用し、鋼床版の現場溶接が工程のクリティカルとなった。そこで、デッキプレートの現場溶接検査を従来の放射線透過検査に変えて自動超音波探傷検査を採用し、工期を約 1 ヶ月短縮した<sup>72)73)</sup>。まず、自動超音波探傷の実橋における実用性を検証するため、ヤード地組立ての大ブロック桁の鋼床版を使って試験した。試験は図 9-18 に示す 4 本の溶接線を 1 本につき平均 26 cm ピッチの 49 区間に分割して行った。ヤードでの本溶接であるため欠陥がほとんどないことから、当然の結果として、放射線透過試験との合否合致率には 96~100% と好成績で

表 9-25 X線試験と超音波探傷試験との判定比較<sup>72)</sup>

区間	G (mm)	S (mm)	余 盛 り (mm)				R T		A 社		B 社		C 社		D 社	
			W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	判定	欠 陥	判定	欠 陥	判定	欠 陥	判定	欠 陥	判定	欠 陥
1	0.6~1.8	0.8~1.6	24~26	13~13	2~2	1.6~1.7	1		①		①		①		①	
2	1.8~2.3	1.6~1.0	26~25	13~13	2~2	1.7~2.0	1		①		①		①		①	
3	2.3~2.5	1.0~0.6	25~24	13~12	2~2.6	2.0~2.1	4	横ワレ、ス ラッグ巻込	③	BH	④	融合不足	④	スラッグ巻込	③	B11
4	2.5~3.0	0.6~0.4	24~21	12~13	2.6~3.2	2.1~2.4	4	高温ワレ、 BH	③	BH	④	〃	④	面状欠陥	④	集中BH
5	3.0~3.3	0.4~0.4	21~24	13~6	3.2~2.0	2.4~2.0	4	巣(パイプ)	④	溶込不足	④	面状欠陥	④	〃, BH	④	融合不良 BH
6	3.3~3.8	0.4~0.2	24~26	6~16	2.0~2.4	2.0~3.0	4	パイプ	④	〃	1		1		④	集中BH
7	3.8~3.8	0.2~0.1	26~29	16~14	2.4~1.8	3.0~2.0	4	BH、スラ ッグ巻込	④	〃	③	BH他	③	スラッグ巻込	④	BH
8	3.8~3.0	-0.1~-0.3	29~28	14~15	1.8~0.5	2.0~2.8	3	パイプ	④	〃, BH	④	溶込不足	④	〃	④	高温ワレ
9	3.0~3.0	-0.3~-0.8	28~27	15~10	0.5~0.2	2.8~3.2	1		②	BH	①		①		①	
10	3.0~3.0	-0.8~-0.4	27~27	10~11	0.2~2.0	3.2~2.4	1	第2種 3mm	①		①		①		①	
11	3.0~3.2	-0.4~1.4	27~23	11~8	2.0~2.1	2.4~1.7	1	第2種 2mm	②	BH	①		①		①	
12	3.2~3.5	1.4~0.1	23~25	8~15	2.1~1.4	1.7~2.6	2		②	BH	①		①		①	
13	3.5~4.3	0.1~0.1	25~22	15~16	1.4~1.6	2.6~2.8	1		①		①		①		①	
14	4.3~4.7	0.1~0.6	22~24	16~14	1.6~0.9	2.8~2.0	1		①		①		①		①	
15	4.7~4.9	0.6~0.3	24~22	14~16	0.9~1.0	2.0~1.2	1		①		①		①		①	
16	4.9~5.3	0.3~0.9	22~25	16~4.5	1.0~1.5	1.2~0.5	1		①		①		①		①	
17	5.3~5.9	0.9~0.4	25~25	4.5~16	1.5~0.2	0.5~2.5	4	溶込不足	④	溶込不足	④	溶込不足	④	面状欠陥	④	溶込不足
18	5.9~6.4	0.4~0.6	25~28	16~18	0.2~2.9	2.5~3.5	4	溶込不足	④	〃	④	〃	④	〃	④	〃
19	6.4~6.7	0.6~0.5	28~26	18~23	2.9~1.4	3.5~3.0	4	高温ワレ	④	〃	④	ワレ	④	〃	④	高温ワレ
20	6.7~7.2	0.5~0.4	26~25	23~	1.4~0.5	2.0~	4	高温ワレ	③	BH	④	ワレ	④	〃	③	BH

(注) ○：合否が一致      ●：等級が一致

表 9-26 等級と合否の合致率<sup>72)</sup>

検査会社	等級合致率	合否合致率
A	75%	100%
B	80%	95%
C	80%	95%
D	80%	100%

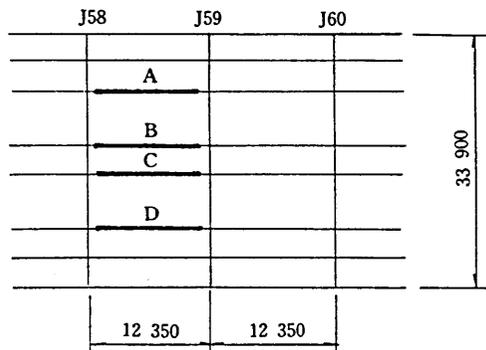


図 9-18 実験継手線<sup>72)</sup>

あった。ヤード地組立てでの検証後、現場での検査に適用した。適用にあたっての検査要領は以下のようになった。

- ① 検査技術者は(社)日本非破壊検査協会認定の「超音波探傷2級」以上の資格を有すること。
- ② 探傷感度を統一するため、対比試験片(DP-1)のφ2.4mm横穴で80+(4+α)dBとする。なお、αは各システムにおける微調整感度とする。
- ③ 継手交差部の両側100m区間は自動超音波探傷が困難なため手探傷とする。手探傷はJIS

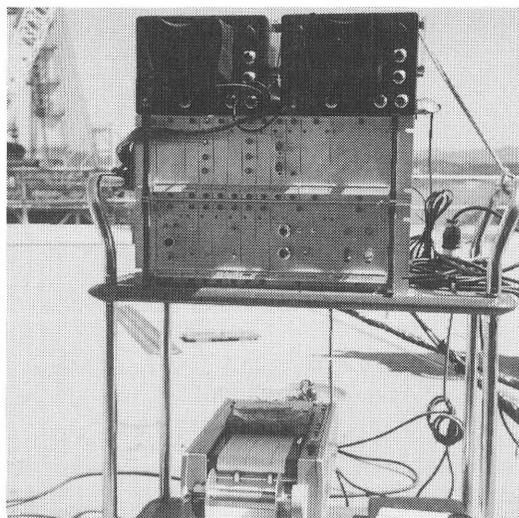
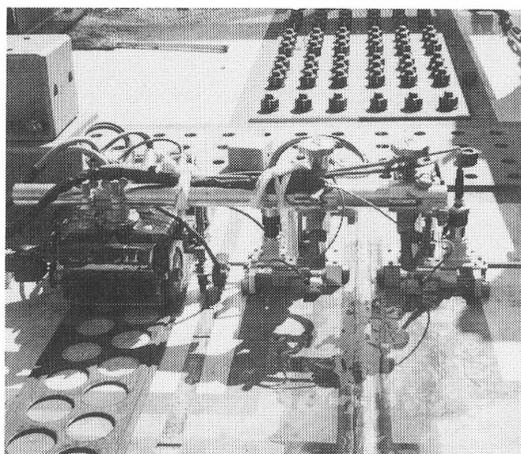


写真 9—5 自動超音波探傷状況

Z 3060(1983)を準用し、判定基準を AUT と同じにするため感度調整は DP-1 を用いる。

- ④ 検査は表面温度が一定になってから行うものとする。
- ⑤ 検出対象欠陥はプロホール(BH)、面状欠陥(PD)、溶込不足(LP)、割れ(CR)とする。
- ⑥ 合否判定は継手線を 250 mm ピッチに分割して表 9—23 に従って行う。報告項目は合否判定、等級分類、欠陥種類、長さ、位置とする。写真 9—5 は探傷状況を示す。

検査実績を表 9—27 に示す。表 9—28 に示す鋼床版溶接の標準サイクル工程より自動超音波探傷は並行作業が可能のためクリティカルにならないことがわかる。準備、片付けを除くと検査時間は約半日である。表 9—29 に一例を示す。準備から片付けまでを含む平均検査速度は、A 社 10.2、B 社 9.2、C 社 12.1 分/m であり、全体平均速度は 10.4 分/m であった。発見された欠陥は延長 1601 m の溶接線に対し、1 級 3、2 級 6、3 級 1、4 級 8 個であり、内訳は BH が 6 個、PD が 12 個であった。3 級以下の不合格欠陥は直ちに補修・再検査を行った。なお、自動超音波探傷試験の施工初期に、溶接長 25.6 m のうち約 7.6 m 区間に延べ 73 cm に達する異常画像が発生した(図 9—19 参照)。これは図 9—20 に示すように形状が悪い裏ビードからの反射エコーであり、ビードをグラインダーで滑らかにすれば消滅した。そこで以後の検査ではつぎのように対策を定めた。

- ① 形状エコー高さが 30% 以上かつ長さが 10 m 以上の場合、裏ビードをグラインダで修正し再検査する。
  - ② ①の基準値未満のものは手探傷で欠陥のないことを確認し、形状エコーとして記録する。
- 以上、実橋に自動超音波探傷を採用して得られた結果を要約すると次のとおりである。

- ・ 面材架設 1 パネルの溶接延長約 50 m につき、放射線透過試験では検査に 2 日を要するが、自動超音波探傷では半日で済むため、溶接の工程管理が非常に楽であり、約 1 か月の工期短縮が達成された。特に橋軸直角方向の溶接検査が即時判定できたため縦リブ作業に手待ちがなかった。
- ・ 並行作業ができたのでサイクル工程を乱すことがなかった。



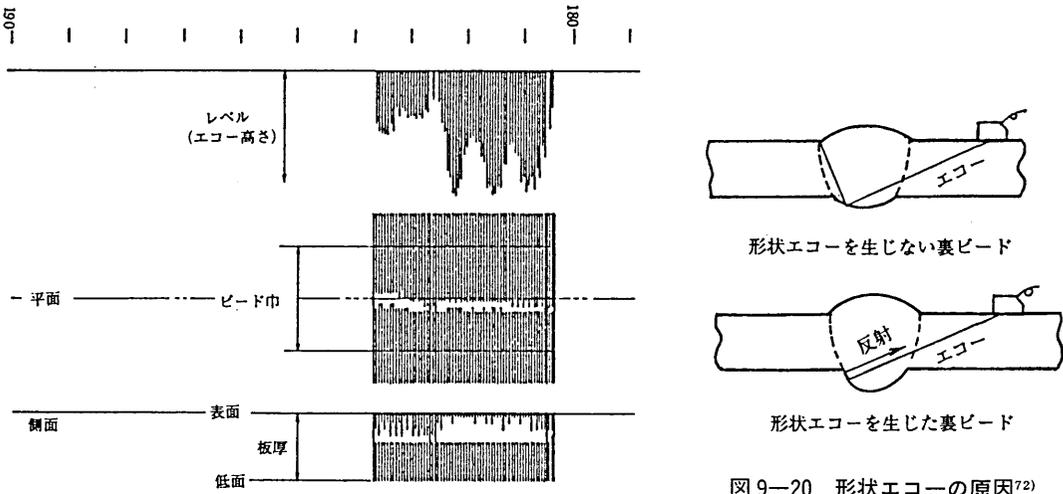
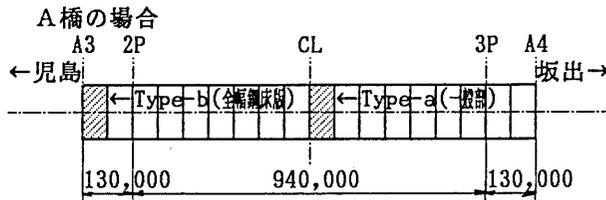


図9-19 形状エコーの例<sup>72)</sup>



- ： 点線は現場溶接継手線を示す。
- ： 一点鎖線はヤード溶接継手線を示す。
- ： 注---この他工場溶接継手線がある。

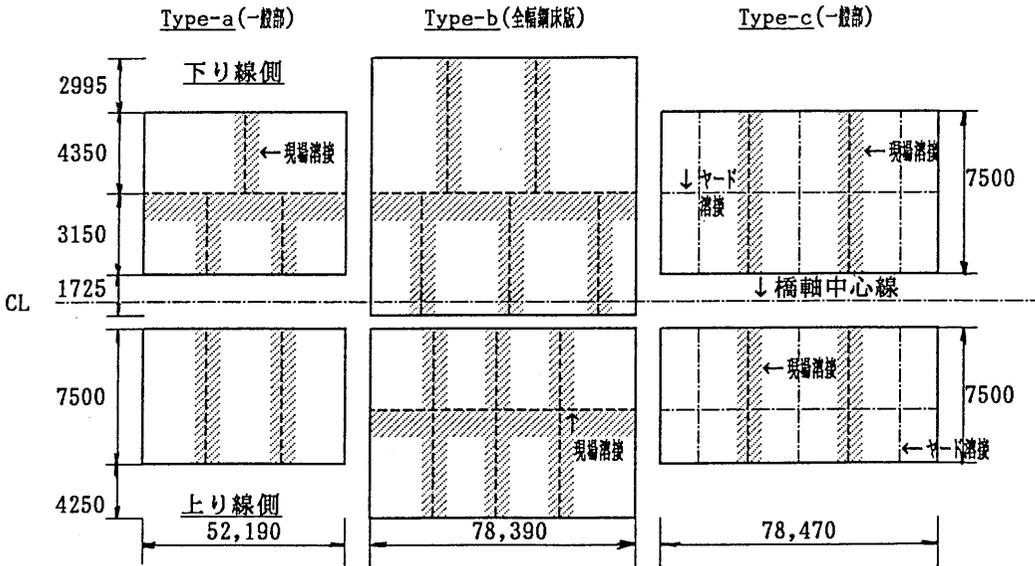


図9-21 鋼床版現場溶接継手概略<sup>74)</sup>

- ・ 全線検査であるので欠陥の見落としがなく、十分な品質保証が得られた。
- ・ 単価的にも放射線透過試験より経済的であった。
- ・ X線作業がないため作業員の健康保全ができた。
- ・ 合否判定に支障する形状エコーを防ぐため、裏当て作業は念入りに行わなければならない。
- ・ 検査時間に占める準備、片付けの時間が大きいので、1回当たりの延べ検査長は100m以上が望ましい。

5) 吊橋3橋の検査結果

本州四国連絡橋・糸島～坂出ルート上の吊橋3橋においても、鋼床版現場溶接継手の検査には自動超音波探傷検査方法を適用した<sup>74)</sup>。現場溶接継手部の概略を図9-21に示す。現場溶接継手は橋軸方向および橋軸直角方向があり、その1継手の長さは、短いもので3m、長いもので78mであった。鋼床版の現場突合せ溶接継手の検査率は、自動超音波探傷検査による全数検査とした。ただし、溶接継手の両端から100mmおよび継手交差部を中心に100mmの範囲の自動超音波探傷検査が適用できない箇所については手探傷とした。溶接継手数および溶接延長を表9-30に示す。なお、従来のX線検査の抜き取り方法は、溶接継手の両端および継手交差部はフィルム各1枚、中間部は1溶接線につきフィルム15枚を等間隔に撮影する条件であり、仮にX線により抜き取り検査方法を実施したと仮定した時の検査率を合わせて示す。

自動超音波探傷検査結果を表9-31に示す。探傷検査結果は記録紙上300mmに区分し区間ごとに合否判定した。不合格欠陥(補修された欠陥)の発生位置を、溶接継手の両端部、中央、交差部に分類すると表9-32に示すごとくであった。一般に、溶接端部および交差部に欠陥発生頻度が高いといわれているが、表9-32に示すように中間部に多く検出された。端部または、交差部から300mm以上離れた位置に29個

表9-30 溶接継手数および溶接延長<sup>74)</sup>

継手方向	溶接長 (mm)	継手数	溶接延長 (mm)	超音波探傷	※放射線透過試験	
				検査率(%)	フィルム枚	検査率(%)
橋軸方向	11,410	1	11,410	100	17	44.7
	11,560	1	11,560	100	17	44.1
	50,630	4	202,520	100	144	21.3
	51,820	4	207,280	100	144	20.8
	52,190	4	208,760	100	144	20.7
	77,910	4	311,640	100	216	31.0
	78,360	8	626,880	100	432	20.7
橋軸直角方向	78,390	4	313,560	100	216	20.7
	3,150	20	63,000	100	220	100
	4,350	12	52,200	100	300	100
	4,875	31	151,125	100	527	100
	7,345	26	190,970	100	442	69.4
	7,500	160	1,200,000	100	2,720	68.0
	11,750	64	752,000	100	1,088	43.4
12,220	30	366,600	100	510	41.7	
合計	373	4,669,505	100	7,137	41.5	

※放射線透過試験

仮に放射線透過試験を実施したと仮定した時のフィルム枚数及び検査率

表9-31 自動超音波探傷検査結果<sup>74)</sup>

継手方向	溶接長 (mm)	継手数	溶接延長 (mm)	区間		不合格 (区間)	区間合格率 (%)	備考
				数	総数			
橋軸方向	11,410	1	11,410	47	47	0	100	
	11,560	1	11,560	47	47	0	100	
	50,630	4	202,520	204	816	0	100	
	51,820	4	207,280	208	832	0	100	
	52,190	4	208,760	212	848	1	99.9	
	77,910	4	311,640	313	1,252	1	99.9	
	78,360	8	626,880	318	2,544	7	99.7	
橋軸直角方向	78,390	4	313,560	317	1,268	0	100	
	3,150	20	63,000	14	280	0	100	
	4,350	12	52,200	19	228	1	99.6	
	4,875	31	151,125	21	651	1	99.8	
	7,345	26	190,970	31	806	4	99.5	
	7,500	160	1,200,000	32	5,120	9	99.8	
	11,750	64	752,000	49	3,136	4	99.9	
12,220	30	366,600	51	1,530	5	99.7		
合計	373	4,669,505	19,405	77,137	33	99.8		

(87.8%)あり、大半が中間部に含まれている。

鋼床版の現場溶接順序は、図9-22に示すように仮付け溶接及び拘束溶接をしてから本溶接を施工するのが一般的である。拘束溶接は端部および交差部に施工され、仮付け溶接に比べ再溶融しなくても欠陥が残らないように施工されている。このため端部および交差部に欠陥が少なかったと思われる。欠陥が検出された中間部といっても、その位置は端部または交差部から300mm~1000mm程度の位置で12個(40%)あり、この位置は拘束溶接長さを500mm程度と仮定すれば、本溶接と拘束溶接が合流する付近であると推定できる。残りの18個(60%)が中間部であり、交差部2個、端部1個であった。

自動超音波探傷検査結果と放射線透過試験結果との対比をするため、自動超音波探傷検査により不合格欠陥と判定された箇所の一部についてX線フィルムを撮影した。その結果を表9-33に示す。また、自動超音波探傷検査が適用できない端部および交差部について行った手探傷において、欠陥なし(等級1級)と判定された一部(端部8箇所、交差部38箇所)をX線フィルム撮影した結果、等級2級が4箇所、1級のうち欠陥検出が4箇所、無欠陥が38箇所(82.6%)であった。その結果を表9-34に示す。

表9-33から放射線透過試験結果の欠陥長さを正とし、自動超音波検査結果の欠陥支持長さが過大評価あるいは過小評価であったかを図9-23に示す。不合格欠陥となるような大きな欠陥で、放射線透過試験の等級分類1、2級程度の欠陥長さに対する欠陥推定寸法のバラツキは、±2mm程度と思われる。

等級分類結果の対比をすれば、UT4級12箇所に対してRT4級が11箇所とRT1級が1箇所であった。UT3級1箇所に対して

表9-32 不合格欠陥の発生位置<sup>74)</sup>

位置	欠陥箇所数	率(%)
端部	1	3.0
中央	30	90.9
交差部	2	6.1
合計	33	100

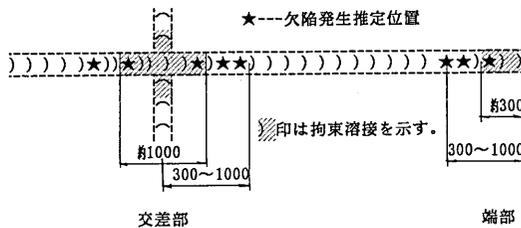
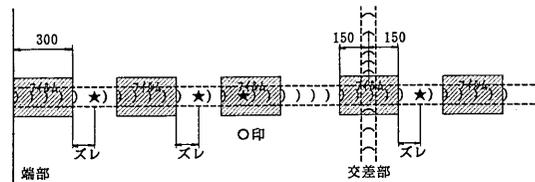


図9-22 拘束溶接位置<sup>74)</sup>



欠陥のズレの距離は、フィルムの有効長を上図に示すように端部については300mm、交差部については、交差部を中心に左右150mmづつと仮定し、他のフィルムは等間隔になるよう配分し、その時のフィルム端からのズレを言う。

図9-23 放射線透過試験を行う場合の欠陥検出<sup>74)</sup>

表9-33 自動超音波探傷試験結果と放射線透過試験結果との対比<sup>74)</sup>

放射線透過試験結果		自動超音波探傷検査結果		欠陥長さの差 (RT-UT)
欠陥箇所・欠陥長さ・欠陥長さ	等級	等級	エコー高さ・欠陥長さ	
ブロー--24mm	4	4	50%・25mm	-1mm
溶込み不足--5mm	4	4	30%・10mm	-5mm
ブロー(複製)--14mm	4	4	85%・13mm	+1mm
ブロー(複製)--90mm	4	4	95%・85mm	+5mm
ブロー(複製)--12mm	4	4	75%・10mm	+2mm
ブロー(複製)--31mm	4	4	100%・25mm	+6mm
ブロー(複製)--28mm	4	4	75%・25mm	+3mm
ブロー(複製)--67mm	4	4	100%・65mm	+2mm
ブロー(複製)--72mm	4	4	100%・60mm	+12mm
ブロー(複製)--8mm	4	3	50%・5mm	+3mm
検出されず	1	4	55%・20mm	-20mm
ブロー(複製)--17mm	4	4	100%・21mm	-3mm
ブロー(複製)--13mm	4	4	100%・15mm	-2mm
ブロー(複製)--2mm	1	1	35%・3mm	-1mm

表9-34 超音波探傷1級と放射線透過試験結果との等級対比<sup>74)</sup>

箇所	箇所数	放射線透過試験		備考
		等級	箇所数	
端部	8	1	6	欠陥なし6箇所
		2	2	ブローホール1箇所,スラグ1箇所
		3	0	
交差部	38	1	36	欠陥なし32箇所,ブローホール4箇所
		2	2	スラグ1箇所,パイピング1箇所
		3	0	

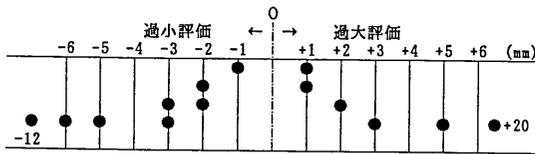


図9-24 欠陥長さ10mm以上の推定寸法のばらつき<sup>74)</sup>

RTでは4級であった。UT1級47箇所に対してRT1級43箇所とRT2級が4箇所であり、両等級の一致した箇所数は54箇所、90%となる。一致しなかったもので大きく違ったものは、UT4級のものがRTでは検出されなかったものが1箇所のみであった。

自動超音波探傷検査により不合格欠陥が検出された箇所が、図9-24に示すように放射線透過試験により抜取り検査を実施したものと仮定した場合、その欠陥位置が撮影フィルム位置と合致したか否かを調査した結果を表9-35に示す。放射線透過試験の検査抜取り率は、一溶接線継手につき両端各1枚および中央部15枚とする。フィルムの有効長は、300mmと仮定する。フィルム撮影位置との合致欠陥は、各溶接線の検査率の大小によって異なるが、全体で48.5% (16個)であった。51.5% (17個)の欠陥が放射線透過試験により抜取り検査した場合

表9-35 フィルム端からのずれ<sup>74)</sup>

欠陥No.-位置	溶接長(mm)	RT等級(%)	フィルム間(mm)	合致	ズレ(mm)	フィルム300mm
(端部からのズレ)						
1-115	7500	68.0	168	○	115	★
2-585	7500	68.0	168	○	117	★
3-650	7500	68.0	168	○	182	★
4-670	7500	68.0	168	○	202	★
5-710	7500	68.0	168	○	242	★
6-1485	7345	69.4	140	○	165	★
7-1650	12220	41.7	1083	○	267	★
8-1850	7500	68.0	168	×	146	★
9-2040	7500	68.0	168	○	168	★
10-2110	7500	68.0	168	○	238	★
11-2257	7500	68.0	168	×	238	★
(交差部からのズレ)						
12-60	7345	69.4	140	○	60	★
13-70	78360	20.7	1243	○	70	★
14-290	12220	41.7	1083	×	140	★
15-400	78360	20.7	1243	×	250	★
16-595	7345	69.4	140	×	5	★
17-785	78360	20.7	1243	×	635	★
18-1005	11750	43.4	416	×	139	★
19-1015	12220	41.7	1083	×	865	★
20-1065	78360	20.7	1243	×	915	★
21-1140	12220	41.7	1083	×	990	★
22-1610	78360	20.7	1243	○	217	★
23-1725	52190	20.7	1243	×	32	★
24-1740	12220	41.7	1083	×	57	★
25-2095	4350	69.4	140	○	45	★
26-2095	7345	100	0	○		★
27-2295	11750	43.3	415	×	0	★
28-2470	78360	20.7	1243	×	777	★
29-2520	78360	20.7	1243	×	827	★
30-2875	4875	100	0	○		★
31-3290	11750	43.3	415	×	280	★
32-3405	11750	43.3	415	○	20	★
33-5430	77910	31.0	1243	×	651	★

表9-36 放射線透過試験による抜取り検査の場合の不合格欠陥見逃し率<sup>74)</sup>

検査率別	個数	%	見逃し率	
			25%	50%
検出欠陥	50%以上	12	36.4	
	50%未満	4	12.2	
	全体	16	48.5	
見逃し欠陥	50%以上	3	9.0	
	50%未満	14	42.4	
	全体	17	51.5	

表9-37 不合格欠陥個数<sup>74)</sup>

	欠陥個数
1 溶接線当り	0.08
溶接メータ当り	0.007
区間(300mm)当り	0.0018

表9-38 放射線透過試験及び自動超音波探傷検査の検査速度<sup>74)</sup>

作業時間	放射線透過試験		自動超音波探傷検査	
	フィルム枚数	溶接延長(mm)	溶接延長(mm)	検査箇所数
1時間当り	8-10	2 400-3 000	18 000-36 000	60-120
1日当り	60-80	18 000-24 000	70 000-90 000	233-300

の見逃し欠陥となることが推定できる。表 9—36 に検査率別の合致率を示す。なお、表 9—37 に示すように、不合格欠陥は一溶接線当たり（1 溶接線の最大長さを 25 m と仮定し、これ以下のものは短くても 1 溶接線とすれば、合計 414 線）0.08 個であった。また、溶接メータ当たりでは 0.007 個であった。

作業性について検討してみると、表 9—38 に示すように自動超音波探傷検査による検査は全数検査で、溶接継手 414 溶接線（373 継手、1 溶接線の最大長さを 25 m、これ以下のものは短くても 1 溶接線とする）、溶接線延長 4 670 m であり、検査速度は 60 cm/min で、1 日当りの検査実績は約 70～90 m であった。また、条件さえ良ければ 130 m は十分可能であった。この条件から延べ約 65 日で検査が可能である。

一方、放射線透過試験による全数検査ならば、少なくとも撮影フィルム枚数は 15 570 枚必要であり、抜取り検査とし各溶接継手の両端部および交差部についてはそれぞれ 1 枚、継手中間部は各 15 枚と仮定すれば、撮影フィルム予定枚数は約 7 137 枚、検査率 42% 程度となる。このフィルム予定枚数を 1 日当たり約 60～80 枚撮影すると仮定すれば、89～118 日となり、自動超音波探傷検査による全数検査より 1.4～1.8 倍多くかかることになる。以上のことから作業性は自動超音波探傷検査の方が有利である。

#### 参考文献

- 1) 磯野：材料の劣化・損傷の検出と評価，WELTEC，Vol.1，No.9，1985.11.
- 2) 森・岸：劣化損傷と非破壊検査，溶接技術，1986.10.
- 3) JIS G 0565：鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法及び欠陥磁粉模様の等級分類。
- 4) JIS Z 2343：浸透探傷試験方法及び欠陥指示模様の等級分類。
- 5) JIS Z 3104：鋼溶接部の放射線透過試験および透過写真の等級分類方法。
- 6) JIS Z 3060：鋼溶接部の超音波探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法。
- 7) 亀井・松永：鋼橋の非破壊検査，橋梁と基礎，1977.7.
- 8) 小林：鋼橋の放射線検査と超音波検査，橋梁と基礎，1977.7.
- 9) (財)首都高速道路厚生会：土木工事共通仕様書，1987.4.
- 10) 名古屋高速道路公社：鋼構造物製作基準，1987.4.
- 11) 名古屋高速道路公社：鋼橋脚の現場溶接施工（案），1985.7.
- 12) 首都高速道路公団工務部：現場溶接施工要領，1988.1.
- 13) 阪神高速道路公団：現場溶接施工マニュアル，1985.4.
- 14) 小宮：鋼橋の溶接部に対する非破壊試験の現状，日本橋梁建設協会 虹橋，1985.8.
- 15) NDIS 2407-76：鋼溶接部の超音波自動探傷方法，非破壊検査，Vol.25，No.11，1976.11.
- 16) 関西道路研究会：鋼床版の現場溶接，施工技术，Vol.5，No.8～Vol.6，No.3.
- 17) 加藤：鋼床版の現場溶接について，橋梁と基礎，1967.5.
- 18) 塩山：組立現場用各種片面溶接法，神戸製鋼技報，Vol.20，No.4，1970.4.
- 19) 奥田：片面溶接継手に発生する終端ワレとその防止に関する研究，神戸製鋼技報，Vol.20，No.4，1970.4.
- 20) 佐々木，池田：ソフトバックギングによる鋼床版の裏波溶接，横河橋梁技報，No.1，1972.1.
- 21) 佐藤，矢田，神近：片面溶接における変形と割れに関する研究，IHI 技報，Vol.17，No.3，1977.5.
- 22) 夏目：片面サブマージアーク溶接の中間割れの研究，横河橋梁技報，No.8，1978.1.
- 23) 菅野：鋼床版箱桁橋現場溶接施工，川田技報，Vol.2，1981.1.

- 24) 夏目・益子・植草：鋼床版の現場溶接における割れ防止施工方法，横河橋梁技報，No.15，1982.11.
- 25) 野村・杉谷・等農・藤村・森・岡：鋼床版現場溶接法の開発と適用，日本鋼管技報，No.109，1985.
- 26) 細井・原田・橋本：炭酸ガスアーク自動溶接工法による鋼床版現場溶接，技報まつお，No.7，1984.4.
- 27) 柴田・明石・玉置・堀川：マイコン制御サブマージアーク自動溶接装置による鋼床版の現場溶接，橋梁と基礎，1984.7.
- 28) 野村・杉・谷・玉置・辻・安藤・高畑：橋梁の自動溶接技術，日本鋼管技報，No.109，1985.
- 29) 柳橋：鋼床版デッキプレート継手の現場溶接に発生する欠陥，東骨技報，No.9，1980.3.
- 30) 加藤：鋼床版の現場溶接における欠陥と X 線検査について，東京大学提出学位論文，1974.9.
- 31) 本州四国連絡橋公団：鋼床版現場溶接施工基準(案)，1978.3.
- 32) 日本鋼構造協会標準化委員会，U リブ規格作成小委員会：鋼床版用 U 形鋼の JSS 規格改訂，橋梁と基礎，1983.7.
- 33) 横河橋梁製作所：鋼床版溶接設計施工指針一社内標準，1982.8.
- 34) 近藤・井上・加藤・佐々木：新十三大橋の工事，橋梁と基礎，1968.2.
- 35) 中村・宮嶋：首都高速道路羽横線・多摩川橋梁の上部工事，土木施工，Vol.9，No.10，1968.10.
- 36) 中村・池田・明石：鋼床版の現場溶接工法に関する実験的研究，土木学会誌，Vol.53，No.4，1968.4.
- 37) 橋：オークランドハーバーブリッジの概要，IHI 技報 別冊 1，1968.8.
- 38) 栗山・山崎・河野：高張力鋼の溶接（オークランド港湾橋），IHI 技報 別冊 1，1968.8.
- 39) 野元・小川・扇谷：首都高速道路 7 号線・斜張橋・荒川橋梁(仮称)について，橋梁，1970.3.
- 40) 野元・小川・熊倉：荒川橋梁(斜張橋部分)の架設工事，土木施工，Vol.11，No.10，1970.10.
- 41) 松永・並川：大阪東大阪線・法円坂一鋼床版の現場溶接施工例について，橋梁，1970.5.
- 42) 井上・柳瀬・天花・原田：天満橋立体交差橋の鋼床版現場溶接，土木技術，Vol.25，No.7，1970.7.
- 43) 菅・鈴木・池田：大ブロック工法による広島大橋の施工，横河橋梁技報，No.3，1973.11.
- 44) 笠谷・成宮・加藤：鰐川橋鋼床版現場溶接，橋梁と基礎，1975.2.
- 45) 妹尾・寺坂・小林・田中・田中：大ブロック工法による荒川湾岸橋の設計・製作・架設，横河橋梁技報，No.6，1976.11.
- 46) 東京都「新大橋」の工事，IHI 技報，Vol.16，No.2，1976.3.
- 47) 鈴木・小野口・石倉・麦谷：水郷大橋(斜張橋)の輸送と架設，横河橋梁技報，No.7，1977.11.
- 48) 佐藤・成宮：箱桁橋の全断面溶接一首都高速旧江戸川橋梁，橋梁と基礎，1978.7.
- 49) 菅原・有村：馬入橋鋼床版現場溶接施工報告，東骨技報，No.8，1979.9.
- 50) 高木・古野・小林・滝沢・中村：Mississippi River 橋(ルーリング)の製作と架設，橋梁と基礎，1982.10.
- 51) <座談会>阿武隈橋鋼床版の現場溶接施工に従事して，技報まつお，No.3，1982.4.
- 52) 葉山・宇和川：児島湾大橋の溶接大組立ておよび海上積出しについて，技報まつお，No.3，1982.4.
- 53) 幕田・山平・大野・上田：首都高速湾岸線・京浜運河橋の設計・製作，住重技報，Vol.30，No.88，1982.8.
- 54) 上床・赤根：U 形鋼を使用した曲線鋼床版箱桁製作報告，東骨技報，Vol.16，1983.9.
- 55) 坂本・毛利：4 径間連続鋼床版箱桁の施工，阪神公団技報，No.4，1984.
- 56) 孫・劉・大宮司：関渡大橋の設計と施工，橋梁と基礎，1984.4.
- 57) 阿保・古宮：京浜運河橋の施工，橋梁と基礎，1983.1.
- 58) 渡辺・横江・梶山：日守大橋の設計と施工一現場溶接を用いた耐候性鋼材の道路橋橋梁と基礎，1985.7.
- 59) 野中・川人：名港西大橋の施工，橋梁と基礎，1985.4.

- 60) 小泉・阡陌・荒木・小杉・米原・川延：名港西大橋の施工，日本鋼管技報，No.109，1985.
- 61) 鷺尾・瀬戸口・毛利：全断面溶接橋梁の設計と製作，阪神公団技報，Vol.5，1985.
- 62) 三輪・武田・風井：北波止工区（大阪臨海線）の設計と製作，高田機工技報，No.3，1987.1.
- 63) 高橋・山崎・安藤：S字曲線斜張橋上部工の設計，橋梁と基礎，1985.4.
- 64) 鈴木・橋本・藤ヶ崎：新浜厚真橋の架設，技報まつお，No.13，1987.4.
- 65) 木下・鈴木・武井：名古屋高速道路六反工区鋼床版現場溶接施工報告書，トピー鉄構技報，No.4，1987.
- 66) 矢野・田中・益子・奥原・青沼：S字形曲線鋼床版箱桁橋の工事報告，横河橋梁技報，No.16，1987.1.
- 67) 安田・淵脇・大倉：最近の現場溶接施工，高田機工技報，No.3，1987.1.
- 68) 城島：超音波探傷におけるCRT波形と欠陥の関係について，東骨技報，No.10，1980.10.
- 69) 原田：鋼床版現場溶接部の超音波自動探傷装置の開発，技報まつお，No.10，1985.10.
- 70) 角・石本：簡易自動超音波探傷装置，住友重機械技報，Vol.27，No.80，1979.8.
- 71) 田中・松本・山口・山下：道路橋鋼床版現場溶接部の自動超音波探傷，橋梁と基礎，1982.12.
- 72) 金沢：鋼床版現場溶接の自動超音波探傷検査，本四技報，Vol.11，No.43，1987.7.
- 73) 原・高田・宮本・藤本・多田・一井：鋼床版現場溶接部への自動超音波探傷検査の適用，川田技報，Vol.7，1988.1.
- 74) 本州四国連絡橋公団：Dルート吊橋3橋・鋼床版現場溶接継手の自動超音波探傷検査報告書，1988.4.