講 義

溶 接 ワ レ 試 験 法 に つ い て (1)*

田 村 博**

A Review on Weld Cracking Tests (1)*

By Hiroshi Tamura

目 次

1. ま え お き
 2. 溶接ワレの性状と影響因子
 3. ワレ試験法の分類と選定条件
 4. ワレ試験法の問題点
 5. 最近の各種材料への使用例 (次下次号)
 6. I.I.W. におけるワレ試験法に対する動向
 7. む す び
- 文 献

1. ま え お き

溶接技術の最近における進歩はまことに目ざましく、各種鉄骨構造物から化学石油タンク類や原子炉等広範囲に利用されつつある。一方材料面でも各種高張力鋼、ステンレス鋼その他種々の新しい材料が溶接用に発達し、それらに用いる溶接棒も多数生産されている。

このような構造物を各種金属で工作する際にしばしば遭遇するのはワレの発生で、ワレの問題を除くための良好な材料、溶接棒の選択あるいは溶接施工条件の設定の問題などでワレ試験法の必要性が日まじに増加しつつある。

ワレ試験法については、溶接技術の進歩する以前からきわめて単純な方法が工夫され慣用されていたようであるが、その後の溶接技術や材料、溶接棒の発達に呼応して、絶えず進歩改良が加えられている。

周知のごとく、溶接そのものが不安定現象であり、またワレの発生が多くの冶金因子と力学的因子の組合さった複雑な現象で材料や溶接施工条件等でその挙動を著しく異にするもの故、数多くの条件を十分に満足させる再現性のよい試験法の確立はなかなか困難で、現状では数多くの試験法のうちからそれぞれの場合に応じて任

意に選ばれたものが便宜的に用いられているので種々の不便が感じられる。

しかし国内はもちろん最近では I.I.W. を中心に、国際的にも試験法を整理統一しようとする気運が昂まり、そのための共同研究なども実施されつつある。

最近一連の割れ試験法については Borland¹⁾ が、またステンレス鋼については安藤氏²⁾ によって詳細に紹介されているが、ここでは主としてこれらの文献を参考にして、ワレ試験法の概要とその問題点を指摘し、あわせて内外における試験法確立の動向について述べる。

2. 溶接ワレの性状と影響因子³⁾

まず溶接ワレの種類生因等であるが、これらについてはここではごく簡単に触れる。

溶接ワレの種類はきわめて多く、ふつうはその発生時期、発生個所、形状、原因などでたとえば次のように分類されている(図-1、2参照)

図-1 各種ビードワレ

* 原稿受付, 昭和37年4月24日

** 正員, 運輸技術研究所 Member, Transportation Technical Research Institute

図-2 各種熱影響部ワレ

熱影響部ワレ

{	ビード下ワレ	{	縦ワレ
	横ワレ		
{	止端ワレ	{	ルートワレ

上記の溶接ワレは材料や溶接棒の種類により、その発生時期を異にし、高温ワレと低温ワレに分けられる。高温ワレは主として軟鋼や S, P などの多い鋼、あるいはステンレスやその他多くの高合金に見られるもので、鋼 casting が鋳型の拘束を受けて冷却中に割れるのと類似の原因で起ると考えられている。冶金学的因子としては凝固温度域における半溶融状態の偏析部分の塑性変形能が著しく消失することが、また力学的因子には収縮や拘束にもとづく内的応力が挙げられている。したがって冶金的には凝固直後の金属の強度や延性を著しく低下させるような成分や不純物の増加、力学的には収縮応力を高める因子、たとえば入熱、ビード形状、板厚や継手の剛性などはすべて高温ワレに悪影響を及ぼす。

一方低温ワレは溶接部が約 200°C 前後あるいはそれ以下に冷却されてから起るもので、普通溶接中溶着鋼あるいは熱影響部に延性の乏しいマルテンサイトを生じやすい低合金鋼や高炭素鋼、マルテンサイトステンレスなどにかぎられ、その発生原因にはマルテンサイト変態、水素および応力が考えられる。したがって冶金的には焼入性を増すような合金の添加や冷却速度を増加させる因子や H₂ 脆化、組織など、力学的には同じくマルテンサイト変態応力、水素圧、その他拘束応力や応力集中度を増すような各種因子が低温割れに著しく影響する。

ただ以上はごく一般的な事項で、もちろん同じ高温ワレでも高硫黄鋼やステンレスなどと低合金鋼とでまったく同じ機構で起るとは考えにくいし、高合金のノッチエクステンションクラックなどでは熱影響部の粗大結晶粒界が切欠の役割を果している場合などがある(図-3)。また低温ワレでもビード下ワレにはマルテンサイト変態と水素が主因で拘束の影響は 2 次的因子であり、止端ワレやルートワレでは形状影響による切欠効果がマイクロフィッシャには水素がそれぞれ主因であるなど、材料や割

図-3 ノッチエクステンションクラック

れの種類で各要因のもつ比重は著しく異なりきわめて複雑である。

3. ワレ試験法の分類と選定条件

以上溶接ワレの生因から推察すればワレを調べるための試験法としては、高温ワレについては溶接直後の半溶融状態において試験溶接部に何らかの手段で応力の加わる機構のものが、低温ワレでは適当な冷却速度を与えつつ試験ビードを拘束することによってワレを起しやすくなったものが考えられてる。もっとも簡単なものは鋼板上に溶接ビードを置いたものから、かなり複雑なものまであり、その数は50を下らない。

すなわち鋳物のようにはなはだ脆弱なものでは凝固時の体積変化のみで自己ワレ (Self cracking) を起すし、自硬性の大きな合金鋼では主としてマルテンサイト変態応力のみでワレを生ずるから、何ら拘束や外力を加えなくとも単にビードを置く程度でワレ試験の役割を果す。一方最近の低炭素高張力鋼のごとく、マルテンサイトの靱性や延性の優れたものではスリット型とか、拘束の強い試験片によらないと、主として水素と拘束とマルテンサイト硬化にもとづくと考えられる遅滞ワレ (Delayed cracking)⁴⁾ の再現が困難である。

これらのうちからその目的に応じてそれぞれ最適な試験法を選択する必要があるが、その選定条件としては大要次のものが挙げられる。

- (1) 使用目的
- (2) 材料の種類
- (3) 材料の形状
- (4) 継手の形状
- (5) 溶接方法

使用目的としては

- a) 母材の溶接性比較
- b) 棒の性能比較
- c) 棒の品質試験
- d) 溶接施工条件の確立
- e) 事故原因の調査と対策

などが考えられる。母材の溶接性を目的とする場合はできるだけ熱影響部にワレの生ずることが、棒の性能比較

表-1 ワ レ 試 験 法 一 覧 (その1)

接 手 形 式	名 称	主 の 位 置	主 な 材 料 の 種 類	ワ レ の 種 類	形 状		拘 束	冷 却 速 度	検 査 方 法	最 我 使 用 近 国 実 験 の 結 果	加 工 難 易	操 作 難 易	繰 返 数	感 度	文 献 番 号	摘 要
					試 験 片	ビ ー ド										
ビ ー ド 置 (平 板 又 は グ ル ー プ)	パッセルビード下ワレ試験	B	銅	HAZワレ	板	直	なし	水 冷	断ミク 面 滑 ロ	○	●	○	5~10	△	1,13,71	E6010 棒, 拘束は板厚変化による, 溶接直後水冷, 後熱
	円周ビード溶接ワレ試験 (図 4)	B	"	"	薄 板	円	治 具	水焼入	平ミク 滑 ロ		○	○	.6	△	1,71	E6013 棒使用, 720°C に対する長さで表示, 溶接直後水焼入, 円周ビード径で拘束変化
	円周溝溶接ワレ試験 (図 5)	D	高 合 金	ビードワレ	板	"	なし		外 観	△	○	○		△	1,2,22,23, 36,37,51	冷間ワレをしるるには溶接後強制空冷
	分割円周溝ワレ試験	D	"	ノッチエックス テンションクラック	"	"	ギヤップ		破 面	○	△	△		○	1,2,37,38	ガスタービンディスクの溶接 円周グループの変形
	指形ワレ試験 (図 6)	D	"	"	板	ビード	治 具 板 幅		破 面		○	○		△	1,2,57,58, 71,81	トルクレンチで拘束 板幅大程拘束大
	鋳鉄ワレ試験 (図 7)	B D	鋳 鉄	各 種	ブロック	"	グループ		外 観	△	○	●		△	1,65,66,67	ワレないときは横引張試験片をとる
	Boudreau 薄板ワレ試験 (図 8)	D	各 種	ビードワレ	薄 板	"	外力		"	△	○	○		△	1,46~48	TIGに適, ワレを外力で表示
	パッドワレ試験	D	ステンレス	マイクロフィッシュ	板	直・多層	なし		平滑・断面 ミク ロ	△	●	○		△	1,77	
	Houldcroft 魚骨形試験 (図 9)	D	アルミ 銅	ビードワレ	薄 板	直	スリット 変 化		外 観		△	△	6	△	1,63,64	MIG, TIGに適 治具要, ビード位置で拘束変化
	縦ビード曲げワレ試験	B D	ステンレス	各 種 ワ レ	"	"	曲 げ		"	○	●	○		△	2,	50×200 mm
突 合 せ 継 手	多層ビード置ワレ試験 (図 10)	B	アーマー	HAZワレ	板	直 3 バ ス	ビード		断ミク 面 滑 ロ		●	○		△	80	
	鉄研式ワレ試験 (Y又はY)	B D	銅	ルートワレ	板	直	自 拘		外 観	●	△	●	2~3	●	12,71	
	Yスリットワレ試験 (小型)	B	"	HAZルート	板	直	自 拘	溶接条件 で変化	断 面 外 観	○	△	○	3又は 2×6*	●	21,71	限界冷却速度決定 * 溶接条件変化
	丸棒形ワレ試験(DIN) (図 11)	D	各 種	ビードワレ	丸 棒	"	ビード (2層)		外 観	△	●	△		○	2,78	T型より厳格
	丸棒形ワレ試験(JIS)	D	"	"	"	"	ビード (1層)		"	○	●	○		○	20	簡単, 棒の品質試験に適
	丸棒形ワレ試験	D	各 種	"	丸 棒	直	ビード (3層)		"		●	○		○	1	クレータワレを除き, 全長が1"以下なら可
	リーハイ拘束ワレ試験	D B	"	ルートワレ	板	"	自拘・スリ ット変化		外 観 断 面	●	△	●	6*	●	1,2,4,14	スタートクレータ残す * スリット長変化
	変形リーハイ拘束ワレ試験 (図 12)	D	合金銅	"	板 棒	"	"		"		△	○		●	6,29,30	軟銅製リーハイ試片に試験材をはめ込み
	Uスリットワレ試験 (小型リーハイ)	D	各 種	"	板	"	自 拘	溶接条件 で変化	外 断 断 面	○	△	○	3又は 2×6*	●	21,71	限界冷却速度決定 * 溶接条件を変化する場合
	円周はめ込みワレ試験 (図 13)	D	"	各 種 ワ レ	"	円	はめ込み		外 観	△	△	○		●	1,2,28,29,30 45,59,71	スタート, クレータ残す, パッチ径で拘束変化 感度良好なるも変動す
手	NRL スリットワレ試験 (図 14)	D	"	"	"	直	自 拘		外 観	△	△	○		○	1,71	ビードの位置で拘束変化 歪測定容易解析に便
	BWRA スリットワレ試験 (図 15)	D	アルミ	"	"	"	"		"		△	○		○	1	"
	X形ワレ試験 (図16)	D	ステンレス	ビードワレ	棒	直・多層 (2 パス毎交互)	ビード		外 断 断 面		○	○			1,62,83	最初のワレを発見後止め, まったくワレないと きは断面検査
	フィスコワレ試験	D	各 種	"	板	直	治 具 ギヤップ		破 面	●	○	△	4 ビード	●	1,35,75,76	材料少くてよい再現性大 ギヤップで拘束変化
	H形スリットワレ試験 (開口式)	B	合金銅	HAZワレ	"	"	自 拘			△	△	●			2,33	切込の長さで拘束変化 戦時中強靱鋼に使用
	スリットワレ試験 (手塚式)	B	"	"	"	"	"			○	△	●			2,34,35,49 50	戦時中強靱鋼に使用
	窓形拘束ワレ試験	D B	低 合 金 銅	横 ワ レ	"	"	治 具 はめ込			○	○	△		○	18,19	実際の施工試験
	スリットグループワレ試験 (図 17)	B	ステンレス 鋳 物	各 種 ワ レ	"	直 多 層	自 拘		X 断 線 面		△	△			2	スリット幅で拘束変化

表-2 ワ レ 試 験 法 一 覧 (その2)

接 手 形 式	名 称	主 な 置 位 レ 位	主 な 材 料 の 種 類	ワ レ の 種 類	形 状		拘 束	冷却速度	検査方法	最 我 使 用 実 績 の 概 況	加 工 難 易	操 作 難 易	繰 返 数	感 度	文献番号	適 要	
					試験片	ビード											
突 合 せ 継 手	海軍式いためワレ試験	D	ステンレス	高 温 ワ レ	板	直・単または多層	治 具		断ミク	面 断	△	△		●	1	スリット長さで拘束変化	
	アーマー用溶着鋼ワレ試験 (図 18)	D	アーマー	ルードワレ	"	直	自 拘		外断 断	親 面	△	○	○	●	28,55	McKay Co. で発達したアーマー溶接棒用,	
	陸軍式初層部溶接ワレ試験	B D	"	ルードワレ	"	直 単又は多層	自 拘		外断 断	親 面	△	△	○	●	27,35,84	12"×16"の大きさのスリット型初層の安全性を しらべる	
	自動溶接用スリット形 ワレ試験	D	鋼	ビードワレ	"	"	"		"	△	△	○		○	73	自動溶接用 450×750 mm, 2 mm スリット	
	自動溶接 I.I.W. 用ワレ試験 (図 19)	D	"	"	"	"	"		外 観		○	○			85	I.I.W. No. 12 委 50×300×30 mmV 溝突合せ	
	薄板用円周溝ワレ試験	D	ステンレス チタン合金	"	薄 板	円	治具で 拘束		"			○	△		○	60,61	スクリューで押えて拘束
T 型 継 手	RD 突合せ溶接ワレ試験	B D	鋼	各 種 ワ レ	板	直	"		断 面		○	△			71	板幅により拘束変化し, ワレのない最小幅を求 める	
	T形すみ肉溶接ワレ試験 (DIN)	D	各 種	ビードワレ	板	直	ビード		外 観	○	●	○		△	2,17	棒の品質試験に適	
	T形すみ肉溶接ワレ試験 (BS)	D	"	"	"	"	"		破 面		●	○		△	1	棒の品質試験に適 スリットを入れて破壊	
	ギャップ付片側(I.I.W.)T形 すみ肉溶接ワレ試験(図27)	D	"	"	"	"	ギャップ 変 化		外 観 破 面	△	△	○		○	71	スリットを入れて破壊 イタリヤ船級協会使用	
	2重T型 (I.I.W.) (図28)	D	"	"	"	"	補助板と ビード		"		○	○		○	71	補助板で拘束 DIN の改良	
	T形すみ肉ワレ試験	D	"	"	"	断 続	ビード		"	△	●	○	3ビ ード	△	44	主として試験ビードが 40 mm の点で異なる	
重 ね 継 手	cruciform 試験	B	鋼	HAZワレ	"	直	"		断ミク	面 断	△	○	○		○	1,31,32,71	欠点材料多量要す, 米軍の受入試験
	リーフワレ試験	B	鋼	HAZワレ	板	直	台 板		断ミク	面 断	△	△		△	1,2,82		
	CTS ワレ試験	B	"	"	"	"		板厚で 変化	"	●	○	○		△	1,15,71	熱的拘束度定量化	
そ の 他	Hinds 式ワレ試験(図20)	D	各 種	ビードワレ	"	"	ビード		外 観	△	○	△		△	1,86	第 1 , 2 ビード時間間隔小さ過ぎ溶接難	
	Cost-Pin Tear Test (CPTワレ試験)	D	各 種	高 温 ワ レ	一	鋳 込	はめ込み		外観・断面 ミク		△	△			71,79	Zr, Ti Cb の溶接用, Mold に鋳込ピンの長さ, Mold の径で拘束変化	
	オーステナイト鋼用 B.W.R.A.ワレ試験(図21)	D B	ステンレス	"	管 板	円 多 層	"				△	△			1	溶接中微小ワレ 熱処理後拡大	
	Murex 高温ワレ試験	D	各 種	ビードワレ	板	直	外 力		破 面		●	△		●	1,16,71	回転角, 速度変えて感度, 歪量広範囲に変化	
	逆曲げ溶接ワレ試験	D	"	"	"	"	"		"	○	●	△		●	10,71	同 上 Murex の改良	
	O.T.T. ワレ試験 (図22)	D	ステンレス	"	パイプと フランジ	円	はめ込み		外断 断	親 面	△	△	△	○	2,45	実用に近い試験	
他	米海軍式円板はめ込ワ レ試験 (図23)	D	"	"	厚 板	円 多 層	"		X断 断	線 面		△	△	○	1,2	板厚直径で拘束変化	
	Prokhorov 試験 (図24)	D	各 種	"	板	直	外 力				△	△		○	1,74	Murex の改良, 突合せとT型アークの移動と 同時に細片を回転	
	切欠溝きれつ試験	D	ステンレス	"	"	直	重 錘		外 観	△	○	△			48	溝中に棒を横たえて Tig 溶接 45×80×25 mm	
	十字型溝付丸棒ワレ試験 (図 25)	D	"	"	棒	"	な し		"		○	○		○	53		
備 考		B: 母 材 D: 溶 着金属				直: 直線ビード 円: 円周ビード				●かなり ○普通 △偏か	●容易 ○普通 △面倒	●容易 ○普通 △面倒		●良好 ○普通 △不良		空 欄 は 不 詳

図-4 円周ビード溶接ワレ試験

図-5 円周溝溶接ワレ試験

図-6 指型ワレ試験

図-7 鑄鉄ワレ試験

図-8 Boudreau 薄板ワレ試験

図-9 Houlacroft 魚骨形ワレ試験

や品質試験であれば、ビード割れの起る試験法が望ましい。ただ溶接部における母材と溶着金属の相互作用からこの両者を完全に分離しうる試験法はきわめて少ない。そのほか材料の種類には鋼、ステンレス、アルミ等各種、形状には板、棒、パイプ等、継手には突合せ、T型等、溶接方法には被覆アークの他、自動、半自動等が挙げられる。

いま既存のワレ試験をこれらの分類にしたがって整理すると表-1のごとくなる。またこのうちの1部*の試

* よく知られている試験法は図を省き、比較的知られていないものを示した。したがって試験法の重要度とは無関係である。

験片形状を図-4～図-25に一括して示した。ただ溶接方法についてはこれらのほとんどは被覆アーク溶接を対称としたもので、自動、半自動に適用しうるものはこのうちのごくかぎられたもののみである。

図-10 多層ビード置ワレ試験

図-11 丸棒型ワレ試験 (DIN)

図-12 変形リーハイ拘束ワレ試験

図-13 円周はめ込みワレ試験

図-14 NRL スリットワレ試験

図-15 BWRA スリットワレ試験

図-16 X型ワレ試験

図-17 スリットグループワレ試験

図-18 アーマー用溶着鋼ワレ試験

図-19 自動溶接用 I.I.W. ワレ試験

図-20 Hinds 式ワレ試験

図-21 オーステナイト鋼 BWRA ワレ試験

一方溶接ワレ試験法の具備すべき重要点としては大要次の事柄が挙げられる。

- (1) 試験片の製作が容易なこと
- (2) 材料をあまり必要としないこと
- (3) 試験実施の操作が簡単なこと
- (4) 再現性の優れていること
- (5) 感度がよいこと
- (6) 検査および判定の明確なこと
- (7) 実用面における諸条件との関連の密なこと

以上が理想的なワレ試験法のもつ条件で、もちろんこれらの諸条件を完備した試験法は現状では見あたらない。通常はこのうちのい

図-22 O.T.T. ワレ試験

図-23 海軍式円板はめ込試験

全性を保証しうる実験事実を何ら持っていない。これはワレ感受性の判定の明確化とも関係するもので、今後早急に検討を要する問題である。これには実際の各種構造物の溶接施工時の拘束あるいは冷却条件を実測することにより厳格度 (Severity) を格付することから、一方においては長い期間と多くの使用実績を統計的に解析するような総合的な調査研究が必要であろう。

(4) ワレ試験結果の定量的表示

前述の目的のごく当面の問題として、各種試験で得られた結果を、たとえば破壊時の残留延性や歪、拘束応力あるいは冷却条件などで定量的に表示し、さらに各種ワレ試験法相互の関連を明確にすることが必要である。なおこれらの点についてはすでに二、三の試験において試みられつつある⁷⁻¹¹⁾。

(5) 判定試験の統一

各種母材の溶接性の判定或使用溶接棒の確性試験としてのワレ試験法は国内においても規定がなく、ほとんど用いられていない現状にある。国内はもとより国際的にも早急に統一をはかり、将来は他の引張強さや衝撃値のような確固とした独立した尺度であらわしうる信頼性の

ある標準の試験法の確立が望まれる。なお棒の確性試験では規格鋼の、また母材の溶接性試験には規格棒の規定も当然随伴する問題である。

(6) そ の 他

以上はすべてワレ試験法の全部についての基本的な重要問題であるが、そのほかの限定的事項として下記の目的のための良好な試験法の確立がそれぞれ望まれる。

(イ) 自動、半自動用試験法

(ロ) 薄板用試験法

(ハ) 超厚板へのワレ試験法の適用 (以下次号)

文 献

- 1) J.C. Borland, Brit. W.J., Oct. 1960, p. 623/637 p. 757~762
- 2) 安藤, 溶接技術, 1957 (11) p. 616~624
- 3) 田村, 溶接技術, 1961 (9) p. 617~624 および 1961 (10) p. 705~714
- 4) E.P. Beachum et al. W.J. April, 1961, 155 s/159 s
- 5) E.F. Nippes et al, W.J. April, 1955, 183 s/196 s
- 6) R.P. Sopher et al, W.J. Nov. 1955, 644 s/552 s
- 7) 鈴木他, 金材研報告, 4 (1961) No. 1, 28~36
- 8) 木原, 松永, 造船協会論文集 No. 160
- 9) J.T. Berry and R.C. Allan, W.J. March 1960, 105 s/116 s
- 10) 中根, 村本, 溶誌, Vol. 28, No. 4, p. 229
- 11) 鈴木, 田村, 溶誌, Vol. 30, p. 155

研究委員会の動き (11月)

◎特別溶接研究委員会

37.11.15~17. 日本化学会々議室

▷本委員会 (第 6 回) および J.I.W. 第 12 委員会合同

37.11.15

鶴田委員長および鈴木 J.I.W. 12 委員長外 52 名

議事:

- 1) 委員会々計状況の報告および予算の修正
- 2) 委員会運営方針の協議
学会理事会の研究委員会運営方針 (案) にもとづいて今後の委員会運営について討議した。
- 3) I.I.W.-XII. との連絡について検討した。

I.I.W.-XII 出席報告および提出論文の説明:

- 1) 出席報告 東 大 安藤 良夫氏
- 2) 提出論文説明 東 大 安藤 良夫氏
東 芝 三上 博氏
金材研 橋本 達哉氏
名 大 関口春次郎氏

映画:

- 1) 「スポットウエルダー」
- 2) 「シームウエルダー」

ベルギー, エレクトロメカニク社製作

提供 愛知産業 KK

次回は 38 年 2 月上旬関西地区で開催

▷A 分科会 (第 8 回) 37.11.16 13.00~16.00

中根主査外 43 名

講演:

- 1) 「潜弧肉盛溶接について」 八幡製鉄 西 武史氏
- 2) 「鉄道車輛用車輪の肉盛溶接に関する研究」
国鉄名古屋工場 横井 忠夫氏
- 3) 「新しい多電極自動溶接法の研究」

新三菱神戸 鈴木 和久氏

- 4) 「ソ連における Ni および Ni 合金のサブマージド
アーク溶接」 鉄研 村本徹五郎氏

▷B 分科会 (第 8 回) 37.11.16 9.30~12.00

杉原主査外 53 名

講演:

- 1) 「CO₂-O₂ アーク多層盛り溶接における層間スラグの除去について」 大同製鋼 岡田 泰治氏
- 2) 「現場におけるパイプラインの炭酸ガスアーク溶接の実用」 日本鋼管工事 寺田 誠氏
- 3) 「橋梁における溶接の自動化」

横河橋梁 田中 五郎氏

- 4) 「I.I.W.-XII-B 文献紹介」

名大 益本 功氏