

現場溶接継手の疲労強度

STUDY OF FATIGUE STRENGTH OF FIELD WELDED JOINTS

稲葉紀昭*, 保坂鐵矢*, 酒井吉永**, 山田聡**, 渡辺昌之***

By Noriaki INABA, Tetuya HOSAKA, Yoshinaga SAKAI, Satoshi YAMADA and Masayuki WATANABE

A large steel box section sometimes needs to be assembled at site in order to meet transportation requirement. Field welding is one of the techniques to join the members. However, field welded joints tend to have weld defects compared to shop welding. In this study, a large box section is welded using horizontal and vertical welds simulating field welding. Fatigue tests on tensile specimens cut out from the field welded joints were carried out, and the test data was evaluated according to the inherent weld defects.

Key words : fatigue strength, box girder, field welded joints, weld defect

1. まえがき

橋梁の大型化に伴い、輸送上の制約から、桁をいくつかのブロックに分けて製作する。これらは、通常現場で高力ボルト継手により連結されるが、美観や防錆の観点から、現場溶接継手が用いられるようになってきた。このようなブロック間の溶接では、一般に、開先精度の確保が難しく、溶接時の拘束が大きくなり、溶接割れが生じ易い。そのため、例えば、鋼製橋脚の現場溶接では、溶接変形や割れ防止の研究が行われている^{1)・2)}。また、道路橋の主桁の添接では、美観が問題にされる位置に現場溶接が行われた例がある。このような場合には、添接板を用いないので鋼重の低減につながるが、現場溶接に十分注意を払う必要がある。

現場溶接は、現場での溶接施工の煩雑さと溶接部の品質の問題から、必ずしも経済的な継手形式とならないことがある。たとえば、鉄道橋では、現場溶接の溶接欠陥等級によって、疲労強度を低減するように規定されている^{3)・4)}。なぜなら、現場溶接は屋外で行うため、気象条件の影響を受け、また、溶接継手の位置によっては、不利な姿勢で溶接することになり、溶接欠陥が生じ易いからである。さらに、場所によっては、余盛り仕上げが困難なことがあり、仕上げによる疲労強度向上も期待できない。このような理由で、これまで現場溶接はあまり用いられていなかった。

しかし、現場溶接であっても、溶接部の仕上げが可能で、溶接欠陥が発生しないような溶接法を使用し、

* 日本鉄道建設公団 設計室 (〒100 東京都千代田区永田町二丁目十四番二号)

** 工修 トピー工業(株) 第一技術研究所 (〒441 豊橋市明海町一番地)

*** トピー工業(株) 鉄構事業部 (〒441 豊橋市明海町一番地)

それが非破壊試験で確認できるのであれば、工場溶接と同じに扱うことが可能と思われる。そこで、本研究では箱桁を現場溶接する場合に問題になる箇所を明らかにするため、実物大の大型模型試験体を製作し、溶接施工試験を行った。この試験体に対し、超音波探傷試験および放射線透過試験を行って、溶接部の欠陥が生じる箇所を把握した。次に、このような溶接欠陥と疲労強度の関係を評価するため、大型模型試験体から試験体を4体切り出して、疲労試験を行った。さらに、データを補足するため、現場溶接を想定した姿勢で大型模型試験体と同じ施工条件で、溶接を行った鋼板から試験体11体を切り出し疲労試験を行った。そして、溶接欠陥を初期き裂と仮定して破壊力学の手法を用いて、疲労き裂進展寿命を計算し疲労強度を評価した。

2. 大型模型試験体の溶接施工試験

(1) 大型模型試験体

大型模型試験体は、図-1に示すように、桁高3.7m、ウェブ間隔2.4m、長さ5.0mである。使用した鋼材はS M490Yであり、その機械的性質を表-1に示す。上フランジおよびウェブは板厚15mm、下フランジは板厚22mmである。なお、ウェブW1とフランジの溶接部は鋼製脚の現場溶接継手を参考にした仮想のものである。

(2) 組立方法と開先精度

この試験体は図-2に示すように4ブロックからなる。まず、これらのブロック①と②および③と④を拘束治具で組立てた。組立後の製作精度として、開先角度、目違い、ルート間隔を拘束治具の位置で計測した。その結果を表-2に示す。施工標準値¹⁾を若干上回る箇所が数カ所あったが、溶接欠陥の発生に対する影響も調べるため、そのまま溶接施工を行った。

拘束治具で組立てた後、溶接線交差部350mmの長さの部分を先に溶接した。ウェブ中央で水平方向の溶接線にて接合し、さらに、桁端部から3.75mの位置で全断面溶接した。

(3) 大型模型試験体の溶接施工

実際の現場溶接施工は、屋外、高所での作業となり、作業足場および防風対策工を設置する。本試験は工場内で高さ170cmの作業架台上で溶接施工を行った。溶接は、溶接線交差部以外はすべて、自動溶接で行った。桁内面には縦リブがあるため、桁内面に裏当て材を取付け、桁外面から片面自動溶接を行った。表-3に各溶接線の溶接方法および姿勢を示す。その順序は図-4に示すように、①～⑧の順に行い、同時に①と①'、②と②'のように溶接した。

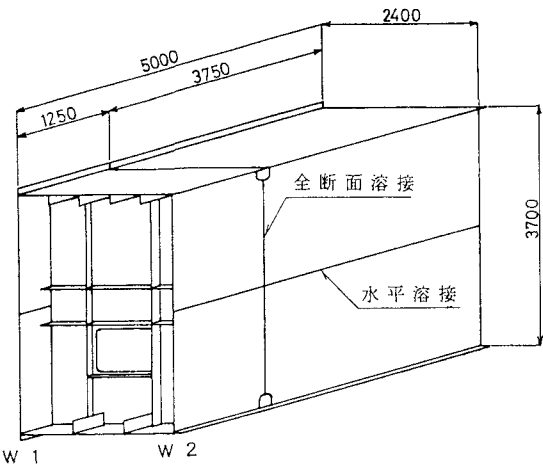


図-1 大型模型試験体

表-1 鋼材の機械的性質

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	全伸び (%)
上フランジ*	417	541	28.0
ウェブ	414	553	26.9
下フランジ*	446	552	27.5

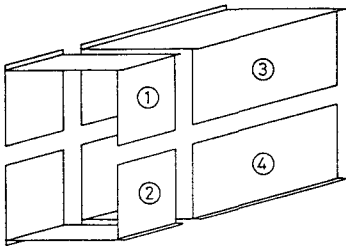


図-2 ブロック

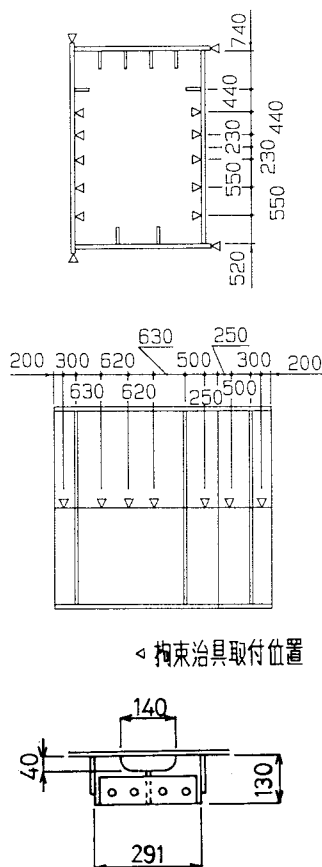


図-3 拘束治具

表-2 開先精度

		測定位置	ノット間隔(mm)		目違い (mm)	開先角度 (°)		
			基準値 (6.0)			基準値(11:30 他:50)		
			実測値	誤差		実測値	誤差	
上フランジ*		1 W1側	6.1	0.1	-0.1	45.0	-5.0	
		2	6.0	0.0	-0.1	47.0	-3.0	
		3 W2側	6.3	0.3	-0.2	46.0	-4.0	
下フランジ*		1 W1側	6.5	0.5	-0.4	45.0	-5.0	
		2	6.0	0.0	0.0	46.0	-4.0	
		3 W2側	6.0	0.0	-0.7	46.0	-4.0	
ウェブ*	水 平	1 端部	6.4	0.4	-0.7	30.5	0.5	
		2	5.7	-0.3	-0.6	30.0	0.0	
		3	5.8	-0.2	-0.2	30.5	0.5	
		4	5.0	-1.0	-0.5	29.0	-1.0	
		5 クロス側	5.4	-0.6	-0.1	30.0	0.0	
	鉛 直	1 上側	6.2	0.2	-0.2	42.0	-8.0	
		2	5.9	-0.1	-0.2	44.0	-6.0	
		3	5.9	-0.1	-0.6	45.5	-4.5	
		4	7.2	1.2	-0.2	46.0	-4.0	
		5	7.3	1.3	0.0	42.0	-8.0	
		6	7.5	1.5	-0.1	44.5	-5.5	
		7 下側	8.4	2.4	-0.5	43.0	-7.0	
	ウェブ*	水 平	1 端部	5.9	-0.1	-0.2	30.0	0.0
			2	5.3	-0.7	-0.3	30.0	0.0
3			5.2	-0.8	-0.3	30.0	0.0	
4			5.3	-0.7	-1.2	30.0	0.0	
5 クロス側			5.2	-0.8	0.0	27.0	-3.0	
鉛 直		1 上側	6.5	0.5	0.0	47.0	-3.0	
		2	5.9	-0.1	-0.2	44.0	-6.0	
		3	6.3	0.3	-0.4	44.0	-6.0	
		4	6.4	0.4	-0.5	50.0	0.0	
		5	6.5	0.5	-1.0	51.0	1.0	
		6	6.8	0.8	-1.9	51.5	1.5	
		7 下側	7.0	1.0	-0.6	44.0	-6.0	

管理目標値 ノット間隔±10mm 目違い 上フランジ・ウェブ 1.5mm
開先角度±5° 下フランジ 2.2mm

溶接線には、ウェブの全断面溶接線と水平溶接線の交差部（図-4のa）、およびウェブとフランジの全断面溶接線の交差部（図-4のbとc）がある。ウェブとフランジの全断面溶接線の交差部は、橋脚の隅の溶接に用いられるカスケード法（図-4のb）と、通常桁で用いられるスカラップにパッチ板を当てるパッチ処理法（図-4のc）の2種類の方法で行った。これら、3種類の交差部の溶接法を以下に示す。

(a) ウェブの全断面溶接線と水平溶接線の交差部

- 1) 図-5(a)に示すように、交差部350mmを十字形にカスケード法で積層する。カスケード法とは、多層溶接の積層法で、後退法で盛り上げる方法である。
- 2) その後、水平溶接を行い、さらに、全断面溶接をする。

(b) カスケード法によるウェブとフランジの全断面溶接線の交差部の溶接

- 1) 図-5(b)に示すように、ガウジングにより、ウェブ端部の内面の開先を形成する。
- 2) カスケード法により、フランジからウェブにかけて内面を半自動溶接する。
- 3) 次に、ウェブ端部の外面について、ガウジングで開先を形成し、半自動溶接を行った後、ウェブ全線にわたり自動溶接する。

(c) パッチ処理法によるウェブとフランジの全断面溶接線の交差部の溶接

- 1) 図-5(c)に示すようにウェブにスカラップを設け、フランジを自動溶接する。
- 2) フランジを溶接した後、スカラップにパッチ板を当て、桁内面より半自動溶接する。
- 3) その後、桁外面よりガウジングではつり、半自動溶接して、完全溶込みとする。

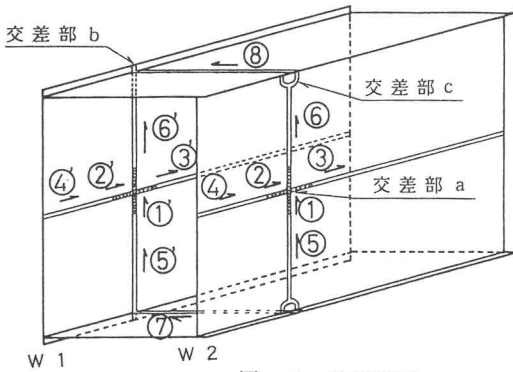


図-4 溶接順序

表-3 溶接方法および姿勢

継手	溶接箇所	溶接方法	溶接姿勢
水平	ウェブ	CO ₂ 片面自動溶接	横向き
	ウェブ	MAG片面自動溶接	立向き
全断面	下フランジ	MAG片面自動溶接	上向き
	上フランジ	CO ₂ 片面自動溶接	下向き

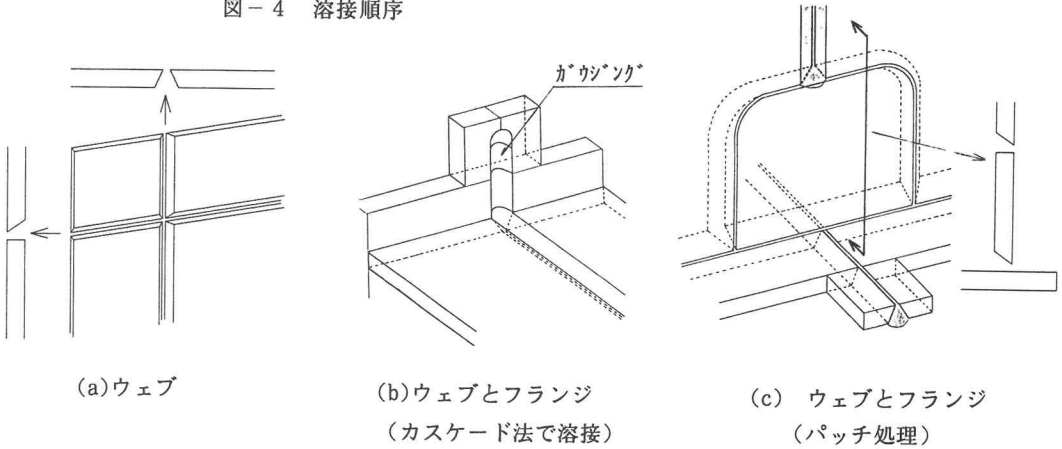


図-5 溶接線交差部の開先とタブプレート

(4) 鋼板試験体の溶接

溶接条件を確認すると共に、疲労試験体を補足するため、図-6に示すような大きさ1m×1m、板厚16mmの鋼板を用いて溶接施工試験を行った。用いた鋼板の材質はSM490Yとした。鋼板の中央部に開先を設けて、大型模型試験体のウェブおよび上フランジを想定して、溶接した。立向き自動溶接の施工状況を写真-1に示す。

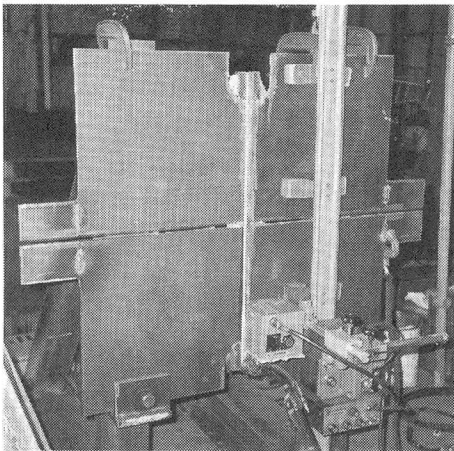


写真-1 施工状況

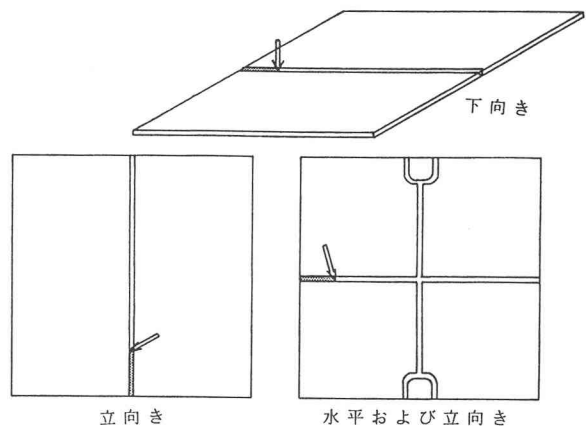


図-6 鋼板試験体

3. 非破壊試験の結果

溶接終了後、内部欠陥の位置や状況を調べるため、放射線透過試験および超音波探傷試験を行った。放射線透過試験は全線行い、超音波探傷試験は溶接線の交差部近傍について行った。

放射線透過試験の結果とおよその欠陥の位置を図-7および表-4に示す。水平溶接、上向き溶接および溶接線交差部近傍で欠陥が見られた。それ以外では溶接欠陥はわずかである。溶接の違いによる欠陥の発生状況を次に示す。

- 1) 下向き溶接部（図-4の⑧）には、端部のカスケード法で溶接した部分以外は欠陥が見られず、すべて1級であった。
- 2) 立向き溶接部（図-4の⑤と⑥）では、カスケード法で溶接した部分以外は、1級および2級であった。
- 3) 水平継手部（図-4の③と④）はW1では、カスケード法で溶接した部分に融合不良がみられた。
- 4) 2箇所のパッチ部では、溶接始点に近い下側の部分で融合不良がみられ、上側は1級であった。
- 5) 十字溶接部は交差部およびカスケード部の始末端部に融合不良が見られた。

超音波探傷試験では放射線透過試験で認められた融合不良は検出できたが、ブローホール等は、識別が難しく、結果は必ずしも一致していない。比較的大きな欠陥は、放射線透過試験の結果と同様に、ウェブとフランジの交差部および十文字溶接部の溶接交差部で検出された。

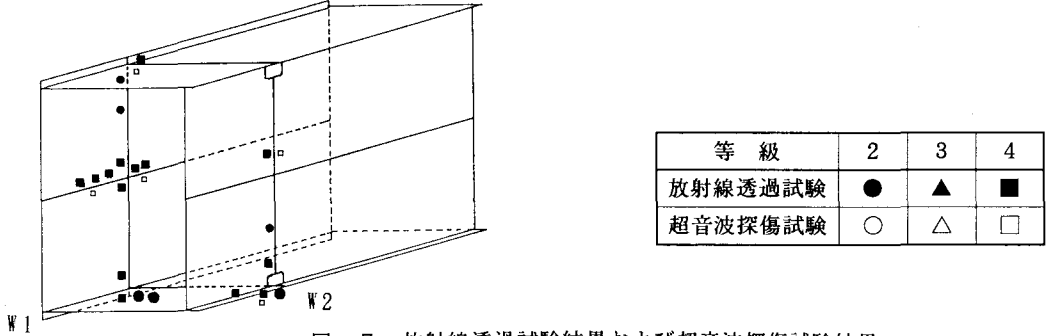


図-7 放射線透過試験結果および超音波探傷試験結果

表-4 放射線透過試験結果

		等級分類 (JIS Z 3104)						欠陥の 種 類	備考
		一 種			二 種		等級		
		大きさ(mm)	点数	等級	長さ(mm)	等級			
上フランジ	1				8.0	4	4	LF	カスケード部
下フランジ	1	1.0, 1.6	4	2			2	BH	カスケード部
	2	1.2, 1.6	6	2			2	BH	
	7				16.0	4	4	LF	
	9	1.6, 2.0, 6.0	14	4			4	BH	
	10	1.8	2	1	6.0	2	2	BH, P	
ウェブ W1	V1		集中	4			4	BH	カスケード部
	V2	1.2	6	2	10.0	4	4	LF, BH	クロス部下側 クロス部上側
	V7	0.8, 1.2	5	2	16.0	4	4	LF	
	V9		集中	4			4	BH	
	V11	0.8, 1.0	3	2			2	BH	
	V13	0.7	3	2			2	BH	
	H3				10.0	4	4	LF	カスケード部 クロス部左側 クロス部右側 カスケード部
	H4				84.0	4	4	LF	
	H5				260.0	4	4	LF	
	H6				156.0	4	4	LF	
		H7				220.0	4	4	LF
ウェブ W2	V1				54.0	4	4	LF	パッチ部上側
	V4	1.0	3	2			2	BH	クロス部下側
	V9		集中	4			4	BH	クロス部上側

BH:ブローホール LF:融合不良 P:パッチ

4. 疲労試験

(1) 疲労試験体

溶接施工試験を行った大型模型試験体の図-8に示す位置から、疲労試験体を4体切り出した。また、鋼板試験体の図-9に示す位置から11体疲労試験体を切り出した。試験体の溶接部の幅は80～90mmとした。仕上げた試験体はつかみ部で破断しないようにR部を設け、溶接のままの試験体は板幅を一定とした。試験体は、以下のように溶接部の形状によって、タイプA、B、C、DおよびEの5種類、合計15体とした。なお、大型模型から切り出した試験体はC*、D*、E*として、鋼板から切り出した試験体と区別した。

タイプA：フランジを下向き溶接する場合を想定した鋼板試験体から2体切り出した。溶接止端形状の影響を調べるため、この場合のみ、溶接止端部は仕上げなかった。

タイプB：ウェブの溶接を想定して、立向き溶接を行った鋼板試験体から6体切り出した。内部欠陥の影響を調べるため、溶接部は仕上げた。

タイプC：ウェブに水平溶接と全断面の立向き溶接が交差する場合を想定した鋼板試験体から1体、および大型模型試験体から1体切り出した。

タイプD：ウェブに明けたスカルップをパッチ処理する場合を想定した鋼板試験体から2体、および大型模型試験体から2体切り出した。

タイプE：ウェブとフランジの全断面溶接線の交差部近くの下フランジから1体切り出した。

鋼板試験体から切り出した試験体は、表面にグラインダーをかけた後、サンドペーパーで仕上げた。大型模型試験体から切り出した試験体はグラインダーでの仕上げのみとした。

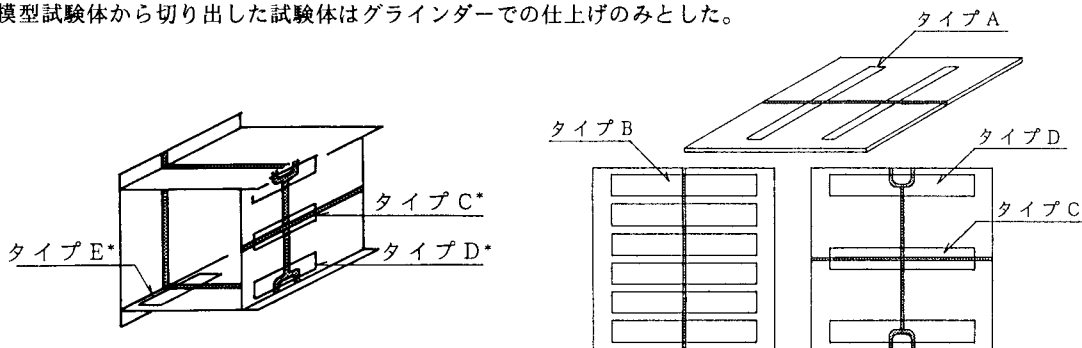


図-8 疲労試験体切り出し位置

図-9 疲労試験体切り出し位置

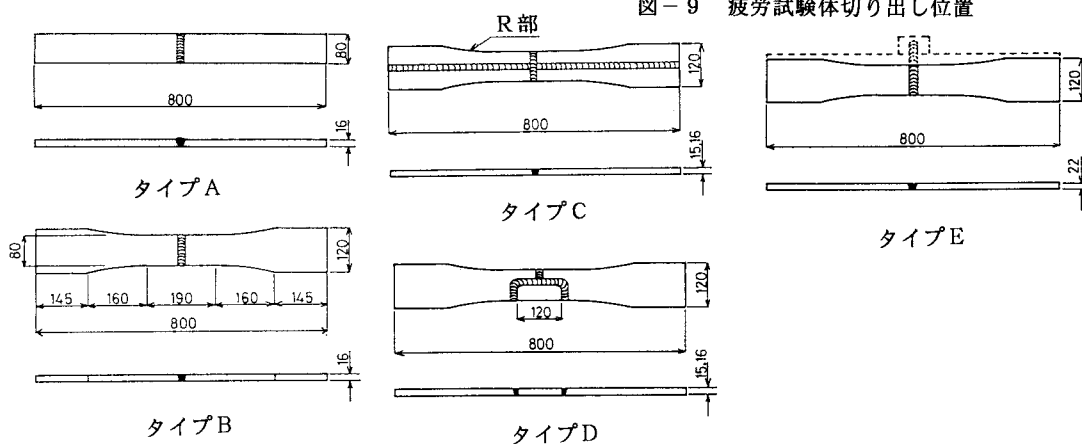


図-10 疲労試験体

(2) 疲労試験方法

疲労試験は100ton油圧サーボ式疲労試験機（島津製作所製）を用いて、応力比 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.05$ の片振りで繰り返し速度10Hzで行った。応力範囲は100～240MPaとした。なお、試験体に作用する応力および偏心はひずみゲージで確認した。この試験では、き裂の発生状況や進展状況を観察するため、約10万回おきに応力範囲を上側半分にしてピーチマークをいれた。

(3) 疲労き裂の発生状況と破面

疲労試験の結果を表-5に示す。試験した15体の内、2体は破断せず、1体はチャック部で破断した。それ以外の12体の試験体の破面に残されたピーチマークおよび欠陥を図-11に示す。

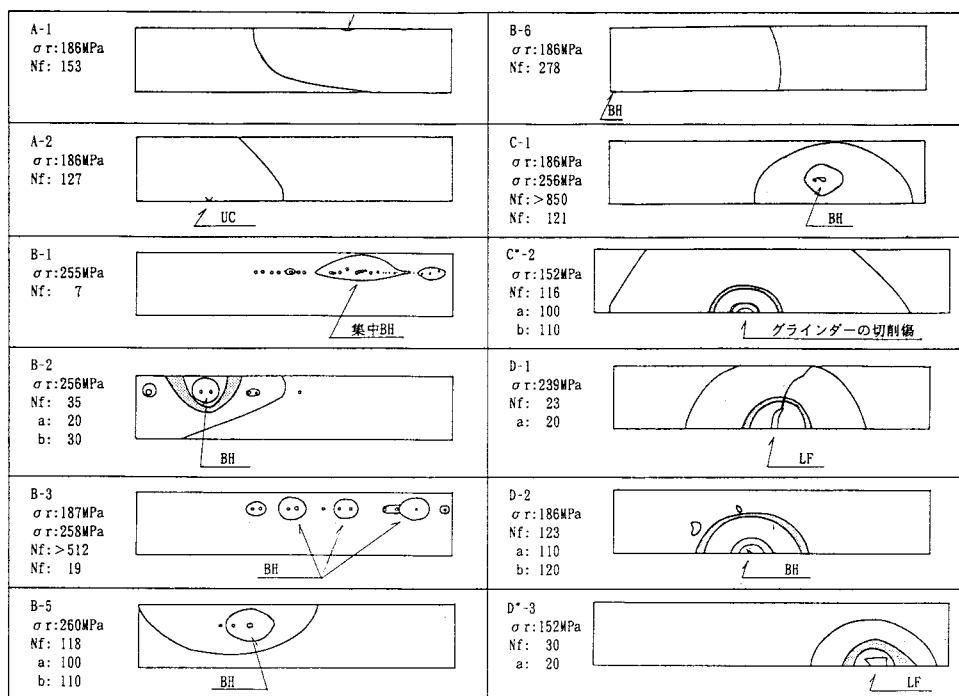
タイプA：いずれも片面溶接の表側の溶接止端部からき裂が発生した。A-2では、溶接止端部の約0.3mmのアンダーカットがき裂の起点となった。

タイプB：き裂は、ほとんどの試験体で内部の0.5～1.0mmの単独あるいは数個のブローホールから発生した。B-6は表面に出たブローホール、B-1、B-3は多数の接近し集中したブローホールから発生した。破面に残されたピーチマークから、き裂はブローホールを中心に円もしくは楕円状に進展した。これらに比較して、内部にある孤立した球状のブローホールはき裂の起点にはなりにくいことがわかる。

溶接法が難しいタイプC、Dでは、大型模型および鋼板から切り出した試験体ともに、次に示すようなブローホールや融合不良などの溶接欠陥がみられた。

タイプC：C-1では、内部の0.5mm×1.0mmのブローホールからき裂が発生し、これはタイプBとほぼ同様の傾向であった。C*-2では、表面のグラインダーの切削傷からき裂が発生し、半楕円状に進展した。

タイプD：D-1には作用応力に平行で縦4mm長さ6mmの融合不良、また、D*-3では、作用応力に垂直で、長さ2.0mm幅4mmの融合不良から、き裂が発生し、半楕円状に進展した。D-2は、表面に出た1.0mmのブローホールからき裂が発生した。この破面には、他に2.0×3.5mm、1.0×2.0mmのブローホールがあり、内部の球状のプロ



(UC:アンダーカット BH:ブローホール LF:融合不良 矢印はき裂の起点を示す。)

図-11 疲労破面

ーホールはき裂の起点にはなりにくいことがわかる。

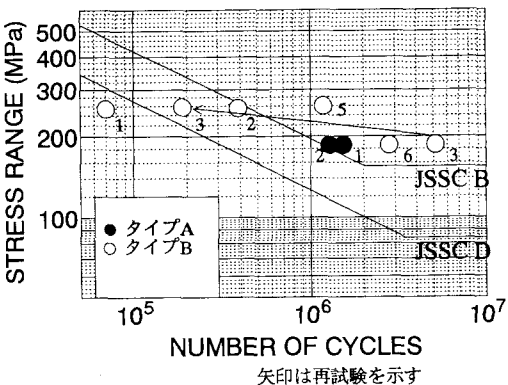
タイプE：応力範囲98MPaで300万回、さらに、152MPaで300万回载荷したが、疲労き裂は発生しなかった。

(4) 疲労強度

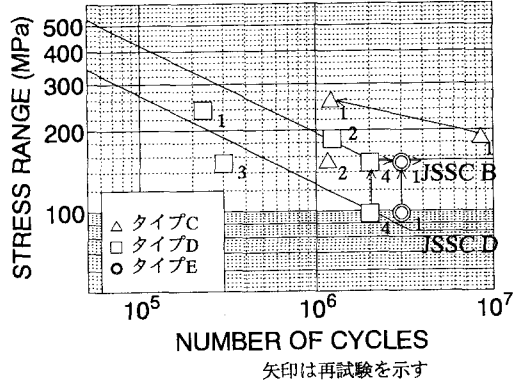
タイプA：JSSCの疲労設計指針⁷⁾によると、この試験体の強度はD等級である。継手の種類は、横突合せ溶接継手の非仕上げの良好な形状の裏波を有する片面溶接に相当する。裏当て材を設けた下向き溶接であるため、溶接ビード形状は良好であり、疲労強度は図-12(a)に示すように、この継手の許容応力度を十分満足した。

表-5 疲労試験結果

試験体 No.	断面諸元		荷重 $\Delta\sigma_f$ (MPa)	応力比 $R = \frac{P_{min}}{P_{max}}$	破断回数 $N_f \times 10^4$	Hz	<備考> 余盛り 仕上げ (有無)	
	幅 x 厚さ x T(mm)	断面積 A(mm ²)						
A-1	80.1x15.8	1268.3	186	0.05	153	10	×	鋼板試験体
A-2	80.0x15.9	1268.0	186	0.05	127	10	×	
B-1	79.3x16.0	1268.8	255	0.05	7	10	○	
B-2	79.2x15.9	1259.3	256	0.05	35	10	○	
B-3	79.3x15.9	1260.9	187 258	0.05 0.10	>512 19	10	○	
B-5	79.2x15.9	1259.3	260	0.05	118	10	○	
B-6	79.3x15.6	1238.6	186	0.05	278	10	○	
C-1	79.9x15.5	1234.8	186 256	0.05 0.10	>850 121	10	○	
D-1	79.8x15.3	1226.0	239	0.10	23	10	○	
D-2	80.1x15.6	1252.3	186	0.05	123	10	○	
C*-2	90.0x14.6	1314.0	152	0.10	116	10	○	大型橋梁試験体
E*-1	89.6x21.6	1935.4	98 152	0.10	>300 >300	10 10	○	
D*-3	89.0x14.0	1246.0	152	0.10	30	10	○	
D*-4	90.0x15.7	1413.0	98 152	0.10	>200 >200	10	○	



(a) タイプA, B



(b) タイプC, D, E

図-12 疲労試験結果

タイプB：継手の種類は余盛りを削除した継手に相当し、B等級である。1.0mm程度の単独あるいは数個のブローホールがある場合は、放射線透過試験の規格JIS Z 3104で2級に相当し、疲労強度はB等級を満足した。また、タイプAと比較することにより、この程度の欠陥であれば、溶接内部の欠陥の影響よりも溶接部の余盛りの影響の方が大きい。しかし、B-1のように多数の接近し集中したブローホールがあると、疲労強度はB等級を下まわる。

JSSCの疲労設計指針には、タイプC，D，Eの継手は規定がない。これらの疲労試験結果を図－12(b)に示す。

タイプC：0.5mmのブローホールがあるC-1はB等級を満足した。しかし、約0.5mmのグラインダーの切削傷があるC*-2はC等級を若干下まわった。

タイプD：1.0mmのブローホールがあるD-2はC等級を満足した。しかし、融合不良がある場合、作用応力に平行で縦4mm長さ6mmのD-1はD等級、作用応力に垂直で長さ2mm幅4mmのD-3*は疲労強度は著しく低く、E等級程度であった。

タイプE：き裂は、発生しなかった。この試験体は欠陥が少なかったため、JSSCのB等級を満足した。
以上の疲労試験結果より、大型模型から切り出した試験体および鋼板から切り出した試験体ともに、溶接法が難しいタイプC，Dでは、ブローホールや融合不良などの溶接欠陥によって疲労強度が低下していることがわかった。

5．破壊力学によるき裂進展寿命の推定

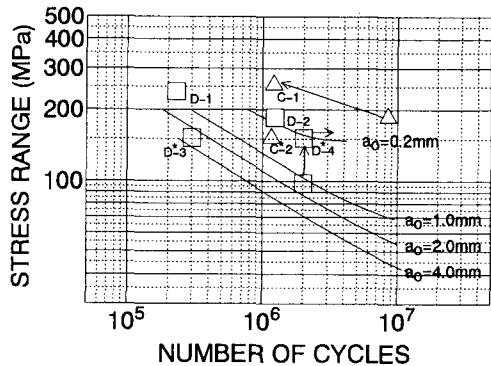
(1) 破壊力学による疲労寿命解析

疲労試験後の破面観察の結果、タイプC，Dのビーチマークから表面に近い溶接内部の欠陥が疲労き裂の起点となっていることがわかった。そこで、これらの欠陥を初期き裂と仮定して、これから進展する疲労き裂進展寿命 N_p を線形破壊力学の手法を用いて計算する。この解析結果と疲労試験結果を比較する。疲労き裂進展速度 da/dN は次式を用いた。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \tag{1}$$

ここで、材料定数は、 $C=1.5 \times 10^{-11}$ ， $m=2.75$ ， $\Delta K_{th}=2.9(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ を用いた⁷⁾。また、応力拡大係数範囲 ΔK は、次式で示すことができる。

$$\Delta K = F_s \cdot F_b \cdot F_t \cdot F_g \cdot \sigma_r \cdot \sqrt{\pi a} \tag{2}$$



試験体	欠陥の種類	大きさ(mm)
C－1	ブローホール	0.5×1.0
C*－2	切削傷	0.5
D－1	融合不良	4.0×6.0
D－2	ブローホール	1.0
D*－3	融合不良	2.0×4.0
D*－4	－	－

図－1 3 破壊力学によるき裂進展寿命解析結果

ここで、 F_s は自由表面補正係数、 F_a はき裂形状補正係数、 F_t は有限板厚補正係数、 F_g は幾何学形状補正係数、 σ_r は応力範囲、 a はき裂長さである。

初期き裂長さ a_0 から最終き裂長さ a_f までき裂が進展するための繰り返し回数、すなわち、疲労き裂進展寿命 N_p は、式(3)をそのき裂長さ区間($a_0 \sim a_f$)で数値積分することにより得られる¹⁰⁾。

$$N_p = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{(F \cdot \sqrt{\pi a})^m} da \cdot \sigma_r^{-m} \quad (3)$$

本解析では、表面に近い溶接内部の欠陥から発生するき裂を対象として、破壊力学を用いたパラメトリックな疲労寿命解析を行う。疲労き裂進展に影響を及ぼす因子として、初期き裂長 $a_0 = 0.2, 1.0, 2.0, 4.0 \text{ mm}$ をとり上げた。き裂形状は、 $a/b = 2/3$ (ビーチマークを測定した平均値)、最終き裂長は $a_f = 16 \text{ mm}$ (板厚)とした。なお、試験体は溶接部を仕上げてあるので、応力集中の影響はないものとした。

(2) 疲労寿命解析結果

大きな欠陥があったタイプCとタイプDの試験体の疲労試験結果と疲労寿命解析結果を図-13に示し比較する。表面に出たブローホールや融合不良がある場合の疲労強度は解析結果とよく対応した。

解析結果から、表面に1mmの初期き裂があり、そこから進展すると仮定した場合、200万回疲労強度は約10MPaであり、JSSCの継手強度等級分類では、D等級に相当する。これは、疲労試験結果において、1.0mmの程度のブローホールが表面にある場合および表面をグラインダー仕上げした場合の強度にほぼ等しい。また、表面に4mmの初期き裂があると、200万回疲労強度は約80MPaであり、E等級に相当する。これは、疲労試験結果において、長さ2.0mm幅4.0mm程度の融合不良が作用応力に垂直にある場合の強度にほぼ等しい。

6. まとめ

本研究では、現場溶接継手の疲労強度を明らかにするため、実物大の模型試験体を用いて現場溶接施工を行い、非破壊試験によって、どのような箇所に溶接欠陥が生じるかを明らかにした。次に、この大型模型試験体、および現場溶接を模して作った鋼板試験体から切り出した試験体を用いて疲労試験を行い、疲労強度を求めた。さらに、破壊力学による手法を用いた数値解析で、欠陥を初期き裂と仮定して疲労寿命を計算した。これらの試験および解析から、以下の結果が得られた。

- 1) 実物大の模型試験体の現場溶接施工後、非破壊試験を行った結果、上向き溶接、立向き溶接部、ウェブの水平溶接線と全断面溶接線の交差部近傍、フランジとウェブの溶接線交差部近傍、に溶接欠陥がみられた。溶接線が交差する場合、カスケード法とパッチ処理法を用いたが、これらの箇所はブローホールや融合不良が発生しやすい。
- 2) 疲労試験はタイプA、B、C、D、Eの5種類の試験体の合計15体行った。その結果、溶接部の仕上げ状況および内部欠陥の状況により、疲労き裂の発生する位置および疲労強度は異なる。
- 3) 溶接したままの試験体タイプAは、裏当て材を設けた下向き溶接であるため、溶接ビード形状は良好であり、疲労強度は、JSSCのD等級の許容応力度を十分満足した。
- 4) 1.0mmのブローホールが1～2個あり、溶接止端部余盛りを丁寧に仕上げたタイプB試験体では、そこから、き裂が発生し、疲労強度はB等級を満足した。ただし、多数の集中したブローホールがあるとB等級を下まわる。
- 5) タイプC、D、Eのように溶接線が交差するような場合、欠陥が発生しやすい。表面に出たブローホール、グラインダーの切り欠きや融合不良などの欠陥を初期き裂と仮定して、破壊力学による疲労寿命解析結果は、疲労試験結果とよく一致した。
- 6) 疲労試験結果および解析結果から、表面に1.0mm程度の欠陥、例えばブローホールが表面にある場合およ

びグラインダーによる切り欠きがある場合、JSSCの継手等級分類のD等級が適当であると考えられる。また、長さ2.0mm幅4.0mm程度の融合不良が作用応力に垂直にあると疲労強度は著しく低く、E等級程度となる。

- 7) したがって、溶接線が交差する箇所では破壊試験ができない場合、疲労強度はE等級まで下げる必要があると考えられる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、名古屋大学の山田健太郎教授に貴重な意見を頂きました。ここに記して、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：鋼鉄道橋現場溶接施工の手引，1980年6月。
- 2) 佐藤章次，加藤誠一，前野裕文，田口俊彦：鋼製橋脚梁部現場溶接継手の施工，橋梁と基礎，PP.28-34，1989年2月。
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準，1992。
- 4) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，技報堂，1983。
- 5) 稲葉紀昭，保坂鐵矢他：現場溶接継手の疲労強度の研究，土木学会年次講演概要集，第48回，PP.620-621，平成5年9月。
- 6) 保坂鐵矢他：箱桁全断面十字継手の実物大模型試験，土木学会年次講演概要集，第48回，PP.1096-1097，平成5年9月。
- 7) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993。
- 8) Albrecht, P., and Yamada, K. : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST2, pp.377-389, Feb. 1977.
- 9) Yamada, K. and Agerskov, H. : Fatigue Life Prediction of Welded Joints Using Fracture Mechanics, IIW Doc XIII-1365-90.
- 10) 山田健太郎，Hirt, M. A. : 破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析，土木学会論文報告集，第319号，pp.55-64，1982年3月。

(1993年9月16日受付)