

厚板の現場溶接継手の疲労試験

Fatigue test on field welded joints of thick plates for SRC girders

山田 聡*
Satoshi YAMADA

酒井吉永**
Yoshinaga SAKAI

長屋五郎*
Goro NAGAYA

保坂鐵矢***
Tetsuya HOSAKA

- * 工修 トピー工業(株) 技術研究所 第一研究部 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町一番地)
 ** 工博 トピー工業(株) 技術研究所 第一研究部 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町一番地)
 *** 日本鉄道建設公団 設計技術室 (〒100-0014 東京都千代田区永田町二丁目十四番二号)

Summary

In order to apply field weld joints to thick flange plates of railway SRC girders, the fatigue test and weldability test were carried out. SM570 plates with thickness of 19mm and 75mm were used in the tests. Fatigue test specimens were cut out from welded joints with defect made by drilling or gouging during welding process.

An investigation was made to see how much fatigue strength of welded joints was decreased by weld defects. Also the difference between fatigue strength of 19mm thickness plate and that of 75mm thickness plate was clarified.

It turned out that fatigue propagation life of welded joints of 75mm plates were a little longer than that of 19mm plates because of long crack propagation.

Key Word : *fatigue, field welded joint, girder, weld defect, thick plate*

1. はじめに

1992 年に溶接構造用圧延鋼材の JIS G 3106 が変更され、適用厚さが SM400A、B と SM490A、B の 200mm を除いて、すべての鋼材は 100mm まで規格化された。鋼鉄道橋においても、50mm を越える調質鋼を適用することにより、カバープレートを省略することができるなど断面の構成や継手構造の簡素化が可能となり、構造上優れているだけでなく、施工性や経済性にも効果がある。

板厚が 50mm を越えるとその接合には高力ボルト摩擦接合を用いると非常に大型となる。そこで、現場溶接が有利な接合法と考えられる。ところが、現場溶接はこれまでの研究から^{1)~4)}、①開先精度の確保が困難、②厳しい環境条件下(気象条件、溶接条件、特に溶接姿勢等)での施工のため溶接欠陥が生じやすい、等の一般的な現場溶接の条件に加えて、極厚材であることから③溶接時の拘束が大きくて溶接割れが生じやすい、④溶接欠陥の検出が難しい等の特殊条件がある。

疲労強度の面からみると、JSSC の疲労設計基準には板厚効果として、リブ十字溶接継手など応力集中の高い継手に対して設けられているが、突合せ継手についての項目はない^{5), 6)}。これは突合せ溶接継手は余盛りを仕上げると比較的疲労強度の高い継手に区分されるためと考えられる。しかし、溶接欠陥があるとその疲労強度が低下

する^{3), 4), 10)}。これに関する板厚の影響は明らかになっていない。

そこで、調質鋼の極厚材(50mm 以上)の接合に現場溶接を鉄道橋に適用するため、疲労試験を行い、溶接欠陥と疲労強度との関係、薄板と厚板の疲労強度の違いを調べる。

2. 溶接施工試験

(1)溶接施工試験内容

溶接施工試験は、図-1 に示すような形状で、厚板($t=75\text{mm}$)と薄板($t=19\text{mm}$)の2種類の鋼板を用いて行った。材質は SM570 とし、その化学成分を表-1 に、機械的性質を表-2 に示す。溶接施工後、その試験体から疲労試験片を切り出した。

溶接は、当て材(ガスシールドアーク片面自動溶接用裏当て材)を取り付けた CO_2 片面自動溶接で行った。溶接条件は入熱量が 70000J/cm 以下になるように条件を設定した入熱量小の場合および 70000J/cm 以上に設定した入熱量大の場合とした。溶接材料はワイヤ径 $\phi 1.2\text{mm}$ と 1.6mm (590N/mm^2 級高張力鋼炭酸ガスアーク溶接ソリッドワイヤ)を使用した。板厚 75mm で入熱量が小さい場合の溶接積層方法の例を図-2(a)に示す。板厚 19mm で入熱量が小さい場合の溶接積層方法の例を図-2(b)に示す。

また、溶接条件を表-3に示す。

現場溶接は溶接欠陥が生じやすいので、その影響を調べるため、溶接部のほぼ板厚中央付近で溶接中にドリルで穴をあけ、そこからブローホールを発生させるようにして、溶接欠陥を入れた。

溶接施工後、断面マクロ試験、硬度測定、溶接残留応力、そして、非破壊試験として、JIS Z 3060 に従い超音波探傷試験を行った。検査時、溶接ビードの研削は行わず、溶接ビードの両側から斜角で探傷した。

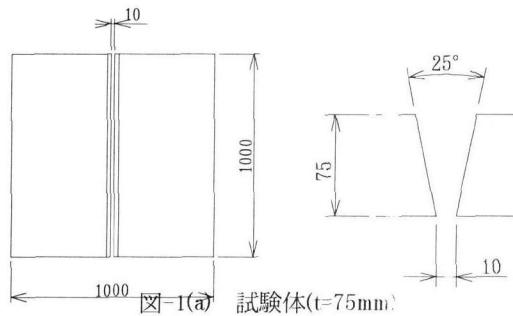


図-1(a) 試験体(t=75mm)

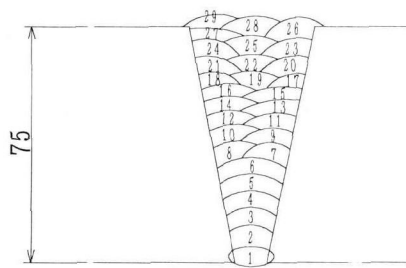


図-2(a) 溶接積層方法(t=75mm)

(2)溶接施工試験結果

①溶接部のマクロ写真

板厚 75mm および 19mm の溶接部のマクロ写真を写真-1(a)(b)にそれぞれ示す。75mm の場合、開先角度は 25° でほぼ板厚中央で左右 2 列に振り分けて行った。これは入熱量の小さい場合である。

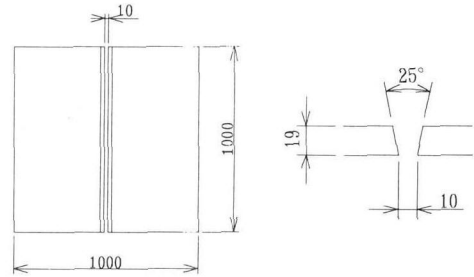


図 1(b) 試験体(t=19mm)

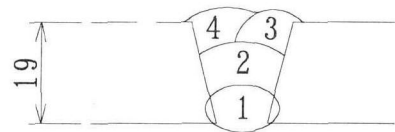


図-2(b) 溶接積層方法(t=19mm)

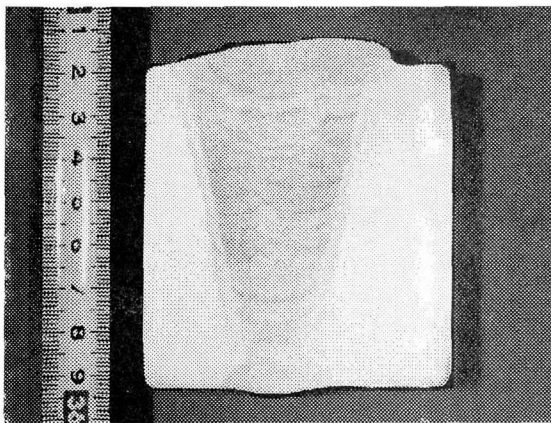


写真-1(a) マクロ試験結果(t=75mm)

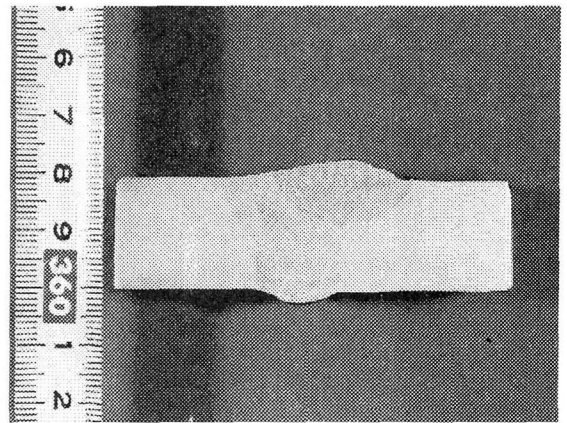


写真-1(b) マクロ試験結果(t=19mm)

表-1 化学成分

Chemical Composition (wt%)													
板厚	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	Ceq
	$\times 10^3$			$\times 10^2$			$\times 10^4$	—	—	—	$\times 10^2$	—	$\times 10^2$
75	7	24	121	16	4		37	23	24		4		40
19	11	28	155	8	2	23	29	—	—	—	3	—	39

表-2 機械的性質

thickness of plate (mm)	yield point (N/mm ²)	tensile strength (N/mm ²)	elongation (%)	C.V.N. (J)
75	572	652	26	276(-5℃)
19	612	675	36	263(-5℃)

表-3 溶接条件

		電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)
t=75	入熱量大	300~360	32~37	8~26	28246~72000
	入熱量小	220~310	28~36	13~28	21214~40688
t=19	入熱量大	300~340	32~36	10~17	43200~57600
	入熱量小	220~290	28~33	13~25	22968~28710

②硬さ分布

板厚 75mm および 19mm の溶接部の硬さ分布を図-3,4 に示す。75mm では、入熱量が小さい場合熱影響部で硬度が高くなった。入熱量が大きくなると硬度分布はなだらかとなる。板厚 19mm の溶接金属の硬度分布はほぼ均一で、溶接金属と熱影響部の境界で少し低くなっている。また、板厚 19mm の場合は 75mm と比較して硬度分布の差は小さくなっている。これは板厚の違いにより冷却速度に差がでるためと考えられる。

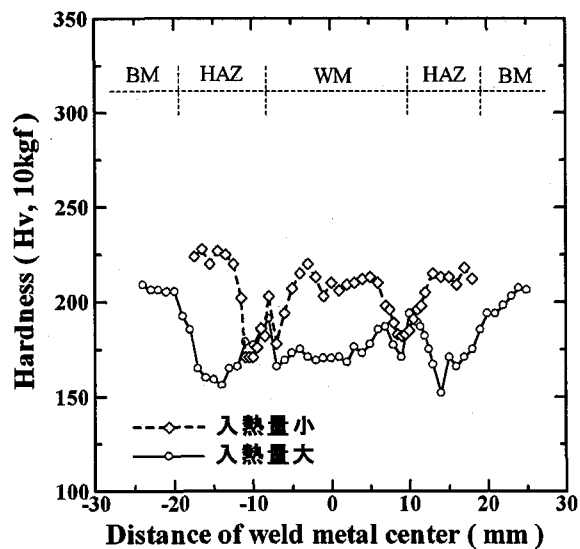


図-3 硬度測定結果(t=75mm,測定位置:板厚中央)

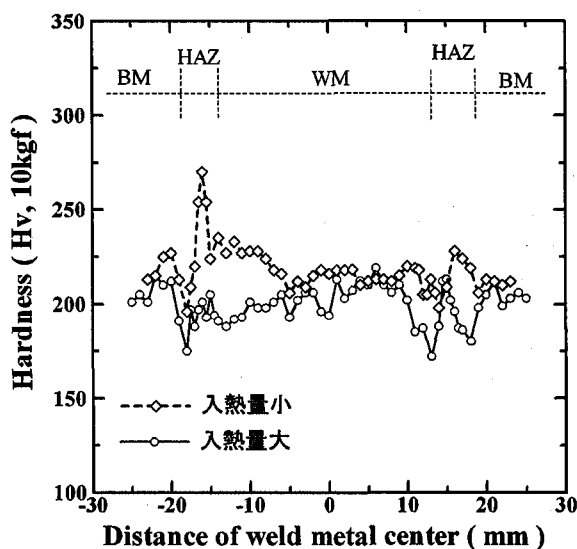


図-4 硬度測定結果(t=19mm,測定位置:板厚中央)

③残留応力分布

X線残留応力測定機で溶接部の残留応力を表面および裏面で測定した。測定結果を図-5 に示す。溶接線直角方向については最終層となる表面で0~250MPaの引張残留応力が認められた。裏面も同程度で、薄板は表裏ほぼ同じ値であったが、厚板では差が見られた。

④超音波探傷試験結果

突合せ溶接部にはほぼ板厚の中央で故意に溶接欠陥を入れた。超音波探傷試験結果を表-4 に示す。薄板の場合

は、探傷角度は 70° で行い、欠陥表示長さは大きめの値であるが、欠陥との対応がとれていた。一方、厚板の場合、探傷角度は 45° と 70° で行った。欠陥の大きさは、多数のブローホールがある場合は対応が難しかった。なお、溶接欠陥を導入した試験片は欠陥等級分類が 1~4 級であった。

薄板と厚板で同様の方法で溶接欠陥を入れたが、厚板の場合溶接が難しくなることによりその溶接欠陥の周りに小さなブローホールが多数発生した。

3. 疲労試験

(1) 疲労試験方法

疲労試験片は図-6に示すように厚板 $t=75\text{mm}$ と薄板 $t=19\text{mm}$ の試験体から切り出した。厚板は応力範囲の低いものは板厚 $t=70\text{mm}$ とし、応力範囲の高いものは板厚 $t=60\text{mm}$ とした。また、薄板から同様にして疲労試験片を切り出し、応力範囲の低いものは板厚 14mm とし、応力範囲の高いものは板厚 $t=10\text{mm}$ とした。疲労試験片は合計 4 種類の形状とした。

試験片は溶接部余盛りを含めて研削加工し、偏心や試験片の曲がりの影響をできる限り小さくなるようにして、疲労き裂が溶接内部に存在する欠陥から発生するようにした。また、チャック部で破断しないように掴み部にかけてテーパを設けている。疲労試験片は① $t=70\text{mm}$ 11 体、② $t=60\text{mm}$ 11 体、③ $t=14\text{mm}$ 11 体、④ $t=10\text{mm}$ 10 体を用いた。

疲労試験は図-7に示すように 100t と 20t の油圧サーボ式疲労試験機を使用して、厚板（板厚 70mm と 60mm ）は応力比 $R=0.05$ および薄板（板厚 14mm と 10mm ）は $R=0.1$ の片振りで行った。繰り返し速度は 10Hz とした。

疲労試験の応力範囲はこれまでの疲労試験データを基にして $\sigma_f=167\sim 196\text{MPa}$ とした。

疲労試験では代表的な試験片について、約 10 万回毎に作用応力範囲を上側半分にして疲労破面にビーチマークが残るようにし、これにより疲労き裂の進展状況を把握した。

(2) 疲労試験結果

① 疲労き裂の発生状況

厚板 $t=70\text{mm}$ の疲労試験片は 11 体の内 7 体破断し、 $t=60\text{mm}$ の疲労試験片は 11 体の内 10 体破断した。一方、薄板 $t=14\text{mm}$ の疲労試験片は 11 体の内 2 体破断し、 $t=10\text{mm}$ の疲労試験片は 10 体の内 8 体破断した。き裂が発生したものはすべて溶接内部の欠陥を起点とし、き裂が進展し表面に達して破断した。200~400 万回載荷しても疲労き裂が発生しないものがあり、これらは超音波探傷試験結果から溶接欠陥は小さいものであったと推定される。疲労試験結果および超音波探傷試験結果を表-4 に示す。

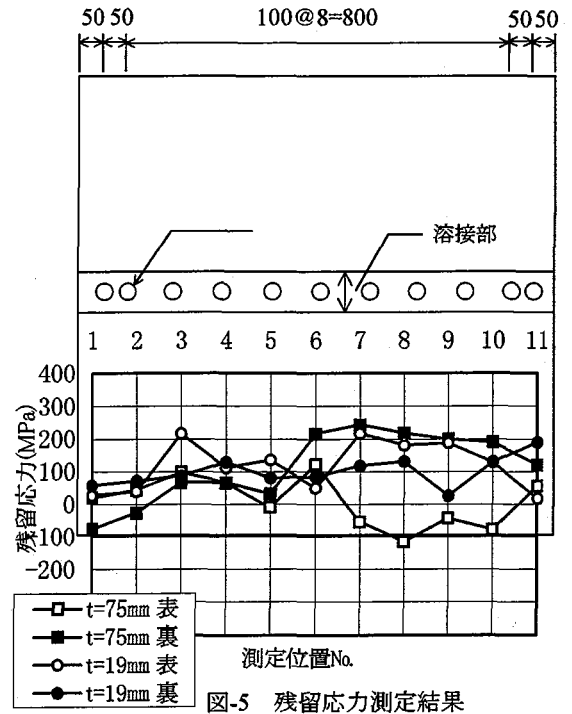


図-5 残留応力測定結果

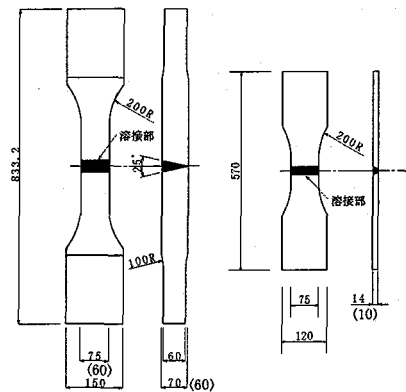


図-6 疲労試験片

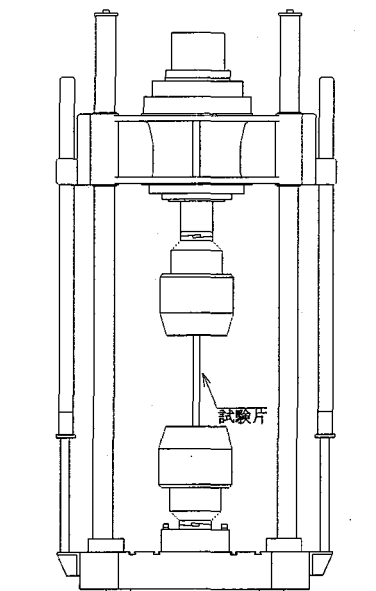


図-7 疲労試験状況

表-4(a) 厚板の疲労試験結果（応力比 0.05）

試験片 No.	板厚 mm	応力範囲 MPa	破断寿命 $N_f \times 10^4$	破面観察			超音波探傷試験結果	
				欠陥 サイズ 高さ×幅 mm	表面から の欠陥の 位置 mm	欠陥の 種類 ^{*2}	45° および 70° ^{*4}	
							欠陥表示長さ mm	分類
70-1	70	167	10	15×40	22	L.F.	—	4
70-2	70	167	110	2.5×6	32	B.H.	10	1
70-3	70	167	>400	破断せず ^{*1}			5	1
70-4	70	167	>400	破断せず ^{*1}			6	1
70-5	70	167	293	2×16	18	S.I.	14	1
70-6	70	167	80	6×24	18	S.I.	27	2
70-7	70	167	243	5×5 6個	23	密集 B.H.	31	4
70-8	70	167	>279	破断せず ^{*1}			6, 4	1
70-8 再 ^{*3}	60	196	396	5×5, 5×6	22	B.H.		
70-10	70	167	>200	破断せず ^{*1}			21	1
70-11	70	167	219	10×4, 8×4	35	B.H.	12, 9	1
60-1	60	196	48	5×25	30	L.F.	29	2
60-2	60	196	>400	破断せず ^{*1}				
60-3	70	167	171	6×10	35	L.F.		
60-4	60	196	128	3×6	30	L.F.		
60-5	60	196	310	7×12	31	B.H.		
60-6	60	196	327	3×8	28	B.H.		
60-7	60	196	230	3×6	32	B.H.		
60-8	60	196	87	8×1	0	Y.K.		
60-9	60	196	53	8×7	44.5	L.F.		
60-10	60	196	82	12×4	21	L.F.		
60-11	60	196	214	12×3	32	L.F.		

*1 未破断のものは欠陥を計測せず

*2 B.H.: ブローホール, S.I.: スラグの巻込み, L.F.: 融合不良, Y.K.: 表面に達した溶接欠陥,

*3 再は未破断の試験片について、試験片寸法を変え応力範囲を高くして再度試験を行った結果を示した。

*4 超音波探傷試験の探傷角度は 45° と 70° を併用した。

表-4(b) 薄板の疲労試験結果（応力比0.1）

試験片 No.	板厚 mm	応力 範囲 MPa	破断寿命 $N_f \times 10^4$	破面観察			超音波探傷試験結果	
				欠陥サイズ 高さ×幅 mm	表面から の欠陥の 位 置 mm	欠陥の 種類 ^{*2}	70°	
							欠陥表示 長さ mm	分類
14-1	14	167	89	4×5, 2×5	3	B.H.	—	4
14-2	14	167	>400	破断せず ^{*1}			—	1
14-3	14	167	>400	破断せず ^{*1}			11	3
14-4	14	167	>400	破断せず ^{*1}			18	3
14-5	14	167	>400	破断せず ^{*1}			7	2
14-6	14	167	>400	破断せず ^{*1}			8	2
14-7	14	167	>400	破断せず ^{*1}			10	3
14-8	14	167	119	4×5, 4×6	3	B.H.	7, 8	3
14-9	14	167	>400	破断せず ^{*1}			17	3
14-10	14	167	>400	破断せず ^{*1}			8	2
14-11	14	167	>400	破断せず ^{*1}			15	2
10-1	10	196	17.2	5×3	4.5	B.H.		
10-2	10	196	23.3	8×8	3.5	L.F.		
10-3	10	196	29.6	5×9	4.8	Y.K.		
10-4	10	196	59.5	2×3	3.5	B.H.		
10-5	10	196	>400	破断せず ^{*1}				
10-6	10	196	374	5×6, 2×2	4	B.H.		
10-7	10	196	>400	破断せず ^{*1}				
10-8	10	196	42.5	4×4	7.0	Y.K.		
10-9	10	196	118	3×5	2.0	Y.K.		
10-10	10	196	29	7×6	3.5	L.F.		

*1 未破断のものは欠陥を計測せず

*2 B.H. : ブローホール, L.F. : 融合不良, Y.K. : 表面に達した溶接欠陥

②疲労破面

1) 厚板 (t=60mm)

写真-2(a)および(b)に示すように、疲労破面に残されたビーチマークから、疲労き裂は溶接欠陥を中心にして円形状に進展し合体して破断に至っている。

2) 薄板 (t=10mm)

疲労破面から疲労き裂は溶接欠陥を中心にして進展して破断に至っている。その状況を写真-2(c)および(d)に示す。

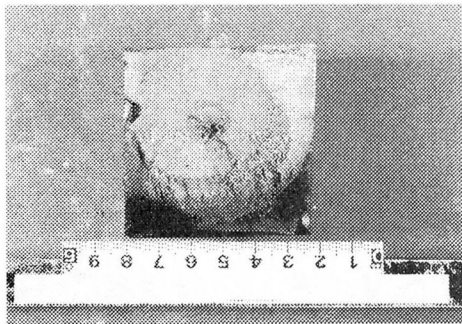


写真-2(a) 疲労破面($\sigma_f=196\text{MPa}$ 、 $N_f=53 \times 10^4$)

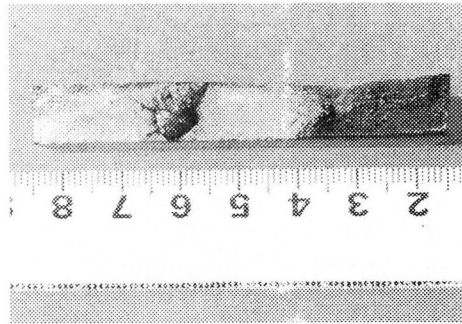


写真-2(c) 疲労破面($\sigma_f=196\text{MPa}$ 、 $N_f=29 \times 10^4$)

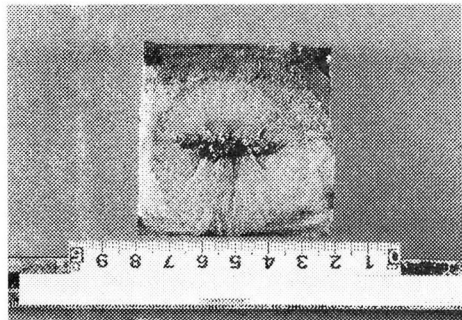


写真-2(b) 疲労破面($\sigma_f=196\text{MPa}$ 、 $N_f=48 \times 10^4$)

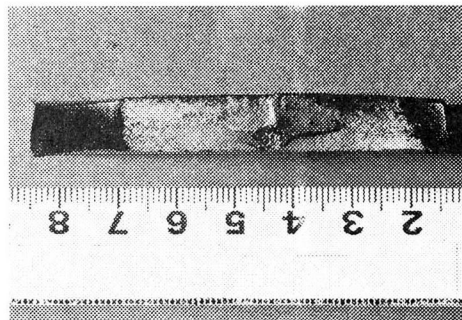


写真-2(d) 疲労破面($\sigma_f=196\text{MPa}$ 、 $N_f=42.5 \times 10^4$)

③疲労強度

1) 厚板 (t=70mmと60mm)

疲労試験を行った結果、作用応力範囲と破断までの繰返し回数を図-8に示す。溶接欠陥は比較的小さなブローホールから大きな欠陥スラグの巻き込みまで様々なものが存在した。疲労強度データはB～F等級まで得られた。40×15mmの大きな溶接欠陥がある場合、JSSCのF等級を下まわる。8×7mmの平面状の融合不良がある場合、JSSCのD等級程度となる。25mmの丸みのある融合不良がある場合も同じくJSSCのD等級程度となる。なお、疲労試験結果より、入熱量の違いによる疲労強度の差は見られなかった。

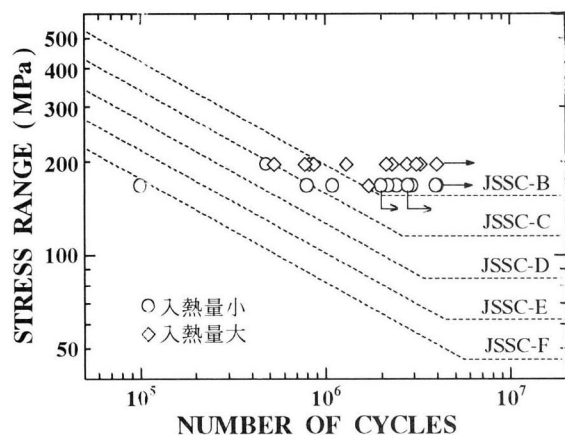


図-8 厚板の疲労試験結果

2) 薄板 (t=14mmと10mm)

疲労試験を行った結果、作用応力範囲と破断までの繰返し回数を図-9に示す。JSSCの継手等級分類でB～E等級の疲労強度データが得られた。溶接欠陥の大きさが4～6mmのブローホールがある場合疲労強度等級はC等級となる。7×8mmの大きな溶接欠陥が表面近くにある場合、JSSCのD等級を下まわる。内部にあると、JSSCのD等級程度となる。

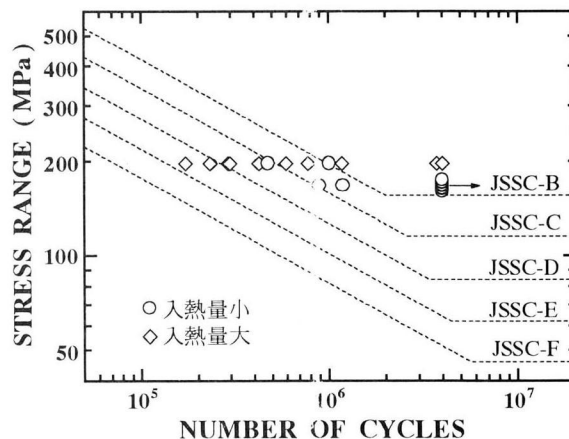


図-9 薄板の疲労試験結果

4. 疲労強度の評価

(1)き裂進展寿命の解析値との比較

①破壊力学による疲労寿命解析

溶接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し、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 は金属材料技術研究所で提案されている式①を用いた。

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

ここで、材料定数は、 $C=1.5 \times 10^{-11}$ 、 $m=2.75$ 、 $\Delta K_{th}=2.9$ (MPa $\sqrt{m}$)を用いた⁵⁾。また、応力拡大係数範囲 ΔK は、次式②で示す。

$$\Delta K = F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \cdot \sigma_r \cdot \sqrt{\pi a} \quad \text{②}$$

ここで、 F_s は自由表面補正係数、 F_e 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 はき裂長である^{7)~9)}。初期き裂長 a_0 から最終き裂長 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①を、そのき裂長区間($a_0 \sim a_f$)で数値積分することにより得られる。

その算定式を式③に示す。

$$N_p = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)} da \quad \text{③}$$

疲労き裂進展に影響を及ぼす因子として、初期き裂長 $a_0=0.2, 1.0, 2.0, 4.0\text{mm}$ を設定し、最終き裂長は a_f =板厚の1/2とした。各補正係数は次のように仮定した。き裂は板厚中央から進展すると仮定し、 F_s を計算した。き裂形状は、 $a/b=2/3$ (ビーチマークを測定した平均値)として F_e を算出した。有限板厚補正係数は $t=14\text{mm}$ として計算した。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、 F_g は1.0とした。

②疲労寿命解析結果

疲労試験結果と疲労寿命解析結果を併せて図-10に示す。解析結果で、板厚 $t=70\text{mm}$ と $t=14\text{mm}$ を比較すると初期き裂長 $a_0=0.2\text{mm}$ の場合はほとんど差が見られないが、 $a_0=4.0\text{mm}$ になると若干差が認められる。解析結果から、1.0mm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100MPaである。疲労試験結果では半径3.0~4.0mm程度の丸みを帯びた欠陥がある場合に相当する。

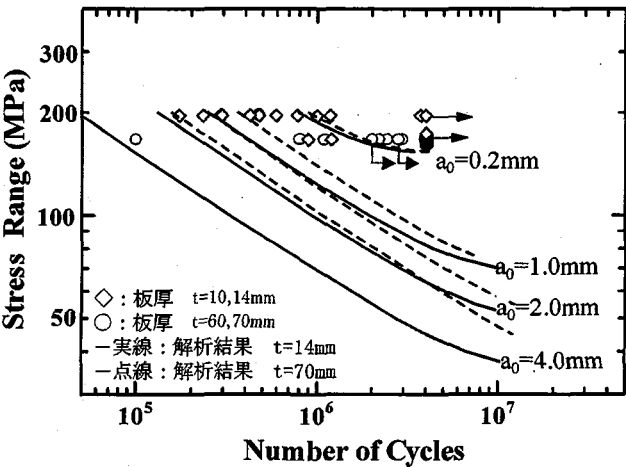


図-10 疲労試験結果と解析値の比較

(2)疲労強度

代表的な疲労破面を写真-3に、そのスケッチを図-11に示す。疲労破面に残されたビーチマークを基にして、き裂の大きさと疲労強度等級の推定値の関係および解析結果と疲労強度等級の関係を表-5に示す。この結果から、破面観察の結果の方が解析の結果よりも少し寿命が長めであるが、安全側で評価すると厚板($t=60 \sim 70\text{mm}$)では欠陥の半径 $a_0=4.0\text{mm}$ の場合、薄板($t=10 \sim 14\text{mm}$)では欠陥の半径 $a_0=3.0\text{mm}$ の場合、突合せ溶接継手の疲労強度は、JSSCの継手強度等級分類のE等級に相当すると考えられる。

表-5 き裂の半径と疲労強度等級

板厚 $t=70\text{mm}$ 欠陥の半径(mm)		板厚 $t=14\text{mm}$ 欠陥の半径(mm)		疲労強度等級
破面観察	解析	破面観察	解析	
9.0	—	5.5	—	F
6.5	4.0	4.0	3.0	E
4.5	2.0	2.5	1.0	D

5. まとめ

鉄道橋において極厚鋼板の接合に現場溶接を適用するため、材質 SM570 の鋼板を用いて、溶接施工を行い、機械的性質および疲労強度を調べた。鋼板は板厚 19mm と 75mm の 2 種類とし、溶接時の入熱量はパスあたり 25000~72000J/cm とした。

疲労試験は溶接部に欠陥を有する試験体を用いて、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き裂進展寿命を計算した。

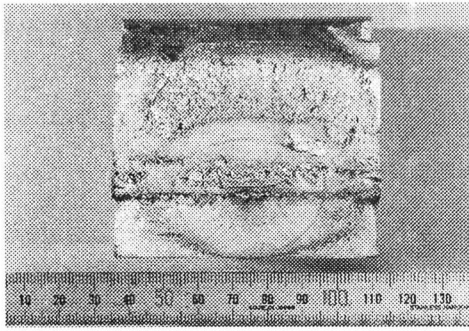


写真-3(a) 疲労破面($\sigma_f=167\text{MPa}$ 、 $N_f=293 \times 10^4$)

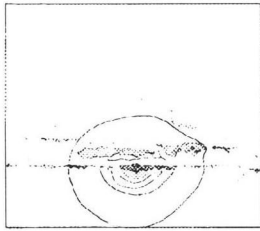


図-10(a) ビーチマークのスケッチ($t=70\text{mm}$)

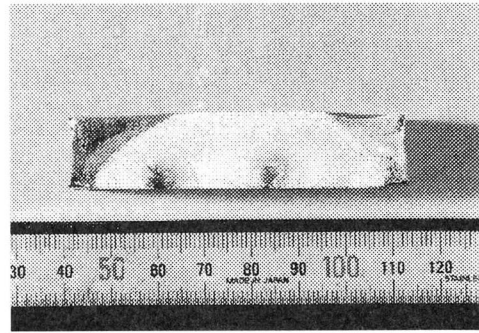


写真-3(b) 疲労破面($\sigma_f=167\text{MPa}$ 、 $N_f=89 \times 10^4$)



図-10(b) ビーチマークのスケッチ($t=14\text{mm}$)

- (1)溶接施工試験を行い、硬さ、表面の溶接線直角方向の残留応力を調べた。その結果、硬さはほとんど差が見られず、残留応力は板厚が厚くなると表面と裏面の差が大きくなる傾向を示した。
- (2)薄板および厚板の溶接部には大小多数の溶接欠陥から疲労き裂を発生させることができ、JSSC の継手等級分類でB～F等級の幅の広い疲労強度データが得られた。
- (3)疲労試験の結果、薄板に比べ厚板の方がき裂の発生数が多い。薄板、厚板とも直径 8mm 程度の融合不良など、比較的大きな欠陥があると、JSSC の継手等級分類の D 等級になった。
- (4)破壊力学による疲労き裂進展寿命解析の結果、板厚が厚くなると疲労寿命は若干長くなり、疲労破面の観察結果と傾向が一致した。
- (5)疲労試験結果および解析結果から、厚板（板厚 60～70mm）の継手では半径 4.0mm 程度の欠陥がある場合、また、薄板（板厚 10～14mm）の継手では半径 3.0mm 程度の欠陥がある場合、JSSC の継手等級分類の E 等級が適当であると考えられる。

謝辞

本研究は日本鉄道建設公団から依頼されたものです。
名古屋大学土木工学科 山田健太郎教授に助言を頂きました。ここに記して感謝いたします。

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、1990.6.
- 2)稲葉紀昭、保坂鐵矢、酒井吉永、山田聡：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、1993.9.
- 3)稲葉紀昭、保坂鐵矢、酒井吉永、山田聡、渡辺昌之：現場溶接継手の疲労強度、構造工学論文集、Vol. 40A、pp. 1243～1253、1994.3.
- 4)保坂鐵矢、酒井吉永、山田聡、福島伸尚：鋼箱試験桁による現場溶接継手の大型疲労試験、構造工学論文集、Vol. 43A、pp.1183～1190、1997.3.
- 5)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、1993.4.
- 6)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準、丸善1992.
- 7)Albrecht,P and Yamada,K : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors、Proc. of ASCE、Vol.103、No.ST2、pp.377-389、Feb.1977.
- 8)Yamada,K. and Agerskov,H. : Fatigue Life Prediction of Welded Joints Using Fracture Mechanics、IIW Doc XII I-1365-90.
- 9)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、1982.3.
- 10)金井卓、三木千壽、Fauzri Fahimuddin、穴見健吾：突合せ溶接継手における許容欠陥寸法の検討、土木学会年次講演概要集 第53回 I-A194 pp.388～389、1998.10.

(199×年×月××日受付)