

鋼箱試験桁による現場溶接継手の大型疲労試験

Fatigue Test on A Full Scale Box Girder with Field Welded Joints

保坂鐵矢* 酒井吉永** 山田聡*** 福島伸尚***
Tetuya HOSAKA Yoshinaga SAKAI Satoshi YAMADA Nobuhisa FUKUSHIMA

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

** 工博 トピー工業(株) 技術研究所 第一研究部 (〒441 愛知県豊橋市明海町一番地)

*** 工修 同上

Field welded joints have some advantage over bolted joints in such requirement as aesthetics and low cost maintenance. Fatigue test results of welded specimens which were simulating the field welding were previously reported.

Additional fatigue test was carried out on a full scale box girder of 10m long with 1m high and 2m wide section. The specimen had field welded joint at the span center and various welded joints which may be associated with the field welded joints were also tested.

KEY WORD : Field welded joint, Fatigue test, box girder

1. はじめに

鋼桁あるいは鋼箱桁の現場継手は、一般に高力ボルト摩擦接合が用いられていたが、溶接技術の進歩に伴い高い安定した品質が確保されることから現場溶接が多く採用されている。鉄道橋においても昭和60年北総線の馬桁や合成桁である市川架道橋、都計道3・4・20架道橋の全断面溶接および山梨リニア実験線のニールセン構造の小形山架道橋、北陸新幹線のSRC桁等には高力ボルトとの併用継手をすでに採用している¹⁾²⁾。

現場溶接は継手の応力伝達性やメンテナンス上の耐久性、そして、鋼材重量の減少等のメリットも多々あり積極的に採用する工法で、現行の手引き³⁾によることとしている。しかし、現場継手は溶接作業環境や溶接技術により品質が左右されるので施工管理体制の確保と現場継手特有の継手強度の規定を定める必要がある。

これまで、長さ5m、桁高3.8m、腹板間隔2.4mの実物大の鋼製箱桁を用いて、溶接姿勢に着目し現場溶接を模した溶接施工試験を行い、溶接による変形や溶接欠陥の発生状況を調べた。そして、この試験桁の着目溶接継手部から試験片を切り出して引張疲労試験を行い、溶接欠陥と疲労強度の関係を求め、突合せ溶接継手の疲労強度をある程度明らかにしてきた⁴⁾⁵⁾。しかし、切り出した試験片は現場溶接による残留応力が除去されることが懸念される。また、実際に現場溶接継手を適用するためには、鋼箱桁にあるような様々な溶接継手の疲労強度を検討する必要がある。そこで、実物に近い鋼箱桁の大型模型を製作して、鋼箱桁部材の現場溶接継手および箱断面にある溶接継手の疲労強度を求めるため、曲げ疲労試験を行って、疲労強度を検討した。

2. 現場溶接継手の疲労の検討箇所

鋼箱桁の現場溶接継手およびその近傍で疲労が問題となる箇所を図-1および表-1の①～⑦に示す。

①は下フランジの突合せ溶接部であり、上向き姿勢で溶接を行う場合、溶接欠陥が生じやすく問題となる。下フランジの幅が広くなると、③のように、縦方向の溶接線と全断面の溶接線が交差する箇所がでてくる。この部分は溶接変形や溶接欠陥が生じやすい。

②はウェブとフランジの溶接線交差部であり、通常、スカラップをあげ、溶接完了後はめ込み板を当ててすみ肉溶接や突合せ溶接で取り付けるため、応力集中が高くなり、溶接欠陥も生じやすい。

④はフランジの現場溶接と交差する縦リブの交差部で、フランジの現場溶接の裏当て材を取り付けるため、スカラップを取る必要があり、この部分に応力集中が生じる。

⑤はダイヤフラムの溶接部である。全断面溶接の近くには溶接変形を防ぐため、ダイヤフラムが取り付けられる。その溶接部やスカラップ部に蓋板を溶接した箇所などは応力集中により疲労強度の低下が予想される。

⑥はダイヤフラムのスカラップ蓋板溶接部は、水等の浸入防止のためのもので、ダイヤフラムを溶接した後で蓋板をすみ肉溶接する。

⑦はダイヤフラムの裏当て金の溶接部であり、片側しか溶接できない場合に用いているディテールである。駒をすみ肉溶接した後、ダイヤフラムを片面からL型開先突合せ溶接した部分であり、駒とダイヤフラムのルートギャップとすみ肉溶接止端部で応力集中が生じる。

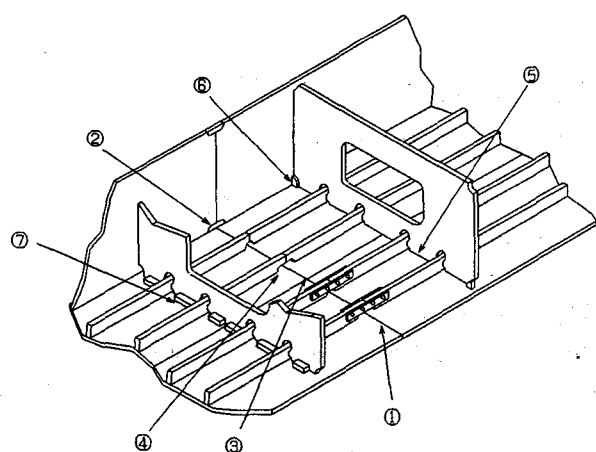
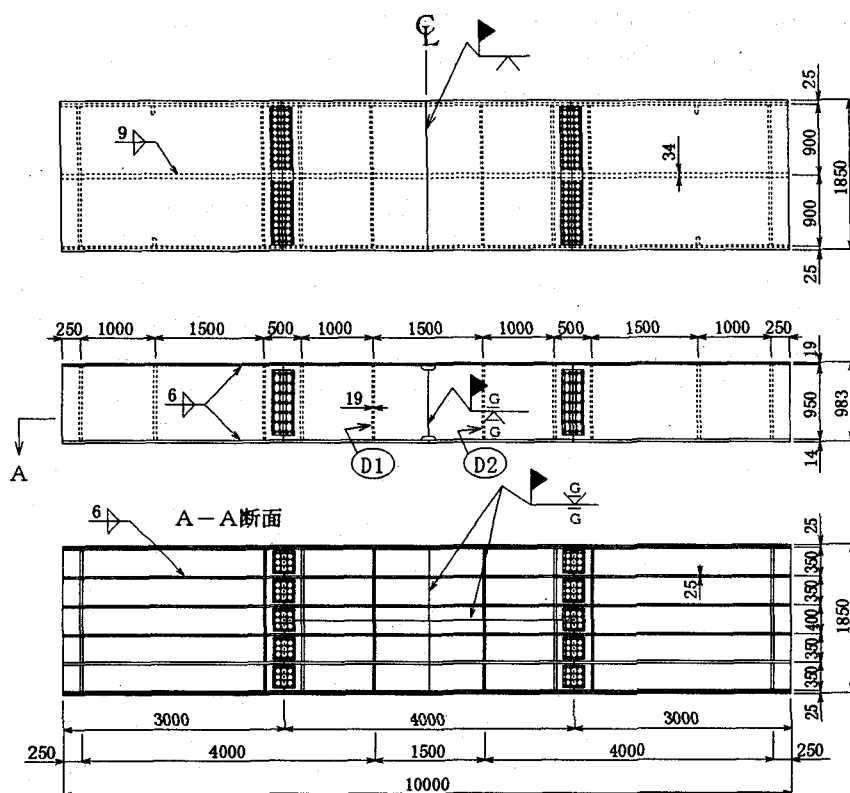


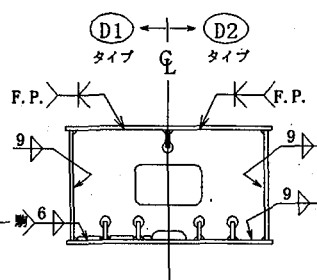
図-1 着目箇所

表-1 着目箇所

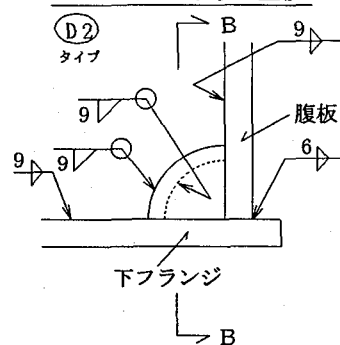
	着目箇所	JSSC 等級分類	備考
現場溶接	① 突合せ溶接 (フラッグ とリブ)	余盛り削除 B 溶接まま D	
	② はめ込み板処理部 (フラッグ とリブ)	未分類	
	③ 溶接線交差部 (下フラッグ)	未分類	
	④ 縦リブのスカップ部	スカップを含む溶接継手 G	現場溶接と HTB
その他	⑤ ダイヤフラムの溶接部	荷重非伝達型 非仕上げすみ肉 E	
	⑥ ダイヤフラムのスカップ蓋板溶接部	荷重非伝達型 非仕上げすみ肉 E	
	⑦ ダイヤフラムの駒の溶接部 (止端部)	荷重非伝達型 非仕上げすみ肉 E	



載荷位置ダイヤフラム詳細

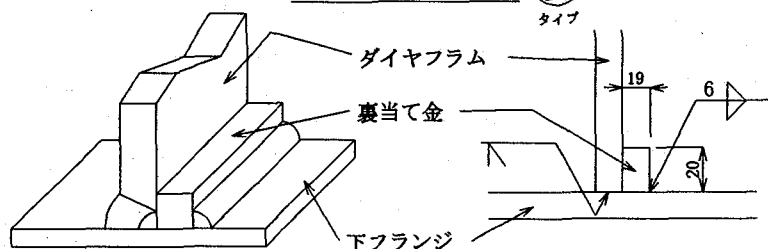


Dia のスカップ蓋板



Dia の駒溶接部

①
タイプ



B-B断面

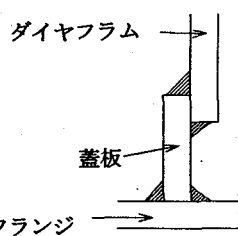


図-2 試験桁詳細

3. 試験桁の溶接施工

3.1 試験桁

試験桁は図-2 のようにスパン 9500mm、ウェブ間隔 1800mm、ウェブ高 950mm の箱断面とする。板厚は、下フランジが 14mm、ウェブが 12mm、上フランジが 19mm である。下フランジには板厚 14mm 高さ 120mm の縦リブを 4 本取り付け。

試験桁は 4 ブロックで構成し、中央の 2 ブロックを試験ブロックとする。長さ 4m の試験ブロックの中央に全断面現場溶接継手を設け、さらに、下フランジには中央部に縦方向の現場溶接継手がある。試験ブロックに使用した鋼材は SM490Y である。

3.2 現場溶接施工

(1) 組立方法

試験ブロックは拘束治具および縦リブの添接部を利用して組立てた。

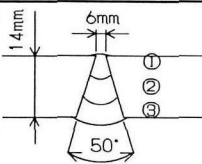
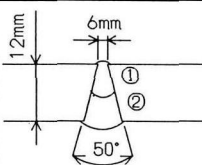
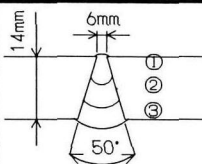
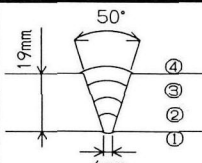
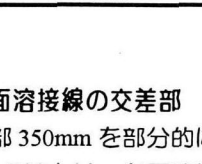
製作精度としては、現場溶接部の開先角度、目違い、ルート間隔を拘束した位置で計測し、目標許容値内に入っていることを確認して溶接施工を行った。

(2) 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。本試験は溶接姿勢に着目したので、写真-1 に示すように工場内で高さ 120cm の作業架上で溶接施工を行った。

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。ただし、はめ込み板処理部は半自動溶接で行った。表-2 に各溶接線の溶接方法および姿勢を示す。

表-2 溶接方法および溶接姿勢

	溶接箇所	溶接方法	姿勢		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)	開先・積層方法
縦 方 向	下フランジ	MAG 片面 自動溶接	上向	①	180	20	11	19,636	
				②	240	27	13	29,908	
				③	240	28	11	36,655	
全 断 面	ウェブ1	CO ₂ 片面 自動溶接	立向	①	160	22	5	42,240	
				②	160	24	8	28,800	
	ウェブ2	CO ₂ 片面 自動溶接	立向	①	160	24	5	46,080	
				②	180	28	6.5	46,523	
断 面	下フランジ	MAG 片面 自動溶接	上向	①	185	20	10	22,200	
				②	210	28	15	23,520	
				③	200	28	10	33,600	
面	上フランジ	CO ₂ 片面 自動溶接	下向	④	300	38	20	34,200	
				③	300	37	21	31,714	
				②	270	34	23	23,948	
				①	210	30	12	31,500	

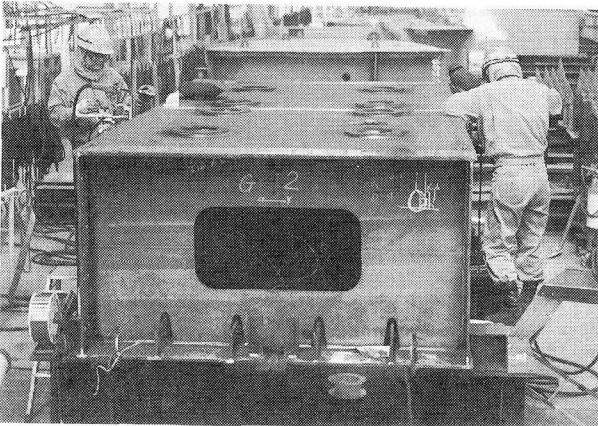


写真-1 溶接状況

(3) 溶接線交差部

a) 下フランジ縦方向溶接線と全断面溶接線の交差部

① 図-3 に示すように、まず、交差部 350mm を部分的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り、比較的溶接欠陥が生じにくい方法である。自動溶接の始末端部をこの溶接上に盛り上げて溶接後に盛り上げた部分を取り除くものである。これによって、開先を固定し精度を保つことができる。

② その後、縦方向溶接を行う。

③ 開先をガウジングで取り、全断面溶接をする。

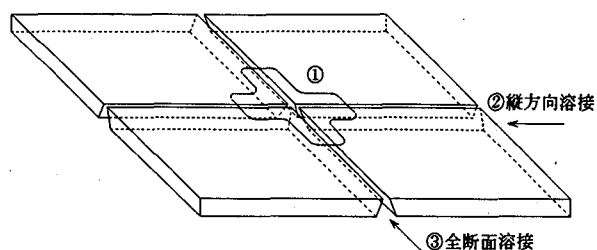


図-3 下フランジ溶接線の交差部

b) ウェブとフランジの全断面溶接線の交差部の溶接

- ① 図-4 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 ウェブを溶接した後、スカラップにはめ込み板を当て、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。

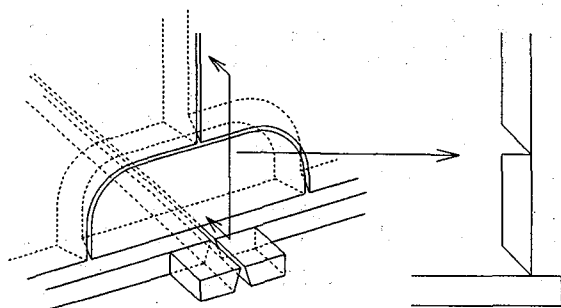


図-4 ウェブとフランジの溶接部

(4) 縦リブの現場継手

下フランジの縦リブの現場継手部の詳細を図-5 に示す。縦リブは板厚 14mm、高さ 120mm とする。縦リブの現場継手は、溶接で取り付ける場合と高力ボルトで取り付ける場合の 2 種類を作成し、継手強度を比較することとした。さらに、スカラップは半径 35mm で、長さが 80mm と 150mm の 2 種類の比較を行う。

縦リブの現場溶接継手はスカラップを設け、V 開先とし完全溶け込み溶接を行った後にグラインダで余盛りを仕上げた。縦リブと下フランジは、すみ肉溶接を行い、スカラップの仕口部は、不等脚溶接サイズとして溶接止端部を $R=20\text{mm}$ に滑らかに仕上げた。

4. 現場溶接部の非破壊試験

4.1 非破壊試験方法

現場溶接終了後、内部欠陥の発生状況を調べるため、非破壊試験を行った。非破壊試験は放射線透過試験とした。放射線透過試験は JIS Z 3104 にしたがひ、下フランジの全断面溶接線 1.85m、縦方向溶接線 4m、ウェブ 1.9m 及びはめ込み板処理部 4 箇所を行った。

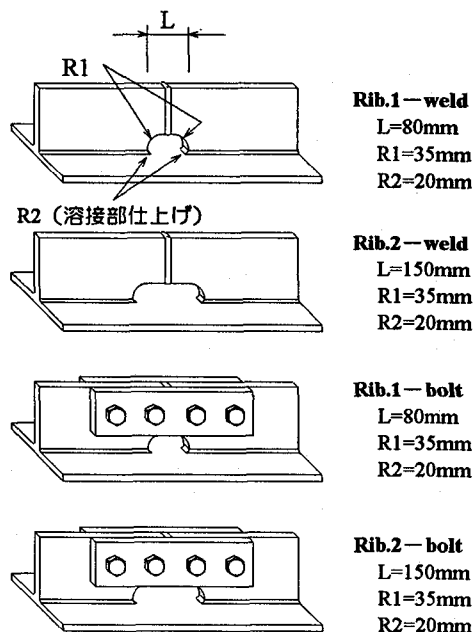


図-5 縦リブの詳細

4.2 放射線透過試験結果

放射線透過試験結果を図-6 および表-3 に示す。下向き姿勢で行った上フランジの溶接部はほとんど欠陥は見られなかった。立向き、上向き姿勢で溶接したウェブと下フランジおよびウェブのスカラップにはめ込み板を溶接した部分で溶接欠陥が存在した。

発生した欠陥の種類と大きさを見ると、上フランジではブローホール (1.7mm) 1 個、下フランジでは融合不良 (長さ 3.0mm) 2 箇所、スラグ巻き込み (長さ 6.8mm) 1 箇所、パイプ (長さ 9.0mm) 1 箇所、ブローホール (最大 6.0mm) 9 箇所、ウェブ 1 (はめ込み板処理部) ではブローホール (1.8mm) 1 個、ウェブ 2 では、欠陥無しであった。これらの欠陥は補修を行わず、そのまま疲労試験を行った。このほかに、いくつかの 1mm 以下の微細な融合不良が見られた。

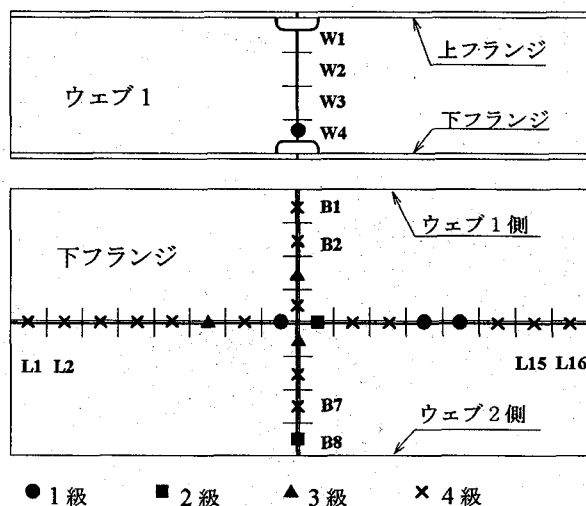


図-6 放射線透過試験結果

表-3 放射線透過試験結果

		撮影位置	等級分類 (JIS Z 3104)						等級	欠陥の種類	
			一種			二種					
			大きさ (mm)	点数	等級	長さ (mm)	等級				
上フランジ		U1	1.7	2	1				1級	BH	
下 フ ラ ン ジ	縦 方 向 溶 接 線	L1	6.0	10	3	9.0	4	4級	LF		
		L2					4	4級	LF		
		L3					4	4級	LF		
		L4					4	4級	LF		
		L5					4	4級	LF		
		L6					4	3級	BH		
		L7					4	4級	P		
		L8					1.0×2	2	1	1級	BH
		L9					3.0	3	2	2級	BH
		L10								4	4級
		L11				4	4級	LF			
		L12	1.0	1	1	1級	BH				
		L13	1.0	1	1	1級	BH				
		L14				4	4級	LF			
		L15				4	4級	LF			
		L16				4	4級	LF			
シ	全 断 面 溶 接 線	B1					4	4級	LF		
		B2	3.0×2 5.0,1.8	4	4級	LF					
		B3		3	3級	LF					
		B4		4	4級	LF					
		B5		3	3級	SI					
		B6		4	4級	LF					
		B7		4	4級	LF					
		B8		2	2級	BH					
ウェブ1		W4		1.8	2	1			1級	BH	
ウェブ2								1級			

5. 疲労試験

5.1 疲労試験方法

現場を想定して溶接施工試験した試験桁を用いて、疲労試験を行った。疲労試験は写真-2 および図-7 に示すように、容量 2MN の油圧サーボ式構造物疲労試験機（巴技研製）を用いて、4 点曲げ载荷を行った。

疲労試験荷重は、等曲げ区間の下フランジの最大応力範囲 σ_r が 100MPa とした。応力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.05$ の片振りで繰返し速度は 0.8Hz である。き裂の発生状況や進展状況を観察するため、50 万回毎に最大応力 $\sigma_{\max}$ は一定で応力範囲を半分にしてピーチマークをいれた。なお、疲労試験前に試験桁の各部に作用する応力をひずみゲージを用いて計測した。

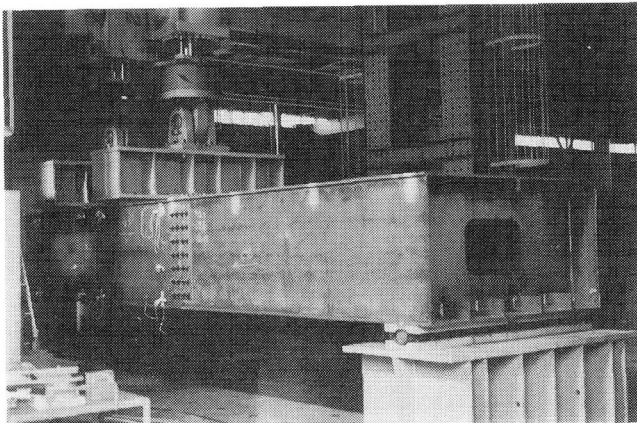


写真-2 疲労試験状況

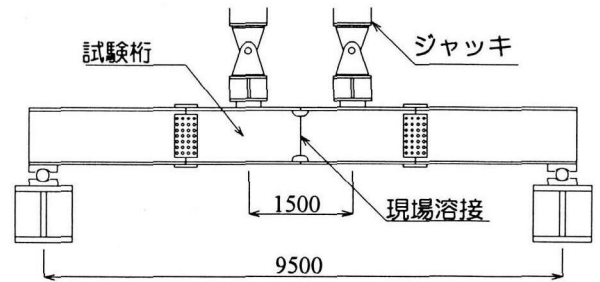


図-7 载荷状況概略

5.2 疲労き裂発生位置と進展状況

き裂の発生位置を図-8 に示す。

(1) ダイヤフラムのスカラップ蓋板溶接部 ⑥

104 万回繰返し载荷によって、疲労き裂はダイヤフラムのスカラップに蓋板をまわすみ肉溶接した部分の溶接止端部で発生した。き裂は下フランジとウェブを作用応力と直角に切断する方向に進展した。さらに、繰返し回数が 128 万回の時にもう一方の角部の蓋板溶接部にき裂が発生した。

(2) ダイヤフラムの裏当て金の溶接止端部 ⑦

148 万回繰返し载荷した後にダイヤフラムの裏当て金の溶接部止端部にき裂が発生した。さらに、繰返し数が 203 万回に達したときにもう一箇所ダイヤフラムの裏当て金の溶接部止端部にき裂が発生した。この部分はダイヤフラムと裏当て金の 2 枚の板が接してルート部ができ、その反対側がすみ肉溶接されている。

(3) 縦リブのスカラップ部 ④

縦リブのスカラップ部の溶接止端部および縦リブのスカラップ中央現場溶接部の表層近くの溶接欠陥からき裂が発生した。

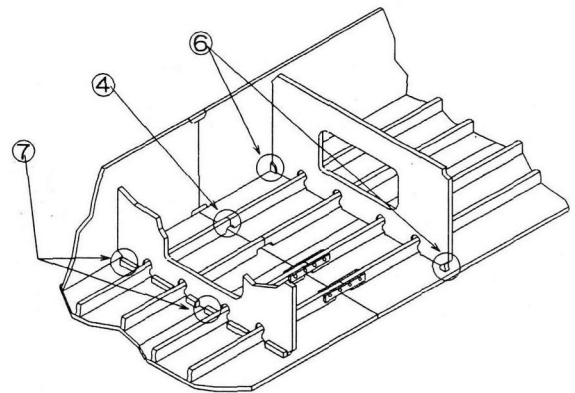


図-8 き裂発生位置

5.3 疲労強度

疲労試験で今回着目した鋼箱桁の現場溶接継手およびその近傍にある様々な溶接継手の疲労強度について検討した。ウェブおよびフランジの突合せ溶接継手、ダイヤ

フラムの溶接部および縦リブの溶接部の疲労強度をJSSCの疲労設計指針の継手等級分類と比較して評価を行った。疲労き裂が発生した部位の作用応力範囲および発生までの繰返し回数を表-4に示す。応力範囲は断面の公称応力で評価した。

表-4 疲労試験結果

	き裂発生位置	繰返し数 N	応力範囲 σ_r (MPa)
ダイヤ フラム	スカラップ	1,042,000	100
	蓋板溶接部	1,280,000	
	裏当て金溶接部	1,458,000	
	(止端部)	2,036,000	
縦リブ	スカラップ Rib.1-weld	1,280,000	

(1) ダイヤフラムのスカラップ蓋板溶接部⑥

ダイヤフラムのスカラップに蓋板をまわしすみ肉溶接した部分の溶接止端部の疲労試験結果を図-9に示す。また、き裂発生状況を写真-3に示す。この部分はダイヤフラムのスカラップに蓋板が溶接されており、残留応力、応力集中などが懸念される。疲労強度はE等級を若干上回った。

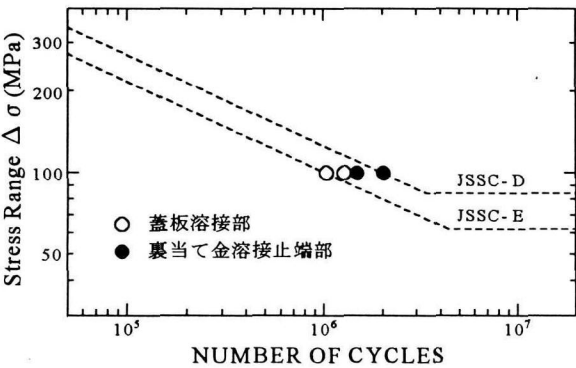


図-9 疲労試験結果 (ダイヤフラム部)

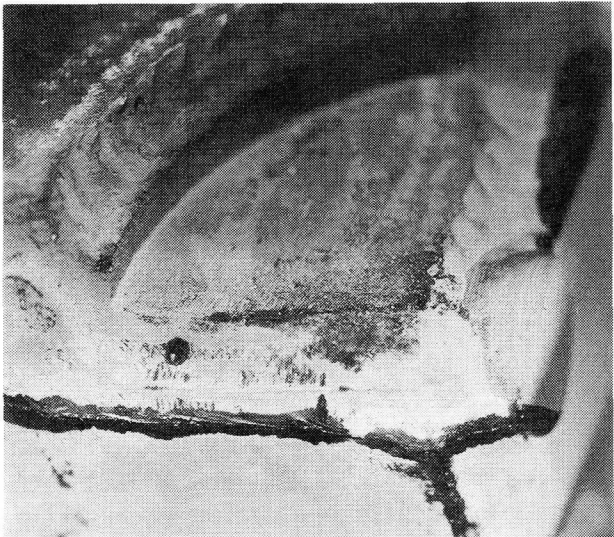


写真-3 疲労き裂 (ダイヤフラムの蓋板部)

(2) ダイヤフラムの裏当て金の溶接止端部 ⑦

ダイヤフラムの裏当て金の溶接部止端部の疲労試験結果を図-9に示す。また、き裂発生状況を写真-4に示す。この部分はダイヤフラムと裏当て金の2枚の板が溶接されており、疲労強度はE等級程度であった。

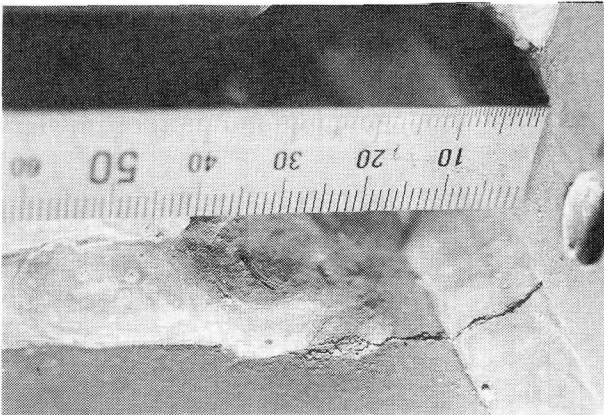


写真-4 疲労き裂 (ダイヤフラムの裏当て金溶接部)

(3) 縦リブのスカラップ部 ④

縦リブのスカラップ部の疲労試験結果を図-10に示す。また、き裂発生状況を写真-5に示す。この部分は溶接止端部をR=20mmに仕上っている。継手等級分類は止端を仕上げていない場合G等級である。今回の試験結果はこれよりも1ランク上であるF等級を満足した。

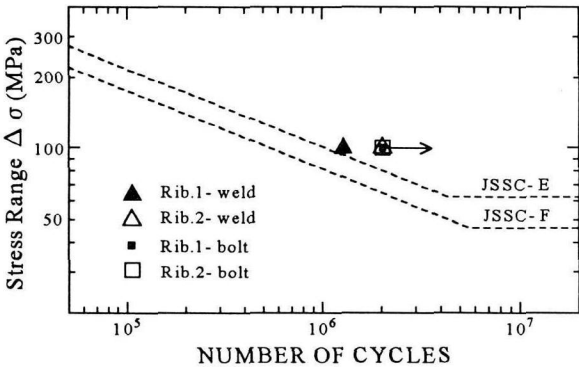


図-10 疲労試験結果 (縦リブ部)

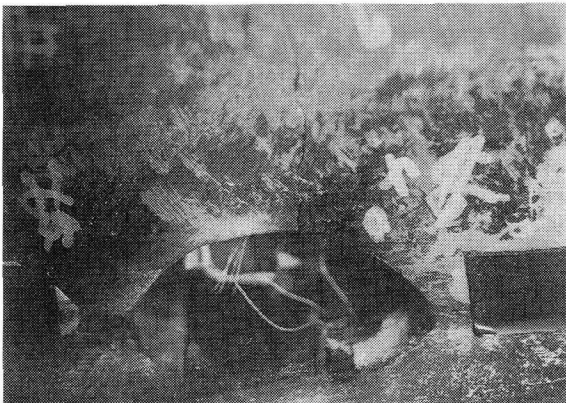


写真-5 疲労き裂 (縦リブの現場継手)

(4) ウェブとフランジの現場溶接継手

ウェブと上フランジの現場溶接継手には、全断面溶接線、下フランジには全断面溶接線と縦方向溶接線を設けた。継手形式は突合せ溶接、溶接線交差部およびはめ込み板処理部である。これらの部分の疲労試験結果を図-11に示す。作用応力範囲 $\sigma_r=100\text{MPa}$ （はめ込み板処理部は $\sigma_r=95\text{MPa}$ ）で204万回繰返し载荷したが、疲労き裂は発生しなかった。

今回発生した溶接欠陥の大きさや種類についてみると、突合せ溶接継手部には1.6mmのブローホール、縦方向溶接継手部には6.0mmのブローホール、溶接線交差部には9.0mmのパイプ、3.0mmのブローホール、5.0mmのスラグ巻き込み、はめ込み板処理部には1.8mmのブローホールがあった。図-12に5mm以上の大きな欠陥を示す。これらの溶接欠陥は、応力方向に平行なものと球状に近い形であるため、疲労強度は高めであったと考えられる。

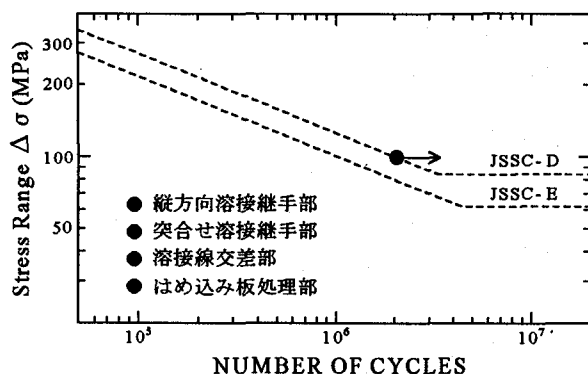


図-11 疲労試験結果

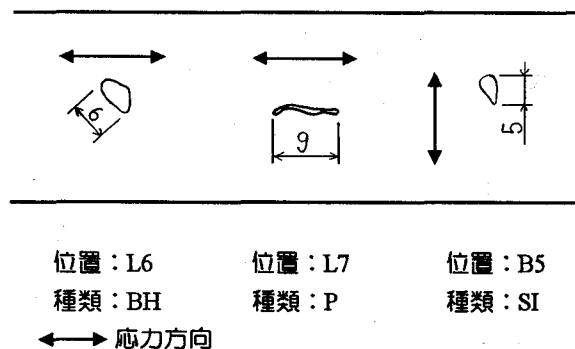


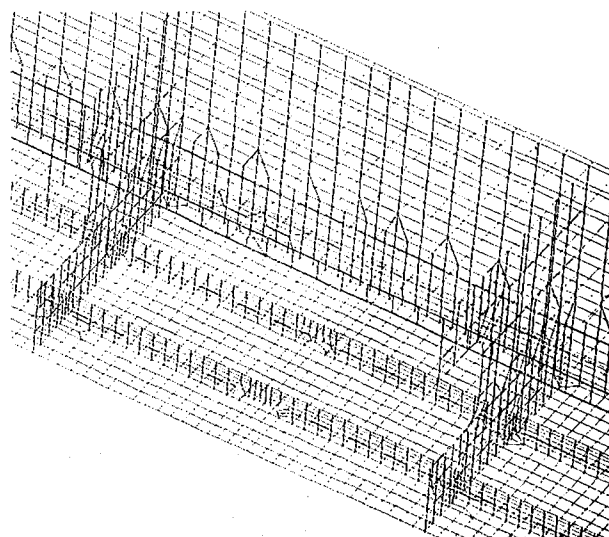
図-12 溶接欠陥の形状

6. 縦リブのスカルップ部の応力

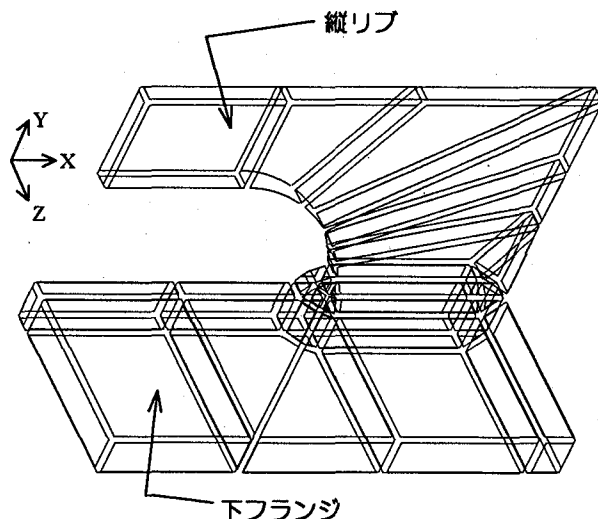
縦リブのスカルップ部に作用する応力を調べるため、FEM解析および溶接止端部にひずみゲージを貼り付け、応力を測定した。FEM解析には汎用有限要素法プログラムI-DEASを用いた。解析モデルを図-13に示す。解析モデルは試験体の縦断面を対称とした1/2モデルとした。なお、最小メッシュサイズは3.5mmとした。縦リブのスカルップ部近傍には立体要素を用い、その他の部分は板要素を用いた。板要素と立体要素は剛結で接合した。

解析結果およびひずみゲージによる計測結果を図-14に示す。ひずみゲージは縦リブスカルップの溶接止端部から4mm、10mmの位置に貼付した。解析結果およびひずみゲージによる計測結果より縦リブのスカルップの長い方が応力集中が低くなることが解った。また、解析結果は測定値よりも低い値となった。スカルップの短い方の測定値では200MPaを超える応力になっているが、解析値では140MPa程度となっている。これは、溶接の影響を解析モデルにうまく取り入れられなかったためと思われる。

今回の試験のようなせん断力が作用しない純曲げの場合、疲労試験結果からもスカルップの長い方が疲労強度上好ましいことが解った。一方、ウェブ等のスカルップでは、せん断力によりスカルップ長さが小さいほど、溶接止端部の応力集中が高くなる。そのため、疲労強度評価に曲げモーメントとせん断力の考慮が必要であることが示されている¹⁰⁾。

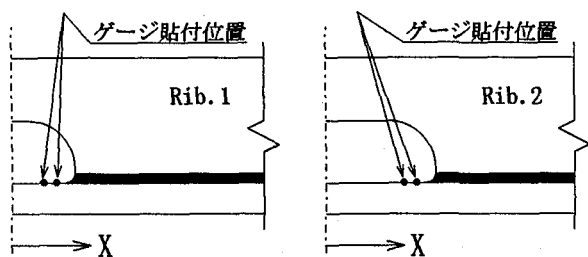


(a) 桁中央部（縦リブ部）



(b) スカルップ部（立体要素）

図-13 解析モデル



ゲージ貼付は溶接止端部から4 mm, 10 mm の位置

図 14(a) 縦リブスカラップ部ゲージ添付位置

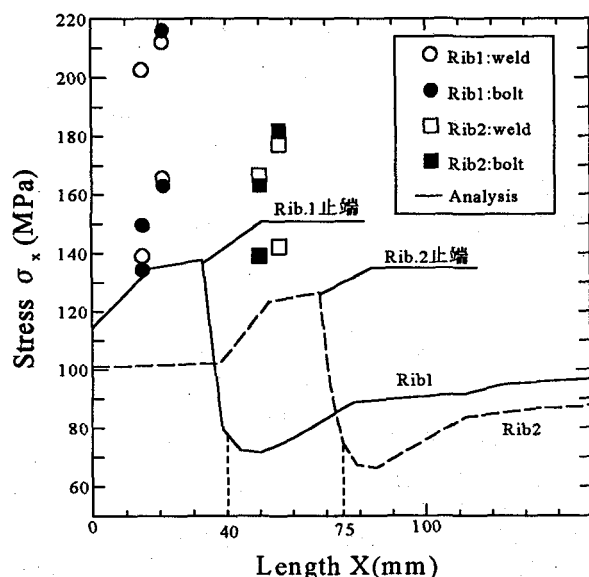


図-14(b) 縦リブスカラップ部の応力

7. まとめ

鋼鉄道橋の現場溶接継手の疲労強度を評価するため、長さ 10000mm、桁高 983mm、腹板間隔 1800mm の箱断面桁を用いて、4点曲げ疲労試験を行った。溶接施工試験および疲労試験をまとめると以下のようになる。

- 1) 現場溶接継手に生じた溶接欠陥は立向き、上向き溶接姿勢で行ったウェブと下フランジで多数発生した。また、ウェブのスカラップにはめ込み板を溶接した部分でも溶接欠陥が発生していたが、これらの欠陥は丸みを帯びたものであった。
- 2) 1)の現場溶接継手では作用応力範囲 $\sigma_r = 100\text{MPa}$ 、204 万回の繰返し載荷によって疲労き裂は発生しなかった。
- 3) ダイヤフラムの下端に裏当て金を溶接した部分とスカラップに蓋板を溶接した部分に 4 力所き裂が発生した。疲労き裂の発生位置は下フランジ側の溶接止端部であった。スカラップに蓋板をまわすすみ肉溶接した部分は最も疲労強度が低く、その疲労強度はほぼ JSSC の継手等級分類の E 等級であり設計上は F 等級にする必要がある。
- 4) 箱桁フランジの縦リブのスカラップ部溶接止端部に生じる応力集中を計測した結果と応力解析結果はともにスカラップの長さが長い方が応力集中率が低くなった。

また、解析値よりも測定値の方が高い値となった。計測値では、縦リブの接合方法が高力ボルトと溶接との差は見られなかった。

5) 縦リブのスカラップ部の疲労強度は F 等級を満足した。4 種類の縦リブ構造のうちスカラップの長さが短く縦リブを突合せ溶接したものからき裂が発生した。き裂の発生位置はスカラップの溶接止端部と縦リブの突合せ溶接部であった。従って、箱桁の縦リブのようにせん断力の作用しない場合、応力集中の計測および解析結果からもスカラップの長い方が疲労強度上好ましい。また、疲労き裂の発生および進展状況から縦リブは高力ボルト接合の方が良いと考えられる。

謝辞

本研究は日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局から依頼されたものです。日本鉄道建設公団 設計技術室の稲葉室長(現 株式会社 東京鐵骨橋梁製作所)に指導して頂きました。また、名古屋大学 山田教授に助言を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 奥田庸、佐藤哲也、八巻康博、井関治郎、佐々木秀弥：北総線、都計道 3.4.20 架道橋の設計と施工、橋梁と基礎 pp.13~22 1990.12
- 2) 谷相理嗣、井口光雄、坂井収、江口真澄：現場溶接の鋼鉄道橋への適用(その2)、土木学会年次講演概要集 第 45 回 pp.647~645 1990.9
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準、1992.
- 4) 日本鉄道建設公団：鋼鉄道橋現場溶接施工の手引、1990.6.
- 5) 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.
- 6) 保坂鐵矢、木下哲朗、原田広紀、渡辺昌之：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, 1993.9.
- 7) 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.
- 8) 日本鉄道建設公団：鋼箱桁現場溶接模型試験報告書、1993.1.
- 9) 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.
- 10) 三木千壽、館石和雄、石原謙治、梶本勝也：溶接構造物材のスカラップディテールの疲労強度、土木学会論文集、No.483/I-26、pp.79-86, 1994.1.

(1996 年 9 月 6 日受付)