

## 仮付け溶接の長さとしール・クラックの発生について

## ON THE MINIMUM LENGTH OF FILLET WELDS AND HEEL CRACKING

三木千寿\*・中村勝樹\*\*・遠藤秀臣\*\*\*・等農克巳\*\*\*\*

By Chitoshi MIKI, Katsuki NAKAMURA, Hideomi ENDO and Katsumi TOHNO

The requirement of the minimum length of tack welds is specified to prevent the occurrence of heel cracking from the root of fillet welds. Heel crackings in the fillet welds of many 500 MPa class steels with different chemical compositions are studied experimentally by using a T-shaped cracking method with various weld lengths, leg lengths, electrodes, temperatures, restrains and plate thicknesses. The level of carbon equivalent is the governing factor for the occurrence of heel cracking and the length of welds is not a dominant factor.

Keywords: fillet weld, heel cracking, tack weld

## 1. はじめに

現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>鋼橋編第15章の3.3.(6)仮付け溶接では「仮付け溶接の長さは80mm以上とし、すみ肉脚長は4mm以上とする」と規定されている。しかし鋼橋部材のディテールによっては短い仮付け溶接しかできない箇所あるいは仮付け溶接長を短くしたい箇所がある。短い仮付け溶接しかできない箇所としてはたとえば図-1に示すように組立て部材で短い接合部を一部有する部材や小物類の取付けが挙げられる。本溶接の長さが少なくとも140mm程度ないと80mmの仮付け溶接長を確保できない。また仮付け長を短くしたい箇所の例としては取り付けあるいは取り付けられる部材が薄く仮付け溶接によりひずみが発生する場合や、垂直補剛材等仕上がり溶接外観を考えると仮付け溶接が短い方が作業性が良い場合がある。さらに溶接部のギャップがなく非常に良い精度で組み立てられている場合などに、仮付け溶接長を状況に応じて柔軟性をもたせられないかとの要求もある。

仮付け溶接長80mm以上の規定は昭和48年に制定されており、それまでは40mm以上であった。解説によると、「最近の研究で50キロ級鋼のT継手にショートビードのすみ肉溶接を行った場合、ルートからボンドに沿って割れが発生しやすく、ビード長を80mm以上とすればそれがとまることが明らかにされた」ことによるとされている。この最近の研究とは木原らによるヒールクラックに関するものをさしている<sup>2)-4)</sup>。ヒール・クラックは仮付け溶接のような溶接長の短い初層隅肉溶接部に発生しやすい割れとして知られている。割れはT継手の初層隅肉溶接において、フランジ側(下板)のルート部より発生し、ボンドのごく近傍のHAZ部に沿ってビードを剝離するように進展する。隅肉溶接部を足に例えると“かかと(heel)”に相当しているため、このように名付けられている。木原らは従来の割れ試験では再現が困難であった冷間割れの一種であるヒール・クラックに対して新たな割れ試験体および試験方法を開発し、それによって割れ感受性を検討している<sup>2)-4)</sup>。溶接長が長くなれば割れなくなるのは、溶接部の冷却時間が特に低温領域において長くなり、水素拡散に有効に作用したためと考えられる。

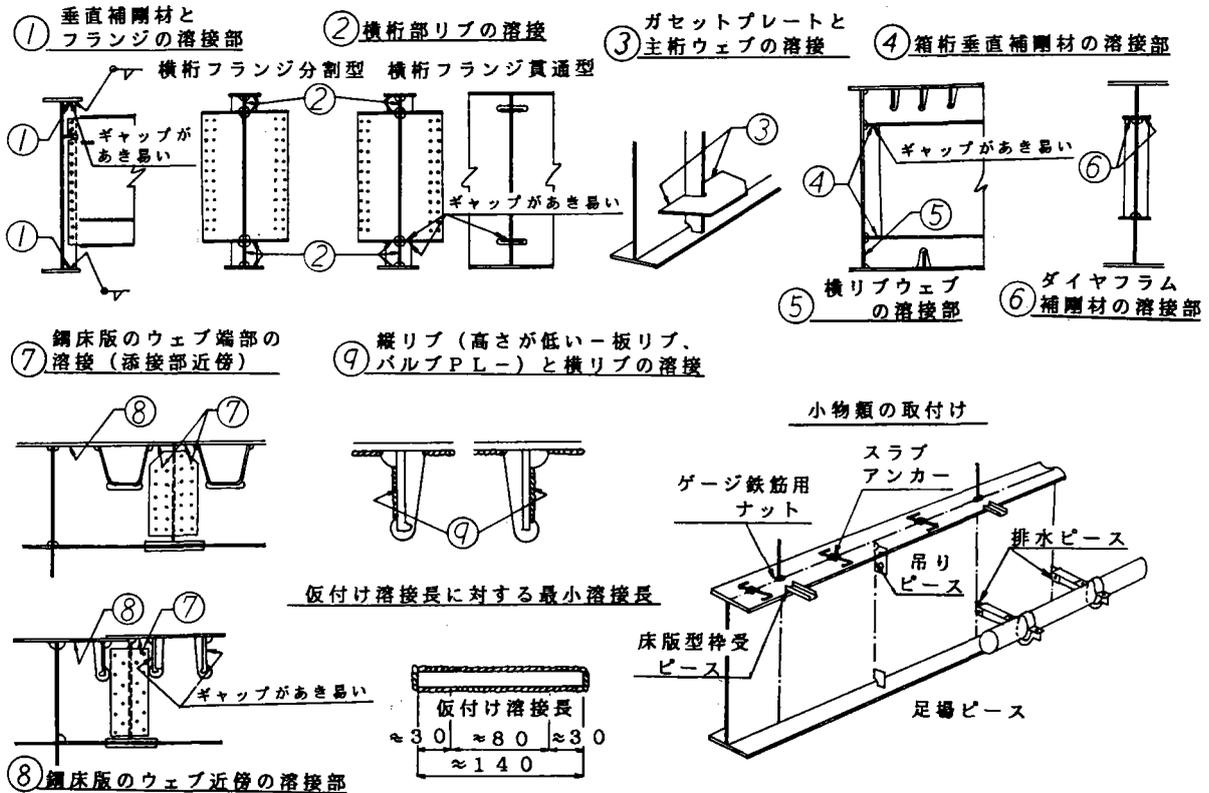
仮付け溶接長の制約の緩和は鋼構造物製作の合理化、省力化につながることであり<sup>5),6)</sup>、本研究はヒール・ク

\* 正会員 工博 東京工業大学助教授  
(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

\*\* 駒井鉄工所取締役(〒110 台東区上野1-19-10)

\*\*\* 桜田機械工業技術部次長(〒272-01 市川市二俣新町21)

\*\*\*\* NKK 応用技術研究所(〒514-03 津市雲出鋼管町1)



図一 80 mm の仮付け溶接が困難な箇所の例

ラックの発生に着目して、その可能性を検討しようとするものである。ヒール・クラックの試験は木原らにより提案された方法によるが、溶接時の温度、ルートギャップ、拘束、板厚の組合せについては鋼橋での条件に合わせて設定している。

## 2. 試験方法

### (1) 試験体

試験体の形状・寸法を図-2に示す。非拘束型（拘束なし）と拘束型（試験ビードの裏側に事前に拘束ビードを置く）の2種類の試験体としている。非拘束型はいわゆる木原らによるヒール・クラック試験方法<sup>2)</sup>に準じた試験体である。試験体の組立てについては、ギャップ量を一定に設定することが重要であり、ウェブの端面を機械加工して組立て精度を保持するようにした。なお、試験溶接部近傍は組立て前に軽くグラインダ処理してプライマーを除去した。

従来のヒール・クラック試験の結果ではフランジとウェブのギャップが0.6~1.0 mmの場合に割れやすいことにより、標準試験体では0.6 mmとされている。ここでは道路橋示方書の隅肉溶接のルートギャップに対する最大許容量である、1.0 mmを中心として実験を行った。またギャップを0.6 mmとした実験も実施した。

対象とした仮付け溶接長と割れ発生に対する影響因子および本研究での条件設定は以下のとおりである。

#### a) 鋼材の炭素当量

対象とする鋼材の強度レベルとしては50キロ級鋼とし、炭素当量 ( $C_{eq}$ ) を0.43, 0.40, 0.36%の3レベルを目標として供試鋼材を選定した。 $C_{eq}=0.36%$ の鋼材はいわゆるTMCP鋼（新制御圧延鋼）である。

供試鋼材の化学成分（チェック値）および割れ試験の組合せを表-1に示す。各割れ試験体の試験板の組合せにおいて、フランジとウェブの炭素当量 ( $C_{eq}$ : WES式) をほぼそろえている。

#### b) 板厚の影響

従来のヒール・クラック試験における板厚の影響に関しては、下板は板厚14 mm以上で割れやすく、18 mm以上でほぼ一定の割れ感受性を示すとされている。また、立板は前述のように板厚20 mm以上では割れず、薄板（標準試験体は12 mm）の方が割れやすいとされている<sup>2), 3)</sup>。本研究ではプレートガーダー橋のフランジとウェブを想定し、また上記の結果をふまえて下板（フランジ）を36 mm、立板（ウェブ）を9 mmとした試験体を中心とし、ウェブとスティフナー、ウェブとラテラルガゼットなどの溶接を想定した12 mm（下板）×12 mm（立板）

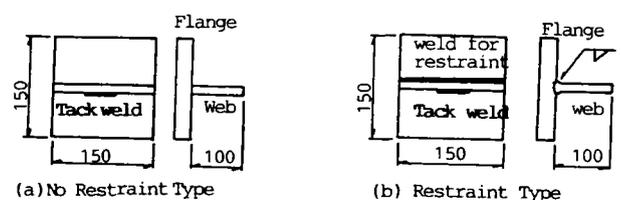
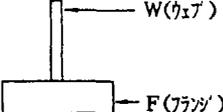


図-2 試験体の形状・寸法

表一 供試鋼材の化学成分と組合せ

炭素当量 区分	試験 会社	板厚 (mm)	材質	フラッグ と ウェル	化 学 成 分 (%)											炭素当量 Ceq (%)	ヒールクラック 感受性指数 PN (%)	
					C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb			
0.42 0.44	A	3.6	SM53B	F	0.18	0.45	1.45	0.015	0.004	Tr.	0.02	0.02	—	Tr.	0.02	0.44	0.37	
		9	SM50YA	W	0.16	0.45	1.45	0.020	0.008	Tr.	0.02	0.03	—	0.002	0.01	0.43	0.35	
	B	3.6	SM53B	F	0.16	0.35	1.40	0.020	0.005	Tr.	0.03	0.04	—	0.004	0.03	0.42	0.34	
		9	SM50YA	W	0.16	0.44	1.45	0.019	0.008	Tr.	0.02	0.03	—	0.002	0.01	0.43	0.35	
	C	3.6	SM50B	F	0.16	0.35	1.42	0.017	0.004	0.01	0.02	0.03	—	0.031	Tr.	0.42	0.34	
		9	SM50A	W	0.16	0.34	1.35	0.015	0.008	0.01	0.02	0.04	—	Tr.	Tr.	0.41	0.33	
	0.44	I	3.6	SM53B	F	0.16	0.40	1.43	0.013	0.002	Tr.	0.02	0.02	—	0.033	Tr.	0.42	0.34
			9	SM50YA	W	0.15	0.45	1.44	0.018	0.004	Tr.	0.02	0.03	—	0.006	0.01	0.42	0.34
		J	3.6	SM50B	F	0.16	0.38	1.45	0.027	0.010	0.01	0.02	0.05	—	0.004	0.03	0.43	0.36
	0.39 0.40	H	3.6	SM50B	F	0.15	0.35	1.40	0.024	0.009	Tr.	0.02	0.02	—	0.003	0.02	0.40	0.33
9			SM50YA	W	0.14	0.35	1.41	0.013	0.010	0.01	0.02	0.05	—	0.003	Tr.	0.40	0.32	
G		1.2	SM50YA	F	0.14	0.34	1.40	0.019	0.005	0.01	0.02	0.03	—	0.006	0.03	0.39	0.32	
		1.2	SM50YA	W	0.14	0.44	1.39	0.016	0.006	0.01	0.02	0.03	—	0.038	Tr.	0.40	0.32	
E		3.6	SM53B	F	0.13	0.20	1.29	0.017	0.006	Tr.	0.02	0.02	—	0.004	Tr.	0.36	0.29	
		9	SM50YB	W	0.15	0.21	1.35	0.019	0.007	Tr.	0.02	0.03	—	0.004	Tr.	0.36	0.32	
0.36		F	3.6	SM53B	F	0.13	0.20	1.29	0.017	0.006	Tr.	0.02	0.02	—	0.004	Tr.	0.36	0.29
			9	SM50YB	W	0.15	0.21	1.35	0.019	0.007	Tr.	0.02	0.03	—	0.004	Tr.	0.36	0.32

\*  \*\*  $Ceq(WES) = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$   
 \*\*\*  $PN = C + Si/20 + Mn/10 + 4P/3 + Cu/20 + Cr/30 + Mo/20$

の組合せも実施した。

c) 試験体の拘束方法の影響

現規定 80 mm の根拠は、木原らの非拘束型のヒール・クラック試験の結果にあると考えられるので、この試験方法を主体に検討した。しかし、実構造物では必ずしも角変形が自由に起こる非拘束状態は考えにくいので、拘束型の試験も実施した。この場合の拘束は実際の橋梁製における拘束状態を考えて、試験ビードの裏側に事前に拘束ビードを置くこととした。

d) 脚長の影響

木原らによる標準ヒール・クラック試験では、脚長は 6 mm (入熱 17 kJ/cm) であるが、道路橋示方書では仮付け溶接は 4 mm 以上と規定されており、また実際の仮付け溶接も 4 mm が多用される。したがって実験での脚長は 4 mm を主体とし、一部 6 mm も実施した。

e) 溶接方法の影響

低水素系の被覆アーク溶接 (SMAW) を主体に、一部 CO<sub>2</sub> 溶接も実施した。SMAW の場合、溶接棒は試験溶接前に 350°C×1 時間の乾燥を行った。拡散水素量のレベルは溶材メーカーのデータによると約 3~4 cc/100 g であった。CO<sub>2</sub> 溶接は極低水素量の溶接法であり、低温割れ感受性がかなり低いことが期待できる。

溶接条件を表一2に示す。

表一2 溶接条件

溶接法	銘柄	溶接電流 (Amp)	溶接電圧 (Volt)	速度 (cm/分)	入熱 (J/cm)	脚長 (mm)
SMAW	LB52T (3.2Φ)	110~150	19~22	17	7,400 11,600	4
	LB52T (5.0Φ)	210~215	25~28	20	15,700 16,800	6
	L55 (3.2Φ)	120~130	23~24	18	9,200 10,400	4
GMAW	CO <sub>2</sub> MG50T (1.2Φ)	180~190	20~22	40	5,400 6,300	4
	CO <sub>2</sub> DN100 (1.2Φ)	270~275	30~33	65	7,500 8,400	4
	Ar+CO <sub>2</sub> SR-3 (1.2Φ)	175~185	24~26	40	6,300 7,200	4

f) 環境条件

ほとんどの試験は気温 15~25°C (目標 20°C) で実施し、一部冬期の気温の低下も考え 5~8°C (目標 5°C) でも実施した。なお、湿度は管理が困難であったため、橋梁の製作と同様に 35~75% 程度の広い範囲を許容して実施した。

(2) 割れの検査方法

各試験条件について 4 体ずつ試験を行い、1 体は割れの性状を調べるためにマクロ試片を切り出し、3 体は木原らの標準ヒール・クラック試験と同様、ビードをルート部から破断して割れ長さを求めた。割れ感受性の指標

としては次式で定義する3体試験体での平均割れ率を用いた。

$$\frac{(\text{各試験体の割れ長さの和})}{(\text{試験溶接長}) \times 3} \times 100 (\%)$$

(3) 硬さ試験

各マクロ試験片の溶接線中央部の試片に対して、溶接部の硬さ分布を図-3に示す要領にて計測した。

3. 試験結果と考察

(1) 割れの性状

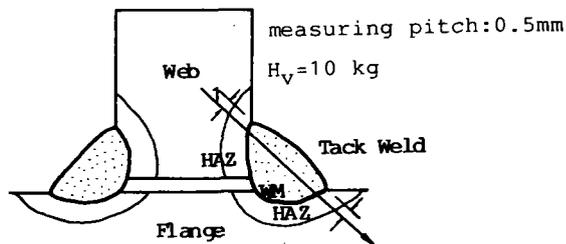
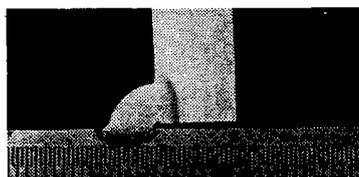
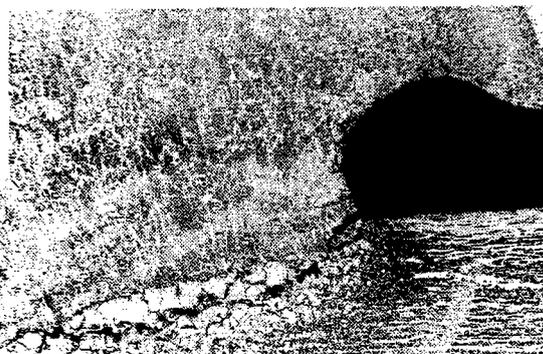


図-3 硬さの測定要領



マクロ断面

SMAW  
脚長 4mm  
ギャップ 0.6mm  
非拘束型  
仮付長 80mm



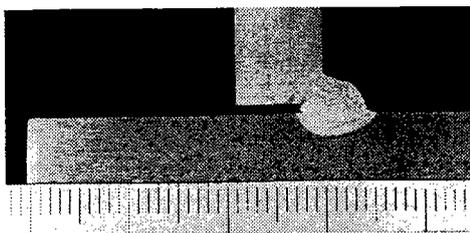
マイクロ断面

0 0.5 1.0 mm

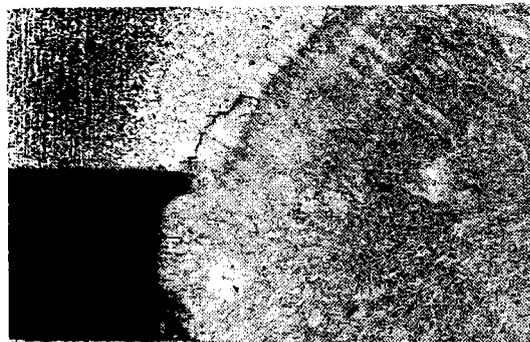
写真-1 フランジ側に発生するヒール・クラック



CO<sub>2</sub>溶接  
脚長 4mm  
ギャップ 1.0mm  
非拘束型  
仮付長 50mm



マクロ断面



マイクロ断面

0 0.5 1.0 mm

写真-2 ウェブ側に発生する微小ルート・クラック

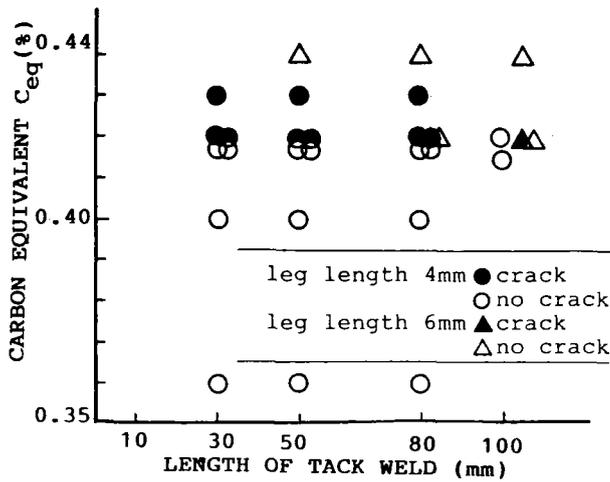


図-4 標準試験体でのヒール・クラックの発生状況

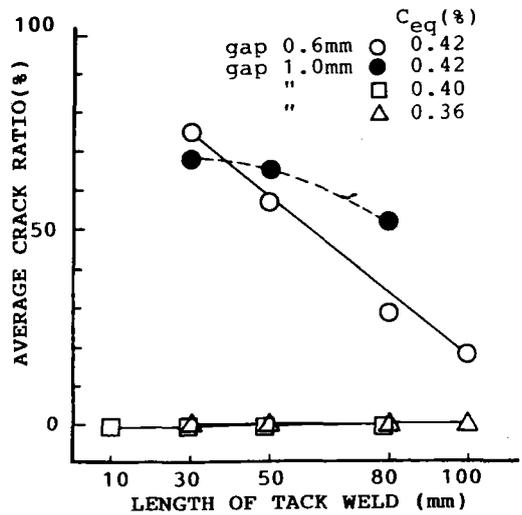


図-5 標準試験体での仮付け溶接長と平均割れ率

図-5に標準試験体での仮付け溶接長と平均割れ率との関係を示す。仮付け溶接長が長くなると平均割れ率は下がる傾向が認められる。しかしルート・ギャップを0.6mmとしても、平均割れ率には差が認められない。図-6に脚長が4mmと6mmの場合について平均割れ率を比較している。脚長6mmの方が平均割れ率は若干低い。仮付け溶接長が80mmでも100mmでもヒール・クラックは発生しており、脚長を6mmにしても割れを防止することには効果はない。図-7に溶接時の気温が20°Cと5°Cの場合の比較を示す。いずれの温度においてもC<sub>eq</sub> ≥ 0.42%でヒール・クラックは発生しており、しかも平均割れ率にも差は認められない。したがって5°C程度までの温度低下はヒール・クラックの発生には影響しないといえよう。

(3) 拘束の影響

標準試験体で立板(ウェブ)の片側を溶接した後、その反対側を仮付け溶接した場合の結果を非拘束の場合と比較して図-8に示す。(1)に示したごとく、C<sub>eq</sub> ≥ 0.42%できわめて微小な割れがウェブ側HAZに発生することがあるが、ここで対象としているヒール・クラックはいずれの仮付け溶接においても全く発生していない。非拘束と拘束での割れ発生位置の相違はすでに知られているように<sup>2)</sup>角変形が拘束されることにより、残留塑性ひずみ量がウェブ側ルート部の方がフランジ側ルート部より大きいと考えられる。

(4) CO<sub>2</sub> 溶接

標準試験体に対して仮付け溶接をCO<sub>2</sub>溶接で行った場合の割れ発生性状を図-9に示す。C<sub>eq</sub>が0.42%以上の鋼材でルート・ギャップが1mmの場合、ウェブ側のHAZに割れが発生することがある。しかしその大きさは微小である。本研究で対象としているヒール・クラックはC<sub>eq</sub>が0.43%で5°Cでも発生していない。CO<sub>2</sub>溶接の場合ヒール・クラックが発生しないのは水

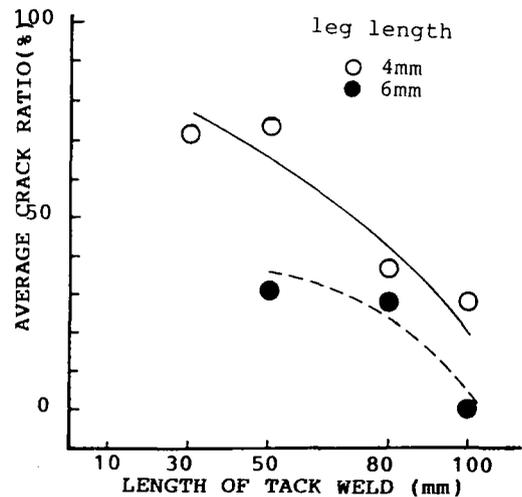


図-6 溶接脚長の影響

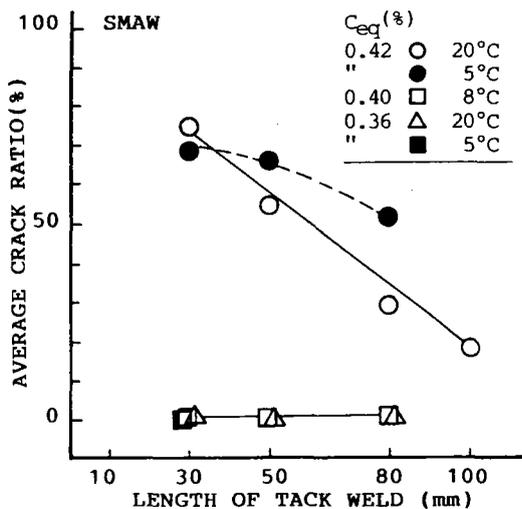


図-7 溶接時の温度の影響

素量が低いことほかに、ルート部の溶け込みが良い(写真-3)ことも理由の1つと考えられる。

(5) 板厚の影響

図-10に底板、立板とも12mmとした場合の割れ発生状況を示す。いずれのC<sub>eq</sub>、仮付け溶接長においても、

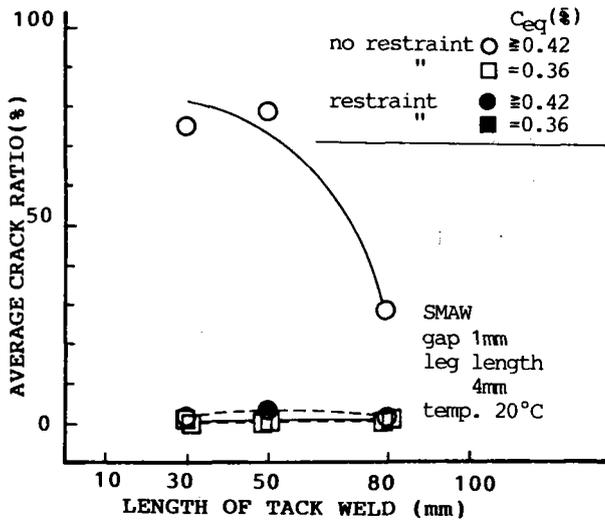


図-8 拘束の影響

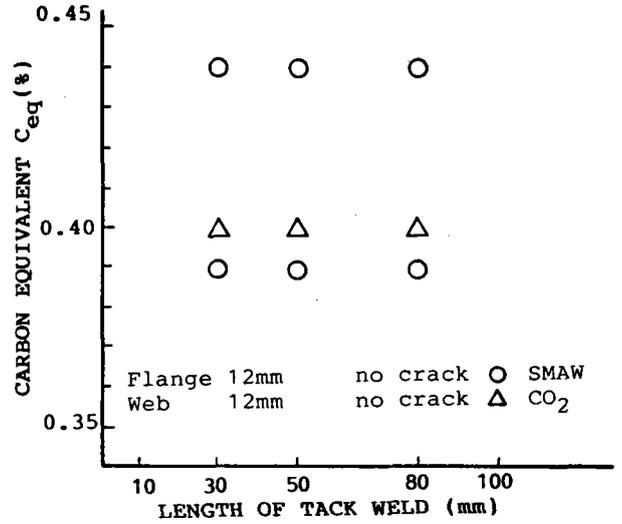


図-10 試験体の板厚が 12 mm-12 mm の結果

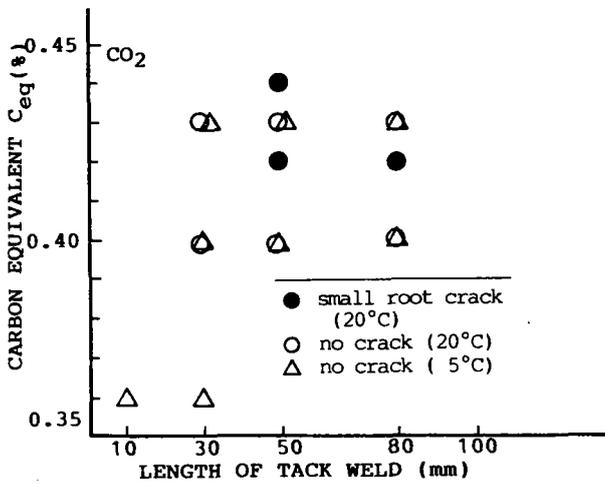


図-9 CO<sub>2</sub> 溶接を用いた場合の割れの発生状況

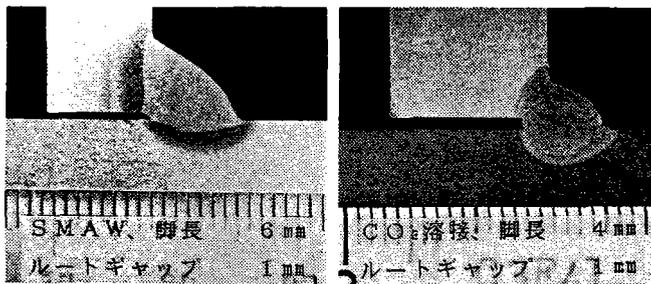


写真-3 溶け込み状況

ヒール・クラックおよび立板側のクラックのいずれも発生していない。

(6) 溶接部冷却速度の影響

溶接中に熔融池（溶接中央点に対応する位置）にサーモカップルを挿入して溶接部の冷却速度を計測した結果を表-3に示す。試験体は図-2に示すもので、フランジは36mm、ウェブは9mm、脚長は4mmである。溶接条件は表-2に示すとおりである。溶接部の硬化（Max. HAZ 硬さ）と良く対応するといわれている800°Cから500°Cまでの冷却時間（ $\Delta t_{8/5}$ ）<sup>7)</sup>は、仮付

表-3 溶接部の冷却速度測定結果

仮付長 (mm)	$\Delta t_{8/5}$ ※1 (SEC)	$t_{100}$ ※2 (SEC)	備考
30	2.2	21	
50	2.6	27.8	
80	3.2	36.4	

※1 溶接部の温度が800°Cから500°Cまでに要する時間  
 ※2 溶接部の最高到達温度から100°Cまでに要する時間

け溶接長30~80mmの範囲での2.2~3.2秒であり、この冷却時間はかなり短いといえる。また本研究での試験の範囲でのこの $\Delta t_{8/5}$ の冷却速度の差ではHAZの硬化組織に差をもたらすことはないと考えられる。

(7) 溶接部硬さの影響

溶接部の硬さ試験の結果の例を図-11に示す。HAZでの硬さは、脚長4mmの場合、 $C_{eq}=0.44\%$ で $H_v=350\sim440$ 、 $C_{eq}=0.40\%$ で $H_v=340\sim350$ 、そして $C_{eq}=0.36\%$ で $H_v=290\sim350$ となっている。

フランジ側の最高硬さはSMAWの場合のヒール・クラックの感受性と対応していると考えられる。すなわち低温割れに特有の、硬化すると割れやすくなるという傾向を示し、今回の試験では $H_v \geq 350$ にて割れが発生している。通常、低温割れは硬さが350以下で防止でき、400以上になると割れやすくなるとされており<sup>7)</sup>、今回実施した非拘束型試験体はかなり厳しい状態にて割れを再現していたと考えることができる。

図-12にHAZ最高硬さと仮付け溶接長の関係を示す。最高硬さは仮付け溶接長に関係なく、 $C_{eq}$ 量にのみ依存する傾向を示しているが、これは今回の溶接条件が冷却速度からみてかなり厳しい条件であり、HAZ組織は溶接長にかかわらずいずれも完全な硬化組織となって

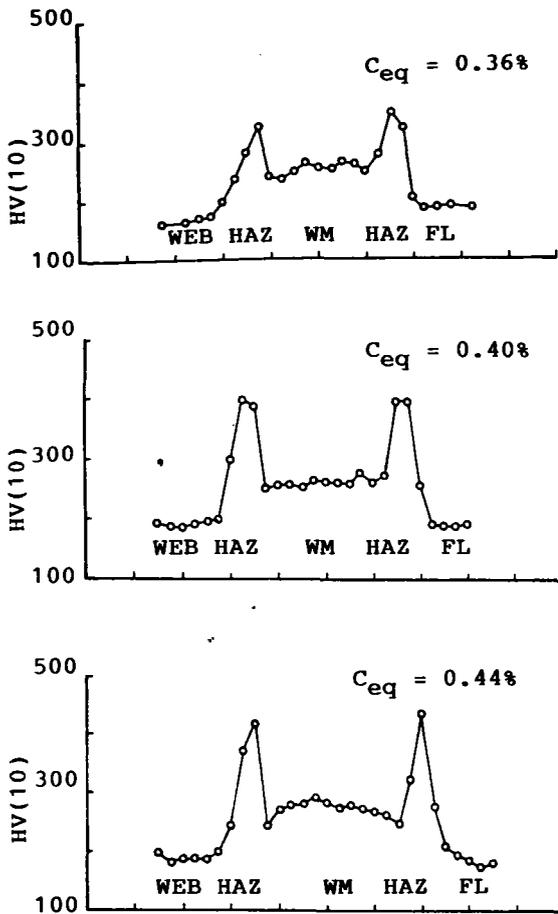


図-11 硬さ試験の結果例

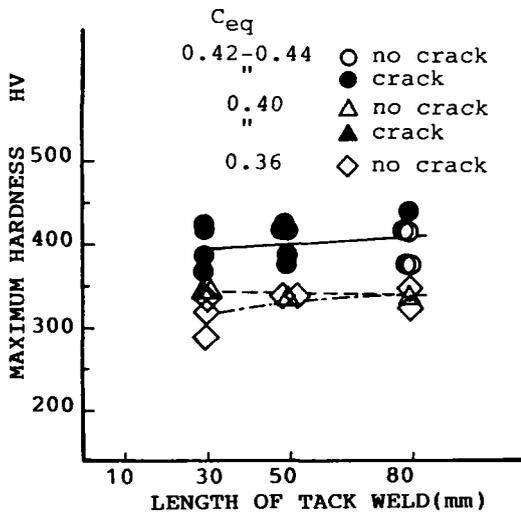


図-12 仮付け溶接長と HAZ 最高硬さ

実験に準じており、道路橋製作の条件に合わせて若干変更して実施した。しかし今回の試験においてはヒール・クラックの発生に最も影響を及ぼすのは鋼材の炭素当量であり、ヒール・クラック発生の有無と仮付け溶接長との間には明確な関係は得られなかった。ただし、鋼材の炭素当量が 0.42 以上の鋼材で既存実験と同様に、溶接長が長くなると割れ率が低下する傾向が明らかとなった。

本実験の範囲でヒール・クラックが発生してはいけないという観点からは仮付け溶接長について次のような提案はできるであろう。

- ① 厚い方の板厚が 12 mm までの継手の仮付け溶接長は 50 mm 以上
- ② 鋼材の炭素当量が 0.36 % 以下の場合、仮付け溶接長は 30 mm 以上
- ③ その他は現行どおり 80 mm 以上

また CO<sub>2</sub> 溶接については被覆アーク溶接 (SMAW) に比して低温割れ感受性は低く、ヒール・クラックは発生せずウェブ側 HAZ の微小な割れのみであった。今後の研究によりヒール・クラックが発生しないことの明確な理由が明らかになれば、仮付け溶接長の制約を緩和できる可能性が高い。

本研究は鋼橋技術研究会示方書研究部会施工基準分科会の共同研究として実施したものである。実施するにあたり、日本橋梁建設協会から研究費の補助を受けました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，pp. 337～359，昭和 55 年 2 月。
- 2) 木原 博・稲垣道夫・堀川一男・栗山良員：50 kg/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼すみ肉溶接部の割れについて—ヒールクラックについて—，溶接学会誌，第 39 巻，第 3 号，pp. 50～60，1970. 3。
- 3) 田中基吉・北田豊文：すみ肉溶接割れに関する研究—ヒールクラックについて—，溶接学会誌，第 41 巻，第 8 号，pp. 55～64，1972. 8。
- 4) 北田豊文：非調質鋼の溶接割れとその割れ防止のための鋼材および溶接施工条件の選定に関する研究，大阪大学学位論文。
- 5) 日本鋼構造協会，経済委員会，土木グループ：鋼橋の経済にかかわる問題，JSSC，Vol. 18，No. 97，pp. 1～31，1982. 12。
- 6) 日本造船研究協会第 193 研究部会：新製造法による 50 キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究—総合報告書一，ISSN 0546-1480，日本造船研究協会報告，第 100 号，1985. 5。
- 7) 稲垣道夫：高張力鋼溶接の実際，日本溶接協会監修，〈溶接の実際シリーズ〉4，1984。

(1988. 2. 26・受付)

いたからと思われる。

4. おわりに

50 キロ級高張力鋼を用いて溶接割れに及ぼす仮付け長の影響を鋼材の炭素当量，板厚，試験体の拘束方法，ギャップ，脚長，溶接方法，環境温度などを因子として検討した。基本的には現行道路橋示方書の仮付け溶接長の規定の根拠となったと考えられるヒール・クラックの

# 隅肉溶接部の疲労強度とルート部の欠陥について

## FATIGUE STRENGTH OF FILLET WELDED JOINTS CONTAINING ROOT DEFECTS

三木千寿<sup>\*</sup>、范 恒達<sup>\*\*</sup>、田中雅人<sup>\*\*\*</sup>

By Chitoshi Miki, Hengda Fan and Masato Tanaka

In order to examine the fatigue performance of fillet welded joints containing heel crack or root-gap defects, fatigue tests are carried out. The specimens are divided into 2 series which are heel crack series and root-gap series. The first series which consists of nonload-carrying cruciform, load-carrying cruciform and longitudinal welded joint; considered various orientations between heel cracks and applied stresses. The second series are all load-carrying cruciform joints and have 4 kinds of details with various root-gaps and weldment sizes. The material used is JIS SM50YA with carbon equivalent of 0.42 for its ease in occurrence of heel crack while tack welding is performed.

### 1. はじめに

鋼橋の疲労損傷の多くは溶接継手部に生じており、その大部分は隅肉溶接部である<sup>1)</sup>。通常高い応力を伝達する継手部には隅肉溶接は使用しないが、二次的な変形、挙動により設計時には想定していないような応力が発生し、それが疲労損傷の原因となることが多い。隅肉溶接はそのルート部に未溶着部を残しており、荷重伝達型の継手として使用した場合未溶着部が応力集中源となるため、隅肉溶接ののど厚によってはルート部から疲労亀裂が発生し、疲労強度がかなり低くなることがある。また、隅肉溶接のルート部には割れなどの欠陥が入りやすい、ギャップ量の精度確保が難しい、しかも溶接終了後はこれらに対する検査が非常に難しい、などの疲労強度からみた場合いくつかの本質的な問題を有している。

本研究では隅肉溶接ルート部に発生する欠陥のうち、疲労強度に大きな影響を及ぼすと考えられるヒールクラックとルートギャップを対象としている。ヒールクラックは溶接長の短い初層隅肉溶接に生じる一種の冷間割れであり、仮付溶接部などに残される恐れがある<sup>2)</sup>。ここでは、構造物中に存在する各種のディテールを勘案し、クラックに対して平行、垂直、及び溶接線方向の荷重下での疲労強度を調べた。

隅肉溶接のルートギャップ（密着度）については、現行の道路橋示方書<sup>3)</sup>では1mm以下とし、それを越える場合は開先溶接にするのが良いとしている。しかし、密着度が悪いことを確認した後に開先をとって溶接す

---

<sup>\*</sup> 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
<sup>\*\*</sup> 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
<sup>\*\*\*</sup> 東京鉄骨橋梁(株) 生産技術部 (〒302 取手市下高井1020)

ることの施工性や、開先溶接に変更したときの入熱量上昇により生じてくる悪影響を考え、示方書の改定案では1mmを越え、3mmまでのルートギャップについては所定の脚長にギャップ量を加えた脚長の隅肉溶接とすることにしている。ここでは、このような対処をされた隅肉溶接部が荷重伝達型継手として使われる場合の疲労強度への影響についても検討を加えている。

## 2. 疲労試験方法

### (1) 試験体

疲労試験には、図-1に示すような2シリーズ合計7種類の試験体を用いた。最初のシリーズはヒールクラックの影響を調べるための試験体であり、それぞれの型式でヒールクラックと荷重の方向が異なっている。試験体Aは非荷重伝達型の十字継手、試験体Bは荷重伝達型の十字継手、試験体Cは縦方向継手である。2番目のシリーズは荷重伝達型十字継手試験体でルートギャップと溶接脚長の影響を調べるための試験体であり、試験体G0S6、G2S6、G2S8、G3S9のルートギャップ(g)と溶接脚長(s)はそれぞれ  $g=0, s=6$ 、 $g=2, s=6$ 、 $g=2, s=8$ 、 $g=3, s=9$  (いずれも mm) である。すなわち、G2S8およびG3S9がギャップ量の増加に伴って脚長を増した試験体である。

供試鋼材は JIS SM50YA である。表-1にその化学成分及び機械的性質を示す。炭素当量  $C_{eq}$  は 0.42 であり、この鋼材はヒールクラックが生じやすいことが確かめられている<sup>2)</sup>。

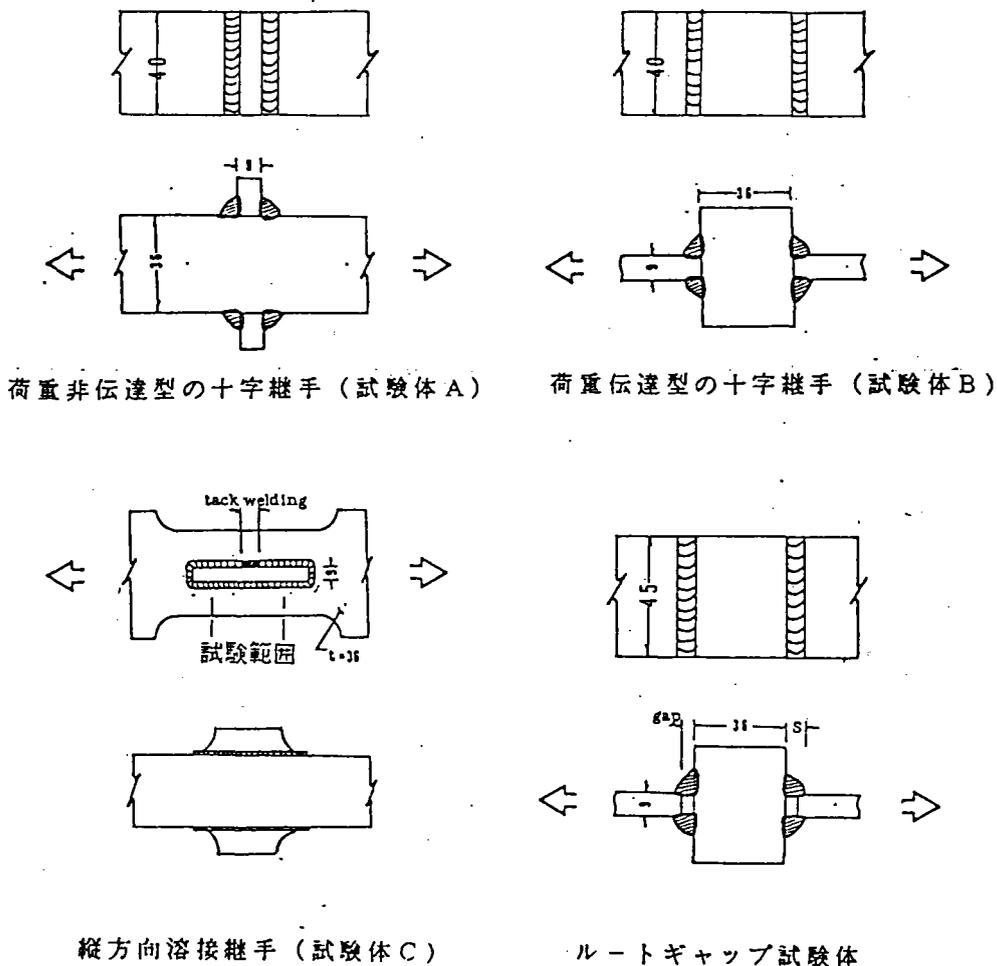


図-1 試験体

表-1 供試鋼材の化学成分及び機械的性質

	C	Si	Mn	P	S	TAI	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び %
t=9mm	.16	.43	1.42	.011	.008	.031	.01	.01	.02	.00	.000	.000	.002	43	58	25
t=36mm	.18	.44	1.39	.019	.003	.025	.01	.01	.02	.00	.016	.000	.002	43	58	27

試験体A、B、Cは、まず長さ80mmの仮付け溶接を行い、次に48時間放置し、その後1パスの本溶接を行うことにより製作した。溶接棒はいずれもJIS D5016相当の低水素系溶接棒であり、その棒径は仮付け溶接で3.2mm、本溶接で4mmである。溶接電流は仮付けで120A、本溶接で175Aとした。溶接脚長は仮付け溶接で4mmであり、本溶接で6mmである。この仮付溶接では、ルート部にヒールクラックが生じることが確認されている<sup>2)</sup>。また、試験体Cの破面の観察により仮付全長にわたり深さ3~5mm程度のヒールクラックの存在が確認された。溶接のパス数はG0S6、G2S6で1パスである。しかし、のど厚が8mmとなると1パスでは施工できなくなる。そのため、G2S8、G3S9では溶接の積層方法の影響を調べるため、2パス溶接と3パス溶接に分けて製作した。図-2にそのルートギャップ試験体の溶接条件と積層法を示す。このシリーズの試験体に対しては仮付溶接を行っておらず、従ってヒールクラックは発生していない。

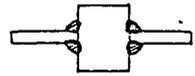
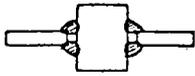
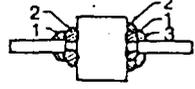
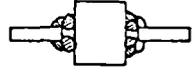
試験体	記号	電流 (A)	積層法
G0S6		175A	
G2S6		175A	
G2S8		1 $\frac{1}{2}$ パス: 180A 2 $\frac{1}{2}$ パス: 170A	
G3S9		1 $\frac{1}{2}$ パス: 180A 2 $\frac{1}{2}$ パス: 180A 3 $\frac{1}{2}$ パス: 170A	

図-2 ルートギャップ試験体の溶接条件と積層法

(2) 疲労試験方法

疲労試験は、電気油圧式疲労試験機を用いて下限荷重をほぼ0とした片振り引張り荷重下で行った。荷重繰り返し速度は10~18Hzである。本試験では、特に長寿命域を中心としての疲労特性を調べている。一部の試験体については、疲労亀裂の発生、進展挙動を観察する目的でビーチマーク試験も行った。

3. 疲労試験結果とその考察

(1) ヒールクラックを含む荷重非伝達型十字継手の疲労強度

荷重非伝達型の十字継手(A試験体)の疲労試験結果を図-3に示す。図中にはこの継手に対するわが国の鉄道橋(JR)<sup>4)</sup>、日本鋼構造協会(JSSC)<sup>5)</sup>、及び米国道路橋(AASHTO)<sup>6)</sup>の疲労設計曲線を示した。ここでの試験体の疲労強度は非常に高く、いずれの設計曲線をも十分満たしている。また、全ての試験体で溶接止端から疲労亀裂が発生しており、仮付溶接中にヒールクラックが存在しても荷重非伝達型の十字継手の疲労強度には影響しないことが分かる。

(2) ヒールクラックを含む縦方向溶接継手の疲労強度

縦方向溶接継手(C試験体)の疲労試験結果を図-4に示す。疲労き裂は付加板の端部の隅肉溶接部ルートから発生し、これにより試験体は破断した。試験体平行部に発生させたヒールクラックがある範囲内では、いずれの試験体でも疲労亀裂は発生しなかった。図中のプロットは平行部での応力範囲と試験終了回数(付加板端部での破断回数)の関係をプロットしてあり、縦方向の継手試験体疲労強度は十分に現行の基準を満

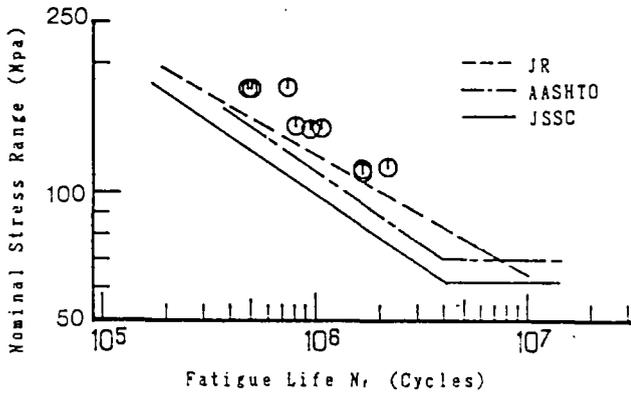


図-3 荷重非伝達型試験体の S r ~ N f 線図

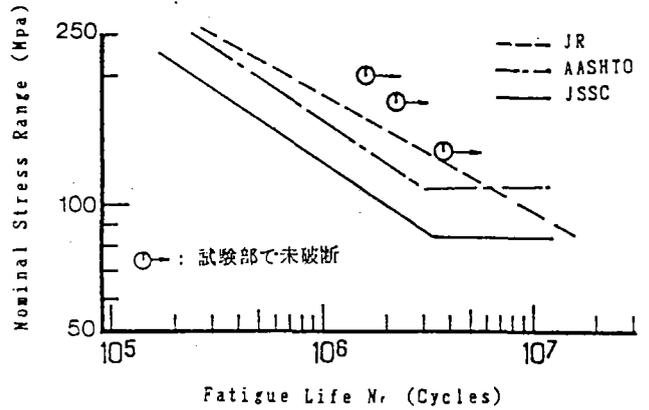


図-4 縦方向溶接試験体の S r ~ N f 線図

たしている。即ち、応力に平行する縦方向の溶接内にヒールクラックが存在しても、隅肉溶接部の疲労強度は影響されないといえる。

### (3) ヒールクラックを含む荷重伝達型十字継手の疲労強度

図-5及び図-6に荷重伝達型の十字継手(B試験体)の疲労試験結果を示す。図-5では主板(載荷をしている板)の応力で、図-6は隅肉溶接の設計のど厚を用いて計算した平均せん断応力で整理している。また、比較のために、図-6中には、同じ形状、寸法と溶接条件のGOS6試験体の試験結果もプロットしてある。GOS6試験体には仮付溶接がなく、したがってヒールクラックは含まれていない。ヒールクラックの有無による疲労強度の違いは見られず、むしろヒールクラックを含む継手試験体のほうが疲労強度は高くなっている。これは、ヒールクラック試験体では仮付溶接内にヒールクラックを発生させ、その上からのど厚6mmの本溶接を行っているため実質のど厚が大きくなっているためと考えられる。図-7は、のど厚からヒールクラックを除いた実測のど厚を基準にしたせん断応力で整理したものである。同図では、ヒールクラックの深さが継手の疲労強度に及ぼす影響を調べる目的で、試験結果をヒールクラックの深さで分類して示している。ヒールクラック試験体とルートギャップ0mmの試験体の間で疲労強度に差が認められず、仮付溶接内のヒールクラックの発生、またはヒールクラックの深さが荷重伝達型の十字継手疲労強度へ及ぼす影響は認められない。

図-8にビーチマーク試験の結果を示す。疲労き裂は、ヒールクラックの先端から全面的に進展するのではなく、ヒールクラックの先端に沿った少数の起点で発生し、半楕円形状に進展している。写真-1は走査型電子顕微鏡で破面を観察した結果である。ヒールクラックと疲労き裂の進展した面との性状の違い、および、境界がよく観察できる。ヒールクラックは粒界で生じているが、疲労き裂は粒内で進展してい

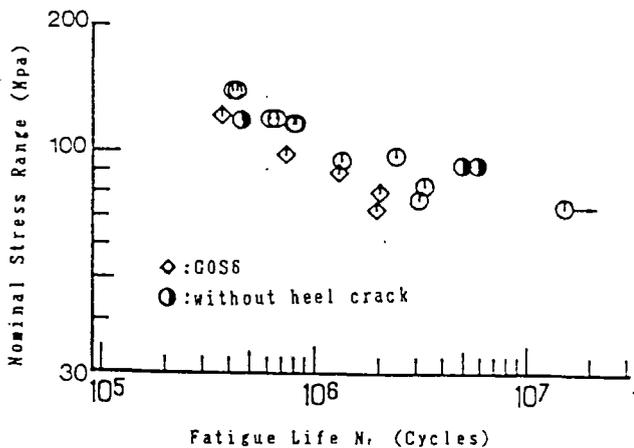


図-5 荷重伝達型試験体の主板応力の S r ~ N f 線図

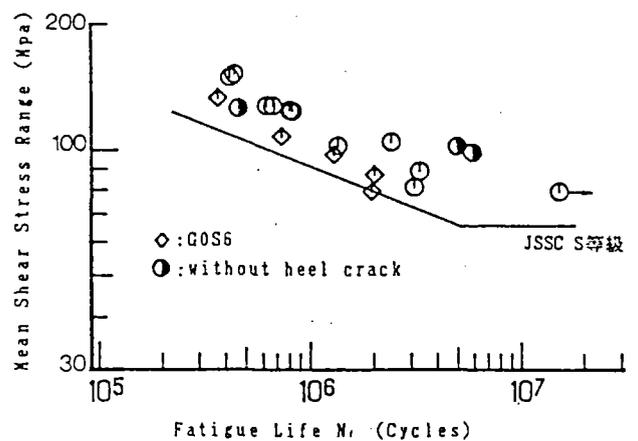


図-6 荷重伝達型試験体の平均せん断応力の S r ~ N f 線図

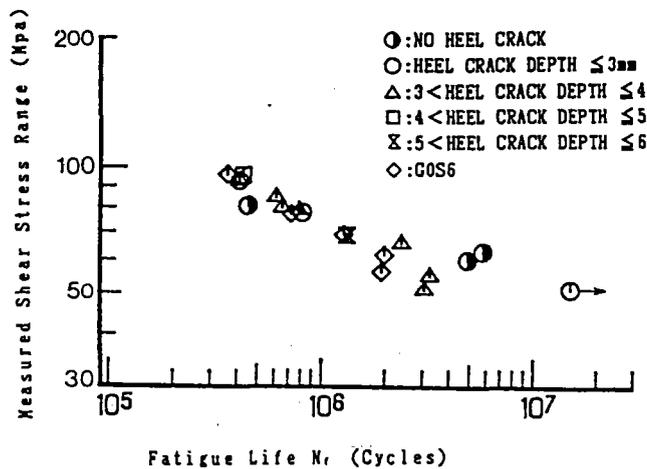


図-7 荷重伝達型試験体の実測せん断応力の  $S_r \sim N_f$  線図

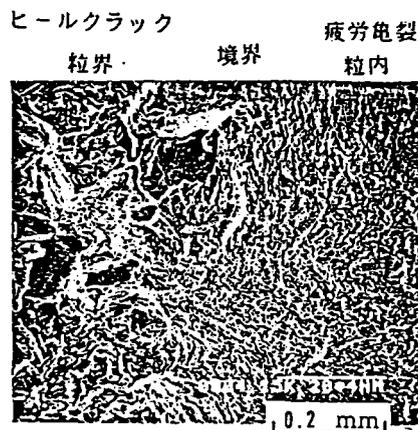


写真-1 疲労亀裂発生部の疲労破面

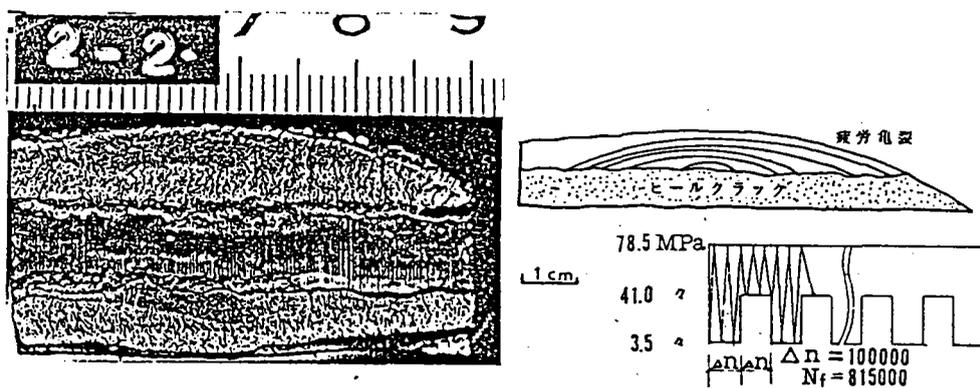


図-8 ビーチマーク試験

る。したがって、このようなビーチマークと走査顕微鏡による破面の観察により、ヒールクラックがそのまま疲労き裂として進展するのではないことが明らかである。

(4) ルートギャップが荷重伝達型十字継手の疲労強度に及ぼす影響

図-9及び図-10にルートギャップ試験体の疲労強度の関係を示す。図-9では主板の応力範囲を、図-10では設計のど厚を用いて求めた平均せん断応力範囲を基準にしている。これらの中ではルートギャップが0の試験体(G0S6)の疲労強度が最も低く、ルートギャップが2mmで脚長を6mmとした試験体(G2S6)の疲労強度が最も高い。ルートギャップの大きさに従ってそれぞれ2mm, 3mmづつ増脚長した試験体(G2S8及びG3S9)の疲労強度は両者の中間となっている。

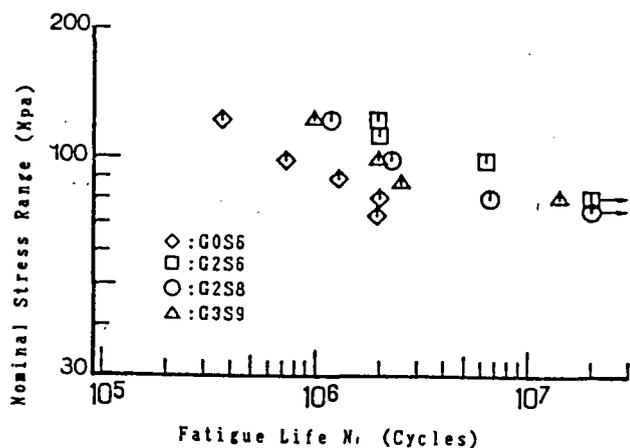


図-9 ルートギャップ試験体の主板応力の  $S_r \sim N_f$  線図

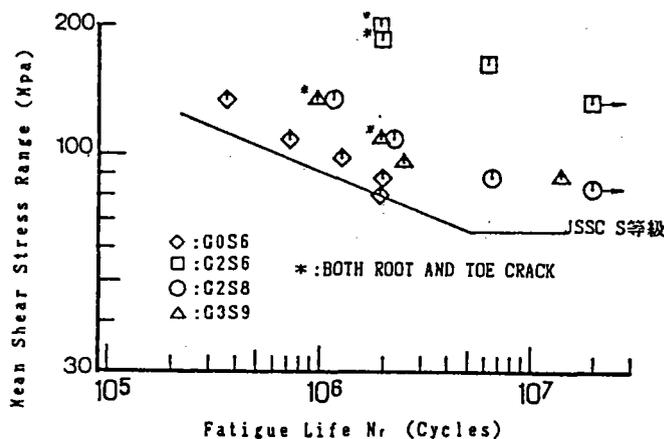


図-10 ルートギャップ試験体の平均せん断応力の  $S_r \sim N_f$  線図

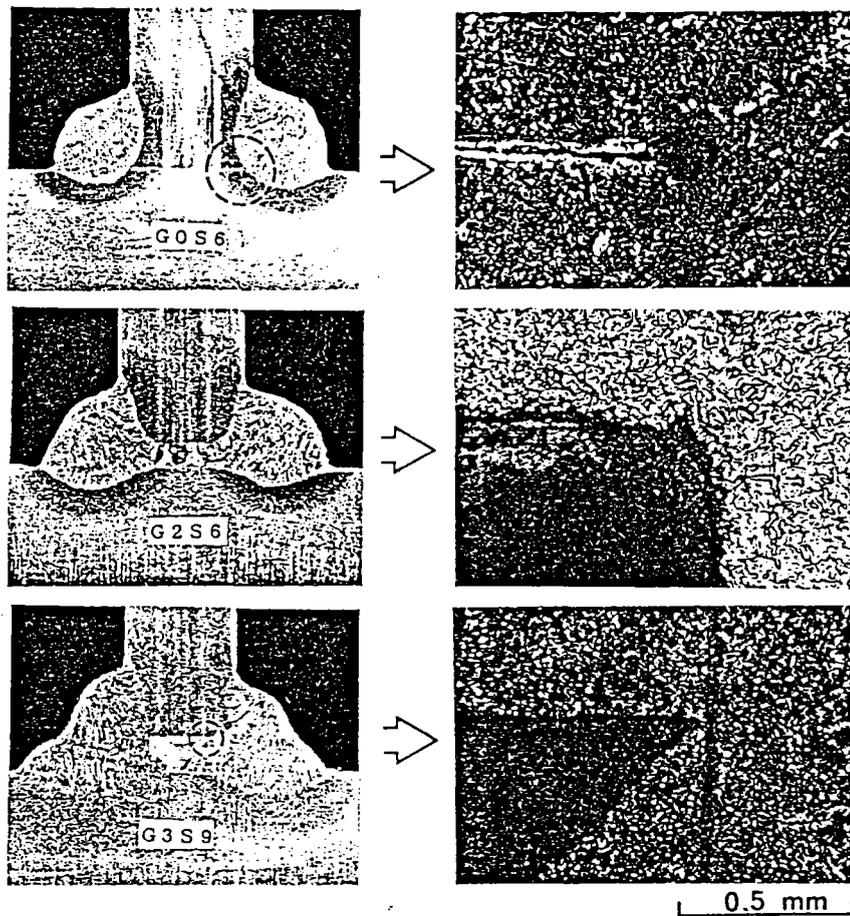


写真-2 ルートギャップ試験体のマクロ試験写真

写真-3 ルートギャップ試験体未溶着部の先端部の金属顕微鏡写真

各タイプ試験体のマクロ試験の結果、および未溶着部の先端部の金属顕微鏡写真を写真-2～3に示す。ギャップが0の場合（G0S6）未溶着部の先端は非常に鋭い亀裂のような形状を示している。それに対して疲労強度のもっとも高かったG2S6試験体の未溶着部の先端は、ほぼ直角に近い鈍角となっている。また、溶接の溶込みもギャップ0の試験体に比べて深い。試験体G2S8、G3S9は2パスと3パスで溶接を行っており、それぞれの積層法によって溶込み形状が異なることは明かである。試験体G2S8、G3S9いずれの試験体においても疲労亀裂は2パス溶接から発生している。これは2パス溶接の初層の狙い位置の関係により、溶込み形状が鋭くなったためである。これらの結果により、ルートギャップ試験体の疲労強度は未溶着部先端の鋭さ、および、未溶着部の長さの影響に強く依存すると考えられる。

G2S6およびG3S9試験体では、比較的短い寿命領域で（ $N_f < 200$ 万回程度）、ルートだけではなく、溶接止端が疲労破壊の起点となるものもあった。

#### 4. 結論

隅肉溶接継手を対象とし、ルート部における仮付け溶接内のヒールクラックおよびルートギャップが疲労強度に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 荷重非伝達型の十字継手と縦方向溶接継手の疲労強度に対してヒールクラックの存在は影響しない。
- (2) 荷重伝達型十字継手の仮付け溶接にヒールクラックが存在しても疲労強度は低下していない。これは本溶接によって所定ののど厚が確保されているためである。
- (3) ヒールクラックを含む荷重伝達型十字継手試験体では、疲労亀裂はヒールクラック先端の数箇所から発生し、半楕円形状の亀裂として進展する。すなわち、ヒールクラックがそのまま疲労亀裂とし

て進展するのではないことが明かである。

- (4) ルートギャップを0mm、2mm、3mmとした荷重伝達型十字継手の疲労強度は、ルートギャップ0mmの場合が最も低い。これはルートギャップが0の場合は未溶着部先端が非常に鋭く、また溶込みが浅いためである。ルートギャップ2mm、3mmの場合は増脚長をしても疲労強度に差はない。これは、疲労強度は溶接脚長だけでなく、ルート部の未溶着部先端の鋭さおよび未溶着部の長さに強く依存する。

謝辞

本研究は鋼橋技術研究会示方書研究部会施工技術分科会の共同研究として実施したものである。実施するにあたり、日本橋梁建設協会からの研究費の補助を受けた。また、東京工業大学 土木工学科 森 猛助手 および河野 雅技官には有益な助言と実験の協力を得た。さらに修士課程1年の沖中 知雄君には、図面の整理などの協力を得た。ここに記して深謝します。

参考文献：

- 1) 三木千寿・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、No392,pp.403-410, 1988.
- 2) 三木千寿・中村勝樹・遠藤秀臣・等農克巳：仮付け溶接の長さとしール・クラックの発生について、土木学会論文集、No404,pp.259-265, 1989.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、pp341-342, pp351-352, 昭和55年2月.
- 4) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、1983-4.
- 5) 日本鋼構造協会：疲労設計指針（案）改定小委員会資料、1989.
- 6) The American Association of State Highway and Transportation Officials: Standand Specification for Highway Bridges.1983.