

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¹⁾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一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る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^{2)~4)}。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剥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^{2)~4)}。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度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^{5),6)}、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)

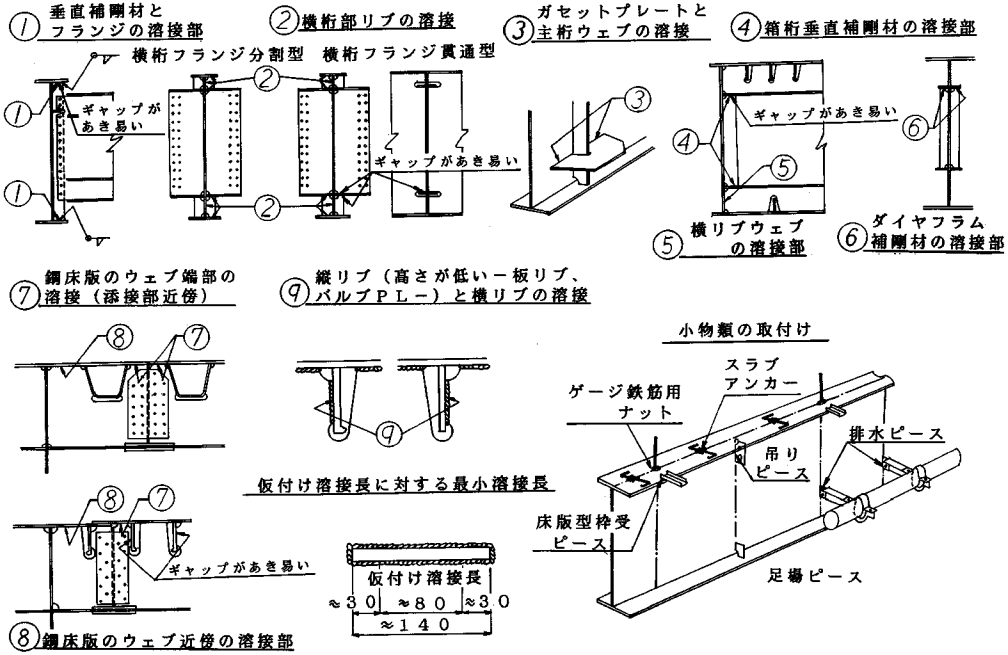


図-1 80 mm の仮付け溶接が困難な箇所例

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²⁾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以上では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^{2),3)}。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）

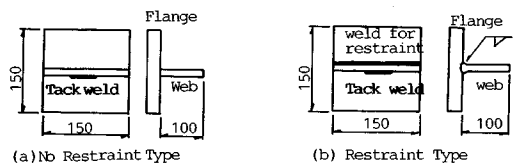


図-2 試験体の形状・寸法

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	フック と ウェ	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	36	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	36	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	36	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
	I	36	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	36	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
		9	SM50A	W	0.14	0.35	1.41	0.013	0.010	0.01	0.02	0.05	—	0.003	Tr.	0.40	0.32
K	12	SM50YA	F, W	0.17	0.43	1.48	0.019	0.007	0.01	0.02	0.02	—	—	—	0.44	0.36	
0.39 0.40	H	36	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	12	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	
	S	12	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
0.36	E	36	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作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 CO₂ 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。CO₂ 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。

溶接条件を表一に示す。

表二 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	25~26	20	15,700 16,800	6
	L55 (3.2φ)	120~130	23~24	18	9,200 10,400	4
GMAW	CO ₂ MG50T (1.2φ)	180~190	20~22	40	5,400 6,300	4
	CO ₂ DW100 (1.2φ)	270~275	30~33	65	7,500 8,400	4
	Ar+CO ₂ 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

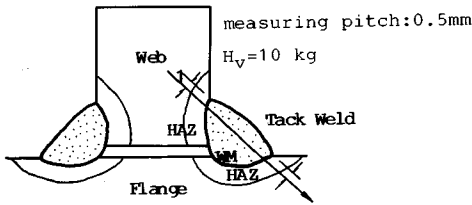
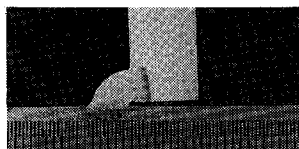


図-3 硬さの測定要領

割れの典型的な例を写真-1に示す。非拘束型試験体の SMAW では従来からいわれているヒール・クラックが発生している。拘束型の SMAW, および非拘束型試験体の CO₂ 溶接では、写真-2に示すようなきわめて微小なルート・クラック (ウェブ側) が発生することがある。しかしこのルート・クラックはヒール・クラックに比べてきわめて小さく、またここでの割れ試験方法での対象外の現象である。

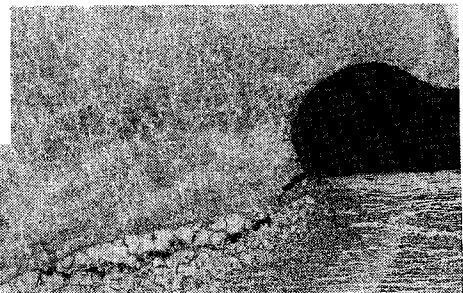
(2) SMAW による標準試験体の結果

図-4に非拘束、板厚の組合せ 36 mm-9 mm, ルートギャップ 1 mm および 0.6 mm (これらを標準試験体とよぶ) におけるヒール・クラックの発生状況を示す。炭素当量 C_{eq} が 0.42 % 以上でヒール・クラックが発生している。ヒール・クラックの発生の有無については溶接長に関係せず、溶接長 100 mm でも微小ではあるが、ヒール・クラックは発生している。またルートギャップを 0.6 mm (木原らの実験と同じ値) にしてもこのヒール・クラックは同程度に発生した。



マクロ断面

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

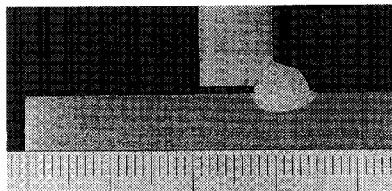


ミクロ断面

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

CO₂溶接
脚長 4 mm
ギャップ 1.0 mm
非拘束型
仮付長 50 mm



マクロ断面



ミクロ断面

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

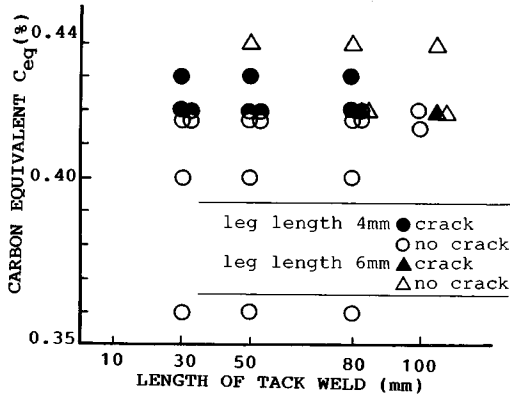


図-4 標準試験体でのヒール・クラックの発生状況

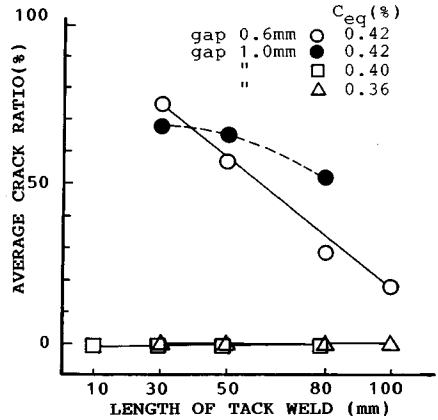


図-5 標準試験体での仮付け溶接長と平均割れ率

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 $C_{eq} \geq 0.42\%$ 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、 $C_{eq} \geq 0.42\%$ 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²⁾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) CO₂ 溶接

標準試験体に対して仮付け溶接をCO₂溶接で行った場合の割れ発生性状を図-9に示す。 C_{eq} 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_{eq} が0.43%で5°Cでも発生していない。CO₂溶接の場合ヒール・クラックが発生しないのは水

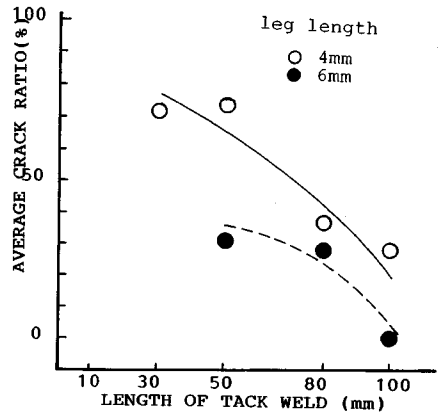


図-6 溶接脚長の影響

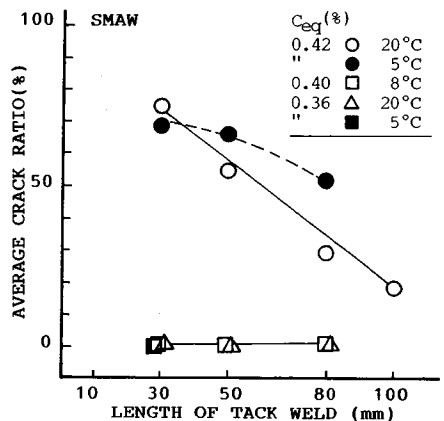


図-7 溶接時の温度の影響

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)ことも理由の一つと考えられる。

(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_{eq} 、仮付け溶接長においても、

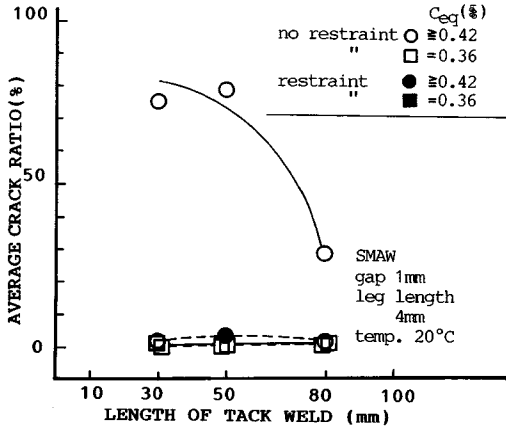


図-8 拘束の影響

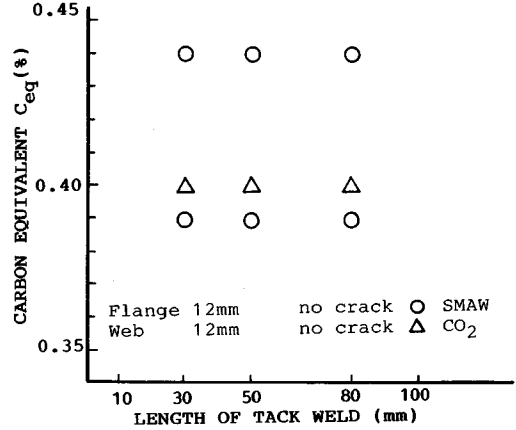


図-10 試験体の板厚が 12 mm-12 mm の結果

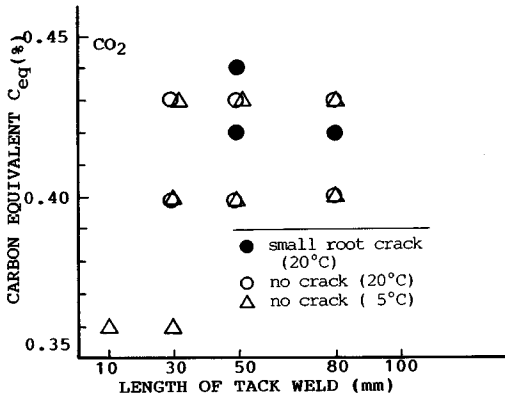


図-9 CO₂ 溶接を用いた場合の割れの発生状況

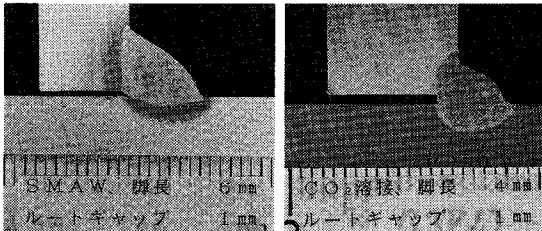


写真-3 溶け込み状況

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

溶接中に溶融池(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(Δt/5)⁷⁾は、仮付

表-3 溶接部の冷却速度測定結果

仮付長 (mm)	Δt/5 ※1 (SEC)	t100 ※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

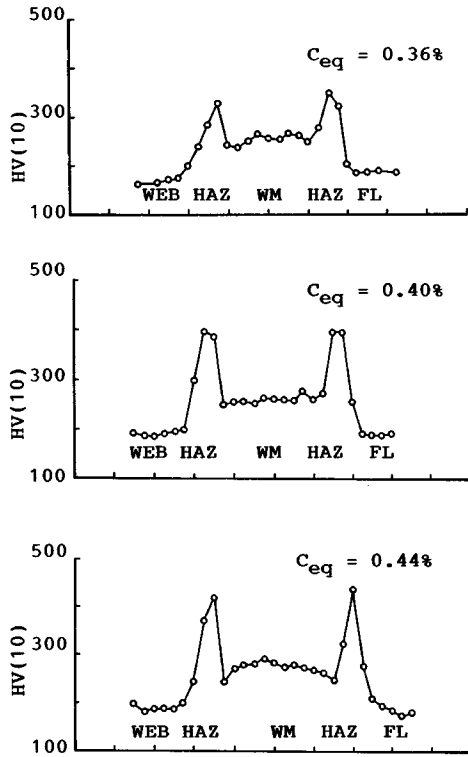
け溶接長30~80mmの範囲での2.2~3.2秒であり、この冷却時間はかなり短いといえる。また本研究での試験の範囲でのこのΔt/5の冷却速度の差ではHAZの硬化組織に差をもたらすことはないと考えられる。

(7) 溶接部硬さの影響

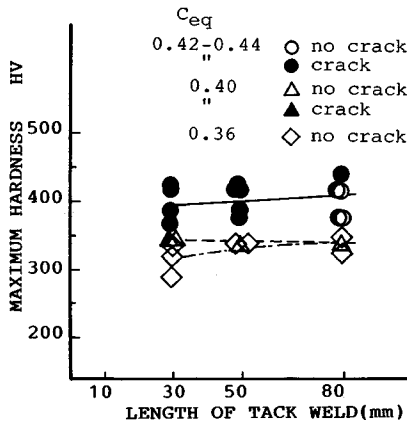
溶接部の硬さ試験の結果の例を図-11に示す。HAZでの硬さは、脚長4mmの場合、Ceq=0.44%でHv=350~440、Ceq=0.40%でHv=340~350、そしてCeq=0.36%でHv=290~350となっている。

フランジ側の最高硬さはSMAWの場合のヒール・クラックの感受性に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Hv≧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⁷⁾、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、Ceq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



図一11 硬さ試験の結果例



図一12 仮付け溶接長と HAZ 最高硬さ

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

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 CO₂ 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/mm² 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) 田中甚吉・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—, 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)