
厚鋼板のT型すみ肉高能率サブマージアーク溶接技術

High-Efficiency Submerged Arc Fillet Welding Process of T-Joint with Heavy Section

山口 忠政 (Tadamasa Yamaguchi) 林 三郎 (Saburo Hayashi) 中島 松重
(Matsushige Nakajima)

要旨：

厚鋼板のT型すみ肉サブマージアーク溶接の高能率化を目的に、溶接材料、最適溶接パラメータを、とくに溶込み深さと溶接金属の割れの面から検討し、以下の結果を得た。(1)溶接材料の開発、溶接パラメータの適正化により、ウェブ厚 25mm までの無開先両側一層溶接技術およびウェブ厚 80mm までの有開先両側一層溶接技術を開発した。(2)低Cワイヤ KW-50 を使用した場合の、溶接金属割れを防止するための母材許容C量を、拘束割れ試験により決定した。ウェブ厚 25mm の無開先両側一層溶接の場合は 0.18%まで、有開先ウェブ厚 80mm の両側一層溶接の場合は 0.14%まで許容できた。(3)大入熱溶接であっても、溶接継手特性は SM-490B 鋼の要求値を十分満足した。(4)開発法によるウェブ厚 20mm の無開先十字溶接継手の疲労特性は、従来法による溶接継手に比較して優れた値を示した。

Synopsis：

To develop a high-efficiency welding process of T-joints with a heavy section, welding materials and welding conditions were examined from the viewpoints of penetration depth and weld defects, especially weld metal cracking. The most appropriate submerged arc welding materials and welding method for one pass per side welding up to a 25-mm-thick web without groove preparation and up to a 80-mm-thick web with groove preparation were developed. Maximum allowable carbon content for base metal for preventing hot cracking was determined by the restraint cracking test to be below 0.18 mass% in the case of a 25-mm-thick web without groove preparation and 0.14 mass% in the case of a 80-mm-thick web with groove preparation when low-C wire KW-50 was used. The mechanical properties of the weld metal satisfied the requirements of the 490 MPa grade high tensile strength steel, though the weld heat input was much larger than that for the conventional welding method. The T-joints made by the developed method with a web thickness of 20mm without a groove showed higher fatigue strength than the conventional welded joints made by the multipass welding method.

本文は次のページから閲覧できます。

厚鋼板のT型すみ肉高能率サブマージアーク溶接技術*

川崎製鉄技報
26 (1994) 4, 168-173

High-Efficiency Submerged Arc Fillet Welding Process of T-Joint with Heavy Section



山口 忠政

Tadamasa Yamaguchi
鉄鋼企画・営業本部
溶接棒営業部 主任部
員(部長補)



林 三郎

Saburo Hayashi
鉄鋼企画・営業本部
溶接棒営業部** 主任
部員(課長補)



中島 松重

Matsushige Nakajima
川鉄メタルファブリカ
(株) 技術開発室 課長

要旨

厚鋼板のT型すみ肉サブマージアーク溶接の高能率化を目的に、溶接材料、最適溶接パラメータを、とくに溶込み深さと溶接金属の割れの面から検討し、以下の結果を得た。(1)溶接材料の開発、溶接パラメータの適正化により、ウェブ厚25mmまでの無開先両側一層溶接技術およびウェブ厚80mmまでの有開先両側一層溶接技術を開発した。(2)低CワイヤKW-50を使用した場合、溶接金属割れを防止するための母材許容C量を、拘束割れ試験により決定した。ウェブ厚25mmの無開先両側一層溶接の場合は0.18%まで、有開先ウェブ厚80mmの両側一層溶接の場合は0.14%まで許容できた。(3)大入熱溶接であっても、溶接継手特性はSM-490B鋼の要求値を十分満足した。(4)開発法によるウェブ厚20mmの無開先十字溶接継手の疲労特性は、従来法による溶接継手に比較して優れた値を示した。

Synopsis:

To develop a high-efficiency welding process of T-joints with a heavy section, welding materials and welding conditions were examined from the viewpoints of penetration depth and weld defects, especially weld metal cracking. The most appropriate submerged arc welding materials and welding method for one pass per side welding up to a 25-mm-thick web without groove preparation and up to a 80-mm-thick web with groove preparation were developed. Maximum allowable carbon content for base metal for preventing hot cracking was determined by the restraint cracking test to be below 0.18 mass% in the case of a 25-mm-thick web without groove preparation and 0.14 mass% in the case of a 80-mm-thick web with groove preparation when low-C wire KW-50 was used. The mechanical properties of the weld metal satisfied the requirements of the 490 MPa grade high tensile strength steel, though the weld heat input was much larger than that for the conventional welding method. The T-joints made by the developed method with a web thickness of 20 mm without a groove showed higher fatigue strength than the conventional welded joints made by the multipass welding method.

1 緒 言

建材やクレーンガーダー、重構造物などに用いられる厚肉溶接H形鋼においても、ボックス柱の溶接同様に、生産効率向上を目指した溶接の高能率化が検討されてきた。

クレーンガーダー、重構造物用のH形鋼の溶接では、一般にウェブ側に開先加工を施し、表側多層溶接、裏ガウジング、グラインダ仕上げ後裏側の多層溶接を行い、完全溶込みを得る方法がとられてきた。この方法では、溶接以外の手間のかかる工程が不可欠のため、溶接能率が悪く、能率向上に対する要望は大きいものがあった。

溶接の高能率化の方法としては、大入熱溶接法による溶接パス数の低減および溶接速度の向上が挙げられ、なかでも溶接パス数低減

の効果は極めて大きい。しかしながら、とくに大きな効果が期待できる一層溶接施工法を可能にするためには解決しなければならない課題も多く、ボックス柱の角溶接を対象にした検討はすでに行われ、高能率化が達成されている¹⁾²⁾。

ここでは、上記要望に応えるべく開発した、ウェブ厚25mmまでは無開先で、25mmを超え80mmまでは開先加工を施し、両側一層溶接法により完全溶込みを得る厚肉溶接H形鋼の高能率すみ肉サブマージアーク溶接技術について述べる。

2 実験方法

2.1 供試材

ウェブ用鋼板として板厚25mmおよび80mmのSM490B鋼を、また溶接材料として直径4.8mmおよび6.4mmの低C-2%Mn系溶接ワイヤKW-50と、新たに開発した焼成型フラックス

* 平成6年9月20日原稿受付

** 現川商溶材販売所

Table 1 Chemical compositions of base metals and wire

(mass%)

Grade	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Nb
Base metal (SM490B)	25	0.15	0.40	1.42	0.015	0.004	—	—
Base metal (SM490B)	80	0.14	0.34	1.37	0.012	0.003	0.14	0.026
Welding Wire (KW-50)		0.06	0.03	2.00	0.012	0.003	—	—

Table 2 Standard welding conditions used

Web thickness (mm)	Wire × Flux	Electrode	Wire diameter (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
25	KW-50×KB-U	L	4.8	1 300	32	400	12.5
		T	6.4	1 000	42		
80	KW-50×KB-US	L	6.4	2 000	35	200	45.8
		T	6.4	1 500	55		

KB-U およびウェブ厚 55 mm 以上の極厚材の有開先溶接用鉄粉添加焼成型フラックス KB-US を用いた。フランジにも原則としてウェブ用鋼板と同一のものを用了。

Table 1 に供試鋼板およびワイヤの化学組成を示す。

2.2 最適溶接条件の検討

無開先両側一層溶接で完全溶込みを得るためには、溶込み深さの確保と溶接欠陥、とくに溶接割れの防止が大きな課題となる。これは開先加工が必要な、ウェブ厚が 25 mm を超える溶接継手の場合も同様である。

溶込み深さの確保を前提に、ワイヤ最適狙い位置、フランジの角度および極間距離の溶込み深さに及ぼす影響等を検討した。Table 2 に、用いた標準溶接条件（電流、電圧、速度）を示す。

2.3 溶接割れ試験

JIS-Z 3153³⁾ で規定されている T 形溶接割れ試験方法では、板厚や試験片サイズが小さく拘束板もないため、今回開発した溶接法に対しての耐溶接割れ性を評価できない。そこで、ウェブ厚 25 mm の場合には、Fig. 1 に示すように、あらかじめ完全溶込み最適溶接条件で長さ 1 000 mm の T 形継手の裏側ビードを溶接し、その後スカラップをとった三角板により 210 mm ピッチで拘束し、さらにフランジの裏側にも三角板と同位置に拘束板を取付け、その後試験ビードを溶接する割れ試験を行った。溶接金属の C 量は、母材 C により変化させた。

ウェブ厚 80 mm の場合には、溶接長を大きくするため、Fig. 2 に示す長さ 2 000 mm の試験体を用いて行った。裏側と試験ビード側の両端およびフランジの裏側に 380 mm ピッチで拘束板を溶接し、ウェブ厚 25 mm の場合と同様の溶接割れ試験を行った。鋼板の C 量を広範囲に変化させることができなかったため、C 量を変化させたワイヤと鉄粉入りフラックス KB-US を適宜組み合わせて試験を行なった。

溶接後 48 時間してから拘束板をはずし、100 mm ピッチで切断して浸透探傷試験および断面検査を行い、溶接金属 C 量と割れの関係を調べた。

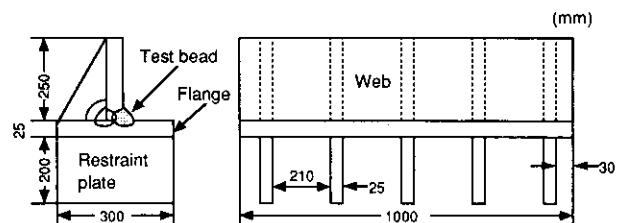


Fig. 1 Restraint cracking test method for fillet welded joint with 25-mm-thick web

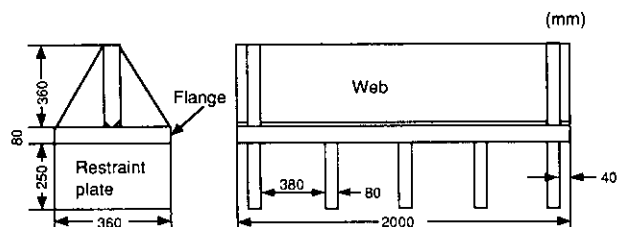


Fig. 2 Restraint cracking test method for fillet welded joint with 80-mm-thick web

2.4 溶接部の機械的性質

代表例として、無開先ウェブ厚 25 mm の T 継手および開先加工を施したウェブ厚 80 mm T 継手溶接部の、シャルピー衝撃試験および溶接金属の JIS A 2 号丸棒引張試験を実施した。シャルピー衝撃試験では、溶接金属以外のノッチはウェブ側の fusion line と HAZ に加工した。

2.5 溶接継手の疲労試験

クレーンガーダーなどでは疲労強度が問題となることから、KB-U を適用したウェブ厚 20 mm の十字すみ肉完全溶込み荷重伝達型疲労試験体を用いて疲労試験を行い、同時に実施した従来型多層溶接継手の疲労特性と比較した。Fig. 3 に試験片形状を示す。疲労試験においては、引張側のみの片振り条件を採用した。

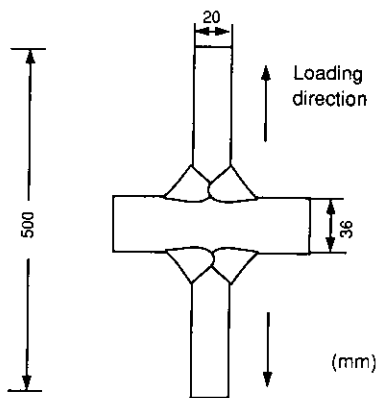


Fig. 3 Dimensions of specimen for fatigue test

3 実験結果および考察

3.1 溶接材料の選定

3.1.1 無開先T継手溶接のための溶接材料選定

開先をとらない溶接の場合には、溶着量の増加とビード幅の減少はビード形状の観点から問題となる。溶着量の増加は、ビード立ち上がり角度を増加させ、止端部に応力集中を起こす危険性がある。またビード幅の減少は、母材希釈の大きい無開先溶接の場合、母材C量の影響を受け、高温割れの危険性を増大させるため、ビード幅はできるだけ広くすべきである。

焼成型フラックスは、溶融型フラックスに比較してかさ密度が小さいため、幅の広いビードが得やすく、軟化温度も高いため、大入熱溶接に適している。種々検討した結果、かさ密度が約 1.0 g/cm^3 の $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系焼成型フラックス KB-U を開発した。このフラックスには溶着量を増加させる鉄粉は含まれていない。低温割れの観点から炭酸塩を添加し、炭酸塩の分解による CO_2 発生、それに伴うアーク中水素分圧低減により拡散性水素量の低減をはかっている。この KB-U を用いた溶接は、ウェブ厚 25 mm までの無開先両側一層溶接、およびウェブ厚 50 mm までの有開先両側一層溶接に適用した。

溶接ワイヤは、溶接割れ防止の観点から低 C 系である KW-50 の適用が必須となる。

3.1.2 極厚鋼板の有開先T継手溶接のための溶接材料選定

開先加工を施して溶接する極厚材の場合には、溶込み確保と同時に、大きな開先を埋めるための溶着量の確保も課題となる。溶着量は溶接電流の増大、溶接速度の低減により確保できるが、いずれの場合も溶接入熱量が大幅に増加するため、溶接継手特性および溶接ビード外観の著しい劣化を招きやすい。したがって、溶着量を増加させる手段として、ボックス柱の角溶接における考え方¹⁾と同様、鉄粉添加フラックスを利用することとし、鉄粉入り $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系焼成型フラックス KB-US を開発した。このフラックスを用いることにより、少ない入熱量で溶込みの確保と溶着量の確保が可能となった。ただし、アークの緊縮、フラックスかさ密度の増加によりビード幅が出にくいこと、および板厚が大きいことから、後記するように溶接割れに対する母材化学組成の規制、溶接材料の制限などは、無開先溶接の場合に比較して厳しくなる。このフラックスは、ウェブ厚 55 mm から 80 mm までの極厚鋼板の有開先両面一層溶接に適用される。

溶接ワイヤは、本技術の場合も溶接割れ防止の観点より、低 C 系である KW-50 の適用が基本となる。

3.2 最適溶接条件

3.2.1 無開先T継手溶接のための最適溶接条件選定

厚肉材の大入熱サブマージーク溶接においては、完全溶込みを確保し、かつアンダーカットや割れなどの溶接欠陥を防止するための適正溶接条件を設定することは非常に重要である。

溶込みを確保するためには先行極に直径 4.8 mm のワイヤを、またビード幅を広くするためには後行極に直径 6.4 mm のワイヤを用いる必要がある。

無開先両側一層溶接による完全溶込み溶接法は、ウェブ厚 25 mm までの適用を狙ったものである。この板厚を超えての適用では、深溶込みビードに起因して母材希釈量も大きくなり、ビード断面形状および溶接金属化学組成の両面から割れ発生の危険性が増すため、さらに検討が必要である。

Fig. 4 に溶込み深さに及ぼすフランジ角度の影響を示す。Fig. 5 には、フランジ角度 θ 、溶込み深さ P の定義を示す。溶込み深さ P を確保するためにはフランジの角度 θ は大きいほど有利であるが、 θ が約 65° を超えるとフランジ側の溶融金属が重力により垂れ落ち、フランジ側にアンダーカットが発生するため、溶込み深さとアンダーカットの両者を勘案してフランジの傾斜角は 60° に設定した。

フランジ傾斜角が 60° の場合の、溶込み深さに及ぼすワイヤ狙い位置の影響を Fig. 6 に示す。先行極の狙い位置 a がルートからややウェブ側のときに溶込みは最大となるが、 a が 5 mm になると、Photo 1 に示す如くフランジ側が溶融しなくなるため、 $0 \leq a \leq 3$ mm が適正である。後行極に最終ビード形状を整え、かつビード幅を広げる機能を持たせるために、狙い位置は先行極よりもややウェブ側とした。

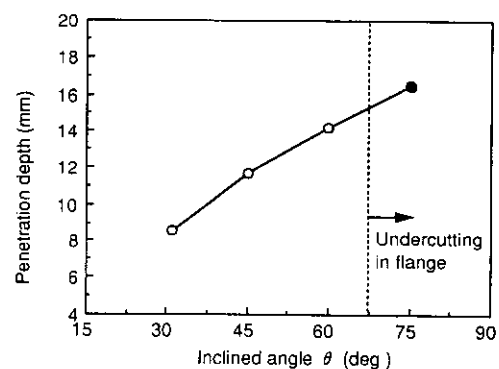


Fig. 4 Effect of inclined angle of flange on penetration depth and occurrence of undercutting

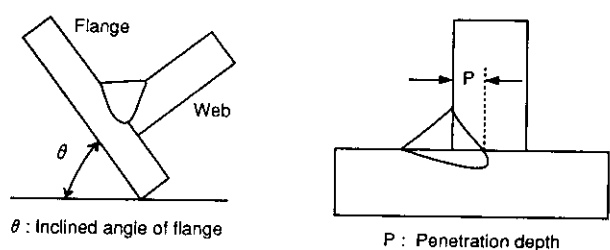


Fig. 5 Inclination of flange and depth of penetration

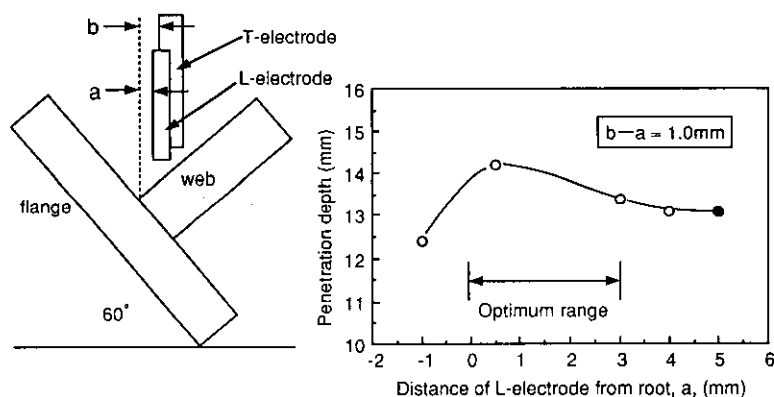


Fig. 6 Effect of wire location on penetration depth in fillet welding without groove

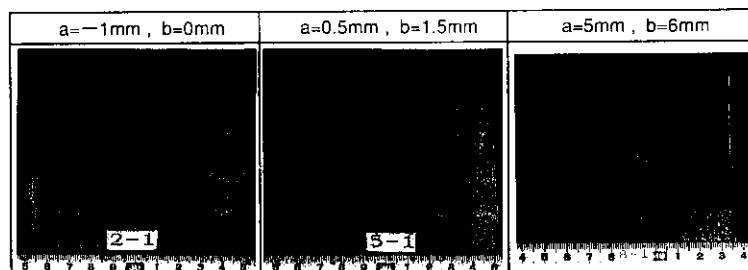


Photo 1 Effect of wire location on shape of penetration

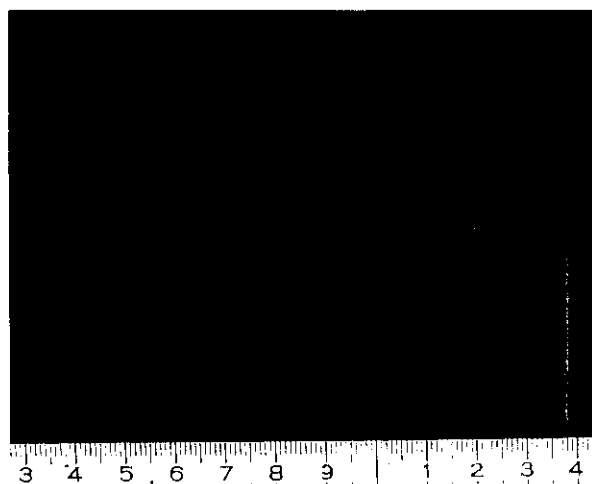


Photo 2 Macro section of full penetration fillet welded joint with 25-mm-thick web

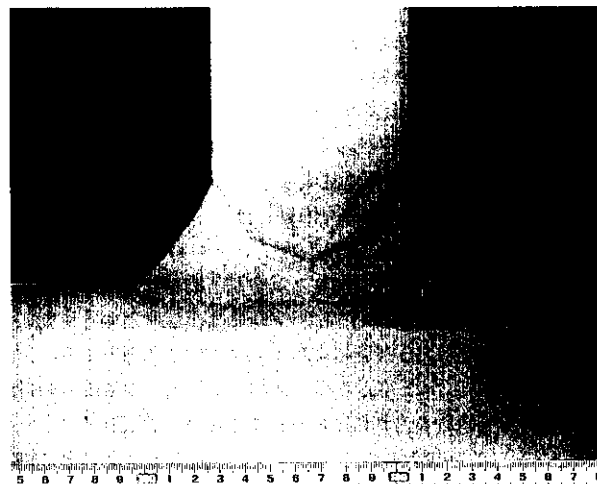


Photo 3 Macro section of full penetration fillet welded joint with 80-mm-thick web

その場合の溶込み深さに及ぼす極間距離の影響を極間距離 25~75 mm の範囲で調べた。この範囲の極間距離では溶込み深さに大きな差は認められなかったが、高温割れ防止の観点から溶融池はセミ・ワンプールが適当であるため、50~75 mm に設定した。

Photo 2 に、このようにして決定した適正溶接条件を用いて溶接した時の、ウェブ厚 25 mm の無開先両面一層溶接継手断面マクロ組織を示す。溶込みも十分であり、ビード止端部形状も良好である。

3.2.2 極厚鋼板の有開先 T 継手溶接のための最適溶接条件

開先加工を施した極厚鋼板の場合には、溶接電流を高めて溶込み

と溶着量を確保する対策が必要となるが、たとえばウェブ厚 80 mm の場合、先行極の溶接電流は 2000 A となるため、先行極も直径 6.4 mm ワイヤの適用が必要である。

ワイヤの狙い位置に対する基本的考え方は、上述のウェブ厚 25 mm の無開先の場合とはほぼ同じであるが、溶込み深さを確保するために、板厚の約 1/3 深さの開先を加工して溶接する必要がある。高温割れを防止するため、極間を調整してセミ・ワンプールとし、T 極によるホットトップ効果⁴⁾を利用しなければならない。

Photo 3 に、このようにして決定した適正溶接条件を用いて溶接したときの継手断面マクロ組織を示す。ウェブ厚 25 mm の無開先

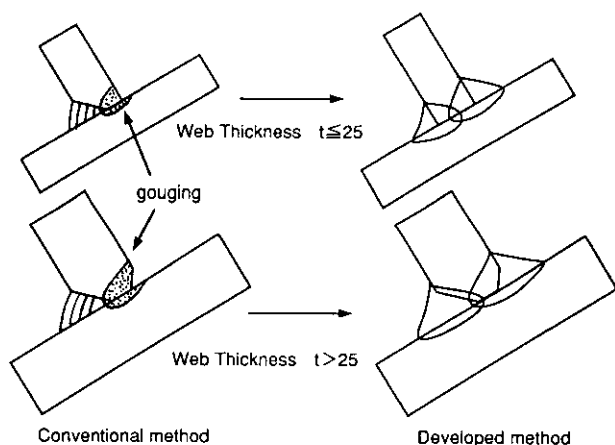


Fig. 7 Comparison of high efficiency fillet welding method with conventional one

両側一層溶接継手同様、溶込みも十分であり、ビード止端部形状も良好である。

Fig. 7 は、本開発技術を従来技術と比較して、模式的に示したものである。ガウジング、グラインダなどの工程が省略され、かつ溶接工数も著しく低減されるため、大幅な能率向上がはかれる。

3.3 拘束割れ試験結果

3.3.1 ウェブ厚 25 mm 試験片の拘束割れ試験結果

本報に示すような厚鋼板の両側一層すみ肉溶接がこれまで実施されなかった理由のひとつに、溶接金属の割れに対する危惧があった。ウェブ厚 25 mm の無開先溶接ビード断面におけるウェブ、フランジ、ワイヤの溶融比率はそれぞれ 39%、22%、39%であった。溶接金属の約 60%は母材からくるため、使用される鋼材の化学組成、なかでも凝固温度範囲を拡大する C 量に関しては細心の注意を払う必要がある。なお無開先の場合は、ウェブ厚 25 mm までは板厚によらず溶融比率はほぼ一定であった。

Fig. 8 は、C の歩留りを 100%と仮定し、溶融比率から求めた溶接金属の C 量計算値（横軸）と実際の C 分析値（縦軸）の関係を示したものである。CO 反応により C の一部は消費されるが、溶接金属の C 量が 0.12%を超える場合に割れが発生し、その時の計算 C 量は 0.135%である。すなわち、溶接金属の高温割れを防止する条件は（1）式で与えられ、ワイヤの C 量を低減するほど、許容できる母材 C 量は高くなる。

$$CWM_{cal} = 0.39 C_{web} + 0.22 C_{flange} + 0.39 C_{wire} \leq 0.135(\%) \quad (1)$$

CWM_{cal} : 溶接金属 C 量計算値(%)

C_{web} : ウェブの C 量(%)

C_{flange} : フランジの C 量(%)

C_{wire} : ワイヤの C 量(%)

現状の低 C ワイヤ KW-50(0.06%C)を用いると、無開先両側一層溶接の場合の母材許容 C 量は、（1）式より 0.18%と算出され、これ以上の C 量を有する鋼材への適用は高温割れ発生の危険性が高い。

3.3.2 ウェブ厚 80 mm 試験片の拘束割れ試験結果

ウェブ厚 80 mm の場合には、C 量を変化させたワイヤと鉄粉入りフラックス KB-US を適宜組み合わせて試験を行ない、溶融比率の測定から同様の手法で割れを評価した。

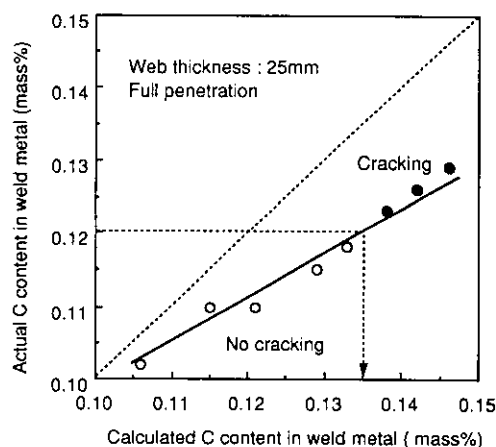


Fig. 8 Effect of C content on weld metal cracking in restraint cracking test

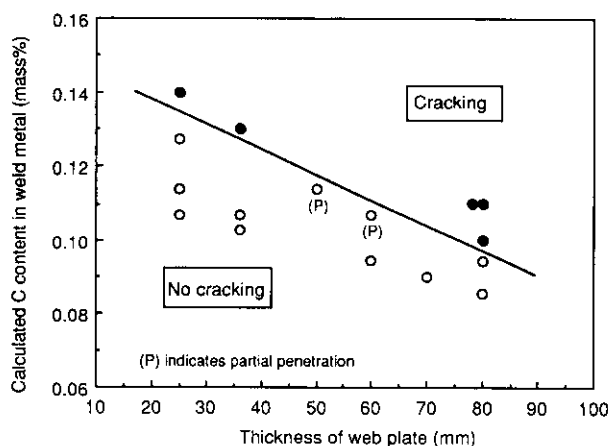


Fig. 9 Effects of web thickness and calculated C content in weld metal on weld metal cracking

Fig. 9 は、本報では触れていない割れ試験結果もあわせて、横軸を板厚、縦軸を溶接金属 C 量の計算値で示したものである。KB-U、KB-US の 2 種類のフラックスを用い、無開先および有開先の両方のデータが含まれているが、割れ境界線は溶接金属 C 量、および板厚と良い相関が認められ、1 本の線で表わすことができる。板厚が厚くなるほど拘束がきつくなるため限界 C 量は低くなり、ウェブ厚 80 mm の場合は、溶接金属の C 量計算値を 0.096%以下に抑えることが割れ防止の面から必要となる。開先加工を施した場合の溶込み率から無開先溶接の場合と同様の手法で、割れを防止するための条件を求めると、（2）式が得られる。

$$CWM_{cal} = 0.28 C_{web} + 0.22 C_{flange} + 0.50 C_{wire} \times 0.85 \leq 0.096(\%) \quad (2)$$

ウェブとフランジの C 量を等しいと仮定して、許容母材 C 量を求めると 0.14%となり、これ以上の C 量では割れ発生の可能性が高くなる。 C_{wire} の係数 0.85 は、フラックスに含有されている極低炭素鉄粉の効果による補正係数である。なお、有開先の場合も板厚によらず溶融比率はほぼ一定であった。

3.4 溶接部の機械的性質

Table 3 に、ウェブ厚 25 mm の無開先完全溶込み溶接部、およびウェブ厚 80 mm の有開先完全溶込み溶接部の機械的性質を示す。

Table 3 Mechanical properties of welded T-joints

Web thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)	Charpy absorbed energy at 0°C (J)				
					Weld metal	Fusion line	HAZ 1mm	HAZ 3mm	HAZ 5mm
25	505	582	28	65	62	129	54	66	85
					34	78	34	93	140
					72	58	44	87	110
80	498	615	32	58	81	122	97	108	190
					66	107	82	141	178
					76	91	130	174	192

いずれの場合も SM 490 B に要求される特性を十分満足している。

3.5 溶接継手の疲労特性

Fig. 10 は KB-U を用いた無開先両側一層溶接継手、および同一鋼板を用いた従来工法による多層溶接継手の十字試験片による荷重非伝達型疲労試験結果を比較したものである。KB-U を用いた無開先両側一層溶接継手の方が、従来工法継手よりも疲労強度が高い。この理由としては、無開先一層溶接の方が止端部形状が良好であること、および残留応力が多層溶接の場合より少ないことが挙げられ

る。応力範囲が 120 MPa のときの疲労寿命は 2×10^6 サイクルを十分満足している。この値は当社製鋼工場クレーンガーダーの疲労設計基準を満たしているため、実際に千葉製鉄所西工場新設備建設工事に適用された。

4 結 論

無開先あるいは開先加工を施すことによる T 継手の両側一層高能率溶接法の開発を目的に、適正溶接材料、適正溶接条件および割れ防止技術について検討し、以下の結果が得られた。

- (1) 低炭素ワイヤ KW-50 と新しい焼成型フラックス KB-U の組み合わせにより、無開先でウェブ板厚 25 mm までの、また鉄粉入りフラックス KB-US を用いる有開先ウェブ板厚 80 mm までの、両側一層完全溶込み溶接技術を開発した。この技術により溶接能率の大幅な向上が可能となった。
- (2) 拘束割れ試験により、溶接金属の割れを防止するための許容 C 量を決定した。KW-50 (C: 0.06%) を用いる場合、無開先ウェブ厚 25 mm の母材 C 量は 0.18% まで、有開先ウェブ厚 80 mm の場合の母材 C 量は 0.14% まで許容できる。
- (3) 両側一層大入熱サブマージーク溶接であっても、溶接金属の機械的性質は鋼材規格 SM 490 B の規格値を十分に満足した。
- (4) 十字溶接継手による荷重伝達型疲労試験において、KB-U を用いた無開先両側一層溶接継手は、従来の多層溶接継手よりも優れた疲労特性を示した。

なお、本レポートでは完全溶込み溶接技術について述べたが、全く同様の考え方は部分溶込みすみ肉溶接にも適用可能であり、部分溶込み標準溶接技術も開発済みである⁵⁾。

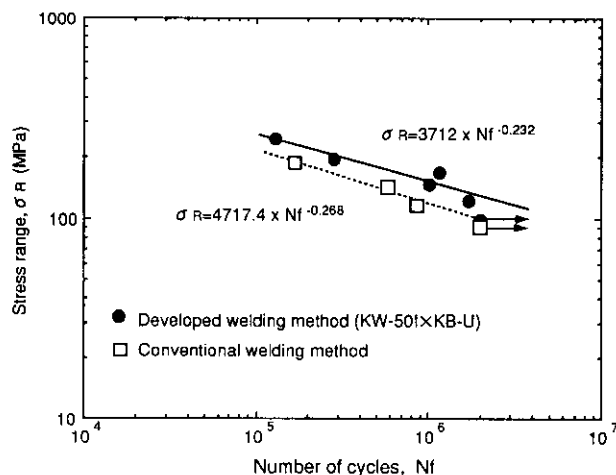


Fig. 10 Fatigue test result of cruciformed fillet welded joint by conventional and developed welding methods

参 考 文 献

- 1) S. Sakaguchi, T. Yamaguchi, and C. Shiga: "One pass submerged arc welding with flux containing iron powder for thick plates," IIW Doc. XII-1156-90, Montreal (Canada), (1990)
- 2) 長谷 薫: 「ボックス柱角継手部の高能率サブマージーク溶接」, 神戸製鋼技報, 40(1990)2, 93-96
- 3) JIS Z 3153: T 形溶接われ試験方法
- 4) 赤秀公造: 「高能率深溶込み多電極サブマージーク溶接法の開発とその応用」, 大阪大学工学部学位論文 (1980)
- 5) 中島松重, 山口忠政, 日黒喜三, 林 三郎: 「開先なし極厚 T 型すみ肉高能率溶接法の開発」, 溶接学会全国大会講演概要集第 50 集, (1992), 152-153