

最近の厚板溶接技術および熱影響部組織制御技術の進歩

Recent Development of Welding Technology and Microstructure Control in Heat Affected Zone for High Performance Steel Plates

小野 守章 ONO Moriaki JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・工博

要旨

TMCP (thermo-mechanical controlled processing: 加工熱処理) 鋼の実用化とともに、鋼材の使用環境がますます厳しくなる中、溶接熱影響部の靱性および溶接性への要求特性も同時に厳格になってきた。また、溶接構造物の大型化が求められるようになり、国際競争力を維持する上でも溶接施工面で高能率が重視されるようになってきた。その結果として、1パスの大入熱溶接技術や狭開先での小入熱溶接の研究開発が進められ、ここ数年で溶接金属および溶接熱影響部の特性が大きく進歩した。一方で、構造物の大型化、軽量化を達成する上で、高強度鋼板の適用拡大が図られている。そこでは、高エネルギー密度溶接の利用などが活発に研究されるとともに、耐疲労特性や耐変形のための溶接技術による高機能化が検討されている。本稿では、高能率溶接技術の進歩と高強度鋼適用のための高機能化接合技術について概説する。

Abstract:

While a utilization of thermo-mechanically controlled processing (TMCP) enabled a manufacturing of high performance steels, the claims for higher impact toughness at weld heat-affected zone (HAZ) and the better properties in weldability have been more stringent since applied environments of those steels become more and more hostile. Meanwhile, welded structures are demanded to be large-scaled; i.e., the enhancement of their construction efficiency becomes crucial to sustain the global competitiveness. As a consequence, research and development toward one-pass, high heat-input welding and narrow-grooved, low heat-input welding technologies have been undertaken, which in the past few years significantly advanced the properties of weld metal and HAZ. On the other hand, high strength steels have magnified the fields of their applications implementing the large-scale and light-weight of the structures, where high energy-density welding has been vitally investigated accompanying with the studies on highly-functioned welding technologies for fatigue-proof properties and deformation-controlling. This article briefs on progress of the high-efficiency welding technologies and highly-functioned welding technologies for applications of high strength steels.

1. はじめに

TMCP (thermo-mechanical controlled processing) 鋼の実用化とともに、鋼材の使用環境がますます厳しくなる中、溶接熱影響部の靱性および溶接性への要求特性も同時に厳格になってきた。また、溶接構造物の大型化が求められるようになり、国際競争力を維持する上でも溶接施工面で高

能率が重視されるようになってきた。たとえば、1パスのサブマージアーク溶接 (SAW)、エレクトロガスアーク溶接 (EGW) やエレクトロスラグ溶接 (ESW) のような大入熱溶接や小入熱溶接の狭開先のガスマタルアーク溶接 (GMAW) などとその代表的な技術開発事例である。それらの溶接技術とともに、溶接熱影響部の組織制御についても大きな進歩がみられた。すなわち、鋼板の造り込みが TMCP を適用することで必要最小限の合金添加で高強度・厚肉化が可能となり、高能率の溶接技術を適用しつつ、大入熱溶接での熱影響部の材質劣化を抑制するような HAZ

組織制御や小入熱多パス溶接での2相域再加熱領域での靱性劣化抑制が達成できる技術が確立され、造船・建築などの重厚長大分野で実用化されている。JFE スチールではこれらの要望にこたえるために大入熱溶接熱影響部組織制御技術(JFE EWEL[®])¹⁾やアーク集中性に優れ、極低スパッタ化と深溶け込みを両立させたJ-STAR[®] (JFE Spray Transfer Arc Welding) 溶接技術を開発し²⁾、多方面で実用化に至っている。

また、高強度鋼板の適用拡大にともなって、従来から問題である疲労強度や溶接時の変形についての技術開発も行われてきた。一般に、溶接継手の疲労強度は鋼板の強度が上昇しても向上せず、このことが高強度鋼適用拡大の妨げとなっている。さらに、鋼構造物の溶接施工時に生じる変形を矯正するためにも多くのエネルギーや労力が費やされており、高強度鋼の利用拡大のネックとなっている。そこで、JFE スチールでは溶接金属の相変態時の膨張を利用することで、溶接部に圧縮の残留応力を導入し、耐疲労特性の向上を達成する技術を開発してきた。そして、その原理を応用することで、溶接変形の抑制を行い、溶接構造物の寸法精度を向上させるための溶接材料の開発に取り組んできた。本稿では、高能率溶接技術の進歩と高強度鋼適用のための高機能化接合技術について概説する。

2. 高能率溶接技術の進歩

2.1 大入熱溶接技術

近年の造船および建築分野においては、構造の大型化にともない使用する鋼材の厚肉化、高強度化が進んでいる。厚肉高強度鋼板の溶接では、継手特性の劣化を懸念して多層溶接が適用されていたが、工期短縮、施工コスト削減などの要望から大入熱溶接による高能率化が望まれている。

造船分野においては、遠距離貨物輸送の需要拡大にともなって、コンテナ船の大型化が急速に進み、最近では7000 TEU (twenty-foot equivalent unit : 20 フィートコンテナ換算個数) を超える大型船が建造され、10000 TEU クラスのメガキャリアーの建造も現実化しつつある³⁾。このような大型コンテナ船には、降伏強度 (YS) 390 N/mm² 級で板厚が65 mm 以上の極厚鋼板が使用され、高能率の溶接方法の一つとして大入熱のEGWが適用されている。

一方、建築分野においては、都市部再開発事業の一環として超高層ビルの建設が増加している。最近の超高層ビルでは、商業スペース、オフィス、ホテルなどが重層化されるため、構造の大スパン化、複雑化が進み、一部の柱材として設計基準強度 390~440 N/mm²、板厚 40 mm 以上の高強度厚鋼板を用いた四面ボックス柱が使用されるようになった。四面ボックス柱の製造には、角溶接にSAW、内ダイアフラム溶接にESWなどの大入熱溶接が適用されている。

これら大入熱溶接では、溶接熱影響部 (HAZ : heat affected zone) が長時間高温にさらされるため、ミクロ組織の粗大化による靱性低下が顕著となり、高いHAZ靱性を得ることは困難とされてきた。しかしながら、造船分野では、継手の要求仕様として-20℃ないしは-40℃でのシャルピー吸収エネルギー値の保証が要求され、建築分野では、兵庫県南部地震以降、耐震性の観点から大入熱溶接を適用される部材にも高靱性が要求されるようになった⁴⁾。

このような大入熱溶接部高靱性化の課題に対し、JFE スチールでは独自の大入熱溶接 HAZ 靱性向上技術「JFE EWEL」¹⁾を開発し、大入熱 HAZ 靱性に優れた造船用高張力鋼板および建築用高張力鋼板の製造に適用している。図1に「JFE EWEL」の要素技術を示す。この要素技術の中で、B、Nのマイクロアロイング制御に関しては、溶接金属からBを拡散させてTiN添加鋼のボンド部近傍 HAZ 靱性を向上させるという従来にはない新技術を適用している⁵⁾。図2にこのB拡散利用技術の模式図を示す。鋼板に

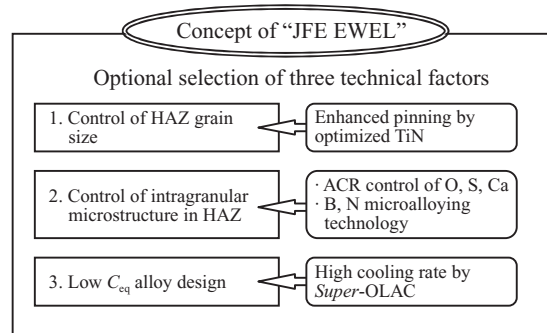


図1 HAZ靱性向上技術「JFE EWEL」の概念と技術要素
Fig.1 Concept and technical factors of HAZ toughness improvement technology "JFE EWEL"

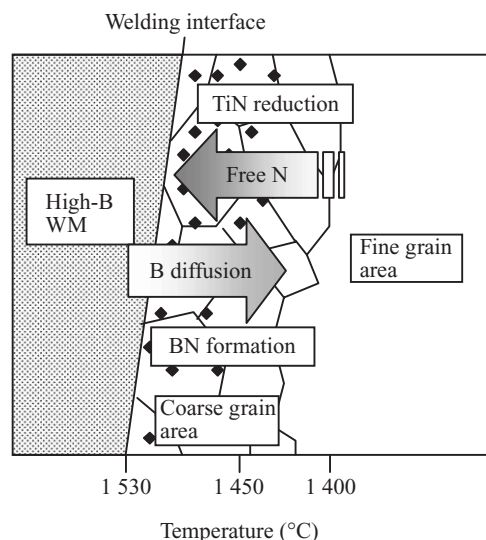
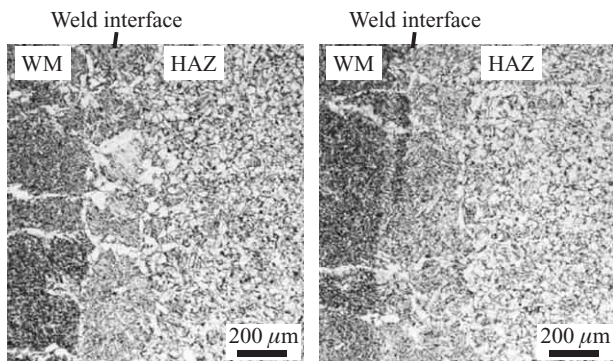


図2 高B含有溶接金属のボンド近傍におけるTiN固溶およびB拡散の模式図
Fig.2 Schematic illustration of TiN resolution and boron diffusion around weld interface of high-boron containing weld metal



(a) B content in WM: 11 ppm (b) B content in WM: 40 ppm
写真1 EGW 溶接部のボンド近傍ミクロ組織 (板厚: 65 mm, 入熱: 50 kJ/mm)

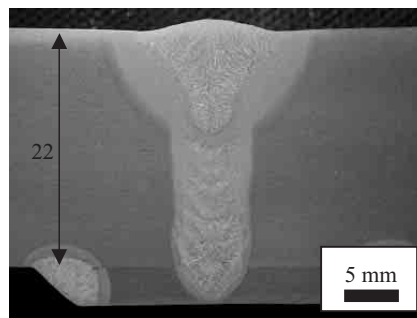
Photo 1 Microstructures around weld interface of EGW welds (Plate thickness: 65 mm, Heat input: 50 kJ/mm)

添加した TiN は、ボンド部近傍では固溶しフリー N を生成する。フリー N は HAZ 素地の靱性を低下させるが、溶接金属から拡散した B がフリー N と結合し BN を形成することで、フリー N による靱性低下を抑制するとともに BN を核とするフェライト生成を促進し、ボンド部近傍の HAZ 組織を微細化する。**写真1** に実際の TiN 添加鋼 EGW 継手のボンド部近傍ミクロ組織を示す。本技術の適用により、ボンド部近傍組織がより微細になっている。

ボンド近傍 HAZ の靱性向上に有効である B を溶接金属からの HAZ に拡散させることにより、鋼中の B 添加量を抑制でき母材の強度、靱性設計の自由度を損なうことなく HAZ 靱性を向上できる。大入熱溶接における HAZ 高靱性化のような非常に困難な要求に対しては、鋼板の成分設計のみで対応することに限界があり、溶接金属からの B 拡散利用のような新たな技術の適用が実用化されている。

2.2 狭開先溶接技術

鋼構造物の大型化にともなう板厚の増加と高強度鋼の普及により溶接施工の能率向上と小入熱化を目的として狭開先溶接技術が開発された。1965 年から 1985 年にかけて特殊なトーチ構造と高速でのオシレート機能を有する装置が開発されたが、溶接技能者には高い技能が要求された。これらの狭開先溶接技術はギャップを 10 mm 前後とし、あくまで既存のアーカ溶接法を適用したものであり、狭開先溶接に適したアーカ溶接法そのものを検討した例はない。1990 年代に、電流波形制御あるいはシールドガス組成制御によりアークを制御することで板厚 19 mm、ギャップ 5 mm の施工が可能であるとの報告⁶⁾がなされている。これら狭開先に用いられるアーカ溶接法にはアーク集中による深い溶込みとスパッタの低減が必要不可欠である。これらの要求に対して、JFE スチールではアークの集中性に優れる CO₂ アーク溶接法でありながら極低スパッタ化と従来法以上の深い溶込みが得られる J-STAR Welding を開発した。この J-STAR を狭開先溶接に適用した継手例を**写真2**



Butt Joint
 Square groove-Gap: 5 mm

Welding conditions
 Electrode negative, 100% CO₂
 Puss number: 8
 Welding current: 300–350 A
 Welding speed: 600–1 200 mm/min
 Heat input: 6–10 kJ/cm

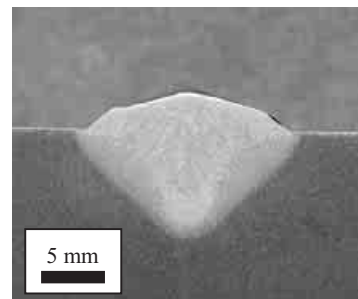
写真2 J-STAR を用いた狭開先溶接部の断面マクロ組織
Photo 2 Macrostructure of narrow gap welding with J-STAR

に示す。板厚 22 mm、無開先 (I 形)-ギャップ 5 mm の極狭開先の溶接でありながら良好なマクロ組織を得ている。

J-STAR Welding は狭開先の溶接に最も適したアーカ溶接法であり、従来の CO₂ アーク溶接法の極性が棒プラス (EP) であるのに対して、不安定とされる棒マイナスにおいて、適量の希土類金属 (REM) を添加したワイヤ KC-500 を用いることで安定な CO₂ アーク溶接を実現した。

従来の CO₂ アーク溶接は溶接時に多量のスパッタが発生するが、J-STAR Welding は、微細スプレー移行の実現により溶接電流 250~400 A の広い範囲で大幅なスパッタ低減を達成した^{2~5)}。加えてソフトなアーク音と低ヒューム化を実現している。

写真3 に断面マクロ組織を示す。アークの集中と安定化効果により溶接ビード中央部に深い溶込みが認められる。J-STAR Welding はこれらの特徴を生かすことでより狭い角度およびより狭い Gap の溶接 (狭開先溶接) を可能とし、(財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明を 2007 年 5



Welding conditions
 Electrode negative, 100% CO₂
 Welding current: 300 A
 Arc voltage: 30 V
 Welding speed: 400 mm/min

写真3 J-STAR を用いたビードオンプレート溶接の断面マクロ組織
Photo 3 Weld bead macrostructure in bead-on-plate welding with J-STAR

月に取得した。推奨の開先形状は無開先 (I 形)-ギャップ 5 mm, レ形 25°-ギャップ 2 mm である。

J-STAR Welding は、溶接ラインの作業環境改善, 溶接金属の品質と溶接ビード形状の安定化, 溶接構造部材の外観品質の向上, さらには厚板の高エネルギー組立溶接での活用がますます期待されている。

3. 高機能化溶接技術の進歩

3.1 耐疲労特性向上技術

一般に、鋼板母材では鋼板強度の増加とともに疲労強度も上昇するが、溶接継手ではほとんど変化しないことから、高強度鋼板の溶接継手の疲労強度向上は、重要な課題の一つとしてあげられている。溶接継手における疲労強度低下の要因としては、主に溶接止端部における応力集中や引張残留応力の存在が考えられ、日本鉄鋼協会「高強度鋼板の疲労強度研究委員会」⁷⁾において、マルテンサイト変態開始温度 (Ms 点) を下げることにより溶接部に圧縮残留応力を導入する、あるいは溶接部の引張残留応力を低減することによる溶接継手の疲労強度向上の可能性が検討された。

図 3 には相変態現象を用いた溶接部への圧縮残留応力の導入の原理を示す。溶接後の冷却過程において、通常の溶接材料を用いた場合には、細線に示すように溶接金属が 500°C 程度で相変態により膨張するものの、その後は温度低下ともなう鋼板による拘束を受けた状態で溶接金属は収縮するため、室温で引張残留応力が生じる。一方、太線に示すように、Ms 点が 200°C 程度でかつ変態が室温付近で終了する場合には、室温にて溶接部には圧縮の残留応力が導入されることになる。

本開発では、Ms 点を下げる Cr, Ni に着目して溶接金属の膨張が室温付近で終了するように溶接材料の化学組成を設計し⁸⁾、表 1 に示す化学組成の 10mass%Cr-10mass%Ni 溶接材料を独立行政法人物質・材料研究機構と共同開発した。

開発材料と従来の溶接材料にて鋼板の降伏応力と荷重非

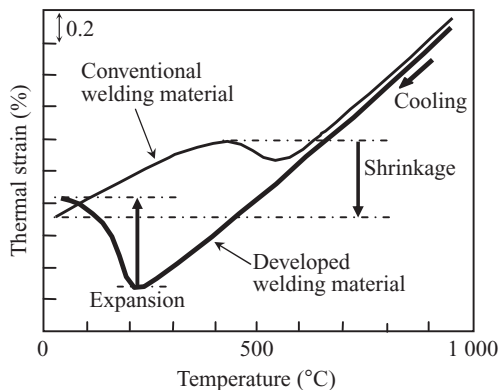


図 3 冷却過程における溶接金属の熱ひずみ履歴

Fig. 3 Thermal strain history during cooling in weld metal

表 1 開発溶接材料を用いた全溶着金属の化学組成

Table 1 Chemical composition of deposited metal of developed welding material (covered electrode)

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.05	0.79	0.35	0.004	0.002	10.2	10.7

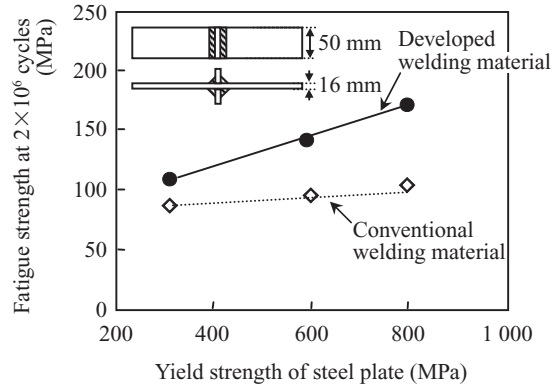


図 4 鋼板の降伏応力と溶接継手の 200 万回疲労強度の関係

Fig. 4 Relationship between yield strength of steel plate and fatigue strength of welded joint at 2×10^6 cycles

伝達型十字溶接継手の 200 万回疲労強度を比較した結果を図 4 に示す。従来の溶接材料では、降伏強度が増加しても疲労強度はほとんど変化していないが、開発溶接材料を適用した場合には、疲労強度が顕著に向上するとともに、鋼板の降伏強度の増加ともなう疲労強度の向上も現れている。さらに、開発溶接材料を用いることにより、角回し溶接継手、箱形断面溶接部材などの疲労強度も大幅に向上するとの結果が得られており⁹⁾、今後の高強度鋼の適用拡大や構造物の疲労安全性向上などが期待されている。

3.2 溶接変形抑制技術

3.1 節では、溶接金属の相変態時の膨張を利用した疲労強度向上技術について述べた。本節においては、溶接金属の相変態を溶接変形抑制に応用した技術について紹介する。

鋼構造物の溶接施工においては、溶接金属と鋼材の熱影響部からなる溶接部の不均一な熱収縮により、鋼構造物には変形が生じる。その変形量が、たとえば道路橋では道路橋示方書に、船舶では日本鋼船工作精度標準に規定されている許容範囲を超える場合には、それを矯正するためにガス加熱を始めとする多くのエネルギーが消費されている。また、鋼構造物の変形矯正には多くの労力も費やされており、鋼構造物を効率的に製作するためにも、溶接変形を低減して溶接構造物の寸法精度を向上させることが重要な課題となっている。

以上の背景のもと、溶接変形低減技術の開発を、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の「省エネルギー型

鋼構造接合技術の開発プロジェクト」(2003~2005年度)において実施した。

疲労強度向上技術においては、溶接部に圧縮残留応力をより大きく発生させるため、溶接金属の膨張が室温付近で終了するように溶接材料は設計されている。一方、溶接変形を低減させる場合には、変態膨張時の溶接金属周囲の鋼の降伏応力は小さい方が、すなわち、変形に対する拘束は、溶接金属の塑性変形による応力緩和が起こらない範囲で小さい方が良い。そのため、溶接材料開発のポイントは、溶接変形の低減に有効な変態開始温度範囲を明確にすることと、溶接材料に必要な作業性や継手の基本特性を具備することにある。

溶接金属の変態開始温度と角変形量の関係を図5に示す¹⁰⁾。継手は、板厚9mmのSM490Y鋼板を用いた長さ600mmのT字隅肉溶接継手で、溶接条件は220A-29V-40cm/min(入熱パラメータ $(Q/h^2) \leq 10 \text{ J/mm}^3$)である。本溶接条件の場合、角変形量は溶接金属の変態開始温度が350~450℃で最小となり、従来溶接材料に比べて約1.5~2.5mm/300mm低減している。

溶接金属はマルテンサイト組織であるため、伸び、韌性、耐割れ性が低いが、溶接金属の凝固モードをFAモード(初晶 δ フェライト)とすることにより向上が可能である。隅肉溶接金属のMs点が350~450℃であり、凝固モードがFAモードとなる溶接材料の化学組成は、鋼板からの希釈を考慮し、12mass%Cr-3mass%Ni系とした。さらに、フラックスを適正化することにより、従来溶接材料と同等の作業性と継手特性を有する単層水平隅肉溶接用フラックス入りワイヤを開発した¹¹⁾。表2に開発溶接材料の化学組成を示す。

開発溶接材料を用いて製作した構造体での溶接変形量低減効果を調べた。単層隅肉溶接構造体の代表例としてI桁

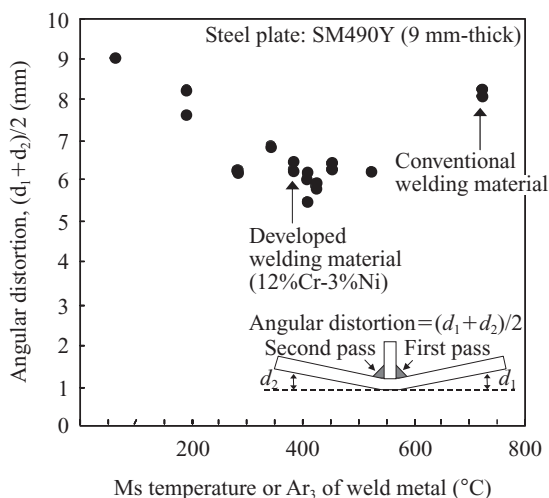


図5 溶接金属の変態開始温度とT字溶接継手の角変形量の関係

Fig.5 Relationship between Ms temperature or Ar₃ of weld metal and angular distortion of T-joint

表2 開発溶接材料(フラックス入りワイヤ)を用いた全溶着金属の化学組成

Table 2 Chemical composition of deposited metal of developed welding material (flux-cored wire)

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.057	0.49	1.71	0.008	0.005	3.0	12.1

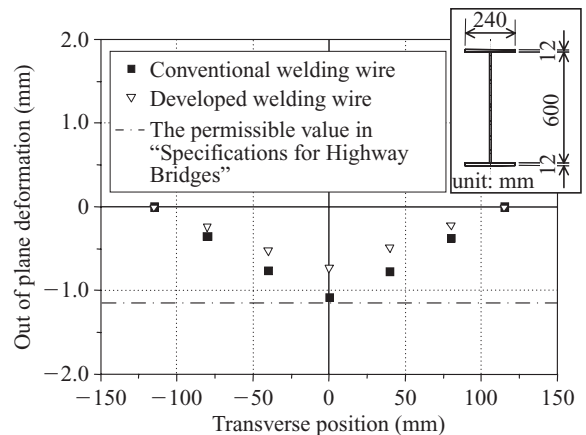


図6 I桁構造体モデルの面外変形量

Fig.6 Out of plane deformation of I-girder model

構造体を製作して下フランジの角変形量を計測し、道路橋示方書¹²⁾に記載の許容面外変形量と比較した¹³⁾。図6に計測結果を示すように、従来溶接材料を用いた施工では形状精度は許容値に対して余裕がないのに対し、開発溶接材料を用いて製作した構造体は余裕をもって規定値を満足した。開発溶接材料は、今後、溶接変形が問題となっている橋梁・造船・建設機械などの分野での活用が期待される。

4. 先進溶接技術

高エネルギー密度溶接の代表例であるレーザー溶接は、一般的なアーク溶接に比べて溶込みが深く、高速で、ひずみの少ない溶接が可能である。薄板の分野では実用化が進んでいるものの¹⁴⁾、鋼管・中厚板の分野では、研究開発レベルに留まっており¹⁵⁾、適用事例は少ないのが現状である。これは、十分な性能(出力やビーム品質など)を有するレーザー溶接装置自体が少ないことや、開先ギャップや目違い、狙い位置など施工精度の問題などが原因と考えられる。前者に対しては、ファイバーレーザーに代表される高品質かつ高出力のレーザー発振器も開発されるなどハード面での進歩は飛躍的であり、それらの問題はやがて解決されるものと期待される。一方、後者に対しては、アーク溶接との複合プロセス化(ハイブリッド溶接)を適用することで解決を図ることができると考えられる。

また、レーザー溶接と同じく高エネルギー密度溶接であるプラズマ溶接とアーク溶接のハイブリッド溶接による溶接

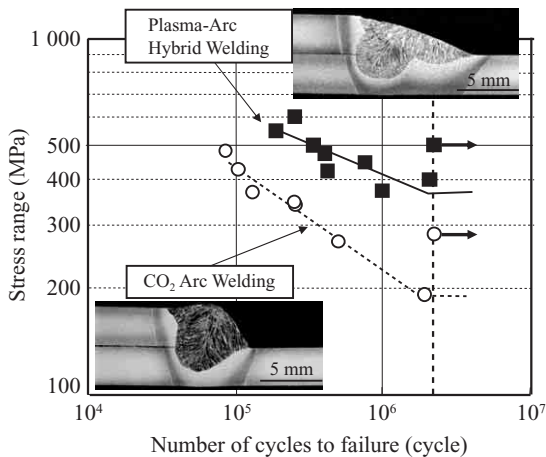


図7 溶接継手部の断面マクロ写真と疲労試験結果

Fig. 7 Cross-section macrograph and results of fatigue test for weld joints

部の疲労強度向上の検討例を紹介する。図7は、プラズマ・アークハイブリッド溶接（先行：アーク，後行：プラズマ）による重ね隅肉溶接継手の疲労試験結果である。ハイブリッド溶接では、アーク溶接に比べて平滑な溶接止端部が得られ、高い疲労特性を示している。この技術は、たとえば高疲労特性が要求される建築分野のT字隅肉溶接など厚板にも適用可能であると考えられる。

5. おわりに

ここ数年の溶接技術および溶接熱影響部の組織制御技術について高能率の観点で概説するとともに高機能化のための溶接技術の一部についても述べた。

近年の高強度鋼材の適用拡大に向けては、新しい接合技術の開発が重要な役割を担うと考えられ、本文中で触れたレーザを中心とした高エネルギー密度ビームを利用した溶接技術をハイブリッド化を通して早期に実用化していくことや、さらには1991年に英国TWIにて開発された摩擦攪拌接合などの新接合法を鋼の分野に適用していくことで、

より高度な技術をもってお客様のご要求に応えるよう技術開発に注力していきたい。

参考文献

- 1) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上善明. あたりあ. 2004, vol. 43, no. 3, p. 232-234.
- 2) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接技術. 2005, vol. 53, no. 3, p. 64-69.
- 3) 上田直樹, 大竹和彦, 坂本利伸, 西村信一, 森英男. 三菱重工技報. 2004, vol. 41, no. 6, p. 326-329.
- 4) 稲田達夫, 小川一郎. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 340-343.
- 5) 木谷靖, 池田倫正, 大井健次, 一宮克行. 溶接学会全国大会講演概要. 2003, no. 72, p. 108-109.
- 6) 中村照美, 平岡和雄. 溶接学会論文集. 2001, vol. 19, no. 1, p. 44-53.
- 7) 溶接用鋼の疲労強度向上に関する基礎検討. 日本鉄鋼協会高強度鋼板の疲労強度向上研究部会. 1995, p. 79-100.
- 8) 太田昭彦, 渡辺修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏. 溶接学会論文集. 2000, vol. 18, p. 141-145.
- 9) 森影康, 久保高宏, 安田功一. 溶接学会誌. 2004, vol. 73, no. 5.
- 10) 安田功一, 森影康, 松下行伸, 丸山敏治. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2006, p. 533-536.
- 11) 金裕哲, 李相亨. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2006, p. 547-533.
- 12) 道路橋示方書・同解説 (共通編・鋼橋編). 日本道路協会. p. 430-432.
- 13) 望月正人, 豊田政男, 森影康, 久保高宏, 猪瀬幸太郎, 中西保正, 公門泰博, 中島康雅. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2006, p. 537-546.
- 14) 小野守章, 吉武明英, 大村雅紀. 溶接学会論文集. 2003, vol. 21, no. 4, p. 515-521.
- 15) 村山雅智, 外館明. 溶接技術. 2006-04, p. 52-59.



小野 守章