

鋼部材溶接熱影響部の靱性に 溶接入熱量が与える影響に関する研究

本間宏二¹・三木千壽²

¹正会員 工博 東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻 社会人博士課程 (研究当時)
(新日本製鐵株式会社 鋼構造研究開発センター(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1))

²フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1)

鋼橋で一般に用いられている20~30 kJ/cm程度の比較的低入熱の溶接を行った場合と、通常の使用が制限されている120~150 kJ/cm程度および370 kJ/cm程度の大入熱溶接を対象に、溶接熱影響部の破壊靱性をシャルピー試験およびCTOD試験により検討した。本研究で「高性能鋼材」として扱ったSM490YB-TMC (熱加工制御) では、入熱量120~150 kJ/cmのエレクトロガス溶接による大入熱溶接の場合でも、JIS G 3106の溶接構造用圧延鋼材Bクラスで規定される「0℃で27Jのシャルピー吸収エネルギー」を満足し、かつ、限界CTOD値(下限値)は、低入熱溶接条件での溶接熱影響部と同程度の0℃で0.2mm程度であり、高性能鋼の大入熱に対する許容性能が発揮されていることが明らかになった。

Key Words : Steel, bridge, weld, heat input, Charpy test, CTOD, heat affected zone, high performance steel, elecrogas weld

1. はじめに

鋼構造物の溶接施工においては、鋼材熱影響部の靱性劣化を防止する目的で入熱量が制限されている。例えば、道路橋示方書では、SM570Q に対して 70 kJ/cm の制限がある¹⁾。しかし、鋼材の製造法の進歩により、その化学成分やミクロ組織は変化している。鋼構造物の合理化においては、鋼材が改良されたことを設計・製作に取り込んでいくことが重要である。例えば TMCP (Thermo Mechanical Control Process, 熱加工制御) 鋼に代表される高性能鋼材の特性を十分に発揮させるなど、鋼材性能の進歩を取り入れた橋梁設計製作技術の確立を目指すことはその一例である。ここでは、鋼材の高性能化が鋼橋製作における溶接の高効率化に寄与する可能性に着目した。具体的には、熱加工制御により結晶組織的改善あるいは微量元素添加により得られる性能改善を含む「高性能鋼材」を使用することによって大入熱溶接法の適用が可能であることを検討することを目的としている。その手段として溶接熱影響部の破壊靱性を把握することを狙いとした CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験を中心として実験的検討を行った。鋼部材の破壊靱性は、鋼橋の安全性にきわめて重要な指標のひとつであり、工学的に不可避免的に存在する微小な溶接欠陥、表面きずなどの応力集中部、実際に損傷事例に見られる疲労亀裂の存

在を念頭においたとき、鋼部材の全体破壊を未然に防止する上で、破壊靱性値の確保はきわめて重要な事項である²⁾。

溶接の入熱により、周辺部には溶接熱影響部 (HAZ) が形成される。一般に入熱量の増加は HAZ 靱性を低下させるが、特に入熱影響の大きいボンド部 (溶接金属と HAZ の境界) 近傍の HAZ 靱性低下は著しい。HAZ 靱性を確保するために、現状では一般に溶接入熱量を制限しており、ある程度の溶接施工効率の低下はやむをえないという考え方に立っている。前述のように、道路橋示方書における SM570Q (調質高張力鋼) を対象とした溶接入熱量の上限値 70 kJ/cm の他、引張強度 680MPa 級の高張力鋼でも、本州四国連絡橋公団の製作基準³⁾ で溶接入熱量の上限値が同様に規定されている。他の鋼種については、道路橋示方書では明確に上限値は規定されていないが、鋼橋製作の実際では事実上の上限値を 70 kJ/cm に設定している場合が多い。入熱に関する規定は、道路橋示方書の昭和 48 年度版において掲載され、その後、抜本的な見直しは行われていない。しかしながら、この間の鋼材や溶接材料の進歩は著しく、加えて、平成 8 年の道路橋示方書の改訂による使用可能板厚の 100 mm まで拡大によって、鋼構造部材を効率的に製作する上での高効率溶接法の適用拡大要求がますます高まっていると言える⁴⁾。

2. 鋼材および入熱量の異なる溶接継手に関する基本特性試験

実験では、3種類の鋼材に対して、溶接入熱量を変化させた溶接熱影響部の破壊靱性をシャルピー試験およびCTOD試験による小型試験レベルで検討した。すなわち、鋼橋で一般に用いられている20~30 kJ/cm程度の比較的低入熱の溶接を行った場合と、通常の使用が制限されている120~150 kJ/cm程度および370 kJ/cm程度の大入熱溶接を行った場合のHAZ靱性をシャルピー試験およびCTOD試験により検討した。使用した鋼材は、溶接構造用圧延鋼材JIS G 3106に規定されるSM490B, SM490YB-TMCおよびSM490YBの3種類を用いた。これらの鋼材の選定にあたっては、現在我が国の鉄鋼製造技術により一般的に製造される構造用鋼材（通常鋼材）および最近の製造技術の進歩を取り入れた構造用鋼材（高性能鋼材）であることを前提とし、前者（通常鋼材）は圧延ままの状態、後（高性能鋼材）は、圧延後に冷却温度を制御した微量添加元素を含む熱加工制御鋼（TMCP鋼）とした。本実験結果をもとに、大入熱溶接の適用による溶接熱影響部の破壊靱性に関する考察を行い、その適用性を明らかにする。

実験に用いた鋼材の機械的性質と化学成分を表-1, 表-2に各々示す。以降、便宜的に本実験で用いた通常鋼材SM490Bを鋼材(A), 高性能鋼材SM490YB-TMCを鋼材(B), 通常鋼材SM490YBを鋼材(C)とする。高性能鋼材(B)では、溶接熱影響部の脆化に影響が大きい炭素(C)および炭素当

量(Ceq)が鋼材(A), 鋼材(C)に比べて低減されていると同時に、靱性と強度向上に効果的といわれ(Ceq)が鋼材(A), 鋼材(C)に比べて低減されるマンガン(Mn), ニッケル(Ni), モリブテン(Mo)などの添加元素が含有されている⁵⁾。

まず、溶接継手の基本的特性を調査する目的で、溶接継手断面マクロ、ミクロ組織観察、硬さ試験、溶接継手シャルピー試験、溶接継手引張試験、および、CTOD試験による靱性評価試験を行った。

基本特性試験に使用した溶接試験体の溶接条件および溶接方法を表-3に、溶接材料を表-4に、溶接入熱量と供試鋼材の組み合わせを表-5に示す。溶接試験体は以下の5種類である。

- (1) 通常鋼材(A)に大入熱溶接(120~150 kJ/cm) — 記号(A)-E
- (2) 通常鋼材(A)に低入熱溶接(20~30 kJ/cm) — 記号(A)-C
- (3) 高性能鋼材(B)に大入熱溶接(120~150 kJ/cm) — 記号(B)-E
- (4) 高性能鋼材(B)に低入熱溶接(20~30 kJ/cm) — 記号(B)-C
- (5) 通常鋼材(C)に大入熱溶接(370 kJ/cm) — 記号(C)-ES

大入熱溶接方法としては、入熱量120~150 kJ/cmに対してエレクトロガス溶接法を、また、入熱量370 kJ/cmに対してエレクトロスラグ溶接法を用いた。一方、低入熱溶接方法としては、入熱量20~30 kJ/cmに対してCO₂ガスシールドアーク溶接法を用いた。

表-1 供試材の機械的性質

Notation	Specification	Classification	Thickness (mm)	Yield Point (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Charpy Absorbed Energy vEo (J)
(A)	SM490B	Conventional Steel	28	368	514	244
(B)	SM490YB-TMC	High Performance Steel	28	449	514	357
(C)	SM490YB	Conventional Steel	20	436	569	181

表-2 供試材の化学成分

Notation	Specification	Chemical Composition (%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	Ceq	
		X100			X1000		X100			X1000				X100	
(A)	SM490B	17	34	127	13	2								40	
(B)	SM490YB-TMC	7	14	153	9	3	18	1	3		2			34	
(C)	SM490YB	17	46	145	14	2					20			43	

表-3 溶接方法

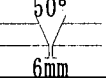
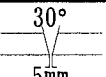

Notation	Welding Method	Thickness (mm)	Groove	Consumable and Diameter	Shield Gas	Amperage (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Number of Passes	Heat Input (kJ/cm)
C	CO ₂ gas shield arc	28		JIS Z 3313 YFW24 1.4mm	CO ₂	200	28	25	12	20 - 30
E	Electrogas	28		JIS Z 3319 YFEG22C 1.6mm	CO ₂	380	37	5.6-7.0	1	120-150
ES	Electroslag	20		YF15 1.6mm		380	46	29	1	370

表-4 溶接材料

Notation	Welding Method	Specification	Diameter (mm)	Chemical Composition (%)					
				C	Si	Mn	P	S	Mo
C	CO ₂ gas shield arc	SM490B	1.4	0.06	0.50	1.40	0.015	0.010	
E	Electrogas	SM490YB-TMC	1.6	0.08	0.35	1.63	0.014	0.010	0.17
ES	Electroslag	SM490YB	1.6	0.10	0.43	1.53	0.013	0.002	0.06

表-5 供試鋼材と溶接入熱量

Notation	Specification	Classification	Thickness (mm)	Welding Method	Heat Input (kJ/cm)
(A)-C	SM490B	Conventional Steel	28	CO ₂ gas	20 - 30
(A)-E	SM490B	Conventional Steel	28	Electrogas	120-150
(B)-C	SM490YB-TMC	High Performance Steel	28	CO ₂ gas	20 - 30
(B)-E	SM490YB-TMC	High Performance Steel	28	Electrogas	120-150
(C)-ES	SM490YB	Conventional Steel	20	Electroslag	370

(1) 溶接継手断面マクロ、ミクロ組織観察

溶接継手断面の性状を巨視的、微視的に把握するために、鋼材 (A), (B), (C) のそれぞれにおいて、エレクトロガス溶接、エレクトロスラグ溶接、CO₂ガスシールドアーク溶接を行った溶接継手の断面マクロ組織、ミクロ組織観察を行った。マクロ組織、ミクロ組織観察は、溶接継手の板厚方向断面を鏡面研磨し、5%硝酸水溶液でエッチングして観察した。ミクロ組織観察は、鏡面研磨後、ナイトール溶液(硝酸をエチルアルコールで5%に希釈した溶液)で表層をエッチングし、顕微鏡で100倍および400倍に拡大して行った。マクロ組織観察結果および、ミクロ組織観察結果を図-1(a)~(e)に示す。マクロ組織観察結果を参照すると、エレクトロスラグ溶接およびエレクトロガス溶接を行った溶接継手では、両者ともに、溶接熱影響部の最外縁は、フュージョンラインから10mm程度にお

よんでいるが、特に、入熱量が370 kJ/cmのエレクトロスラグ溶接では、フュージョンライン近傍の組織の粗粒化の程度は著しい。一方、CO₂ガスシールドアーク溶接の場合は入熱量が20~30 kJ/cmに抑えられているため、各溶接パスでの熱影響部の範囲は、3mm程度となっている。

図-1(a)~(e)のミクロ組織観察結果の中で、まず、通常鋼材(A)、高性能鋼材(B)の母材(Base Metal)同士を比較すると、通常鋼材(A)では、圧延ままの溶接構造用鋼材の典型的組織であるフェライト、パーライト組織(図-1(a)Base Metal)が観察される。また、高性能鋼材(B)では、TMC P (Thermo Mechanical Control Process) 鋼材の典型的な組織であるフェライト、ベイナイト組織(図-1(c)のBase Metal)で、同倍率の組織写真で比較すると、きわめて細粒化された組織が観察される。

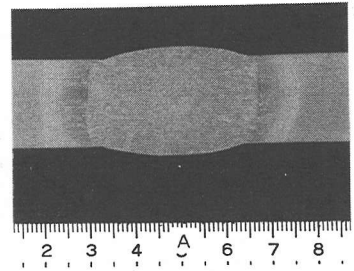
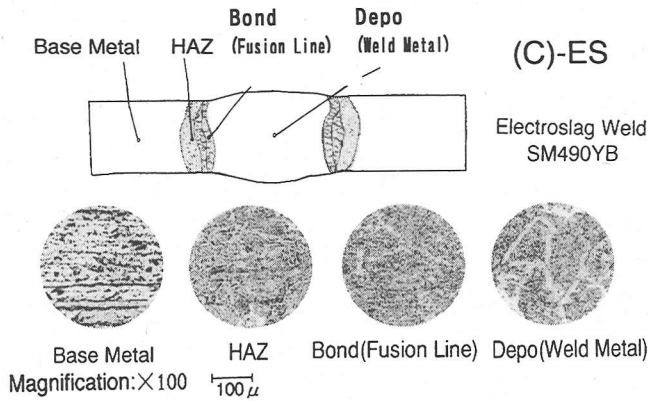


図-1(a) 溶接継手マイクロ組織 (通常鋼/エレクトロスラグ溶接法/入熱量 370~390kJ/cm)

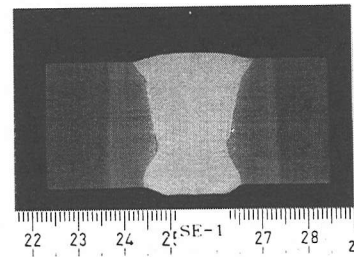
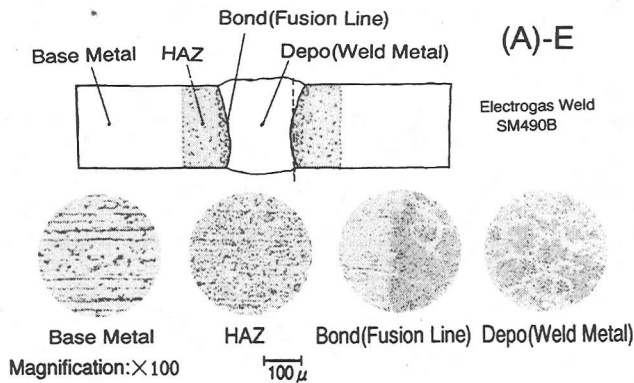


図-1(b) 溶接継手マイクロ組織 (通常鋼/エレクトロガス溶接法/入熱量 120~150kJ/cm)

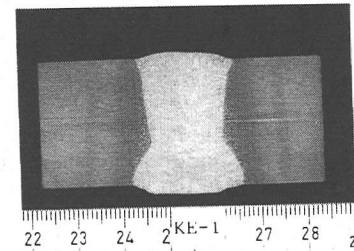
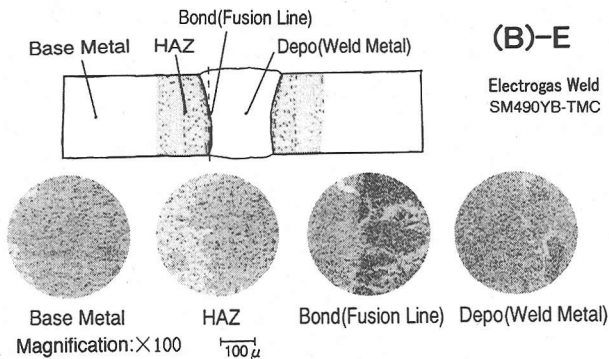


図-1(c) 溶接継手マイクロ組織 (高性能鋼/エレクトロガス溶接法/入熱量 120~150kJ/cm)

次に、溶接継手の組織を観察すると、図-1(a)~(e)の中の模式図に示すように、溶接金属部分、ボンド、HAZ、母材に大別され、5種類の溶接試験体でそれぞれに対応する位置の組織写真を示した。エレクトロスラグ溶接およびエレクトロガス溶接熱影響部に、マクロ組織観察でも見られた差異がより明確にみとめられる。溶接金属部分とHAZに着目すると、エレクトロガス溶接試験体において著しい結

晶粒の粗大化が見られる。図-1(b), (c)の母材を比較すると高性能鋼材(B)の方が微細な結晶粒が観察されるが、同じエレクトロガス溶接条件での鋼材(A), (B)の違いは、図-1(b), (c)のHAZを比較してみたところ、一見してマイクロ組織の違いは明確に見られない。

以降さらに、硬さ、シャルピー吸収エネルギー等の機械的特性に関して検討した。

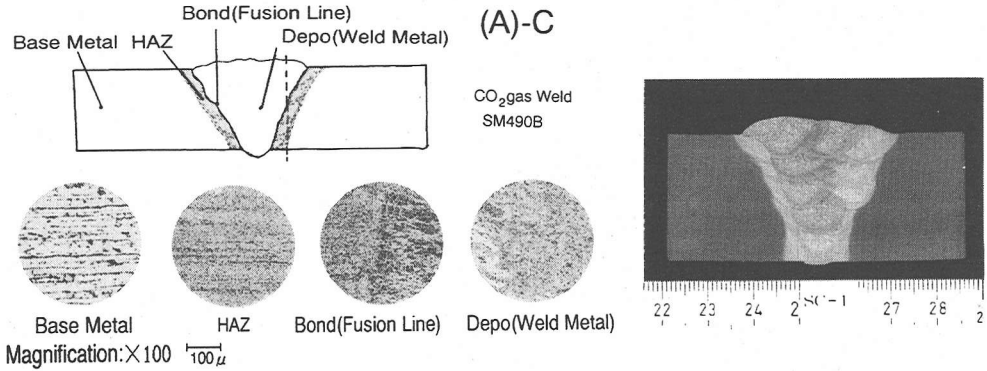


図-1(d) 溶接継手マイクロ組織(通常鋼/CO₂シールドガスアーク溶接法/入熱量 20~30kJ/cm)

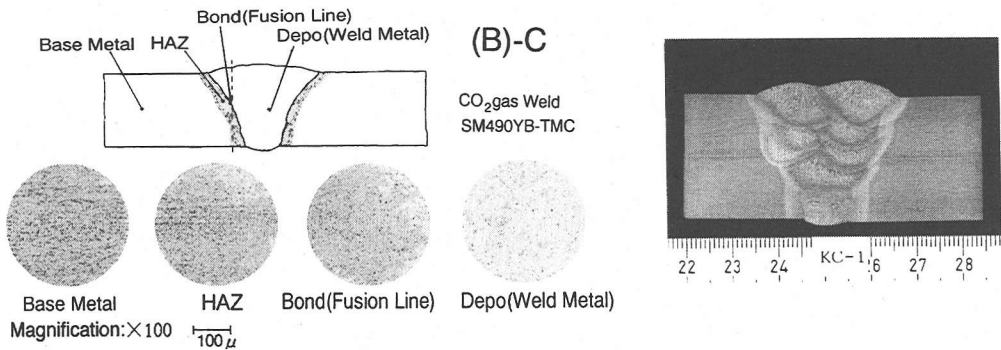


図-1(e) 溶接継手マイクロ組織(高性能鋼/CO₂シールドガスアーク溶接法/入熱量 20~30kJ/cm)

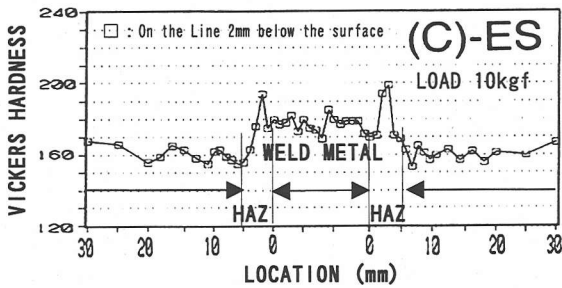


図-2(a) 溶接継手硬さ分布
(通常鋼/エレクトロスラグ溶接法)

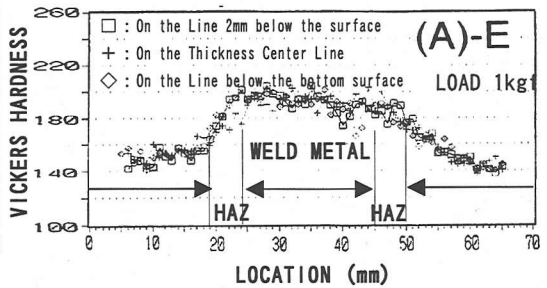


図-2(b) 溶接継手硬さ分布
(通常鋼/エレクトロガス溶接法)

(2) 溶接継手の硬さ試験

硬さ試験は、JIS Z 2244の「ピッカース硬さ試験方法」により、試験荷重 10kgf または 1kgf を使用して測定した。測定点は鋼板の表裏面から 2mm の線上および板厚中心線上で行った。硬さ試験の結果を図-2(a)~(e)に示す。母材ではいずれもピッカース硬さで 150 前後を示すのに対し、溶接部、特にポンド部の硬さに上昇が見られ、ピッカース硬さ

190~200 を示す。溶接方法による違いは、ピッカース硬さ絶対値では明確に見られないが、ポンド部の硬さ上昇が最も明確にみられるのがエレクトロスラグ溶接であった。一方、CO₂ガスシールドアーク溶接では、何回も熱影響を受ける再熱 HAZ の存在により組織が複雑化していることを反映し、ピッカース硬さのばらつきが大きいことが観察される。

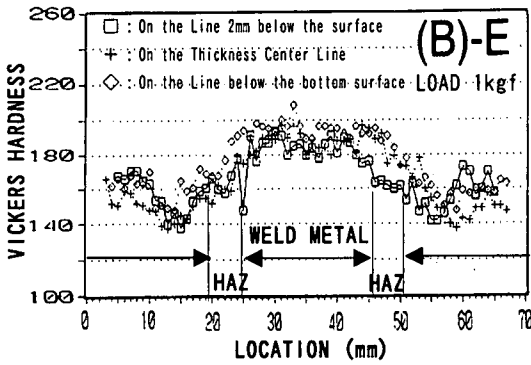


図-2(c) 溶接継手硬さ分布
(高性能鋼/エレクトロガス溶接法)

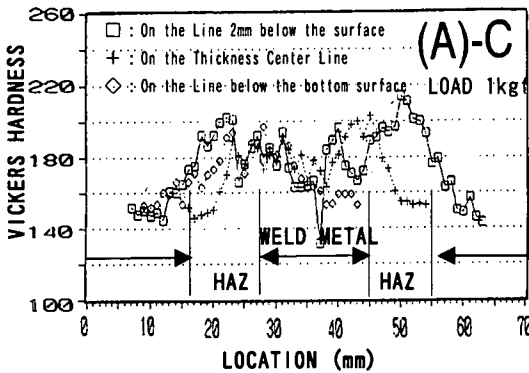


図-2(d) 溶接継手硬さ分布
(通常鋼/CO₂シールドガスアーク溶接法)

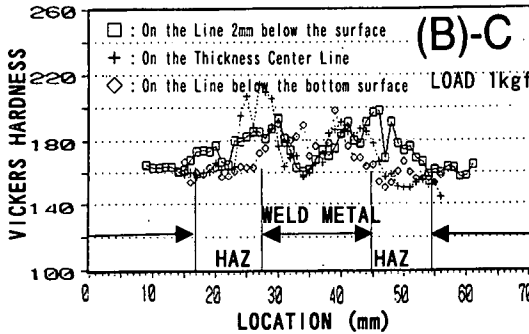


図-2(e) 溶接継手硬さ分布
(高性能鋼/CO₂シールドガスアーク溶接法)

(3) 溶接継手シャルピー試験

シャルピー試験は、JIS Z 3128 の溶接継手の衝撃試験方法に従って行った。試験片採取にあたっては、図-3 に示すように、2mm V ノッチ 4号試験片を板厚方向に 1/4 の線を中心として採取し、ノッチ

中央位置が溶接金属中央(記号 W)、ポンド(記号 B)、母材 HAZ 境界(記号 H)に位置するように3種類の試験片を用意した。試験片の長手方向と鋼材の圧延方向は一致させた。

シャルピー試験の方法は、JIS Z 2242 金属材料衝撃試験方法に従って行った。シャルピー吸収エネルギーの遷移曲線を求めるために6温度で各3本のシャルピー試験を行い、吸収エネルギーと脆性破面率を測定した。

図-4 にまず、通常鋼材(A)、高性能鋼材(B)の2種類の母材のシャルピー吸収エネルギー遷移曲線と脆性破面率を示す。2種類の母材のシャルピー吸収エネルギー遷移曲線の結果を見ると、破面遷移温度(vTrs)と0℃でのシャルピー吸収エネルギー(vEo)において、両者の差が鮮明に読み取れる。すなわち、破面遷移温度で(A)は-23℃、(B)は-124℃、0℃でのシャルピー吸収エネルギーで(A)は225J、(B)は350Jという結果が得られており、高性能鋼材(B)の方は、通常鋼材(A)より、きわめて低い破面遷移温度と、きわめて高い吸収エネルギーを有していることが観察され、靱性がきわめて優れた鋼材であると言える。また、表-1 に示したように、通常鋼材(C)の0℃でのシャルピー吸収エネルギー(vEo)は、181Jであり、通常鋼材(A)に比べて若干低い値である。

次に、図-5 (a), (b)に溶接試験体間の比較を示した。図-5 (a)のエレクトロslag溶接を行った溶接継手では、HAZのシャルピー吸収エネルギーが最も低下しており、10J程度の値となっている。母材のシャルピー吸収エネルギーが181Jであったことを考えると、370 kJ/cmの入熱量の影響が非常に大きいことが判明した。橋梁部材として溶接熱影響部にこのような大幅な靱性低下を発生させるような溶接方法および入熱量は通常鋼材に対して不適であるといえる。

また、図-5 (b)に示す入熱量120~150 kJ/cmのエレクトロガス溶接法を行った溶接継手では、母材、HAZ、ポンド、デポと順を追ってシャルピー吸収エネルギーが低下している。通常鋼材(A)、高性能鋼材(B)の差異は、HAZ、ポンドで顕著に見られる。さらに、図-5 (c)に示す入熱量20~30 kJ/cmのCO₂ガスシールドアーク溶接法を行った溶接継手では、同様にポンド、デポでシャルピー吸収エネルギー低下が見られるが、HAZでは逆に上昇している場合も見られる。

本結果を解釈するにあたり、鋼橋製作現場で溶接継手性能の目安として一般的に使用されているように「溶接継手シャルピー吸収エネルギーが母材に要求される規格値を上回ることを判断基準とするならば、370 kJ/cmの入熱量のエレクトロslag溶接において、この目安を満足しないが、120~150 kJ/cmのエレクトロガス溶接法を含むその他の溶接法では、通常鋼材(A)、高性能鋼材(B)ともに全てこの目安を満足する。

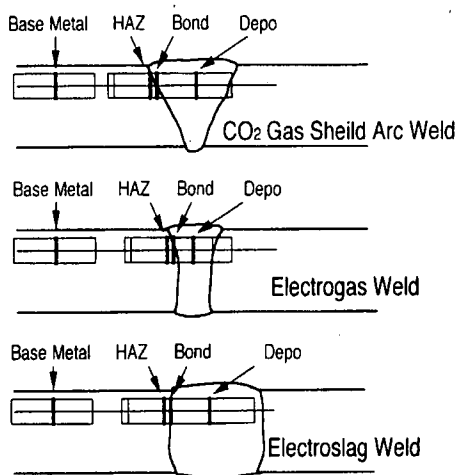


図-3 溶接継手シャルピー試験のノッチ位置

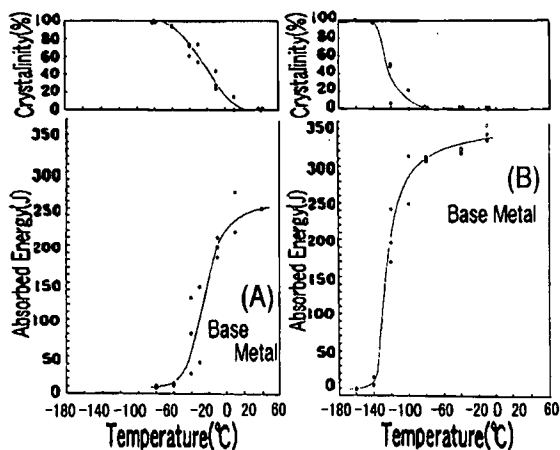


図-4 通常鋼(A)、高性能鋼(B)の母材シャルピー試験結果

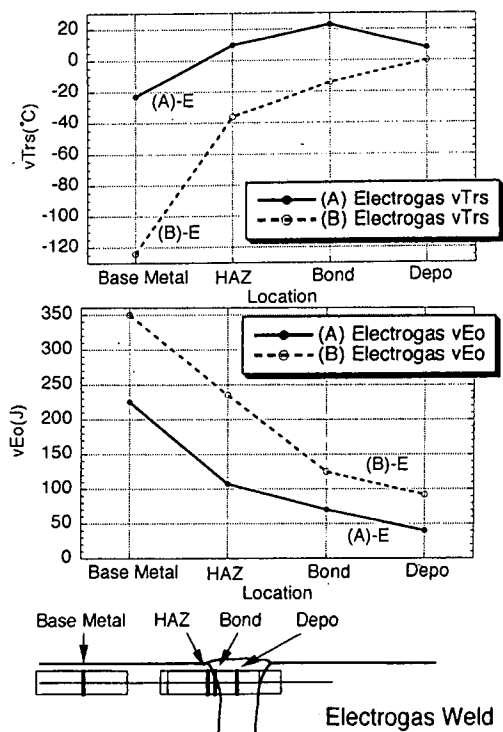


図-5(b) 溶接継手シャルピー試験結果 (エレクトログラス溶接法)

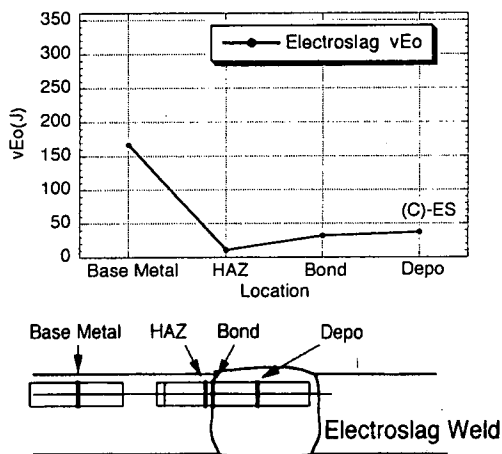


図-5(a) 溶接継手シャルピー試験結果 (エレクトロスラグ溶接法)

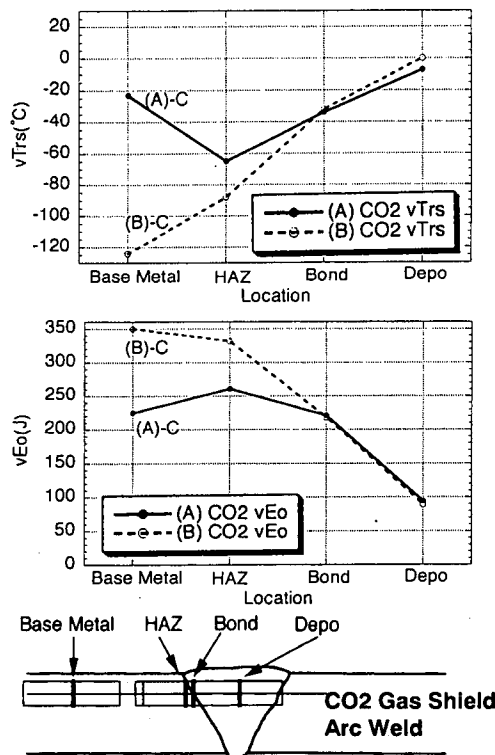


図-5(c) 溶接継手シャルピー試験結果 (CO₂シールドガス溶接法)

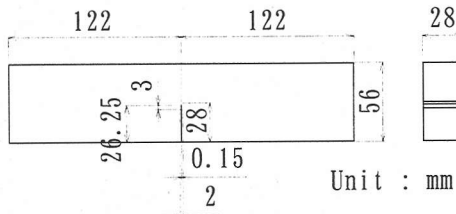
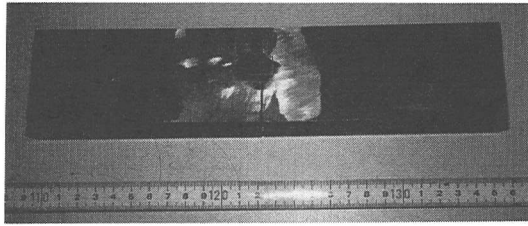


図-6 CTOD試験片

3. 溶接継手 CTOD 試験による検討

さらに、溶接継手の CTOD 試験による検討を行った。前述のシャルピー試験に加えて、溶接継手のように組織が複雑に構成され、また局所的な脆化域の存在下での破壊現象を評価する目的で、溶接熱影響部 CTOD 試験方法によって詳細な検討を行った。

(1) 溶接継手 CTOD 試験方法

本節では、破壊力学的な評価が可能な CTOD 試験による溶接継手の破壊靱性の検討を行った。溶接継手の CTOD 試験は、日本溶接協会規格の「溶接熱影響部 CTOD 試験方法に関する指針」⁶⁾ および、「亀裂先端開口変位 (CTOD) 試験方法」⁷⁾ に従い、溶接熱影響部の不安定破壊が開始する破壊靱性の評価を行った。本指針では、特定の溶接継手の構造安全性評価に用いる破壊靱性を求める場合、試験目的に応じた開先形状、溶接条件を使用することが望ましいとされている。

試験板厚は供試材の板厚 28mm とし、シャルピー試験と同一の、鋼材 (A)、鋼材 (B) の 2 鋼種につき、大入熱 (エレクトロガス溶接)、低入熱溶接 (CO₂ ガスシールドアーク溶接) を行った計 4 種類の供試材を用いた。図-6 に示すように、試験片形状は B X 2 B タイプ (W = 2 B, W: 試験片幅, B: 試験片厚さ) の標準試験片を用いた。ノッチ位置は図-7 示すように、エレクトロガス溶接、CO₂ ガスシールドアーク溶接ともにボンドを中心とし、母材、溶接金属とノッチの交差する部分が母材 50%、溶接金属 50% となるように設定した。CTOD 試験にあたっては、試験片を保冷容器中に固定し、試験温度、20℃、-10℃ (または -15℃)、-40℃ の 3 温度にて限界 CTOD 値を算出した。

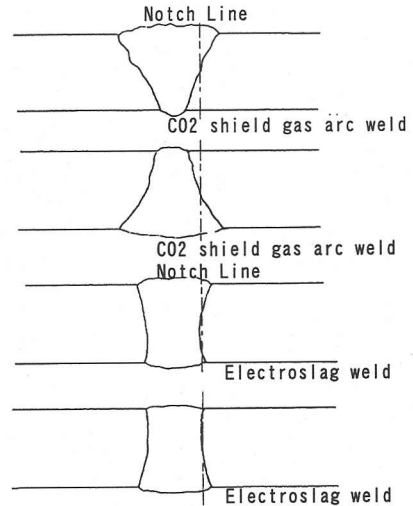


図-7 溶接継手 CTOD 試験のノッチ位置

(2) 溶接継手 CTOD 試験結果

溶接熱影響部 CTOD 試験の結果では、同一温度においても大きなばらつきが存在する。溶接熱影響部のように材質不均一が著しい場合、局所的脆化域の破壊靱性への影響を考慮に入れた評価を行うために、同一条件で実施された複数の試験結果の最低値をもって評価することが推奨されており⁴⁾、図-8 (a) ~ (d) には、CTOD 試験の下限に相当する包絡線を同時に示した。これら下限包絡線を比較すると、図-9 を得る。低入熱溶接 (CO₂ ガスシールドアーク溶接) を行った場合、通常鋼材 (A)、高性能鋼材 (B) の結果を比較すると、両者の差異はほとんど見られない。一方、大入熱 (エレクトロガス溶接) を行った場合に (A)、(B) の結果を比較すると、両者の差は鮮明であり、試験を行った全温度域で、高性能鋼 (B) が通常鋼材 (A) を上回っている。すなわち、高性能鋼 (B) の大入熱溶接への適合性は、溶接熱影響部 CTOD 試験で判定する限りにおいては、通常鋼材 (A) に比べて優れていると言える。

さらにこれらの破面の内、大入熱 (エレクトロガス溶接) を行った場合の通常鋼材 (A)、高性能鋼材 (B) に関して、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を図-10 (a) ~ (e) に示す。観察対象は、疲労予亀裂の先端とそれに続く脆性破壊または延性破壊の境界付近に存在するストレッチゾーン (Stretched Zone) とした。ストレッチゾーンは、疲労予亀裂先端の塑性鈍化の痕跡であり、ストレッチゾーン幅 (Stretched Zone Width) は、破壊時の亀裂先端開口変位すなわち限界 CTOD 値と線形の対応があることが知られている^{8)・9)}。そこで、試験片の中央付近において、破面観察により、ストレッチゾーン幅を適宜測定可能な倍率に拡大して観察した。

ストレッチゾーン幅は観察範囲内で若干の変動があるので、任意の 10 点での測定の平均値と標準偏

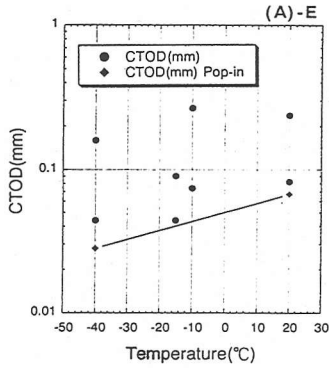


図-8(a) 限界 CTOD 値(通常鋼/エレクトロガス溶接法)

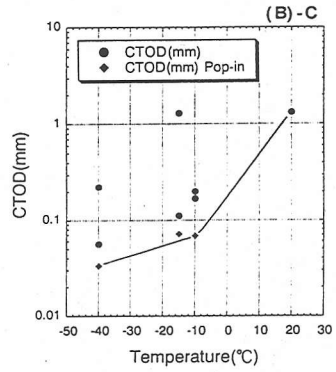


図-8(d) 限界 CTOD 値(高性能鋼/CO₂ シールドガス溶接法)

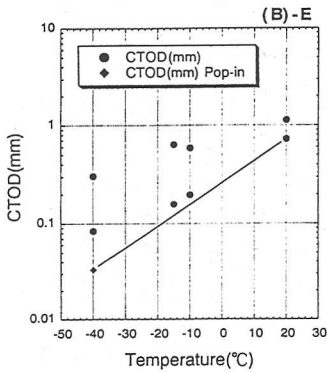


図-8(b) 限界 CTOD 値(高性能鋼/エレクトロガス溶接法)

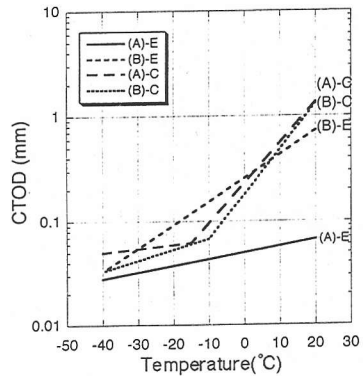


図-9 限界 CTOD 値の下限包絡線

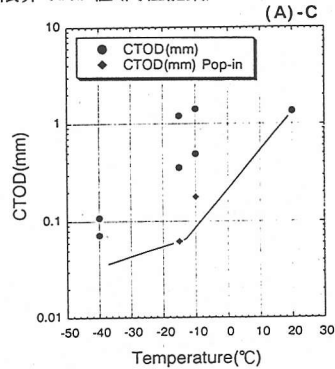


図-8(c) 限界 CTOD 値(通常鋼/CO₂ シールドガス溶接法)

差を記録した。図-11 は、測定したストレッチゾーン幅と CTOD 試験による限界 CTOD 値の関係を示したものであるが、既往の文献⁹⁾に報告されているように限界 CTOD 値と線形の対応を示し、 $SZW=1/2 CTOD$ の直線ときわめて良い相関がある。図中において同一温度条件で、通常鋼材 (A)、高性能鋼材 (B) を比較すると、測定されたストレッチゾーン幅からも同様に鋼材性能の差が認められる。すなわち、高性能鋼材 (B) は、通常鋼材 (A) に比べて、より幅の広い塑性鈍化の痕跡を残していることがわかる。

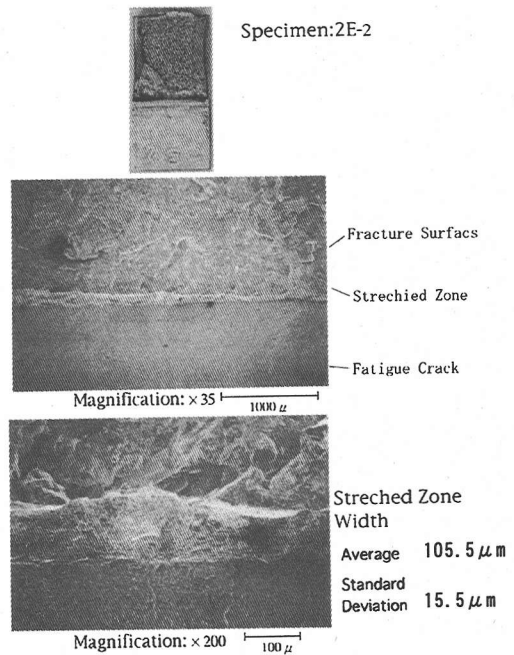


図-10(a) CTOD 破面の SEM 写真
(通常鋼/エレクトロガス溶接法/-10°C)

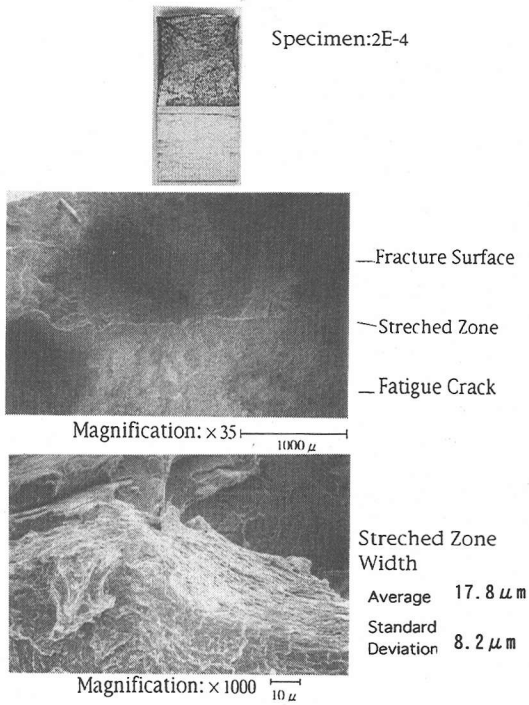


図-10(b) CTOD 破面の SEM 写真
(通常鋼/エレクトロガス溶接法/ -40°C)

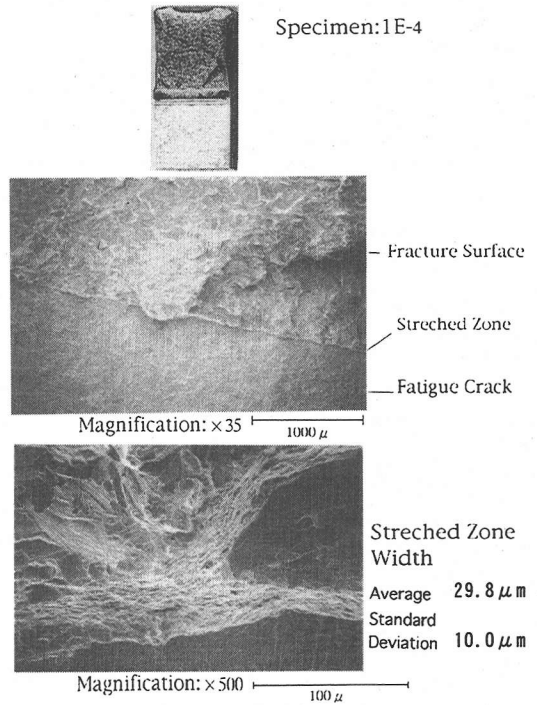


図-10(d) CTOD 破面の SEM 写真
(高性能鋼/エレクトロガス溶接法/ -40°C)

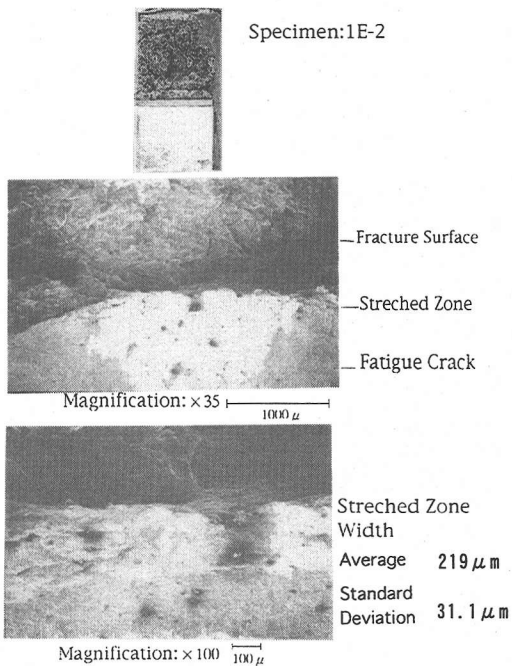


図-10(c) CTOD 破面の SEM 写真
(高性能鋼/エレクトロガス溶接法/ -10°C)

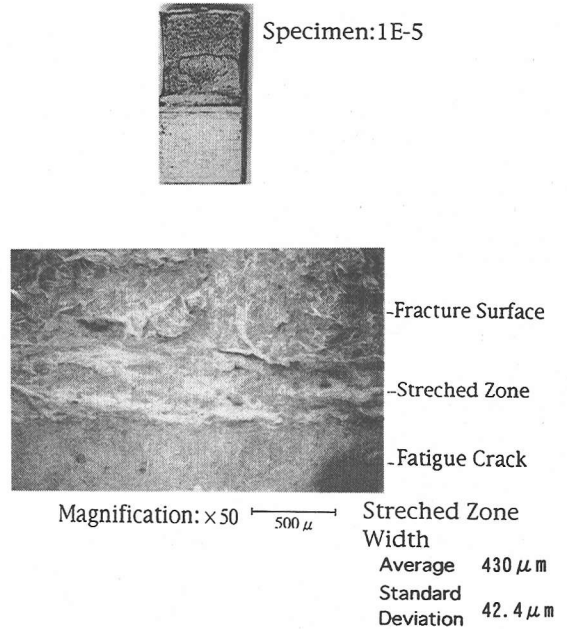


図-10(e) CTOD 破面の SEM 写真
(高性能鋼/エレクトロガス溶接法/ 20°C)

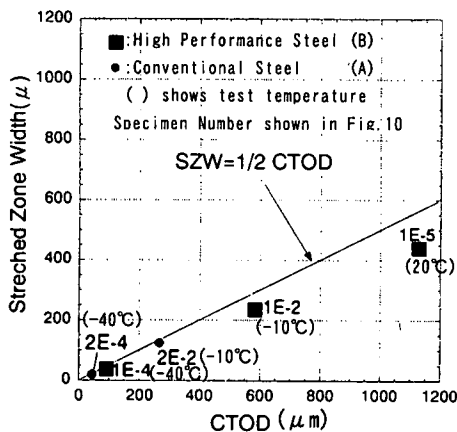


図-11 限界CTOD値とストレッチゾーン幅測定値

4. 実験結果と考察

溶接金属、溶接熱影響部等での所要靱性値は、構造物としての特性や、使用条件等によって異なるため、わが国の各種構造物における設計基準書等でも明確に規定されている例は少ない。前述の JIS 規格における母材に要求されるシャルピー吸収エネルギーを準用することが一般的である。鋼橋を対象としての所要靱性値として必要十分な値であるかはより詳細な検討を要すると考えられるが、本研究の範囲では母材に要求されるシャルピー吸収エネルギーを所要靱性値の目安とし検討を行った。

また、本供試鋼材における溶接継手の HAZ、ボンド、デボの切り欠き靱性値による評価では、各領域で異なった値を示していると同時に、必ずしも鋼材側がクリティカルになっていない。しかしながら、デボ部が比較的均質な組織であるのに対し、HAZ の域内では局所的な低靱性域や、細粒化 HAZ のような靱性改善域を含む複合的な組織であり、シャルピー試験による切り欠き靱性値で得られる指標は必ずしも最脆化部を代表するものでない点を考慮する必要がある。そのため、溶接熱影響部 CTOD 試験結果の解釈にあたっては実験結果の下限値で評価した。以下に、入熱量のレベルに応じた実験結果を総括して述べる。

(1) 入熱量 370 kJ/cm のエレクトロスラグ溶接継手

溶接継手シャルピー試験の結果から、入熱量が 370 kJ/cm のエレクトロスラグ溶接継手においては、HAZ の脆化が最も顕著にみられる。通常鋼材での母材のシャルピー吸収エネルギーが 0°C で 181J であったにもかかわらず、この溶接継手の HAZ では約 10J と母材要求値 27J を下回っている。このような大幅な靱性低下を溶接熱影響部にもたらす溶接方法および入熱量は、通常の鋼材を前提とした場合には、橋梁部材の溶接として適さないといえる。

(2) 入熱量 120~150 kJ/cm のエレクトロガス溶接継手

入熱量 120~150 kJ/cm のエレクトロガス溶接による大入熱溶接の場合は、鋼材による差異が HAZ、ボンドのシャルピー吸収エネルギーの差として明確にあらわれている。通常鋼材 (A) における大入熱溶接の場合は、HAZ、ボンドで破面遷移温度 ($vTrs$) が 0°C を大幅に上回っており切り欠き靱性値の低下は著しい。一方、高性能鋼材 (B) における大入熱溶接の場合は、HAZ、ボンドで破面遷移温度 ($vTrs$) が 0°C 未満にあり、鋼材性能の差による切り欠き靱性値低下の抑制効果が見られる。低入熱溶接の場合と同様、デボのシャルピー吸収エネルギーが最も低い結果が得られているが、大入熱溶接、低入熱溶接のいずれの場合も、JIS G 3106 の溶接構造用圧延鋼材における B クラスで規定される「0°C で 27J のシャルピー吸収エネルギー」は満足している。

一方、溶接継手 CTOD 試験で限界 CTOD 値の下限値の包絡線で評価すると、例えば、高性能鋼材 (B) における大入熱溶接 (入熱量 120~150 kJ/cm) の場合、0°C で 0.2mm 程度にある。一方、通常鋼材 (A) における大入熱溶接の場合は、これに比べて著しく低い値を示し、0°C で 0.05mm 程度にある。すなわち、通常鋼材に比較して高性能鋼材では限界 CTOD 値に大きな差が見られ、高性能鋼材の大入熱溶接 (入熱量 120~150 kJ/cm) に対しての優位性が見られた。

(3) 入熱量 20~30 kJ/cm の CO₂ ガスシールドアークによる低入熱溶接継手

同様に溶接継手シャルピー試験の結果から、CO₂ ガスシールドアークによる低入熱溶接の場合は、通常鋼材 (A)、高性能鋼材 (B) とともに、HAZ、ボンドのシャルピー吸収エネルギーは、デボにおけるシャルピー吸収エネルギーを上回っており、デボがクリティカルな値を示している。

鋼橋で一般的に行われている溶接法と一般的鋼材の組み合わせと言える通常鋼材 (A) における低入熱 CO₂ ガスシールドアークの溶接継手 CTOD 試験で、限界 CTOD 値の下限値の包絡線で評価すると、0°C で 0.2mm 程度、-10°C で 0.1mm 程度の値を示す。

溶接熱影響部 CTOD 試験の結果において、下限値の包絡線を比較すると、低入熱溶接 (CO₂ ガスシールドアーク溶接) を行った場合、鋼材による差異はほとんど見られない。大入熱 (エレクトロガス溶接) を行った場合には、低入熱溶接の場合の結果とほぼ同じレベルにあり、高性能鋼の大入熱に対する許容性能が発揮されていると言える。

5. 結論

溶接入熱量を変化させた溶接熱影響部の破壊靱性をシャルピー試験および溶接熱影響部 CTOD 試験によ

り検討した。鋼橋で一般に用いられている20~30 kJ/cm程度の比較的低入熱の溶接を行った場合と、通常の使用が禁止されている120~150 kJ/cm程度および370 kJ/cm程度の大入熱溶接を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 本研究で「通常鋼材」として扱った溶接構造用圧延鋼材 JIS G 3106 に規定される SM490B, SM490YB (圧延まま) では、鋼橋で一般的に行われている CO₂ ガスシールドアークによる 20~30 kJ/cm の低入熱溶接の場合、溶接熱影響部 CTOD 試験での限界 CTOD 値 (下限値) は 0℃ で 0.2mm 程度である。一方、「通常鋼材」において入熱量 120~150 kJ/cm のエレクトロガス溶接による大入熱溶接の場合、および 370 kJ/cm のエレクトロスラグ溶接継手においては、切り欠き靱性値の大幅な低下が見られ、特に 370 kJ/cm の入熱量は、鋼橋部材溶接において過大であると見られた。エレクトロガス溶接の場合の溶接熱影響部 CTOD 試験での限界 CTOD 値 (下限値) は 0℃ で 0.05mm 程度である。
- 2) 本研究で「高性能鋼材」として扱った SM490YB-TMC (熱加工制御) では、入熱量 120~150 kJ/cm のエレクトロガス溶接による大入熱溶接の場合でも、JIS G 3106 の溶接構造用圧延鋼材における B クラスで規定される「0℃で27Jのシャルピー吸収エネルギー」を満足し、かつ、限界 CTOD 値 (下限値) は 0℃ で 0.2mm 程度であり、この種の「高性能鋼材」を用いることで、鋼橋部材溶接に入熱量 120~150 kJ/cm は使用可能なレベルであるといえる。

謝辞：本研究は日本鋼構造協会/次世代土木鋼構造研究特別委員会/高機能鋼材の橋梁への利用小委員

会活動の一環として、東京工業大学/創造プロジェクト/都市基盤施設研究体において実施したものである。貴重な助言を頂きました委員会参加メンバー各位に感謝致します。また、溶接試験の実施にあたっては(株)サクラダ、南邦明氏の協力を頂きました。研究費の一部は日本鋼構造協会土木鋼構造研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書同解説 (I 共通編 II 鋼橋編) 平成 8 年 12 月, 1996.
- 2) John W. Fisher, Alan W. Pence, John D. Wood, Bruce R. Somers, Report No. 438-1(81), An Evaluation of Electroslag Welds in Three Bridges, Friz Engineering Laboratory Report, Lehigh University, 1981.
- 3) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準同解説, 1977.
- 4) 南邦明, 三木千壽：橋梁製作における入熱制限の考察, 鋼構造論文集第 6 巻第 23 号, pp.105-116, 1999.
- 5) 高嶋修嗣：大入熱溶接対策鋼, 日本造船学会「新しい製造法による鋼材 (TMCP 鋼) の溶接構造物への適用に関するシンポジウム」, pp.93-115, 1983.
- 6) 日本溶接協会：WES1109, 溶接熱影響部 CTOD 試験方法に関する指針, 1995.
- 7) 日本溶接協会：WES1108, 亀裂先端開口変位 (CTOD) 試験方法, 1995.
- 8) 國尾武, 中沢一, 林郁彦, 岡村弘之：破壊力学実験法, 朝倉書店, 1993.
- 9) 大塚昭夫, 宮田隆司, 西村誠二, 柏木陽一郎, 笠井登：切欠部からの破壊発生に関する COD クライテリオンとストレッチド・ゾーン, 日本造船学会論文集, Vol.136, pp249-257, 1974.

(2000.05.01 受付)

STUDY ON FRACTURE TOUGHNESS OF HEAT AFFECTED ZONE OF STRUCTURAL STEEL MEMBER AFFECTED BY WELD HEAT INPUT

Koji HOMMA and Chitoshi MIKI

The fracture toughness of heat affected zone (HAZ) of structural steels is studied focusing on the level of heat input by welding. The CTOD tests and Charpy V notch tests are carried out to investigate the fracture toughness of HAZ's which are resulted from the heat input of 120-150 kJ/cm and 370 kJ/cm respectively. The test results using "High performance structural steel" (SM490YB-TMC) have satisfied CVN absorbed energy of 27 J at 0 degree centigrade which is specified in JIS G 3160 "Rolled Steel for Welded Structure". The CTOD tests of the same specimen result in the value of 0.2 mm at 0 degree centigrade which is the same level as those of usual low heat input HAZ's of conventional steel.