

建築用高性能 550 MPa 級高張力鋼板 鉄骨コストのミニマム化と環境負荷軽減を実現する 新設計基準強度厚板「HBL385」

High Performance 550 MPa Class High Strength Steel Plates for Buildings —Steel Plates with New Reference Design Standard Strength “HBL385,” which Minimize the Construction Costs in Frame Fabrication and Alleviate the Environmental Burden—

林 謙次 HAYASHI Kenji JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(副課長)
藤沢 清二 FUJISAWA Seiji JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(副課長)
中川 一郎 NAKAGAWA Ichiro JFE スチール 厚板セクター部 主任部員(課長)

要旨

経済性・耐震性・溶接性を合わせ持った建築用高張力鋼材として、高性能厚板「HBL385」(降伏点の下限值: 385 MPa)を開発した。本鋼材は、当社が誇る最先端のオンライン加速冷却装置を用いた TMCP (thermo-mechanical control process) 技術を駆使することにより、初めて製造可能になった鋼材であり、HBL355 と SA440 の中間強度と HBL355 と同等の溶接性を有する。溶接部の靱性にも配慮した成分設計としており、HBL385-E は、JFE スチールの大入熱溶接熱影響部靱性向上技術「JFE EWEL」を適用することにより、大入熱溶接部において 0 で平均 70 J 以上のシャルピー吸収エネルギー値の確保を可能としている。すでに国土交通大臣の認定を取得しており、実物件への採用実績を伸ばしつつある。

Abstract:

JFE Steel has developed a high strength steel plate, “HBL385,” with lower limit yield strength of 385 MPa, providing a combination of economic efficiency, earthquake resistance, and weldability. This developed steel has the middle strength between HBL355 and SA440, and good weldability equivalent to HBL355. Production of this steel plate was made possible for the first time by applying thermo-mechanical control process (TMCP) technology using the most advanced JFE Steel’s on-line accelerated cooling system. Heat affected zone (HAZ) toughness of HBL385-E for high heat input welding was improved by applying JFE Steel’s microstructural control technology for high heat input welding, “JFE EWEL,” accomplishing the Charpy absorbed energy value above 70 J (average) at 0°C. The developed steel has been approved by Minister of Land, Infrastructure and Transport, and the actual application results of the developed steels are under increase.

1. はじめに

建築分野では、都市部の高層建築用として高強度材が求められる一方で、阪神淡路大震災における梁端溶接部の破断被害などから、建築鉄骨に降伏比(降伏点/引張強さ)が低く、靱性が高く、かつ溶接性の良い高性能鋼材のニーズが高まっている。さらには、最近の経済情勢を反映し建設コストの低減が強く求められている。

このようなニーズに対応し、経済性・耐震性・溶接性を合わせ持ち、鋼材強度あたりの経済性に最も優れた鋼材として、520 MPa 級鋼と 590 MPa 級鋼の中間強度レベルに

あたる 550 MPa 級(降伏点下限値は 385 MPa)の厚板「HBL385」を開発し¹⁾、2002 年 4 月に建築基準法第 37 条による国土交通大臣の認定を取得した。本鋼材は Super-OLAC²⁾に代表される当社が誇る最先端のオンライン加速冷却装置(OLAC: on-line accelerated cooling)と TMCP (thermo-mechanical control process) 技術を駆使することにより、初めて製造可能になった鋼材である。また本鋼材は、最近の靱性への要求の高まりから、溶接部の靱性にも配慮した成分系としている。さらに、当社の大入熱溶接熱影響部靱性向上技術「JFE EWEL」³⁾を適用することにより、梁端部のガスシールドアーク溶接(GMAW)部⁴⁾のみならず、溶接組立箱形断面柱(四面ボックス柱)の角溶接部

に適用される多電極サブマージアーク溶接 (SAW, 最大入熱量: 約 70 kJ/mm) や内ダイアフラム部のエレクトロスラグ溶接 (ESW, 最大入熱量: 約 100 kJ/mm) など高効率の大入熱溶接⁵⁾ が施工される部位においても, 高い靱性の確保が可能であり, 0 におけるシャルピー吸収エネルギーが 70 J 以上 (平均) の厳しい靱性要求に対応可能とした厚板「HBL385-E」も開発・商品化している。

本論文では, HBL385 の開発コンセプト, 特徴ならびにその鋼板および溶接継手の性能について紹介する。

2. 新設計基準強度厚板 HBL385 の開発コンセプト

現在使用されている建築用鋼材 (JIS 規格適合材および大臣認定取得材) の強度レベルは, 400, 490, 520 および 590 MPa 級鋼 (降伏点強度ランクで見た場合, 235, 325, 355 および 440 MPa) である (Fig. 1)。一般に, 高強度の鋼材を使用することにより, 必要部材断面の減少による鋼材重量および溶接材料重量の軽減, 鉄骨加工, 運搬・建方負荷の軽減がもたらされるため, 高層建築になるほど高強度鋼材が採用されている。590 MPa 級鋼 (大臣認定取得材 SA440) は強度が高く優れた性能を有しているが, 合金元素の添加と圧延後の複雑な熱処理工程が不可欠であり

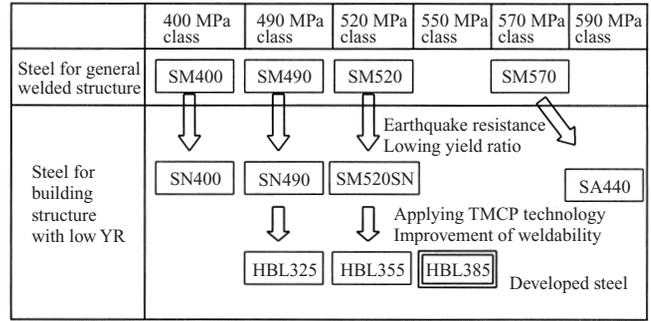


Fig. 1 Placement of HBL385 in the steel plates for buildings

鋼材コストの上昇とリードタイムの延長が避けがたく, また鉄骨加工時の溶接施工においても予熱管理, 入熱制限など厳格な管理が必要となる。極厚鋼板の板厚低減, 高軸力部位への対応など有用な面は多々あるものの, 鋼材強度あたりの経済性に劣り, 適用部位が限定されている。

そこで, 建設コストの合理化ニーズに対応するために良好な溶接性と優れた耐震性を合わせ持ち, 鋼材強度あたりの経済性に優れた鋼材として, 520 MPa 級鋼と 590 MPa 鋼の中間強度レベルにあたる 550 MPa 鋼 (HBL385: 降伏点下限値は 385 MPa) を開発した。

HBL385 の規格化学組成および機械的特性を Table 1 2 に示す。HBL385 の板厚範囲は 19 mm から 100 mm であり

Table 1 Chemical compositions of HBL385 (mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	C_{eq}	P_{CM}	
HBL325B	≦ 0.20	≦ 0.55	≦ 1.60	≦ 0.030	≦ 0.015	$t \leq 50$	≦ 0.38	≦ 0.24
HBL325C				≦ 0.020	≦ 0.008	$t > 50$	≦ 0.40	≦ 0.26
HBL355B	≦ 0.20	≦ 0.55	≦ 1.60	≦ 0.030	≦ 0.015	$t \leq 50$	≦ 0.40	≦ 0.26
HBL355C				≦ 0.020	≦ 0.008	$t > 50$	≦ 0.42	≦ 0.27
HBL385B	≦ 0.18	≦ 0.55	≦ 1.60	≦ 0.030	≦ 0.015	$t \leq 50$	≦ 0.40	≦ 0.26
HBL385C				≦ 0.020	≦ 0.008	$t > 50$	≦ 0.42	≦ 0.27
SA440B	≦ 0.18	≦ 0.55	≦ 1.60	≦ 0.030	≦ 0.015	$t \leq 40$	≦ 0.44	≦ 0.28
SA440C				≦ 0.020	≦ 0.008	$t > 40$	≦ 0.47	≦ 0.30

$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$, t : Thickness (mm),

$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

Table 2 Mechanical properties of HBL385

Grade	Thickness, t (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)		YR (%)	$vE_{0°C}$ (J)	RA _Z (%)	
HBL325B, C	40 < $t \leq 100$	325-445	490-610	$t \leq 50$	≧ 19*	≦ 80	≧ 27	C	≧ 25 (average)
				$t > 40$	≧ 21**				≧ 15 (each)
HBL355B, C	40 < $t \leq 100$	355-475	520-640	$t \leq 50$	≧ 19*	≦ 80	≧ 27	C	≧ 25 (average)
				$t > 40$	≧ 21**				≧ 15 (each)
HBL385B, C	19 ≦ $t \leq 100$	385-505	550-670	$t \leq 50$	≧ 26***	≦ 80	≧ 70	C	≧ 25 (average)
				$t > 40$	≧ 20**				≧ 15 (each)
SA440B, C	19 ≦ $t \leq 100$	440-540	590-740	$t \leq 50$	≧ 26***	≦ 80	≧ 47	C	≧ 25 (average)
				$t > 40$	≧ 20**				≧ 15 (each)

* T.P.: JIS No. 1A, ** T.P.: JIS No. 4, *** T.P.: JIS No. 5

RA_Z: Reduction of area in through thickness tensile test (Z)

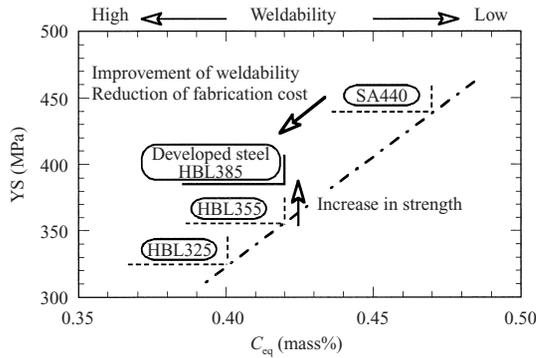


Fig. 2 Concept of the developed HBL385

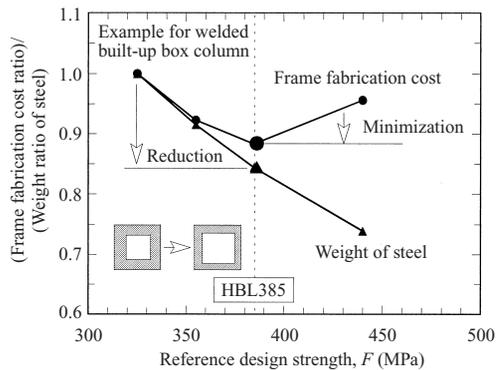


Fig. 3 Minimization of fabrication costs by using HBL385

HBL355 と比べ、降伏点および引張強さで 30 MPa の強度向上を図りながらも、炭素当量 (C_{eq}) および溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) は同一である (Fig. 2 Table 2)。そのため HBL385 の溶接施工性は従来鋼 HBL355 と同等であり、高い強度に比して鉄骨加工時の溶接施工コストを低く抑えることが可能である。

したがって、従来鋼と比較した場合、高強度化による使用鉄骨重量の削減、それにもなう鉄骨加工工数や溶接工数の低減、さらには溶接施工性の改善による施工時における管理の軽減や溶接時間の短縮などが可能となり、鉄骨コストのミニマム化を図ることができる。試算結果の一例を Fig. 3 に示す。

また、鋼板の靱性規格値に関しては、最近の高靱性要求に対応して、0 で平均 70 J 以上としている。さらに溶接部の継手靱性についても、梁端部 (GMAW 部) のみならず四面 BOX 柱の角継手部に適用される多電極 SAW や内ダイアフラム部の ESW など大入熱溶接の熱影響部においても、平均 70 J 以上のエネルギー値の確保も可能としており、溶接接合部においても十分な耐震安全性を持ち合わせることができる^{6,7)}。

3. 開発鋼の成分設計および製造技術

3.1 TMCP 技術による低降伏比高強度鋼の製造技術

当社は、TMCP 分野でパイオニアとして豊富な実績を

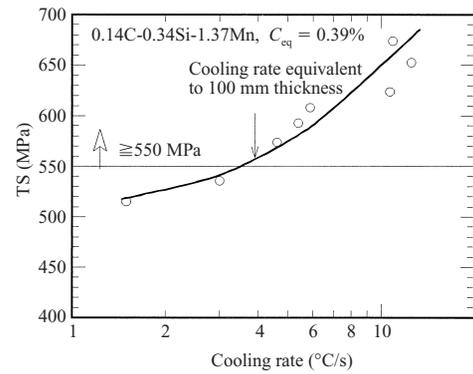


Fig. 4 Tensile strength obtained by advanced TMCP process

有しており、世界に先駆けて厚板のオンライン加速冷却装置を実用化するとともに、現在も、高い冷却能と優れた冷却均一性、制御性を有する Super-OLAC を有している。

HBL385 は、従来鋼である HBL355 に対して、合金添加量の増加を抑制しながら高強度化を達成することが技術的課題であったが Super-OLAC に代表される高冷却速度を有する加速冷却装置を活用するとともに、圧延、加速冷却条件を高精度に制御することで、これまでの課題を克服し高性能化を達成し、最大板厚 100 mm までの製造を可能とした。

Fig. 4 に C_{eq} を HBL355 と同等にした成分系での冷却速度と引張強さの関係を示す。HBL355 と同等の化学組成において、板厚 100 mm まで引張強さ 550 MPa を確保できることが分かる。さらに、TMCP 技術を高精度に制御してマイクロ組織の最適化を行うことにより、550 MPa 以上の高強度と 80% 以下の降伏比、0 で平均 70 J 以上の優れた靱性を有する本鋼板を開発した。

3.2 溶接熱影響部の靱性向上技術

HBL385 は、高冷却速度を有する加速冷却装置の適用により C_{eq} を HBL355 と同等レベルにしている。多層盛り溶接部において 0 で 70 J (平均) が確保可能とされる MAG 溶接熱影響部 (HAZ) 靱性指標 $f_{HAZ} \leq 0.58\%$ ⁸⁾ にも対応可能である。

また、角継手部 (SAW) や内ダイアフラム溶接部 (ESW) など大入熱溶接時の HAZ 靱性に関しては、当社の大入熱溶接熱影響部靱性向上技術「JFE EWEL」を適用することにより、0 で平均 70 J 以上のエネルギー値を確保できる。

JFE EWEL 技術は

- [1] 高冷却速度を有する Super-OLAC を活用した TMCP 技術による C_{eq} の低減など成分設計の最適化
- [2] TiN 活用による HAZ 粗粒域の極小化
- [3] フェライト生成の促進と脆化相の抑制などのための HAZ 粒内組織制御

を特長としており、建築用鋼板のみならず、造船用鋼板など幅広い分野で適用している。本技術の適用により、多電

種 SAW や ESW などの大入熱溶接 HAZ 靱性は、0 で平均 70 J 以上を安定して確保可能となる。

Fig. 5 に、ESW (溶接入熱量:80-90 kJ/mm) の FL (溶接境界) の 0 でのシャルピー吸収エネルギーと C_{eq} の関係を示す。母材の高強度化に有効な合金元素である Nb を 0.01% 程度添加した鋼は C_{eq} が 0.36% 以上では目標とする 70 J を満足することができない。しかしながら、Nb を添加しないことにより靱性の向上が認められる。さらに窒化物、酸化物、硫化物などの微細析出物・介在物を制御⁹⁾した JFE EWEL 技術を適用した鋼では、さらなる靱性の向上が認められ、0 で平均 70 J 以上の高いシャルピー吸収エネルギー値が確保できる。

Photo 1 に、Nb 添加鋼と JFE EWEL 適用鋼の ESW 時の FL 近傍 HAZ 粗粒域のミクロ組織を示す。JFE EWEL を適用していない Nb 添加鋼では粗粒域幅が広く、粒界フェライトの生成が認められるものの粒内は上部ベイナイト主体の組織を示している。これに対して、JFE EWEL 技術を適用した鋼では、HAZ 粗粒域幅が縮小されるとともに、フェライト量が多く、脆化相である上部ベイナイトの生成量が減少しており、ミクロ組織の大幅な改善が認められる。粒内組織の改善は C_{eq} の低減、Nb の無添加に加え、微細な酸化物、硫化物の制御によるものである。

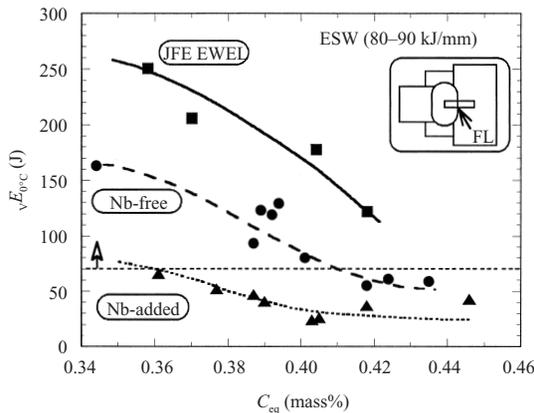


Fig.5 Improvement of HAZ (FL) toughness for high heat input welding by suppression of C_{eq} and applying JFE EWEL technology

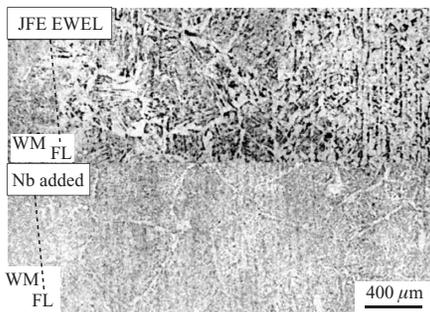


Photo 1 Microstructures at fusion line of an ESW joint of steel with applying JFE EWEL technology and Nb added steel ($C_{eq} \cong 0.40$ mass%)

4. 開発鋼 HBL385 シリーズの特性

4.1 HBL385 鋼板の特性

HBL385 鋼板の化学組成および機械的特性を Table 3 4 に示す。板厚 19 mm から最大板厚 100 mm まで、いずれの板厚においても目標性能を満足している。特に 0 におけるシャルピー吸収エネルギーは 200 J 以上の高い値を示しており、十分な靱性を有している。

HBL385 の溶接性に関して Fig. 6 に最高硬さ試験結果 [JIS Z 3101 準拠、ビード長さの影響] を示す。ビード長さが 40 mm 以上で、最高硬さは 350 HV 以下となっている。また、y 形溶接割れ試験結果では、被覆アーク溶接 (SMAW) および炭酸ガスシールドアーク (CO_2) 溶接における割れ防止予熱温度は、それぞれ 50 および常温 (25 以下) であり、HBL385 は従来鋼 HBL355 と同等の優れた溶接性を有している。

4.2 HBL385 鋼板の溶接継手性能

HBL385 鋼板の溶接継手性能の一例として、炭酸ガス

Table 3 Chemical compositions of HBL385C

Thickness, t (mm)	(mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	C_{eq}	P_{CM}	f_{HAZ}
19	0.14	0.34	1.37	0.014	0.002	0.39	0.22	0.43
35	0.14	0.21	1.26	0.013	0.002	0.37	0.21	0.41
70	0.14	0.34	1.37	0.014	0.002	0.39	0.22	0.43
100	0.14	0.34	1.37	0.014	0.002	0.39	0.22	0.43

$f_{HAZ} = C + Mn/8 + 6(P + S) + 12N - 4Ti$ (if $Ti \cong 0.005\%$, then $Ti = 0$);
Index to the HAZ toughness

Table 4 Mechanical properties of HBL385C

Thickness, t (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	YR (%)	$vE_{0°C}$ (J)	RA_Z (%)
19	422	552	44	76	289	74, 70, 74
35	458	593	32	77	269	73, 73, 72
70	445	596	31	75	290	76, 74, 74
100	432	578	31	75	247	72, 69, 71

Tensile test : Full thickness (JIS No. 5)-C (19t), 1/4t (JIS No. 4)-C (35, 70, 100 t)
Charpy test : 1/4t-C, RA_Z : Z

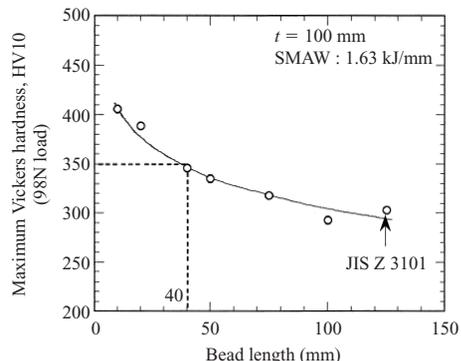


Fig.6 Maximum hardness test result of HBL385C

Table 5 Mechanical properties of HBL385C's CO₂ welded joint

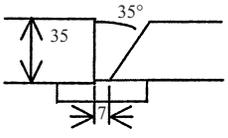
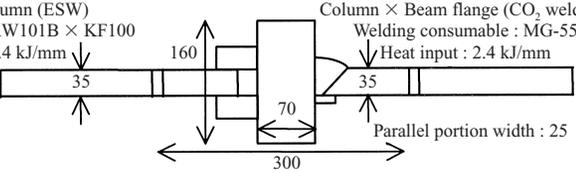
Thickness, <i>t</i> (mm)	Shapes and dimensions of groove	Welding conditions	Tensile properties		Charpy impact properties	
			TS (MPa)	Fracture positions	Notch position	$\sqrt{E_{0°C}}$ (J)
35		Welding consumable : MG-55D Heat input : 3.0 kJ/mm Preheat : None Inter pass temperature: ≤ 250°C	580	BM	WM	157
			581		BM	FL
					HAZ 1 mm	261
					HAZ 3 mm	237

Table 6 Tensile test results of HBL385C's ESW and CO₂ welded joint

Welding method/Shape and dimensions of tensile test specimen		Tensile results		
Diaphragm × Column (ESW) Welding consumable : KW101B × KF100 Heat input : 50.4 kJ/mm		Column × Beam flange (CO ₂ welding) Welding consumable : MG-55 Heat input : 2.4 kJ/mm	TS (MPa)	Fracture positions
			592	BM (Beam flange)
			599	BM (Diaphragm)

シールドアーク (CO₂) 溶接継手性能を Table 5 に、ダイアフラム・柱スキンプレート・梁フランジの十字継手引張試験結果を Table 6 に示す。CO₂ 溶接継手部では、母材の規格を十分に満足する継手強度が得られるとともに、いずれのノッチ位置においても、0 において平均 70 J 以上の高いエネルギー値が得られている。また、十字継手引張試験の破断位置はダイアフラムまたは梁フランジの母材部であり、引張強さも母材の材料試験結果と同等であり大入熱溶接に対しても十分な継手強度を有している。

4.3 大入熱溶接用高 HAZ 靱性 HBL385-E 鋼板の特性

大入熱溶接用高 HAZ 靱性鋼として JFE EWEL 技術を適用した HBL385C-E 鋼板の板厚 32, 40, 50 mm 材を用い大入熱の多電極 SAW および ESW を行いその性能を確認した。供試鋼の化学組成および機械的性質を Table 7 8 にそれぞれの溶接条件を Table 9 に、得られたマクロ組織を Photo 2 に示す。また、これら大入熱溶接継手部のシャルピー衝撃試験結果を Fig. 7-9 に示す。いずれの溶接継

手においても、FL 部から熱影響部にいたるまで 0 での平均シャルピー吸収エネルギーは 70 J 以上の高い靱性を示している。また、Fig. 9 は、CFT 構造 (コンクリート充填型四面ボックス柱) に対応した、スキンプレート厚/ダ

Table 7 Chemical compositions of HBL385C-E

Thickness, <i>t</i> (mm)	(mass%)						C_{eq}	P_{CM}	f_{HAZ}
	C	Si	Mn	P	S				
32	0.12	0.28	1.54	0.007	0.001	0.40	0.21	0.36	
40	0.11	0.28	1.54	0.007	0.001	0.40	0.21	0.35	
50	0.11	0.28	1.54	0.007	0.001	0.40	0.21	0.35	

Micro-alloying elements are added

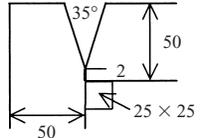
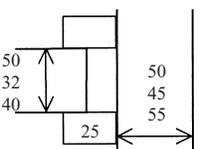
Table 8 Mechanical properties of HBL385C-E

Thickness, <i>t</i> (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	YR (%)	$\sqrt{E_{0°C}}$ (J)	RA _Z (%)
32	472	602	33	78	361	83
40	473	604	32	78	346	84
50	446	570	33	78	346	81

Tensile test : Full thickness (JIS No. 5)-C (32, 40t), 1/4t (JIS No. 4)-C (50 t)

Charpy test : 1/4t-C, RA_Z : Z

Table 9 Welding conditions for HBL385C-E's SAW and ESW welded joints

Welding method	Shapes and dimensions of groove	Plate thickness (mm)	Thickness of diaphragm (mm)	Welding consumable	Welding condition	Heat input (kJ/mm)
SAW		50	—	KW-55 (6.4 mmφ) × KB-60IAD	L : 1 850 A-43 V T : 1 500 A-50 V 210 mm/min	44.0
ESW		50	50	KW-60AD (1.6 mmφ) × KF-100AD	380 A-53 V 15.0 mm/min	80.7
		32	45		380 A-48 V 19.5 mm/min	56.2
		40	55		380 A-51 V 15.8 mm/min	73.7

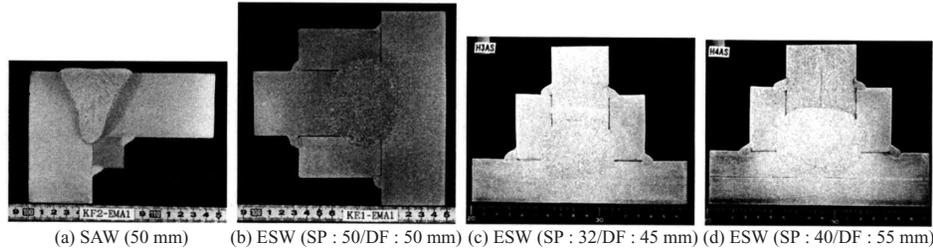


Photo 2 Microstructures of HBL385C-E's SAW and ESW welded joints

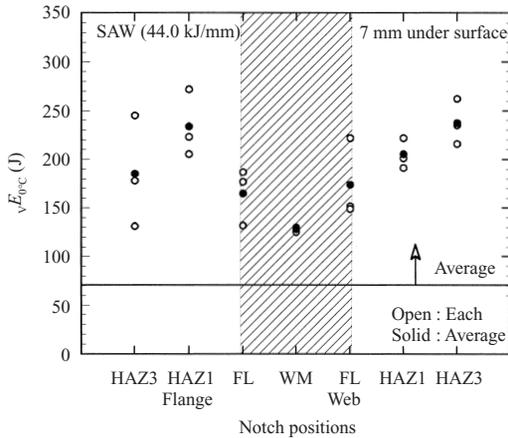


Fig. 7 Charpy impact properties of HBL385C-E's SAW welded joint ($t = 50$ mm)

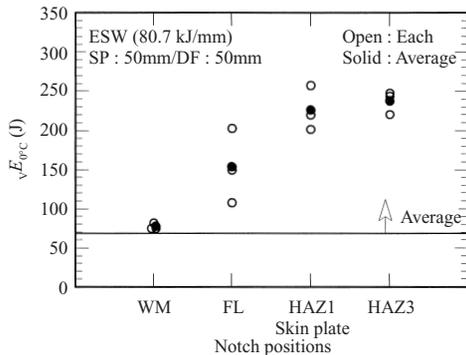


Fig. 8 Charpy impact properties of HBL385C-E's ESW welded joint ($t = 50$ mm)

イアラム厚の小さい条件での ESW 継手靱性を示しているが、平均 70 J 以上の高い靱性値であることが分かる。

5. おわりに

経済性・耐震性・溶接性を合わせ持った新設計基準強度の建築用高性能 550 MPa 級高張力鋼板「HBL385」(降伏点下限値は 385 MPa)を開発した。本鋼板は、建築基準法第 37 条による国土交通大臣の認定を取得(2002 年 4 月)し実物件への採用実績を伸ばしつつある。本鋼板の採用により、設計の自由度が拡大するとともに、多様化する社会的

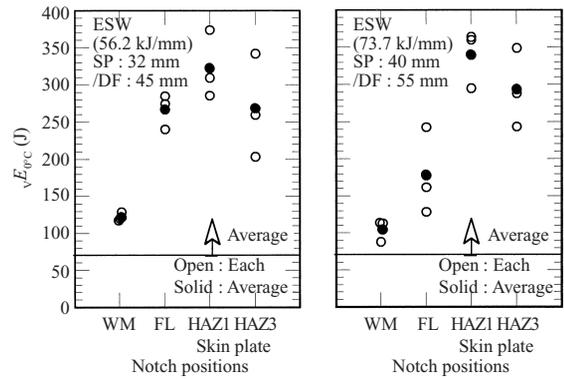


Fig. 9 Charpy impact properties of HBL385C-E's ESW welded joint for CFT structure

ニーズへの対応が可能となるものと確信する。

参考文献

1. 角博幸, 林謙次, 加村久哉, 猪砂利次, 塚本裕昭. CAMP-ISIJ vol. 16, 2003, p. 344
2. 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘. NKK 技報. no. 179, 2002, p. 57
3. 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷靖, 村上義明. まてりあ vol. 43, 2004, p. 232
4. 鈴木孝彦, 石井匠, 森田耕次. 建築技術. no. 619, 2001, p. 140
5. 稲田達夫. 鉄構技術. no. 159, 2001, p. 32
6. 下川弘海, 伊木聡, 岡本晴仁, 栗原正好, 小嶋敏文. 鉄構技術 no. 174, 2002, p. 38
7. 島岡久壽, 沢村一巳, 岡本隆. NKK 技報. no. 179, 2002, p. 69
8. 建築研究所. 先端技術による新しい鋼構造建築システムの開発 建築構造用溶接材料と溶接接合部性能評価法の確立. 最終報告書 2002
9. 木村達巳, 久田光夫, 藤沢清二, 横山幸夫, 香取修治. 川崎製鉄技報 vol. 34, no. 4, 2002, p. 158



林 謙次



藤沢 清二



中川 一郎