
氷海域での仕様を満足する YP420MPa 級高靱性海洋構造物用厚鋼板
420MPa Yield Strength Steel Plate with Superior Fracture Toughness for Arctic
Offshore Structures

久田 光夫(Mitsuo Hisata) 三宅 孝則(Takanori Miyake) 川端 文丸(Fumimaru
Kawabata)

要旨：

シャルピー衝撃試験の破面遷移温度が 2100.°C 以下であり、NRL 落重試験の TNDT が 285.°C 以下という非常に高靱性で亀裂伝播に対して十分な抵抗性が要求される板厚 75 mm, YP420MPa 級の氷海域仕様の海洋構造物用厚鋼板を、低 C-低 Si-Cu-Nb-1.1%Ni 系の成分系で MACS プロセス (multipurpose accelerated cooling system) 適用により開発した。開発鋼の母材および K 開先、入熱 5.0 kJ/mm のサブマージアーク溶接継手部特性を調査した結果、母材および溶接継手部の破壊靱性は HAZ 靱性と同様に非常に優れていることが確認できた。母材靱性は T 方向の 1/2 t 部のシャルピー衝撃試験の破面遷移温度で 295.°C, NRL 落重 TNDT は表面部および 1/2 t 部で 2120.°C, 290.°C である。一方、溶接継手部の CTOD 値は 260.°C において CGHAZ 部で 0.38 mm 以上, SCHAZ 部で 1.20 mm 以上, WM 部も 0.52 mm 以上であり、240.°C においては、上記のすべての部位において 1.60 mm 以上の値が得られた。

Synopsis：

A 75 mm thick YP420MPa class steel plate has been developed for arctic offshore structures where required are high toughness and crack arrestability such as 50% fracture appearance transition temperature (FATT) lower than 2100.°C and the temperature of nil ductile transition (NRL TNDT) lower than 285.°C, respectively. The steel plate was designed of low C-low Si-Cu-Nb and 1.1 mass%Ni addition type and manufactured by MACS (multipurpose accelerated cooling system). The excellent fracture toughness of the base metal and the welded joints were verified by fundamental testing as well as HAZ toughness evaluation for the 5.0 kJ/mm K-bevel submerged arc welded joints formed with straight fusion line. The featured values are, as follows: As for the base metal, the 50%FATT was 295.°C and the NRL TNDTs were 2120.°C and 290.°C at the surface and mid-thickness positions, respectively. As for the welded joints, the minimum CTOD values for the essential portions in the weldments measured at 260.°C were 0.38 mm, 1.20 mm, 0.52 mm for the coarse grained (CG) HAZ, the sub-critical(SC) HAZ, and the weld metal, respectively. All the values at 240.°C for

those portions exceeded 1.60 mm.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

氷海域での仕様を満足する YP420MPa 級高靱性海洋構造物用厚鋼板*

川崎製鉄技報
30 (1998) 3, 142-147

420MPa Yield Strength Steel Plate with Superior Fracture Toughness for Arctic Offshore Structures



久田 光夫
Mitsuo Hisata

水島製鉄所 管理部
厚板・鋳鍛管理室 主
査(掛長)



三宅 孝則
Takanori Miyake

水島製鉄所 管理部
厚板・鋳鍛管理室 主
査(課長)



川端 文丸
Fumimaru Kawabata

技術研究所 厚板条鋼
研究部門 主任研究員
(課長)・工博

要旨

シャルピー衝撃試験の破面遷移温度が -100°C 以下であり、NRL落重試験のTNDTが -85°C 以下という非常に高靱性で亀裂伝播に対して十分な抵抗性が要求される板厚75mm、YP420MPa級の氷海域仕様の海洋構造物用厚鋼板を、低C-低Si-Cu-Nb-1.1%Ni系の成分系でMACSプロセス(multipurpose accelerated cooling system)適用により開発した。開発鋼の母材およびK開先、入熱5.0kJ/mmのサブマージアーク溶接継手部特性を調査した結果、母材および溶接継手部の破壊靱性はHAZ靱性と同様に非常に優れていることが確認できた。母材靱性はT方向の $1/2t$ 部のシャルピー衝撃試験の破面遷移温度で -95°C 、NRL落重TNDTは表面部および $1/2t$ 部で -120°C 、 -90°C である。一方、溶接継手部のCTOD値は -60°C においてCGHAZ部で0.38mm以上、SCHAZ部で1.20mm以上、WM部も0.52mm以上であり、 -40°C においては、上記のすべての部位において1.60mm以上の値が得られた。

Synopsis:

A 75 mm thick YP420MPa class steel plate has been developed for arctic offshore structures where required are high toughness and crack arrestability such as 50% fracture appearance transition temperature (FATT) lower than -100°C and the temperature of nil ductile transition (NRL TNDT) lower than -85°C , respectively. The steel plate was designed of low C-low Si-Cu-Nb and 1.1 mass%Ni addition type and manufactured by MACS (multipurpose accelerated cooling system). The excellent fracture toughness of the base metal and the welded joints were verified by fundamental testing as well as HAZ toughness evaluation for the 5.0 kJ/mm K-bevel submerged arc welded joints formed with straight fusion line. The featured values are, as follows: As for the base metal, the 50%FATT was -95°C and the NRL TNDTs were -120°C and -90°C at the surface and mid-thickness positions, respectively. As for the welded joints, the minimum CTOD values for the essential portions in the weldments measured at -60°C were 0.38 mm, 1.20 mm, 0.52 mm for the coarse grained (CG) HAZ, the sub-critical(SC) HAZ, and the weld metal, respectively. All the values at -40°C for those portions exceeded 1.60 mm.

1 緒 言

近年、石油エネルギー資源開発の活発化により海洋構造物の設置域も氷海域、深海域へと広がりつつある。使用される鋼板自体も高強度化、厚肉化するとともに、氷海域では破壊靱性に対しても従来の -10°C でのCTOD値要求から、 -40°C の低温におけるCTOD値が要求され、さらに脆性亀裂伝播停止特性を確保するためNRL落重試験でTNDT $\leq -85^{\circ}\text{C}$ といった非常に厳しい要求もある。今回、このような従来よりも厳しい要求を満足する低温靱性に優れた

75mm厚YP420MPa級の海洋構造物用鋼を開発し、その母材および溶接継手特性を評価した。

2 開発目標特性

本報告の開発目標特性をTable 1に示す。基本特性はAPI規格の2W Gr.60鋼¹⁾の低温仕様を基本としたものである。溶接熱影響部(HAZ)に対するCTOD要求値はAPI RP2Z²⁾では板厚75mm以下でのGr.50鋼については0.25mm以上と規定しているがGr.60鋼は規定されていないため、ここでは鋼板の降伏強度(YS)に比例して要求値を算出し³⁾0.30mmを目標値とした。なお溶接金属部の要求値はAPI RP2Zに規定されているHAZ部要求値+0.13mmか

*平成10年8月1日原稿受付

Table 1 Target values in mechanical properties and fracture toughness for steel plate developed

Steel plate						Welded joint				
YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Charpy impact properties		NRL TNDT (°C)	Welding method	Heat input (kJ/mm)	V Charpy absorbed energy (J)	CTOD value at -40°C (mm)	
			Absorbed energy (J)	50% FATT (°C)					CGHAZ SCHA2	Weld metal
414~586	≥517	≥22	$vE_{-60} \geq 41$	≤-100	≤-85	SAW	5.0	$vE_{-60} \geq 41$	≥0.30	≥0.43

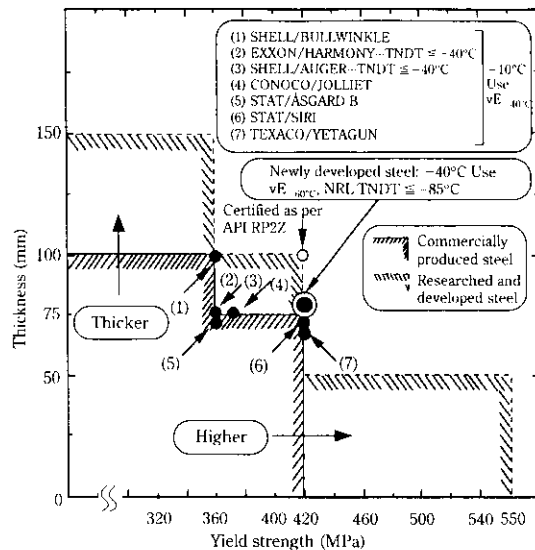


Fig. 1 Commercial availability and R&D works for offshore steels

ら 0.43 mm の目標値とした。CTOD 要求温度については従来は -10°C の要求が多かったが、最近開発が進められているサハリン海域での使用を考慮し、 -40°C とした。脆性亀裂伝播停止特性については Pellini らの fracture analysis diagram (FAD) の CAT 曲線⁹⁾において、溶接残留応力や応力集中により作用応力が降伏応力を越える条件下でも十分に亀裂伝播が可能なように設計温度 (-40°C) = TNDT + 45°C として TNDT の目標温度 -85°C を設定した。

Fig. 1 に今回の開発鋼の位置付けと当社の海洋構造物の製造実績および製造可能範囲を示す。従来鋼はシャルピー試験温度が

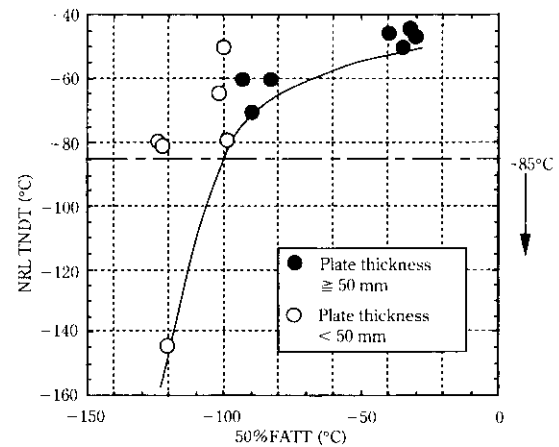


Fig. 2 Relation between 50%FATT and NRL TNDT

-40°C 、NRL TNDT $\leq -40^{\circ}\text{C}$ のものであるが、今回の開発鋼は板厚、降伏応力レベルとしては従来の製造範囲内であるものの、シャルピー試験温度が -60°C 、NRL TNDT $\leq -85^{\circ}\text{C}$ という今までにない低温靱性が要求されていることが特徴である。次に母材のシャルピー破面遷移温度 (50%FATT) と NRL TNDT の関係を **Fig. 2** に示すが、NRL 落重 TNDT の目標温度 -85°C を満足するためには 50%FATT が -100°C 程度を目標とする必要がある。

3 化学成分および製造プロセス

2 章で述べた目標靱性を確保するための成分設計、製造プロセスに対する基本概念を **Table 2** に示すが、これまでの当社の海洋構造

Table 2 Metallurgical measures for improving HAZ toughness at low temperatures

Item	Improvement of HAZ toughness	
	Metallurgy	Measure
Grain size	Utilizing pinning effect by fine precipitate TiN and REM (O, S)	REM-Ti treatment
Microstructure	Decreasing the M-A constituent + Fine ferrite-pearlite structure	Lowering C_{eq} and P_{cm} (MACS process)
Matrix	Decreasing free N and sol. Ti	Lowering C, N, Si and P together with controlling of Ti/N ratio
	Minimizing the detrimental effect of precipitation hardening on toughness	Restricting Nb and V contents

Table 3 Chemical composition of steel plate developed

(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	Al	N	Ceq ^{*1}	Pcm ^{*2}	Note
0.07	0.10	1.55	0.005	0.001	0.29	1.09	0.015	0.028	0.0039	0.42	0.18	REM-Ti treated

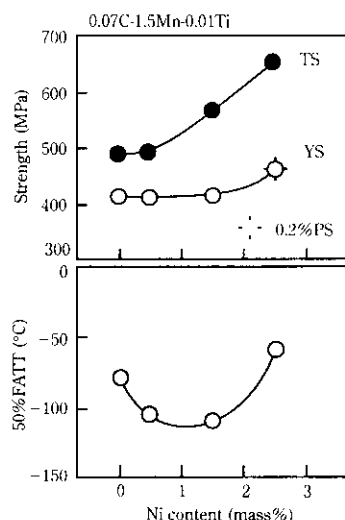
*¹ Ceq = C + Mn/6 + (V + Mo + Cr)/5 + (Cu + Ni)/15*² Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B

Fig. 3 Effect of Ni content on strength and toughness of MACS steel

物用鋼の基本プロセス、すなわち、溶接継手部の靱性を確保するために低 Ceq, 低 Pcm, 低 C, 低 N, 低 Si, 低 P 化, REM-Ti 処理, および Ti/N 比の最適化を行い⁵⁻⁷⁾, 強度確保のため、制御圧延, MACS プロセスを適用することとした。また、脆性亀裂の起点となりうる非金属介在物減少と鋼板材質異方性改善のため低 P, 低 S 化を図っている。さらに今回は、板厚 75 mm の厚物であることから、圧延による組織微細化の効果にも限界があり、特に板厚 1/2t 部の靱性を確保するため、鋼板素材の鋳片を低温加熱とし、加熱時点での γ 粒径の粗大化を防止した。ただし低温加熱を実施した場合、鋼板の焼入性が低下し、強度靱性が良好なフェライト、ベイナイト組織を形成しにくくなるため、圧延後に加速冷却を実施するとともに、さらに焼入性に有効な元素の添加を検討した。焼入性を上げる合金元素としては、DI 値で知られているように C, Si, Mn, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B などがあるが C, Si, Cr, Mo, B は HAZ 靱性を劣化させる懸念がある。一方、Ni は HAZ 靱性を損なうことなく母材マトリックスの靱性を向上させ、また焼入性を高める元素であるが、製造コスト上その添加量は最小限としてきた。しかし、今回のような極端に高度の靱性要求に応えるためには、Ni 添加量の増加が必要であると考えた。Ni 量が強度、靱性におよぼす影響を Fig. 3 に示すが、1.5% までは強度と靱性の両方とも向上する。強度は焼入性の向上によるものであるが、添加しすぎると焼入過多となり靱性が劣化する。したがって Ni 量は 1.5% を上限として設計すべきである。次に鋼板の Ni 量を変化させた場合の HAZ 部の CTOD 値の変化を Fig. 4 に示すが、目標とする -40°C での HAZ 部の CTOD 値 0.30 mm 以上を達成するためには Ni 量 1% 程度が必要であり、ここでは 1.1% を添加することとした。

Table 3 に今回開発した鋼板の化学組成を示す。前述したように、高靱性確保のために Ni を 1.1% 添加した低 C-低 Si-Cu-Ni-Nb 系であり、Pcm は 0.20% 以下となり、予熱無しでの溶接が可能と考えられる。Fig. 5 に鋼板の製造プロセスを示す。製鋼工程では低 P, 低

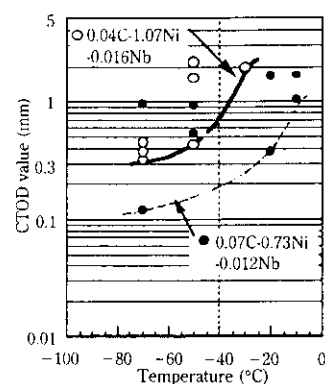


Fig. 4 Effect of Ni content on CTOD value at HAZ of SAW welded joints (H.I. 5.0 kJ/mm, Notch location: CGHAZ)

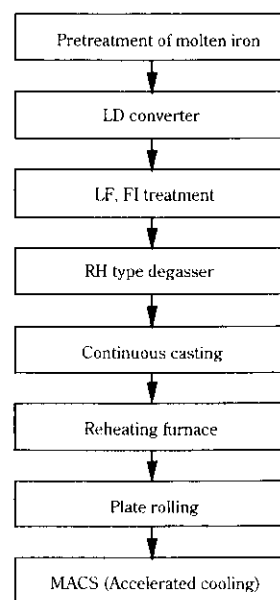


Fig. 5 Manufacturing process of steel plate developed

S, 低 N 化および REM-Ti 処理を行い、圧延での鋳片中心部のポロシティ圧着の圧下量確保を考慮して、連続鋳造における最大厚 310 mm の鋳片を用いた。厚板工程では、低温加熱を実施し、未再結晶域を主体とした制御圧延を実施後、加速冷却を行った。

4 鋼板の諸特性

4.1 母材の基本特性

Photo 1 に母材の光学顕微鏡組織を示す。板厚 1/4t 部、1/2t 部ともに微細アシキュラーフェライトを含むベイナイト組織を呈している。1/2t 部は 1/4t 部に比べて若干組織が粗いものの、十分に微細な組織となっている。Table 4 に母材の引張試験および 2 mmV

Table 4 Mechanical properties of steel plate developed

Location	Direction	Tensile properties			Charpy impact properties				Preheat temp. without cracking (°C)
		YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Absorbed energy (J)			50% FATT (°C)	
Subsurface	T	—	—	—	324	305	258	-135	≤ 25
1/4 t	L	446	529	35	—	—	—	—	
	T	451	541	34	400	405	324	-135	
	Z	—	519	61 ^{*1}	—	—	—	—	
1/2 t	L	425	520	34	—	—	—	—	
	T	432	522	33	193	156	122	-95	
	Z	—	524	62 ^{*1}	—	—	—	—	

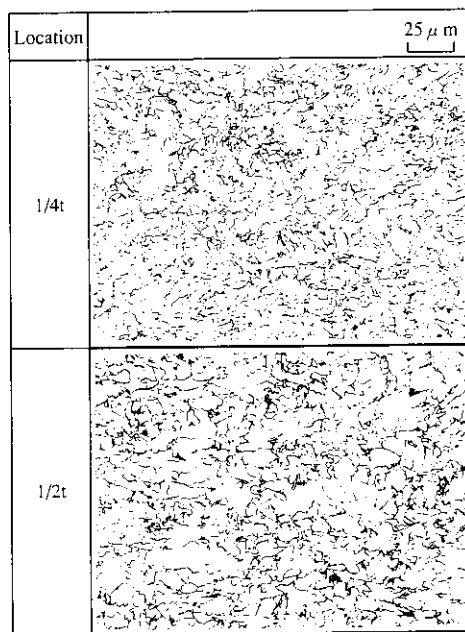
*¹ Reduction of area (%)

Photo 1 Microstructure of steel plate developed

ノッチシャルピー衝撃試験の結果を示す。いずれも Table 1 に示した強度、靱性の目標値を板厚 1/2t 部も含め満足している。シャルピー破面遷移温度は表層、1/4t 部とも -135°C と目標の -100°C 以下を満足しており、1/2t 部でも -95°C と十分な母材靱性が得られている。また板厚方向引張試験における絞り値は 61% 以上と、十分な耐ラメラチア性を有している。

4.2 NRL 落重試験特性

開発鋼板について ASTM E208 の NRL 落重試験を実施した。Table 5 にこの結果を示すが、表面部および板厚 1/2t 部での TNDT はそれぞれ -120°C、-90°C と Table 1 の目標 TNDT ≤ -85°C という非常に厳しい脆性亀裂伝播停止特性要求を十分に満足している。

Table 5 Drop-weight test results of steel plate developed

Test piece type	Location	Direction	TNDT (°C)
P-2	Surface	L	-120
	1/2 t	L	-90

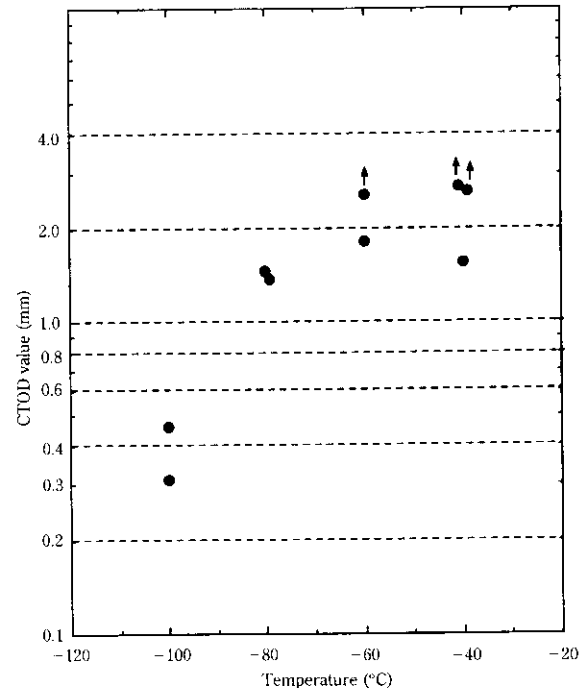


Fig. 6 CTOD test results for steel plate developed

4.3 母材の破壊靱性

4.3.1 脆性破壊発生特性

母材の脆性破壊発生特性を 3 点曲げ CTOD 試験 (試験片厚み B とすると $B \times B$ サイズ)³⁾により調査した。Fig. 6 にこの結果を示すが、-40°C での CTOD 値は 1.55 mm 以上あり -80°C でも 1.37 mm 以上の良好な値を示した。

4.3.2 脆性亀裂伝播停止特性

母材の脆性亀裂伝播停止特性を ESSO 試験により調査した。Fig. 7 に脆性亀裂伝播停止特性 K_{Ic} 値の温度依存性を示す。 K_{Ic} 値は使用温度 -40°C、使用応力を降伏応力の 1/2 とすると WES3003A 種⁴⁾を満足しており十分な脆性亀裂伝播停止特性を具備している。

4.4 歪み時効特性

鋼板表面近傍について、最大引張 10% の歪み付加ののち、250°C で 1h の時効処理を行い、シャルピー衝撃試験により靱性値の変化を調べた。Table 6 に試験結果を示すが、歪み付加 5% では歪み時効処理による破面遷移温度の上昇は最大で 10°C であり非常に小さい。また 10% の歪付加でも 50%FATT は 105°C と良好な結果となっている。

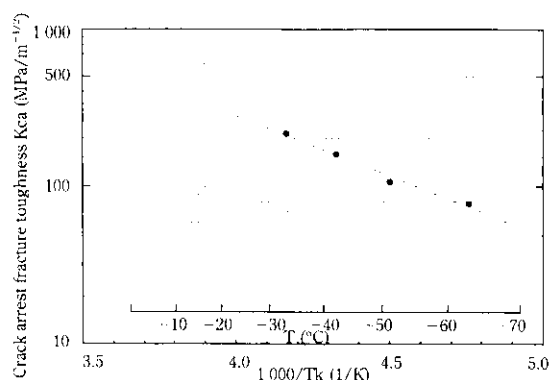


Fig. 7 Results of temperature gradient type of ESSO test for crack arrest fracture toughness for steel plate developed

Table 6 Effect of strain aging on Charpy impact properties for steel plate developed

Strain and aging ¹⁾	Charpy impact properties ²⁾			
	Absorbed energy (J)			50% FATT (°C)
	-60°C	-80°C	-100°C	
No	324	305	258	-135
5% + aging	310	291	231	-125
10% + aging	298	244	206	-105

¹⁾ Aging : 250°C × 1 h

²⁾ Specimen location and direction : subsurface, transverse

4.5 溶接性

低温割れ感受性を JIS Z3158 の斜め Y 型拘束割れ試験により調べた。Table 4 にその結果を示すが、表面、断面およびルート割れ阻止温度は 25°C 以下であり、実施行においては予熱無しでの溶接が可能と考えられる。

5 溶接継手の諸特性

5.1 溶接条件

Table 7 に鋼板の溶接条件を示す。K 開先、入熱量 5.0 kJ/mm の多層サブマージアーク溶接を実施した。

Table 7 Welding conditions

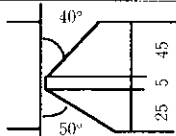
Welding method	Wire × Flux	Groove shape (mm)	Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)	Preheat temp. (°C)	Interpass temp. (°C)
Multipass SAW	KW30T (modified) × KB100		L T	550 550	30 32	410	5.0	min. 250	min. 250

Table 8 Mechanical properties of welded joints of steel plate developed

Welding method	Heat input (kJ/mm)	Tensile test		V-Charpy impact test							
		TS (MPa)	Location of rupture	Thick wise location	Testing temperature (°C)	Absorbed energy (J)					
						WM	FL	HAZ1	HAZ3	HAZ5	HAZ7
Multipass SAW	5.0	543	HAZ	1/4 t	-60°C	214	255	381	335	315	329
		546	HAZ		-80°C	194	217	284	283	269	306
					50°FATT (°C)	-85	-90	-135	-155	-130	-95

5.2 溶接継手の基本特性

Table 8 に継手の引張試験および板厚 1/4 t 部での継手各部位のシャルピー衝撃試験結果を示す。継手の引張強度は Table 1 の母材強度の目標値を十分満足した。継手シャルピー吸収エネルギーは fusion line 部 (溶接金属 50%、HAZ 50% を含む位置) でも -60°C で 255 J 以上、50%FATT は -90°C と、十分な継手シャルピー特性を示している。

5.3 溶接継手部の CTOD 特性

継手 CTOD 試験は、母材と同じ B × B サイズの試験片を用い、ASTME1290 および API RP2Z に基づいて試験および評価を行った。Fig. 8 に試験結果を示す。-40°C での CTOD 値の最小値は

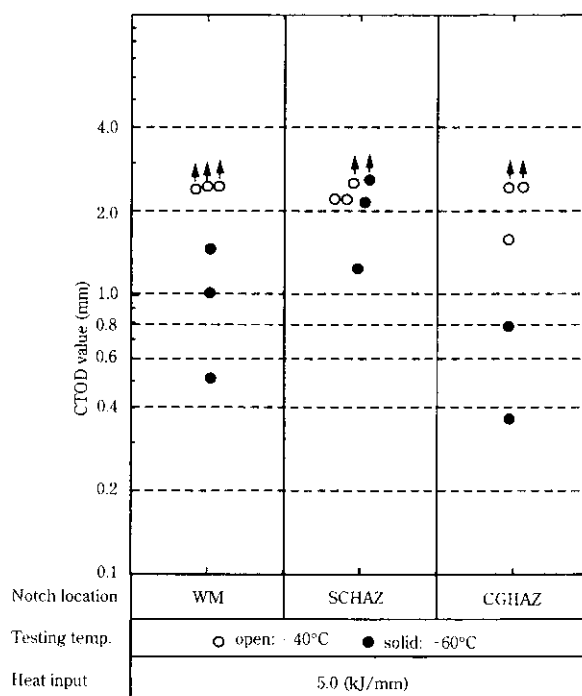


Fig. 8 CTOD test results for SAW welded joints of steel plate developed

CGHAZ 部で 1.39 mm、SCHAZ 部で 2.22 mm、WM 部で 2.35 mm 以上とそれぞれ目標値の 0.30 mm 以上 (CGHAZ 部、SCHAZ 部)、0.43 mm 以上 (WM 部) を十分満足し、 -60°C においても CGHAZ 部で 0.38 mm 以上、WM 部でも 0.52 mm 以上の良好な値が得られた。なお CGHAZ 部の試験片の亀裂先端で粗粒 HAZ 部が占める比率は最小でも 23% 以上であり、API RP2Z の規定を満足している。

6 結 言

設計温度 -40°C の溶接継手部の CTOD 値 0.30 mm 以上ならびに NRL 落重試験の TNDT が -85°C 以下といった非常に厳しい低温靱性仕様に対応した 75 mm 厚の氷海域海洋構造物用高靱性 YP420MPa 級厚鋼板を低 C-低 Si-Cu-Nb-1.1%Ni 系の成分系で MACS プロセス (multipurpose accelerated cooling system) 適用により開発し、その母材およびサブマージアーク溶接継手部特性を調査した

結果、以下の結論を得た。

- (1) 母材靱性は T 方向の $1/2t$ 部の破面遷移温度で -95°C 、L 方向の CTOD 値は -40°C で 1.55 mm 以上、 -80°C でも 1.37 mm 以上であり非常に良好な結果が得られた。
- (2) NRL 落重 TNDT は表面部および $1/2t$ 部で -120°C 、 -90°C と、ともに目標値の -85°C 以下を十分達成し、良好な脆性亀裂伝播停止特性が得られた。
- (3) K 開先、入熱 5.0 kJ/mm の SAW 継手において溶接熱影響部の CTOD 値は -40°C 、CGHAZ 部で 1.60 mm 以上、SCHAZ 部で 2.22 mm 以上であり、目標値 0.30 mm 以上を達成し、WM 部でも 2.35 mm 以上と目標値 0.43 mm 以上を十分に満足した。また、 -60°C においても CGHAZ 部で 0.38 mm 以上、SCHAZ 部で 1.20 mm 以上、WM 部も 0.52 mm 以上と良好な値が得られ、氷海域で脆性破壊の発生、伝播に対して十分な抵抗を有することが確認できた。

参 考 文 献

- 1) American Petroleum Institute: "API Specification 2W, 3rd. Edition", July (1993)
- 2) American Petroleum Institute: "API Recommended Practice 2Z, 2nd Edition", July (1992)
- 3) T. Kubo, Y. Nakano, O. Tanigawa, H. Ishii, and P. W. Marshall: "A 100 mm Thick API 2W GR60 Steel Plate Produced by TMCP and Its Applicability to Offshore Structures", OMAE, *Materials Engineering ASME*, (1994)3
- 4) P. P. Puzak, E. W. Eschbacher, and W. S. Pellini, *Welding J.*, 31 (1952)561S
- 5) 弟子丸慎一, 平井征夫, 天野慶一, 上田修三, 上村尚志, 坪田一也: 川崎製鉄技報, **18**(1986)4, 295-300
- 6) 小林英司, 弟子丸慎一, 平井征夫, 小川隆生, 天野慶一, 中野善文: 川崎製鉄技報, **19**(1987)2, 105-110
- 7) 谷川 治, 石井裕昭, 板倉教次, 天野慶一, 中野善文, 川端文丸: 川崎製鉄技報, **25**(1993)1, 13-19
- 8) 日本溶接協会: WES3003 「低温用圧延鋼板判定基準」, (1995)