

海洋構造物用厚肉 TMCP 鋼板の開発

Heavy TMCP Steel Plate for Offshore Structure

鈴木秀一/Shuichi Suzuki・鋼板事業部 厚板技術部 参事

染谷 良/Ryo Someya・鋼板事業部 厚板技術部 部長

要 約

海洋構造物の建造費用低減に寄与することを配慮して開発された厚肉 TMCP 鋼板について紹介する。最近の海洋開発は計画内容が決定してから構造物建設までの工期が短くなってきており、その建設スケジュール短縮によって多大な建設費の削減を実現することができる。今回紹介する厚鋼板は製造納期の短縮以外に、溶接施工の簡素化を通して海洋構造物の建設費用低減に資することができ、メキシコ湾岸で建設された TLP (Tension Leg Platform) でその有効性が実証された。本厚鋼板の設計思想から実用化実績までの経緯について記述した。

Synopsis

This paper describes a newly developed steel plate which enables fast-track construction of offshore structures through a short steel delivery period and a short fabrication period with a minimized number of welding procedures and low preheat. The total cost saving achieved by utilizing this steel was actually verified in the construction of Tension Leg Platforms (TLP) in the Gulf of Mexico. This was only possible because of newly developed API 2W composition mono-chemistry which ensures a high heat-affected zone (HAZ) CTOD toughness. In addition to this high steel performance, close teamwork between the end user, fabricator and steelmaker with uninhibited sharing of technical information was the other essential key for the success of these TLP construction projects.

1. 緒 言

メキシコ湾岸においては、21世紀初頭に予想される中国、インドを中心とした世界的な石油需要の増加を見越して、海洋構造物の建設が相次いで進められている。米国 SHELL OFFSHORE INC.では2000年以降まで2年に1基のペースで TLP を建設する計画で事業を展開しており、刺激された SHELL 以外の石油会社もそれぞれの開発計画を急ピッチで推進し始め、メキシコ湾は正に海洋石油開発競争たけなわという様相を呈している。

SHELL OFFSHORE INC.は世界最深の2860ftの海底から石油を採取するために Auger と呼ばれる TLP をメキシコ湾岸に建設し、1994年からすでに同 TLP による石油生産を開始した。Auger の成功で力を得た SHELL OFFSHORE INC.は更に、Mars, Ram-Powell, Ursa と呼ばれる TLP を次々と建設し、その度に Auger で更新した世界(最深)記録を自ら塗り替えてきている。例えば Ram-Powell フィールドは SHELL, AMOCO, EXXON の3社共同出資による開発であり、Auger よりも更に400ft深い海底からの石油採掘用 TLP となった。これらの巨大な海洋構造物には、深海の波浪と海上での風

圧に耐える必要性から新しい技術導入が要求され、その構想の中で4"厚の高性能厚鋼板が開発された。

Mars, Ram-Powell, Ursa の計画的な短期建設のために、新規に開発された50 ksi および60 ksi の降伏点鋼の製造認定試験も短期間で進められた。これらの TLP 用の厚板はその適用用途によって、Critical, Special, Primary, Secondary の4クラスに分類されており、靱性レベル、品質管理レベルは各クラスによって異なるが、低予熱での溶接を可能とするために、良好な溶接性がすべてのクラスに対して要求された。そのため、API 2W に準じた TMCP 鋼がすべてのクラスに対して適用され、設計者の材料選別工数が削減されると同時に材料発注から厚板製造開始までの期間が一律に短縮された。SHELL の規格では、Critical および Special クラスの厚板には出荷試験ベースで母材 CTOD 試験と DWT 試験が要求されるが、認定試験結果から、シャルピー試験で-80℃以下の遷移温度を有している場合には要求 CTOD, DWT 性能が保証されるという結果を踏まえて、製造リードタイム短縮の面から、これらの特殊試験は-80℃でのシャルピー試験で代替された。

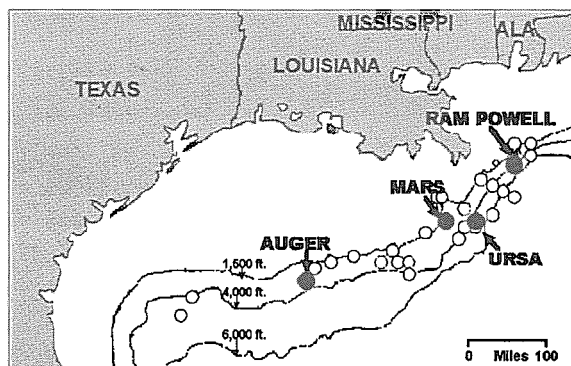
短期間での TLP 建設のために、このシャルピー試験代替法以外にも鉄鋼メーカー側から種々の方策が提示された。

そのひとつが、すべてのグレードおよびすべての板厚の厚板(Critical および Special)を炭素等量の低い同一の成分で造り分けるという方策であり、これにより、鋼の鋳込み工程が短縮され、施工者も同一の溶接施工基準をすべての鋼材に適用できるという恩恵を享受することができ、TLPの短期間建設に大きく貢献することとなった。ただし、この方式を実現するためには TMCP でのきめ細かな製造管理と溶接熱影響部の靱性劣化のない鋼材が必要とされた。

このような安定した溶接施工を保証しうる高品質の鋼材を迅速に開発、供給し得たのは、TMCP 技術を中心とした厚板製造技術の進歩もさることながら、エンドユーザー、施工会社、製鉄会社間での信頼ある技術対応と情報の共有化が不可欠であったことを追記しておきたい。本報告はこれらの背景で、開発、製造され、メキシコ湾岸の最大級の TLP 用として適用された厚鋼板について紹介したものである。

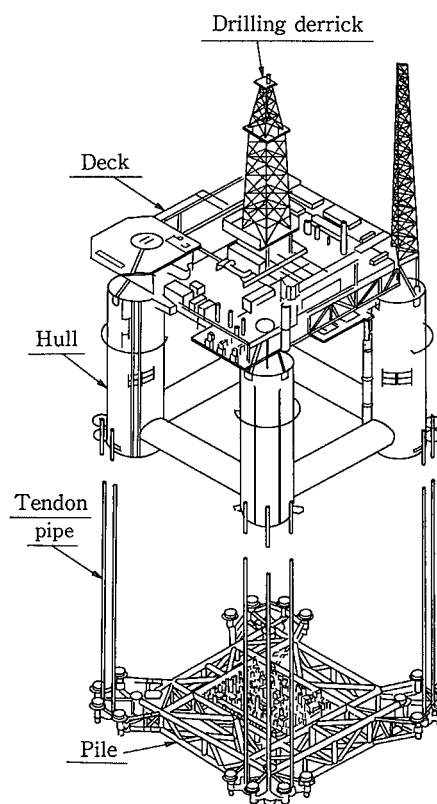
2. メキシコ湾岸 TLP 用厚鋼板供給実績

メキシコ湾において最近建設が進められている



第1図 メキシコ湾における SHELL の TLP 建設位置
Fig.1 Location of Shell TLP's in the Gulf of Mexico

SHELL OFFSHORE INC.の TLP の建設位置を第1図に、また住友金属がこれらの TLP 用として供給した製品量実績を鋼管も含めて第1表に示す。第2図には参考として TLP の一般的な構造を示す。



第2図 一般的な TLP の構造
Fig.2 General structure of TLP

3. 厚鋼板の材料設計

TLP への適用鋼材の中で Critical クラスの鋼材に対しては API 規格 RP2Z¹⁾に則った溶接性試験、溶接熱影響部

第1表 SHELLのTLPへの製品供給実績 (H9年10月時点)
Table 1 Sumitomo's steel supply record for the TLP's

TLP Name	AUGER	MARS	RAM-POWELL	URSA
Owner	Shell	Shell	Shell/Exxon /Amoco	Shell/BP /Exxon /Conoco
Water depth	2 860 ft	2 933 ft	3 220 ft	3 950 ft
Production start	1994	1996	1998	2000
Steel supply	Deck*	—	5 644 mt	6 387 mt
	Hull*	—	2 899 mt	26 400 mt
	Tendon pipe	5 300 mt	5 520 mt	6 000 mt
	Pile*	—	2 899 mt	2 600 mt
	Seamless and others	12 900 mt	7 600 mt	3 600 mt

Note: * Steel plates were supplied

CTOD 試験による製造認定試験が必要とされ、この認定試験では更に SHELL の指定による特殊な試験項目が追加された⁷⁾。この鋼材仕様と短期 TLP 建設という SHELL のコンセプトを受けて、厚鋼板の化学成分は SHELL のプロジェクト専用に 1 成分をすべてのグレード・板厚に適用することを前提にして設計された。成分設計に当たっては以下の特性確保が最重視された：

- (1) すべての溶接入熱条件において高い HAZ CTOD 靱性を -10°C において確保し得ること。
- (2) シャルピー遷移温度が -80°C 以下になるような高い母材靱性を有すること。
- (3) 低予熱の溶接施工を可能とするような高い溶接性を有すること。

これらの性能を満足させるために、低 P_{cm} —低 Al—微量 Nb—Ti をベースとした成分系が選定された。Al を低く抑えることによって HAZ 靱性の改善を図り^{6),10)}、最小限の微量 Nb—Ti 量の最適添加によって TMCP 鋼の母材低温靱性の改善が図られた^{8),9)}。この化学成分は実際の注文投入の半年前に決定され、半年間の製造認定試験によってその効果が確認された¹¹⁾。このような短期間での認定試験は製造所と SHELL OFFSHORE INC. との緊密で信頼ある連携によって可能となった。

同一成分系で高い母材低温靱性を確保するためには TMCP による製造方法においても高度な製造管理が必要とされ、鋼材グレード・板厚ごとに TMCP 条件が細かく設定・管理された。特に厚肉材は以下のような冶金的效果を重視して、TMCP 法で製造された³⁾：

- (1) 制御圧延開始前の工程におけるオーステナイト粒の細粒化
- (2) 適切な温度・板厚範囲における充分な累積圧延ひずみを

制御圧延で確保。

- (3) 圧延ひずみを受けたオーステナイト粒を完全に再結晶させた後の加速冷却処理。

4. 認定試験

Critical クラスの鋼材に対して、API 2W²⁾の Gr.50 では 4" まで、Gr.60 では 3" までの板厚に対して認定試験を受けた。第 2 表にそれぞれの最大厚の試験材に対して実施された母材試験結果の要約を示す。前述したとおり、両グレード材共同一の成分で製造され、鋼材の P_{cm} 値は 0.18%，炭素等量値 (IIW) は 0.39% であった。第 2 表においてシャルピー試験片、Pellini 型落重試験片 (DWT) は板厚中央部から採取されたものであるが、ともに高い靱性値を示し、5% の歪み時効後においても良好な靱性値を示した。

HAZ 靱性試験は API RP2Z に則って K 型開先で溶接継手を作成して実施された。第 3 表に試験継手の溶接条件を示す。溶接入熱としては 3 段階のレベルで実施され、0.7 kJ/mm は GMAW で、3.0 kJ/mm と 4.5 kJ/mm は SAW で溶接された。作製された溶接継手に対して、2 mm—V ノッチのシャルピー試験と標準の全厚 CTOD 試験によって HAZ 靱性の調査を行った。第 3 図は実施された CTOD 試験片の切断後のマクロ腐食写真によって CGHAZ (Coarse Grained HAZ) 組織の直線性を例示したものである。

第 4 図と第 5 図に、3" 厚の Gr.60 に対して実施されたシャルピー試験結果と CTOD 試験結果の一部を示す。シャルピー試験においては、FL (Fusion Line) での vE-40 と vTs はともに SCHAZ (Sub-Critical HAZ) での値と大きな差異はなく、母材での試験結果と比べてもほとんど劣

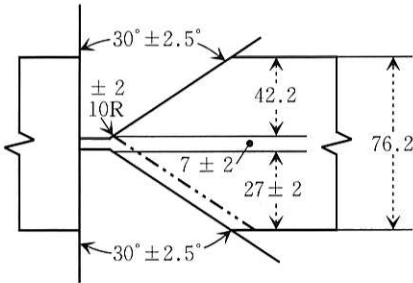
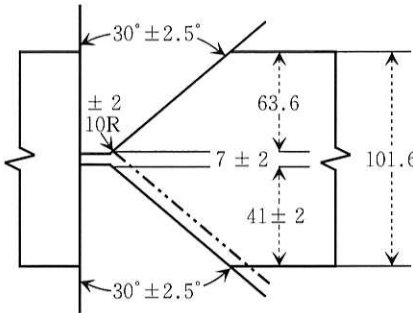
第 2 表 母材試験結果

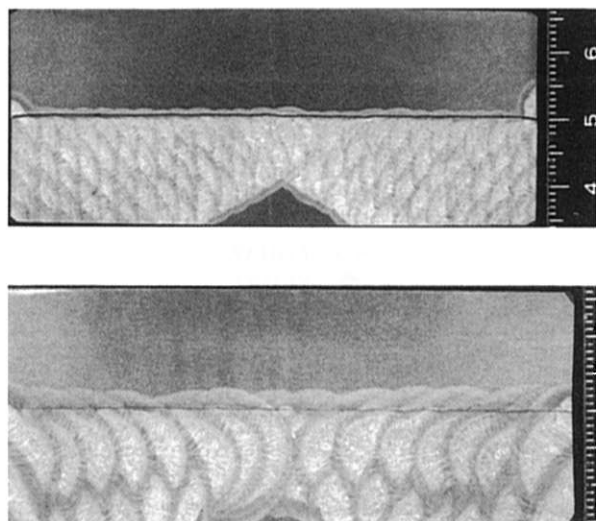
Table 2 Base metal test results

Test items		3" Gr.60		4" Gr.50	
		Result	API 2W	Result	API 2W
Tensile test	Yield strength, N/mm ²	441—458	414—586	381—413	345—483
	Tensile strength, N/mm ²	537—551	Min. 517	496—530	Min. 448
	Elongation, %	30—35	Min. 22	27—34	Min. 23
Charpy test	vE-40°C, Joule	350—396	Min. 48	411—419	Min. 41
	vTrs, °C	-97	—	-89	—
Z-Tensile test	Reduction of area, %	65—72	(Min.30)	75—77	(Min.30)
DWTT	NDTT, °C	-90	—	-65	—
CTOD test	CTOD, mm	Min. 1.69	—	1.14	—
5% Aged test	Charpy vE-40°C, Joule	229—260	(Min. 48)	241—380	(Min. 41)
	NDTT, °C	-70	—	-60	—

Note: () indicates a supplementary requirement to API 2W.

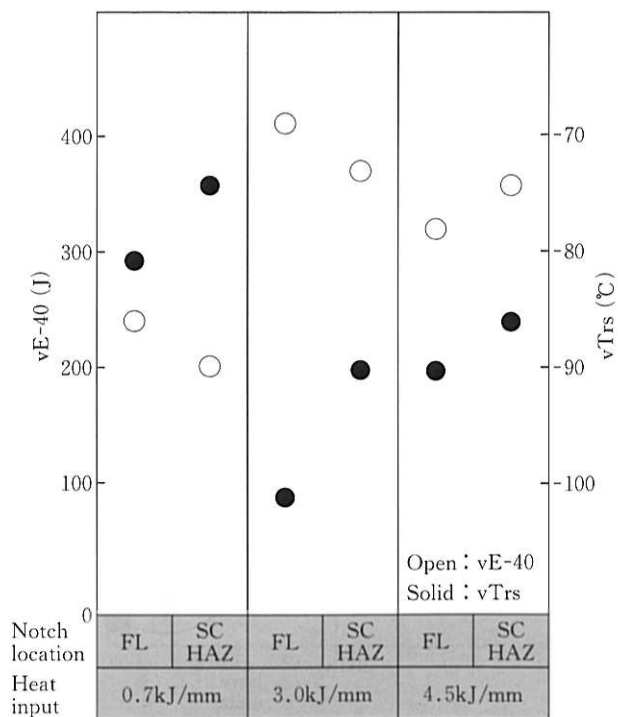
第3表 溶接条件 (3"-Gr.60, 4"-Gr.50)
Table 3 Welding condition (Gr.60-3", Gr.50-4")

Heat input	Low	Middle	High
Welding method	GMAW	SAW	
Groove shape	 <p>3"Gr.60</p>	 <p>4"Gr.50</p> <p>(Unit : mm)</p>	
Heat input	0.7 kJ/mm	3.0 kJ/mm	4.5 kJ/mm
Welding material	Wire: Φ DW-55L Shielding gas: 100%CO ₂	Wire: Φ W-36 Flux: BL-55	Wire: Φ W-36 Flux: BL-55
Preheat	Ambient	100 °C	100 °C
Interpass	Ambient	250 °C max.	250 °C max.



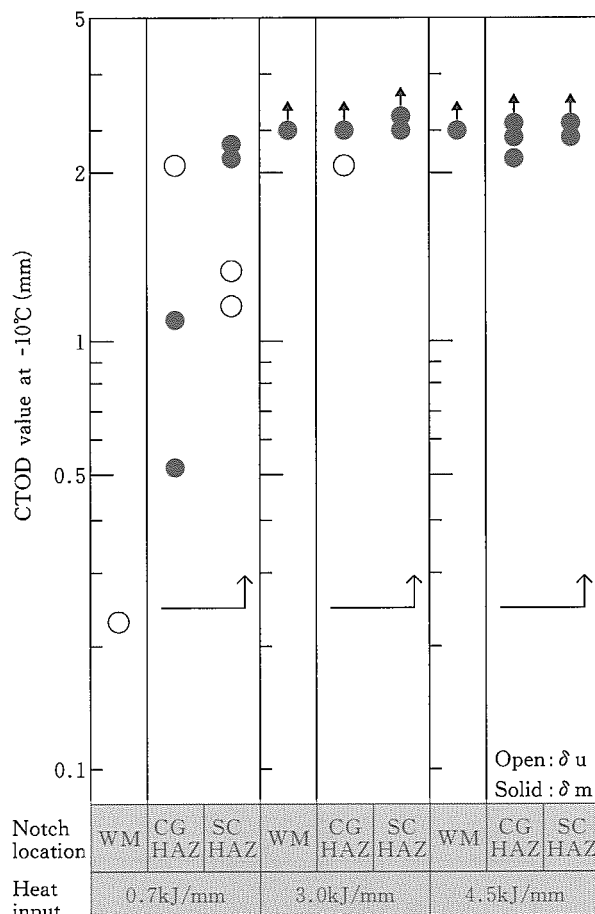
第3図 3"-Gr.60のHAZ-CTOD試験における
疲労切欠き先端の断面の代表的マクロ組織
Fig.3 Typical macro-etched section of the HAZ CTOD
specimens for 3" Gr.60 steel, showing position
of fatigue precrack tip

化していないことがわかる。また、HAZのCTOD試験においても、 -10°C におけるすべての有効なCTOD値は、CGHAZ, SCHAZで規定された0.25mmを上回っており、良好な結果であった。これらの結果から、設計された化学成分によってHAZ組織がきちんと改善されていることがわかる。



第4図 3" Gr.60のHAZにおけるシャルピー試験結果
Fig.4 HAZ Charpy test results for 3" Gr.60

SHELL OFFSHORE INC.のTLP建設においては鋼材の溶接性が重要な特性であったため、試験材の水素割れに対する抵抗についてはAPI RP2Zの規定試験範囲を超えた種々の溶接条件において調査された。



第5図 3" Gr.60のHAZにおけるCTOD試験結果
Fig.5 HAZ CTOD test results for 3" Gr.60

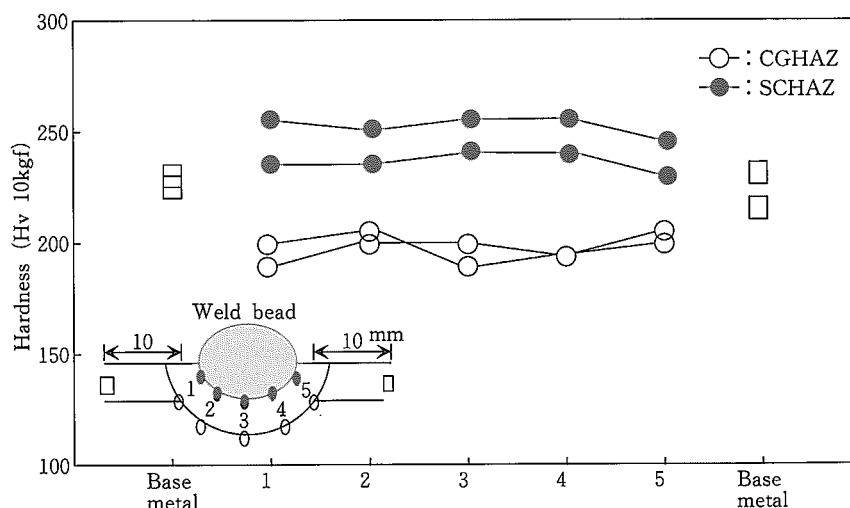
第6図は3"のGr.60に対して Bead-on-plate 試験によって HAZ 最高硬さを調べた結果である。溶接入熱は0.7 kJ/mmで実施された。CGHAZの最高硬さはヴィッカーズで高々250程度であり、要求されている350よりもはるかに低い値であった。

鉄研型のY開先拘束割れ試験はAPI RP2Zに準拠した3.0ml/100gの標準水素レベルでの試験に加えて、高水素のSelf-shielded FCAWを想定した11.6ml/100gの水素レベルでの試験も実施された。これらの2レベルの拡散性水素値それぞれに対して溶接入熱と予熱温度を変化させることによって、以下の限界条件を求める試験を実施した：

- (1)25°C以下の予熱条件で低温割れを阻止できる最小入熱。
- (2)0.7kJ/mm以下の溶接入熱において低温割れを阻止できる最低の予熱温度。

第4表にY開先拘束試験結果を示す。標準の水素量での試験では(25°C予熱の場合)溶接入熱0.5kJ/mmでも割れは発生しないが、11.6ml/100gの高い水素量では溶接入熱を2.0kJ/mm以上にすることがわかる。

CTS (Controlled Thermal Severity) 試験においても同様に、APIの標準の溶接条件以外に、実溶接施工で最も厳しいと想定される条件で試験を実施した。APIに準じた試験条件としては、入熱1kJ/mm－水素量3ml/100gが設定されたが、限界条件としては、入熱0.6kJ/mm－水素量11.6ml/100gの条件を設定した。第5表にCTS試験結果



第6図 3" Gr.60に対するBead-on-plate硬さ試験結果
Fig.6 Bead-on-plate hardness test results for 3" Gr.60

第4表 Y開先拘束割れ試験結果
Table 4 Tekken test results

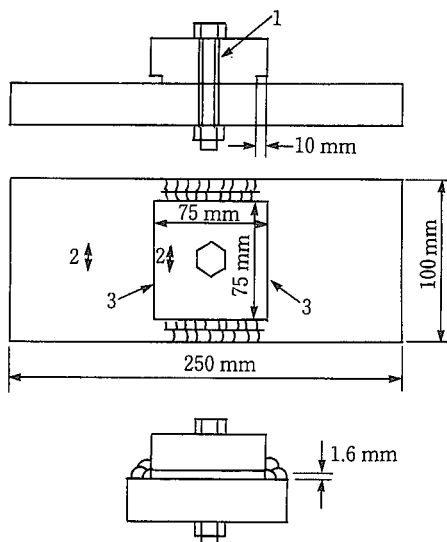
Hydrogen level	Welding condition to prevent cold cracking	
	Heat input at R.T.	Preheat temperature with 0.7 kJ/mm
3 ml/100g	≤0.5 kJ/mm	≤16°C
11.6 ml/100g	2.0 kJ/mm	75°C

第5表 CTS試験結果
Table 5 CTS test results

Condition	Heat input	Hydrogen level	Cracking*		
			W.M.	F.L.	HAZ
API RP2Z condition	1 kJ/mm	3 ml/100g	0/6	0/6	0/6
Marginal condition	0.6 kJ/mm	11.6 ml/100g	0/6	3/6	0/6

Note:* Number of cracked sections/Number of sections examined

** Shape of test specimen:



1: Clearance hole, 2: Rolling direction 3: Test welds
13 mm dia.

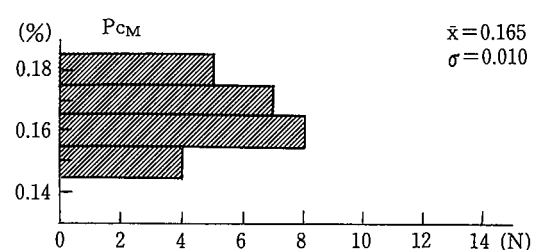
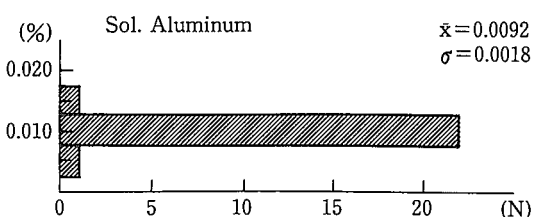
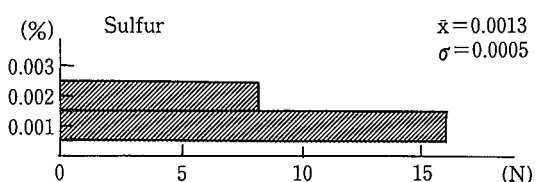
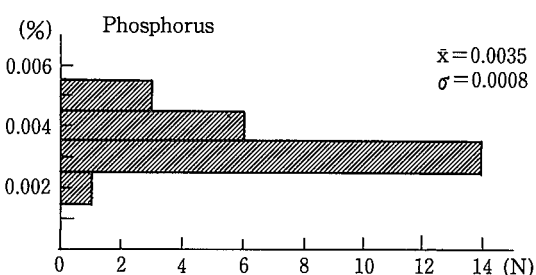
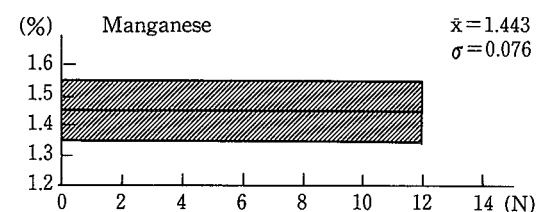
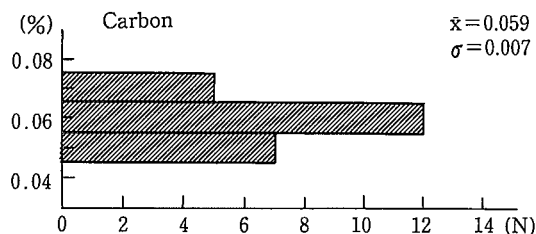
を示すが、APIの標準条件では溶接割れが発生しなかったものの、限界条件ではFL部に割れが発生した。

これらの溶接性試験結果から、SHELL OFFSHORE INC.のTLP建設で適用される溶接管理条件として、SAW, Gas-Shielded FCAW, GMAW, SMAWによる溶接の場合は予熱なし、Self-Shielded FCAWの場合には2kJ/mm以上の入熱あるいは75℃の予熱という溶接管理条件が設定された。

5. 実製品製造実績

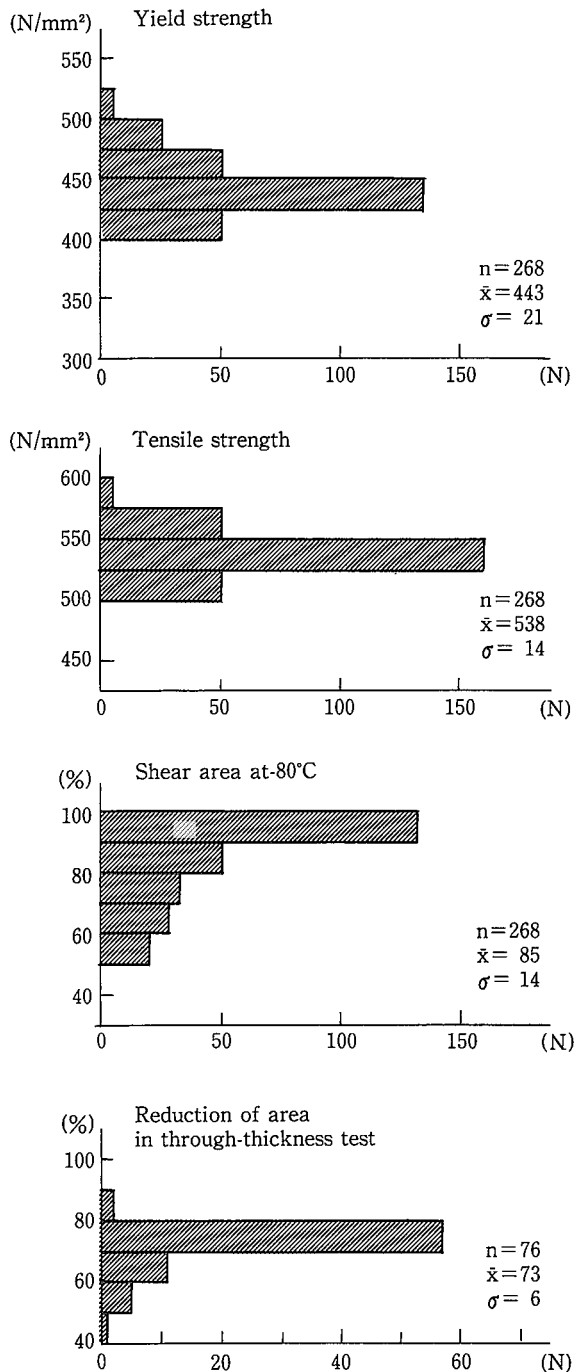
実製品の製造実績例として、第7図にMARS TLPのDeck部用に製造されたCriticalおよびSpecialクラスの厚鋼板の鋳込み成分実績を、またこれらの厚鋼板の内でGr.60に対する機械試験値実績を第8図に示す。ただし、これらの厚鋼板の中には板厚方向引張試験が要求された鋼板と要求されなかった鋼板があるので、第8図中の(板厚方向引張試験)断面収縮率は試験を実施した鋼板についてのみの結果を示した。

対象の鋼板(Gr.50とGr.60)製造のために24チャージが転炉で精錬されたが、それらのレードル成分分析の結果、 P_{CM} は0.15-0.18%の範囲で非常に低く管理され、その目的のために炭素量も0.05-0.07%と低い範囲で製造された。燐や硫黄のような不純物元素についても非常に低いレベル



第7図 実製品の化学成分実績

Fig.7 Production histograms of chemical composition
(24 heats)



第8図 Gr.60の実製品の機械試験値実績 (板厚: 0.788-3")
Fig.8 Production histograms of mechanical properties for Gr.60 (Thickness: 0.788-3")

で製造されており、燐は0.005%以下、硫黄は0.002%以下の範囲に管理された。鋼はSiとAlで脱酸されたが、HAZ靱性改善の観点から酸固溶性のAl量は0.015%以下で製造された。

第8図は0.788-3"厚のGr.60の機械試験値実績を示したものである。引張試験において、1.25"以下の板厚の鋼板は1.25"幅の標準板状試験片によって、また1.25"超えの板

厚の鋼板は板厚中央から採取された丸棒試験片によって試験が行われ、第8図には両者の結果が取り混ぜて示されているが、降伏点、引張強さともに狭い範囲に収まっている。-80°Cのシャルピー試験では吸収エネルギーが130-460Jの範囲であり、すべて50%以上の延性破面率を示した。一部の鋼板について実施された板厚方向引張試験結果においては、断面収縮率が平均で73%、低いものでも40%以上であった。板厚方向が35%以上であればほぼ完全にラメラティアを抑制できるという従来の知見に従えば、非常に良好な板厚方向特性であると言える。

6. 開発鋼板の経済性

今回開発された厚鋼板を使用することによる海洋構造物建設の費用軽減効果は以下のように集約される：

海洋構造物設計者にとって、

- ・適用鋼材分類数の最小化および単純化による鋼材選定作業の工数削減
- ・その結果として鋼材仕様発注の迅速化

建設施工者にとって、

- ・適用溶接法の種類の最小化
- ・予熱なしあるいは低予熱施工
- ・厚鋼板製造納期の短縮、
- ・以上の結果としての施工工期短縮と施工費用削減

最終ユーザーにとって、

- ・海洋構造物建設工期短縮による総費用削減

7. 結 言

(1) SHELL OFFSHORE INC.の短工期でのTLP建設要請に応じて、同一成分設計思想に基づいた低 P_{CM} 、低AlのAPI 2W Gr.50 & Gr.60クラス厚鋼板が開発、製造された。

(2) API RP2Zに則った製造前鋼材認定試験において、3"のGr.60および4"のGr.50鋼板は高いHAZ靱性を有することが実証された。

(3) MARS TLPのDeck部用の厚鋼板は非常に狭い成分・機械的性能ばらつき範囲で製造され、すべての鋼板が-80°C以下のシャルピー遷移温度規定を満足した。

(4)非常に低い炭素等量の成分設計によって、低い予熱温度での溶接施工が実現された。

(5)本開発鋼板適用による材料選定作業工数の最小化、溶接施工の簡素化、施工工期短縮を通して総建設費用が削減されることが、メキシコ湾岸における相次ぐTLP建設によって実証された。



鈴木秀一/Shuichi Suzuki

鋼板事業部 厚板技術部
参事

(問合せ先: 03(3282)6380)

参考文献

- 1) American Petroleum Institute (1992). "Recommended Practice for Preproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures", API Recommended Practice 2Z (RP 2Z)
- 2) American Petroleum Institute (1993). "Specification for Steel Plates for Offshore Structures, Produced by Thermo-Mechanical Control Processing (TMCP)", API Specification 2W (SPEC. 2W)
- 3) Bessyo, K, Nito, N, Someya, R, Suzuki, S, and Kamada, Y (1991). "Development of TMCP Thick Plate for Skyscrapers", The Sumitomo Search, No. 45, pp.48-55
- 4) British Standards Institution (1979). "Crack opening displacement (COD) testing", BS5762
- 5) Campbell, W P (1976). "Experiences with HAZ Cold Cracking Tests on a C-Mn Structural Steel", Welding Research Supplement, May, pp.135-143
- 6) Fukada, Y, and Komizo, Y (1992). "Study on Critical CTOD Property of Heat Affected Zone in C-Mn Microalloyed Steel", IIW Doc. IX-1664-92, SC-IX-A
- 7) SHELL (1993). "SUPPLEMENT 16, SHELL OFFSHORE INC., Material Quality Level 1, Carbon and Low Alloy Steel, Weldable Structural Plate Requirements, 50-80 ksi SMYS, Issue 2"
- 8) Suzuki, S, and Weatherly, G C (1985). "Characterization of Precipitates and Grain Growth in Simulated HAZ Thermal Cycles of Ti-Nb Bearing Steel Weldments", HSLA Steels '85, Beijing, Proceedings published by ASM, Paper No. 8520-014
- 9) Suzuki, S, Weatherly, G C, and Houghton, D C (1987). "The Response of Carbo-Nitride Particles in HSLA Steels to Weld Thermal Cycles", Acta Metallurgica, Vol. 35, No. 2, pp.341-352
- 10) Suzuki, S, Bessyo, K, Arimochi, K, Yajima, H, Tada, M, and Sakai, D (1994). "Low Temperature Type New TMCP Steel Plate for LPG Carriers", ISOPE '94, Osaka, pp.591-595
- 11) Suzuki, S, Sueda, K, Iki, H, and Smith J D (1995). "Metallurgical Design Basis, Qualification Testing, and Production History of 50 ksi and 60 ksi Steel Plate for the Mars TLP Deck Fabrication", OMAE'95, Copenhagen, ASME, pp.337-346