解 説

溶接構造物の破壊じん性要求とじん性試験法

—溶接部のもつ特異性が生む問題について—

(その3) 海洋構造物におけるじん性要求の現状と溶接施工*

原 沢 秀 明**

Fracture Toughness Requirement and

Fracture Toughness of Weldments

—Incidence of Characteristics due to Welding—

(Part 3) Toughness Requirements and Welding Procedures
in Offshore Structures*

by Hideaki Harasawa**

1. は じ め に

溶接構造物の製作に際して、継手性能として具備すべき要求品質を確認するために溶接施工法承認試験が実施される。ぜい性破壊の抵抗を評価する試験方法としては、2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験の適用が一般的である。

しかし、ぜい性破壊に対する重要度が高い構造物の製作において、新しい製造法、化学組成による鋼材の適用、強度、板厚の増大、新しい溶接方法、溶接材料の適用、工作精度、NDE の方法と頻度、PWHT の有無などぜい性破壊に対する影響因子をより詳しく評価する必要がある場合、何らかのより意味のある破壊じん性試験によって、継手の健全性を評価しようとする要求の生じるのは当然であろう。

本シリーズの(その1)¹⁾および(その2)²⁾では、これらじん性要求の実際と問題点および溶接継手に対するじん性試験法のあり方について述べられてきた。本報ではシリーズのしめくりとして、海洋構造物(主として生産用の固定式 Platform)を例にとり挙げ、じん性要求のより実際的な話題について、最近の諸規則、仕様をまず最初に紹介する。そして、シャルピー試験以外では、もっとも多く利用されている3点曲げ COD (Crack Opening Displacement) 試験に関し、試験要求の背景、試験実施上の問題点、さらに要求値確保のための溶接施工上の努力などについて述べる。

2. じん性要求に関する諸規則、仕様

海底油田・ガス田の掘削、生産に関わる海洋構造物は、大別すると、Jack-up Rig, Semi-submergeble Rig などいわゆる Rig と呼ばれる移動式(Mobile)、試掘用の構造物と、Jacket(鋼製やぐら)を主構造とする半永久的に使用される Platform と呼ばれる固定式(Fixed)、生産用の構造物に分けられる³⁾。後者については、水深が深くなった場合、Tension Leg Platform^{4,5)}などの新しい型式の構造も出現してきている。また北極海(ボーフォート海)に現在設置されている構造物は主として試掘用である。図1には、移動式試掘用と固定式生産用それぞれの一例を示す。

これら構造物の製作に関する規則のうち、じん性要求が明記されている主要な規則を挙げると表1に示すとおりである。諸規則も移動式試掘用(Mobile)と固定式生産用(Platform)を明確に区別しており、前者は船級協会、後者は米国石油協会(API)、英国エネルギー省(DOE)など石油エネルギー関連の国家的規格ならびに船級協会が主体となって整備されている。

じん性要求については、(その1)¹⁾にも示されたとおり、他の構造物に比べて厳しく、とくに Platform では厚板の継手に対して COD 試験が要求される場合が多い。以下それぞれの構造物に対する要求例の実際を紹介する。

2.1 Mobile offshore unit のじん性要求の実際

これら構造物は、荒天時安全区域に逃避することが容易でないこと、構造が特殊な形状をしていること、Jack-up Rig では Leg 部に降伏点 70 kgf/mm² 級高張力鋼が使用されることなど、通常の船舶とは異なる。

*原稿受付 昭和60年1月28日

**正 員 日本鋼管(株)重工研究所 Member, Tsu Laborafories, Nippon Kokan K.K.

このため各船級協会においては、独自に、じん性要求(主として鋼材使用区分)を規定している。

一例として、Det Norske Veritas (DnV) 規則の要求を図2および図3に示す。図2は鋼材使用区分であり、構造部材の重要度により3つのカテゴリーに分け、鋼材の強度を3種類に大別している。そして設計温度に応じて、鋼材のグレード(シャルビー試験温度)と適用し得る板厚の限界を定めている。例えば設計温度0℃の最重

要部材が降伏点 36 kgf/mm^2 級高張力鋼の場合、シャ

(a) Jack-up Rig

(b) Fixed Platform

図1 移動式および固定式海洋構造物の一例

表1 海洋構造物の製作に関してじん性要求の明記されている主要な規則

Mobile offshore unit		
United Kingdom	Llyod's Register of Shipping	'Rules for mobile offshore units'
USA	American Bureau of Shipping	'Rules for building and classing mobile offshore drilling units'
Norway	Det Norske Veritas	'Rules for classification of mobile offshore units'
Japan	Nippon Kaiji Kyokai	'Rules for mobile offshore units'
Fixed offshore structure		
United Kingdom	Department of Energy	'Offshore installations: guidance on design and construction'. 2nd edition London. HMSO, 1977. (new edition in preparation).
	British Standards	'BS 6235: 1982 Code of practice for fixed offshore structures'
USA	American Petroleum Institute	RP 2 A 'Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms' 13th ed 1982
		Spec 2 H 'Spec for carbon manganese steel plate for offshore platform tubular joints' 3rd ed 1983
France	Bureau Veritas	'Rules and regulations for the construction and classification of offshore platforms'
Norway	Det Norske Veritas	'Rules for design, construction and inspection of offshore structures'
	Norwegian Petroleum Directorate	'Regulations for structural design of fixed structures on the Norwegian continental shelf' 1977

図2 Det Norske Veritas (DnV) 規則における移動式海洋構造物に対する鋼材使用区分

ルビー試験温度は、板厚 25 mm で -20°C (DH), 板厚 50 mm で -40°C (EH) となり、降伏点 70 kgf/mm^2 級高張力鋼の場合、板厚 25 mm で -40°C (EX), 板厚 50 mm で -60°C (FX) となる。また要求される吸収エネルギー値は、図3に示すように、鋼材の降伏強度が高くなると、高く設定される。溶接部に対しては、シャルピー試験温度は母材と同じであり、溶接金属の吸収エネルギー値は母材の Transverse 方向の要求値と同じ値、ボンドおよび HAZ (HAZ 2 mm と HAZ 5 mm) は継手方向と圧延方向の関係から、その都度母材の L, T 方向のいずれかの値をとる。但し、ボンドと HAZ については、要求値が確保できないとき、母材そのものの値の 70% 以上あれば、別に落重試験 (NDT 温度を設計温度より 5°C 低く設定) でその性能を証明してもよい。また、板厚 50 mm を超える継手に対しては、別途じん性試

図3 DnV 規則における鋼材の降伏強度とシャルピー吸収エネルギー要求値の関係

験が必要とされる場合がある。

他の船級協会でも、多少の相違はあるもののほぼ同様な区分が決められているが、最近、IACS の Drilling Units のワーキング・グループで各協会が独自の手法を用いて規定しているものを国際的に統一する方向で、鋼材の使用区分が検討されているようである⁶⁾。

現状の規則の範囲では、例えば北極海など氷海厳寒域のような設計温度が低い場合や、鋼材強度、板厚が増大した場合、溶接部への考え方などにおいて、じん性要求値が明確にされていない場合が多い。

しかしながら、すでに北極海 (ボーフォート海) 向けの移動式人工島は建造されてきており、一つの例としては、米国船級協会 (ABS) の規則に準拠して、設計温度より $0 \sim 30^\circ\text{C}$ 低いシャルピー試験温度が適用されている⁷⁾。現在までのところ、造船用の船級規格材のうち低温じん性の良好な降伏点 36 kgf/mm^2 級高張力鋼の E グレード (EH 36) の規格範囲内で、 -60°C の試験温度を満足するように改善された鋼材が、これら構造物の重要部材に適用されることが多い。また、溶接部のシャルピー試験温度は母材と同じであることが多い。

2.2 Fixed offshore structure のじん性要求の実際

半永久的に使用される固定式、生産用の海洋構造物の場合、長期間にわたる自然環境の苛酷さ、検査、補修の困難さ、事故を起こした場合の人的、経済的な損失の大きさなどの理由により、設計、製作、検査のすべてにわたり、厳しい条件が設定され、じん性要求も必然的に厳しくなっている。

移動式の Rig たとえば Jack-up Rig が、柔軟性や重量軽減のため降伏点 70 kgf/mm^2 級高張力鋼のような高強度鋼を使用するのに対して、Platform では、

剛性や疲労強度の重要性のために降伏点 36 kgf/mm^2 級高張力鋼の厚板 ($\sim 100 \text{ mm}$) が使用される。

したがって、じん性要求の対象は36キロ級鋼材とその溶接部の場合が多く、各国の規則は、それぞれの領海に設置される Platform の稼動環境や過去の経験、研究成果を踏まえて整備されている。以下にそれらのじん性要求について、特徴的な部分を紹介する。

まず、米国の API-SPEC-RP 2 A では、構造用鋼板の区分を表 2 のように、強度をグループ分けし、かつそれぞれを部材の重要度に応じて、じん性要求の程度 (主としてシャルピー試験温度) をクラス分けしている。鋼材は ASTM 規格材を主に充当しているが、Class A 材では API-SPEC-2 H に示される Grade 42 (軟鋼) および Grade 50 (36キロ級高張力鋼) の使用を推奨している。また、格点部は応力集中の点から重要であるので、別に区分けしている。例えば水中部では管径(D)と板厚(t)の比によりじん性要求の程度を変え、評価の試験法も NRL の落重試験あるいはシャルピー試験のどちらかとしている。要求値としては、鋼材に対しては厳しい条件の場合、シャルピー試験温度、落重試験の NDT 温度の要求は $-30 \sim -40^\circ\text{C}$ 程度になる。これに対して、溶接金属への靱性要求は、シャルピー試験温度 -18°C で吸収エネルギー 27 J 以上であり、PWHT も通常は考慮されず、板厚が厚い場合など必要が生じた場合には承認試験をする方が良いとの表現のみである。

一方、欧州では北海向け Platform に対する規則を整備することを目的として、英国溶接研究所(The Welding Institute)を中心とする UK Offshore Research Programme (UKOSRP) の活動があり、その成果が DOE のガイダンス BS 6235、さらには DnV 規則などに反映されている⁸⁻¹²⁾。じん性要求の考え方は、板厚の増加とともにシャルピー試験温度を低く設定するが、PWHT 仕様の鋼材では試験温度を緩和しており、残留

応力緩和のぜい性破壊に対する抵抗の効果が含まれている。また、溶接部に対しては、溶接入熱を制限するなど配慮が詳細であり、とくに厚板 (40あるいは 50 mm を超える) 継手で PWHT を省略する場合は、溶接部 COD 試験が要求され、ぜい性破壊の伝播よりも発生を重要視する COD アプローチが一般化している。

じん性要求の実際を、英国の規則 (BS 6235) を例にとりあげて示すと、まず鋼材区分は図 4 のように As-Weld 仕様と PWHT 仕様に分けている。ここで、鋼材の Grade 50 と Grades 43 (40) は降伏点36キロ級高張力鋼と軟鋼の別である。シャルピー吸収エネルギーの要求値が Grade 50 においても 27 J と低いのは、他の諸規則 (34 J が多い) と相違しており、この理由は吸収エネルギー値よりも試験温度を低くする方が良いと考えられたからである。すなわち、水中部の重要部材の設計温度 $+4^\circ\text{C}$ の場合、As-weld 仕様の板厚 25 mm 、 40 mm および 80 mm 以上に対するシャルピー試験温度は、それぞれ -15°C 、 -32°C および -51°C と低く設定される。これに対して、PWHT 仕様の鋼材に対しては、板厚に関係なく、シャルピー試験温度は設計温度に近い 0°C と、大きく緩和されている。

溶接部については、COD 試験のデータをもとにして決めており^{10,11)}溶接金属についてみるとその要求の手順は図 5 に示すように詳細である。部材の重要度、板厚、PWHT によってシャルピー試験温度は変化し、例えば前述の鋼材仕様の場合、板厚 25 mm 、 40 mm の試験温度はそれぞれ -20°C および -40°C であり、PWHT 仕様では -20°C となる。また要求値は 35 J であって、母材よりも厳しい設定となっている。シャルピー試験片の採取位置も、図 6 に示すように、COD 試験との関係から、母材希釈やひずみ脆化により、もっともじん性が劣化すると考えられている溶接ルート部が推奨される。

そして、重要部材では 40 mm 、一般部材では 50 mm

表 2 米国石油協会規則 (API-SPEC-RP 2 A)
における固定式 Platform に対する構造用
鋼板選定基準

Steel	Subject	Grade	Detail
Steel groups	Strength level and weldability characteristics	I	$\sigma_Y \leq 280 \text{ MPa}$, $\text{Ce}q \leq 0.40\%$
		II	$280 < \sigma_Y \leq 360$, $\text{Ce}q \leq 0.45\%$
		III	$360 < \sigma_Y (\leq 420)$, also investigation for weldability, fatigue and toughness
Steel classes	Notch toughness Characteristics Suitable for the condition of Service	C	Impact tests are not specified
		B	Impact test at LAST* min. 20 J for Group I, min 34 J for Group II
		A	Impact test at LAST- ($20 \sim 30^\circ\text{C}$)

*LAST=Lowest Anticipated Service Temperature

図4 英国規格 (BS 6235) における固定式海洋構造物に対する鋼材使用区分とシャルピー衝撃試験温度
(a)As Weld 仕様の構造部材
(b)PWHT 仕様の構造部材

図5 BS 6235 における溶接金属じん性要求値決定のための手順

図 6 BS 6235 における溶接金属シャルピー衝撃試験片の推奨採取位置

を超える厚板の継手に対して PWHT を省略しようとするときは、溶接金属にノッチを入れた COD 試験が試験温度を設計温度として実施の必要がある。また HAZ については、入熱が $1.5 \sim 4.5 \text{ kJ/mm}$ の範囲であれば通常のアルミキルド鋼ならば十分な COD 値が得られるとの考えから母材同等の要求となっている。しかし、最近 HAZ のじん性が問題視される傾向にあり、この考え方はより厳しい要求として修正されてきている¹⁰⁾。

実際の海洋構造物の施工に際しては、上述の規則をもとに、個々の設計条件を考慮して仕様が決められる。その数例は本シリーズの (その 1)¹¹⁾ に示されているので参照されたい。なお、最近では北海向けのみならず、米国西海岸など比較的温暖と思われる地域での Platform にも COD 試験が要求される傾向にある。

3. 溶接部 COD 試験要求の背景とその実際

3.1 COD 試験要求の背景

COD アプローチの主要な目的の一つは、溶接構造物に存在する欠陥の重要度を定量的に評価するための基本的な考え方を与えようとするものである。すなわち、構造物の安全性をより合理的に評価しようとする機能適合性 (fitness-for-purpose) の考え方を支持するための手段の一つとして、とくに信頼性工学の導入によりさかんに検討されている。この概念はまた、必要なじん性を確保するための材料選択の尺度として使用でき、実際の Platform の製作においては、この材料選択 (鋼材と溶接材料)、溶接施工法承認の手段としての意味の方が大きい。

初期の北海向 Platform でこの概念が適用されたのを契機として⁸⁾、溶接部に対する COD 試験要求は一般化したといえるが、この最初の目的は、降伏点 36 kgf/mm^2 級高張力鋼の厚板を PWHT なしで、As-Weld にて重要部材に適用するためであった。実際、巨大な Platform の製作においては 63.5 mm (2.5 inch) 程度の厚板が屋外の組立 Yard で溶接され、局部 PWHT されるときも、技術的な困難さ以外に、工費、工数が多大となり、設計上、製作上 PWHT 省略は切実な課題であったといえる。

3.2 COD 試験適用の考え方と問題点

ところで、より意味のある破壊じん性試験法として、簡便な COD 試験が適用されるのは、英国領海の構造物に対する評価から始まったので当然ともいえるが、溶接施工法承認試験の一項目として広く利用され、定着してきた本評価法の考え方、現状の問題点について、ここでは、J. D. Harrison の論文⁹⁾を引用して簡単にふれておく。

まず、破壊を支配する因子として、①遷移現象、②板厚増加による拘束状態、および③ひずみ速度をあげ、基本的な取り組み方として、ぜい性破壊の発生と伝播に分けている。しかし、伝播阻止に対しては、あまりに安全側に偏り過ぎる結果になることや、構造物への評価に困難のあることをあげ、破壊発生試験により局部的なぜい化域 (LBZ: Local Brittle Zone) の発生傾向をとらえるのが良いとしている。試験方法としては、大型の広幅試験と COD 試験の関係をもとにして、COD 試験で評価するのが、安全側であるとしている。

また、伝統的なシャルピー衝撃試験については、①破壊の発生と伝播抵抗の割合が不明、② 10 mm 角という小さな試験片、③切欠きは機械加工された鈍な形状、そして④ひずみ速度を実構造に対応させ難いを挙げ、鋼材出荷試験などの品質管理的な意味しかないとしている。

しかしながら、COD 試験の適用に対しては、IIW 第 X 委員会をはじめ多くの議論がある。これらについては次の提案をしている。

①COD 試験を、日常的な試験法としてとらえるのではなく、とくに欠陥評価の重要度の高い継手に限って、その評価や施工法承認の手段として適用すべきである。

②この試験法の結果が、唯一のじん性評価のパラメータというわけではない。とくに拘束状態を評価するパラメータが必要であろうが、現状、全厚ノッチの本試験法が最良ではないか。

③荷重-変位曲線記録から測定される COD 値としては、 δ_c 、 δ_u および δ_m を推奨する。

④Pop-in の取り扱いは研究課題であるが、現状では、いくつかの例を除いて COD 値とするのが安全ではないか。

⑥ぜい性破壊のもととの遷移的な挙動は、データのばらつきとして現われる。とくに溶接部は不均質ゆえに、そのばらつきの程度も大きい。十分なデータによる統計的な解析により、現状の最低値による評価を変更することが望ましい。

以上のように課題解決のための提案がなされているが、このほか試験実施上あるいは評価上、溶接部固有の課題があり、本シリーズの（その2）^{22）}にふれられておりである。

また、もともと母材を対象にした BS 5762：1979^{13）}に示された試験法を溶接部に適用する場合、いくつかの問題があり、例えば厚板の多層溶接では As-Weld の試験片に疲労き裂を導入する時、板厚方向の残留応力分布により、き裂が図7に示すように不均一になることがある。このため、事前に圧縮塑性ひずみを与えるなどの手法をとる必要がある。このような問題を含め、課題解決のためのさまざまな努力がなされている^{14-16）}。

3.3 COD 値要求の実際

本シリーズの（その1）^{11）}にも示されたように、客先仕様にみられる COD 試験の要求値は、シャルピー試験のそれと同じように、設計温度、部材の重要度、板厚、PWHT の有無などにより変化しており、また客先によっては、設計条件が違うので当然ともいえるが、さまざまである。しかしながら、その根拠となるのは、やはり国家的な規則であり、例えば、DnV 規則では、As-Weld、局部 PWHT では 0.35 mm 以上、PWHT では 0.25 mm 以上と明記されている。ただし、数値の意味付けはなされていない。

これに対して、英国の規則（BS 6235）では、BS-PD 6493 に準拠した手法により、必要 COD 値を計算することとなっている。その手順を図8に示す。計算例として、 $\sigma_Y = \sigma_{YP} = \sigma_{YW} = 36 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $\sigma_D = \sigma_{YP}/2$ 、B 50 mm そして $K_t = 2$ と仮定すると、As-Weld の場合 $\delta = 0.24 \text{ mm}$ 、PWHT の場合 $\delta = 0.10 \text{ mm}$ となり、ほぼこれらの値がある余裕をもって客先仕様に反映して

(a)As-Weld (b)圧縮ひずみ付与

図7 As-Weld の溶接金属 COD 試験片にみられる疲労き裂の不均一さの例

いるのであろう。

4. 要求 COD 値確保のための溶接施工

Jacket 構造の場合、対象となる溶接継手の形式は、

①厚鋼板（～100 mm¹）を曲げ加工して鋼管とする場合の、鋼管の縦継手、円周継手

②厚肉鋼管内外の補剛桁（リングスチフナ、リブ）の T 継手

③格点部継手（両面、片面裏波）

④現場での鋼管同士の固定管突合せ継手（両面、片面裏波）

などがあり、溶接方法としては、サブマージアーク溶接（SAW）、被覆アーク溶接（MMA：Manual Metal Arc）、ガスマタルアーク溶接（GMAW）、ティグ溶接などが適用される。

これら溶接方法を適用した場合のじん性確保のための施工上の話題について以下に述べる。

4.1 溶接金属 COD 値の確保

溶接金属の低温じん性に影響をおよぼす因子は、図9

$$\delta = 2\pi e_Y \bar{a}_{\max} \left(\frac{e}{e_Y} \right)^2 \quad \text{for } \frac{e}{e_Y} \leq 0.5 \quad \dots (1a)$$

and

$$\delta = 2\pi e_Y \bar{a}_{\max} \left(\frac{e}{e_Y} - 0.25 \right) \quad \text{for } \frac{e}{e_Y} \geq 0.5 \quad \dots (1b)$$

In the common case of determining fracture toughness requirements for weld metals, these may be rewritten as:

$$\delta = \frac{2\pi \bar{a}_{\max}}{E} (K_t \sigma_D + \sigma_{YP} - 0.25 \sigma_{YW}) \quad \dots (2)$$

for as-welded components, and

$$\delta = \frac{2\pi \bar{a}_{\max}}{E} (K_t \sigma_D - 0.25 \sigma_{YW}),$$

for $\frac{K_t \sigma_D}{\sigma_{YW}} \geq 0.5 \dots (3a)$

$$\delta = \frac{2\pi \bar{a}_{\max}}{E} \frac{K_t^2 \sigma_D^2}{\sigma_{YW}}, \quad \text{for } \frac{K_t \sigma_D}{\sigma_{YW}} \leq 0.5 \quad \dots (3b)$$

for stress-relieved components,

where

- δ is the required COD
- $\bar{a}_{\max}$ is the maximum tolerable flaw parameter
- E is the modulus of elasticity
- e is the total strain = $(K_t \sigma_D + \sigma_R)/E$
- e_Y is the yield strain = σ_Y/E
- K_t is the elastic stress concentration factor
- σ_D is the nominal design stress
- σ_R is the residual stress
- σ_Y is the yield stress
- σ_{YP} is the guaranteed minimum plate yield strength
- σ_{YW} is the weld metal yield stress

Both K_t and σ_D depend on the specific design, and appropriate values should be inserted for a given structure. The appropriate value of $\bar{a}_{\max}$ depends on the sensitivity of non-destructive testing, etc. The allowable flaw parameter, $\bar{a}_{\max}$ may be related to an actual or hypothesized surface breaking or buried defect by means of the procedures described in Ref. 12. However, it is recommended that, for thickness $B \leq 50 \text{ mm}$, $\bar{a}_{\max} = B/4$, and, for $B > 50 \text{ mm}$, $\bar{a}_{\max} = 12.5 \text{ mm}$.

図8 BS 6235 における溶接部 COD 値決定のための計算手順

図 9 溶接金属の低温じん性に影響をおよぼす因子

表 3 COD 特性検討のために使用した溶接材料の溶接金属化学成分の一例²⁰⁾

Welding process	Type of material	Chemical composition										
		(%)										(ppm)
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Nb	Ti	B	N	O
MMA	Si-Mn	0.10	0.47	0.96	0.010	0.006	0.03	0.011	0.017	<0.001	117	206
	0.5%Ni	0.08	0.38	1.38	0.010	0.010	0.53	0.009	0.015	<0.001	72	262
	Ti-B	0.11	0.25	1.56	0.013	0.007	0.03	tr.	0.0043	0.0042	91	304
SAW	Ti-B	0.10	0.31	1.00	0.013	0.007	0.05	0.015	0.022	0.0037	40	307
MAG	Si-Mn	0.13	0.36	0.85	0.018	0.019	0.03	tr.	tr.	tr.	70	387
	Ti-B	0.07	0.35	1.30	0.006	0.004	0.07	tr.	0.023	0.0035	89	300
FCA (80%Ar-20%CO ₂)	1.5%Ni	0.06	0.39	1.42	0.015	0.023	1.48	0.018	0.070	0.0036	53	507
SS-FCA (Non-gas)	0.8%Ni	0.09	0.09	0.85	0.008	0.004	0.83	0.008	0.024	tr.	328	153

に示すとおりとなろう。じん性確保のためには、適用鋼材、施工方法を考慮して、適正な溶接材料を選定することがもっとも重要である。低温じん性の向上のためには、溶接金属組織を均一化することがもっとも有効であるとの考えから、たとえば Ti-B 系溶接材料の適用がはかられている^{18, 19)}。

ここでは、まず降伏点 36 kgf/mm² 級高張力鋼 (Nb 含有、焼ならし処理) の厚板 (40~60 mm) を用いて、溶接施工法選定のために実施した、溶接金属 COD 試験の数例を示す²⁰⁾。表 3 に検討した溶接金属の化学成分を示す。

被覆アーク溶接において、溶接入熱をかなり高く設定して溶接材料の成分系の影響を調べると、図10に示すように、一般的な Si-Mn 系では -10℃での COD 値を確保し難く、0.5% Ni 系あるいは Ti-B 系の適用が

図10 溶接金属 COD 特性におよぼす被覆アーク溶接材料成分系の影響 (板厚: 40 mm, 開先形状: X, 溶接姿勢: 下向, 棒径: 6 mm, 但し, ルート部のみ 5 mm, 溶接入熱範囲: 4.9~5.6 kJ/mm, 予熱温度: 100℃, 層間温度: 最大 200℃, PWHT: 605℃ × 7 時間)

図11 被覆アーク溶接材料各材分系の溶接金属ミクロ組織 (図10の As-Weld 試片ルート部)

良い。とくに Ti-B 系は安定して高い値を示す。この結果は図11に示す金属組織と明瞭に対応しており、じん性の高い溶接金属は、初析フェライトの少ない微細組織となっている。また、PWHT は、As-Weld より全般的にじん性が改善される

サブマージアーク溶接においては、入熱の規則上限で施工されるが、Ti-B 系溶接材料の適用により、安定して高い値を示す。図12は熔融型フラックスの適用例であり、規則範囲外の入熱 10 kJ/mm でも充分な値を示す。PWHT によりじん性の改善はみられないが、最近では、酸素量を下げた焼成型フラックスの適用により、As-Weld, PWHT とともに低温までじん性の改善がなされている。

半自動溶接においては、さまざまな方法が適用される。図13にその一例を示すように、ソリッドワイヤ、フラックス入りワイヤそれぞれに適正な溶接材料、溶接条件により、じん性要求値の確保ができる。ソリッドワイヤでは当初 Si-Mn 系ワイヤで溶接条件を慎重に選択して適用がはかられてきたが、Ti-B 系ワイヤの開発によりより安定したじん性が得られてきている。フラックス入りワイヤについては、CO₂-シールドでは 1.5% Ni 系で適用できるが、PWHT 仕様のワイヤは未開発のようである。セルフ・シールド (ノン・ガス) は、欧米では適用が盛んであり²¹⁻²³⁾、適正な溶接条件の設定と作業者の熟練によりじん性を確保して施工できる方法と思われる。

厚板突合せ継手を効率よく施工するために、狭開先化がはかられており、溶接法として、サブマージアーク溶接とガスメタルアーク溶接がある。ここでは、その一例として、ナロー・ギャップ・ミグの COD 特性を図14に示す。板厚の増加にもかかわらず、図13の半自動溶接継手の結果とほぼ対応する結果を示している。図14にはボンド部に近接した HAZ に切欠きを入れた HAZ-COD 試験の結果も示すが、十分な値を示している。

図12 溶接金属 COD 特性におよぼす Ti-B 系サブマージアーク溶接材料の入熱、PWHT の影響 (2電極溶接、ワイヤ径：4 mm、予熱：40℃、他の条件は図10と同じ)

次に、これらの結果をもとにして溶接金属 COD 試験 (最低値) と、ルート部から採取したシャルピー試験 (3本の平均値) との相関を検討した結果を図15に示す。この図には、Dolby により示された被覆アーク溶接 (As-Weld) に対する相関線も示す¹¹⁾。-10℃にて 0.2 mm の COD 値確保のためには、シャルピー試験の 40 J 遷移温度は-50℃程度であり、Dolby の結果とほぼ一致している。また、PWHT は As-Weld より 40 J 遷移温度を20～30℃緩和してよさそうである。

以上に示したように、さまざまな施工法に対して、じん性要求を満足するような溶接材料選定、溶接条件の設

図13 溶接金属 COD 特性におよぼす各種半自動溶接法の溶接材料の成分系、溶接姿勢の影響 (板厚: 45 mm, As-Weld)

定がなされている。しかしながら、これらの結果は全般的な傾向を示すものであり、COD 試験では全厚を通して切欠きが入られていることが主たる理由となっており、ときとして、低いじん性値を示すことがある。とくに、被覆アーク溶接、半自動溶接において、アーク長過大やアーク始終端のシールド不足による N₂ 混入により局部的にじん性が劣化している部分が切欠き位置と一致するときにその例である。

また、ルート部は母材希釈、ひずみ脆化、開先が狭いため As-deposited 組織の割合が増えることなどにより、じん性が劣化していることが多い。とくに X 開先などでは拘束の高い板厚中央部付近がルート部となるため COD 試験では影響が重畳する。したがって、裏ガウジング量を大きくしてぜい化部を除去すると、COD 値が向上するという効果が認められる²⁴⁾。また、ルート部に高じん性な溶接材料を適用してもその効果が認められる²⁵⁾、2 層 1 パスのふり分け溶接や積層厚をうすくして再加熱組織を多くするという方法も有効である。

しかしながら、一部のじん性向上策は、現実施工での管理が困難なものもある。したがって、施工者としては、管理可能な範囲内の方策にとどめるべきであろう。

4.2 HAZ-COD 試験の要求

HAZ のじん性が最近になって問題視されてきたのは、UKOSRP および関連の W/G が明らかにしてきた結果がもとになっており、じん性劣化の原因は次の 2 点にあるとしている¹⁰⁾。

①連続铸造 (C.C.) 材の偏析

②溶接性向上のため低炭素量とするために添加される微量合金元素

また、劣化は As-Weld と PWHT の両方にみられるとしている。

劣化原因の究明は急がれているようであるが、この結論は最近の客先仕様で反映されており、ファブリケータのみならず、鋼材メーカーにも HAZ-COD 試験が課せられることになってきている。

HAZ の評価は、本シリーズの (その 2)²⁾にも詳述されているように、溶接金属よりも問題が多い。この点について英国では、実施工での評価を前提に、一応のガイドラインが示されているので^{25, 26)}、以下にその概略を紹介する。

HAZ-COD 試験のための継手形状は、図16にみるように K あるいはレ型開先が推奨される。ただし、両面一

図14 溶接金属および HAZ-COD 特性におよぼす
ナロー・ギャップ・ミグ溶接法の溶接材料成
分系、PWHT の影響 (板厚：60 mm)

層溶接のように HAZ を板面に垂直にするのが困難な場合は、表面切欠きによる B×B のサブサイズ試験片も良いとしている。

切欠き位置は、一般的には粗粒 HAZ であるが、V 添加あるいは Al キルド鋼でない場合は HAZ と母材の境界付近のじん性劣化も考えられるので、この位置も評価する必要がある。また、事前のシャルピー試験やマイクロ試験で推定するのもよい。

そして、もっとも必要とされるのは、図16にみるように、試験後破壊発生位置を切断し、所定の位置に切欠きが入り、対象とされる部分が正確に評価されたかどうかを調査することである。

現状、いくつかの客先仕様では、これら切欠き位置が狙いどおりの試験片は少くとも3本必要であり、その最

低値にて評価する方法がとられている。したがって、施工者としては、溶接金属への試験以上に狙いどおりの試験片を得るために数多くの試験が必要となることが多い。

また、溶接金属では、最大入熱を保証すれば良いが、HAZ の場合、入熱が低く HAZ が硬化した場合のじん性劣化も考えて、最小入熱の保証も必要となっている。

現在までのところ、上記主旨に沿った HAZ-COD 試験のデータは少ないものの、ほぼ満足すべき結果は得られているようである。

しかしながら、現状の仕様にみられるような、局部ぜい化域 (Local Brittle Zone) を探し求めてその最低値で評価する要求には疑問を感じざるを得ないし、それよりも、設計条件によりじん性要求が苛酷となった場合には、早晩、困難な場合に直面するであろうことが危

惧される。

したがって、合理的な HAZ じん性の評価方法を確立することが、もっとも重要であるが、じん性確保のための施工法を確立するには、鋼材、溶接材料メーカー、

ファブリケータ共通の課題としてとらえることが重要であろう。

5. あとがき

海洋構造物のじん性要求と溶接施工について、主として固定式 Platform における COD 試験要求の実際的な話題を紹介した。著者の限られた知識と情報からの紹介であり、的をそれているかもしれないが、COD 試験の要求は厚板継手の PWHT 省略を目的とする、Off-shore engineering 関係者の要求を具現化するための手段であったと思われる。

しかしながら、施工者の立場から批判をいえば、次の点がある。

- ① プロジェクトごとにくり返し類似の試験を実施してきており、少くとも Pre-qualification は認めても良いのではないか
- ② COD とシャルピーの相関は、Dolby のデータを BS 6235 の溶接金属シャルピー要求値に反映させていることもあり、シャルピー試験による評価で十分ではないか
- ③ 溶接入熱の制限など施工法に細部の制約が設定されているが、要求値を満足することを前提に、施工条件に自由度を与えられないか

図15 板厚40および45mmの多層盛溶接金属における40Jシャルピー遷移温度と0.2mm COD 遷移温度の関係(溶接金属降伏強度: As-Weld=439~530 N/mm², PWHT=405~431 N/mm²)

図16 HAZ-COD 特性を評価するための開先形状、切欠き位置および破壊発生位置の確認²⁵⁾

④ 要求値と許容欠陥の関係をより積極的にとり入れて、NDE 評価法、頻度に反映できないか

日本では立場上、諸外国の領海に設置される構造物でもあり、彼らのじん性要求の概念にしたがわざるを得ないという現実がある。しかし、素材を始め構造物の製作については、日本は“The Big Supplier”としての地位を保持してきており、今後とも諸外国では、日本の技術力、供給力に依存するところ大であろう。

さまざまな解決すべき課題はあるものの、靱性要求に合致する素材、施工法の改善に対する努力はもとより、評価方法の妥当性などについても、現在 IIW 第 X 委員会では計画されているような、より一層協調的な観点からの日本の寄与も重要である。

参 考 文 献

- 1) 豊田：溶接構造物の破壊じん性要求とじん性試験法、(その 1) じん性要求の実際とその問題点、本誌、54-1 (1985) 10-16
- 2) 豊田；同上、(その 2) 溶接部じん性試験法はいかにあるべきか、本誌、54-2 (1985)
- 3) 川井、安岡、清水；海洋構造物の製作技術、鉄鋼界、8 (1984) 39-51
- 4) N. Ellis, J. H. Tetlow, F. Anderson and A. L. Woodhead ; Hutton TLP Vessel-Structural Configuration and Design Features, OTC 4427, May (1982) 557-563
- 5) I. J. Smith, H. G. Pisarski, N. Eilis and N. J. Prescott ; Assesment of Fracture Toughness Requirements for the Deck Structre of the Hutton TLP using Finite Elements and the CTOD Design Curve, OTC 4430, May (1982) 603-607
- 6) 安田；TMCP 鋼の波及効果とその将来性、造船学会シンポジウム、11 (1983) 279-300
- 7) 原沢；TMCP 鋼の海洋構造物への適用、同上、311-320
- 8) J. D. Harrison ; The Selection of Material to Avoid Fracture in Large Offshore Structures, OTC 1909, May (1973)
- 9) J. D. Harrison ; Material Selection Considerations for Offshore Steel Structures, Int. Conference on Steel in Marine Structures, Paris, Oct. (1981) Paper PS 3.
- 10) H. G. Pisarski and J. D. Harrison ; Background to the Material Selection Procedures for Steels and Weldments contained in the Proposed Revisions to the Department of Energy Guidance Notes, 2nd Int. Conference on Offshore Welded Structures, Nov. (1982) paper No. 22
- 11) R. E. Dolby ; Charpy V and COD-Correlations between Test Data for Ferrilic Weld Metals, Metal Constraction, 13-1 (1981) 43-51
- 12) BS. PD 6493 : 1980, “Guidance on some methods in the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints”, The British Standards Institution
- 13) BS 5762 : 1979, “Methods for Crack opening displacement (COD) testing, British Standards Institution
- 14) J. D. Harrison ; The “state-of-the-art” in crack tip opening displacement (CTOD) testing and analysis-part 1 to 3, Metal Construction, Sept, Oct, Nov (1980)
- 15) O. L. Towers ; Procedures for fatigue cracking fracture toughness test pieces, with particular reference to weldments, The Welding Institute Research Bulletin, April (1982) 112-120
- 16) M. S. Kamath ; The incidence of pop-ins in fracture toughness testing, ibid, April (1979) 114-122
- 17) H. G. Pisarski ; Fracture Toughness of some Materials used in Fabricating Fixed Offshore Structures, OTC 4034, May (1981)
- 18) 森、本間、若林、大北、斉藤；Ti-B 系溶接金属の材質特性と靱性向上機構、製鉄研究、307 (1982) 104-116
- 19) 奥田、上田；最近の低温用鋼の溶接、神戸製鋼技報、30-3 (1980) 37-41
- 20) H. Harasawa, M. Hano and W. E. Bremner ; The development and selection of welding procedures for optimum mechanical properties, 2nd Int. Conference on Offshore Welded Structures, Nov (1982) Paper No. 20
- 21) T. Keeler ; Innershield welding Part 1 : Development and applications, Metal Constructions 11 (1981) 667-673
- 22) T. Keeler ; Innershield welding Part 2 : Properties, ibid 12 (1981) 750-753
- 23) W. I. Miscoe ; Continued development brings wider applications for Innershield, ibid 12 (1983) 738-741
- 24) 本間、若林、大北、森；寒冷地向極厚海洋構造物用鋼材 (HT 50) 溶接部の材質向上に関する研究、製鉄研究、314 (1984) 37-43
- 25) H. G. Pisarski and R. J. Pargeter ; Fracture toughness of HAZs in steels for offshore platforms, Metal Construction, July (1984) 412-417
- 26) H. G. Pisarski, O. L. Towers and A. A. Willoughby ; Guidelines for fracture toughness testing of heat affected zones, The welding Institute Research Bulletin, June (1984) 188-190