厚板溶接部の COD 試験法に関する研究*

梶本 勝也**, 谷 光夫***, 生藤 伸明**

Study on COD Testing of Thick Weldment*

by Katsuya Kajimoto**, Mitsuo Tani*** and Nobuaki Ikutoh**

Crack opening displacement (COD) testing is widely used to determine the fracture toughness of steel materials. However, COD testing of thick weldments involves the problem of a non-uniform shape of fatigue precracking through the thickness due to the influence of welding residual stress. In this study, first, the residual stress distribution in a thick weld metal COD specimen was measured to clarify the cause of the irregular fatigue crack front. Then, initial machined notches of various shapes were tested to select suitable ones which would not affect the material toughness and would not have a non-uniform shape. As a result it was found that a partial arc notch and partial drill hole notch meet the above requirements.

Key Words: COD, Frac. Mech. tests, Fracture toughness, Thick weldment, Fatigue crack, Crack pattern, Residual stresses

1. 緒 言

海洋構造物, 低温貯槽タンクなどの大形溶接構造物の強度安全性を確保する観点から, 従来のシャルピー衝撃試験に加えて, 弾塑性破壊力学に基づく COD 試験がしばしば要求されるようになった。COD 試験方法は, 例えば英国規格, BS 5762 (1979)¹⁾などに規格化されており, 通常これらに基づいて試験が行われる。しかし, 現在までの規格は, もともと鋼板母材を対象としていることもあって, 溶接継手の COD 試験に適用する場合に種々の問題点が生じている。

その一つとして, 厚板多層溶接継手の COD 試験を行う場合に, 溶接残留応力の影響により試験片に導入する疲労予亀裂が板厚に沿って大きく湾曲するという問題がある。このような問題が生じると, 上述の規格によれば亀裂湾曲度に関する規定を満足しないために, 試験結果がすべて無効になることがある。また H. G. Pisarski²⁾は, 疲労予亀裂が湾曲すると, 破壊靱性値が実際よりも高目の値を示して危険側の評価を与えると指摘している。このために, あらかじめ疲労予亀裂を導入する部分に 1%程度の圧縮塑性ひずみを付与して, 機械的に溶接残留応力を再分布させたのちに疲労予亀裂を導入する方法³⁾(以後プラテン法と呼ぶ)が一般的にとられている。しかしながら本方法には, 圧縮塑性ひずみの付与によってひずみ時効脆化などをきたし, 真の破壊靱性値を把握できないのではという基本的問題がある。さらに, 板厚が厚くなるとプラテンに要する荷重は膨大なものになるという試験実施上の問題もある。

そこで本論文では, まず厚板多層溶接継手から採取した COD 試験片について, その板厚方向に沿った溶接残留応力分布を計測し, 疲労予亀裂の湾曲との関連を調べた。そしてこれらに基づいて, 破壊靱性値に影響を及ぼさない疲労予亀裂の

湾曲防止法として, 初期機械切欠きの形状を操作する方法に各種実験的検討を加えてみた。

2. 試 験 方 法

2.1 供試鋼および溶接方法

供試鋼として, 低温域向けの海洋構造物などに使用されている 50 kgf/mm² 級の TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 鋼を用いた。板厚は 40 および 50 mm で, その化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。

溶接継手の製作は, 主としてサブマージアーク溶接法 (SAW) によったが, 一部比較のため被覆アーク溶接法 (SMAW) およびガスメタルアーク溶接法 (GMAW) も用いた。その溶接条件を Table 2 にまとめて示す。いずれの溶接法とも, 溶接開先は両面 K 開先としている。

2.2 溶接残留応力の計測方法

COD 試験片として加工された状態の, 疲労予亀裂導入部分の三次元溶接残留応力分布を厳密に求めること

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials used

Thickness (mm)	Chemical composition (%)									Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Nb		σ_y (MPa)	σ_b (MPa)	El (%)
40	0.07	0.27	1.40	0.015	0.005	0.37	0.035	0.012		415	510	30
50	0.10	0.38	1.50	0.015	0.003	0.16	0.03	0.3		363	510	37

Table 2 Summary of welding conditions used

Welding method	Groove shape	Welding material	Welding conditions			
			Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
SAW (Flat)		AWS F8A8-FG-G (4.8φ)	650	35	30	45
SMAW (Vertical up)		AWS E8016-G (4.8φ)	145	25	4	50
GMAW (Horizontal)		AWS E705-GB (11.2φ)	250	30	33	11

*原稿受付 昭和60年9月4日 昭和61年度春季全国大会論文発表講演

**正 員 三菱重工業(株) Member, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

*** 三菱重工業(株) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Fig. 1 Procedure for measurement of welding residual stresses

は、多大な時間と費用を要する。そこで、ここでは Fig. 1 に示すような手順で簡易的に COD 試験片の板厚方向に沿った溶接残留応力分布を計測することとした。すなわち、サブマージーク溶接法を用いて作製した板厚 40 mm × 板幅 500 mm × 長さ 1500 mm の溶接試験板の中央部から、外形寸法が COD 試験片のそれと同一の試験体を切出したのちに、溶接線に垂直な両側面の溶接金属中央部の板厚方向に沿って 2 軸ひずみゲージ（ゲージ長さ：1 mm）を貼付し、順次細断して溶接残留応力を解放する方法である。なお、各切断過程において高い切断熱などで塑性変形を生じさせないよう細心の注意を払った。また、このような方法による計測値の妥当性を検討するために、隣接する試験片について X 線法を適用した溶接残留応力の計測も行った。

2.3 疲労予亀裂の導入方法

COD 試験片の形状は、Fig. 2 に示すように BS 5762 (1979) の推奨 (Preferred) 試験片にし、疲労予亀裂は溶接残留応力の計測位置に合わせて溶接金属中央部に導入することとした。Table 3 に本研究で採用した疲労予亀裂の導入方法をまとめて示す。同表において、

(A)は、通常よく用いられる形状の機械切欠きを設けたのちに、とくに前処理を施さずことなく疲労予亀裂を導入するもので、これを以後に述べる湾曲防止法検討の基準とすることとした。

(B)は、緒言に述べたプラテン法の効果を再確認するためのもので、疲労予亀裂の導入予定位置を中心として、直径が板厚(B)の 1/2 の硬鋼圧盤を用いて、試験片両表面からそれぞれ 0.5% の圧縮塑性ひずみを付与したのちに、機械切欠きを設けて疲労予亀裂を導入する方法で行った。

(C)～(E)は、上述のプラテン法に代わる方法とし

て、本研究で新たに考案した初期機械切欠きの形状を操作するものである。すなわち、溶接残留応力の影響によって疲労予亀裂の進展が板厚内部で遅れ、表面部で速くなることに鑑みて、

(C)は、機械切欠きの形状をシェブロン形にして、切欠きの拘束効果により疲労予亀裂の均一化を狙ったものである。

(D)は、幅 2 mm の鈍い機械切欠きを設けたのちに、疲労予亀裂の進展が遅くなる板厚内部にのみ、幅 0.2 mm の鋭い円弧形切欠きを設け、当部分の亀裂進展を速めることによって疲労予亀裂の均一化を狙ったものである。なお、円弧形切欠きの加工は放電加工法にて行い、その位置と形状寸法を同表のように変化させた。

(E)は、通常の機械切欠き（先端幅 0.2 mm）を設けたのちに、疲労予亀裂の進展が速くなる表面部にのみ、直径 2 mm のドリル穴を明けて切欠き先端半径を鈍くし、当部分の亀裂進展を遅めることによって疲労予亀裂の均

Fig. 2 COD test piece geometries

Table 3 Methods of fatigue pre-cracking used in this study

A	As machined notches	
B	Platen method	
C	Chevron notch	
D	Partial arc notches	
E	Drill hole notches	

一化を狙ったものである。なお、ドリル穴の深さを同表のように変化させた。

以上、5種類の疲労予亀裂導入法の検討のうち、(A)および(B)については、溶接方法をサブマージアーク溶接、被覆アーク溶接、ガスメタルアーク溶接の3種類に変化させて、その影響を調べた。(C)～(E)については、サブマージアーク溶接法を用いて検討した。

機械切欠き加工後の疲労予亀裂の導入は、BS 5762 (1979)に規定されている範囲内の疲労荷重（応力拡大係数の変動幅、 $\Delta K \leq 120 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ ；応力比、 $R \leq 0.09$ ）を用いて行った。その後、 -60°C の温度において正規のCOD試験を行い、試験後の破面から疲労予亀裂の導入状況を調べるとともに、破壊靱性値、 δ_e を求めた。

3. 試験結果および考察

3.1 溶接残留応力分布と疲労予亀裂湾曲の関係

2.2項に述べた方法により計測された溶接残留応力のうち、疲労予亀裂の進展に大きい影響を及ぼすと考えられる溶接線直角方向の残留応力、 σ_{Rx} の板厚方向に沿った分布をFig. 3に示す。なお、同図には参考のため、溶接残留応力の計測が行われた溶接継手（サブマージアーク溶接継手）の断面マクロ組織および通常の機械切欠きのままで疲労予亀裂を導入したCOD試験片の破面状況を併せて示してある。

COD試験片の外形状に加工された状態の試験片両側面の溶接金属中央部における σ_{Rx} は、両側面でほとんど差異がなく、すべて圧縮側の残留応力値になっている。その板厚方向、Zに沿った分布は、表側溶接（Z=40 mm側）と裏側溶接（Z=0 mm側）の会合部である溶接金属幅の狭い部分で最も大きな圧縮残留応力値を示し、板厚両表面部で小さい圧縮残留応力値を示す形態となっており、同図に示す疲労予亀裂の湾曲の傾向と非常によく一致している。なお、疲労予亀裂の湾曲に影響を及ぼすのは、試験片に機械切欠きを導入後の切欠き先端付近の σ_{Rx} の板厚方向分布と考えられる。当部分は溶接線方向の固有ひずみが存在し、さらに切欠きの導入による残留応力の再配分も起こるため、残留応力の絶対値は本研究で計測されたものとは当然異なるはずである。しかし、試験片両側面で計測された σ_{Rx} の分布と疲労予亀裂の湾曲傾向が実験結果ではよく一致したことから、切欠き先端付近の σ_{Rx} の板厚方向に沿った分布も、

試験片側面部のそれとほぼ同一の形態を示すことが考えられる。

以上のことから、COD試験片に残っている溶接線直角方向の溶接残留応力が、板厚内部で最大圧縮応力となって当部分の亀裂進展をおそくする働きをすることが、疲労予亀裂を湾曲させる最も大きな要因になるようである。したがって、その湾曲防止を検討するうえで、板厚方向に沿った溶接残留応力の分布形態を十分に配慮することが重要と考えられる。

3.2 疲労予亀裂の湾曲防止方法

Fig. 4は、通常の機械切欠きのままの状態での疲労予亀裂を導入した場合のCOD試験片の破面を、溶接継手の断面マクロ組織と対比して示したものである。疲労予亀裂は、いずれの溶接法においても溶接金属幅が最も狭い部分で遅くなる2重弓形の湾曲形状を呈している。すなわち、溶接線直角方向の溶接残留応力が最大の圧縮応力を示す位置は、溶接法の差異にかかわらず、表側溶接と裏側溶接の会合部付近であることが同図から伺える。当部分は溶接ルート部とも呼ばれ、溶接の熱ひずみ時効脆化などにより靱性が最も低下する部分になることが知られている²⁾。したがって、溶接継手の真の破壊靱性値を把握するには、溶接ルート部における疲労予亀裂の形状をできるだけ均一にし、湾曲の影響を排除することが重要となる。

Fig. 5は、プラテン法を適用した場合のCOD試験片の破面を示したものである。溶接法によらず、ほぼ均一な疲労予亀裂の形状が得られており、圧縮塑性ひずみを付与して機械的に溶接残留応力を再分布させる方法は、疲労予亀裂の湾曲防止に顕著な効果を呈することを改めて確認することができた。

Fig. 6は、本研究で新たに試みた初期機械切欠きの形状を操作する各方法を適用した場合のCOD試験片の破面をまとめて示したものである。これらから、各方法の疲労予亀裂の湾曲防止効果に関して、次のことが明らかになった。

(1) シェブロン形切欠き法は、その切欠き内の疲労予亀裂の進展においては湾曲が小さくなる様相が認められた。しかし、切欠きを過ぎると、もはやシェブロン形切欠きの拘束効果が消滅するためか、最終的には通常の機械切欠きのままに近い湾曲形状を示し、とくに湾曲防止

(a) Welding residual stress

(b) Macrostructure of welded joint

(c) Fracture surface

Fig. 3 Result of welding residual stress measurements

に対する効果は認められなかった。

(2) 部分円弧形切欠き法は、溶接線直角方向の溶接残留応力が最大の圧縮応力値を示す溶接ルート部を狙って円弧形切欠きを設けたもの〔同図(a)〕については、当部

Fig. 4 Fracture surfaces of COD specimens (as machined notches)

Fig. 5 Fracture surfaces of COD specimens (platen method)

分の亀裂進展が加速され、全体的にはほぼ均一な疲労予亀裂の形状が得られた。しかし、円弧形切欠きを最大圧縮残留応力場からはずして板厚中央部に設けたり〔同図(b)〕, 板厚全域に及ぶような大きさ〔同図(c)〕にするにつれて、その湾曲防止の効果は次第に薄れて行くことがわかる。したがって、本方法を採用する場合には、溶接残留応力の分布形態と疲労予亀裂の湾曲状態をよく考慮して、その円弧切欠きの形状寸法と加工位置を選定する必要がある。

(3) ドリル穴切欠き法は、板厚表面側のみドリル穴を明けて切欠き先端半径を鈍くすることにより、板表面部における疲労予亀裂の進展をおそくすることができ、湾曲防止に対して効果が認められた。この場合のドリル穴の深さとしては、溶接残留応力分布(疲労予亀裂の湾曲)を考慮して同図(a)のように両表面側で変化させるのが適切と考えられるが、板厚の1/4程度の等しいドリル穴深さの場合でも湾曲防止効果が認められた〔同図(b)〕。しかし、その深さが5mmと浅い場合には、もはやその効果は認められなくなる。

以上、各方法の疲労予亀裂の形状を破面写真により示したが、これらを Fig. 7 に示すように BS 5762 (1979) の湾曲度に関する規定に基づいて計測して Fig. 8 に示す。なお、図において斜線部分が規格の許容範囲である。

機械切欠き先端からの距離に関する規定 ($a_{\min} - a_0 \geq 0.025 W$) に対して、通常の機械切欠きのままのもので、被覆アーク溶接法とガスマタルアーク溶接法が満足していない。これは Fig. 4 に示したように、板表面部における疲労予亀裂の長さを他に比べて短くしていたことが一つの原因になっている。溶接継手の COD 試験においては、このようなケースがしばしば生じるので、板表面部における疲労予亀裂の長さを、母材試験の場合に比べて大きくとる配慮が必要となろう。

疲労予亀裂の最大、最小長さの差に関する規定 ($a_{\max}$

Fig. 6 Fracture surfaces of COD specimens (chevron notch, partial arc notches and drilled hole notches)

Fig. 7 Crack measurements after fracture

Fig. 8 Measurement result of fatigue pre-cracking shape

Fig. 9 Results of COD test at -60°C

$-a_{\min} \leq 0.1 W$) および板厚方向の 3 位置における長さの差に関する規定 ($|a_1 - a_2|$, $|a_2 - a_3|$, $|a_3 - a_1| \leq 0.1 W$) に対しては、後者の方がより厳しく、通常の機械切欠きのままのものでは、これを満足しないが、上限に近い値を示している。これに対して、プラテン法、部分円弧形切欠き法の (a) およびドリル穴切欠き法の (a), (b) などの湾曲防止対策をとれば、十分に規格値を満足することがわかる。

次に、 -60°C における COD 試験により得られた破壊靱性値、 δ_c を Fig. 9 に示す。今回主として試験対象としたサブマージアーク溶接法の溶接金属の靱性値がよく、 -60°C においては延性安定亀裂を伴って破壊したことおよび試験数が少ないこともあって、各疲労予亀裂導入法による破壊靱性値の確たる傾向を把握することができなかった。この点に関しては、本研究で新たに試みた部分円弧形切欠き法、ドリル穴切欠き法の汎用性の確認と相まって、今後さらに詰めて行く予定である。

4. 結 言

厚板多層溶接継手の COD 試験を行う場合に、試験片に導入する疲労予亀裂が大きく湾曲する問題に各種実験的検討を加え、次の結論を得た。

(1) 疲労予亀裂の湾曲に溶接残留応力は大きく影響し、その板厚方向に沿った分布形態と湾曲の形状はよく一致している。とくに両面溶接では、溶接ルート部に対応する溶接金属幅の狭い部分で最大の圧縮残留応力値を示し、当部分の疲労予亀裂の進展をおそくすることが最も大きな湾曲要因となるようである。

(2) あらかじめ試験片に圧縮塑性ひずみを付与し、機械的に溶接残留応力を再分布させる方法 (プラテン法) は、溶接法によらず顕著な疲労予亀裂湾曲防止効果を呈した。しかし、圧縮塑性ひずみの付与による破壊靱性値の変化が懸念され、今後さらに詰める必要がある。

(3) 破壊靱性値に影響を及ぼさない新しい疲労予亀裂湾曲防止法として、部分円弧形切欠き法およびドリル穴切欠き法などを提案し、その適用の見通しを得た。

参 考 文 献

- 1) Brith Standard Institution, Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing; BS 5762 (1979)
- 2) H.G. Pisarski and M.G. Dawes; Measurement of Crack Opening Displacement in Weldments with Particular Reference to Offshore Structures, The Welding Institute (111/1980)
- 3) M.G. Dawes; Fatigue Precracking Weldment Fracture Mechanics Specimens, Metal Construction and British Welding Journal, February (1971)