

水島製鉄所の新設破壊靱性試験システム^{*1}松居 進^{*2} 小石 想一^{*3} 入谷 正夫^{*4} 中野 善文^{*5} 小林 英司^{*6}

Fracture Toughness Testing System at Mizushima Works

Susumu Matsui, Sohichi Koishi, Masao Iritani, Yoshifumi Nakano, Eiji Kobayashi

1 はじめに

海洋構造物, 圧力容器等の安全性確保にあたっては破壊力学的手法に基づく評価が広く用いられている。それらに使用される鉄鋼材料の靱性評価には, 従来のシャルピー衝撃試験で代表される簡便な方法で得られる特性に加えて, CTOD(き裂先端開口変位), K_{Ic} (平面歪破壊靱性), J_{Ic} (延性き裂発生に対応した平面歪破壊靱性)などの高度な技術を必要とする試験が要求されている。これらの破壊力学に基づく破壊靱性の測定方法は BS 5762¹⁾, ASTM E399²⁾, ASTM E813³⁾等の規格によって規定されているが, 引張試験あるいはシャルピー衝撃試験のように単純な方法ではないために従来は研究所レベルで実施されてきた。ところが近年では破壊靱性試験が鋼材の製造法認定試験あるいは出荷保証試験として要求されること

が多くなり, そのため多量の試験を短期間にかつ正確に処理することが重要である。

このような現状から, 水島製鉄所においては高靱性鋼材の開発および改善, さらには需要家の品質保証要求に応えるために破壊靱性試験のなかでもとくに要求が高い CTOD, K_{Ic} および J_{Ic} 試験システムの整備を進めて来た。ここでは, 水島製鉄所に設置が完了し, 順調に稼動している破壊靱性試験システムの概要を紹介する。

2 試験システムの構成と機能

破壊靱性試験システムは疲労予き裂加工用の 5 tf 電気油圧サーボ型試験機, 小型 CT 試験と高温および低温引張試験用の電子式インストロン型 25 tf 試験機, 疲労予き裂加工と小型 CT および CTOD 試験用の 50 tf 電気油圧サーボ型試験機, さらには厚さ 200 mm ま

Table 1 試験システムの機能概要

No.	項 目	5 t 試 験 機	25 t 試 験 機	50 t 試 験 機	300 t 試 験 機
1	本 体 機 構	電気油圧サーボ	デジタル・メカニカル・サーボ	電気油圧サーボ	電気油圧サーボ
2	制 御 方 式	サーボ・クローズドループシステムによる荷重制御	コンピュータ・サーボ・クローズドループシステムによる荷重, ストローク制御		
3	機 能	疲労予き裂加工	・ CT 試験 ・ 高温引張試験 ・ 低温引張試験	・ 疲労予き裂加工 ・ 3点曲げ試験 ・ CT 試験	・ プラテン加工 ・ 3点曲げ試験
4	能 力 最大負荷荷重 ストローク 最大ストローク変位 速度	動的 5 tf, 静的 7.5 tf ±25 mm 70 mm/s	静的 25 tf 1 200 mm 500 mm/min	動的 50 t, 静的 65 tf ±100 mm 180 mm/s	静的 300 tf ±200 mm 200 mm/min
5	本 体 寸 法 (mm D × mm W × mm H)	1 000 × 870 × 2 030	880 × 1 300 × 2 700	1 500 × 2 000 × 3 200	1 500 × 2 000 × 4 360
6	試 験 範 囲	CT および CTOD 試験片の疲労予き裂加工	(1) +500°C ~ -185°C での CT 試験 (2) +900°C ~ -185°C での引張試験	(1) RT ~ -196°C での三点曲げ試験および疲労予き裂加工 (2) RT ~ -185°C での CT 試験	(1) 最大試験片厚さ 200 mm, RT ~ -185°C での三点曲げ試験
7	試験プログラム	—	・ J_{Ic} 試験 ・ K_{Ic} 試験 ・ 荷重および歪制御引張試験	・ CTOD 試験 ・ K_{Ic} 試験 ・ J_{Ic} 試験 ・ K 値制御疲労加工	・ CTOD 試験 ・ K_{Ic} 試験 ・ プラテン加工

*1 昭和61年4月1日原稿受付

*2 水島製鉄所 品質保証部 部長

*3 水島製鉄所 品質保証部 主査(部長補)

*4 水島製鉄所 品質保証部検査課 主任部員(課長補)

*5 鉄鋼研究所 水島研究部第2研究室 主任研究員(課長)・Ph. D.

*6 水島製鉄所 管理部厚板管理室 主査(課長)

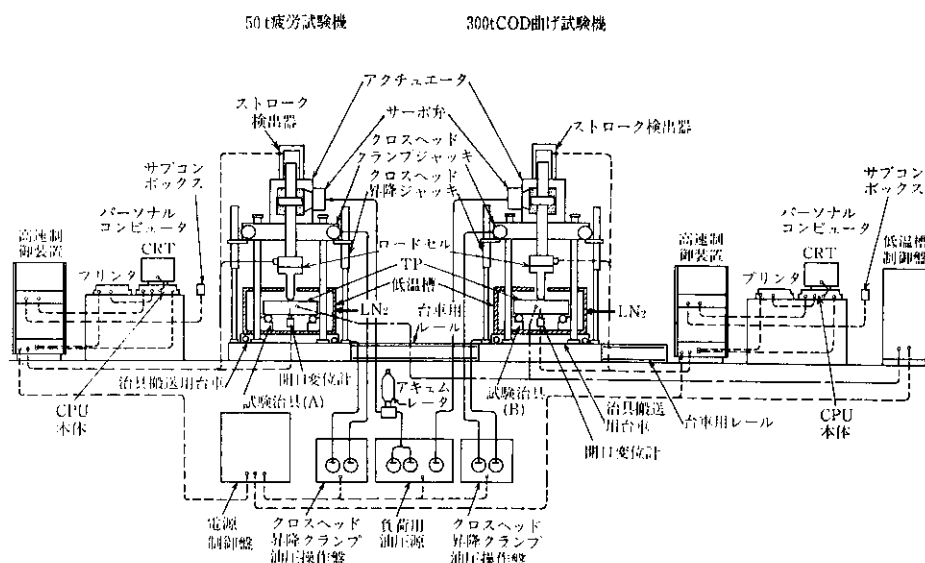


Fig. 1 50 tf および 300 tf 破壊靱性試験システム構成

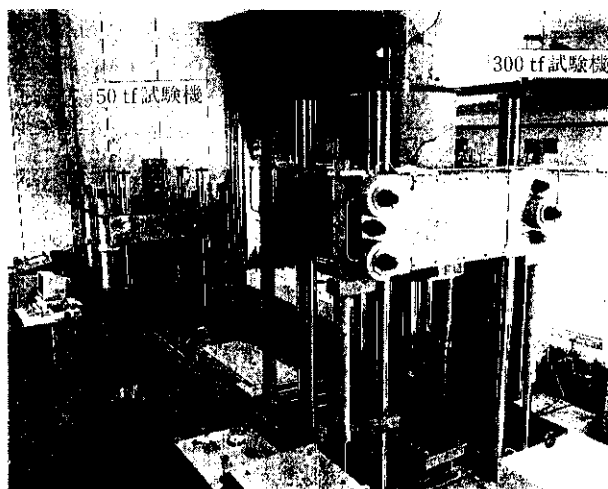


Photo 1 50 tf および 300 tf 破壊靱性試験装置の全景

での三点曲げ CTOD 試験とプラテン加工が可能な 300 tf 電気油圧サーボ型試験機およびそれぞれの制御・演算装置から構成される。試験装置ごとの機能概要をまとめて Table 1 に示す。また代表的な試験機の例として 50 tf/300 tf 試験装置の外観を Photo 1 に、システム構成を Fig. 1 に示す。

試験機の配置は疲労予き裂加工から試験データの出力までの一連の試験工程を同じ建屋内で実施できるように配慮して試験の迅速化を図った。さらに、試験プログラムには各々の試験規格で規定されている有効性評価式を組み入れてロジック判断させ出力表示できるようにして、試験信頼性を高めている。

3 試験システムの特徴

3.1 三点曲げ試験による CTOD の測定

ジャケット等の海洋構造物、液化天然ガス貯槽などの压力容器の安全性評価には CTOD(き裂先端開口変位)が通常用いられ、そのために使用される鋼材および溶接継手の破壊じん性はもっぱら CTOD を判断基準としている。海洋構造物の大型化にともない、使用される鋼板は厚くなる傾向にある。液化天然ガス貯槽は -163°C

ときわめて低温で使用されるため、それらに見合った温度における試験が必要である。したがって、本試験システムにおいては、厚さ 200 mm までの極厚材の三点曲げ試験を -196°C までの低温において対応可能なものとした。そのため、疲労予き裂導入および小型三点曲げ試験用に 50 tf 電気油圧サーボ型試験機、大型三点曲げ試験用に 300 tf 電気油圧サーボ型試験機を備えた。厚さ 200 mm までの三点曲げ試験能力は、海洋構造物の深海域での建設にともなう鋼材の厚肉化を考慮した。

疲労予き裂の導入にあたっては、応力拡大係数を一定値(たとえば、BS 5762¹⁾では $0.63 \sigma_Y \sqrt{B}$ 、ここに σ_Y および B は試験材の降伏強さおよび試験片厚さ)以下にする必要がある。50 tf 試験機においては単なる荷重制御以外に、 K 値(応力拡大係数)制御を可能にしておき、精度の高い疲労予き裂の導入を行うことが可能である。

CTOD 試験にあつては試験片を所定の温度に保持する必要がある。そのために専用恒温槽に試験片全体を収納し、液体窒素を用いて室温から -196°C の広範囲な温度で $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内に精度よく制御可能としている。試験片への荷重速度は BS 5762 により定められた応力拡大係数増加速度 $15 \sim 80 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}/\text{s}$ の範囲である必要があり、閉回路方式により精度の高い制御が可能で、さらには変位速度制御も行えるようにしている。試験はすべてコンピュータ制御により行い、試験過程における荷重、クリップゲージ変位のようなデータの収録、それらの解析を通した CTOD の計算、試験の有効性の判定を迅速に、かつ高精度で実施している。試験機の機能のブロック線図を 50 tf 試験機を例に Fig. 2 示す。

3.2 コンパクト試験による K_{Ic} および J_{Ic} の測定

原子力圧力容器などの ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III および Sec. XI に基づいて設計、健全性評価を行う場合は、静的平面歪破壊じん性 (K_{Ic} あるいは J_{Ic}) が用いられる。したがって、使用鋼材の破壊じん性は K_{Ic} あるいは J_{Ic} を判断基準としている。それらの破壊じん性は、それぞれ ASTM E399²⁾ および E813³⁾ に従って求める必要があり、通常はコンパクト試験(より一般的には CT 試験)が用いられる。コンパクト試験は平面歪破壊じん性を求めたものであり、必要な試験片の大きさは材料および求めようとする破壊じん性の大きさにより変化する。すなわち、材料が高じん性なほど大きな試験片が必要である。しかしながら、通常必要とされるのは厚さ 50 mm までの試験片である。

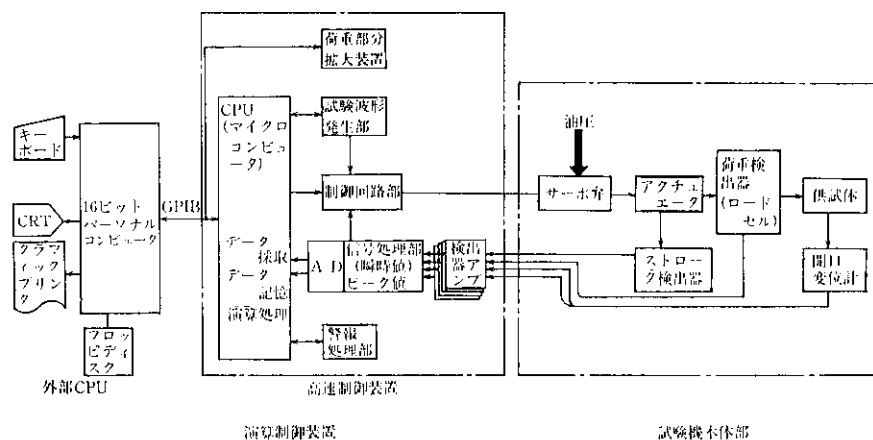
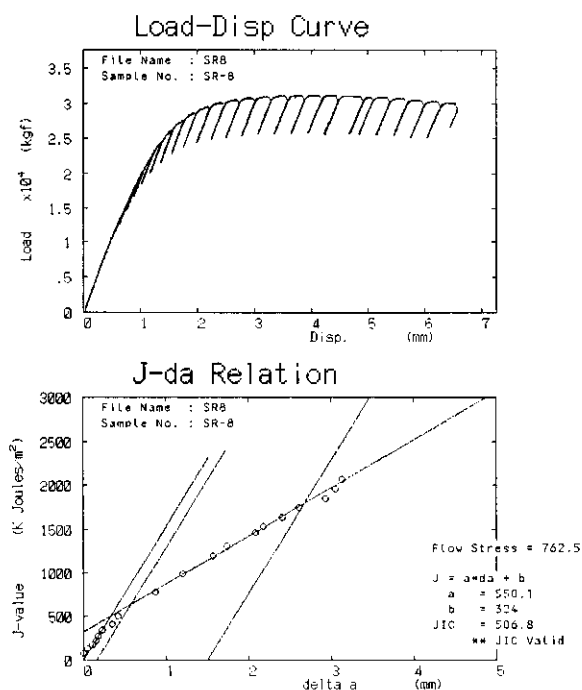


Fig. 2 50 tf 試験機機能ブロック線図

Fig. 3 除荷コンプライアンス法による J_{IC} 測定例 (上, 荷重-荷重線変位曲線; 下, J とき裂進展量 da の関係)

K_{IC} 試験は低温で、 J_{IC} 試験は比較的高温で実施されるのが通例である。そのため、厚さ 50 mm までのコンパクト試験片を -196°C から $+500^{\circ}\text{C}$ のきわめて広範囲にわたって、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内の精度で温度制御可能としている。試験片への負荷の制御は閉回路方式とし、規格に定められた負荷速度での試験が実施できる。 J_{IC} 試験に

おいては、一本の試験片で延性き裂の発生および進展特性を求めるための除荷コンプライアンス法と呼ばれる方法が用いられる場合がある。これは任意の荷重まで負荷したのち、10% ほど除荷し、その際の荷重と変位の関係からき裂長さを推定するとともに、除荷直前の荷重-変位曲線の下面積から J 積分を求め、これを繰返すことにより J 積分とき裂進展量の関係を求める手法である。この手法には精度の高い荷重、変位の測定およびそれらデータのコンピュータ処理が要求される。この実施例を Fig. 3 に示す。

平面歪破壊じん性試験には、25 tf インストロン型試験機、50 tf 電気油圧サーボ型試験機、さらには 300 tf 電気油圧サーボ型試験機が適用可能である。

破壊じん性評価に必要な特性である高温あるいは低温における降伏強さ、引張強さおよび弾性定数は ASTM E8⁴⁾、ASTM E21⁵⁾、ASTM E111⁶⁾ および E231⁷⁾ に準拠して 25 tf インストロン型試験機を用いて精度よく測定できる。

4 おわりに

水島製鉄所に設置した破壊じん性試験システムについて紹介した。当システムでは、三点曲げ試験およびコンパクト試験が、それぞれの規格に準拠したプログラムを用いて疲労予き裂加工から試験実施およびデータ処理までの過程について、コンピュータにより制御、データ収録測定値の演算および有効性判定をさせて試験の迅速化と信頼性向上を図った。

さらには、深海域での建設にともなう海洋構造物の大型化を考慮して、厚さ 200 mm までの極厚材の三点曲げ試験能力を備えた。

近年の鉄鋼材料に対する品質要求の高度化、多様化のなかで当所のシステムは高じん性材料の品質保証と改良、開発実験に有力な手段となっている。

参考文献

- 1) BS 5762: "Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing"
- 2) ASTM E399: "Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials"
- 3) ASTM E813: "Standard Test Method for J_{IC} , a Measure of Fracture Toughness"
- 4) ASTM E8: "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic

Materials"

- 5) ASTM E21: "Standard Recommended Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials"
- 6) ASTM E111: "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus"
- 7) ASTM E231: "Standard Method for Static Determination of Young's Modulus of Metals at Low and Elevated Temperatures"