



# 応力腐食割れ下限界応力拡大係数 $K_{ISCC}$ の 測定に関する標準試験方法 (学振 129 委員会基準)

青木孝夫\*・岩館忠雄\*<sup>2</sup>

## Standard Test Method for Threshold Stress Intensity Factor $K_{ISCC}$ in Stress Corrosion Cracking (JSPS 129 Committee Recommendation)

Takao AOKI and Tadao IWADATE

### 1. はじめに

近年、主として高強度鋼、高カチタンまたはアルミニウム合金等を対象として、応力腐食割れの感受性を破壊力学的パラメータを用いて表現することが多くなつたが、試験方法が統一されていないこともあつて提出されているデータにかなりのばらつきが見られた。そこで、学振 129 委員会第 1・2 合同分科会（委員長 横堀武夫 東北大学名誉教授）において、鋼の環境強度と破壊に関する機構を明らかにするとともに、環境強度についての標準試験法を開発することを目的として共同研究を行うことが企画された。これとほぼ同時期にアメリカの ASTM-24 委員会でも応力腐食割れ試験法を開発するための Round Robin Test が企画され実行に移されつつあつた。なお、この結果については最近 ASTM G-1 委員会が主催したシンポジウムで報告されている<sup>1)</sup>。このような背景のもとに 129 委員会では ASTM と情報交換を行い、その Round Robin Test 実施計画を参考として、昭和 52 年から約 2 年間にわたり 26 機関が参加した第 1 回の Round Robin Test を実施した。その成果は報告書<sup>2)</sup>に取りまとめられ、ASTM へも情報交換のため送付された。続いて、降伏強さレベルが前回と異なる 2 種類の共通試料を用いた第 2 回の Round Robin Test が 25 機関が参加して昭和 56 年 6 月に開始され 58 年 4 月に終了した。この結果も集計整理されて報告された<sup>3)</sup>。表 1 に Round Robin Test に参加した機関名をまとめて示す。

以上の 2 回にわたる Round Robin Test の結果を検討し、 $K_{ISCC}$  の測定に関する標準試験法案を作成するために、学振 129 委員会環境強度小委員会（小委員長 横堀武夫、幹事 青木孝夫、岩館忠雄）が組織された。小委員会で作成した標準試験法の原案について、分科会

の各委員に対し 2 回にわたつてアンケート形式の審理を依頼し、ここによりやく  $K_{ISCC}$  の標準試験法<sup>4)</sup>† を提案する運びとなつた。以下その概要について紹介するが、詳細についてはそれぞれの文献を参照されたい。

### 2. 標準試験法の概要

#### 2.1 適用範囲

この基準は、主として海洋構造物等に用いられる一般鋼材を対象として、3.5%NaCl 水溶液中における応力

表 1 Round Robin Test 参加機関(○印) (順不同)

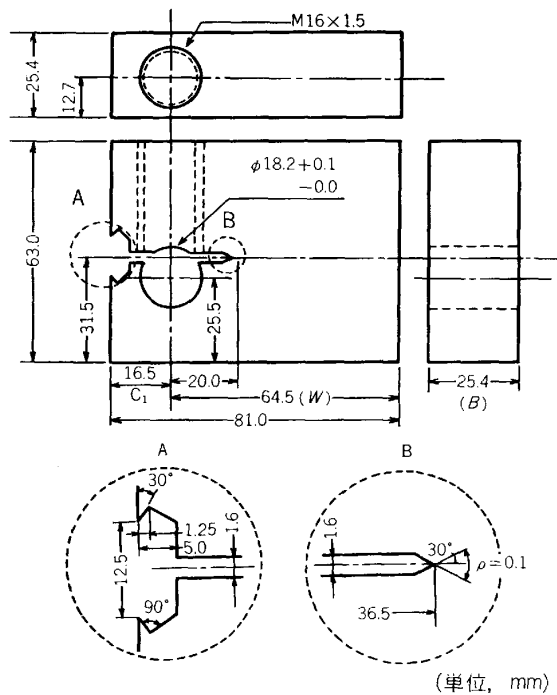
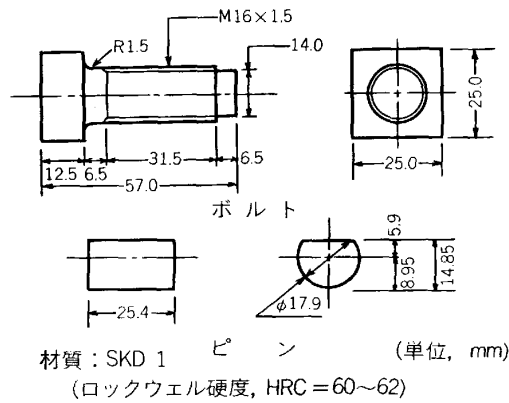
| 研究機関        | 第 1 回 |    | 第 2 回 |    |
|-------------|-------|----|-------|----|
|             | WOL   | CB | WOL   | CB |
| 九州大学        | ○     |    |       |    |
| 久留米工専       | ○     |    |       |    |
| 川崎重工        | ○     |    | ○     |    |
| 三菱重工 (広島)   |       | ○  |       | ○  |
| " (高砂)      |       |    | ○     |    |
| 住友金属        | ○     | ○  | ○     |    |
| 日立造船        | ○     |    | ○     |    |
| 神戸製鋼所       | ○     |    | ○     |    |
| 姫路工業大学      |       |    | ○     |    |
| 立命館大学 (大南研) | ○     | ○  | ○     |    |
| " (藤谷研)     |       |    | ○     |    |
| 大同特殊鋼       | ○     |    | ○     |    |
| 海事協会        | ○     |    | ○     |    |
| 神奈川大学       | ○     |    | ○     | ○  |
| 川崎製鉄        | ○     |    | ○     |    |
| 日本鋼管        | ○     | ○  | ○     | ○  |
| 鉄道技研        | ○     |    | ○     |    |
| 東京工業大学      | ○     | ○  | ○     |    |
| 東京大学        | ○     |    | ○     |    |
| 電気通信大学      | ○     |    | ○     |    |
| 金材技研        | ○     | ○  | ○     | ○  |
| 都立工科短大      | ○     | ○  | ○     |    |
| 石川島播磨重工     | ○     | ○  | ○     |    |
| 新日本製鉄       | ○     |    | ○     |    |
| 東大生研        | ○     | ○  | ○     |    |
| 東芝          | ○     |    | ○     |    |
| 名古屋大学       | ○     |    | ○     |    |
| 東北大学        | ○     | ○  | ○     |    |
| 東北工試        | ○     |    | ○     | ○  |
| 日本製鋼所       | ○     | ○  | ○     | ○  |

† 文献 4) の入手については次のとおりです。  
 予約出版 B5 約 80 ページ 解説付き  
 定価 5000 円 刊行予定日 昭和 60 年 4 月  
 予約申込期日 昭和 59 年 12 月末日まで  
 予約申込先 〒980 仙台市上杉1-17-18 銅谷ビル 802  
 日本材料強度学会 (0222) 65-7843

昭和 59 年 7 月 6 日受付 (Received July 6, 1984) (依頼解説)

\* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku 153)

\*<sup>2</sup> (株)日本製鋼所室蘭製作所 (Muroran Plant, The Japan Steel Works, Ltd.)



指定されていない公差はすべて±0.10mm

図 1 WOL 試験片と負荷用ボルト及びピンの製作図

腐食割れ下限界応力拡大係数  $K_{Isc}$  値を測定するための自己荷重方式のボルトロード WOL (Wedge Opening Loading) 試験と外部荷重方式の片持ち曲げ CB (Cantilever Beam) 試験について規定したものである。

2.2 試験片

標準の WOL 試験片及び負荷用のボルトとピンの形状を図 1 に、CB 試験片を図 2 に示す。切り欠き先端には疲労による予き裂を導入する。疲労き裂を入れる際の最大応力拡大係数  $K_{max}$  は、少なくとも最後の 1.3 mm は本試験開始時の初期応力拡大係数  $K_{I0}$  の 80% を超えないようにする。応力拡大係数  $K$  は次式で計算する。

$$WOL : K = \frac{P\sqrt{a}}{BW} [30.96 - 195.8(a/W) + 730.6(a/W)^2 - 1186.3(a/W)^3 + 754.6(a/W)^4] \dots (1)$$

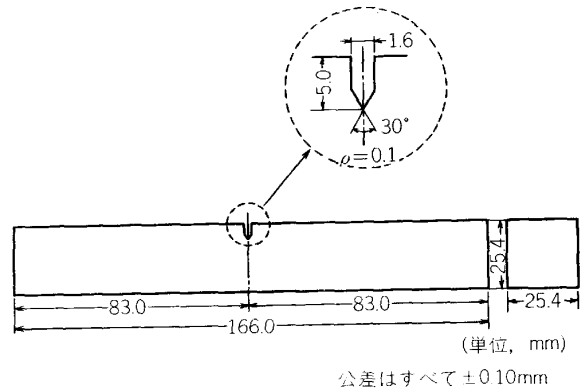


図 2 CB 試験片の製作図

$$CB : K = \frac{6M\sqrt{a}}{BW^2} [1.99 - 2.47(a/W) + 12.97(a/W)^2 - 23.17(a/W)^3 + 24.80(a/W)^4] \dots (2)$$

ここで、 $P$  = 荷重、 $a$  = き裂長さ (WOL ではボルト中心から疲労き裂先端まで、CB では表面から疲労き裂先端まで)、 $B$  = 試験片厚さ、 $W$  = 試験片幅、 $M$  = 切り欠き断面における曲げモーメント

2.3 試験環境

3.5% NaCl 水溶液を標準とする。溶液の pH は試験期間中 5.0~7.0 の間にあることを確認する。試験液量は WOL では試験片 1 個当たり 1~2 l、CB では 0.5 l 以上とする。試験片は原則として室温静止状態に保ち、毎週新しい溶液と交換する。

2.4 試験開始の手順

WOL 試験

(1) 初期き裂長さ  $a_0$  と  $W$  を用いて所定  $K_{I0}$  に対する切り欠き口の開口変位  $V_0$  を次式によつて計算する。

$$V_0 = \left[ \frac{K_{I0}}{E} \right] \sqrt{a_0} \left[ \frac{C_5(a_0/W)}{C_3(a_0/W)} \right] \dots (3)$$

ここで、 $E$  はヤング率、

$$C_3(a/W) = 30.96(a/W) - 195.8(a/W)^2 + 730.6(a/W)^3 - 1186.3(a/W)^4 + 754.6(a/W)^5$$

$$C_5(a/W) = \exp[4.495 - 16.130(a/W) + 63.838(a/W)^2 - 89.125(a/W)^3 + 46.815(a/W)^4]$$

(2) 試験片の切り欠き部の両側面に粘着テープをはり、試験液を数滴落して切り欠き面をぬらす。

(3) クリップゲージを切り欠き開口部に取り付け、所定の  $K_{I0}$  に相当する変位  $V_0$  を与えるようにボルトで負荷する。

(4) 粘着テープを除去しボルトとピンが試験液に接しないように試験片を試験液中に浸す。この際、初期き裂の先端が少なくとも液面下 6 mm 以上になるようにする。

CB 試験

(1)  $a_0$ 、 $B$ 、 $W$  及びモーメントアーム長さ  $L_1$  を用

い、(2)式から所定の  $K_{I0}$  に対応する荷重を計算する。

(2) 試験片を片持ち試験機に取り付け、腐食槽に試験液を入れて試験片を完全に没入させる。

(3) ジャッキ等を用いて静かに荷重を加える。ステップ状や衝撃的な負荷はさける。

## 2.5 試験時間

WOL 試験の試験時間は 4000 h を標準とする。ただし、4000 h 以後もき裂の成長が停止しない場合はさらに延長する。き裂の成長停止の定義として  $10^{-4}$  mm/h 以下を目安とする。CB 試験では、破断しない場合 1000 h までとするが、 $K_{I0}$ -破断時間曲線より判断して明らかにまだ低下傾向が認められるときはさらに 4000 h まで延長する。

## 2.6 試験終了の手順

### WOL 試験

(1) 試験片切り欠き開口部にクリップゲージを取り付け、ボルトを回して除荷し、切り欠き口の変位  $\Delta V_t$  を測定する。

(2) クリップゲージを付けたまま試験片を引張試験機で負荷し、 $\Delta V_t$  だけ変位させるに要する荷重  $P_f$  を測定する。

(3) 試験片を液体窒素温度にまで冷却し引張試験機で破断する。破面上で肉厚方向に 4 等分して両表面を含む 5 個所の位置でき裂長さを測定し、その平均値  $a_f$  を求める。

### CB 試験

(1) 破断時間  $t_F$ 、破断しない場合は試験時間  $t_T$  を記録する。

(2) 破断しない場合は液体窒素温度で機械的に破断し、WOL 試験と同じ要領で  $a_0$  及び  $a_f$  を測定する。

## 2.7 試験結果の取り扱い

(1) WOL 試験のき裂進展途中における  $K$  の計算ボルトの弾性変形を考慮しない剛性ボルト解析による場合はボルト張力  $P_i$  を次式で計算する。

$$P_i = \left[ \left( \frac{a_0}{a_i} \right) \left( \frac{a_i + c_1}{a_0 + c_1} \right) \right] \frac{EBV_0}{C_6(a_i/W)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $a_i$  は  $i$  回目の測定におけるき裂長さ、 $c_1$  は図 1 で定義された長さで 16.5 mm、 $C_6(a_i/W)$  は(3)式参照。

また、き裂の進展に伴うボルトの弾性変形を補正する弾性ボルト解析では、ボルト張力  $P_{EP}$  を次式で計算する。

$$\frac{P_{EP}}{P_i} = \frac{1 + \frac{a_0 + c_1}{a_0} \cdot \frac{L_B B}{A_b} \cdot \frac{1}{C_{60}}}{1 + \frac{a_i + c_1}{a_i} \cdot \frac{L_B B}{A_b} \cdot \frac{1}{C_{6i}}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $L_B$  は弾性変形にあずかるボルトの有効長さ(標準試験片では 16.5 mm を用いる)、 $A_b$  はボルト正味断面積、 $C_{60}$  及び  $C_{6i}$  は(3)式の  $C_6(a/W)$  の  $a_0$  及

び  $a_i$  に対応する値。

したがって、き裂長さ  $a_i$  における応力拡大係数  $K_{Ii}$  は、(4)及び(5)式を用いてボルト張力  $P_i$  または  $P_{EP}$  を求め、(1)式の  $P$  に代入して算出する。

### (2) き裂進展速度 $da/dt$ と $K$ の関係

試験途中の  $a_i$  におけるき裂進展速度と前項の手順によつて求めた  $K_{Ii}$  の関係をプロットする。正確な  $da/dt$  と  $K$  の関係を求めるためには弾性ボルト解析が有効である。

### (3) $K_{ISCC}$ 値の評価

WOL 試験による  $K_{ISCC}$  値は、2.6(1)(2)の手順で求めたボルト張力  $P_f$  を(1)式に代入し試験終了時の  $K_{If}$  を計算する。

ここで、

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_{If}}{\sigma_y} \right)^2 \text{ 及び } 0.45 \leq a_f/W \leq 0.80$$

の関係を満足し、かつ破面上の任意の位置におけるき裂長さ  $a_f$  と平均き裂長さ  $a_f$  との差が 7% 以下であるとき、 $K_{If}$  を有効な  $K_{ISCC}$  と見なす。また(5)式から求めた  $P_{EP}$  と  $a_f$  から計算した  $K_{If}$  は、上記条件を満足する場合、弾性ボルト解析による  $K_{ISCC}$  と見なすことができる。

CB 試験による  $K_{ISCC}$  値は、破面上で測定した予き裂長さの平均値  $a_0$  と荷重から(2)式を用いて  $K_{I0}$  を計算し、 $K_{I0}$ -破断時間  $t_F$  線図を作成してその水平となる  $K_{I0}$  値を  $K_{ISCC}$  とする。破面上での任意の位置における予き裂長さが  $a_0$  と 7% 以上の差異がある場合はデータから除く。

## 3. 共同実験の結果の要約

降伏強さが 120 及び 130 kgf/mm<sup>2</sup> 級の SNCM 439 鋼を用いて行われた Round Robin Test の結果、いくつかの知見が得られたが、その主な点はつぎのとおりである。

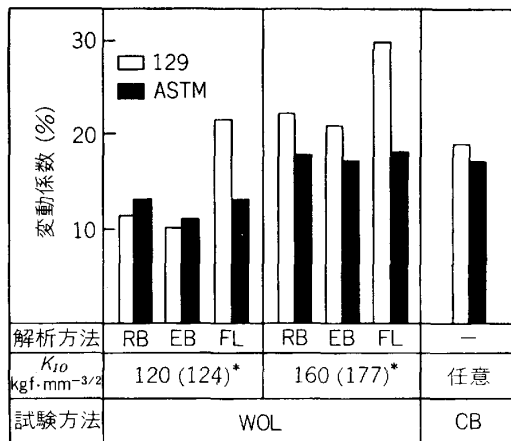
(1) き裂進展開始までの潜伏時間やき裂進展速度は、 $K_{I0}$ 、材料の種類や強度レベル、環境などによつて大幅に異なるので、試験の打ち切り時間を一律に定めることは困難である。き裂進展挙動を長時間観察し決定しなければならない。

(2) WOL 試験における剛性ボルト解析は弾性ボルト解析より低目の  $K$  値を与える。正確な  $da/dt$ - $K$  関係を求めるためには弾性ボルト解析がより有効である。

(3) WOL 試験の最終荷重解析において、荷重の検定時に誤差の入る可能性が予想されるので、十分注意して測定しなければならない。

(4) WOL 試験におけるき裂進展量は  $0.45 \leq a_f/W \leq 0.8$  の範囲内に規定される必要がある。

(5) CB 試験より求められた  $K_{ISCC}$  は、WOL 試験で求められた値より全般的に高目の値となつたが、試



(\*)ASTM, RB剛性ポルト, EB弾性ポルト, FL最終荷重

図3 Round Robin Test の  $K_{ISCC}$  値のばらつきの比較

験本数が多いほどより正確な値が求められる。本共同実験では、少なくとも6本以上の試験を用いた場合、WOL 試験に近い値を示した。

最後に、Round Robin Test によつて得られた  $K_{ISCC}$  値のばらつきの程度を、ほぼ同じ強度レベルの対応鋼種を用いて行われた ASTM の結果<sup>4)</sup>と比較して図3に示す。最終荷重解析の場合にやや差が見られるが、両者の傾向、ばらつきの程度は大体同じと考えられる。

#### 4. おわりに

WOL 及び CB 試験による  $K_{ISCC}$  値の評価法には、まだ検討すべき点もあるが、今回の Round Robin Test で用いた方法により、高強度鋼において変動係数が約10~20%の  $K_{ISCC}$  値が求められた。

最後に熱心に Round Robin Test に協力された担当各委員各位ならびに標準試験法のアンケートに回答された学振129委員会の各位に感謝します。また、共通実験材を御提供いただきました新日本製鉄株式会社ならびに大同特殊鋼株式会社の御厚意にも深甚なる謝意を表します。

#### 文 献

- 1) R. P. Wei and S. R. Novak: "Interlaboratory Evaluation of  $K_{ISCC}$  Measurement Procedures for Steels" presented at Symposium on Environmental Sensitive Fracture, Washington D. C. (1982) [ASTM]
- 2) 学振129委員会: 「鋼の環境強度と破壊に関する共同研究」第1回 SCC Round Robin Test 報告書 (昭和55年2月)
- 3) 同上, 第2回 Round Robin Test 報告書 (昭和58年6月)
- 4) 学振129委員会: 「学振129委員会基準 応力腐食割れ下限界応力拡大係数  $K_{ISCC}$  の測定に関する標準試験方法」60年4月刊行予定 [日本材料強度学会]