

© 1992 ISIJ

技術資料

応力腐食環境下でのき裂の発生・進展に関する共通試験

青木 孝夫*・岩館 忠雄*²・江原隆一郎*³
梅山 嘉夫*⁴・横堀 武夫*⁵

Cooperative Tests on Crack Initiation and Crack Propagation in Stress Corrosion Environment

Takao AOKI, Tadao IWADATE, Ryuichiro EBARA,
Yoshio UMEYAMA and Takeo YOKOBORI

1. はじめに

機械・構造物の多くは、その使用条件から種々の腐食環境下で使用されるものがあり、腐食環境下での機器の安全性の確保のために、材料面では耐腐食環境性に優れた材料の開発が行なわれてきている。一方、腐食環境下での材料の評価手法に関する研究も広く行なわれ、現在では破壊力学を用いてき裂進展寿命を論じられるようになってきている。したがって、現在ではある程度の確度をもって、腐食環境下での寿命の評価が可能になってきているが、その寿命評価の基礎となる腐食環境下での統一的なデータの収集のために、試験方法の標準化が望まれている。

日本学術振興会第 129 委員会では、先に「鋼の環境強度と破壊に関する共同研究」を行ない、昭和 60 年に「応力腐食割れ標準試験法—日本学術振興会第 129 委員会基準—」¹⁾²⁾を作成した。この基準は、試験環境として 3.5%NaCl 水溶液を対象として作られた基準であり、その汎用性の確認が望まれていた。本共通試験は、かかる試験方法の拡張とともに、応力腐食環境下での寿命評価技術に関する情報収集を目的として実施されたものである。機器の対象としては、エネルギー分野で今後とも大きく伸張が期待されている原子力発電用機器に注目し、最近応力腐食割れの損傷のために、リプレイスが実施されている原子力発電用大形低圧タービンロータ³⁾を

対象として、き裂発生試験ならびにき裂進展試験が実施された。試験環境としては、加速試験として推奨されている 38%NaOH + 0.01%CuO 水溶液が用いられた。共通試験は昭和 61 年 8 月に開始され、平成 2 年 1 月に終了した。参加機関は Table 1 に示すごとく 4 機関である。

本報告は、それらの各研究機関の最終報告データを集計整理し、委員会報告として取りまとめたものである。

2. 共通試験材

共通試験材は、外径 2460 mm の原子力発電用大形低圧タービンロータの胴部中央から採取された ASTM A470 (3%Ni-Cr-Mo-V) 鋼である。Table 2 は共通試験材の化学成分を示したものであり、Table 3 は機械的性質を示したものである。共通試験材の 0.2% 耐力は

Table 1. Research laboratories participating in the round robin test.

Lab. No.	Research Laboratory	Bend	WOL
1	Muroran Research Laboratory, The Japan Steel Works, Ltd.	○	○
2	Hiroshima Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.	○	○
3	National Research Institute for Metals.		○
4	Faculty of Engineering, Kanagawa University.	○	○

平成 4 年 2 月 17 日受付 平成 4 年 7 月 3 日受理 (Received on Feb. 17, 1992; Accepted on July 3, 1992)(依頼技術資料)

* 元金属材料技術研究所 (Formerly National Research Institute for Metals)

*² (株)日本製鋼所室蘭研究所 工博 (Muroran Research Laboratory, The Japan Steel Works, Ltd., 4 Chatsu-machi Muroran 051)

*³ 三菱重工業(株)広島研究所 工博 (Hiroshima Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

*⁴ 神奈川大学工学部 (Faculty of Engineering, Kanagawa University)

*⁵ 帝京大学理工学部 理博 (School of Engineering and Science, Teikyo University)

Key words : environmental testing ; fracture mechanics ; stress corrosion cracking ; stress intensity factor ; subcritical flaw growth ; test technique ; evaluation.

Table 2. Chemical compositions of the material (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.24	0.06	0.30	0.005	0.009	3.12	1.50	0.39	0.11

Table 3. Tensile properties of the material.

0.2% Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation in 50 mm %	Reduction of area %
920	1 039	19.6	60.3

920 MPa であり、引張強さは 1 039 MPa である。

3. き裂発生試験

き裂発生寿命の評価試験として、4点曲げによるき裂発生試験が実施された。

3.1 共通試験と ϵ_0 の設定

Fig. 1 は共通試験に用いた厚さ 3 mm、幅 15 mm、長さ 70 mm、スパン距離 60 mm の 4 点曲げ試験片である。ここで、試験片は試験片表面の条件を統一するために、耐水ペーパー #1200 による表面研磨が施され、各研究機関に配布された。また、試験片と接触するピンや治具の材料としては電位を生じないように試験片と同一の材料が使用された。共通試験の環境は、38% NaOH + 0.01% CuO 水溶液であり、液温は 110°C ± 3°C の範囲に制御された。ここで、試験液量は試験片 1 個当たり 0.5 l とし、試験液の水準は試験液に脱イオン水を加えることによって維持された。

試験片の初期設定ひずみおよび試験片本数は、予備試験の結果をもとに、 $\epsilon_0 = 4\,000, 6\,000, 8\,000 \times 10^{-6}$ のひずみで各 2 本、 $\epsilon_0 = 10\,000 \times 10^{-6}$ 以下の 2 種類のひずみで各 2 本が設定された。ここで、試験片のひずみの負荷は試験片に抵抗線ひずみゲージが貼付され、ボルトを回しながら所定のひずみまで負荷された。

3.2 共通試験の結果

各研究機関において実施された各試験片の試験終了時のき裂発生時間は、当初試験中の荷重記録から、初期設定荷重が 25% の低下を示す時までの時間と定義されたが、研究機関の中にロードセルを保有していない機関があったことから、予備試験の結果をもとに、初期荷重の 25% 低下時と等価なき裂寸法、すなわち表面に観察されたき裂の寸法が 5 mm の大きくなった時間と定義された。Fig. 2 に表面き裂の大きさと経過時間の関係および Photo. 1 に試験終了後の試験片表面の一例を示した。

Fig. 3 は各試験片のき裂発生時間 t_i を初期設定ひずみ ϵ_0 との関係でまとめて示したものである。各研究機関のき裂発生寿命の中には、一部短い寿命を示す試験片が観察されるが、各研究機関の 1 000 時間のき裂発生寿

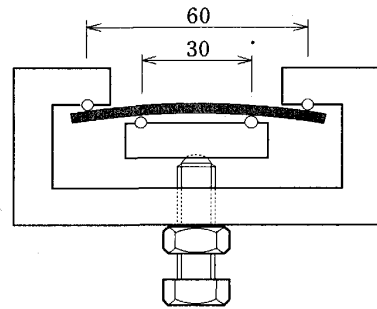


Fig. 1. Four point bend test.

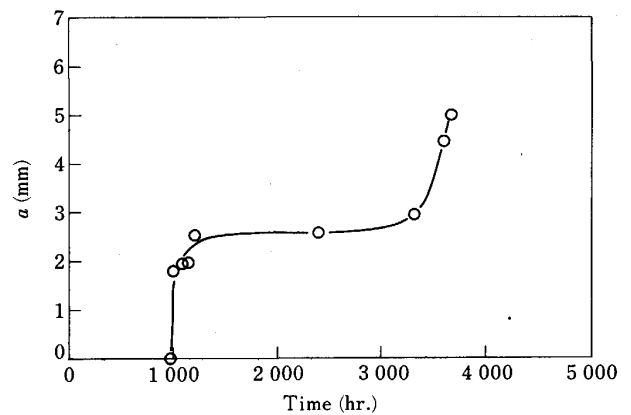


Fig. 2. Relationship between surface crack length and elapsed time.

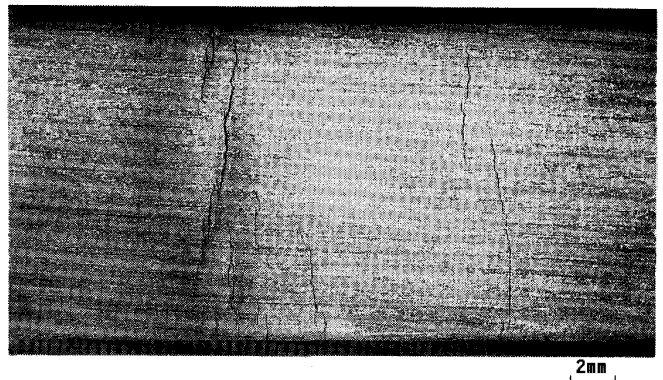


Photo. 1. Surface cracks observed on the specimen tested.

命を与えるひずみは、 $3\,500 \sim 4\,000 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、き裂発生寿命は比較的研究機関の間でよい一致を示している。ここで、Photo. 2 は試験終了後の試験片に観察された表面き裂の拡大観察の一例を示したものである。発生したき裂は粒界に沿って伝播し進展拡大する様相が観察された。

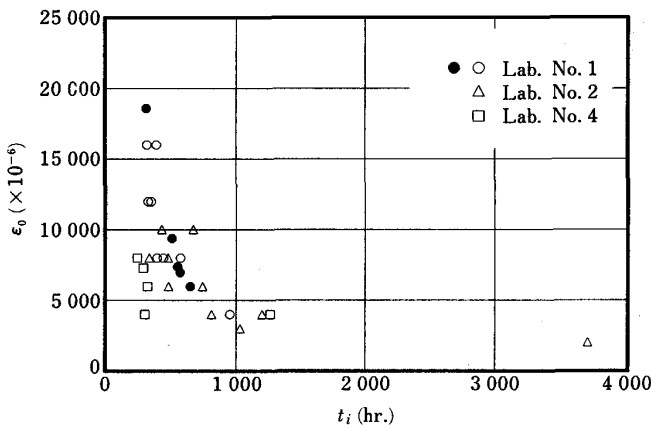


Fig. 3. Relationship between the initial surface strain and crack initiation time for bend tests.

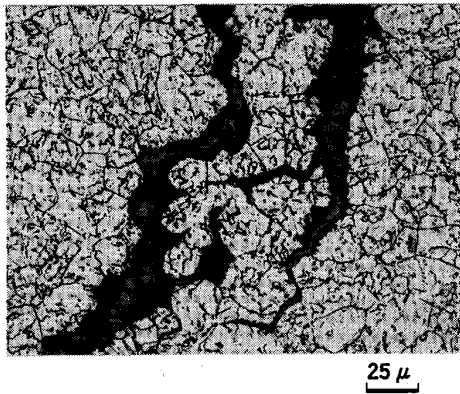


Photo. 2. Optical micrograph of a surface crack.

4. き裂進展試験

き裂進展速度の評価試験として、WOL 試験片を用いた K_{ISCC} 試験が実施された。

4.1 共通試験と K_{I0} の設定

共通試験に使用された試験片は Fig. 4 に示す厚さ 25.4 mm の 1T-WOL 標準試験片である。ここで、試験片の採取方向は ASTM E399 表示で C-R 方向である。試験片への疲労予き裂の挿入は、少なくとも最終の 1.3 mm は、最大応力拡大係数 K_{max} が初期設定応力拡大係数 K_{I0} の 80% を超えないように配慮された¹⁾²⁾。応力拡大係数 K は次式によって計算された。

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

ここで、 P は荷重、 a はボルト中心から疲労き裂先端までのき裂長さ、 B は試験片厚さ、 W は試験片幅である。

試験環境はき裂発生試験の場合と同じ 38% NaOH + 0.01% CuO 水溶液であり、試験中の液温は 110°C ±

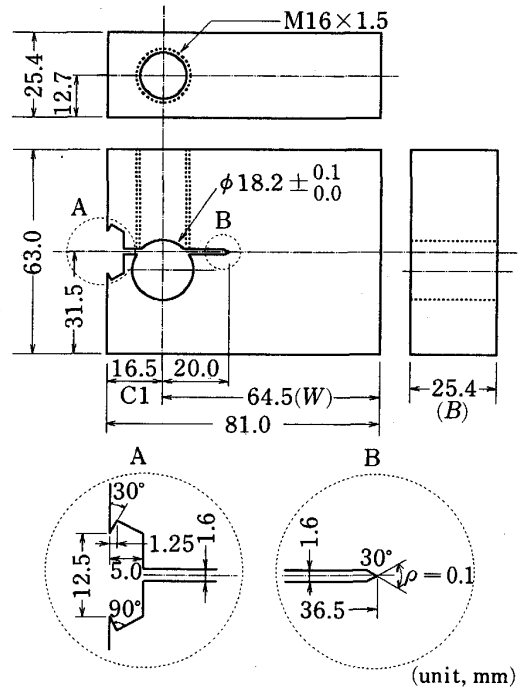


Fig. 4. Standard 1T-WOL specimen.

3°C に維持された。ここで、試験液量は 1 T-WOL 試験片 1 個当たり 1~2 l とし、試験液の水準は脱イオン水を加えることによって維持された。試験開始時の初期応力拡大係数 K_{I0} は $31 \text{ MPa}\sqrt{m}$ および $46 \text{ MPa}\sqrt{m}$ に設定され、試験片本数はそれぞれ 2 本とされた。試験開始時の試験片の前処理、き裂開口変位の決定、荷重の荷重方法、試験中のき裂長さの測定および試験終了時の K_{II} の測定の手順は、学振 129 委員会基準¹⁾²⁾に従った。ここで、所定の K_{I0} に対する切欠部の開口変位 V_0 は、次式により計算され、ボルトを締めることによって試験片に設定された¹⁾²⁾。

$$V_0 = \left[\frac{K_{I0}}{E} \right] \sqrt{a_0} \left[\frac{C_6(a_0/W)}{C_3(a_0/W)} \right] \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 E はヤング率、

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

$$C_6(a/W) = \exp [4.495 - 16.130(a/W) + 63.838(a/W)^2 - 89.125(a/W)^3 + 46.815(a/W)^4]$$

4.2 共通試験結果

4.2.1 WOL 試験の結果

Fig. 5 は各研究機関で測定された各試験片のき裂成長曲線を初期応力拡大係数 K_{I0} 別にまとめて示したものである。試験終了時までの経過時間は、6 000~11 000 時間の間にあり、その大半は 7 000 時間を超えている。Fig. 5 をみると、初期き裂長さの違いによるばらつきを除いた各試験片のき裂成長曲線のばらつきは、標準試験法の作成時に実施された 3.5% NaCl 水溶液環境下での

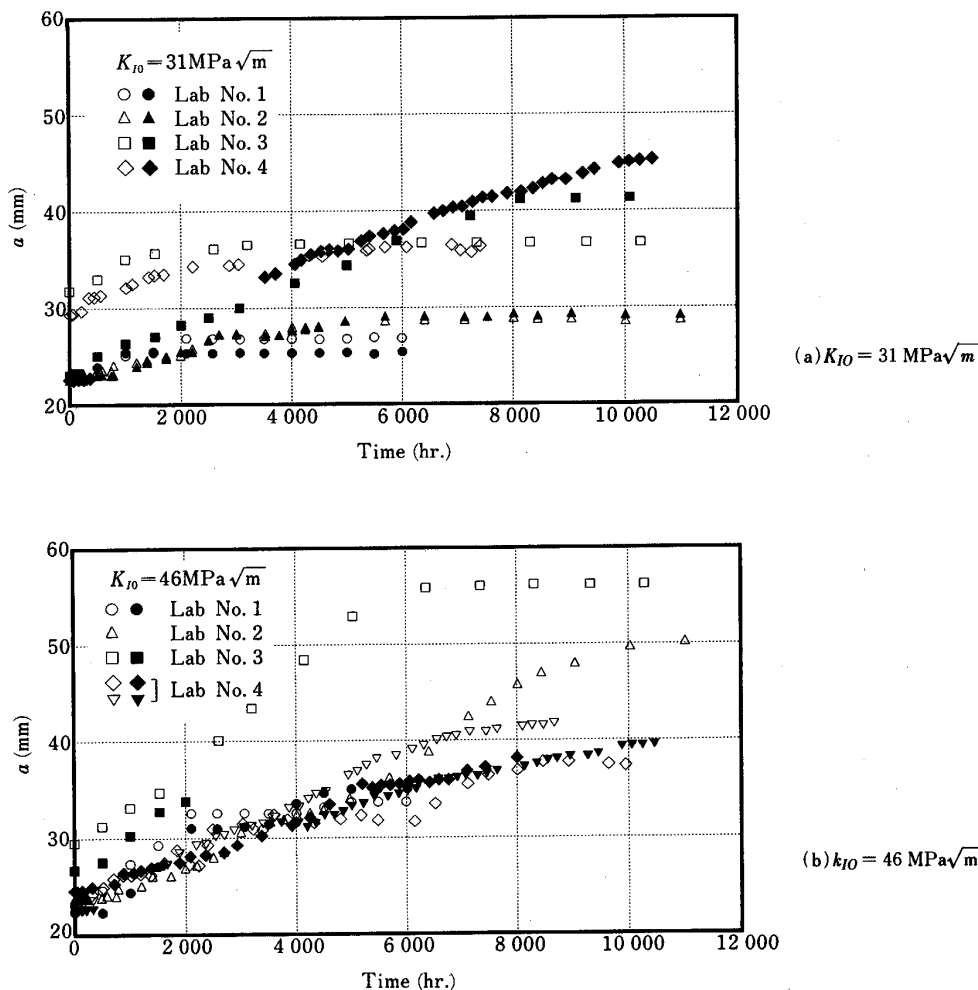


Fig. 5. Crack length versus elapsed time records for WOL tests.

き裂成長曲線¹⁾に比較して小さいようである。これは、3.5% NaCl 水溶液下でのき裂成長曲線のばらつきが各試験片の潜伏期間のばらつきに起因しているのに対して、本共通試験の 38% NaOH + 0.01% CuO 水溶液環境下では、き裂進展開始までの潜伏期間がなく、各試験片が試験開始時からき裂が進展開始しているためである。

Fig. 6 は Fig. 5 のき裂成長曲線を曲線近似し、その勾配から求めたき裂進展速度 da/dt を応力拡大係数 K との関係で示したものである。ここで、 K 値の計算には、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が使用され、次式を用いて計算されるボルト張力 P_{EP} が (1) 式に代入され計算された。

$$\frac{P_{EP}}{P_i} = \frac{1 + \frac{a_0 + c_1}{a_0} \cdot \frac{L_B B}{A_b} \cdot \frac{1}{C_{60}}}{1 + \frac{a_i + c_1}{a_i} \cdot \frac{L_B B}{A_b} \cdot \frac{1}{C_{6i}}} \dots \dots \dots (3)$$

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

ここで、 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)、 A_b はボルトの正味断面積、 C_{60} および C_{6i} は (2) 式の $C_6(a/W)$ の a_0 および a_i に対応する値である。また C_1 は Fig. 4 の標準試験片で定義された 16.5 mm である。Fig. 6 をみると、き裂進展速度のばらつきは、各 K_{I0} とともに大きく、その程度は 3.5% NaCl 水溶液環境下の場合と同程度である。ここで、前述の Fig. 5 から明らかなように、7000 時間の経過においても、試験片の中にはき裂は明らかに進展しているものがあり、信頼度の高い K_{ISCC} を求めるためには 10000 時間近くまでの試験時間が必要である。

Fig. 7 は試験終了時の K_{Ij} の値を、弾性ボルト解析および最終荷重解析の場合で比較し示したものである。 K_{Ij} のばらつきは明らかに最終荷重解析の場合に大きく、試験終了後の荷重測定時における誤差が大きいことを示している。

4.2.2 K_{ISCC} のばらつきについて

下限界応力拡大係数 K_{ISCC} のばらつきを検討するために、各試験片の破面の観察が行なわれた。き裂進展量

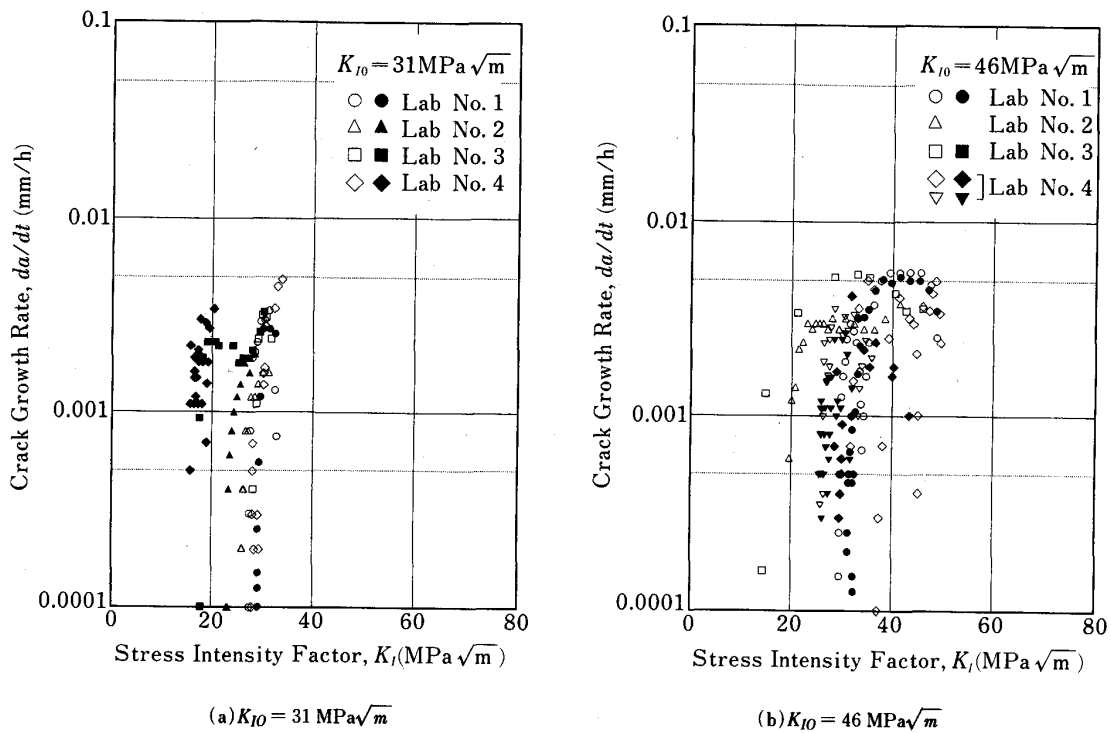


Fig. 6. Crack growth rate as a function of K from a rigid-bolt analysis.

が大きい試験片では、Photo. 3 の一例にみるように、き裂進展面が湾曲し標準試験法に規定されている切欠面に対して $\pm 5^\circ$ 以内の基準を超えていた。また、き裂進展量が小さく K_{I0} の大きい試験片では、数個に分かれた分枝き裂が観察された。このようなき裂進展挙動は、実機での原子力発電用大形低圧タービンロータに観察されたき裂形態と同様であった³⁾。

Table 4 は全試験片の K_{I0} を研究機関内および研究機関間に分けて統計解析を行なった結果を示したものである。ここで、分枝き裂を伴う試験片、湾曲き裂を伴う試験片の結果は、除外し解析すべきであるが、き裂進展形態が実機の場合と同様であることから、全試験片を対象として解析を行なった。 K_{I0} が $31 \text{ MPa}\sqrt{m}$ の場合の標準偏差は、3.5% NaCl 環境下での結果と同程度であるが、 K_{I0} が $46 \text{ MPa}\sqrt{m}$ の場合の標準偏差は2倍以上の値を示している。

5. ま と め

応力腐食環境下での寿命評価技術に関する情報収集を目的として、原子力発電用大形低圧タービンロータ材を用いた 38% NaOH + 0.01% CuO 水溶液環境下での、き裂発生試験およびき裂進展試験が実施された。その結果、寿命評価にあたっての評価試験方法として、下記の点が指摘された。

(1) 4点曲げ試験によるき裂発生寿命試験では、一部

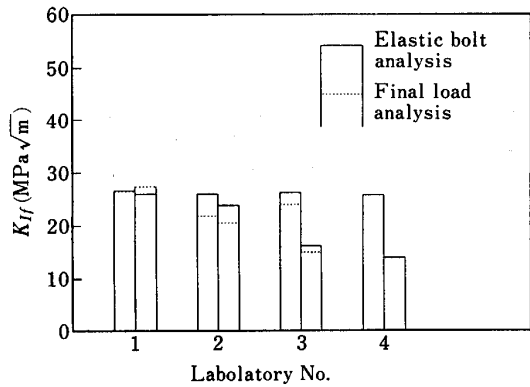


Photo. 3. An example of crack propagation during WOL test.

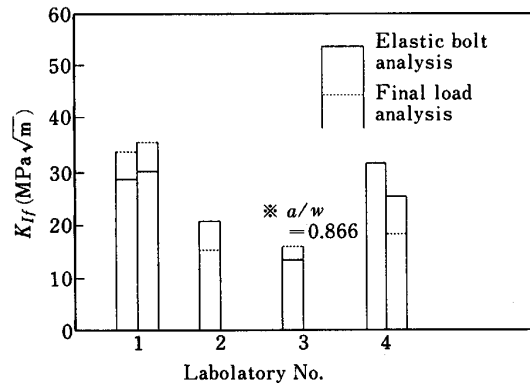
の試験片においてき裂発生寿命が短い場合が観察されたが、1000時間の寿命を与えるひずみのばらつきは

Table 4. Statistical analysis of K_{Ij} values obtained with WOL specimens.

K_{I0} MPa \sqrt{m}	Test duration h	Analysis method	Number of laboratory	Number of specimen	K_{Ij} MPa \sqrt{m}	$\sigma_{surface}$			K_{Ij} MPa \sqrt{m}	σ_{avg}		
						Standard deviation MPa \sqrt{m}				Standard deviation MPa \sqrt{m}		
						Within S_W	Between S_n	Total S_m		Within S_W	Between S_n	Total S_m
31	6 000	Rigid bolt	4	8	22.6	2.6	3.0	3.1	22.7	3.2	7.0	7.1
	↓	Elastic bolt	4	8	23.4	2.4	2.5	2.7	23.4	3.0	6.4	6.5
	11 016	Final bolt	4	7	21.4	2.6	5.3	5.4	21.5	2.6	5.1	5.2
46	6 000	Rigid bolt	4	6	22.9	3.1	6.6	6.7	25.9	2.8	5.2	5.4
	↓	Elastic bolt	4	6	24.4	3.1	6.5	6.6	27.4	2.5	4.7	4.8
	11 016	Final bolt	4	5	25.1	5.2	9.4	9.6	23.9	5.1	9.1	9.4



(a) $K_{I0} = 31 \text{ MPa}\sqrt{m}$



(b) $K_{I0} = 46 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Fig. 7. Comparison of K_{Ij} obtained from an elastic-bolt analysis and a final load analysis.

3 500~4 000 $\times 10^{-6}$ と比較的小さな結果を示した。

(2) WOL 試験片によるき裂進展寿命試験では、き裂進展開始までの潜伏期間がなく、き裂進展曲線のばらつきは、学振 129 委員会基準設定時の共通試験である 3.5% NaCl 水溶液環境下に比較して小さい結果を示した。

(3) 下限応力拡大係数 K_{ISCC} の測定には、初期応力拡大係数 K_{I0} の影響は小さいが、試験時間には 10 000 時間前後が必要である。

(4) 最終荷重解析による K_{ISCC} の値は、荷重測定の問題から誤差が大きく、弾性ボルト解析による K_{Ij} 値の採用が推奨された。

(5) K_{Ij} のばらつきは比較的大きく、その原因は分枝き裂の発生とき裂進展面の湾曲に起因していることが明らかにされた。

(6) この分枝き裂とき裂進展面の湾曲は、実機での原子力発電用大形低圧タービンロータに観察された破面形態とよい一致を示した。

このように、本共同試験の試験環境は加速試験であるが、実機でのき裂進展形態を再現できており、本研究の試験の結果は実機の寿命評価に対して一つの情報を与えるものである。

文 献

- 「応力腐食割れ標準試験法—日本学術振興会第129委員会基準—」(日本材料強度学会編)(1985)
- 青木孝夫, 岩館忠雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2204
- Steam Turbine Disc Integrity Seminar, EPRI, Mineapolis (1982. 9)