

高張力鋼切欠き底からの応力腐食割れ発生特性[†]津田 政明* 広瀬 幸雄*
矢島 善次郎** 田中 啓介***Initiation of Stress Corrosion Cracking in Notched
High Strength Steel

by

Masaaki TSUDA*, Yukio HIROSE*, Zenjiro YAJIMA**
and Keisuke TANAKA***

Stress corrosion tests were conducted on the notched compact tension specimens of quenched-tempered SNCM 439 steel in three kinds of environmental solution : distilled water, 3.5%NaCl, and 0.1N H₂SO₄. The crack nucleation behavior was analysed from a view point of fracture mechanics. The results obtained are summarized as follows ;

(1) Time to crack nucleation t_n of the notched specimens with various root notch radii was determined by a parameter of $K\rho/(\rho+\rho_0)^{1/2}$, where $K\rho$ is the apparent stress intensity factor, ρ is the notch root radius and ρ_0 is the intrinsic notch root radius. The life got shorter as the hydrogen content became larger in the order of distilled water, 3.5%NaCl, and 0.1N H₂SO₄.

(2) Stress corrosion cracks were formed from the notch on three different planes : the original notch plane and two inclined planes to the notch. The crack plane changed depending on environments, notch-root radii and stress levels. Two inclined planes of crack initiation from the notch agreed with the plane of the maximum shear stress.

Key words : Stress corrosion cracking, Fracture mechanics, Electrical potential method, Stress intensity factor, Crack nucleation

1 緒 言

構造物の応力腐食割れ (SCC) において、き裂発生挙動を明らかにすることは、破壊予知あるいは破壊のメカニズム解明の点からも重要な課題であり、これまでも数多くの研究がなされている^{1)~8)}。

著者らは高張力鋼の食塩水環境中の SCC き裂発生においてこれまでにき裂発生時間と切欠き先端半径およびみかけの応力拡大係数 $K\rho$ 値との間に一価関係があることを示し、き裂発生時間は切欠き底の最大応力値に対応するパラメータで決まることを示した⁴⁾。一方 SCC においてき裂が枝分れすることは、しばしば観察されており^{7),8)}、枝分れは、材料、負荷応力ばかりでなく環境に大きく影響されることが明らかである。したがって、上述の食塩水中のき裂発生寿命の研究で得た考え方が環境の異なる場合についても成り立つのかどうかは興味深いところである。

本研究では、環境水溶液を種々変化させた場合について各種切欠き半径を持つ切欠き材の応力腐食割れき裂発生実験を行い、各環境におけるき裂発生挙動につ

いて検討するとともに、き裂成長形態および破壊様式についても破壊力学的観点より検討を加えた。

2 実験方法

2・1 材料および試験片

実験に用いた材料は前報⁸⁾と同様の SNCM439 鋼 (AISI4340 鋼相当)、(化学成分 ; wt%, 0.39C, 0.77Mn, 0.27Si, 0.019P, 0.014S, 0.13Cu, 1.77Ni, 0.83Cr, 0.17Mo) で、市販の $\phi 100$ mm の丸棒を入手した。試験片は 1 インチ型のコンパクト引張型試験片で、丸棒の中心軸方向と直角に切断した平板を機械加工により採取した。

熱処理は 1153K で 1 hr 焼ならしの後、1123K で 1 hr オーステナイト化後油焼入れした。焼もどし処理では 473 K で 2 hr 保持後水冷した。試験片表面は、研削により脱炭層を除去したのち湿式研磨紙および電解研磨によって仕上げた。

切欠き先端は放電加工によって切欠き先端での加工層が最小となる条件で加工したのち、電解研磨を行った。切欠き先端半径 ρ の仕上がり寸法が 0.05, 0.25,

† 原稿受理 平成元年 7 月 20 日 Received July 20, 1989

* 正 会 員 金沢大学教育学部 金沢市丸の内, Faculty of Education, Kanazawa University, Marunouchi, Kanazawa

** 正 会 員 金沢工業大学 金沢南局区内野々市町, Kanazawa Institute of Technology, Nonouchi-machi, Minamikyoku, Kanazawa

*** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

Table I. Mechanical properties.

Yield strength σ_Y (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation ϵ_F (%)	Fracture toughness in Air	
			$\rho=0$ mm K_{01c} (MPa \sqrt{m})	$\rho=0.5$ mm K_{1c} (MPa \sqrt{m})
1529	1931	4.5	54.6	123

0.5, 1.0, 2.5 mm のものを用いた。

試験片形状寸法は前報⁶⁾と同様の鈍化切欠きを持つコンパクト引張型試験片であり、板厚 $B=5.5$ mm, 板幅 $W=50.8$ mm, 切欠き深さ a と W の比は 0.50 とした。試験片の機械的性質を Table I に示す。

2・2 き裂測定方法

応力腐食割れき裂の発生は、移動式読み取り顕微鏡および交流電位差法^{9)~11)}(AC-EPM)を用いて観察した。交流電位差法は Fig. 1 に示す回路において、周波数

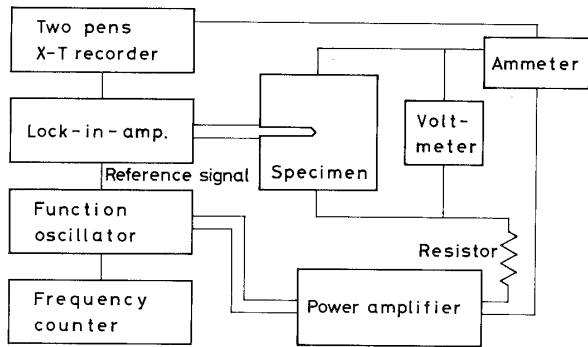


Fig. 1. Set up for the AC electrical potential method.

92 Hz, 電流 1.0 A 一定の条件のもとで給電点, 電位検出点および導線はシールドした。交流発振器 (NF E1011 型) で発生させた交流を電力増幅器 (NF TA250) で増幅させたのち試験片に接続した。切欠き両側から検出した信号は、プリアンプ (NF P-52A) で増幅されたのち、ロックインアンプ (NF L1-574A) で交流発振器からの信号との間で位相検波したものを増幅し記録した。

2・3 環境条件

環境液として 0.1N H₂SO₄, 3.5% NaCl, 蒸留水の

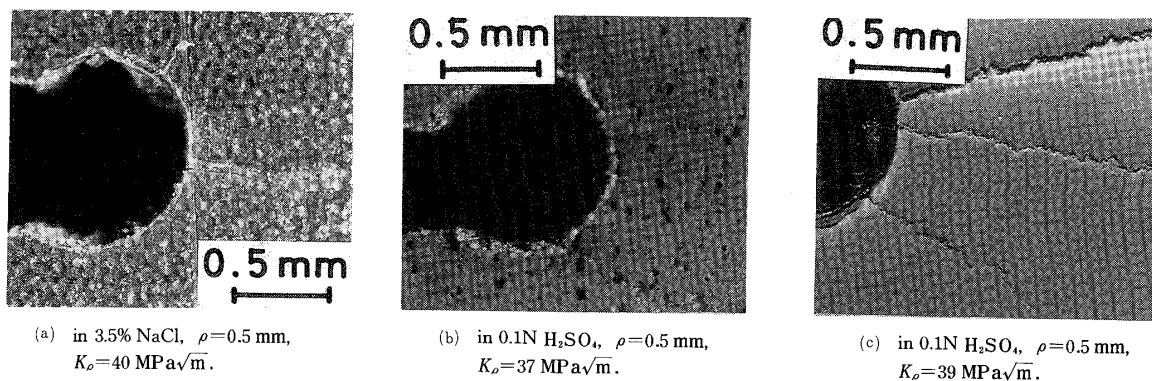


Fig. 3. Macroscopic features of the stress corrosion crack profile.

Table II. Hydrogen contents.

Environment	Hydrogen content C_0 ($\mu\text{g/g}$)	Diffusion coefficient D (cm^2/sec)
0.1N H ₂ SO ₄	8.7×10^{-1}	4.0×10^{-7}
3.5% NaCl	8.6×10^{-3}	
Distilled water	$< 1.0 \times 10^{-3}$	

3 種を用いた。電気化学的測定^{12)~14)}による試験片と環境との拡散性水素溶解量 C_0 を Table II に示す。蒸留水中での C_0 は他の溶液の場合よりも極めて小さな値を示した。試験片の浸漬は、無負荷状態で 0.1N H₂SO₄ のものは 20 hr, 他のものは 200 hr とした。また液温は $295 \pm 2\text{K}$ に保った。

3 実験結果

3・1 き裂発生時間

応力腐食割れ過程中的切欠き底でのき裂発生挙動を移動型読み取り顕微鏡と AC-EPM 法により測定した。そのときの電位差法の測定感度を上げた場合の電位の時間変化を Fig. 2 に示す。なお、図中に示した K_0 は $\rho=0$ として計算した見掛けの応力拡大係数である。き裂発生直後に実験を中断したときの試験片のき裂写真を Fig. 3 に示す。蒸留水, 3.5% NaCl 中および 0.1N H₂SO₄ 中の K_0 の低い領域では Fig. 3 (a) に示すように試験片中央部を通るき裂が観察された。また, 0.1N H₂SO₄ 中の K_0 の高い領域では Fig. 3 (b), (c) に

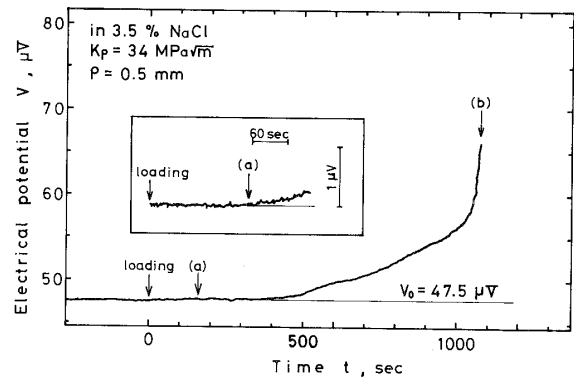


Fig. 2. Detection of crack nucleation with the AC electrical potential method.

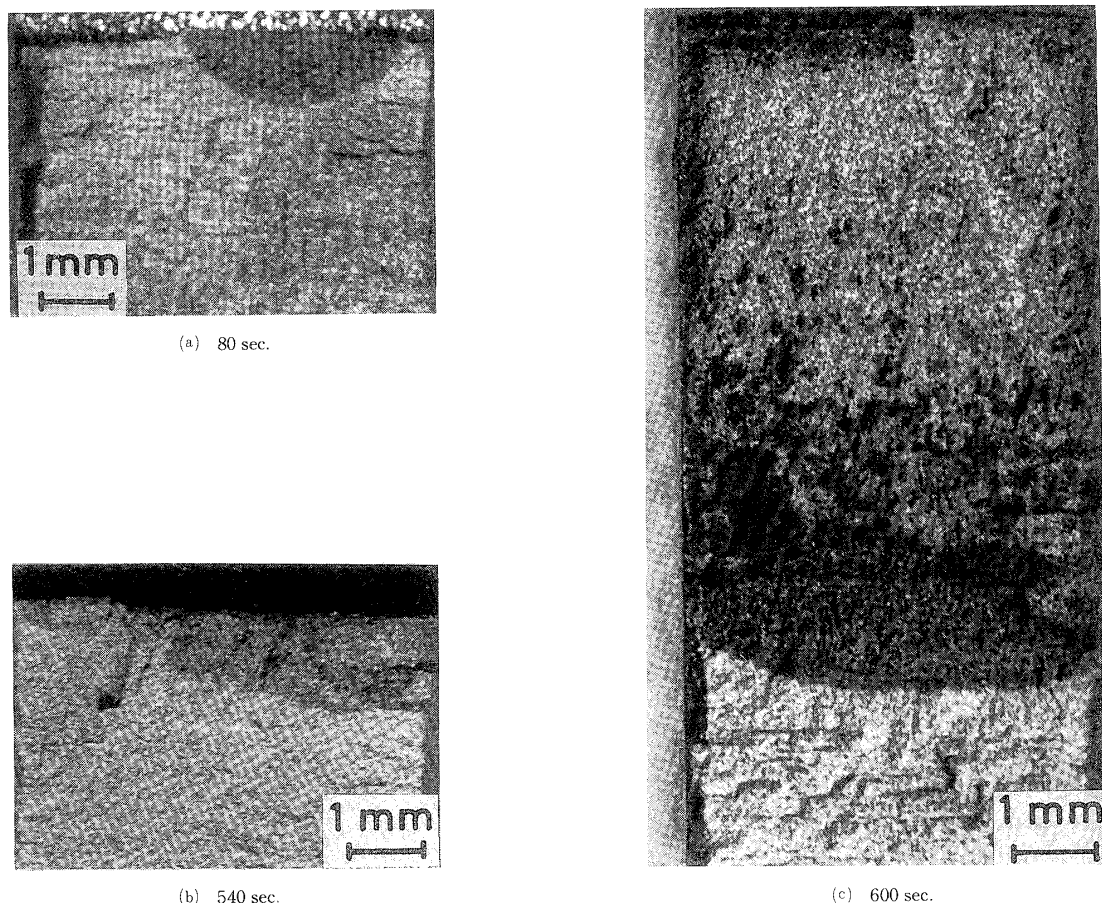


Fig. 4. Macroscopic features of SCC fracture surface.
in 3.5% NaCl, $\rho=0.5$ mm, $K_0=34$ MPa \sqrt{m} .

示す2本あるいは3本のき裂がみられた。

Fig. 2中(a), (b), (c)に対応したところで除荷し, 実験を中断, 試験片を423 Kで20 hrベーキングしたのち急速破壊させたものの破面のマクロ写真をFig. 4に示す。き裂発生の開始場所はほぼ板厚中央部(Fig. 4(a))であり切欠き底から少し離れたところを中心にしてだ円状に広がっていた。このだ円状の微小き裂はAC-EPM法ではほぼ $0.1 \mu V$ の変化を示したときに発生していた。いずれのSCC実験においてもFig. 4(b)に示すようにき裂はその後急速に板厚方向に広がっていき, 試験片表面での顕微鏡観察では白く反射する領域がみられた。さらに, き裂は時間の経過にしたがって板厚すべてに広がる(貫通き裂となる)とともにしだいにき裂長さ方向へ成長していった(Fig. 4(c))。

本研究においては, 顕微鏡で板厚方向表面においてき裂を観察できた時間はAC-EPM法ではほぼ $10 \mu V$ に相当するところであった。このき裂が観察された時間をき裂発生時間 t_n とした。

3種類の環境中で, 切欠き半径 ρ を種々変化させたときの見掛けの応力拡大係数 K_0 とき裂発生時間 t_n との関係をFig. 5に示す。また, $t_n=240$ hrでの矢

印付プロットは荷重設定後240 hr経過してもき裂の発生が認められなかった場合の K_0 の値の最も大きいものを示している。

3.5% NaCl中では, 前報と同様に, どの ρ のものについても $t_n=100$ hrまでの範囲で, 両対数線図上ではほぼ直線関係にあり, このような関係は蒸留水中の場合についてもほぼ同様な傾向を示した。また, K_0 が同じ場合には ρ の大きいものほどき裂の発生時間は長くなっていた。

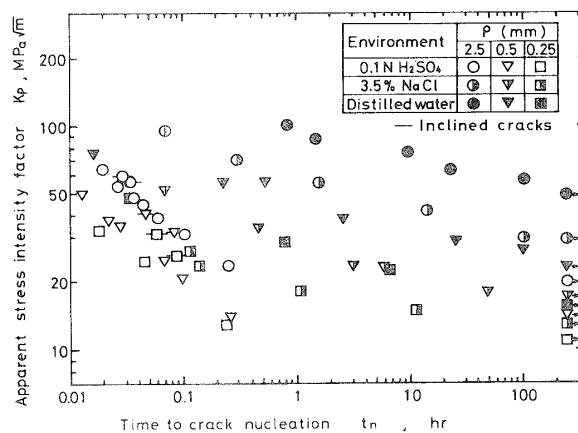


Fig. 5. K_0 vs. t_n .

一方、0.1N H₂SO₄ 中では、切欠き半径 ρ を変化させて実験を行った場合には、き裂発生時間は K_0 の比較的大きい場合にそれぞれの ρ によってばらつきを示すが、き裂発生時間の短いものに注目すると、後述のように図中の領域全体にき裂の数が一本の場合は切欠き底から直線的にき裂が入っていたが、この場合は複数入った場合（図中横棒付データ）よりき裂発生寿命が短い。このとき K_0 と t_n の間に直線関係を有していることがわかる。しかしこの関係は ρ が大きい方が長寿命となる。一方、斜め方向にき裂が分れて発生する場合のき裂発生時間 t_n は、一本のき裂が発生した場合より長くなっていた。

図中、き裂発生時間を3つの溶液について同じ K_0 で比較すると、0.1N H₂SO₄ の場合には、他の液に比べて極端に t_n が短い。また、蒸留水中の場合には3.5% NaCl 中より t_n が長い。同一の t_n で比較すると K_0 の大きいものから順に蒸留水、3.5% NaCl、0.1N H₂SO₄ となる。

3・2 き裂発生形態

Fig. 3 に示したように、き裂は荷重方向に対して試験片中心線から傾いた方向にも発生していた。発生したき裂の形状をモデル的にしたものを Fig. 6 に示す。また、き裂発生形態は溶液の種類、見掛けの応力拡大係数、切欠き半径などによって異なったものとなる。0.1N H₂SO₄ の場合には K_0 の高い順に3本、2本、1本のき裂が確認された。

また、試験を中断した試験片を縦割りしてき裂形態を比較観察したところ、試験片表面と板厚中央部とでき裂の発生角の差はみられなかった。

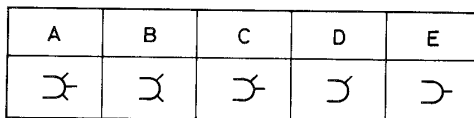


Fig. 6. Characterization of the stress corrosion crack path.

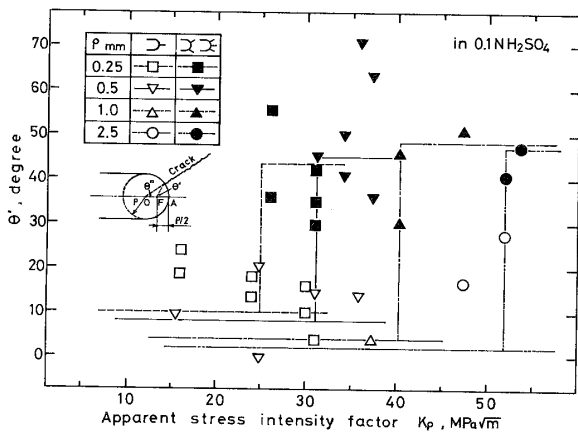


Fig. 7. θ' vs. K_0 and the crack tip stress field derived by Creager and Paris.

0.1N H₂SO₄ 中でのき裂発生形態を定量化するため、Fig. 7 中に示すような座標における θ' (き裂発生角) を測定した。Fig. 7 に ρ を変化させた時の θ' と K_0 との関係を示す。き裂の数が同じときには、 K_0 が大きい条件でき裂の発生角 θ' の値は大きくなっていることがわかる。

き裂の本数が複数の場合には、Fig. 5 中にばらつきとなっているように、長時間側に遅れるような明確な時間差を生じていた。

また、き裂はどれも切欠き内側方向に延長すると、ほぼ切欠き中心 O を通っていた。

4 考 察

4・1 き裂発生時間と $K_0/\sqrt{\rho}$ の関係

前報までの実験において、 K_0 と t_n の間にはそれぞれの ρ の平方根との間で $t_n=0.01\sim 100$ hr の範囲において一価関係が得られた。つまり、次式の関係が成り立っている。

$$t_n = \alpha [2K_0 / (\pi\rho)^{1/2}]^m \quad (1)$$

ここで、 α 、 m は環境と試験片の組合せによって定まる定数となる。Fig. 8 に、Fig. 5 の K_0 を ρ の平方根で割った値つまり $K_0/\sqrt{\rho}$ と t_n の関係を示す。 t_n は蒸留水中および3.5% NaCl では $t_n=0.01\sim 100$ hr の範囲において ρ によらず1本の直線上に実験点が集中する。一方、0.1N H₂SO₄ 中では、 ρ の大きさによらず傾き m は等しいが、 α の値が異なった値となり、一本の直線では表されなかった。

そこで、前報で報告した仮想切欠き ($\rho+\rho_0$) の概念を使って Fig. 5 を再整理したものを、Fig. 9 に示す。いずれの溶液中においても、き裂の発生時間は ρ の大きさによらずすべて1本の直線で表され、次式の関係が成り立っている。

$$t_n = \alpha [2K_0 / [\pi(\rho+\rho_0)]^{1/2}]^m \quad (2)$$

なお、 ρ_0 の値は Fig. 9 中に示した。ここで、 ρ_0 の値は0.1N H₂SO₄ では他の場合よりも大きく、このことが Fig. 8 の関係に ρ 依存性が表れたものと理解される。

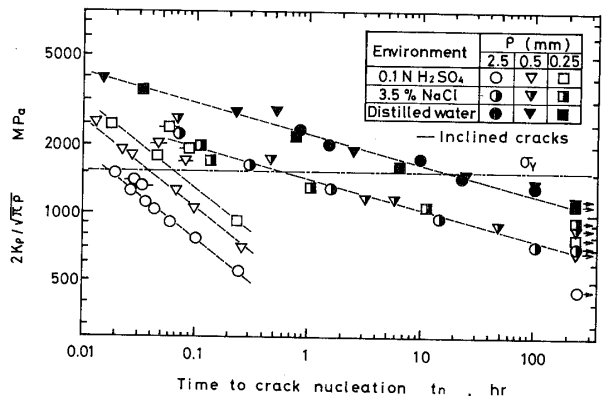


Fig. 8. $K_0/\sqrt{\rho}$ vs. t_n .

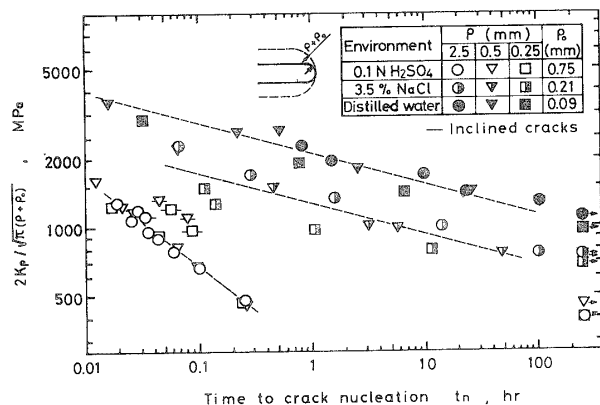


Fig. 9. $K_I/\sqrt{\pi(\rho+\rho_0)}$ vs. t_n .

ここで、直線の傾き m は、蒸留水中および 3.5% NaCl 中においてはほぼ -7.04 で等しい。しかしながら、0.1N H₂SO₄ 中の場合では -2.59 であった。一方、 α については、蒸留水および 3.5% NaCl 中のもはそれぞれ 3.17×10^{23} , 7.45×10^{21} となっていた。0.1N H₂SO₄ 中では 2.04×10^6 であった。このように環境によって直線の傾きが異なるのは、蒸留水および 3.5% NaCl に比べて 0.1N H₂SO₄ 中の方が試験片中の水素濃度が圧倒的に高かったことから、水素濃度がきわめて高くなる環境中では材料は応力に対してより敏感になっていると思われ、水素濃度が切欠き底最大応力とき裂発生時間に深く関わっていることが予想される。

0.1N H₂SO₄ のような C_0 の高い環境中においては、 ρ_0 の値が大きくなり、実際に設けられた切欠き半径よりも大きな寸法としてき裂発生時間に影響することが予想される。このように仮想切欠き半径を考えた場合き裂発生時間は切欠き底最大応力で決まるものであることがわかった。

どの環境の場合にも σ_{max} ($\sigma_{max} = 2K_I/(\pi\rho)^{1/2}$) は降伏応力 σ_y 以上および以下の両方の場合のデータを含んでおり、弾性および弾塑性の混在した応力場においてき裂が発生していることがわかる。

4・2 き裂発生角

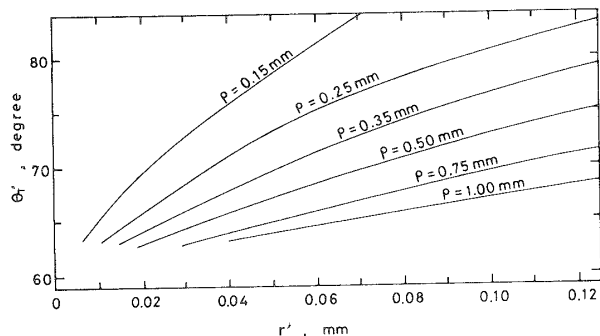


Fig. 10. Relation between the inclined angle of crack and the length from notch root to the point of maximum shear stress.

0.1N H₂SO₄ 中での応力腐食き裂発生の最大応力は、Fig. 8 に示すように降伏応力以下の場合がほとんどであった。この場合、複数のき裂が生じる理由について弾性応力分布をもとに論じることができるであろう。

モード I の変形を受ける深い切欠き材での切欠き先端近傍の弾性応力分布は Creager と Paris らにより次で与えられた。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r'}} \frac{\rho}{2r'} \begin{pmatrix} -\cos \frac{3\theta'_T}{2} \\ \cos \frac{3\theta'_T}{2} \\ -\sin \frac{3\theta'_T}{2} \end{pmatrix} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r'}} \cos \frac{\theta'_T}{2} \begin{pmatrix} 1 - \sin \frac{\theta'_T}{2} \sin \frac{3\theta'_T}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta'_T}{2} \sin \frac{3\theta'_T}{2} \\ \sin \frac{\theta'_T}{2} \cos \frac{3\theta'_T}{2} \end{pmatrix} + \dots \quad (3)$$

$$\therefore r' = \rho / (1 + \cos \theta'_T)$$

ただし r' および θ'_T は Fig. 7 中の挿入図に示す切欠き先端より $\rho/2$ 内側を原点とする極座標である。まず切欠き中心を通り負荷方向および板厚方向に直角な軸を x 軸、それと直交し負荷と同じ方向の軸を y 軸とする。

Fig. 10 に各 ρ に対して r' の距離で τ_{xy} が最大値となる場所の θ'_T の計算結果を示す。この計算結果は、Fig. 7 に示した θ' が 60° 近傍に存在するという実験結果とたいへん良く一致している。つまり、傾斜き裂は τ_{xy} が最大となる面に発生するものとみなされる。Fig. 7 によると、き裂本数が 2 本となる場合のうちの最小の K_I では θ' はそれ以下の K_I の場合より小さな値を示すが、複数のき裂発生における応力の低下や多数のき裂発生による実質的な切欠き半径の増大のどちらかがかかわって引き起こしていると考えられる。

D, E のようなき裂形態を生ずる場合には、 0° と $\pm 60^\circ$ の方向において、これらの発生箇所のうちどちらかに選択的にき裂が発生し成長する。この場合、残された方向はき裂とはならず、き裂発生部分のみが応力集中によってき裂が成長するために、き裂は 1 本になると考えられる。一方、それよりも K_I の高い場合には、まず発生の可能性を持つ 3 つの方向においてほぼ同時に発生するか、あるいはいずれかの方向に発生したき裂は K_I が高いためにそれ以外の方向でもき裂の発生にいたるのであろう。そして、2 方向あるいは 3 方向のき裂として先述の Fig. 2, 4 に示した経過を経て成長していくものと思われる。微視分岐と同様に、複数の方向に発生するき裂をき裂先端位置を含ん

だ切欠きと考えれば、実質的な切欠き半径の増大による応力の低下によりき裂進展は減速される結果、目視によるき裂確認時間は遅くなったものと思われる。

5 結 言

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

(1) き裂発生寿命 t_n は各環境中において見掛けの応力拡大係数を仮想切欠き半径 $(\rho + \rho_0)$ の平方根で除した値との間で一価関係にあり、次式によって示される。

$$t_n = \alpha [2K_I / \{\pi(\rho + \rho_0)\}^{1/2}]^m$$

ここで ρ_0 はき裂材に対応する材料固有の切欠き半径であり、環境液によって異なる。また、係数 α およびべき乗数 m は環境および切欠き半径によって変化するパラメータとなる。

(2) 切欠き底からの応力腐食割れき裂の発角は切欠き中心線方向とそれからそれぞれ約 60° の傾きを持った2方向との、3方向の可能性がある。また、傾きを持つ2つの方向は、鈍化切欠き底での弾性応力解析によれば、せん断応力の最大値を持つ方向とほぼ一致した。

(昭和63年7月21日 第25回 X線材料強度に関するシンポジウムにて一部講演)

参 考 文 献

- 1) 米沢俊一, 山川宏二, 吉沢四郎, 材料, **32**, 1125 (1983).
- 2) 向井喜彦, 村田雅人, 材料, **36**, 1350 (1987).
- 3) 中佐啓治郎, 武井英雄, 桜武達規, 材料, **28**, 299 (1979).
- 4) 広瀬幸雄, 田中啓介, 岡林邦夫, 材料, **27**, 545 (1978).
- 5) 広瀬幸雄, 田中啓介, 矢島善次郎, 岡林邦夫, 材料, **28**, 189 (1979).
- 6) 広瀬幸雄, 田中啓介, 岡林邦夫, 材料, **28**, 196 (1979).
- 7) 広瀬幸雄, 田中啓介, 矢島善次郎, 津田政明, 材料, **31**, 510 (1982).
- 8) 津田政男, 広瀬幸雄, 矢島善次郎, 田中啓介, 材料, **37**, 599 (1988).
- 9) 田中啓介, 秋庭義明, 藤田成雄, 材料, **36**, 177 (1987).
- 10) R. P. Wei and R. L. Brazill, ASTM STP 738, 103 (1981).
- 11) Y. Nakai and R. P. Wei, Engineering Fracture Mechanics, **32**, 581 (1989).
- 12) 吉沢四郎, 鶴田孝雄, 松本桂一, 山川宏二, 防食技術, **24**, 511 (1975).
- 13) 米沢俊一, 山川宏二, 吉沢四郎, 防食技術, **31**, 343 (1981).
- 14) 藤嶋 昭, 相澤益男, 井上 徹, “電気化学測定法” (1985) 技報堂出版
- 15) M. Creager and P. C. Paris, Int. J. Frac., **3**, 247 (1963).