遅れ破壊き裂の発生, 伝ばおよび枝分れに 及ぼす 2 軸荷重の影響*

中 佐 啓 治 郎** 武 井 英 雄*** 斎 藤 利 之****

Effect of Biaxial Load on Crack Initiation, Propagation and Branching in Delayed Failure

by

Keijiro NAKASA, Hideo TAKEI

(Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima)

and Toshiyuki SAITOH

(Graduate School, Hiroshima University, Higashihiroshima)

The crack initiation, propagation and branching characteristics of delayed failure under uniaxial and biaxial load were investigated on the Ni-Cr-Mo steel quenched and tempered at 473 or 673 K.

In the three point (uniaxial) bending tests of smooth rectangular specimens, a straight crack initiated and propagated perpendicular to the longitudinal axis of the specimen without revealing crack branching. In the uniaxial tensile tests of precracked rectangular specimens, the crack propagated to unstable fracture without branching. In the biaxial bending tests of smooth disk specimens, the edge of which was supported and the center of which was compressed by a round punch, a Y-shaped crack initiated from the center of specimen, and the branching occurred at the tip of the Y-shaped crack when the stress of specimen was large. These aspects were almost the same both for the steels tempered at 473 and 673 K.

For the steel tempered at 473 K, the crack initiation time in delayed failure was shorter in the biaxial bending than in the uniaxial bending for the same bending stress.

(Received Aug. 10, 1981)

キー・ワード：遅れ破壊, き裂, 発生, 枝分れ, 2 軸荷重

1 緒 言

高強度鋼材は, 水や水蒸気などの比較的弱い腐食作用をもつ環境中でも遅れ破壊を生じやすいことはよく知られている。この傾向は構造物や部材中に巨視的なき裂や鋭い切欠きが存在するときにとくに顕著であるが, 一見欠陥が全く存在しないような平滑な部材の表面にも, 加工・製造時についた表面きずや微視的な表面不均一部(結晶粒界, 析出物, 介在物など)が存在しており, 負荷応力が大きい場合には, その部分が起点となって遅れ破壊が生じる可能性がある。このような遅れ破壊の特性は通常 1 軸荷重下で検討されているが, 部材または試験片に多軸荷重が加わる場合の遅れ破壊き裂の発生および伝ば特性についてはあまり調べられていないようである。

そこで本研究では, まず平滑平板について 2 軸引張荷重が遅れ破壊き裂の発生挙動にどのような効果をもつかを調べ, 次に発生したき裂の 2 軸荷重下での伝ば形態を調べた。また, ある種の材料では, 遅れ破壊き裂の伝ば過程で巨視的な枝分れが起ることがあるので, この枝分れ挙動が 2 軸荷重によってどのような影響を受けるかも合わせて検討した。

2 実験方法

2・1 試験片および試験装置

実験に用いた材料は直径が 160 mm の市販の Ni-Cr-Mo 鋼 SNCM 439 (0.40% C, 0.28% Si, 0.77% Mn, 0.022% P, 0.019% S, 0.06% Cu, 1.63% Ni, 0.80% Cr, 0.16% Mo) 丸棒である。この棒を輪切りにして直径 160 mm, 厚さ 4 mm の円板試験片を作製し, これを Fig. 1 (b) に示すようにカップ状の支持台の上にのせ, 試験片中央部に球頭ポンチを押しつけて 2 軸曲げ応力を発生させた。また上記円板試験片から Fig. 1 (a) に示す矩形板を切り出し, これを図のように

* 原稿受理 昭和56年 8 月10日

** 正 会 員 広島大学工学部 東広島市西条町下見

*** 広島大学工学部 東広島市西条町下見

**** 広島大学大学院 東広島市西条町下見

Fig. 1. Specimens and loading methods: (a) Three point (Uniaxial) bending of smooth rectangular specimen, (b) biaxial bending of disk specimen, (c) uniaxial tension of precracked rectangular specimen.

3点曲げ試験して1軸曲げ応力を発生させた。さらにFig. 1 (c)に示す予き裂試験片を作製し、1軸引張荷重下でき裂伝ば挙動を調べた。これら3種類の試験片はいずれも1123 Kから油焼入れしたのち、473 K, 573 K, および673 Kで3600 sec (1 hr) 焼もどししてある。熱処理後試験片表面を研削仕上げしたが、遅れ破壊き裂の発生方向は研削方向とは無関係であり、このことから遅れ破壊き裂の発生を大きく支配するような欠陥は、研削過程では形成されていないものと思われる。

矩形板試験片の3点(1軸)曲げおよび円板試験片の2軸曲げ遅れ破壊試験に用いた装置をFig. 2に示す。試験片の表面をベンジンで脱脂したのち、303±2 Kに保ったイオン交換水の入っている容器中に試験

Fig. 2. Apparatus for bending delayed failure tests.

片を入れて約600 sec (10 min) 保持し、装置の上部ハンドルを手動により回転して試験片に曲げ荷重を加えた。試験荷重はロードセルと動ひずみ計で検出し、ペンレコーダーで連続的に記録した。試験片表面にき裂が発生すると荷重が低下するが、その都度ハンドルを回転させて荷重を一定に保った。なお、荷重と試験片に加わる応力の関係を求めるために、試験片中央部表面(ポンチと接触する側と反対側の表面)にひずみゲージ(ゲージ部面積1.9×2 mm)を貼っておき、所定の荷重に対応するその部分の平均の引張応力を計算しておいた。

このようにして、1軸曲げ(矩形板試験片の3点曲げ)と2軸曲げ(円板試験片の球頭ポンチによる曲げ)で遅れ破壊き裂の発生形態および発生時間にどのような差があるかを調べ、さらに、予き裂試験片の1軸引張り(または矩形板試験片の3点曲げ)と円板試験片の2軸曲げで遅れ破壊き裂の枝分れ挙動にどのような差があるかを調べた。

3 実験結果と考察

3・1 空気中における平滑平板からのき裂の発生と伝ば形態

焼入れ後473 Kまたは673 Kで焼もどした SNCM 439 の矩形板および円板試験片に空気中で単調増加荷重を加え、それぞれ1軸3点曲げおよび2軸曲げを与えたときのき裂の発生と伝ば形態をFig. 3に示す。

Fig. 3. Crack initiation patterns in bending tests in air.

まず、1軸3点曲げの場合には、473 K焼もどし材ではき裂が数箇所から斜めに発生しこれらが連結しているのに対し、673 K焼もどし材では多数のき裂が試験表の長手軸に対して垂直に(平行ポンチの長手軸方向に)発生し、これが連結している。しかし、いずれの場合でも巨視的には1本のき裂になっている。一方、2軸曲げの場合には、473 K焼もどし材、673 K焼もどし材いずれの場合でも試験片中央にY字形のき裂(互いにほぼ120°の角度をなす3本のき裂)が発生する。場合によっては最初1本の直線状のき裂が発生し、そ

Fig. 4. Crack initiation and branching patterns in bending delayed failure tests.

の後き裂の中央部から別の1本のき裂が発生してT字形となり、最初発生したき裂が後からできたき裂と反対方向に進展することもある。473K 焼もどし材では、これらYまたはT字形き裂がぜい性的に伝ばして破壊するが、673K 焼もどし材の場合には、3本のき裂がかなり大きな塑性変形をともしながら安定に進展するとともに途中で枝分れを生じる。この枝分れが、大気中の水蒸気による遅れ破壊で生じたものかどうかは明らかではない。

3・2 水中における平滑平板からの遅れ破壊き裂の発生と伝ば形態

Fig. 4 に、473K 焼もどし材矩形板および円板試験片について、異なる値の1軸および2軸曲げ応力を加えたときのき裂発生形態を示す。図中の応力 σ はポンチ直下部の凸表面における引張応力を、また t_i は荷重の低下時期から求めたき裂発生時間を表す。まず、矩形板試験片では、空气中 (Fig. 3) の場合と異り、き裂は直線状であり、試験片表面の1箇所で開催した遅れ破壊き裂が試験片全断面にわたってぜい性的に伝ばしている。円板試験片では空气中と同様3方向にき裂が発生しているが、応力が大きい場合には発生した各き裂が枝分れしていることがわかる。ただし、 $\sigma=666$ MPa の場合には、Y字型き裂が枝分れせずそのまま伝ばしているが、これはき裂が夜間に発生して手動によりき裂発生後の荷重を一定に保つことができなかったためであり、き裂の伝ばとともに荷重が低下し応力拡大係数が上昇しなかったためと思われる。なお、Fig. 1 (c) に示した予き裂試験片に初期応力拡大係数

$K_t=25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ として1軸引張荷重を加えて遅れ破壊試験を行ったが、き裂はまっすぐに伝ばして応力拡大係数 $K_t=60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で不安定破壊するまで枝分れは生じなかった。

Fig. 5 は、573K 焼もどし材の円板試験片について、遅れ破壊き裂の発生および伝ば形態をスケッチしたものである。473K 焼もどし材と同様な傾向を示しているが、応力が大きい場合には微細な枝分れき裂が多数存在している。この原因は明らかではないが、この焼もどし温度域は低温焼もどしぜい性域であり、粒界に不純物原子が析出して粒界割れが生じやすくなっていることと関連があるように思われる。

Fig. 5. Crack initiation and branching patterns in bending delayed failure tests.

Fig. 6 に、673K 焼もどし材のき裂発生および伝ば形態を示す。ただし、図中の応力 σ の値には、試験片が弾性変形をしている範囲の荷重と応力の関係を塑性変形領域にまで外挿して求めたものが含まれており、この材料の2軸曲げ降伏応力 1760 MPa を越えてい

Fig. 6. Crack initiation and branching patterns in bending delayed failure tests.

る応力はみかけの値である。まず矩形板試験片の場合には試験片表面の数箇所遅れ破壊き裂が発生し、それらがせん断変形をとまって連結している。つぎに円板試験片の場合にはY字形のき裂が発生する場合が多く、それらは再び枝分れを生じている。き裂の進展には大きな塑性変形が付随しており、き裂はジグザグに進む。一方、Fig. 1 (c)に示す予き裂試験片に1軸引張荷重を加えても $K \approx 108 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で不安定破壊が生じるまでは巨視的な枝分れは生じなかった。

このように、473 および 673 K 焼もどし材いずれの場合でも、1軸引張りまたは1軸（3点）曲げでは遅れ破壊き裂の枝分れは生じないが、2軸曲げの場合には応力が大きいときに枝分れが生じる。

3・3 遅れ破壊き裂発生時間に及ぼす2軸荷重の影響

473 K 焼もどし材について、矩形板試験片の3点曲げ試験および円板試験片の球頭ポンチによる2軸曲げ試験を行い、遅れ破壊き裂発生時間に及ぼす2軸荷重の効果を調べた。その結果をFig. 7に示す。この図

Fig. 7. Relation between stress at the center of specimen and time to crack initiation under uniaxial or biaxial load.

より応力が小さいほどき裂発生時間が長いことがわかるが、同じ応力でも2軸曲げの方が1軸曲げの場合よりもき裂発生時間が短いことがわかる。すなわち、2軸応力は遅れ破壊き裂の発生を促進することがわかる。このような2軸荷重の影響は、ステンレス鋼の応力腐食割れき裂の発生や疲労き裂の伝ばなどについて報告されている。平滑材における遅れ破壊き裂の発生は、微視的な応力集中の原因となる組織不均一部（表面近傍の析出物、介在物、結晶粒界など）へ水素原子が拡散・集合してその部分を弱く・分離させることによって生じられるが、1軸引張応力下と比べ2軸引張応力下では、応力集中部での静水圧引張応力成分が大きいため、水素原子の拡散・集合が早まり、遅れ破壊き裂の発生が促進されたものと考えられる。

3・4 遅れ破壊き裂の枝分れに及ぼす2軸荷重の効果

前報で述べたように、遅れ破壊き裂の伝ば過程で枝分れが生じるか否かは、1本のき裂が2本に枝分れすることがエネルギー的に安定であり、枝分れ角度 $2\theta_B$ と枝分れき裂長さ a_n が安定に存在するという必要条件と、枝分れき裂が発生しようとする場所に多量の水素原子が存在するという十分条件の両方が満足されるかどうかによって決定されるものと思われる。詳細は省略するが、応力拡大係数 K が大きくなるほどき裂先端の塑性変形領域が発達し、き裂表面から3軸引張応力の作用する部分（き裂先端からある距離だけ材料内部に入った位置に存在する）に拡散する水素原子のうち、塑性変形領域内の転位や微小ボイドによってトラップされない水素原子が、大きなまわり込みを生じてエネルギー的に安定な枝分れき裂発生位置を通過するようになると、枝分れが生じると推測した。このような考えのもとに、1軸引張荷重が加わる予き裂試験片

において, K が小さい場合には枝分れは生じないが, K がある値 (すなわち K_{IB}) になると枝分れが生じる理由, および雰囲気温度が高いほど, 旧オーステナイト結晶粒径が大きいほど, 降伏強度が大きいほど, また試験片板厚が薄いほど, K_{IB} が大きいのか, 場合によっては全く枝分れしないで破壊する理由を説明した。

つぎに, 本研究の結果によると, 473K 焼もどし材では, 円板試験片に空气中で荷重を加えても発生した Y 字形き裂がそのまま枝分れしないでぜい性的に伝ばするのに対し, 同じ円板試験片を水中で遅れ破壊試験すると, 荷重が大きい場合には Y 字形き裂から枝分れが生じる。一方, 予き裂試験片の 1 軸引張りおよび矩形平板の 3 点曲げ遅れ破壊試験では, き裂は枝分れしないで破壊する。そこで, 2 軸荷重下でのみ遅れ破壊き裂の枝分れが起こる理由を以下に考えてみる。すでに報告されている計算結果によると, 1 軸引張荷重のみが加わる場合に比べて, 2 軸引張荷重が加わる時のき裂先端の塑性変形領域の大きさはかなり小さい。したがって, 上述の著者らの考えによると, 2 軸荷重下では外部荷重がさらに大きくなってき裂先端の塑性変形が大きくなり, 水素原子の拡散経路のまわり込みがはげしくなったときにはじめて枝分れが起るものと思われ, 1 軸荷重下に比べ 2 軸荷重下では K_{IB} が大きくなる可能性がある。しかしながら 473K および 673K 焼もどし材いずれの場合とも, 予き裂試験片の 1 軸引張試験では枝分れが生じる前にそれぞれ $K_c = 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, および $108 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で破壊したので, 1 軸荷重下と 2 軸荷重下での K_{IB} の値を比較してこの考えを確かめることはできなかった。また, 2 軸荷重が加わる場合の安定な枝分れ角度および安定な枝分れき裂の長さについても, 2 軸荷重によって枝分れ角度が大きくなるという計算からの予測はあるが¹²⁾, 詳細は不明である。したがって, 上述の十分条件 (き裂先端の塑性変形と水素原子の拡散挙動) のみならず, 必要 (エネルギー) 条件 (安定な枝分れ角度とき裂長さ) に対する 2 軸荷重の効果についても明らかにし, 両者を結合してはじめて厳密な議論ができると思われるが, これらのことについては今後の検討課題としたい。

4 結 言

焼入れ後 473, 573 または 673K で焼もどした Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM439) につき, 遅れ破壊き裂の発生と枝分れ挙動が 1 軸荷重下と 2 軸荷重下でどのように

異なるかを調べ, 次の結果を得た。

(1) 矩形板試験片を 1 軸 (3 点) 曲げ試験すると, 1 本の直線状き裂が発生し, これが枝分れしないまま伝ばする。予き裂試験片を 1 軸引張試験すると, 不安定破壊するまでき裂は枝分れしない。一方, 円板試験片を 2 軸曲げ試験すると, Y 字形のき裂が発生し, 応力が大きい場合にはこれらのき裂が枝分れする。これらの様子は, 473 および 673K 焼もどし材で基本的には同じである。

(2) 473K 焼もどし材の遅れ破壊き裂発生寿命は, 1 軸曲げの場合より 2 軸曲げの場合の方が短い。

終りに, 実験に熱心に協力された大西一将君 (当時学生, 現在広島ガス (株)), ならびに試験片および試験装置の作製でお世話になった吉永芳豊, 広田秀徳, 向井一夫, 各技官に感謝します。

(昭和 56 年 4 月 4 日 日本金属学会春期大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Carter, C.S., Engng. Fracture Mech., **3**, 1 (1971).
- 2) Speidel, M. O., "The Theory of Stress Corrosion Cracking in Alloys", Ed. by J. C. Scully, NATO Scientific Affairs Division, 345 (1971).
- 3) 渡辺正紀, 向井喜彦, 日本機械学会誌, **77**, 977 (1974).
- 4) Christensen, R.H., and M.B. Harmon, ASTM STP 415, 5 (1967).
- 5) Liu, A.F., J.E. Allison, D.F. Dittmer, and J.R. Yamane, ASTM STP 677, 5 (1979).
- 6) Nakasa, K., and H. Takei, Engng. Fracture Mech., **11**, 739 (1979).
- 7) Nakasa, K., H. Takei, and M. Yoshida, Engng. Fracture Mech., **13**, 667 (1980).
- 8) 中佐啓治郎, 武井英雄, 吉田基治, 斎藤利之, 日本金属学会誌, **44**, 1156 (1980).
- 9) Nakasa, K., H. Takei, and T. Saitoh, Engng. Fracture Mech., **16**, 387 (1982).
- 10) Smith, S.H., "Prospects of Fracture Mechanics," Ed. by G.C. Sih, H. C. Van Elst, and D. Broek, 367 (1974) Noordhoff, Leyden, The Netherlands
- 11) Kfoury, A.P., and K.J. Miller, Fracture 1977, ICF 4, Waterloo, **3A**, 241 (1977) Pergamon Press, New York
- 12) 北川英夫, 結城良治, 日本機械学会論文集, **44**, 3346 (1978).