

討31 変動応力下における遅れ破壊

広島大学工学部 中佐啓治郎, 武井英雄

1. 緒言

切欠きやき裂を有する高強度鋼板が水や水蒸気などの比較的微弱な腐食雰囲気中で、静荷重を受けて破壊する現象は、遅れ破壊と呼ばれているが、その原因は、材料と腐食雰囲気の化学反応によって生成した水素が材料中に侵入し、切欠きまたはき裂先端近傍の3軸引張り応力の作用する位置に集合し、その部分の材料を弱化、分離することによって生じる。ところで、実際に腐食雰囲気中で使用されている機械、構造物では静荷重に微小な変動荷重が重畳している場合も多く、この場合の遅れ破壊挙動を知ることは実用上意味があるし、また、静荷重下と異なった応力条件下での遅れ破壊(水素脆化割れ)挙動を明らかにすることは、水素脆化割れの機構を明らかにする上での1つの材料を提供することになるものと思われる。本研究は、このような観点から、高強度鋼の遅れ破壊き裂の伝ば特性に、変動応力の重畳がどのような影響を与えるかを調べたものである。

2. 実験方法

実験に用いた材料は市販のNi-Cr-Mo鋼(SNCM439)で、これを1123Kから油焼入れ後473Kで焼もどしして高強度鋼とした。これから片側予き裂試験片を作製し、静的および繰返し曲げモーメントを加えた。重畳した応力波形は、正弦波、矩形波、正および負の二歯状波である。腐食雰囲気には、イオン交換水を用い、水温Tを278~353Kと変化させた。また、応力波形を台形波とし、応力拡大係数Kを最大値 K_{max} または最小値 K_{min} に保持したときに現われる潜伏時間 t_u または t_d が、K上昇またはK下降時間 t_r または t_f によってどのように変化するかを調べた。

3. 実験結果および考察

静荷重に微小な変動荷重を重畳させると、切欠き試験片の遅れ破壊き裂発生時間⁽¹⁾および予き裂試験片のき裂進展開始時間⁽²⁾は短くなり、下限界応力 σ_{sc} および下限界応力拡大係数 K_{isc} は大きく低下する。これは、切欠きまたはき裂先端の保護皮膜が繰返しによって破壊され、腐食反応が活発となるため、水素原子の材料中への侵入が促進されるためであると考えられる。ところが、変動する応力拡大係数の最小値 K_{min} が K_{isc} より大きいときの遅れ破壊き裂の伝ばに対しては、変動応力の重畳は逆の作用を及ぼし、き裂の伝ば速度を減少させる。図1は、重畳応力波形を正弦波および矩形波とし、変動応力の重畳による遅れ破壊き裂伝ば速度の低下割合

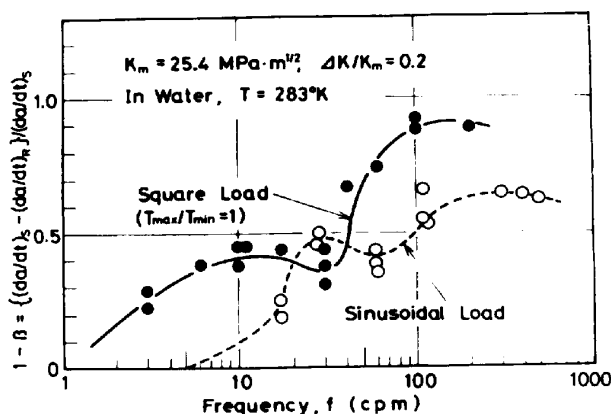


図1 変動応力の重畳による遅れ破壊き裂伝ば速度の減少割合 $1-\beta$ と繰返し速度の関係

$$1-\beta = \frac{(da/dt)_s - (da/dt)_R}{(da/dt)_s}$$

が繰返し速度 f によってどのように変化するかを調べたものである⁽³⁾。ここで $(da/dt)_s = f \times \int_{K_{min}}^{K_{max}} da/dt(K(t)) \cdot dt$ であり、変動応力下での遅れ破壊き裂の伝ばが、時間とともに変化するKの各段階で静荷重下におけるき裂の伝ばと全く同じように起こると仮定し⁽⁴⁾、あらかじめ求めておいた静荷重下での遅れ破壊き

裂伝ば速度 $da/dt(K)$ を波形に応じて1サイクルあたり積分し、これに f をかけて単位時間あたりのき裂伝ば長さになおしたものである(もし変動する K の変動幅 ΔK が小さければ、 $(da/dt)_s$ として $K_m = (K_{max} + K_{min})/2$ におけるき裂伝ば速度をとってもよい)。また、 $(da/dt)_R$ は変動応力下における遅れ破壊き裂伝ば速度である。図1によると、 $1-\beta$ の繰返し速度依存性は、正弦波と矩形波で異なるが、いずれの場合にも $(1-\beta)$ 対 f 曲線に2つのピークが現われることがわかる。応力波形が正弦波の場合について、試験温度を変えて $(1-\beta)$ 対 f 曲線を求めた結果によると⁽⁵⁾、ピークの生じる位置は試験温度の上昇とともに高繰返し速度側へ移動するとともに、ピークの高さが減少する。

図2は、矩形波について K_{max} 保持時間 T_{max} と K_{min} 保持時間 T_{min} の比を種々に変化させたときの $(1-\beta)$ と f の関係を示すもので、⁽³⁾ T_{max}/T_{min} の減少とともに、2つのピークが接近しやがて1つになることを示している。また、応力波形を正または負のこ歯状に変化させると、 $(1-\beta)$ 対 f 曲線の形状は、正弦波または矩形波の場合と異なったものになる。⁽²⁾

以上の実験事実は、水素原子の材料への侵入、拡散または集合過程が、変動応力下では静荷重下と異なった様相になっていることを示しているが、以下、変動応力の重畳により、遅れ破壊き裂の伝ば速度が減少し、しかもこのような特異な繰返し速度、温度および波形依存性を示す理由を考える。まず、静荷重下および変動荷重下におけるき裂伝ば速度と試験温度 T の関係は Arrhenius の式にしたがい、その活性化エネルギーは約 $10,000 \text{ cal/mol}$ であり、⁽⁵⁾ この値は水素原子の鉄中における透過のための活性化エネルギーにはほぼ等しいから、静荷重下および変動荷重下における遅れ破壊き裂の伝ばが、水素原子の材料への侵入過程ではなく、拡散または集合過程に支配されていると考えてよい。そこでつぎに、荷重を変動させたときに、き裂先端で水素原子の拡散または集合がどのようなようになるかを考えてみる。

図3は、 K を台形波状に変化させ、 K 上昇時間 t_u および K 下降時間 $t_d (=t_l)$ をいろいろに変化させたときの応力 σ - 時間 t 曲線を模式的に示したものであるが、この実験では変位(または K) 制御試験を行なっているので、応力 σ が低下して σ - t 曲線に通線性が存在しない領域では、き裂が進展していることを示している。まず図3(a)は、空気中で試験した場合の結果で、き裂の進展はないから応力の低下はなく、 σ - t の関係は直線的である。図3(b)は、 $t_u (=t_d)$ が短い、水温 T が低い場合で、 K 上昇および下降区間でき裂の進展はなく、しかも K を最大値または最小値に保持しても、すぐにはき裂の伝ばは起こらず、それぞれ潜伏時間 t_u または t_d が存在する。そして $t_d \gg t_u$ である。図3(c)は、 $t_u (=t_d)$ が(b)の場合より長い、 T が高い場合で、 K 上昇または K 下降区間の初期にき裂の伝ばが生じて σ - t

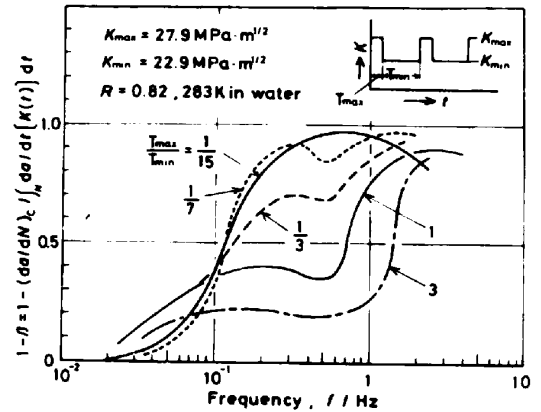


図2 矩形波の場合の $(1-\beta)$ と f の関係におよぼす K_{max} 保持時間 T_{max} と K_{min} 保持時間 T_{min} の比の影響

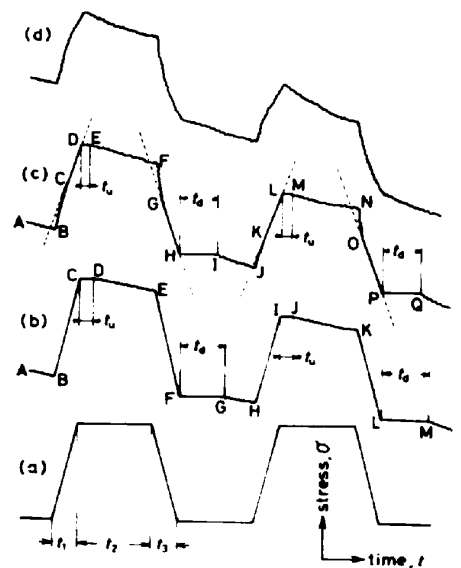


図3 K を台形波状に変化させたときの、応力 σ 対時間 t 曲線

の関係は直線的ではないが、 K が K_{max} または K_{min} に近づくとき、それぞれC点およびA点でき裂の伝播が停止し、 K が K_{max} または K_{min} に達したのち潜伏時間が現われ、その後き裂が伝播し始める。ただし、この場合の t_u および t_d は、(b)の場合のそれらより短い。図3(d)は、 $t_1 (= t_3)$ が非常に長い、 T が非常に高い場合で、すべての区間でき裂の伝播が生じているので、直線部は全く見られない。図4は、 t_u および t_d が t_1 、 t_3 によってどのように変化するかを調べた結果の一例である。他の試験温度においても同様であり、 t_u および t_d は t_1 および t_3 の増加とともに減少するが、とくに t_d の減少が著しい。また T の増加とともに、 t_u および t_d は減少し、 $1/t_u$ または $1/t_d$ と $1/T$ の間にはArrheniusの関係が成立する。このように、荷重を変動させると、き裂の伝播がそれに対応してすぐには起こらない場合があることは明らかであり、台形波や矩形波以外の波形においても、このような現象が存在するものと思われる。

つぎに、応力を変動させたときに、き裂の伝播がすぐには起こらず、潜伏時間が現われる理由および(1-β)対f曲線に2つのピークが現われる理由であるが、これについて著者らは変動応力の重畳により、き裂先端の3軸引張り応力の作用する位置(この場所へ水素原子が集合して微視き裂を発生させると考えられている。以下この位置を3軸応力位置と略称する)が周期的に移動し、これと水素原子の相互作用が生じて、変動応力下で(1-β) > 0

となることを考えた。⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾図5は、波形が正弦波のときの両者の相互作用を表わす模式図である。⁽³⁾すなわち、繰返し速度が非常に遅いと($f = f_a$)、3軸応力位置の移動も遅いから、ほとんどの水素原子はそれに追隨でき、一定の量の水素原子がその位置に集合したときに微視き裂が生じてこれが主き裂と連結する。この状態は静荷重下とはほとんど同じであるから $1-\beta \approx 0$

である。逆に f が非常に速いと($f = f_e$)、3軸応力位置の速い移動に水素原子は全く追隨できないから、一定量の水素原子が集合し、これが3軸応力位置と出会った時に微視き裂が発生する。したがって、この場合にも $1-\beta \approx 0$ である。ところが、 f が f_a よりやや大きいと($f = f_b$)、 K の上昇過程における3軸応力位置の移動には水素原子が容易に追隨できるが、 K の減少過程においては水素原子の追隨は遅れる(台形波状の応力変動において t_u は非常に小さく、 $t_u \ll t_d$ であることに対応する)。その際、水素原子は、結晶粒内または粒界の転位やボイドなどの短範囲の応力場によってトラップされ、水素原子が分散してしまい、

全体として水素原子の集合が遅れて $1-\beta > 0$ となる。また $f = f_d$ においては、 K の減少過程における3軸応力位置の移動に水素原子は全く追隨できず、 $f = f_e$ の場合と同様水素原子の分散は生じないが、 K の上昇過程では水素原子の追隨がある程度起こるので、水素原子の分散が生じ、やはり全体として $1-\beta > 0$ となる。 $f = f_c$ においては、 K 上昇時および下降時の両方の分散が少しづつ生じて $1-\beta \approx 0$ である。このように、(1-β)対f曲線に2つのピークが現われる理由は、 K の上昇過程と減

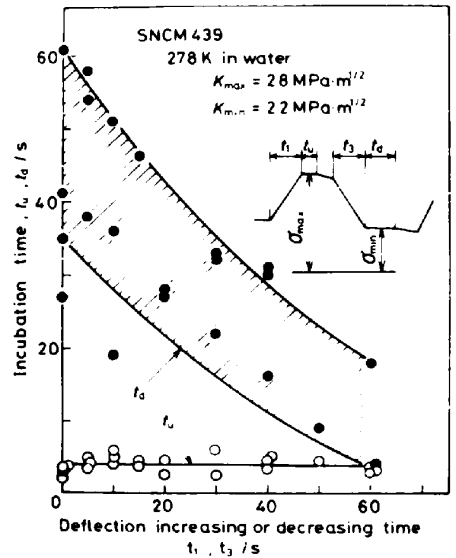


図4 潜伏時間におよぼす変位上昇または下降時間の影響

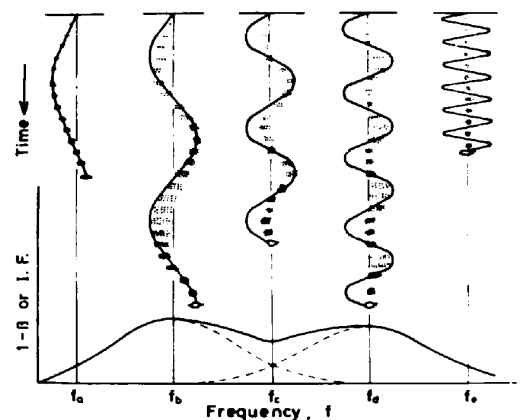


図5 3軸応力位置の移動(実線)と水素原子(小さな点)の相互作用

少週程で水素原子の拡散挙動が異なり($t_d \gg t_u$ となることに対応する), それぞれのピークが現われる f では, 水素原子の分散が生じていると思われる。このような3軸応力位置の移動と水素原子の相互作用を仮定すれば, 上述の他の実験事実も説明できる。すなわち, 試験温度 T が高くなるとピークの生じる繰返し速度が大きくなることは, T が高いほど水素原子の拡散速度が速くなり, f が大きくなってはじめて相互作用が生じるためと解釈できるし, T が高くなるとピークの高さが低くなることは, T が高いほど水素原子が転位などのトラッピングの影響を受けにくく, したがって分散が生じにくくなることで説明できる⁽³⁾。また, 重畳応力波形が矩形波の場合に, T_{max}/T_{min} が小さくなるにつれ2つのピークが近づく理由は, このような操作が $t_u \ll t_d$ という潜伏時間の非対称性を修正する働きをするからである⁽⁴⁾。さらに図1で, K がなめらかに変動する正弦波の場合の方が, 水素原子の追従が容易であるから, 矩形波の場合に比べてピークが生じる f が高くなったものと思われる。

ところで, K_{max} と K_{min} の値があまり違わないのに, $t_1 (= t_3)$ が小さいとき $t_d \gg t_u$ となる理由は, 両者でき裂先端の応力分布が大きく異なるためと思われる。すなわち, $K=K_{max}$ で生じたき裂先端の塑性変形領域が $K=K_{min}$ で可逆的に収縮することができず, 周辺の弾性変形領域によって圧縮され, $K=K_{min}$ においてはき裂先端の実質上の K あるいは3軸性が大きく低下し, 水素原子の移動が速くにくくなるものと思われる。一方, t_1, t_3 が増加すると t_d が急激に減少し t_u に近づくが, これは K 減少過程のき裂の伝播によって $K=K_{max}$ で生じた塑性変形領域が分断され, 実質上の K が低下しなくなるためと思われる。このように, 変動応力の重畳によりき裂先端の応力分布が静荷重におけるそれと全く異なっているとすれば, これは $(1-\beta) > 0$ となる1つの原因であると考えられる。しかし, 図2において, $t_1 (= t_3)$ が同じで T_{max} または T_{min} のみが異なる場合でも $(1-\beta)$ 対 f 曲線の形が大きく変化することから, このような機械的な作用は, $(1-\beta)$ 対 f 曲線のバックグラウンドとして $(1-\beta)$ の値を全体的にかさ上げすることはあっても2つのピークの直接的な原因ではないと思われる⁽⁵⁾。

なお, 上記の相互作用モデルにおいては, 3軸応力位置が移動し, 転位は静止していると考えているが, 繰返し応力下では多数の転位が往復運動しているはずである。したがって, たとえば, K が上昇する過程で水素原子が転位によって3軸応力位置以外の場所に輸送され, K 下降過程で逆方向に運動する転位によって水素原子が押しもどされることにより, 水素原子の3軸応力位置への集合が遅れることも考えられる。しかし, このような機構が存在するかどうかは今後の検討課題である。

4. 結 言

静荷重に微小な変動荷重を重ねると, 遅れ破壊き裂の伝播速度は遅くなり, 変動応力を加えたことによる遅れ破壊き裂伝播速度の減少割合 $(1-\beta)$ と繰返し速度 f の関係を表わす曲線上に2つのピークが現われる。このピークの高さとピークが現われる繰返し速度は, 試験温度, 応力波形などによって変化する。 $(1-\beta)$ 対 f 曲線に2つのピークが現われる原因は, 変動応力によってき裂先端の3軸応力位置が周期的に移動し, これとき裂先端から侵入してきた水素原子が相互作用を生じるためであると思われる。すなわち, 特定の繰返し速度では, 水素原子の拡散または集合過程で, 転位セボイドのトラッピングによる水素原子の分散が生じ, 静荷重下と比べて水素原子の3軸応力位置への集合と微視き裂の発生が遅れる場合があると思われる。

文 献 (1) 中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄: 日本金属学会誌, 40(1976), p. 744.

(2) K. Nakasa, H. Takei and M. Kido: Engng Fracture Mech., 9(1977), p. 867.

(3) K. Nakasa, H. Takei and K. Kajiwara: Engng Fracture Mech., 14(1981), 507.

(4) R. P. Wei and J. D. Landes: Materials Res. & Std., 9(1969), p. 25

(5) K. Nakasa, H. Takei and H. Itoh: Engng Fracture Mech., 11(1979), p. 689.