

## (3-19)

# 切欠き材のクリープ破壊 (有限要素法による応力、ひずみの解析およびき裂伝播のシミュレーション)

京都大学工学部    〇土井 健志    大谷 隆一

## 1. 緒言

切欠き材のクリープ破壊強度を論ずる際には、き裂発生までの変形挙動のみならず、切欠き材のき裂発生および伝播の挙動を検討する必要がある。本研究では、連続体力学の立場から微小変形に関する有限要素法を用いて、切欠き材のクリープ変形中の応力、ひずみの解析を行なうとともに、き裂の発生並びに伝播に関して、切欠き先端あるいはき裂先端のひずみがある限界値に達したときにき裂が発生あるいは伝播するとする破壊ひずみのクライテリアを採用して、有限要素法によるき裂伝播のシミュレーションを行なった。

## 2. 計算方法とその結果

### 2.1 応力およびひずみの解析

解析に用いた環状切欠き丸棒 (60°V型,  $K_t=5.3$ ) の有限要素分割を図1に示す。最小メッシュサイズは  $6.5\mu$  である。クリープ解析の方法は、微小時間中に生ずるクリープひずみを初期ひずみとみなす従来の方法であり、クリープ則としては  $1Cr-1Mo-1/4V$  鋼の  $600^\circ C$  におけるクリープ試験から得られた定常クリープの式:  $\dot{\epsilon}_c = 5.0 \times 10^{-23} \sigma^{12.3}$  を用いた。解析は実験で切欠き強化と切欠き弱化が生じた公称応力  $35 \text{ kg/mm}^2$  と  $20 \text{ kg/mm}^2$  の2応力レベルで行なった。

図2に  $\sigma_n = 35 \text{ kg/mm}^2$  の場合のクリープ変形中の軸方向応力  $\sigma_z$  と Mises の相当応力  $\sigma^*$  の時間的変化を示す。興味ある事は、切欠き底の応力がクリープ変形によって短時間に急激に低下し、 $\sigma_z$  は切欠き底より少し内部にピークを生ずる。一方、 $\sigma^*$  は  $\sigma_z$  よりも急激に低下し、応力分布が非常に平坦になって、ほぼ定常状態に近づく頃にはその最大値が公称応力以下になることである。 $\sigma_n = 20 \text{ kg/mm}^2$  の場合も全く同様であって、応力分布の形およびその時間的な変化の様子には公称応力の大小による相違が認められない。

次に  $\sigma_n = 35 \text{ kg/mm}^2$  の場合の Mises の相当クリープひずみ  $\epsilon_c^*$  の

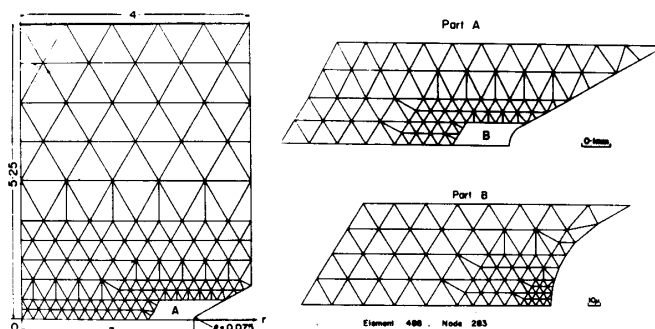


図1. 切欠き材の有限要素分割

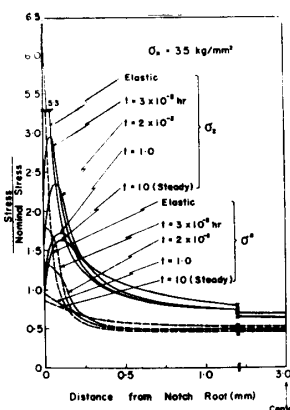


図2. 応力分布

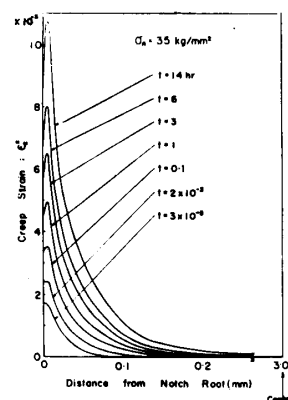


図3. 相当クリープひずみ分布

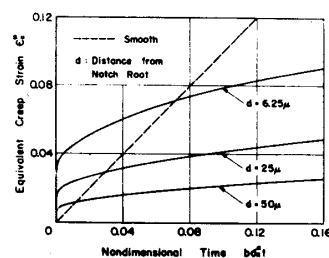


図4. 平滑材と切欠き材のクリープ曲線

分布を図3に示す。20 kg/mm<sup>2</sup>の場合も分布の形は時間的変化には同様である。切欠きが  $K_t=5.3$  と鋭く、またひずみ速度の応力依存性 ( $\dot{\epsilon}_c = b\sigma^a$  の  $a$  の値) が大なるために、ひずみは切欠き底からわずか 100  $\mu$  以内の領域に鋭い集中を示している。図4は切欠き材における切欠き底近傍のクリープひずみを平滑材のそれと比較してクリープ曲線に示したものである。ただし、横軸は無次元化した時間である。すなわち、応力レベルの異なる平滑材のクリープ曲線(破線)を横軸の時間伸縮させて1本の曲線に一致させると、切欠き材のある裏におけるクリープも公称応力の欠欠に関係なく1本のクリープ曲線をもって示される。この図より、切欠き底ではクリープ初期において高い応力集中のために平滑材より大きな変形を生ずるが、クリープ変形によって相当応力が公称応力以下に低下するため、次第にひずみ速度が低下してある時間後には平滑材のひずみより小さくなることがわかる。

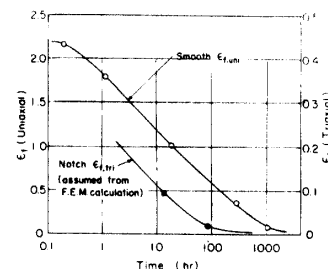


図5. 破壊ひずみ

## 2.2 き裂伝播のシミュレーション

図1の要素分割を用いて、き裂発生については切欠き底、き裂伝播についてはき裂先端の節点における Mises の相当クリープひずみの値が予め指定した破壊ひずみの値より大きくなったときに、その節点の拘束をはずしてき裂を生ぜしめる、という方法によってき裂の伝播をシミュレートした。これによって、破壊に直接寄与する領域としては有限要素の大きさを考え、かつき裂伝播は1メッシュ長さのき裂発生の連続とみなしていることになる。き裂が生じた瞬間には、き裂面を応力が解放され、き裂先端で応力が上昇する。これはき裂が伝播する直前に生じていたクリープひずみを残留ひずみとみなすことによって計算できる。

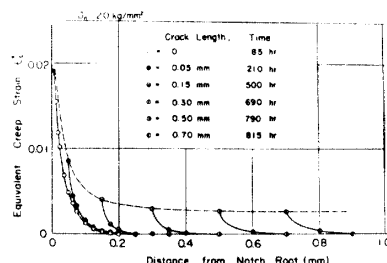


図6. き裂先端のひずみ分布

図5に計算に用いた破壊ひずみ  $E_{f,tri}$  (時間とともに変化する)を示す。この破壊ひずみ決定法は以下のとおりである。Cr-Mo-V鋼の平滑材の破断破りから破壊ひずみ  $E_{f,uni}$  が求まる。これは長時間になるにつれて値が小さくなる。切欠き材のき裂発生

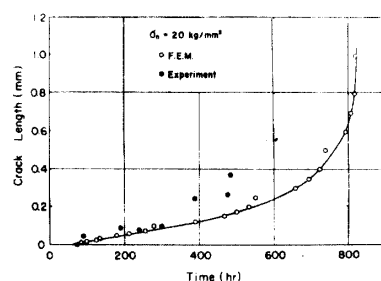


図7. き裂伝播曲線

に対する破壊ひずみ  $E_{f,tri}$  もこのような傾向にあると考え、実験で  $\sigma_n = 35$  および  $20 \text{ kg/mm}^2$  の切欠き材にき裂が発生する時間を求め、その時間におけるクリープひずみの計算値を各応力レベルのき裂発生に対する限界ひずみとし、両値を  $E_{f,tri} \cdot t^{0.89} = 1$  なる式で結んでき裂伝播についての破壊ひずみの時間的変化を表示した。図6は、き裂が伝播していく過程で、新たにき裂が伝播する直前のき裂先端におけるひずみ分布 ( $E_{f,tri}$ ) を示している。

図7に  $\sigma_n = 20 \text{ kg/mm}^2$  の場合について計算したき裂伝播曲線とクリープ試験により求めたき裂長さ  $L$  を示している。き裂伝播速度  $dL/dt$  と Net section stress  $\sigma_{net} = (\frac{d}{d-2e})^2 \sigma_n$  との間には、FEMでは  $\frac{dL}{dt} = 8.4 \times 10^{-16} \sigma_{net}^{8.8}$ 、実験では  $\frac{dL}{dt} = 1.4 \times 10^{-15} \sigma_{net}^{8.8}$  なる関係がある。いまき裂先端の相当応力  $\sigma_c^*$  が  $\sigma_c^*/\sigma_{net} = K^*$  と表わされ、 $K^*$  が一定であるなら、 $dL/dt$  と  $\sigma_c^*$  の間にも同様の関係式が成立する。