異材接合部に切欠きを有する部材の弾塑性ひずみの評価法について

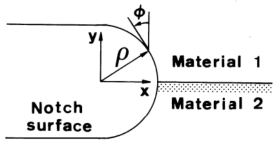
トピー工業(株)　　正会員　　林　健治

１．はじめに

構造物の設計・施工の合理化を計る方法の一つとして，異種材料を接合し，部材を製作する方法が検討されている．この場合，接合境界における力学的特性を明ことが肝要である．特に，異材接合部の破壊や損傷を防止するためには，接合境界に損傷を有する部材の力学的特性を簡便に，しかも，定量的に評価できる手法を確立することが重要である．しかし，現状では，弾塑性有限要素解析等の煩雑な数値解析を実施する必要があり，実用上の観点から，より簡便な手法の提案が望まれる．本報告では，接合境界に損傷を有する部材のモデルとして，この部位に切欠きを有する部材を取り上げ，その弾塑性挙動を簡便に評価する手法を提案する．

２．弾塑性応力－ひずみの簡便評価法

（１）J_k積分と解析仮定



図－１　解析対象

接合境界に損傷を有する部材の解析モデルの例として，図－１に示すような接合境界に切欠きを有する部材（構造的応力集中と強度的不均質を有する部材）を取り扱う．ここで，切欠き底の任意な点における接触角ϕ，切欠き底の最大ひずみ$\varepsilon_{yi,max}$を用いて，切欠き底のｙ軸方向の材料１，２のひずみε_{yi}が次式で与えられるものと仮定する．

$$\varepsilon_{yi}=\varepsilon_{yi,\,max}\cos^{m}\phi \qquad \text{（但し，後述の結果を受け，m＝３とする）} \tag{1}$$

また，材料の応力－ひずみの関係式として，次式で与えられるｎ乗硬化則を用いることにする．

$$\sigma_{yi}=E_i\,\varepsilon_{yi} \quad (\sigma_{yi}\leqq\sigma_{Yi}) \quad , \quad \sigma_{yi}/\sigma_{Yi}=(\varepsilon_{yi}/\varepsilon_{Yi})^{n_i+1} \quad (\sigma_{yi}\geqq\sigma_{Yi}) \tag{2}$$

ここに，σ_{Yi}，ε_{Yi}はそれぞれ材料ｉの降伏点と降伏ひずみを表し，E_iとn_iは材料ｉのヤング率，加工硬化指数である．なお，平面応力条件では，切欠き底の応力状態が単軸引張と等価となり，問題を整理し易くなるので，ここでは，この条件のみを考え，応力集中係数K_σとひずみ集中係数K_εをそれぞれ次式で定義する．ここで，$\sigma_{yi,max}$は切欠き底の最大応力，σ_Nは純断面応力を表す．

$$K_\sigma=\sigma_{yi,\,max}/\sigma_N \quad , \quad K_\varepsilon=E_i\,\varepsilon_{yi,\,max}/\sigma_N \tag{3}$$

つぎに，J_k積分は次式で与えられる．

$$J_k=\int_{\Gamma+\Gamma c}\left(Wn_k-T_i\frac{\partial u_i}{\partial X_k}\right)d\Gamma \tag{4}$$

ここに，Γはき裂を囲む径路，Γ_cはき裂の上下面の径路（$\Gamma+\Gamma_c$：閉じた径路），Ｗはひずみエネルギー密度，n_kは曲線Γの外向き単位法線ベクトルの成分，T_iは表面力，u_iはX_i方向の変位を表す．

（２）小規模降伏域における評価式

線形弾性体では，切欠き底の自由面をｘ軸方向及びｙ軸方向に進展させる力を表すJ_xとJ_yは，次式で与えられる．

$$J_x=J_{x1}+J_{x2}=\frac{8}{35}\cdot\frac{\rho}{E_1}\left(1+\frac{1}{r_t^{\,2}}\cdot\frac{E_1}{E_2}\right)(K_t\sigma_N)^2 \quad , \quad J_y=J_{y1}+J_{y2}=\frac{1}{14}\cdot\frac{\rho}{E_1}\left(1-\frac{1}{r_t^{\,2}}\cdot\frac{E_1}{E_2}\right)(K_t\sigma_N)^2 \tag{5}$$

ここに，ρは切欠きの曲率半径，K_tは形状係数を表し，r_tは材料１に対する材料２の板厚比である．

つぎに，非線形弾性体では，J_xとJ_yは次式で与えられる．ここで，Γはガンマ関数である．

$$J_x=J_{x1}+J_{x2}=\sum_{i=1}^{2}\frac{\sigma_{Yi}\,\varepsilon_{Yi}\,\rho}{2(n_i+1)}\left\{\left(\frac{\varepsilon_{yi,\,max}}{\varepsilon_{Yi}}\right)^{n_i+1}\cdot\frac{3\sqrt{\pi}\,(n_i+1)(3n_i+1)\,\Gamma(3n_i+1/2)}{(3n_i+4)(3n_i+2)\,\Gamma(3n_i+1)}+n_i-1\right\} \tag{6a}$$

$$J_y=J_{y1}+J_{y2}=\sum_{i=1}^{2}\frac{\sigma_{Yi}\,\varepsilon_{Yi}\,\rho}{2(n_i+1)}\left\{\left(\frac{\varepsilon_{yi,\,max}}{\varepsilon_{Yi}}\right)^{n_i+1}\cdot\frac{2}{3n_i+4}+n_i-1\right\}(-1)^{i+1} \tag{6b}$$

キーワード　異材接合，切欠き，Ｊ積分，弾塑性挙動，応力－ひずみ評価法
連絡先　　〒441-8510　愛知県豊橋市明海町１番地　トピー工業(株)　研究開発センター　TEL.0532-25-5354

小規模降伏では，線形弾性体と仮定して求めた J_x，J_y と，非線形弾性体と仮定して求めた J_x，J_y は等価とみなすことができるので，式(5a)，式(5b)をそれぞれ式(6a)，式(6b)に代入して，$\varepsilon_{y1,max}$ と $\varepsilon_{y2,max}$ について連立して解くことにより，K_σ と K_ε を算定することができる．

（３）大規模降伏域及び全面降伏域における評価式

J_k 積分の径路独立性を利用して，切欠き底に沿った径路の積分と切欠き材の外縁に沿った径路の積分（荷重－変位曲線から決定されるＪ積分値）が等しいという条件から，切欠き底の最大ひずみを推定できる．

いま，引張荷重をＰ，純断面降伏荷重を P_{NY} とすると，式(2)よりＪ積分値は次式で与えられる．

$$J = J_{linear} = (J_{x,\,linear}{}^2 + J_{y,\,linear}{}^2)^{1/2} \qquad (P \leqq P_{NY})$$
$$J = J_{NY}\left(\frac{P}{P_{NY}}\right)^{1+1/n_i} = [J_{linear}]_{P=P_{NY}} \cdot \left(\frac{P}{P_{NY}}\right)^{1+1/n_i} \qquad (P \geqq P_{NY}) \tag{7}$$

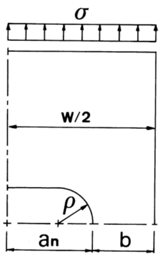
$$J_{x,\,linear} = \frac{8}{35}\cdot\frac{\rho}{E_1}\left(1+\frac{1}{r_t{}^2}\cdot\frac{E_1}{E_2}\right)(K_t\sigma_N)^2 \quad , \quad J_{y,\,linear} = \frac{1}{14}\cdot\frac{\rho}{E_1}\left(1-\frac{1}{r_t{}^2}\cdot\frac{E_1}{E_2}\right)(K_t\sigma_N)^2 \tag{8}$$

式(8)において $K_t\sigma_N = \sigma_{Yi}$ と置き，その値を J_{yield} と定義する．この値とともに，式(7)，式(8)を式(6a)，式(6b)に代入して，小規模降伏の場合と同様に $\varepsilon_{y1,max}$ と $\varepsilon_{y2,max}$ について連立して解くことにより，大規模降伏域及び全面降伏域における評価式を得ることができる．

３．簡便推定法の数値実験に基づく検証

（１）解析条件

本法の妥当性を検証するため，平面応力条件下で一様引張応力σを受ける２相切欠き材の弾塑性有限要素解析を実施した．幾何形状は対称性を考慮して,図－２に示すように,切欠き長さ２ａn,板幅 W，切欠き底の曲率半径ρを変化させた３ケースについて検討した（上部のみ表示し，下部を省略した）.



	Specimen		
	A-1	A-2	A-3
2an/W	0.50	0.50	0.25
ρ/2an	0.40	0.05	0.05
Kt	7.8	6.0	2.7

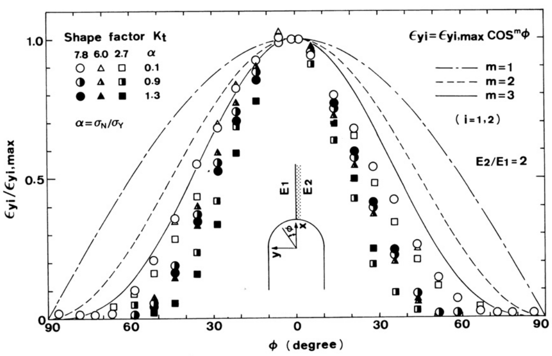
an: Half notch length , W: Width
ρ: Notch root radius ,
Kt: Shape factor

図－２　解析条件

材料定数は，材料１，２共にポアソン比を 0.3，加工硬化指数を 0.21 と固定し,材料１のヤング率 E_1 を 10000 kg/mm²,降伏点 σ_{Y1} を 30kg/mm² として，材料２の E_2，σ_{Y2} の何れかを材料１の値と異なる事例について,解析を行った.本報では,$E_2／E_1$＝2.0，$\sigma_{Y2}／\sigma_{Y1}$＝1.0 の事例を紹介する.

（２）解析仮定の妥当性

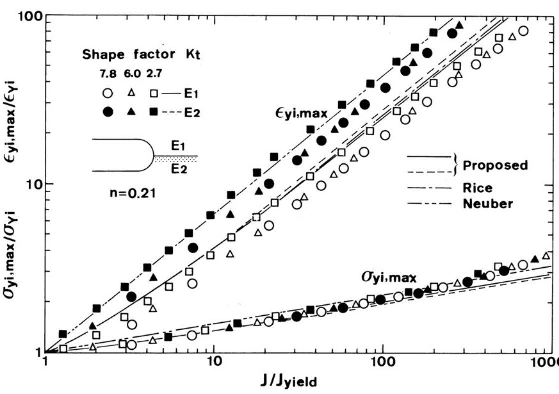
式(1)の妥当性を検証するために，各荷重段階における切欠き底に沿うひずみの分布を調べたものが図－３である.線形弾性時にはｍ＝３をほぼ満足するが,高負荷時になるとともにｍが３より大きくなり，純断面全面降伏以降，ｍ＝３で近似する場合，注意を要する．また，ひずみの分布に顕著な非対称性が求められる．今後，塑性変形の進行に伴い，非対称な変形挙動を反映したひずみの評価式が必要となる.以下では，式(5)～(8)に示すように，ｍ＝３として整理する．なお，別途，J_k 積分の径路独立性を検証・確認した.



図－３　切欠き底のひずみ分布

（３）評価法の有効性

図－４は，接合境界上の切欠き底の最大応力 $\sigma_{yi,max}$ 及び最大ひずみ $\varepsilon_{yi,max}$ とＪ積分との関係を示す．$\sigma_{yi,max}$ は各評価式共に比較的良好に一致しているが，$\varepsilon_{yi,max}$ は材料１の側は本評価式と Rice の式に，材料２の側は Neuber 則に近い関係を示す．本評価式は，材料１と材料２に差異が見られ，定性的には有限要素解と一致するものの，精度面では，改良する必要があると考えられる．



図－４　最大応力、最大ひずみとＪ値の関係