

ミニチュアサンプルによる力学的特性評価技術

近年、種々の産業分野で微小なサンプルをもちいて強度や応力-ひずみ関係などの材料力学的特性を評価する手法の開発が望まれている^{1)~3)}。たとえば、電子機器や電子デバイスは小型化・高集積化が進んでおり、内部で使用されるはんだなど評価対象部は体積が非常に小さい。また、機械・構造物における余寿命診断の信頼性向上のためには、機器に損傷を与えない程度の小さなサンプルを採取して直接材料特性を評価することが望ましい^{4), 5)}。

このように試験片採取量がきわめて少ない体積に制限されている場合、材料力学的特性評価は各規格に準拠した標準的な試験片では困難であるが、微小サンプルで実施可能な材料試験と有限要素法 (Finite Element Method, FEM) 解析を組み合わせることによってこれが可能となる。

本稿では、微小サンプルをもちいた3点曲げ試験とFEM解析を併用して材料の応力-ひずみ関係を逆同定した例と、スモールパンチ試験とFEM解析を併用した破壊靱性値推定法について紹介する。

B-1

3点曲げ試験とFEM解析による応力-ひずみ関係の逆同定

- 1) 社団法人日本原子力学会:微小試験片材料評価技術の進歩,(1992), p.181.
- 2) 権一賢ほか:日本機械学会論文集(A編), Vol.63(1997), No.605,p.61.
- 3) Maribel L. Saucedo-Munoz et al.:J. Mater. Res., Vol.17(2002),No.8, p.1945.
- 4) 金谷章宏ほか:日本機械学会2005年度年次大会講演論文集,Vol.5(2005),p.331.
- 5) 中本久志ほか:M&M2005材料力学カンファレンス講演論文集,(2005),p.115.

逆同定の概要

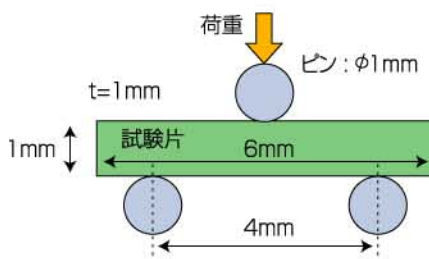
応力-ひずみ関係の逆同定は、材料の応力-ひずみ関係を与えることで対象物の荷重-変位関係を求める通常のFEM解析に対して、FEM解析での荷重-変位関係が実測データと一致するときの材料の応力-ひずみ関係を逆推定するものである。

3点曲げ試験は試験片形状が単純で試験片の固定が不必要などの利点を有することから、小さなサンプルでの試験が実施可能である。よって、逆同定のための荷重-変位関係の実測に適していると思われる。

また、試験片が固定されていないなどFEM解析での境界条件が単純であることから、精度良い解析結果がえられる。

応力-ひずみ関係の逆同定

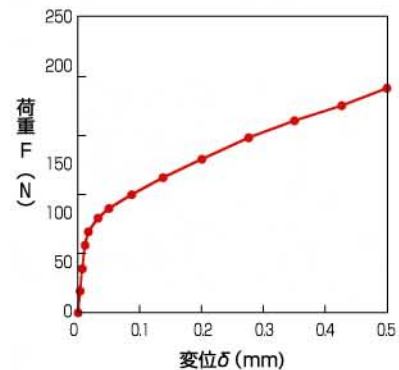
オーステナイト系ステンレス鋼SUS304について応力-ひずみ関係の逆同定を試みた。第1図に3点曲げ試験の概要を示す。試験片は長さ6mm、幅1mm、厚さ1mmで正方形断面を有する梁型である。



第1図 3点曲げ試験の概略

第2図は3点曲げ試験でえられた荷重-変位関係である。FEM解析では、応力-ひずみ関係を記述する材料定数の値を変化させて、荷重-変位関係を本試験結果に近接させる。

FEM解析で使用する応力-ひずみ関係 ($\sigma - \varepsilon$ 関係) は次のように表した。

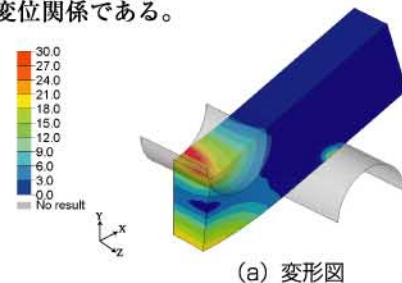


第2図 3点曲げ試験の荷重-変位関係

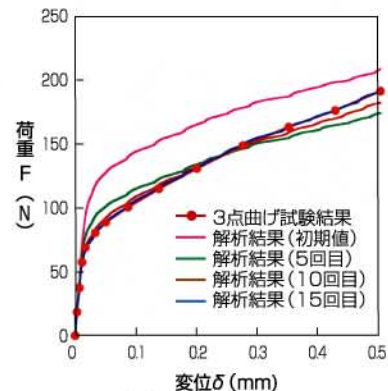
$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon & \sigma \leq \sigma_0 \\ \sigma &= \sigma_0 + C\varepsilon_{pl}^n & \sigma > \sigma_0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Eはヤング率、 σ_0 は降伏応力、nは加工硬化指数、Cは塑性係数であり ε_{pl} は塑性ひずみである。逆同定の際、変数となるパラメータ (材料定数) は、 σ_0 、nならびにCの三つである。

第3図は3点曲げ試験片の変形図ならびに荷重-変位関係である。



(a) 変形図

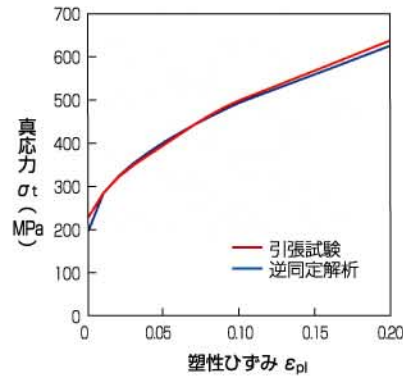


(b) 荷重-変位関係

第3図 逆同定解析結果

ここに示すように、FEM解析での荷重-変位関係が実測された荷重-変位関係に近接するまで複数回解析が実行される。今回の例では、逆同定が終了するのに15回の繰り返し計算を要した。

第4図は推定された応力-ひずみ関係である。図には対象材の応力-ひずみ関係も示してある。本手法によって、材料の応力-ひずみ関係が精度よく推定されていることがわかる。なお、パラメータの値変更、解析実行、結果比較の一連の作業は、最適化ツールにより自動でおこなうことが可能である。



第4図 応力-ひずみ関係の推定結果

スモールパンチ試験と有限要素解析による弾塑性破壊靱性の推定

B-2

弾塑性破壊靱性推定の概要

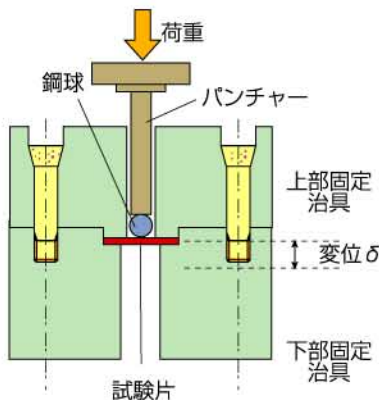
機械・構造物の破壊に対する安全性の診断には、き裂進展に対する抵抗度、すなわち弾塑性破壊靱性 J_{IC} の評価が必要である。実験によって J_{IC} を評価するには通常10mm t × 60mm × 60mm程度の大きさの試験片が必要であり、実際の構造物からそのような試験片を採取することは困難である。

原子力分野では、10数年前から靱性の指標としてスモールパンチ (SP) 試験を取り入れてきた。SP試験は、たとえば直径3mm、厚さ0.25mmという微小円板を試験片として使用し、材料の延性-脆性遷移温度の評価や簡易的に J_{IC} を推定するために適用されている¹⁾。そこでの靱性評価は、SP試験結果と多くの破壊靱性試験結果を対比させる経験則にもとづくものである。

本稿では、より合法的な手法として、破壊靱性試験結果がなくても J_{IC} を数値解析的に求める方法を提案する。

スモールパンチ試験によるき裂発生条件・位置の特定

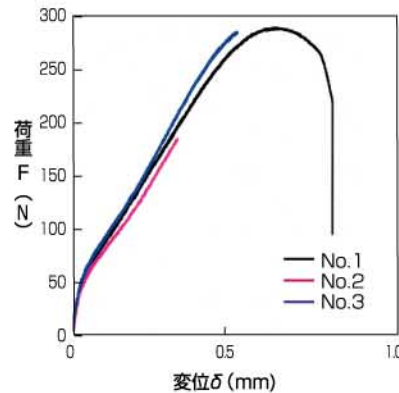
0.29%C-Mn鋼のSP試験片を採取しSP試験を実施した。第5図に試験の概略を示す。



第5図 スモールパンチ試験の概略

試験には直径3mm、厚さ0.25mmの微小円板型試験片を用いた。SP試験での試験片変位量 δ は一

般的に数mm程度と小さく、治具 (鋼球・パンチャー) の弾性変形が無視できない場合は治具の変位量を事前に求め試験でえられる変位量を補正する。第6図にSP試験の結果を示す。



第6図 スモールパンチ試験の荷重-変位関係

破壊靱性を推定するには、SP試験においてき裂が発生したときの変位量 δ_{crit} を特定する必要がある。そのため、最大荷重 (第6図、No.1データ) へ到達する前に除荷し、き裂の成長度合い (き裂開口量) が異なる荷重-変位データ (第6図、No.2、3データ) を取得した。このような試験結果から、き裂開口量がゼロとなる場合のSP試験変位量を特定する。

写真1はSP試験後の試験片凸部を、走査型電子顕微鏡 (SEM; Scanning Electron Microscope) で観察した例である。

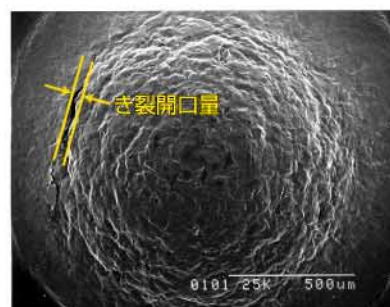


写真1 スモールパンチ試験後の試験片凸面のSEM写真

このようなSEM画像からき裂の開口量を求め、SP試験変位に対してプロットし、き裂開口量がゼロとなる変位量 δ_{crit} を求めると $\delta_{crit} = 0.32\text{mm}$ であった。

スモールパンチ試験の有限要素解析

SP試験で試験片凸部に発生する応力およびひずみを把握するために、試験片を弾塑性体、そのほか治具などを剛体とした弾塑性解析をおこなった。

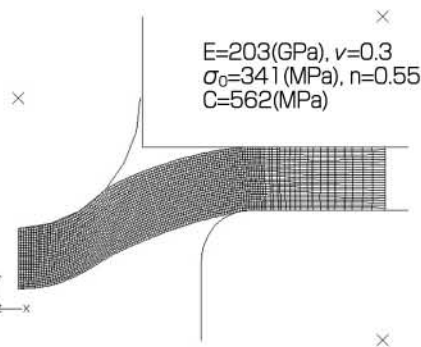
ひずみエネルギー密度 W は各方向成分のひずみと応力の積分で計算されるが、本稿ではその方向を考慮しない等価塑性ひずみと等価(MISES)応力の積で算出した。

そのうえ、SP試験で δ_{crit} の変位量に達したときの W が、き裂発生条件である、との仮定に基づき破壊発生時のひずみエネルギー密度 W_{crit} を求めた。

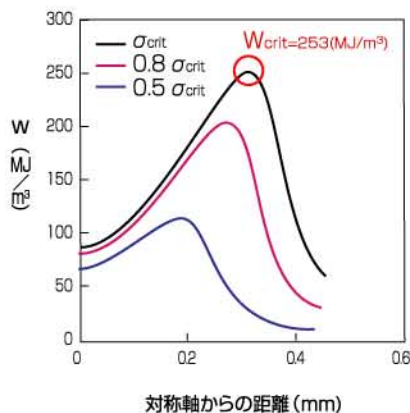
第7図は変位 $\delta_{crit} = 0.32\text{mm}$ を与えたときのSP試験片の変形である。図には解析で使用した材料定数の値も示した。

ここで、 ν はポアソン比である。

第8図は、変位 δ_{crit} 負荷したときの試験片凸側のひずみエネルギー密度分布である。この結果、 $W_{crit} = 253\text{MJ/m}^3$ と求められた。



第7図 スモールパンチ試験片の有限要素解析結果



第8図 スモールパンチ試験片凸面のひずみエネルギー密度の分布

弾塑性破壊靱性試験の有限要素解析

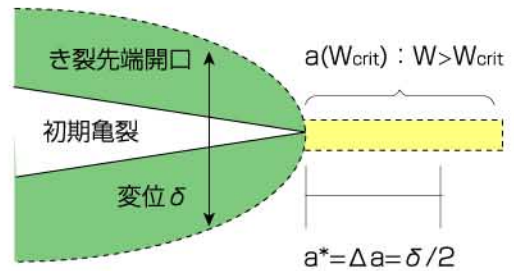
SP試験の有限要素解析で求められた W_{crit} をもちいて弾塑性破壊靱性 J_{IC} を推定するため、 J_{IC} 試験の弾塑性解析を実施した。モデルは厚さ10mmのCT試験片形状であり、二次元X軸対称である。

き裂の進展はき裂先端前方のある距離がSP試験の解析で求めた破壊発生時のひずみエネルギー密度 W_{crit} に到達したときに開始する、と仮定した。き裂先端前方で W_{crit} が満足されるべき距離 a^* はき裂進展距離 Δa とし、 Δa はき裂開口変位 δ をもちいて次のような関係から求めた。

$$\Delta a = \delta / 2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

δ はASTM E1820の定義式で算出する。

J_{IC} は、第9図に示すように、き裂先端前方の W の値が W_{crit} に到達している要素の範囲 $a(W_{crit})$ を求め、 a^* と比較し、 $a(W_{crit}) > a^*$ となるとき J 積分値(数値解析値)とする。



第9図 破壊靱性評価時におけるき裂先端の状態

このようにして J_{IC} を推定した結果、 $a^* = 80\ \mu\text{m}$ 、 $J_{IC} = 95\text{kJ/m}^2$ と求められた。

J_{IC} 推定結果の精度検証のため、ASTM E1820に準拠して同材の弾塑性破壊靱性試験を実施した。その結果、 J_{IC} は $99\text{--}101\text{kJ/m}^2$ と求められた。したがって推定値と実測値の差は5%程度であることから、本手法をもちいると高い精度で J_{IC} を推定できることが確認された。

微小サンプルによる材料試験とFEM解析を併用した材料特性評価例を2件紹介した。

これらの方法は単に材料強度特性がえられるだけでなく、えられた応力-ひずみ関係をもちいて実機の応力解析ができるなど、より信頼性の高い余寿命診断が可能になると期待される。

機器の小型化はますます進んでおり、微小サンプルによる特性評価技術はさらに有用になると考えられることから、今後も精力的に研究開発をおこなう所存である。

[エンジニアリングメカニクス事業部 強度技術部 中本 久志]