R-curve の FEM 解析による マグネシウム合金の小規模降伏条件の提案

石名敏之^{*1}, 濱田繁^{*2}, 野口博司^{*3}

Proposal of Small Scale Yielding Condition in Magnesium Alloy by FEM Analysis of R-curve

Toshiyuki ISHINA^{*4} Shigeru HAMADA and Hiroshi NOGUCHI

^{*4}Department of Mechanical Engineering, Graduate school of Engineering,
Kyushu University, 744 Moto-oka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 819-0395 Japan

In order to clarify the small scale yielding condition in magnesium alloy, FEM analysis of the R-curve whose shape is considered to be the material characteristic shape was carried out. As an object material, magnesium alloy AZX312 was used. From the FEM analysis results, the shape of the R-curve of its first step when an initial crack size $a = 200 \mu\text{m}$ is obviously different from those of $a = 900 \mu\text{m}$ and $a = 2000 \mu\text{m}$. It is considered that the transition crack size from the small scale yielding to the large scale yielding may be between $200 \mu\text{m}$ and $900 \mu\text{m}$. However, the threshold crack size given by the ASTM standard E399 is much larger than $900 \mu\text{m}$. The ASTM standard is based on experimental results of many materials, however, the standard does not consider the difference of Young's modulus of each materials. So, in magnesium alloy whose Young's modulus is low, the ASTM standard is considered to be not effective.

Key Words : Small Scale Yielding, Finite Element Method, Magnesium alloy, Fracture Mechanics, Young's Modulus

1. 結 言

マグネシウム合金では以下に示す ASTM の規格式⁽¹⁾を用いて小規模降伏を満足するしきい値のき裂寸法を計算すると、実際に小規模降伏状態にあるき裂寸法よりも大きな値を与えてしまう。このことは著者らの実験結果でも確認済みである。要因として、マグネシウム合金はヤング率 E が低いことが考えられる。

$$a > 2.5(K/\sigma_Y)^2 \quad (1)$$

そこで本研究では、小規模降伏条件を満足する範囲においては、その形状が材料固有の形状であると考えられる R-curve を FEM 解析で作成することによりマグネシウム合金の小規模降伏条件について検討する。小規模降伏条件を逸脱すると応力拡大係数 K を用いて評価できないことから、 K で R-curve を整理し、種々のき裂寸法の R-curve の形状を比較することでしきい値の

き裂寸法を確認できると考えた。なお、本研究では難燃性マグネシウム合金 AZX312 押出し材を対象とした。

2. FEM 解析による R-curve の作成

本研究では非線形き裂力学⁽²⁾の知見をき裂進展の挙動へ拡張した。FEM 解析によるき裂先端の第ゼロ節点の y 方向の相当塑性ひずみの値 $\epsilon_{y0,FEM}^P$ が、き裂寸法に依らない材料固有の値になったときに、き裂の進展が開始すると考えた。そこで種々のき裂寸法の R-curve を FEM 解析で作成することを試みた。FEM 解析では curve の連続性は再現できないので、R-curve をいくつかの微小ステップの集合と考え、進展するき裂の微小ステップ量を解析モデルにおけるき裂近傍の一要素の長さとした。以下に鈍化直線と R-curve の最初のステップを得るまでの手順を示す。

まず、解析に用いる相当塑性ひずみの値 $\epsilon_{y0,FEM}^P$ を得るために、実験で単一試験片を用いた R-curve の一部の取得をおこなった。試験片に対して人工微小穴を導入した後、疲労試験機を用いて予き裂を導入し、焼鈍後、引張試験に供試した。負荷荷重を徐々に増加することで、鈍化直線の終点、すなわちき裂が安定成長を

^{*1} 学生員, 九州大学大学院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)。

^{*2} 正員, 九州大学大学院工学研究院

^{*3} 正員, フェロー, 九州大学大学院工学研究院

E-mail: ishina@mech.kyushu-u.ac.jp

開始する時の応力拡大係数 $K = 7.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ を得た。その後試験片を破断させ、予き裂の深さ方向の寸法 b を計測したところ、 $b = 897 \text{ }\mu\text{m}$ であった。

次に図 1 に示した二次元の解析モデルを用いて、相当塑性ひずみの値 $\epsilon_{y0,FEM}^P$ を求めた。解析には汎用ソフト ANSYS を用い、平面ひずみ状態とした。要素はいずれも 8 節点四辺形とし、き裂近傍においては一要素の長さを $10 \text{ }\mu\text{m}$ とした。また、非線形解析用の応力ひずみ線図の二直線近似については図 2 に示した。き裂寸法は実験における予き裂の深さ方向の寸法 b と対応させ、 $900 \text{ }\mu\text{m}$ とした。解析モデルに実験で得た応力拡大係数 $K = 7.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ を負荷させたとき、き裂先端の第ゼロ節点の相当塑性ひずみの値 $\epsilon_{y0,FEM}^P$ は 9.5% であった。

最後に解析で得た相当塑性ひずみの値 $\epsilon_{y0,FEM}^P = 9.5\%$ を用いて R -curve の最初の微小ステップを得た。先のモデルでき裂の安定成長開始時の応力拡大係数 $K = 7.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ を負荷させた後、き裂先端の境界条件としての図中の y 方向の拘束を一要素分 ($10 \text{ }\mu\text{m}$) だけ外し、解析モデルに $7.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ 以上の応力拡大係数を負荷し、再び新たなき裂先端の第ゼロ節点の相当塑性ひずみの値 $\epsilon_{y0,FEM}^P$ が 9.5% となる時の応力拡大係数を求めた。

さらに R -curve の形状の変化を確認するため、き裂寸法 $a = 200 \text{ }\mu\text{m}$ および $a = 2000 \text{ }\mu\text{m}$ について同様の解析をおこなった。

3. 解析結果

図 3 に解析で得た鈍化直線と R -curve の最初のステップを示した。鈍化直線については破線で示した。表 1 に各き裂寸法における鈍化直線の終点、すなわちき裂が安定成長を開始する時の応力拡大係数の値 K ならびに R -curve の初期ステップを $10 \text{ }\mu\text{m}$ とした場合の初期

Fig.1 FEM analysis model and mesh pattern near the crack tip

ステップの傾き $\Delta K/\Delta a$ の値を示した。き裂寸法 $a = 200 \text{ }\mu\text{m}$ では $a = 900 \text{ }\mu\text{m}$ と $a = 2000 \text{ }\mu\text{m}$ に比べ、安定破壊開始時の応力拡大係数 K と R -curve の初期ステップの傾きが著しく低下した。

4. マグネシウム合金の小規模降伏条件

解析結果より、マグネシウム合金 AZX312 においては小規模降伏から大規模降伏への遷移が初期き裂寸法 $a = 200 \text{ }\mu\text{m}$ から $a = 900 \text{ }\mu\text{m}$ の間で起こっていることが予測される。現段階では遷移の明確なき裂寸法は明示できないが、本材料の降伏応力 $\sigma_Y = 231 \text{ MPa}$ とき裂の安定成長開始時の応力拡大係数 $K = 7.0 \text{ MPa m}^{1/2}$ を式 (1) に代入すると、遷移がまだ開始していないと考えられる $900 \text{ }\mu\text{m}$ よりさらに大きな $a > 2300 \text{ }\mu\text{m}$ となる。

5. 文 献

- (1) ASTM E399-09e2. Standard test method for linear-elastic plane strain fracture toughness K_{IC} of metallic materials. American Society for Testing and Materials.
- (2) Nisitani, H., Fujisaki, W., Proposal of Nonlinear Crack Mechanics and Nonlinear Notch Mechanics, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 60, No. 579 (1994), pp. 2525-2531.

Fig.2 Two straight-line approximation of stress strain curve

Fig.3 Blunting line and first step of R -curve

Table1 K and $\Delta K/\Delta a$ values of each crack length

	200 μm	900 μm	2000 μm
K value at the beginning of stable growth [$\text{MPa m}^{1/2}$]	6.0	7.0	7.1
Inclination at the first step of the R -curve, $\Delta K/\Delta a$ [$\text{GPa m}^{-1/2}$]	92	210	220