三角形パターン多孔体の弾-粘塑性均質化挙動

池之谷和孝^{*1}, 大野信忠^{*1}, 笠原直人^{*2}

Elasto-viscoplastic macro material modeling of unidirectionally perforated metals

Kazutaka IKENOYA^{*3}, Nobutada OHNO^{*3} and Naoto KASAHARA^{*4}

^{*3} Nagoya University Dept. of Mechanical Science and Engineering
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

^{*4} Tokyo University Dept. of Nuclear Engineering and Management
Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

his study investigates homogenized elasto-viscoplastic material modeling of thick perforated plates operating at high temperatures. To this end, homogenized stress-strain relations of a periodic unit cell of thick perforated plates subjected to simple and complex loading are analyzed using a homogenization method of periodic solids. The resulting homogenized stress-strain relations are then simulated using a recently developed elasto-viscoplastic macro-material model based on a general form of quadratic equivalent stress. It is shown that this macro-model successfully represents the macro-anisotropy and macro-volumetric compressibility revealed in the homogenization analysis.

Key Words : Homogenization, Macro-Model, Thick Perforated Plates

1. 緒 言

熱交換器に用いられる多孔体は一方方向に開空間を有している。この部分は非常に多くの開空間が周期的に配置されており、巨視構造物の構造解析を行う場合に、微視構造を詳細に有限要素分割すると、計算負荷が大変大きくなる。

マクロ材料モデルを利用すれば、微視構造体を均質体として扱うことができるから、低い計算負荷で巨視構造物の解析が可能となる。このため、微視構造体の巨視的変形挙動を記述できるマクロ材料モデルの研究が行われてきた。例えば Tsuda ら⁽¹⁾は、べき乗則型の弾-粘塑性マクロ材料モデルを構築し、超細密プレートフィン構造体に適用してその妥当性を検証した。本研究では、開発が進んでいる高速炉の熱交換器に用いられる正六角形配列多孔体の解析を行う。この多孔体は、高温下で熱応力や内圧により多軸応力を受けるから⁽²⁾、その均質化粘塑性特性を二軸負荷や三軸負荷のもとで調べる。さらに、Tsuda ら⁽¹⁾が構築したマクロ材料モデルを適用し、その有効性を検討する。

2. 均質化解析

解析した一方方向多孔体では、Fig.1 に示すように、円孔が正三角形配置されている。本研究では、Fig. 1 上の右側の破線部分をユニットセル Y とし、円孔間のピッチと母材最少厚さをそれぞれ P , h とした。

変形は微小とし、弾性ひずみ ϵ^e は Hooke の法則

$$\sigma = \mathbb{D}^b : \epsilon^e \quad (1)$$

に従うとした。

Fig. 1 Unidirectionally perforated metals considered in this study.

^{*1} 正員, 名古屋大学 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

^{*2} 正員, 東京大学 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) .

E-mail: ikenoya@mml.mech.nagoya-u.ac.jp

Fig. 2 Unit cell Y of unidirectionally perforated metals ($h/P=0.1$).

ここで、 σ と $\mathbb{D}$ は母材の応力と母材の弾性剛性を表し、テンソル間の $(\cdot)$ は内積を示す。次に、粘塑性ひずみ ϵ^p の時間変化は、次式のようなべき乗則で表されるとした。

$$\dot{\epsilon}^p = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^{n-1} \frac{s}{\sigma_0} \quad (2)$$

ここで $\dot{\epsilon}_0$, σ_0 , n は材料パラメータである。また、 $(\cdot)$ は時間による微分を示し、 s は偏差応力を表す。さらに、 σ_{eq} は Mises の相当応力であり、次式によって定義される。

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2} s : s \right)^{1/2} \quad (3)$$

上に述べた構成式と 550°C における改良 9Cr-1Mo 鋼の材料パラメータを用いて均質化解析を行った。解析したユニットセル ($h/P=0.1$) の有限要素分割を Fig. 2 に示す。このユニットセルに各座標軸方向 (Fig. 2 参照) の単軸負荷と x - y 面内等二軸平面応力負荷を与えた。これらの均質化解析の結果を、Fig. 3 に○印で示す。Fig. 3 を見ると、各座標軸方向の単軸負荷での定常状態における巨視的応力の値は、 z 方向単軸負荷で大変大きく、異方性が著しいことがわかる。また、 x , y 方向単軸負荷での定常状態での巨視的応力 Σ_z , Σ_x はほぼ等しく、 x - y 面内ではほぼ等方であることが明らかになった。

3. マクロ材料モデル

Tsuda ら⁽⁴⁾は、母材の構成式が式(1)~(3)のように表わされる場合にべき乗型弾-粘塑性マクロ材料モデルを導いた。この章では、このマクロ材料モデルに

Fig. 3 Macro-stress versus macro-strain relation under uniaxial tension at a macro-strain rate of 10^{-4} s $^{-1}$.

ついて簡単に説明する。まず、巨視的ひずみ E は、次式のように巨視的弾性ひずみ E^e と巨視的粘塑性ひずみ E^p に分離できるとした。

$$E = E^e + E^p \quad (4)$$

上式の巨視的弾性ひずみ E^e は、Hooke の法則

$$\Sigma = \mathbb{D}^{eh} : E^e \quad (5)$$

に従うとした。ここで、 Σ と $\mathbb{D}^{eh}$ は巨視的応力と均質化弾性剛性を表す。次に、巨視的粘塑性ひずみ速度は、式(2)を拡張した次式

$$\dot{E}^p = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\Sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^{n-1} \frac{\mathbb{M} : \Sigma}{\sigma_0} \quad (6)$$

で表わされことを示した。上式中の $\mathbb{M}$ は、巨視的異方性と巨視的体積圧縮性を表現するための 4 階のテンソルである。また Σ_{eq} は、巨視的応力の 2 次関数に基づく巨視的相当応力であり、次式のように定義される。

$$\Sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2} \Sigma : \mathbb{M} : \Sigma \right)^{1/2} \quad (7)$$

上に述べたマクロ材料モデルの材料パラメータの決定について簡単に説明する。まずは、弾性均質化解析によって決定される。次に $\mathbb{M}$ の成分を決定する。2 章で述べたように、多孔体は x - y 面内で等方であるから、本研究では x - y 面内等方性を仮定して、 $\mathbb{M}$ の成分を決定した。

各座標軸方向の単軸負荷条件におけるマクロ材

Fig. 4 Steady-state macro-stress surface under combined loading prescribed by Eq. (8).

料モデルによる解析結果を Fig. 3 に実線で示す。グラフから、マクロ材料モデルによる解析と均質化解析の結果は一致していることがわかる。

4. 多軸負荷解析

マクロ材料モデルの妥当性の検討のため、二軸負荷条件と三軸負荷条件のもとで解析を行い、その定常状態における巨視的応力曲面を比較した。まず、二軸負荷解析では、以下の負荷条件を与えた。

$$\dot{E}_{xx} = \dot{E}^* \cos \theta, \dot{E}_{yy} = \dot{E}^* \sin \theta, \Sigma_{zz} = 0 \quad (8)$$

また、三軸負荷解析においては以下のマクロひずみの時間変化を与えた。

$$\dot{E}_{xx} = \dot{E}_{yy} = \dot{E}^* \cos \theta, \dot{E}_{zz} = \dot{E}^* \sin \theta \quad (9)$$

ここで、 $\dot{E}^* = 1.0^{-4}$ とし、解析は $\theta = k\pi/12$ ($k=0, 1, \dots, 23$) の場合に行った。この二軸負荷解析と

Fig. 5 Steady-state macro-stress surface under combined loading prescribed by Eq. (9).

三軸負荷解析によって得られた定常応力曲面をそれぞれ、Fig. 4 と Fig. 5 に示す。これらのグラフから、マクロ材料モデルと均質化解析の結果は、二軸平面応力負荷、三軸負荷解析の場合に一般的によく一致していることがわかる。

5. 結 語

本研究では、正三角形パターン配置の一方多孔隙体の均質化挙動を調査した。均質化解析により、一方多孔隙体が顕著な巨視的異方性と巨視的圧縮性（本稿では省略）を有することが明らかとなった。さらに、これらの巨視的変形特性を記述するマクロ材料モデルを適用し、その妥当性を検討するために単軸負荷解析だけでなく、多軸負荷解析を行った。この結果、マクロ材料モデルは高精度に均質化解析の結果を再現できた。

文 献

- (1) M. Tsuda, E. Takemura, T. Asada, N. Ohno and T. Igari: Int. J. Mech. Sci., 2010, 52, (5), 648-656.
- (2) M. Ando, H. Takasho, N. Kawasaki and N. Kasahara: Proc. of PVP 2008, Vol. 1, PVP2008-61320, pp. 701-710, ASME, 2008