

I-10

ボクセル有限要素法を用いた
ミクロ構造解析による材料の変形強度特性評価

東北大学大学院
東北大学大学院
東京大学生産技術研究所

学生員 ○日下 桂一
正 員 寺田 賢二郎
永井 学志

1. はじめに

非均質材料のより実際的でかつ定量的な巨視的力学特性の評価を行うためには、微視領域における力学挙動を適格に微視構造モデルに反映させるとともに、その幾何学的な性状も現実のものに近づける必要がある。本研究では、均質化法に基づくマルチスケール解析のミクロ構造解析において、その幾何特性をより忠実に反映できるボクセル有限要素法の適用を前提として、弾塑性材料の巨視的材料特性の評価手法の高度化を試みる。具体的には、従来のボクセル有限要素法¹⁾の適用が困難とされてきた弾塑性問題に対して、応力振動の影響を回避する手法を構築し、均質化法に基づくマルチスケール解析の一般化アルゴリズム²⁾におけるミクロ解析手法として実装し、その手法の適用性、有用性を示す。

2. 弾塑性材料のボクセル解析

2.1 塑性問題におけるボクセル解析の問題点への対応

ボクセル解析を行う際には、滑らかであるべき各材料の境界形状が、デジタル化によって階段状に近似され、特異な点を生成しているために数学モデル上は意図しない数値的な特異応力が生じる。このような特異応力は、特に弾塑性問題などの履歴依存型の非線形挙動を解析する際には悪影響を及ぼすことが懸念される。そこで本研究では、増分計算のひとつの過程である応力積分で用いられる試行的弾性応力状態に対して積分平均化理論に基づくスムージング技法を導入して、物理的に妥当な弾塑性判定を行うことを試みる。単純な球一つを含む3次元解析モデルを用いて、マルチスケール解析を行い、この数値解析結果を参照してボクセルモデル特有の特異応力に起因する問題点の回避方法について述べる。

まず、初期ステップにおける試行的弾性応力のスムージングを行い(非局所試行的弾性応力と呼ぶ(図-1(b))), 非局所試行的弾性応力とスムージング効果なしの試行的弾性応力(局所試行的弾性応力と呼ぶ(図-1(a)))との差である beta 特性値(図-2)を定義してこの解決を図る。具体的には、この beta 特性値を、 β としてミクロ構成材料の材料パラメータのひとつである σ_y に加え、応力評価点ごとに材料を変えることによって、ボクセルモデル特有の物理的に意味のない応力振動の影響を人工的に取り除く。ここでスムージングの方法は、ある要素に対して各材料ごとにその周りの要素の応力状態の平均化を行う。また、その β の効果は、Newton 法によって変位増分を求める場合に用

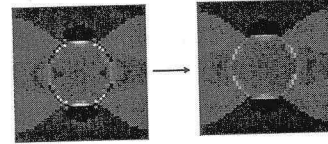


図-1 降伏判定に用いる非局所試行的弾性応力の分布

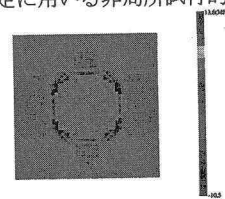


図-2 局所試行的弾性応力と非局所試行的弾性応力の差として定義した beta 特性値の分布

いられる consistent 接線剛性を評価する際にも反映させる。

このようにして得られたマクロ応力・ひずみ関係を図-3に示す。この図より、微視領域において最初に塑性ひずみが発生するマクロ応力は明らかに異なり、提案手法を用いた場合の方が降伏が遅れている。これは図-2に示すような局所試行的弾性応力と非局所試行的弾性応力の差である beta 特性値の効果によるものであるが、前述したボクセル解析の方が有限要素解析より特異応力が生じていることによって早く降伏してしまうという問題を回避しており、この手法は妥当性が示されている。すなわち、より厳密なボクセル有限要素法によるミクロ構造解析を行うためには非常に有効であるといえる。しかしながら、図-3から分かるように巨視的な応力・ひずみ関係にはほとんど差異がみられないことから、微視領域における力学挙動を反映した平均的なマクロ挙動を評価する場合に限っては、大きな問題は生じないということが考えられる。

2.2 弾塑性材料の巨視的変形特性の異方性の評価

まずミクロ構造としては、図-4(a)のように顕微鏡で観察することができる複雑な微視領域の幾何形状を CAD を利用して模擬する(図-4(b))。そして、自動ボクセルメッシュ生成ソフトである閑くいんと社の VOXELCON³⁾を用いることにより図-4(c)のように複雑な幾何形状を有するモデルに対して正確に3次元有限要素モデルを生成する。

ここでは、構成材料の弾塑性挙動は非線形の等方硬

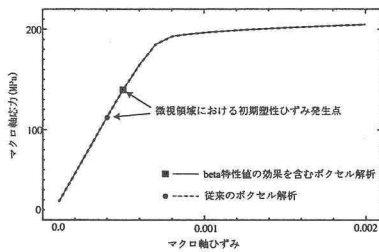


図-3 マクロ応力・ひずみ関係

化則のみを仮定した J_2 塑性理論に従うものとし、材料特性は母材（弾塑性体）が Young 率 229.0GPa, Poisson 比 0.3, 降伏応力 170MPa, 硬化係数 275MPa, 介在物（線形弾性体）が Young 率 177.0GPa, Poisson 比 0.26 とする。荷重条件は、マクロ 3 次元一要素に対して x_1 方向に 0.1% の一軸圧縮を与え、マクロ応力がゼロになるまで除荷する。そしてその塑性履歴を保持して x_1 方向、 x_2 方向それぞれに巨視的な再負荷を与える。

このような解析条件の下で、マルチスケール解析を行うことによって得られたマクロ応力・マクロひずみ関係を図-5に示す。またその図中に示した各点に対応する微視領域における相当塑性ひずみ分布を図-6に示す。相当塑性ひずみ分布については、巨視的な引張力が作用する際に新たに生じた塑性ひずみを明確にするために、圧縮荷重後（state A）に生じている相当塑性ひずみを初期化したものを示した。図-5より、微視領域に塑性履歴を保持した状態に対して新たに変形を加えると、各方向によって巨視的な変形性能が異なることが分かる。この巨視的な力学挙動は、微視領域における力学挙動を反映したものである。そこで、以下では微視領域での力学挙動に対して考察を加え、巨視的な異方性発現の原因を探る。

巨視的圧縮・除荷を順に受けた時の微視領域における変形履歴を保持した状態で、それと垂直方向に引張力を与えた時の微視領域における相当塑性ひずみを観察すると、巨視的な同一方向に対する圧縮、引張の場合（ x_1 方向荷重）と明らかにミクロ挙動が異なる。これは、 x_1 方向に圧縮を受けた時点において生じる塑性変形に対して、違う向き（ x_2 方向）に荷重するとこれまで塑性変形していなかった領域が新たに降伏し始めるためであると考えられる。この塑性変形を生じさせるには、 x_1 方向に引張った場合より弾性域が卓越しているため、微視領域に高い応力が必要となり、結果としてマクロ応力が高まり巨視的に硬化するものと推察される。

ここでは、前節でボクセル有限要素法に改良を加え、複雑な微視構造の幾何特性をより厳密に解析モデルに反映させた弾塑性マルチスケール解析を炭素鋼に対する弾塑性挙動異方性の評価に適用し、開発した手法の有用性を例示した。

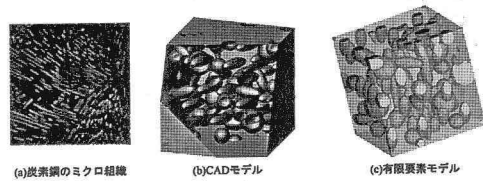


図-4 実画像から模擬した形状モデルと解析モデル

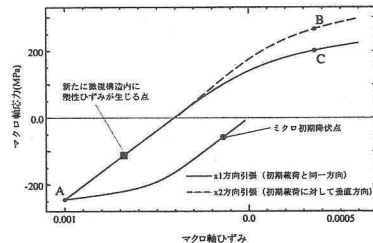


図-5 マクロ応力・ひずみ関係

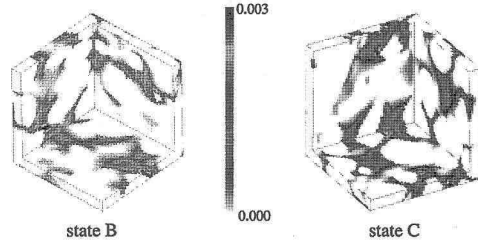


図-6 微視領域における相当塑性ひずみ分布

3. 結論

本研究では、弾塑性マルチスケール解析の精度を上げ、より実際的でかつ定量的な巨視的な力学特性の評価を行うことを目的として、ミクロ構造の幾何特性をより忠実に反映するためにボクセル有限要素法を導入した。それに伴って生じるボクセル解析特有のいくつかの問題点に対して、技術的改良を加え、複雑な幾何学的な特徴を有するミクロ構造の弾塑性解析を可能とし、マルチスケール解析の信頼性の向上を図った。そして数値計算例を通して、本手法の適用性を示すことができた。

参考文献

- 1) Hollister, S.J. and Kikuchi, N.: Homogenization theory and digital imaging: a basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.43-7, pp.586-597, 1994.
- 2) Terada, K. and Kikuchi, N.: A class of general algorithms for multi-scale analyses of heterogeneous media, *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.190, pp.5427-5464, 2001.
- 3) 石井恵三, 中野亮: ボクセル解析とソフトウェア開発, 計算工学, Vol.8, No.4, pp3-6, 2002
- 4) 永井学志, 山田貴博, 和田章: 三次元実画像データに基づくコンクリート材料の有限要素解析手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.509, pp.77-82, 1998.