

構成則データベースを用いた弾塑性有限要素解析手法の複合硬化則への適用に関する研究

電通国際情報サービス 正 尾崎 孝宏
筑波大学機能工学系 正 亀田 敏弘

1. はじめに

計算機の性能が向上し、大量のマトリクス演算を高度に実行することが可能となって来た現在、有限要素法は、有効な数値解析の手法の一つである。しかし、非弾性、不均一材料を解析の対象とする場合、構成則が複雑になり、計算量が増大する。そこで近年の計算機の記憶容量の増加に着目すると、予めひずみと応力の対応関係を計算し、データベースとしてメモリ上に構築することにより、複雑な構成則についても、逐次構成則に関する数値演算を行うことなくデータベースの参照により解析が可能となる。

本研究では、Von Mises 則に従う弾塑性体について、データベースを用いる手法と既存の手法との間で、解析結果の相対誤差を計算することにより、本手法の解析精度について検討する。また数値演算を構成則データベースの参照に置き換えることによる作成時間の変化について検討する。

2. 構成則データベース

塑性変形した要素の構成式は、弾塑性応力-ひずみマトリクス $[D^{ep}]$ を用いて次式のように応力-ひずみの増分関係式で表される。

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}]\{d\varepsilon\} \quad (1)$$

構成式が増分形であることから、要素剛性方程式 $[K_e]$ も増分形で、節点力増分 $\{dP_e\}$ と変位増分 $\{d\delta_e\}$ の関係として次式のように表される。

$$\{dP_e\} = [K_e]\{d\delta_e\}, [K_e] = \int_V [B]^T [D^{ep}] [B] dV \quad (2)$$

微小変形と仮定すると、ひずみ-変位マトリクス $[B]$ は一定であるから、要素剛性マトリクスから全体剛性方程式を構築するため、次式により弾塑性応力-ひずみマトリクス $[D^{ep}]$ を計算しなければならない。

$$[D^{ep}] = [D^e] - \frac{\{d_D\}\{d_D\}^T}{(H' + H'_k) + \{d_D\}^T\{a\}}, \{d_D\} = [D^e]\{a\} \quad (3)$$

- $\{a\}$: 流れベクトル
- H' : 等方硬化によるひずみ硬化係数
- H'_k : 移動硬化係数

表1のように各硬化係数および背応力の考慮の有無を設定することにより、硬化則として、等方、移動および複合硬化を表現することが可能である。

キーワード：構成則 データベース 並列処理 弾塑性 FEM
連絡先： 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学 機能工学系 亀田敏弘

表1 各硬化則

	等方硬化 係数 H'	移動硬化 係数 H'_k	背応力 $\{a\}$ の考慮
等方硬化則	一定	0	しない
移動硬化則	0	一定	する
複合硬化則	$\bar{\varepsilon}$ により割合変化		する

本手法では、図1に示すように応力状態 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ の値を添字とし、対応する $[D^{ep}]$ の各成分の保存位置 location を記憶する配列 DB1 と、保存位置 location を添字とし、各成分の値を記憶する配列 DB2 を定義することにより、応力と $[D^{ep}]$ の対応関係を構成則データベースとしてメモリ上に構築する。解析時には、各段階における $[D^{ep}]$ を式 (3) の数値演算によって作成するのではなく、その応力状態から対応する $[D^{ep}]$ の各成分を参照することにより、メモリアクセスのみで作成することが可能となる。残差力ベクトルの作成時についても同様の手法を用いる。

本手法による弾塑性解析プログラムのフローチャートを図2に示す。

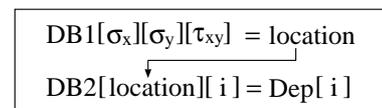


図1 構成則データベース

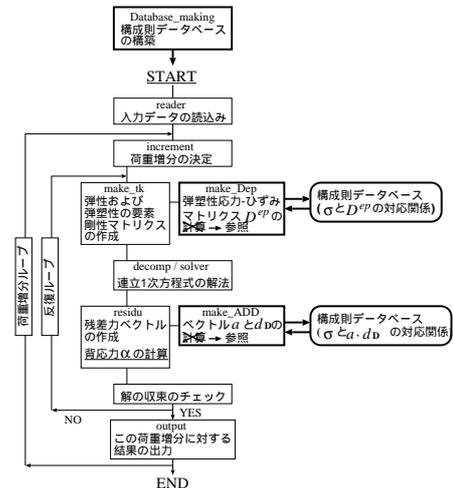


図2 フローチャート

3. 実行環境

構成則データベースの精度の向上、および参照パラメータの増加によりデータ量は増大する。そこでMPI(Message Passing Interface) によるメッセージ通信を利用することにより、構成則データベースを複数ノードのメモリ上に分割して構築する手法を取り入れる。実行環境として学術情報処理センターに設置されている分散メモリ型ベクトル並列計算機「富士通 VPP5000」を利用する。

4. 数値解析

図3に示す節点数1225、要素数1152の円孔1/4モデルを用い、x方向の繰返し負荷による2次元平面問題について解析を行った。平面応力状態について考え、物性値としてヤング率 2.1×10^5 [MPa]、ポアソン比0.3、単軸降伏応力240[MPa]を用いる。

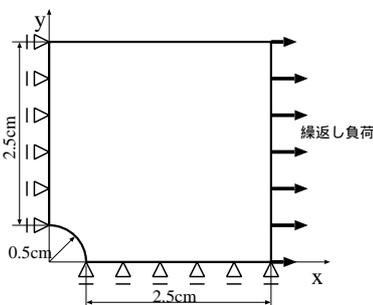


図3 解析対象

図4上段に示すように、複合硬化域において全ひずみ硬化係数 $H'_{tot}(=H'+H'_k)$ が相当塑性ひずみに対して一定(model1)と比例減(model2)の2種類の複合硬化モデルを仮定する。既存手法による単純引張の相当応力-相当塑性ひずみ曲線を図4下段に示す。

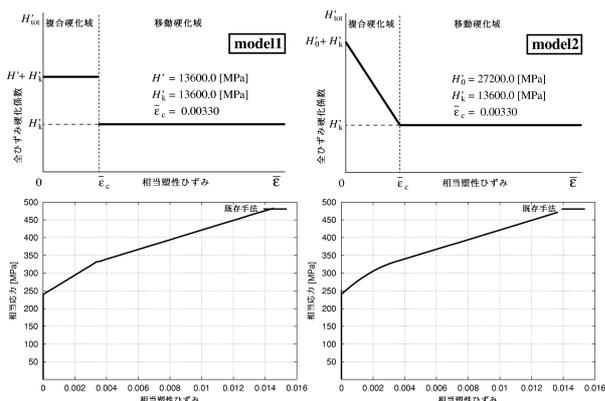


図4 複合硬化モデル

model1では、塑性の進行度合いにより複合硬化域と移動硬化域の2種類の全ひずみ硬化係数に対応する構成則データベースを構築する。model2では、複合硬化域を5分割し、各区間の中間点での全ひずみ硬化係数を用い5種類の値に対応するデータベースを構築することにより直線近似を行う。複合硬化域と移動硬化域の判定および複合硬化域における分割区間の判定には相当塑性ひずみを用いる。構成則データベースは各応力成分0.5[MPa]きざみで構築する。

相対誤差 既存手法とデータベースを用いる手法の、円孔上端部の積分点における、繰返し負荷による応力-ひずみ曲線を図5に示す。最終状態における各積分点の相当応力を比較したときの相対誤差をプロットしたものが図6である。両者共に円孔周辺部で相対誤差が最大となり、その値はmodel1では1.34%、model2では0.56%である。これより十分な解析精度が得られることが確認できる。

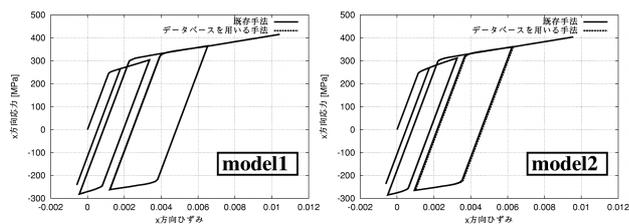


図5 応力-ひずみ曲線

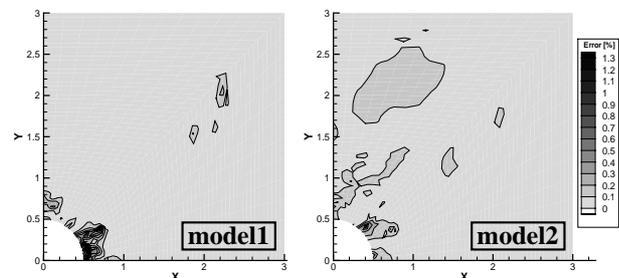


図6 相対誤差

作成時間の比較 マトリクスおよび各ベクトル成分の作成時間を既存手法とデータベースを用いる手法で比較したグラフが図7となる。作成時間は各作成モジュール実行回数150000回当たり換算した数値である。データベース参照への置き換えにより、両者共にそれぞれ約52%と約42%の作成時間の短縮が確認できる。

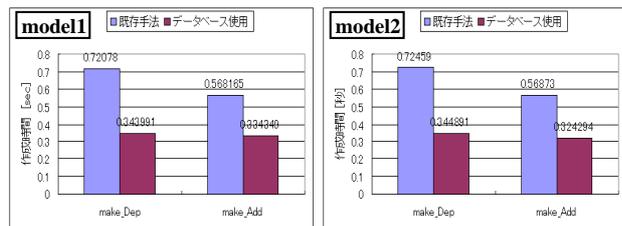


図7 作成時間の比較

5. まとめ

構成則データベースを用いる本手法の十分な解析精度と、数値演算をデータベースの参照に置き換えることによるマトリクス作成時間の短縮を確認することができた。

6. 謝辞

本研究は2000年度筑波大学学内プロジェクト助成研究(B)の助成を受けました。本研究は筑波大学学術情報処理センターのスーパーコンピュータ富士通 VPP-5000の使用により可能となりました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 亀田敏弘・尾崎孝宏:”構成則データベースに基づく有限要素解析に関する研究”, 応用力学論文集, Vol.3, pp.637-644, 2000-8
- 2) O.C.Zienkiewicz 著, 吉識雅夫・山田嘉昭訳: 基礎工学におけるマトリクス有限要素法, 培風館, 1975
- 3) D.R.J.Owen/E.Hinton 著, 山田嘉昭訳: 塑性の有限要素法, 科学技術出版, 1988
- 4) 吉田総仁: 弾塑性力学の基礎, 共立出版, 1999
- 5) 日本機械学会: 固体力学 - 基礎と応用 -, オーム社, 1987