

I-34

多結晶金属のマルチスケールCAE
-曲げ加工を受けた鉄筋の残留応力解析-

○東北大学大学院 学生員 田端大人
東北大学大学院 学生員 渡邊育夢
東北大学大学院 正員 寺田賢二郎
住友金属（株） 秋山雅義

1. 序論

金属材料は、マイクロ領域で観察される現象がマクロ材料特性に影響を与えることが知られており、スケール間の相互作用を解明することで、材料設計や材料性能の維持管理技術の高度化が期待されている。これを可能にする数学的方法論の一つとして、均質化法に基づいたマルチスケールモデリング¹⁾がよく知られており、これによればマイクロスケール内での任意の非均質性を考慮できるため、マクロ応答をより忠実に再現・評価できるという利点がある。

本研究では、均質化法に基づく多結晶金属のマルチスケール解析²⁾の考えを導入したマルチスケールCAEシステム³⁾により、鉄筋が曲げ加工を受けた際に比較的大きなマクロ残留応力を示すサンプリング点の変形履歴を用い、対応するマイクロ構造の応答を評価することで材料破断の要因について議論する。

2. 単結晶に基づく構成モデル

本研究では結晶粒内部の材料挙動として、単結晶のすべりに基づく弾塑性構成モデルを適用する。各すべり系の降伏関数には、次式を用い、一般的な非速度依存型の塑性発展則を採用する。

$$\phi(\alpha) = |\tau|^{(\alpha)} - \tau_Y^{(\alpha)} - \sum_{\beta=1}^{n_{slip}} h_{\alpha\beta} \xi^{(\beta)} \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n_{slip})$$

ここで、 $\tau^{(\alpha)}$ はすべり方向への分解せん断応力、 $\tau_Y^{(\alpha)}$ は降伏応力、 $\xi^{(\alpha)}$ は塑性履歴パラメータ（すべり系 α のすべり量）であり、 $h_{\alpha\beta}$ は硬化定数で自己硬化（ $\alpha = \beta$ ）、潜在硬化（ $\alpha \neq \beta$ ）の2種類を考える。

3. マルチスケール解析

本研究における均質化法に基づくマルチスケールCAEシステムは、通常のマルチスケール解析とは異なり、計算コスト軽減のためにマクロ・ミクロスケールの連成効果を保持しながら2つの境界値問題を別々に解析するマイクロマクロ非連成解法³⁾を用いる。この手法では、まずマイクロ構造に対してマクロ的な一様一軸応力を与えてマイクロ解析を実施して、対応するマクロ応力-ひずみ関係を得る。次いでこの数値的な関係を用いてあらかじめ選定しておいたマクロ構成則の材料パラメータを同定する。そして、このマクロ構成則を用いたマクロ塑性加工解析を行い、その結果として得られる残留応力の顕著な点のマクロ変形履歴データを用いてマイクロ解析を行う。本研究ではマクロ構成則に関連流れ則に基づく等方硬化弾塑性材料を仮定し、Misesの降伏条件を採用する。マクロ解析には汎用有限要素ソフトABAQUSを用いる。

表-1 ミクロ材料定数

弾性係数	E	[GPa]	216.5
ポアソン比	ν		0.3
降伏分解応力	$\tau_Y^{(\alpha)}$	[GPa]	0.13
自己硬化定数	$h_{\alpha\alpha}$	[GPa]	0.5
潜在硬化定数	$h_{\alpha\beta} (\alpha \neq \beta)$	[GPa]	0.7

表-2 マクロ Mises・静水圧応力値 [GPa]

	Point A		Point B	
	載荷終了	除荷終了	載荷終了	除荷終了
Mises	0.64	0.12	0.64	0.16
静水圧	0.22	-0.05	-0.36	0.11

表-3 ミクロ静水圧応力の最大値と最小値 [GPa]

	Point A		Point B	
	載荷終了	除荷終了	載荷終了	除荷終了

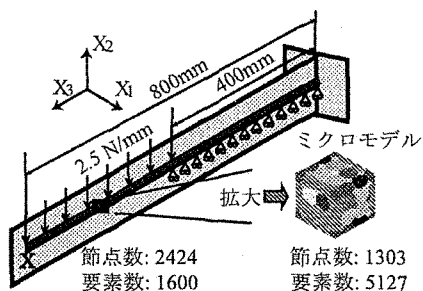


図-1 鉄筋のマクロ解析モデルとマイクロモデル

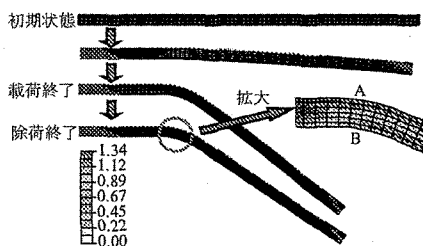


図-2 マクロ残留応力分布 -Mises Stress[GPa]-

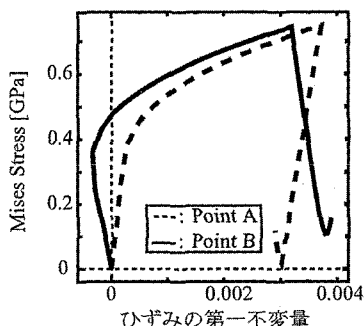


図-3 マクロ Mises 応力履歴

ことがわかる。ただし、図-6 からわかるように、A 点、B 点ともに要素の大部分は最大、最小応力より小さく、約-0.4 ~3.6[GPa]の値が多い。つまり、ミクロスケールの中でも局所的に非常に大きな応力を生じる部分があるということがわかり、この領域を起点としてマイクロ亀裂が生成され、マイクロ構造の崩壊、すなわちマクロ材料破断につながるものと考えられる。また、表-3 によるとマイクロ静水圧応力は除荷により最大、最小値のノルムが大きくなり、逆にマクロスケールの図-4 では一様にノルムが減少しており、マイクロでは逆の現象が起こる点が存在することがわかる。

4. 結論

本研究では、均質化法に基づく多結晶金属のマイクロの幾何形状を考慮したマルチスケール CAE システムにより、鉄筋が曲げ加工を受けた際マクロ的な残留応力が顕著なサンプリング点の変形履歴を用い、対応するマイクロ構造の応答を数値解析により調査した。結果、マイクロ応力はマクロ応力よりも局所的に高い値を示すということがわかった。

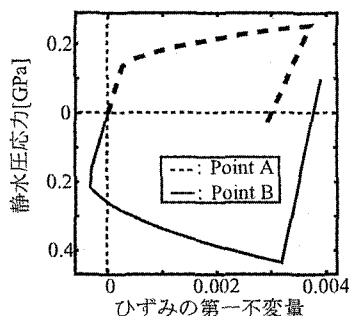


図-4 マクロ静水圧応力履歴

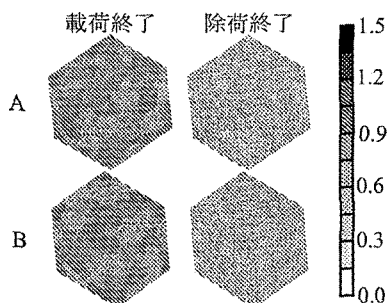


図-5 ミクロ Mises 応力分布 [GPa]-

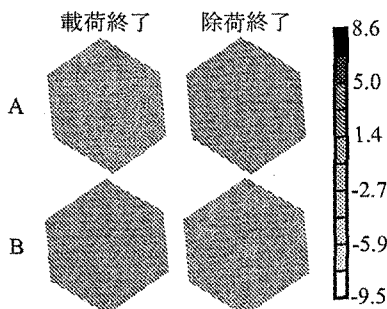


図-6 ミクロ静水圧応力分布 [GPa]

また、ミクロスケールだけに限定しても、局所的に大きな値を示す部分が存在するということが確認された。今後は、マルチスケール CAE 高機能、高精度化を目指してマクロ構成則異方性を考慮できるよう改良したうえで、ミクロスケールの応答結果から粒内及び粒間の変形状態や残留応力を詳しく調査し、マクロ変形強度特性の異方性発現のメカニズムの解明を行う。これにより、塑性加工問題のような加工法ごとに異なる変形履歴に対する材料評価への適用が期待される。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 日本計算学会, 2003.
- 2) 渡邊育夢, 寺田賢二郎, 松井和己, 秋山雅義, 根石豊: 多結晶金属のマルチスケール解析, 応用力学論文集, Vol.6, pp.239-246, 2003.
- 3) 渡邊育夢, 寺田賢二郎: 非線形均質化理論における 2 変数境界値問題のマイクロ-マクロ非連成近似解法, 応用力学論文集, Vol.8, pp.277-285.