

CS - 9 多等価直列相モデルによる破壊局所化解析での問題点

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

多等価直列相モデル（Multi Equivalent Series Phase Model: MESPモデル）はコンクリートの微視的レベルの破壊局所化現象に着目し構築した非局所型構成則であり、マイクロプレーンコンクリートモデル¹⁾（Microplane Concrete Model: MPCモデル）との形式上の等価性が示されている²⁾。本論文はMESPモデルやMPCモデルを用いたコンクリートの破壊局所化解析における問題点について整理したものである。

2. 局所型軟化構成則としての問題点

(1) 付加静的拘束条件の必要性

MESPモデルとMPCモデルでは巨視的静水圧圧縮挙動が表現できるように微視的垂直圧縮応答曲線をピーク応力がない塑性硬化タイプ（図-1の $f_m(\epsilon_N)$ ）とした場合図-2のように1軸圧縮軟化領域で再硬化現象が生じてしまう。オリジナルのMPCモデルではこれを回避するため微視的垂直圧縮応答に微視的側方偏差ひずみ ϵ_{LD} 依存性を考慮した¹⁾。図-3(a)は3軸圧縮実験での応答とそれに対するオリジナルMPCモデルによる解析結果を比較したものであるが、オリジナルMPCモデルは高拘束圧下でのぜい性-塑性遷移挙動を再現できない。そこで図-1のように微視的垂直圧縮応答が ϵ_{LD} のみならず巨視的分解側方拘束応力 S_{LC} にも依存するように、また巨視的分解直応力の増大にともなう微視的せん断応答のぜい性-完全塑性遷移が表現できるようにモデルの改良を行なった。図-3(b)はその改良MPCモデルによる3軸圧縮解析の結果であり、比較的良好にぜい性-塑性遷移挙動を表現できている。MPCモデルやMESPモデルは基本的に運動学的拘束条件に基づくものであるため構成則の概念的単純化が計れたわけであるが、静水圧圧縮挙動を含む広範な応力状態における軟化、塑性硬化挙動を統一的に記述するためには上述のようにマイクロ構成関係に対して巨視的応力から多くの拘束条件すなわち付加静的拘束条件を課さねばならず、それはモデルを過度に複雑化させ非均質材料のマイクロメカニズムに対する簡潔明快なモデル化という本構成則の利点を損ねることになる。

(2) マイクロ構成則に関する材料定数の同定法

マイクロ構成則を規定する材料定数は巨視的応答が実験結果と適合するように同定されなければならない、その合理的な同定法を確立する必要がある。

3. 非局所力学モデルとしての問題点

1軸圧縮軟化に関してMESPモデルによる構成方程式の数値解法と非局所マイクロプレーンコンクリートモデル（Nonlocal Microplane Concrete Model: NMPCモデル）による有限要素解析とを比較した場合、前者は軟化剛性の寸法効果を概ね表現できたが後者はそれを表現できなかった²⁾。すなわちNMPCモデル解析で履行される非局所空間平均化演算は勾配型非局所理論などと同様に支配偏微分方程式の楕円性を保持することが可能であり数値計算の安定化が計れるが、NMPCモデルの内部寸法と単純な空間平均化手法では寸法効果が生じる破壊局所化メカニズムを表現しえないのである。一方MESPモデルは微視的破壊局所化のメカニズムを考慮することによって巨視的構成関係の寸法依存性（寸法効果）が評価できたわけであるが、それに基づく離散化数値解析では支配偏微分方程式の楕円性が喪失し解は不安定なものとなる可能性がある。しかしコンクリート構造物の有限要素解析で問題とされるメッシュ依存性や

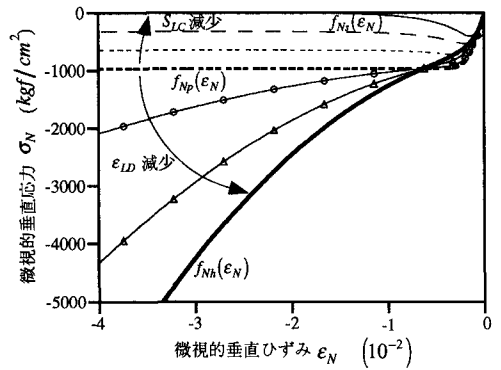


図-1 微視的垂直圧縮応答

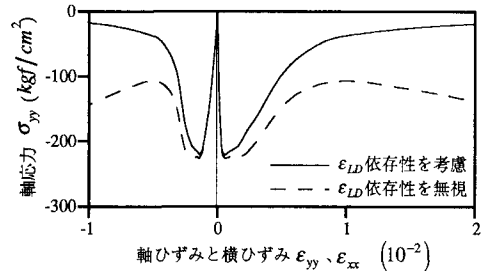


図-2 構成方程式の解法による1軸圧縮応答

寸法効果に関しては引張りびわれ破壊に対するびわれ帯モデルが多く成功を収めていることからわかるように破壊にともなう構造物内各部位の間でのエネルギー収支を適切に評価することが重要であり、その点に関してMESPモデルは有効であると考えられる。解の唯一性が失われる分岐点を見出し最も安定なつりあい経路を追跡できる数値安定性の高い求解手法の確立が重要な課題である。

4. 有限要素解析での問題点

(1) 局所化した変形場の記述

MESPモデルなどのひずみ軟化構成則を用いてコンクリートの破壊局所化状態をsub-h法的またはiso-h法的に連続体近似し有限要素解析する場合、変位の C_0 連続性を仮定する有限要素では要素内の変位場やひずみ場の記述が不十分であるばかりでなく、stress locking³⁾が生じ破壊局所化を再現できなくなる。

(2) 疑似的運動モード (spurious kinematic mode)

MESPモデルのようなひずみ軟化構成則モデルを用いた有限要素解析では、前述したように支配偏微分方程式の楕円性喪失のため求解が困難になるばかりではなく、単一有限要素の場合でさえ材料構成関係が力学的に意味しない疑似的なゼロエネルギーモード(疑似的運動モード)が生じる⁴⁾。図-4はMESPモデルを用いた初期応力法による1軸圧縮解析から得られた応力-ひずみ関係であり、構成方程式を数値解法した場合の結果と単一有限要素解析の結果が比較されている。ひずみ仮定法によるBelytschkoの1点積分有限要素⁵⁾は、ダイラタンシーにともなう非圧縮性の状態を過渡的に通過する場合に対しても有効であると考えられたが、すべての有限要素に関する解析において疑似的運動モードを抑制することができず、ひずみ軟化領域での再硬化現象が生じている。

(3) 平面応力場での面外ひずみ

MESPモデルやMPCモデルでは、平面応力場での増分応力や増分構成マトリックスを計算する場合に面外直ひずみ ε_{zz} を必要とし、有限要素解析では面外直応力 σ_{zz} がゼロであるという条件から ε_{zz} を算定しなければならない。

5. まとめ

本論文ではMESPモデルやMPCモデルを用いたコンクリートの破壊局所化解析における局所型軟化構成則及び非局所力学モデルとしての問題点、有限要素法での問題点などについて解析例をあげて述べた。

[参考文献]

- 1) Hasegawa, T. and Bazant, Z. P.: Nonlocal microplane concrete model with rate effect and load cycles. I and II, J. Mater. Civ. Engrg., ASCE, 5(3), pp.372-410, 1993.
- 2) 長谷川俊昭: コンクリートの多等価直列相モデルと非局所マイクロプレーンモデル、土木学会年次学術講演会講演概要集、第V部、pp.4-5、1993年。
- 3) Rots, J. G.: Computational modeling of concrete fracture, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1988.
- 4) de Borst, R.: Analysis of spurious kinematic modes in finite element analysis of strain-softening solids, Cracking and Damage, Strain Localization and Size Effect, pp.335-345, 1989.
- 5) Belytschko, T. and Bindeman, L. P.: Assumed strain stabilization of the 4-node quadrilateral with 1-point quadrature for nonlinear problems, Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg., 88, pp.311-340, 1991.

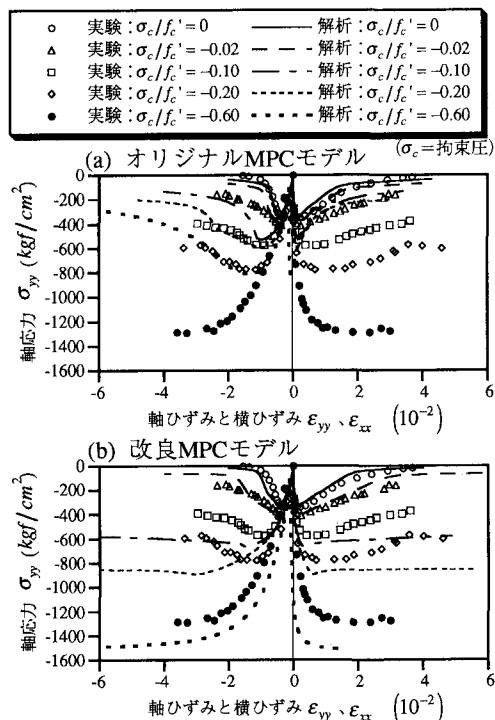


図-3 構成方程式の解法による3軸圧縮応答

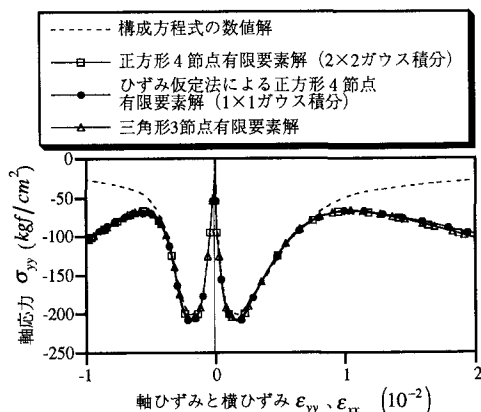


図-4 構成方程式の解法及び有限要素解析による1軸圧縮応答