

V-454

多等価直列相モデルによるセメント複合材料の引張せん断破壊解析

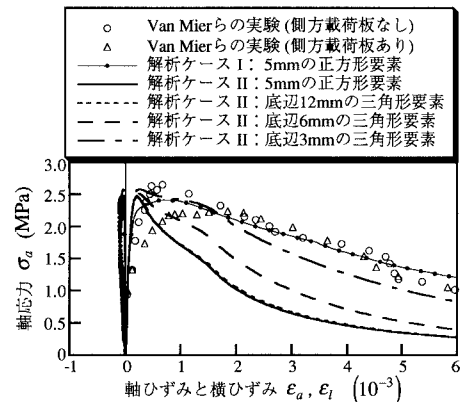
清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

セメント複合材料は混合モード形式（引張－せん断）の载荷を受ける場合でも、モードI（引張）ひび割れが卓越するが、そのひび割れ進展は破壊進行領域でのせん断特性に大きな影響を受ける。しかしながら、既往のひび割れ構成モデルには破壊進行領域でのせん断の影響を軽視しているものが多い。多等価直列相モデル（Multi Equivalent Series Phase Model: MESPモデル）¹⁾は、せん断ひずみ軟化を含めた広範な応力状態を統一的に記述することができる一般化マイクロプレーンコンクリートモデル²⁾を核とした非局所型構成則である。本論文は、MESPモデルを組み込んだ汎用有限要素解析コードDIANAを用いて、Van Mierら³⁾が実施した両側切欠き付きモルタル試験体の引張せん断実験を解析し、その引張せん断破壊について考察を加えたものである。

2. 1軸引張実験のMESPモデル構成関係解析

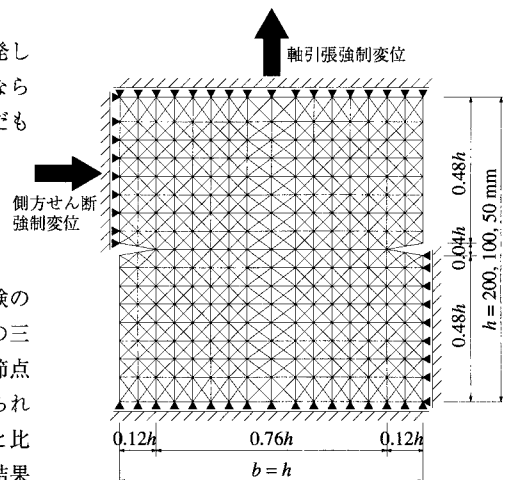
MESPモデルの材料定数を決定するためにVan Mierらの両側切欠き付きモルタル試験体の1軸引張実験を解析した。幅5mmの切欠き部のみに非線形性が局所化していると仮定し、切欠き部を含む65mmの検長において実測された開口変位から切欠き部の平均応力－平均ひずみ関係を求めた。図－1はMESPモデルの構成方程式を数値解析した結果と実験から得られた切欠き部の平均応力－平均ひずみ関係を比較したものである。MESPモデルの破壊相の長さ l^F を $2l^F = d_{\max} = 2\text{mm}$ （ $d_{\max}$ ：モルタルの骨材最大寸法）とし、解析ケースIでは切欠き部に相当する5mmの正方形要素に関する構成関係が実験結果と適合するように材料定数を決定した。解析ケースIIでは破壊相の形成する球体とはほぼ一致する底辺3mm、高さ1.5mmの三角形要素に関する構成関係が実験結果と適合するように材料定数を決定した。解析ケースIIについては三角形要素の底辺が12mm、6mmの場合に関する解析結果も示されており、MESPモデルは引張りひずみ軟化の寸法効果を表現できることがわかる。



図－1 1軸引張実験の構成関係解析

3. 引張せん断実験のMESPモデル有限要素解析

本有限要素解析コードは、オランダ応用科学研究機構が開発した汎用有限要素解析コードDIANA Version 6.1にMESPモデルならびに一般化マイクロプレーンコンクリートモデルを組み込んだものである。本研究では、軸引張変形 δ_a と側方せん断変位 δ_s の比を $\delta_a/\delta_s = 2$ としたVan Mierらの引張せん断比例载荷実験（载荷経路6b）を解析対象とした。図－2は、高さ $h = 200, 100, 50\text{mm}$ の引張せん断試験体の有限要素分割および境界条件を示したものであり、有限要素分割は1軸引張実験のMESPモデル構成関係解析で対象とした底辺が12, 6, 3mmの三角形要素を基本としている。解析では左側および上側の拘束節点に $\delta_a/\delta_s = 2$ とした強制変位を与えた。図－3は、解析から得られた各試験体の軸引張荷重 P_a と軸引張変形 δ_a の関係を実験結果と比較したものである。 $h = 200\text{mm}$ に対する解析ケースIは実験結果と比べて軸引張じん性能を過大評価しているが、解析ケースIIの軸引張応答は実験結果を非常に良好に再現している。この両解析



図－2 引張せん断試験体の有限要素分割および境界条件

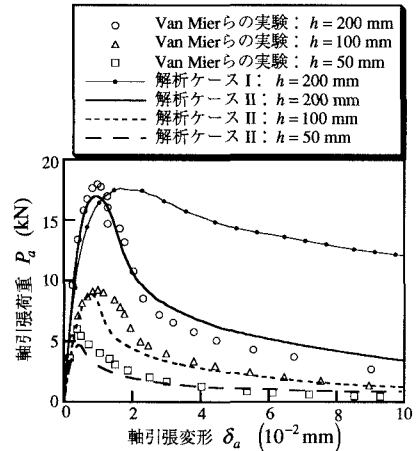
ケースの違いは、局所化を伴った実験結果のregularizationおよびそれに基づく局所または非局所の力学モデルを構築する難しさを示すものである。解析ケース II は $h=100$, 50 mm の最大軸引張荷重 $P_a^{\max}$ や軟化剛性の寸法効果についてもほぼ妥当な予測を与えており、セメント複合材料が混合モード形式（引張－せん断）の荷重を受ける場合にも引張応答そのものはあまり大きな影響を受けないことが再現されている。図－4 は、各々の h に対する側方せん断応答の解析結果を実験結果と比較したものである。荷重初期の側方せん断応答は実験値によく一致しているが、 $P_a^{\max}$ 時に側方せん断荷重 P_s の一時的な低下が現われその後また再硬化しているため、実験結果と解析値は大きな差異を生じている。解析ケース II の $h=200\text{ mm}$ の場合はそうでもないが、明かに解析では側方せん断耐力を過大評価している。図－5 は、 $h=50\text{ mm}$ の場合の増分変形、正の最大主ひずみの分布、負の最小主応力の分布であり、 $P_a^{\max}$ 後、 $P_a/P_a^{\max}=0.2$ となった荷重ステップにおけるものである。本解析は実験で確認されている特徴的な重なり合った2本のひび割れの局所化現象を良好に再現しており、前述した過大なせん断耐力がstress lockingやせん断軟化構成関係の問題に起因するものではないことが理解できる。しかしひび割れ領域およびその先端領域は側方せん断によって生じる圧縮場（圧縮ストラット）のためにひび割れ進展が妨げられた状態になっており、これがせん断応答を硬化させていると考えられる。

4. まとめ

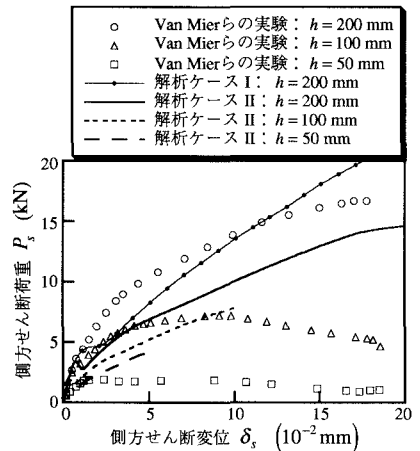
多等価直列相モデルを組み込んだ汎用有限要素解析コードDIANAを用いて、両側切欠き付きモルタル試験体の引張せん断破壊解析を実施した。本解析では軸引張応答やその寸法効果、重なり合った2本のひび割れの局所化現象を良好に再現できたが、側方せん断によって生じる圧縮場のために側方せん断応答が過大評価される結果となった。

【参考文献】

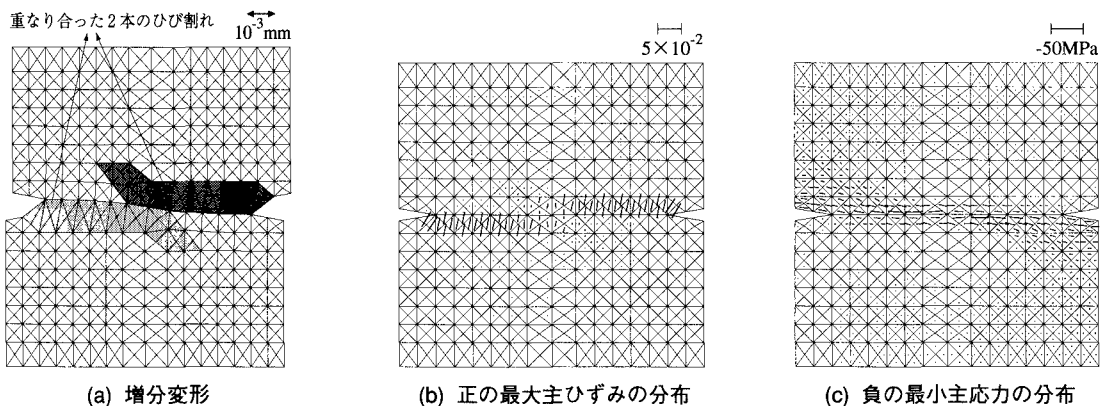
- 1) 長谷川俊昭：コンクリートの非局所型構成則としての多等価直列相モデル，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，第V部，pp.18-19, 1992年。
- 2) 長谷川俊昭，前川宏一：一般化マイクロプレーンコンクリートモデルの検証，土木学会論文集，No. 538/V-31, pp.149-168, 1996年 5月。
- 3) Van Mier, J. G. M., Nooru-Mohamed, M. B., and Timmers, G.: An experimental study of shear fracture and aggregate interlock in cementbased composites, *HERON*, Vol. 36, No. 4, 1991.



図－3 引張せん断試験体の軸引張応答



図－4 引張せん断試験体の側方せん断応答



図－5 引張せん断試験体の有限要素解析結果（ $h=50\text{ mm}$ ）