

名古屋大学工学部 正員 川本 敏 乃
 清水建設株式会社 正員 〇今津 雅 紀
 琉球大学工学部 正員 渡嘉敷 直 彦

1. 緒言

ひずみ軟化現象は連続体の物性として表現されるのではなく、粒状体の各粒子がカラストロフィックに変形・移動することに伴い、生ずる構造的な特性ではないかと考えられるようになってきている。ひずみ軟化をしている各要素は、それ自身が構造不安定となるのであり、全体構造物が安定であれば他の要素はピーク前の強度を有しており、ひずみ軟化した要素から配分された過剰応力を支えている。こうして現実のひずみ軟化現象においては、媒体がもはや連続体でなくなるにもかかわらず、数値解析では連続体として取り扱わねばならず、大きなギャップを伴っている。本研究では、岩質材料の三軸圧縮下における軟化現象を含む圧縮破壊挙動を実験的に解明し、その特性を構成法則として導入することにより、変位制御型の三軸圧縮試験の数値シミュレーションを行い、比較検討している。

2. 実験概要

供試体としては、セメントモルタルを選び、普通ポルトランドセメントと豊浦標準砂を用いて、水：セメント：砂=0.65：1：2の重量配合比で、φ

50×100 mmの円柱体をつくり、27日間水中養生ののち、3日間空中養生、材令30日で試験した。このモルタルの諸特性を表1に示す。載荷は、フサビを水平方向に微動させる機構の高剛性圧縮試験機を用いて、三軸状態で行った。なお、ひずみ速度は、 1.67×10^{-5} / secとし、端面拘束の状態で行った。

3. ひずみ軟化特性とその定式化

本研究で行った剛性三軸圧縮試験結果から、比較的低拘束圧のモルタルの場合に軟化現象があらわれ、拘束圧の増加に伴い破壊強度、残留強度が増大すること、およびそれらに対して、我々が行った実験の範囲内の静水圧下においては、図1に示すように、線形のMohr-Coulomb破壊規準でほぼ近似できることがわかった。そこで、三軸圧縮試験供試体を数値シミュレーションするにあたって、応力-ひずみ関係のモデル化を行うため、以下のような仮定・理想化をした。

- 1) 破壊強度（軟化開始点）および残留強度（変動開始点）はともにMohr-Coulomb破壊規準で近似する。
- 2) 応力-ひずみ関係は、図2に示すように、3本の直線で理想化する。
 (ただし、非線形性をうまくフィットさせるには、Saenzの式が望ましい)
- 3) 軟化領域における応力経路は、側圧一定または最小主応力一定にて、破壊強度から残留強度に低下するものとする。
- 4) 引張破壊および破壊後の構成要素は、引張応力に抵抗し得ないいわゆる no-tension 材料として考える。

4. F. E. M. による解析

上記の定式化を用いて数値シミュレーションを行う場合には、対象とする供試体に加えられる荷重または強制変位を、その履歴に従って分割して段階的に与えることが望ましい。ここでは上端面に強制変位を与える方法を

表1. 物質定数

	S_c MPa	S_t MPa	E_0 MPa	ν	f_t kgf/cm^2	w %	V_p km/s
MORTAR	34.4	1.7	6.9×10^4	0.19	219	10.0	4.0

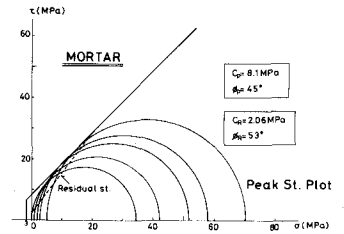


図1. 破壊規準

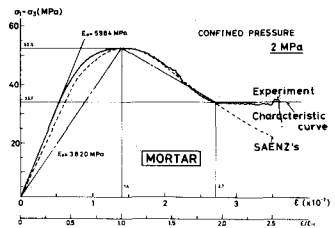


図2. 応力-ひずみ関係の定式化

採, たのど, その解析手順を簡単にしする。

1) 現段階までの応力を $\{\sigma_i\}$, ひずみを $\{\epsilon_i\}$ とする。

2) $\{\sigma_i\}$, $\{\epsilon_i\}$ に増分強制変位によ, 2生じる増分応力 $\{\Delta\sigma_i\}$, 増分ひずみ $\{\Delta\epsilon_i\}$ を加え, 応力 $\{\sigma_i\}$, ひずみ $\{\epsilon_i\}$ を得る。応力 $\{\sigma_i\}$ が破壊規準を越えているか否かをチェックし, 越えていないときは, 次の増分変位を与える。

3) 規準を超えた場合には, 応力分配法により仮定した応力-ひずみ関係に収束するまで繰り返して計算する。²⁾

5. 数値解析の結果と実験結果の比較検討

解析法の妥当性を検討するために, 図3に示した要素分割の軸対称モデルを考え, y軸方向のみ強制変位を段階的に与えて, 変位制御の三軸圧縮試験のシミュレーションを行, た。制圧2MPa時の材料定数は, 実験からつぎのように得られている。

- 弾性域の変形係数 $E_1 = 3968 \text{ MN/m}^2$
- 軟化域の負の傾斜の変化率 $E_2 = -0.44 E_1$
- 破壊強度に対するせん断強度 $C_p = 8.1 \text{ MPa}$ 破壊強度に対する内部摩擦角 $\phi_p = 45^\circ$
- 残留強度 " $C_R = 2.1 \text{ MPa}$ 残留強度 " $\phi_R = 53^\circ$

この拘束圧に対する軟化域・流動域の発達の様子を図4に示す。図は, 加圧面の強制変位量に従, 2示してある。実験で得た供試体の破壊形状(せん断破壊形状)と, 解析によ, て得た軟化・流動域の広がる状態を比較し考察すると以下のようなのである。供試体は, その中央部分から発達した破壊域が表面にまで達して変形を増加させることによって, 加圧面下のまだ破壊に至らない剛性の高いくさび形の領域が中央部の塑性域に押し込まれる状態になる。その後, 端面付近に生じた微小フラックの発生も加わ, て, せん断破壊を起す。

図5は, 供試体の図に示す要素Aにおける応力-ひずみ関係である。わずかに解の乱れはあるものの, ほぼ仮定した通りの応力-ひずみ関係に収束していることがわかる。制圧2MPaにおける平均荷重強度と軸方向変形量との関係を図6に示す。図6は, 実験で得られた応力-ひずみ曲線と理想化したものと, 解析で得られた反力-変形量の関係を比較している。解析に適用する際, 弾性係数として割裂弾性係数を用いて3つの直線と理想化したこともあ, て, 両者は完全なる一致をみない。しかし, 解析では, 破壊強度が46.5MPaであり, そのときの軸ひずみが 1.4×10^{-2} であるのに対し, 実験値では, 破壊強度が49.7MPa, 軸ひずみが 1.5×10^{-2} でありかなりの一致がみられる。軟化領域・流動領域については, 定性的に一致すると言えるものの, 実験値とかけ離れている。これらの傾向は, 有限要素解析が連続体の力学に基礎を置いているのに対し, 不連続性の発生およびその逐次進行現象である軟化および破壊にそのまま応用している(実験で得られた応力-ひずみ関係は供試体全体を平均化したものであること)に起因するものと考えられる。

今後, 粒状体の塑性学の立場から, 岩質材料の構成方程式を導き, 数値計算への適用を考える必要がある。(参考文献)

1. Saenz, I.P. : Discussion of Equation for the Stress-Strain Curves of Concrete, A.C.I.J., Vol.61, 1964, pp. 1229-1235.
2. 川本, 石塚 : 岩質材料のひずみ軟化特性を考慮した解析について, 第14回土質工学研究発表会, G4, 349.

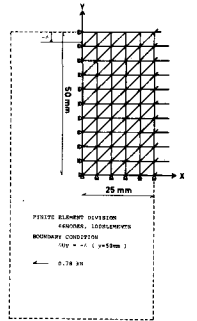


図3. 要素分割

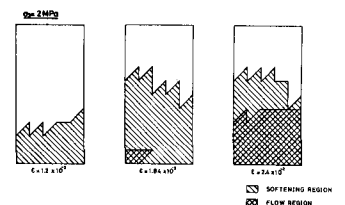


図4. 破壊域の進展

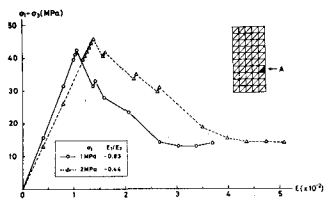


図5. 要素Aにおける応力-ひずみ関係

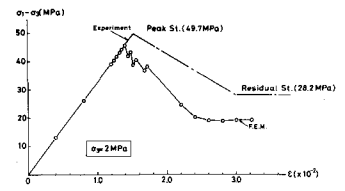


図6. 解析結果と実験結果の比較