

供試体形状が異なる飽和正規圧密粘土の三軸試験と有限要素解析

京都大学 フェロー会員 岡 二三生 京都大学 正会員 小高 猛司  
 京都大学 学生会員 肥後 陽介 京都大学 正会員 木元小百合  
 西松建設(株) 正会員 里村 知三 京都大学 学生会員 ○市之瀬知子

1. はじめに

本研究では、3次元条件下における地盤材料の変形・破壊挙動の正確な把握を目的とし、飽和正規圧密粘土の角柱供試体を用いた非排水三軸圧縮試験および本実験の有限要素シミュレーションをそれぞれ異なる供試体形状について行った。実験では、せん断中の供試体側面をデジタルカメラで撮影し画像解析によりせん断ひずみを定量化した。解析では、弾粘塑性構成式を用いた3次元有限変形水-土連成有限要素解析を実験と同じ軸対称三軸条件で行った。そして、実験と解析の結果を比較することにより、供試体形状がひずみの局所化に及ぼす影響について検討を行った。図1に供試体形状を、表1に供試体の寸法および载荷速度を、それぞれ示す。

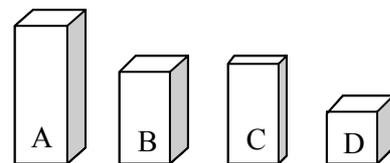


図1. 供試体形状

表1. 载荷速度および供試体寸法

供試体No.	载荷速度 (%/min)	供試体寸法 (cm)
A	0.1	4×4×12
B	0.1	4×4×8
C	① 0.1	4×2×8
	② 0.01	
D	0.1	4×4×4

2. 実験および画像解析の方法

再構成深草粘土を用いて角柱供試体を作製し、有効拘束圧 200kPa で等方圧密した後、拘束圧一定で軸ひずみ制御の非排水三軸圧縮試験を行った。設置の際、供試体に 2mm 格子を描いたゴムスリーブを被せ、せん断中、供試体の隣り合う二側面を定点カメラで撮影し、変形の様子を記録した。撮影した写真をパソコンに取り込み、デジタルソフトウエアで各格子点の座標を読み取った。その座標をもとに各格子点の変位および各要素内のせん断ひずみを計算することで、せん断ひずみの定量化および可視化を行った。

3. 有限要素シミュレーションの方法

弾粘塑性構成式には、木元らによる内部構造の変化を考慮した飽和粘土の弾粘塑性構成式<sup>1)</sup>を用いた。この構成式では、材料の不安定性を内部構造の変化と考え、内部構造パラメータ  $\sigma'_{m0}$  によって足立・岡モデル<sup>2)</sup>における降伏曲面の大きさを変化させることにより表現する。詳しくは、参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

解析法としては、有限変形理論に基づく水-土連成有限要素法を用いた。支配方程式は Biot の二相混合体理論に基づき、固相と液相の全相の釣合い式と液相の支配方程式であり、これらを Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた Updated-Lagrangian 法により定式化した。変位に 20 節点、間隙水圧に 8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。図2に供試体 B についての境界条件を示す。他の形状についても同様の境界条件である。

表2. 解析に用いたパラメータ

圧縮指数 $\lambda$	0.191
初期間隙比 $e_0$	1.10
先行圧密応力 $\sigma'_{mbi}$	200(kPa)
粘塑性パラメータ $m'$	24.3
破壊応力比 $M^*_f$	1.14
変相応力比 $M^*_m$	1.14
初期せん断弾性係数 $G_0$	17700(kPa)
内部構造パラメータ $\beta$	10.0
膨潤指数 $\kappa$	0.043
初期圧密応力 $\sigma'_{m0}$	200(kPa)
静止土圧係数 $K_0$	1.0
粘塑性パラメータ $C$	$5.8 \times 10^{-10} (1/s)$
内部構造パラメータ $\sigma'_{mat}$	170(kPa)
透水係数 $k$	$1.63 \times 10^{-9} (m/s)$

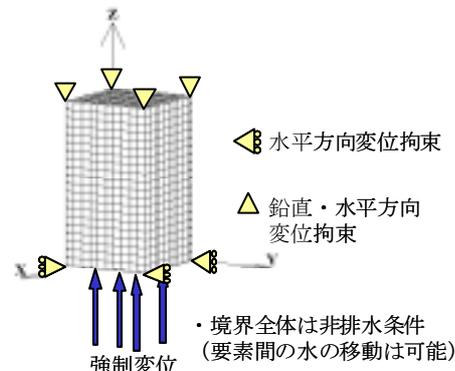


図2. 有限要素解析の境界条件

#### 4. 実験および解析結果の比較

図3に供試体A～Dについて、実験および解析で得られた軸ひずみ16%における供試体側面のせん断ひずみ(偏差ひずみの第二不変量)分布図と実験後の供試体写真を示す。なお、解析結果も実験と同様に側面の変位からせん断ひずみを求めている。図中の矢印および記号I, IIは撮影方向である。供試体B(図3.(b))について、実験結果を見ると、写真からは樽型に変形しているように見えるが、せん断ひずみの分布図を見ると、供試体上下端面から大きくX型にせん断帯が現れていることがわかる。解析結果も実験と同様X型の局所化モードとなった。また供試体D(図3.(d))を見ると、Bと同様に供試体上下端面からひずみの局所化が見られ、解析はこのモードを精度良く表現している。供試体BやDのように[供試体長/供試体短辺長](以下縦横比とする)の小さい形状については実験と解析の結果が良く似た結果となることが分かった。

一方、供試体A(図3.(a))については、実験では座屈のようなモードであるのに対し、解析では上下に2つ、X型のせん断帯が生じている。また供試体C-①(図3.(c))についても、供試体Aと同様座屈のようなモードに見えるが、側面Iを見ると座屈による折れ曲がりのひずみに加え、解析結果に見られるようなX型のひずみの局所化も確認できる。図4に供試体Cについて载荷速度0.01%/minで行った実験および解析結果を示す。この载荷速度での実験では座屈のようなモードにはならず、供試体Bに見られたようなX型のせん断破壊を生じており、解析結果と類似している。縦横比の大きな供試体AやCの実験では解析に見られるような対称な変形モードから離れ、座屈モードに分岐し易いが、C-②(図4)のように対称に変形が進む場合もあり、そのモードは解析で得られるモードとよく似ていることが分かった。実験と解析との差の原因として、実験における初期不整の影響も考えられる。载荷速度がひずみの局所化に与える影響については別報<sup>3)</sup>を参照されたい。

#### 5. まとめ

形状の異なる粘土角柱供試体を用いた三軸試験とそのシミュレーションを行い、比較検討を行った結果、縦横比が小さい形状の場合は解析結果と類似した変形を生じることが確認された。一方、縦横比が大きい形状の場合は、座屈モードに移る場合が多いが、C-②のように座屈モードではなく比較的対称に変形する場合もあり、そのモードは解析で得られるモードとよく似ていることがわかった。

**参考文献** 1)木元・岡, 粘性土の内部構造劣化による圧密中の不安定挙動と圧縮帯の形成, 第38回地盤工学研究発表会講演概要集, 2003. 2)Adachi, T. and Oka, F., *Soils and Foundations*, 22(4), pp.57-70, 1982. 3)市之瀬・岡・小高・里村, 角柱供試体を用いた正規および過圧密粘土の三軸試験によるひずみの局所化の観察, 第38回地盤工学研究発表会講演概要集, 2003.

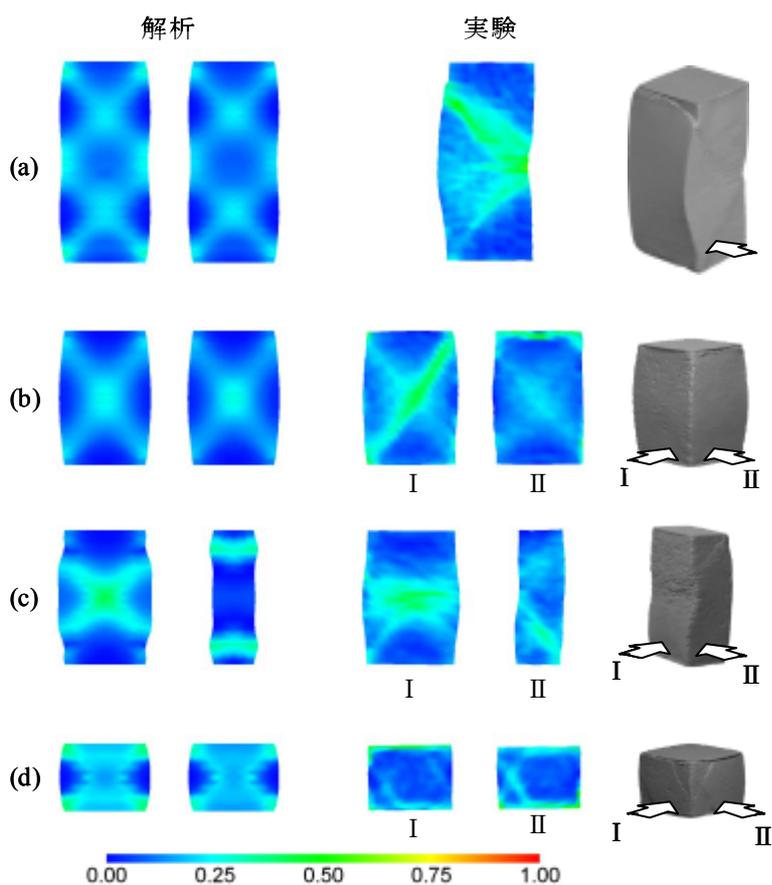


図3. 解析および実験におけるせん断ひずみ分布図, 試験後の供試体写真(A, B, C-①, D)

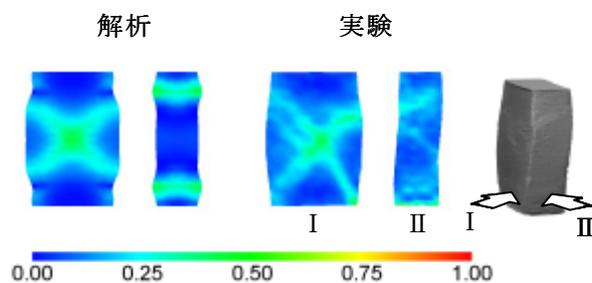


図4. 解析および実験におけるせん断ひずみ分布図, 試験後の供試体写真(C-②)