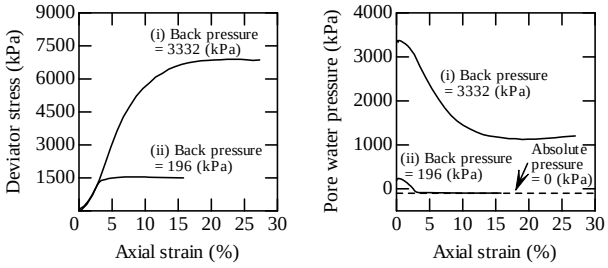
背圧の大きさが異なる密詰め砂供試体の力学挙動の違いに関する数値シミュレーション

名古屋大学　　フェロー会員　○野田　利弘　　学生会員　吉川　高広

１．はじめに

図-1 は，三軸試験機を用いて，同一の有効拘束圧 98kPa の下で行なった密な砂の側圧一定条件下の非排水せん断挙動 [1]で，(i)背圧が十分な場合と(ii)不十分な場合の比較を示している．(i)の背圧が十分な場合は，ゲージ圧としての間隙水圧が正値を保ったまま，最終的には軸差応力がほぼ一定になっている．一方で，(ii)の不十分な場合は，ゲージ圧としての間隙水圧の大きさがゼロに近づく軸ひずみ約 3%あたりから軸差応力の増加量が減少し，真空を基準とする絶対圧力がゼロに到達するときには，軸差応力が増加しなくなっている．このような背圧の違いにより力学挙動に違いが生じる理由を，空気～水～土骨格連成有限変形解析コード[2]を用いて，飽和土の試験といえども，少量は存在している「空気」に注目して説明する．



(a) 軸差応力～軸ひずみ関係　　(b) 間隙水圧～軸ひずみ関係

図-1　背圧の影響を受ける密砂供試体の非排水せん断 [1]
（(i)背圧が十分な場合，(ii)背圧が不十分な場合）

２．解析条件

図-2 は計算に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す．計算は簡単のため，円筒供試体と載荷条件の上下・軸対称性を仮定して供試体の 1/4 断面を用いて行う．重力の影響は無視した．上端は剛・摩擦のペデスタルの条件を表現するために節点間に束縛条件（長さ不変，角度不変）[3][4]を課し，隅角部に変形の自由度を上げるための処理 [5]を施した．せん断時は，水理条件は非排水条件，空気に関する境界条件は非排気条件とした．表-1 は土骨格の構成式 SYS Cam-clay Model[6]に関する材料定数および初期状態を示す．三河珪砂 6 号の弾塑性パラメータ・発展則パラメータ [4]で，構造を有しない密な状態を設定した．初期の飽和度は 99.90%に設定し，せん断時も飽和度は高い状態を保つため，紙幅の都合上，水分特性に関する材料定数は省略する．ただし，水分特性に関するパラメータは Carsel と Parrish[7]の sand のパラメータを参考にして設定している．飽和透水係数は，1.0×10^{-5}m/sec とした．ここで，初期状態とは，セル圧 220kPa，背圧（間隙水圧）200kPa の状態である．この状態から非排水（・非排気）条件で，セル圧を 2.0kPa/sec の速さで，(i)2100kPa まで上昇させた供試体と，(ii)300kPa まで上昇させた供試体をつくる．このとき B 値も算出する．次に，背圧（間隙水圧）を，(i)では 2000kPa，(ii)では 200kPa まで下げ，有効拘束圧 100kPa で圧密させる．背圧は所定の値まで 1 分間で減少させ，その後 30 分間圧密させた．最後に，側圧一定条件下で軸変位を定率 0.1cm/min で上端のペデスタル中央部（すなわち図-2 では左端の節点）に与える．つまり，実際の実験と同様に，一つの初期状態からセル圧や背圧（間隙水圧）を制御することで，(i)背圧が大きい場合：側圧 2100kPa，背圧 2000kPa の状態（このときの飽和度は 99.99%）と(ii)背圧が小さい場合：側圧 300kPa，背圧 200kPa の状態（このときの飽和度は 99.90%）の供試体をつくり，それぞれを非排水せん断して，両者の結果を比較した．また，参考までに算出した B 値は，(i)では 0.999，(ii)では 0.996 であった．

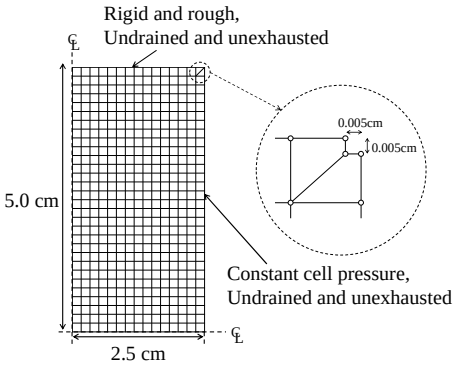


図-2　有限要素メッシュ図と境界条件

表-1　材料定数および初期状態

Elasto-plastic parameters		
Specific volume at q=0 and p'=98.1kPa on NCL	N	1.98
Critical state constant	M	1.0
Compression index	$\tilde{\lambda}$	0.05
Swelling index	$\tilde{\kappa}$	0.012
Poisson's ratio	ν	0.3
Evolution rule parameters		
Degradation index of overconsolidation	m	0.06
Degradation index of structure	a (b=c=1.0)	2.2
	c_s	1.0
Evolution index of rotational hardening	b_r	3.5
Limit of rotational hardening	m_b	0.7
Initial conditions		
Degree of structure	$1/R_0^*$	1.0
Overconsolidation ratio	$1/R_0$	500.0
Stress ratio	$\eta_0 (= q_0/p'_0)$	0.0
Degree of anisotropy	ζ_0	0.0
Void ratio	e_0	0.823

キーワード　空気～水～土骨格連成解析，超過圧密土，背圧
連絡先　　〒464-8603　名古屋市千種区不老町工学部 9 号館 318 室　ＴＥＬ052-789-4483

３．解析結果

図-3 は，「2. 解析条件」において説明した(i)と(ii)の供試体のせん断時の見かけの挙動を示す．ここに，見かけの挙動とは供試体を 1 要素として見た場合の挙動を言う．このため，ペデスタルと供試体の境界に位置する節点の等価節点力から反力を計算し，側圧を考慮して見かけの平均有効応力，軸差応力を算定している．このとき，常に円筒形を仮定して断面補正を行っている．間隙水圧，間隙空気圧は，軸対称条件を考慮してペデスタルに接する土要素の面積平均をし，見かけの飽和度と見かけの体積ひずみは体積平均をして算出する．軸ひずみは軸変位を初期供試体高さで除した値である．また，見かけの間隙水圧～軸ひずみ関係と間隙空気圧～軸ひずみ関係には発生しうる最小の負の間隙空気圧の値（間隙水圧の最小値も本計算においてはほぼ同じ），すなわちゼロ絶対圧力に相当する-101.325kPa の位置を点線で示している．また，有効応力経路中に示した $q = \mathrm{M}_a p'$ の直線は，SYS Cam-clay Model[6]の骨格構造概念の一つである異方性が限界まで発展した際の，塑性体積圧縮と膨張の境界線である．この図から，背圧が十分に与えられている(i)の場合は，体積変化がほぼ見られないまま軸差応力が上昇し続け，典型的な飽和した密な砂の非排水挙動を示している．これに対し背圧が低い(ii)の場合は，軸ひずみが 4%において間隙空気圧と間隙水圧の値がゼロになるあたりから，空気が急激に膨張するため供試体が膨張し，軸差応力の上昇が見られなくなり，(i)と異なるせん断挙動を示す．つまり背圧が空気の膨張を引き起こすほど大きいかどうかが，二つの力学挙動の違いを生んだ．

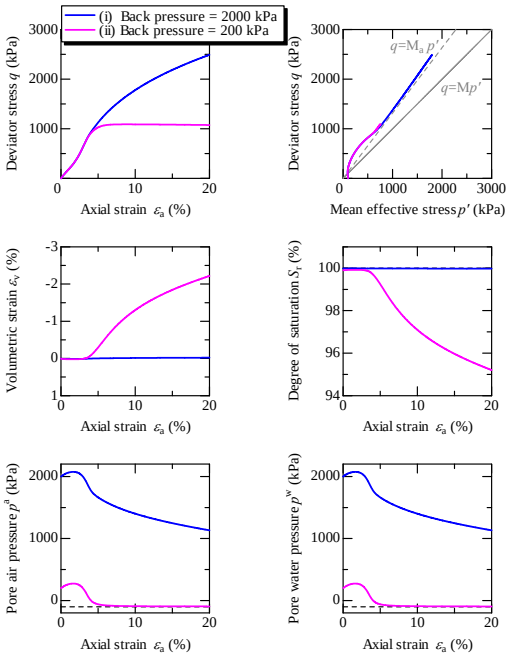


図-3 供試体の見かけの挙動
（背圧の違い）

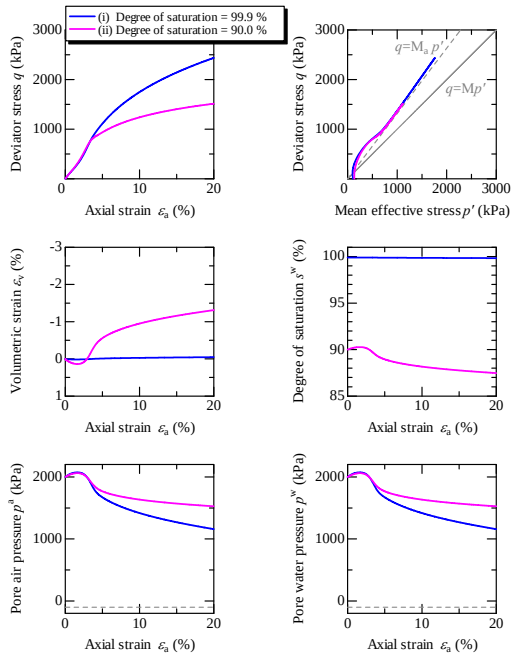


図-4 供試体の見かけの挙動
（初期飽和度の違い）

４．おわりに

密な砂の正のダイレイタンシーに着目し，厳密には不飽和状態にあるが，初期飽和度が 99.90%で事実上「飽和土」と見なされる密詰め砂供試体の側圧一定・非排水（・非排気）三軸試験のシミュレーションにより，背圧が不十分な場合は，間隙水圧が正から負へと転ずるあたりから，空気の存在による体積膨張効果が顕著になるため，供試体は膨張し不飽和土として挙動し，軸差応力の伸びが見られなくなることを示した．本結果は空気が存在していることが土の強度を低下させるとも解釈できる．図-4 は，本解析コード [2]を用いて，セル圧 2100kPa と背圧 2000kPa で初期飽和度を 99.90%と 90.00%の 2 パターンで非排水（・非排気）せん断した際の見かけの要素挙動である．飽和度が 90.00%の場合は空気が比較的多く含まれているため，正のダイレイタンシーにより土の体積が膨張し，背圧が不十分の場合と同様に強度が小さくなる結果を示した．このように超過圧密土では，空気の存在が，少量であっても力学挙動に大きな影響を与え得る点には注意したい．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 21226012，25249064 の助成を受けた．また本論文作成に当たり，名古屋大学の中野正樹教授には，実験結果について助言を受けた．ここに謝意を表します．

参考文献：1) 中野正樹ら: 密な砂供試体の…，第 19 回中部地盤工学シンポジウム，1997. 2) Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled …, *S & F*, to be submitted. 3) Asaoka et al.: Displacement/traction boundary conditions…, *S & F*, Vol.38, No.4, pp.173-181, 1998. 4) Noda et al.: Soil-water coupled…, *S & F*, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008. 5) Asaoka et al.: Soil-water coupled behaviour…, *S & F*, Vol.34, No.1, pp.91-106, 1994. 6) Asaoka et al.: An elasto-plastic description…, *S & F*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002. 7) Carsel, R.F. and Parrish, R.S.: Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics, *Water Resour. Res.*, Vol.24, pp.755-769, 1988.