

各種排気・排水条件下で制御された 不飽和三軸シルト供試体の力学挙動の数値シミュレーション

不飽和土 連成解析 有限変形

名古屋大学 学生会員 ○吉川高広, 国際会員 野田利弘

1. はじめに

排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験の結果¹⁾を参考に、土骨格の構成式として SYS Cam-clay model²⁾を搭載した空気～水～土骨格連成有限変形解析コード³⁾を用いて、不飽和シルト供試体の力学挙動の再現を試みた。その結果、三相系の枠組にするだけで、一つの初期状態から、排気排水条件、非排気非排水条件、定体積非排水条件など、複数の排気・排水条件下における不飽和三軸シルト供試体の力学挙動を概ね再現できることがわかった。

2. 計算条件

図 1 に示すように、今回は最単純の条件を想定して、三軸試験を考慮して上下・軸対称条件とし、1 要素の有限要素メッシュを用いた。材料定数と初期値は表 1 に示した。水分特性曲線式は van Genuchten 式を用い、図 2 はその概形を示す。参照実験¹⁾のサクシオンと飽和度の値に合うようにこれらのパラメータを決定した。

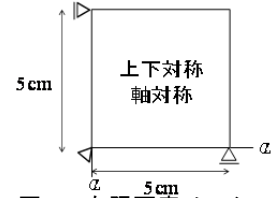


図 1 有限要素メッシュ

表 1 材料定数と初期値

弾塑性パラメータ			発展則パラメータ			初期値		水分特性曲線		物性値		
NCLの切片	N	1.98	正規圧密土化指数	m	1.3	構造の程度	$1/R_0^*$	4.7	最大飽和度 [%]	70.0	土粒子密度 [g/cm ³]	2.65
限界状態定数	M	1.23	構造劣化指数	a ($b=c=1.0$)	0.9	過圧密比	$1/R_0$	2.5	残留飽和度 [%]	5.17	水の密度 [g/cm ³]	1.00
圧縮指数	λ	0.05	構造劣化指数	c_s	0.8	応力比	η_0	0.0	α [kPa ⁻¹]	0.092	空気の気体定数 [m ³ /sec ² /K]	287.042
膨潤指数	κ	0.01	回転硬化指数	b_r	0.0	異方性の程度	ζ_0	0.0	n (m=1-1/n)	1.45	絶対温度 [K]	293.15 (20°C)
ボアソン比	ν	0.15	回転硬化限界定数	m_b								

表 2 に示すように段階を踏んで実験¹⁾を再現した。第 1 段階は供試体作成段階で、実験の初期飽和度 (約 45%) と一致させるように初期のサクシオン (25kPa) を与えた。表 1 に示した初期値は第 1 段階における値を指す。第 2 段階では、供試体を三軸試験機に設置し、非排水条件下で、セル圧 20kPa、空気圧 0kPa、つまり基底応力 20kPa を与えた。第 3 段階では、非排水条件のまま、基底応力一定でセル圧と空気圧を同時に 250kPa 上昇させた。この時点で実験において計測されたサクシオンは約 20kPa であったが、計算においても約 20kPa になった。第 4 段階では所定のサクシオンとなるように水圧を調整し、さらにセル圧を 450kPa にすることで基底応力を 200kPa まで上昇させた。以上の段階を経た供試体に対して、軸変位速度一定で各種せん断試験を行なった。具体的には、排気排水試験、非排気非排水試験、定体積非排水試験、その他にも様々に空気圧を制御させた試験を再現した。これらのせん断試験結果は次章に示す。ただし計算では、載荷速度を水と空気両方が十分に移動できるぐらいゆっくりとした速度に設定した。

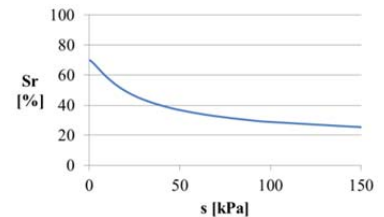


図 2 水分特性曲線

表 2 実験の手順

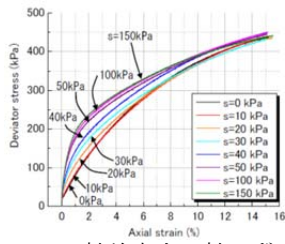
段階	セル圧 [kPa]	空気圧 [kPa]	水圧 [kPa]	基底応力 [kPa]	サクシオン [kPa]
1	0	0	-25	0	25
2	20	0	非排水	20	未計測
3	270	250	非排水 (約230)	20	(約20)
4	450	250	各水圧	200	各サクシオン
5	各種せん断試験				

3. 参照した実験結果¹⁾と計算結果

はじめに、排気排水試験の実験結果と計算結果を図 3 と図 4 に示す。計算結果は一部のみを抜粋している。実験と計算ともにサクシオンが大きくなるにつれて、強度と剛性が若干大きい挙動を示している。このような力学挙動を示した理由は、図 4(b)からわかるように、本解析コードでは有効応力として平均化骨格応力⁴⁾を用いていて、サクシオンが大きくなるにつれて平均有効応力が大きくなるためである。平均化骨格応力の式は、Bishop の有効応力式において有効応力係数を飽和度とした場合に一致する。

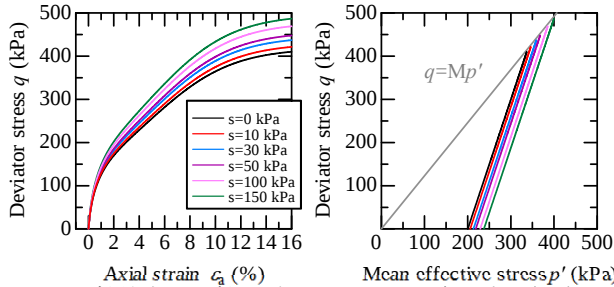
次に、非排気非排水試験の実験結果と計算結果を図 5 と図 6 に示す。軸差応力～軸ひずみ関係や有効応力経路は実験をよく再現できていることがわかる。初期サクシオンが大きいほど、軸差応力～軸ひずみ関係では強度・剛性が大きく、有効応力経路では右に進むという特徴が見られる。

最後に、様々に空気圧を制御したせん断試験の実験結果と計算結果を図 7 と図 8 に示す。参考として、非排気非排水試験と排水排気試験の結果も掲載している。参照実験においては、空気圧制御として、空気圧を緩やかに上昇させていった場合、急激に上昇させていた場合、その間の中程度に上昇させていった場合、さらには定体積になるように空気圧



(a) 軸差応力～軸ひずみ

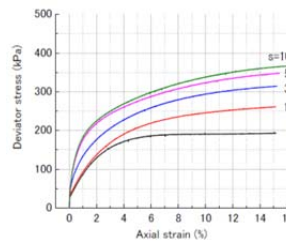
図3 排気・排水 (実験結果¹⁾)



(a) 軸差応力～軸ひずみ

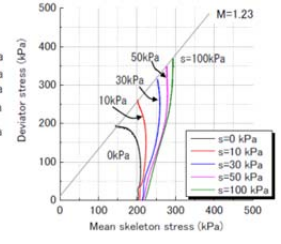
(b) 有効応力経路

図4 排気・排水 (計算結果)

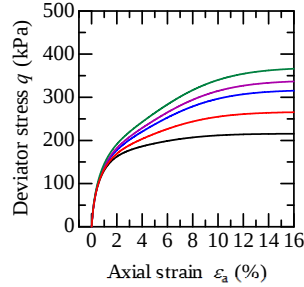


(a) 軸差応力～軸ひずみ

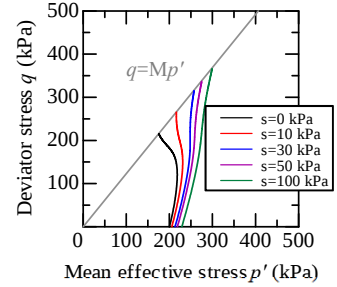
図5 非排気・非排水 (実験結果¹⁾)



(b) 有効応力経路



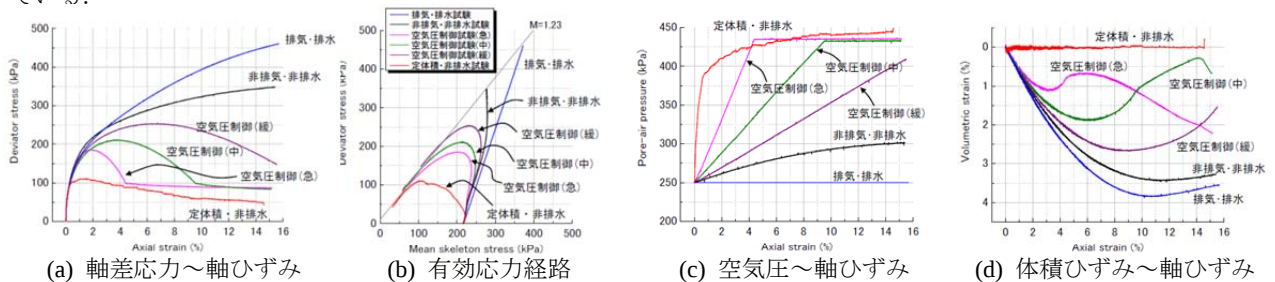
(a) 軸差応力～軸ひずみ



(b) 有効応力経路

図6 非排気・非排水 (計算結果)

を制御した場合の計4種類のせん断試験を行なわれている。具体的な空気圧の値は図7(c)に示す通りである。これと同様にして空気圧を制御した場合の計算を行なった。図7と図8の(a)軸差応力～軸ひずみ関係と(b)有効応力経路から、概ねその様子を再現できている。特に、限界状態線より下側で軟化している様子を再現できているが、これはSYS Cam-clay modelの骨格構造概念の一つである「構造」がせん断中に喪失したことに起因する力学挙動である。同図(d)の体積ひずみに関しては、具体的な数値の大きさや曲線の詳細な形状までは再現できていないものの、傾向は十分に捉えられている。



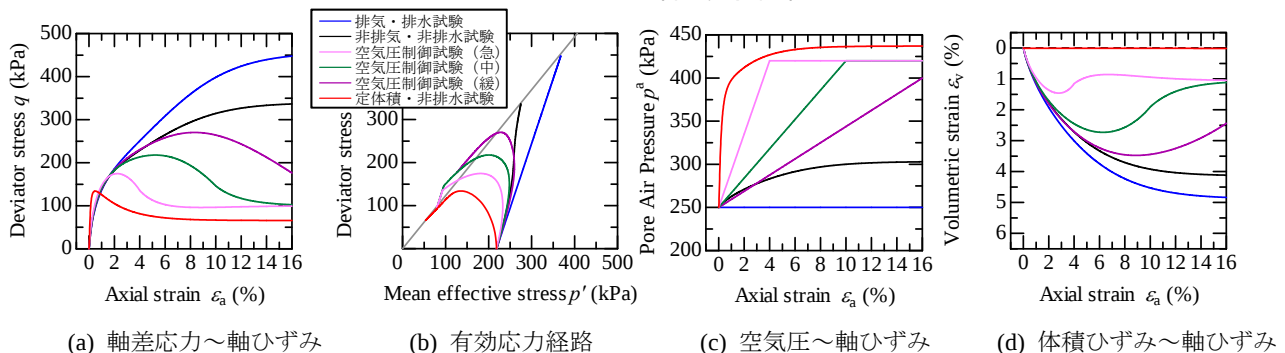
(a) 軸差応力～軸ひずみ

(b) 有効応力経路

(c) 空気圧～軸ひずみ

(d) 体積ひずみ～軸ひずみ

図7 空気圧制御 (実験結果¹⁾)



(a) 軸差応力～軸ひずみ

(b) 有効応力経路

(c) 空気圧～軸ひずみ

(d) 体積ひずみ～軸ひずみ

図8 空気圧制御 (計算結果)

4. おわりに

土の力学挙動は有効応力に支配される。不飽和土の場合は、同時に、水頭勾配（間隙水圧勾配）と空気圧勾配をそれぞれ変数に持つ二つの「ダルシー則」が土の体積変化を制御するから、自ずと飽和土よりも複雑な力学挙動が現れる。本報では、土骨格の塑性体積変化が有効応力変化に加えて骨格構造（構造・過圧密・異方性）の変化として記述される構成式を用いて、様々な排気・排水（体積拘束）条件下で示す異なる不飽和土の挙動が再現できることを示した。

参考文献 1) 小高ら(2006)：排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験，第18回中部地盤工学シンポジウム。 2) Asaoka et al.(2002)：An elasto-plastic description ..., *S & F*, 42(5), 47-57. 3) 野田ら(2012)：空気～水～土骨格連成有限変形..., 第47回地盤工学研究発表会, 335, 667-668. 4) Jommi, C.(2000)：Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, *Experimental Evidence ...*, Tarantino, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, 139-153.