

名古屋大学（正）中野正樹 野田利弘
名古屋大学（学）中井健太郎 李尚宰 渡辺寿彦
佐藤公也 二井内政典 山本大輔

1. はじめに

砂の初期状態は、同じ拘束圧でも密詰めからゆる詰めまで異なる比体積をとることができる。練返し正規圧密粘土の場合は圧密した後、除荷により過圧密状態にすることで同様の状態にすることができる。このように砂と粘土は圧縮過程が異なり、砂は締固め材、粘土は圧密材とも呼ばれる。同様に、砂は同じ間隙比でも異なる拘束圧下でも同じ比体積を容易にもつことができ、その後の非排水せん断は拘束圧によって異なっている。拘束圧に応じた非排水せん断挙動を実験によって把握し、SYS Cam-clay model により拘束圧に応じた初期構造・過圧密の程度から解釈を試みる。

2. 試料および試験方法

三河珪砂は、愛知県額田郡額田町で採取される岩石を粉砕してふるい分けた人工珪砂である。主な構成成分は SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 でその大部分を SiO_2 が占める違いにより 4、5、5.6、6、7 号があり、本実験ではすべて 6 号を用い、以下珪砂 6 号を珪砂と記述する。珪砂の物理的指数及び粒径加積曲線を表 1、図 1 に示す。

非排水せん断前初期値を表 2 に示す。供試体は、それぞれ圧密後 $\text{Dr}=30\%$ ($e=0.95$) となるように、拘束圧 49KPa を水中落下法、294KPa、490KPa を Moist Placement 法により作製した。その後、通水し飽和供試体を作製し、それぞれ拘束圧 49KPa、294KPa、490KPa にて圧密後、荷重速度 1%/min にて非排水せん断試験を行った。

3. 有効拘束圧を 3 種類変えた非排水三軸試験

同じ初期間隙比のもとで有効拘束圧を 3 種類変えた砂の非排水三軸圧縮試験結果を紹介し、砂の非排水せん断挙動に与える影響について実験結果から把握する。図 2 に試験結果（有効応力 $q \sim p'$ 関係と $q \sim \epsilon_a$ 関係）を示す。有効拘束圧によって異なる非排水せん断挙動を示している。有効拘束圧 49kPa (①) の有効応力パスを見てみると、 q の減少は見られず、 p' の増加を伴いながら q は増加し続けている（軟化せず、硬化挙動のみ）。有効拘束圧 294kPa (②)、490kPa (③) は軟化後硬化挙動が見られ、特に 490kPa は 294kPa と比べてよりピーク後の軟化の程度 (q の減少の度合い) が大きくなっている。また $q \sim \epsilon_a$ 関係図について、 $\epsilon_a=1\sim 15\%$ 付近まで 3 種類の線は拘束圧が大きくなるにしたがって線が上に位置しているが、 $\epsilon_a=20\%$ 付近で有効拘束圧 294kPa (②)、490kPa (③) の線が交わり、 $\epsilon_a=25\%$ 付近では 294kPa (②) が 490kPa より大きな q を示した。これは有効拘束圧 294kPa では間隙比 $e=0.95$ 、490KPa は間隙比 $e=0.96$ であり、294kPa の間隙比が小さいためである。

表 1 試料の物理的性質

	密度	均等係数	曲率係数	最大間隙比	最小間隙比
珪砂	2.65	1.833	0.982	1.07	0.67

表 2 せん断前初期値

	有効拘束圧(KPa)	初期比体積 v_0
珪砂－①	49	1.96
珪砂－②	294	1.95
珪砂－③	490	1.96

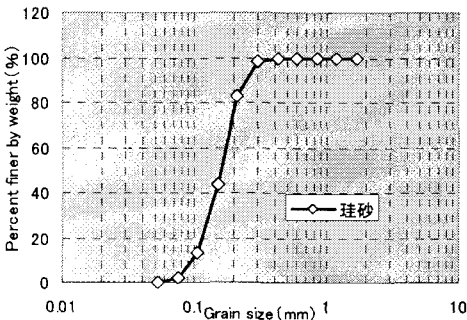


図 1 珪砂の粒径加積曲線

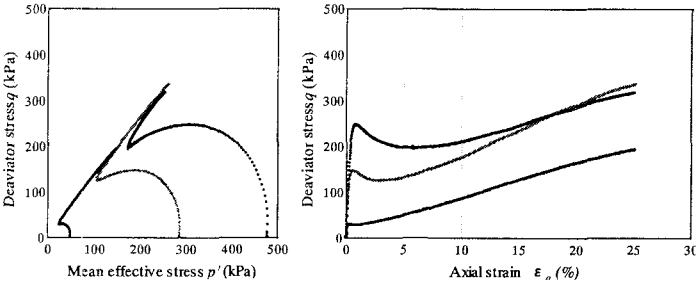


図 2 間隙比一定条件での非排水三軸試験結果

4. 上・下負荷面カムクレイモデルによる砂の非排水せん断挙動の解釈

計算において、比体積一定条件下で有効拘束圧を変えるために、初期にゆるい状態にある砂を設定 ($1/R^*=150$ 、

表 3 せん断前初期値

	繰返し回数	初期比体積	初期構造の程度	初期過圧密比	初期異方性
	n	v_0	$1/R_0^*$	$1/R_0$	ζ^0
珪砂-「a」	150	1.92	1.9	21.9	0.041
珪砂-「b」	26	1.92	3.66	3.91	0.021
珪砂-「c」	17	1.92	5.35	2.99	0.016

表 4 弾塑性パラメータ

弾性パラメータ	
圧縮指数 λ	0.05
膨潤指数 κ	0.012
限界状態定数	1
NCLの切片 N	1.98
ポアソン比 ν	0.3

表 5 発展則パラメータ

正規圧密土化指数 m	0.06
構造劣化指数 a	2.2
回転硬化指数 b_r	3.5
回転硬化限度指数 m_b	0.7

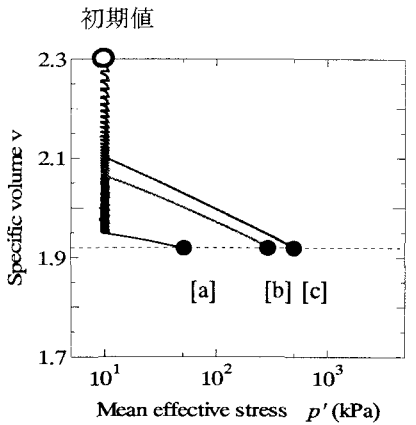


図 3 繰返しによる間隙比の設定

1/R=1) し、図 3 のように微小な応力振幅(p' const, $q = \pm 2$ kPa)で排水繰返しせん断を加え、締固めの繰返し回数と等方圧密圧力を調整した (図 3)。これは拘束圧のない状態で作製しその後振動等で締固めて砂供試体を作製する過程を模擬したものである。図中からも明らかなように、同比体積にするためには有効拘束圧が小さいほど締固め回数を多くしなくてはならない。繰返し回数によってせん断前の拘束圧に応じた初期値 $1/R$ 、 $1/R^*$ 、 ζ_0 が計算された (表 3)。ここでいう「構造」(R^*) とは、砂のかさばり具合を表したもので、ゆる詰め砂は、「構造」が高位であり、また正規圧密状態に近い。有効拘束圧の違いは、弾塑性パラメータを変えることなく、砂の状態、つまり構造・過圧密・異方性の初期値の違いで表現される。つまり拘束圧の大きい砂ほど高位構造で過圧密が小さく、逆に拘束圧の小さい砂ほど過圧密が大きく、低位な構造を有する。

図 4 は解析結果を示しており、図中(a)に応力ひずみ関係、(b)に有効応力パス、(c)(d)にせん断中の「過圧密」および「構造」の推移を示している。計算結果は実験結果を再現できている。有効拘束圧の大きい珪砂[c]は、初期に高位な構造を有しているため、せん断に伴い、構造の劣化による塑性圧縮を伴う軟化がはじめに起こり、その後、過圧密の解消により硬化してゆく。珪砂[b]は、珪砂[c]ほど構造を有していないため、初期の軟化の程度が小さく、しかし過圧密が大きいので、その後の硬化は[c]よりも大きい。拘束圧の小さい珪砂[a]は初期の構造が低位で軟化せずに、過圧密が最も大きいので硬化が卓越する。

6. まとめ

砂の非排水せん断挙動に及ぼす拘束圧依存性は、拘束圧に応じて材料パラメータを変えるのではなく、その状態、つまり構造・過圧密・異方性の程度を変えることで表現できる。拘束圧の大きい供試体は中詰め砂に、拘束圧の小さい供試体は密詰め砂と類似した挙動を示す。これは拘束圧が大きいほど高位な構造で、過圧密が小さく、拘束圧が小さいほど、過圧密が大きく構造が低位であることから明らかである。

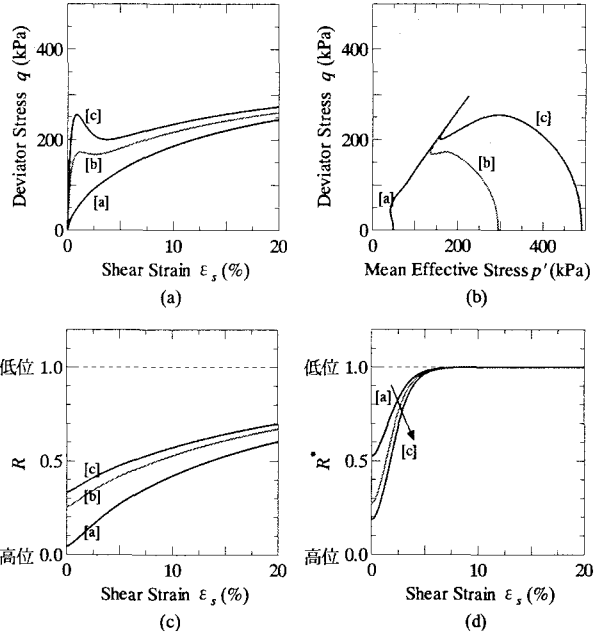


図 4 間隙比一定条件下での非排水三軸試験計算結果

1) Asaoka, A. et al.(2000): “Superloading yield surface ...”, S&F, 40(2), 99-110.
2) 中井健太郎(2004): “間隙比・有効拘束圧依存の砂の非排水せん断挙動に関する初期構造と過圧密の違いによる記述”, 中部地盤工学シンポジウム論文集, 81-90