

砂の粒径分布の違いが非排水せん断挙動に及ぼす影響

名古屋大学 正会員 浅岡 顕 中野正樹 野田利弘
 名古屋大学 学生会員 岩瀬大典

1. はじめに

飽和砂の力学特性は粒径分布の影響を受けると言われ、飽和粘土がコンシステンシーの影響を受けることと対比される。本研究では、飽和砂の非排水せん断挙動に絞って、粒径分布の影響を調べた。まず、均等係数がほぼ同じで、平均粒径の異なる3種類の砂に対し、ゆる詰め、中間詰め、密詰めの3種類の供試体を作製し、非排水3軸圧縮試験を実施した。次に砂の粒度範囲内で異なる粒径分布の砂供試体を3種類作製し、同様に非排水3軸圧縮試験を実施した。最後に、細粒分も含むシルト質砂である野間砂との比較を行った。また構造を有する土の力学挙動を記述する上負荷面カムクレイモデルに基づいて、粒径分布が非排水せん断に及ぼす影響を、初期構造や過圧密の程度や、その劣化過程に注目して、考察した。

2. 均等粒径で平均粒径の異なる砂の非排水せん断挙動

試験に用いた砂は三河珪砂と呼ばれ、主な構成化学成分は SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 でそのほとんどが SiO_2 である。試験には3種類の砂を用いることとし、それらの粒径分布を図1に、それぞれの粒径に関する情報を表1に示す。均等係数は2程度でどれもほぼ等しく、平均粒径が異なる。砂供試体は、直径5.0cm、高さ10.0cmの円柱形で、それぞれ密詰め、中間、ゆる詰めの3種類の相対密度を設定した。試験方法は、等方圧294kPaで等方圧密した後、側圧一定のもと軸ひずみ速度1.0%/minで非排水せん断試験を行うというものである。

表1 三河珪砂の粒径分布に関するパラメータ

TEST	50%粒径	均等係数	曲率係数	最大間隙比	最小間隙比
4	0.473	2.219	0.921	1.136	0.748
5	0.292	2.124	1.036	1.139	0.714
6	0.103	1.833	0.982	1.014	0.611

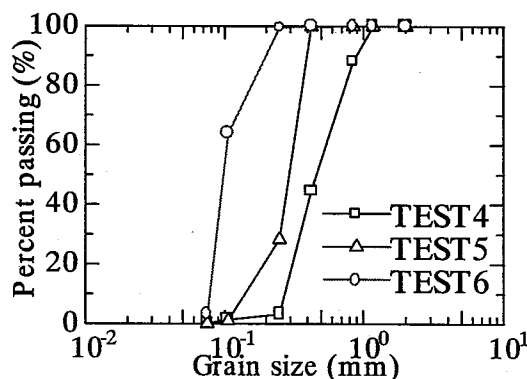


図1 三河珪砂の粒径分布

Undrained shear behavior of saturated sand with various grain sizes

Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Iwase, D. (Nagoya University)

まず、相対密度が 0 に近いゆる詰め砂の非排水せん断試験結果を図 2 に示す。ここで注意しなければならないことは、3つの供試体それぞれの最大最小間隙比は異なっているため、たとえ相対密度が同じでも、初期の間隙比は異なっているということである。さて3つの供試体ともせん断初期に軸差応力がピークを示した後軟化している。粒が大きい (TEST4-L) ほどピーク荷重は大きくなっている。図中にせん断終了時の q 、 p' から原点を通る実線も示しているが、その線の下側を軟化している。つぎに、相対密度 0.3 程度の中間密度の結果を図 3 に示す。それぞれの供試体ともに軸差応力はせん断初期にピークを示した後軟化し、再び硬化する。有効応力パスを見ると、先の実線の下側で軟化した後、上側で硬化している。粒の大きい TEST4-M は、ピーク荷重が大きく、軟化も顕著であるが、その後の硬化は僅かである。粒が小さくなるにつれ、軟化の程度が小さくなり、逆にその後の硬化の程度が増す。特に小粒の TEST6-M は過剰水圧が減少しながら硬化し続け、最終の軸差応力は 1000kPa を越える。図 4 には相対密度 0.8 程度の密詰めの結果を示す。どの供試体も初期に軟化は示さず硬化が卓越する。粒が小さくなるにつれ、最終の軸差応力は大きくなり、小粒の TEST6-D は、図中には示すことができなかったが、6000kPa 近くまで達する。

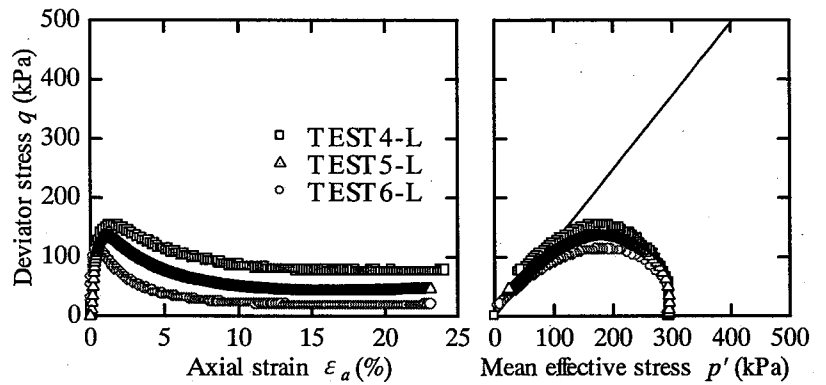


図 2 均等径のゆる詰め砂の非排水せん断挙動

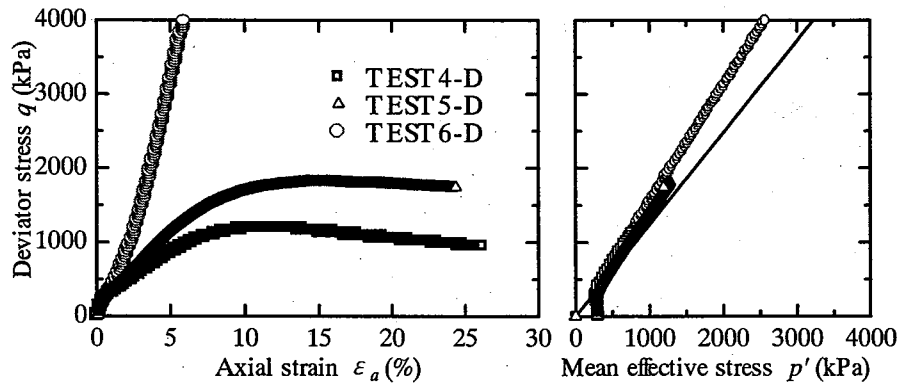


図 3 均等径の中間密度砂の非排水せん断挙動

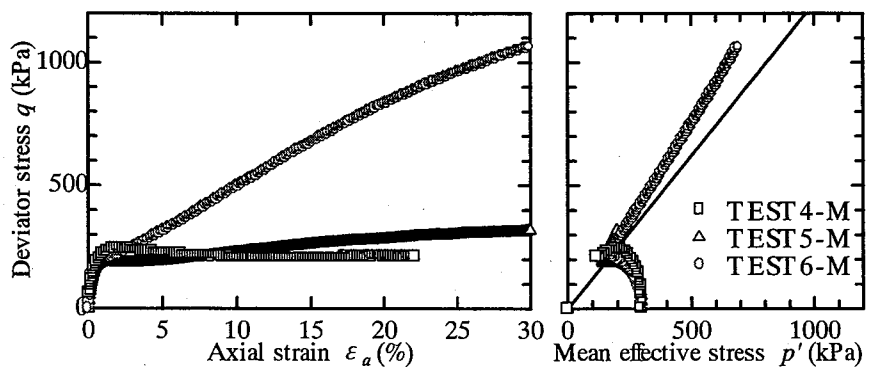


図 4 均等径の密詰め砂の非排水せん断挙動

3. 粒径分布の異なる砂の非排水せん断挙動

いわゆる砂の粒径の範囲で粒径の異なる砂の混合率を変えることにより、粒径分布の異なる供試体を作製した。図5に示す3種類の異なる粒径分布の砂供試体を示す。それぞれの粒径分布に関する情報を表2に示す。2.と同様に3種類の相対密度を設定し、試験方法も2.と同じとした。

表2 混合砂の粒径分布に関するパラメータ

TEST	50%粒径	均等係数	曲率係数	最大間隙比	最小間隙比
A	0.258	3.522	1.086	1.066	0.626
B	0.14	2.909	0.702	0.974	0.56
C	0.098	1.832	1.067	1.037	0.627

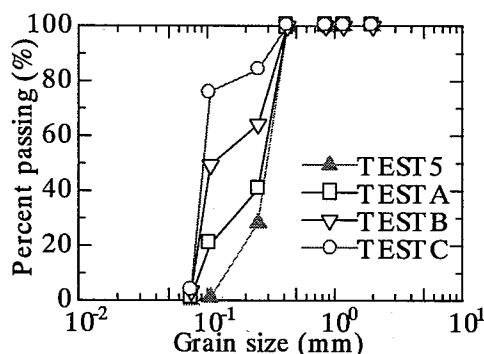


図5 混合砂の粒径分布

相対密度 0 に近いゆる詰め
の試験結果を図6に示す。軸差
応力～軸ひずみ関係や有効応
力パスに対して粒径分布の違
いの影響は顕著には見られ
ない。均等径の TEST5-L のみ
大きなピーク荷重を示し、他
の3つの供試体との違いが
現れている。相対密度 0.4 程
度の中間密度を図7に示して
いる。やはり粒径分布の違
いの影響はほとんど見られ
ないが、小さい砂粒を多く
含む TESTC-M の方が、せん
断後半の硬化過程が卓越す
る。相対密度 0.7 程度の密
詰めにおいても、ここでは結
果を示していないが、同様
に粒径分布の影響はせん断
後期の硬化過程を除いて見
られない。このように砂の粒
径範囲で粒径分

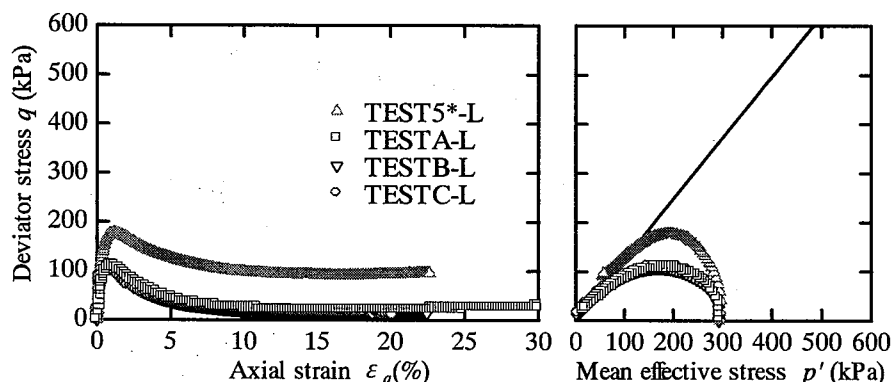


図6 ゆる詰め混合砂の非排水せん断挙動

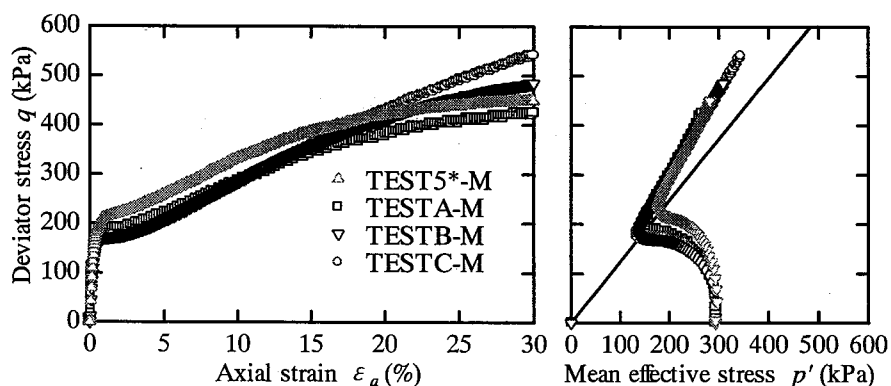


図7 中間密度混合砂の非排水せん断挙動

布を変化させると、ゆる詰めでは影響なく、密詰めではせん断後半の硬化過程に影響を及ぼす。

そこで、細粒分も含むシルト質砂である野間砂と TEST6 の比較を行った。野間砂の粒径分布は図 8、表 3 のように良配合といえる。図 9 にゆる詰め試験結果を示す。均等径の砂が軟化を示すのに対し、野間砂は軟化せず硬化のみしている。図 10 には中間密度の試験結果を示すが、有効応力パスにおける平均有効応力の増加を伴う硬化過程は、野間砂よりも均等径の砂の方が顕著に現れている。

表3 野間砂の粒径分布に関するパラメータ

TEST	50%粒径	均等係数	曲率係数
N	0.07	27.8	31.5

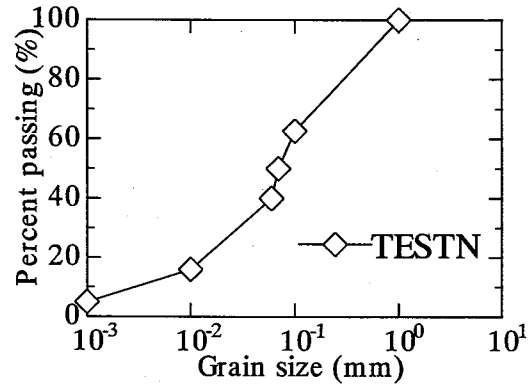


図 8 野間砂の粒径分布

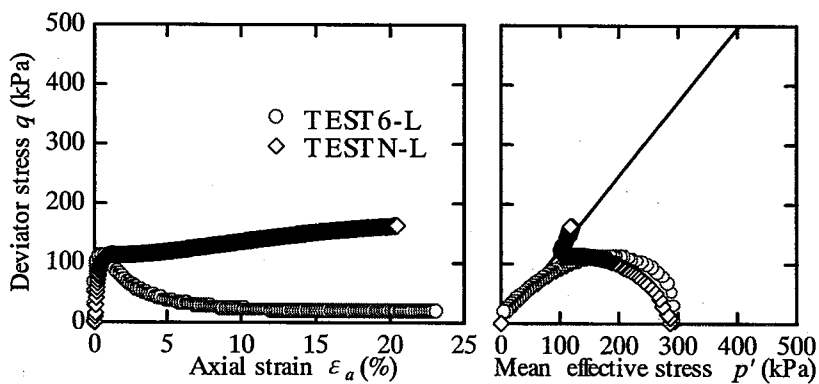


図 9 ゆる詰め野間砂の非排水せん断挙動

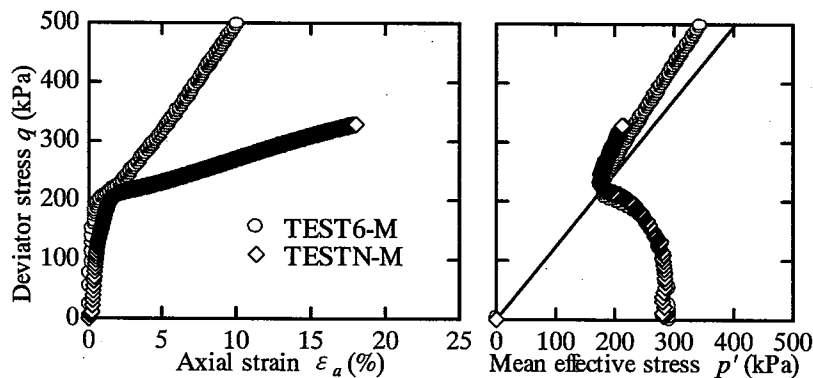


図 10 中間密度野間砂の非排水せん断挙動

4. 上負荷面カムクレイモデルによる考察

構造を有する過圧密土の力学挙動の記述する上負荷面カムクレイモデルの詳細については、文献1)に譲り、その概要を述べる(図11)。カムクレイモデルは完全に構造が喪失した土の挙動を表現し、構造を有する正規圧密土は、カムクレイ降伏面の外側に相似形の「上負荷面」を導入し、いわゆる「嵩張った状態」を表現する。これら2つの面の相似比 R^* が、「構造」の程度を表す。さらに構造を有する過圧密土は、橋口^{2),3)}にならい、上負荷面の内側に相似形の下負荷面を導入し表現する。上負荷面との相似比 R の逆数が過圧密比に相当する。土は塑性変形が進むにつれ、構造を喪失し($R^* \rightarrow 1.0$)、過圧密を解消して($R \rightarrow 1.0$)、構造のない正規圧密粘土へ戻る($R=R^*=1.0$)。ここで構造劣化を式(1)で示し、 R^* の発展則と呼び、式中の m^* はそのしやすさを表し、構造劣化指数と呼ぶ。過圧密の解消は式(2)で示され、 R の発展則、式中の m は正規圧密土化指数と呼ぶ(D:ダイレイタンシー係数)。

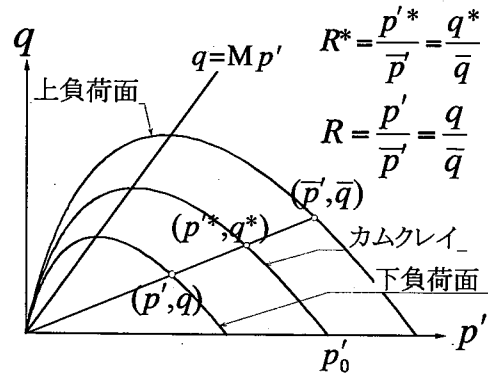


図11 上・下負荷面とカムクレイ降伏

土は塑性変形が進むにつれ、構造を喪失し($R^* \rightarrow 1.0$)、過圧密を解消して($R \rightarrow 1.0$)、構造のない正規圧密粘土へ戻る($R=R^*=1.0$)。ここで構造劣化を式(1)で示し、 R^* の発展則と呼び、式中の m^* はそのしやすさを表し、構造劣化指数と呼ぶ。過圧密の解消は式(2)で示され、 R の発展則、式中の m は正規圧密土化指数と呼ぶ(D:ダイレイタンシー係数)。

$$\dot{R}^* = JU^* \sqrt{\frac{2}{3}} \|D_s^p\|, U^* = \frac{1}{D} R^* (1 - R^{*m^*}) \dots (1)$$

$$\dot{R} = JU \sqrt{\frac{2}{3}} \|D_s^p\|, U = -\frac{m}{D} \ln R \dots (2)$$

解析は構成式に一様非圧縮変形場を与え、差分的に数値積分する¹⁾。三軸試験は要素試験とは見なせず、本来なら水～土連成での境界値問題の解を求めるべきであるが、ここでは構成式による理解にとどめる。本格的な計算は文献1)を参照。用いた弾塑性パラメータは表4を、 R 、 R^* の初期値 R_0 、 R_0^* と m 、 m^* については、境界値問題としてフィッティングした結果⁴⁾得られた(表5)。

表4 砂の土質パラメータ

珪砂	
圧縮指数 λ	0.0419
膨潤指数 κ	0.016
限界状態定数M	1.24
$N(p'_0=98\text{kPaの}v_0)$	1.99

表5 解析で用いた砂のパラメータ

試験名	1/R0	1/R0*	m	m*
Test L(c)	1	16.2	0.04	1.8
Test M(c)	12.7	4.5	0.04	1.8
Test D(c)	16.2	1	0.04	1.8

表5のように砂は密詰め、中間、ゆる詰めの3種類とした。 R_0 、 R_0^* は密度によって変化するが、 m 、 m^* は等しい。解析結果を図12に示すが、ゆる詰めにおける塑性圧縮を伴う

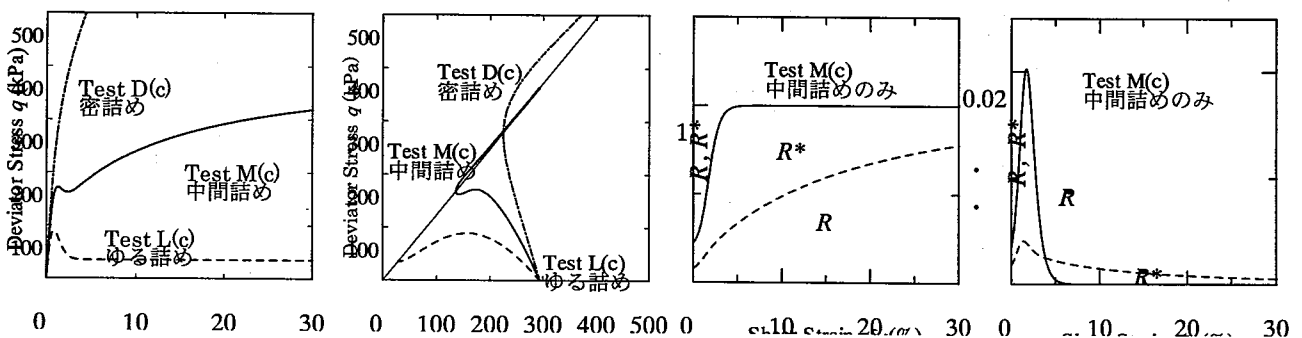


図12 密詰め、中間、ゆる詰め砂の解析結果

軟化、中位の密度でのせん断初期の塑性圧縮を伴う軟化と後期の塑性膨張を伴う硬化、密詰め
の塑性膨張を伴う硬化という砂のせん断挙動の特徴を表現している。

本モデルでは、初期構造と過圧密の劣化過程から、図 13 のように砂と粘土の違いを記述することができる⁵⁾。すなわち構造を有し過圧密状態である砂は、構造が早く喪失しその後過圧密が解消するため、せん断初期には塑性圧縮を伴う軟化とその後の塑性膨張を伴う硬化が現れる。この砂の記述に基づけば、2. で示した均等径で小粒径（細砂）である砂供試体は、相対密度を大きくするにつれ、構造は低位化し、逆に過圧密比は大きくなるため、せん断初期の軟化が見られなくなり逆に後期の硬化が卓越してくる。均等径で大粒径の砂（粗砂）は、相対密度を大きくしても過圧密比が大きくなる

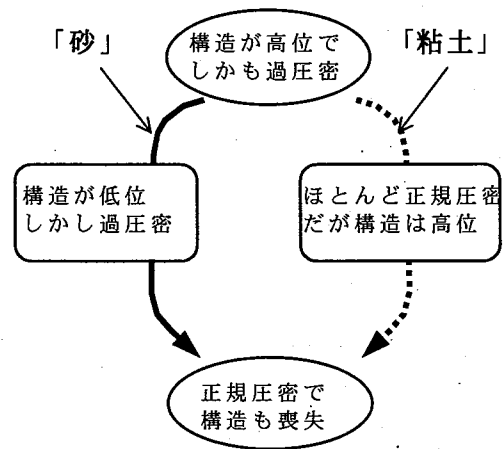


図 13 典型的な砂と粘土の推移

ため、軟化後の硬化の程度が小さいと考えられる。3. の前半の粒径分布の異なる砂については、今回のように狭い範囲での粒径分布の違いでは、顕著に力学挙動に影響を及ぼさない。しかし小粒を多く含む砂ほど、相対密度が大きくなると過圧密比が大きくなり、せん断後期の硬化が顕著となる。3. の後半の野間砂との比較については、細粒分を含む粒径分布がなだらかなるほど、せん断初期の軟化や後期の硬化が見られなくなり、いわゆる粘土に近い挙動を示すようになると考えられる。

5. 参考文献

- 1) Asaoka, A. et al.(2000): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, Soils and Foundations, Vol.40,No.2 pp.99-110.
- 2) Hashiguchi, K.(1978): "Plastic constitutive equations of granular materials", Proc. US-Japan Seminar on Continuum Mech. Stast. Appr. Mech. Granular Materials (Cowin, S.C. and Satake, M. eds.), Sendai, pp. 321-329.
- 3) Hashiguchi, K.(1989): "Subloading surface model in unconventional plasticity", International Journal of Solids and Structures, Vol.25, pp. 917-945.
- 4) 浅岡顕他(2000): 「砂と粘土の違い」に関する構造・過圧密の劣化過程から見た一考察,第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.573-574
- 5) 浅岡顕他(2000): 「砂と粘土の違い」に関する 3 軸非排水試験の弾塑性解析,第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.575-576