

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.008

# 非塑性细粒粒径与含量对饱和砂类土强度的影响\*

徐令宇<sup>1</sup>, 薛莹莹<sup>2</sup>, 潘冬冬<sup>1</sup>, 吴琪<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

**摘要:**松散状态下的饱和砂类土受剪切后出现静态液化现象,且受到细粒含量、颗粒级配、固结围压等因素的影响。而目前对于中密状态下砂类土的相关研究鲜有报道,特别是对于细粒粒径的影响研究尚少。采用福建标准砂与三种不同粒径的石英粉进行混合,开展了一系列三轴不排水压缩试验。试验中保持所有土样的相对密度相同,相对密度控制为50%,同时还考虑了细粒含量( $FC = 10\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$ )、围压(50, 100, 200 kPa)等因素的影响。试验结果表明:相同细粒含量下随着标准砂平均粒径与石英粉平均粒径比 $R_d$ 的增大( $R_d = 10 \sim 65.76$ ),最大孔隙比和最小孔隙比均有增大趋势;在细粒含量较低时( $FC = 10\%$ 和 $20\%$ ),峰值偏应力随着 $R_d$ 的增大呈现近似线性递减关系,而在细粒含量较高时( $FC = 30\%$ ),峰值偏应力在 $R_d$ 达到某个临界值迅速下降,而后基本保持不变或者缓慢下降;中等密实状态的砂类土在高细粒含量的情况下可发生静态液化,且平均粒径比 $R_d$ 越大静态液化越容易发生,因此,评估饱和砂类土的强度需要考虑非塑性细粒粒径的不利影响。

**关键词:** 细粒粒径; 细粒含量; 静态液化; 砂类土; 三轴不排水压缩试验

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0741-08

## Effects of Non-plastic Fines Size and Content on Strength of Saturated Sandy Soils

XU Lingyu<sup>1</sup>, XUE Yingying<sup>2</sup>, PAN Dongdong<sup>1</sup>, WU Qi<sup>1</sup>

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;  
2. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Saturated loose sand containing low non-plastic fines is prone to static liquefaction subjected to undrained monotonic loading; this phenomenon is normally termed as static liquefaction, which is affected by various factors, such as non-plastic fines content, particle gradation and confining pressure. However, limited work focused on sandy soils in medium-dense state and especially the effect of silt size on the liquefaction potential of the sandy soils; thus, in this study, a series of strain-controlled monotonic undrained triaxial compression tests are conducted on a single base sand mixed with three different essentially non-plastic silts at three different fines content ( $FC = 10\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$ ) and three different confining pressure (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa). The relative density of all soil samples was the same and has a value of 50%. The results show that: (1) Under otherwise identical condi-

\* 收稿日期:2018-08-14;修回日期:2018-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51508271)、江苏省地震局青年科学基金(201704)、江苏省自然科学基金项目(BK20150958)资助

作者简介:徐令宇(1988-),男,副教授,博士,硕导。主要从事岩土地震工程及城市地下工程方面的研究。

Email: xulingyu2008@126.com

tions, the maximum porosity ratio and the maximum porosity ratio increase with the increase in the average particle size ratio  $R_d$  in the range of 10~65.76, where  $R_d$  is defined as the ratio of the average particle diameter of the base sand to the non-plastic silts; (2) the peak deviatoric stress of sandy soils tends to decrease nearly linearly with the increase in  $R_d$  when  $FC = 10\%$  and  $20\%$ ; however when  $FC = 30\%$ , the peak deviatoric stress rapidly decreases as  $R_d$  reaches a critical value and then remains unchanged or slightly decreases with the further increase in the  $R_d$ ; and (3) complete static liquefaction of sandy soils could occur at medium dense state at high fines contents. In addition, static liquefaction is more likely to occur when the  $R_d$  become larger. Therefore, it is necessary to consider the adverse effect of not only the content of low-plastic fines but also the size of low-plastic fines on undrained strength of sandy soils.

**Keywords:** fine size; fine content; static liquefaction; sandy soils; undrained triaxial compression test

## 引言

自然界中大多数砂类土并非纯砂粒,而是含有不同的细粒(粒径小于0.075 mm)含量。《土的工程分类标准(GB/T50145—2007)》根据细粒含量将砂类土分为砂、含细粒土砂以及细粒土质砂<sup>[1]</sup>。我国长江三角洲地区富含大量的饱和砂类土层,同时,砂类土在我国渤海和南海浅表层也广泛存在<sup>[2]</sup>。由于经济发展对土地资源的迫切需求,我国沿海地区广泛开展围海吹填造陆工程,特别是长三角、珠三角、渤海湾、辽东湾等地,吹填土面积已有很大规模,这些吹填土中也包含相当部分的砂类土<sup>[3-4]</sup>。目前国家正在渤海湾、琼州海峡等沿海地区规划建设海底隧道、电缆、管道、风力发电厂、石油平台、跨海大桥等近海岸工程和海洋工程。细粒对于饱和砂类土的强度具有重要影响,无论是静力加载还是动力加载,当砂类土本身强度不足以抵抗外力时,砂土类会发生变形破坏并可能伴有液化现象的发生,常导致海底滑坡、海工构筑物失稳、桩基础破坏等灾害现象,对近海岸工程和海洋工程的危害极大。因此,研究砂类土的强度问题具有重要价值。

最早从H.B.Seed等<sup>[5]</sup>开始,以原位测试数据来研究低塑性细粒对循环阻抗比的影响。随后,国内外针对细粒对饱和砂类土的强度影响问题开展了大量理论和试验研究。国内外学者较早关注非塑性细粒含量对饱和砂类土强度的影响,J.A.Yamamoto等<sup>[6]</sup>研究发现松散砂不排水条件下剪切会出现静态液化现象,且在低围压下静态液化更容易发生,在净砂中掺入非塑性细粒后会增加砂土的液化势,且在达到某一个细粒含量前,液化势随着细粒含量的增加而增加。同时,P.V.Lade等<sup>[7]</sup>研究发现

在较高的非塑性细粒含量下,中密实状态(相对密度为60%)的砂类土可发生静态液化。此后有众多学者开展了相关研究,但大部分学者主要集中在松散砂的研究<sup>[8-14]</sup>。

近年来,学者们开始关注非塑性细粒粒径对饱和砂类土强度的影响,M.M.Monkul等<sup>[15]</sup>通过不排水三轴压缩试验研究了非塑性细粒粒径对饱和砂类土强度的影响,研究的砂类土平均粒径比 $R_d$ 范围为2.6~10.1,其中, $R_d$ 定义为骨架砂的平均粒径 $D_{50\text{-sand}}$ 与细粒土的平均粒径 $d_{50\text{-silt}}$ 之比,结果表明在不同的 $R_d$ 下,细粒含量对砂类土液化势增大或降低的趋势不同。陈志彬<sup>[16]</sup>研究的砂类土平均粒径比 $R_d$ 范围为3.55~12.94,并通过不排水三轴压缩试验指出在低围压和低非塑性细粒含量下,随着平均粒径比 $R_d$ 的增大能够增强砂土的抗液化能力。总体上,非塑性细粒粒径的影响研究相对非塑性细粒含量的影响研究较少,且平均粒径比的范围相对较窄。

本文开展了一系列饱和砂类土不排水三轴压缩试验,以标准砂为净砂与三种不同粒径的石英粉(非塑性细粒)分别混合;考虑到实际场地的砂类土状态可能由于自然或者人工因素处于相对密实状态,制样过程中控制所有土样的相对密度为50%,为中密实状态,并且考虑了更宽范围的平均粒径比 $R_d$ ;探讨了细粒含量、细粒粒径、围压对饱和砂类土强度的影响规律。

## 1 砂类土三轴不排水压缩试验

### 1.1 试验材料

试验中采用福建标准砂作为净砂(S),细粒采用三种不同粒径的石英粉(I、II、III),颗粒级配曲线如图1所示。石英粉是由石英石经研磨后筛分而

成,外观呈颗粒状白色粉末。净砂和三种石英粉的基本物理指标见表1。为表述方便,净砂与三种不同粒径的石英粉混合形成的砂类土,分别表示为SI、SII和SIII。本文通过平均粒径比 $R_d^{[10]}$ 来描述细粒径的影响,根据表1,计算得到SI、SII和SIII的平均粒径比分别为10、18.87和65.76。

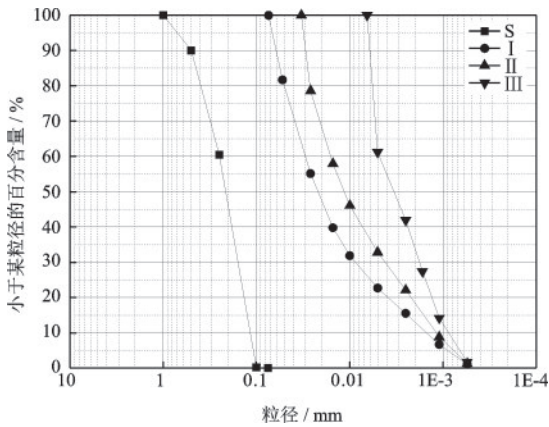


图1 净砂(S)和三种石英粉(I、II、III)的颗粒级配曲线  
Fig.1 Grain size distribution curves of clean sand (S) and three kinds of quartz powders (I, II, III)

表1 净砂和三种石英粉的基本物理指标

Table 1 Basic physical parameter of clean sand and three kinds of quartz powders

物理指标	S	石英粉 I	石英粉 II	石英粉 III
$G_s$	2.655	2.682	2.663	2.67
$d_{10}/\text{mm}$	0.116	0.001 5	0.001 2	0.000 9
$d_{30}/\text{mm}$	0.156	0.008 6	0.004 1	0.001 8
$d_{50}/\text{mm}$	0.217	0.021 7	0.011 5	0.003 3
$d_{60}/\text{mm}$	0.248	0.029 7	0.015 8	0.004 8
$e_{\max}$	0.855	1.49	1.853	2.242
$e_{\min}$	0.552	0.527	0.591	0.86

图2给出了净砂和三种石英粉的电镜扫描图像,根据M.C.Powers<sup>[17]</sup>对颗粒形状的定义,净砂的颗粒形状呈现圆形和亚圆形,石英粉(非塑性细粒)的颗粒形状为棱角状或亚棱角状。

根据《土工试验方法标准(GB/T50123—1999)》<sup>[18]</sup>,通过振动锤击法和量筒法测得净砂和三种砂类土最大干密度 $\rho_{d\max}$ 和最小干密度 $\rho_{d\min}$ ,并由干密度计算得到不同细粒含量下的三种砂类土SI、SII、SIII的最小孔隙比 $e_{\min}$ 和最大孔隙比 $e_{\max}$ ,如图3所示。可以看出,随着平均粒径比 $R_d$ 的增大,相同细粒含量下的最大孔隙比和最小孔隙比均有增大趋势,这说明平均粒径较小的细粒更容易处于砂粒

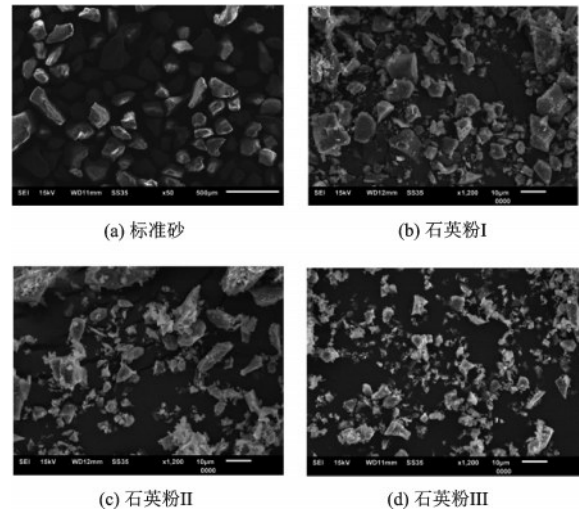


图2 净砂和三种石英粉的微观扫描图像

Fig. 2 SEM images of clean sand and three kinds of quartz powders under optical microscope

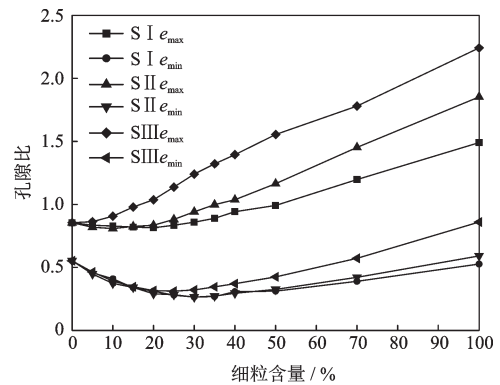


图3 三种砂类土最大孔隙比和最小孔隙比随着细粒含量的变化曲线

Fig. 3 Curves of maximum void ratio and minimum void ratio with fine grain content in three kinds of fine-grained sands

接触点或接触面上。

对于同一种平均粒径比下的砂类土,其最小孔隙比 $e_{\min}$ 随细粒含量的增加均呈现先减小后增大的规律,且均在细粒含量为30%左右时,达到最小值。而对于三种砂类土的最大孔隙比 $e_{\max}$ ,发现细粒含量的影响规律不尽相同:①砂类土SI、SII的最大孔隙比随细粒含量增加略有减小,分别在细粒含量超过20%和10%后呈现上升趋势;②而砂类土SIII的最大孔隙比随着细粒含量增加而增大。朱建群等<sup>[19]</sup>和M.E.Karim等<sup>[20]</sup>分别报道过最大孔隙比随着细粒含量变化的这两种变化趋势,可以看出,细粒颗粒的粒径对砂类土骨架结构有重要影响,对于最大孔隙比,当少量的细粒混入净砂中,一部分细粒参

与土骨架的形成,会使得孔隙比增加,另一部分混入到原先土骨架的孔隙中,使得孔隙比相对降低,当前者的增加值大于后者的降低值时,最大孔隙比整体呈现增大趋势。而对于最小孔隙比的形成主要由于细粒充填作用,随着细粒增加,一开始孔隙比减小,但随着细粒进一步增加,细粒占主导地位,最大和最小孔隙比均呈现增大趋势。

### 1.2 试验方案与试验步骤

本次试验均采用实心圆柱试样,试样尺寸直径为50 mm、高为100 mm,进行固结不排水压缩试验。试样为净砂(S)以及三种砂类土(SI、SII、SIII),在本文中,三种砂类土是指标准砂和三种不同粒径的细粒的混合土,并且包含了不同的细粒含量。细粒含量为10%、20%和30%,每个土样的围压采用50、100和200 kPa。所有土样相对密度控制为50%,总共30个土样,试验编号见表2。

为保证试样制备的均匀性,采用干装分层振捣法制备试样,共分5层。按照细粒含量和试样的总质量,确定净砂质量和细粒质量,然后将两者充分混合,搅拌均匀,缓慢倒入承模筒内,击实到指定高度。

试样制备完成后,装上压力室,并向压力室内充无气水。再进行分级反压饱和,每级完成后检测B值,最后检测B值大于0.95时达到饱和要求。

试样饱和完成后,进行均等固结,固结后孔隙比 $e_c$ 见表2。试样固结完成后,均采用应变式加载,加载速率为0.5%/min,在轴向应变达至30%左右时停止试验。

### 1.3 试验仪器

本次试验采用位于南京工业大学土动力学实验室的GDS(DYNTTS型)三轴试验仪进行试验。仪器主要由压力室、围压控制器、反压控制器、轴向力和轴向位移动态控制主机、孔压测量系统、试验数据采集器及传输器(DCS)组成。最大轴向荷载为10 kN,最大轴向位移为100 mm,围压、反压可达2 MPa。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 细粒含量对砂类土应力应变和应力路径的影响

图4给出了100 kPa围压下细粒含量对三种砂

表2 不排水三轴压缩试验工况

Table 2 Cases of undrained triaxial compression tests for sandy soils

类型	试验组号	FC/%	$\sigma'_3$ /kPa	$e_c$	$\varphi'_p/(\circ)$
S	CU1		50	0.698	
	CU2	0	100	0.693	33.2
	CU3		200	0.689	
SI	CU4		50	0.612	
	CU5	10	100	0.608	34.6
	CU6		200	0.602	
	CU7		50	0.554	
	CU8	20	100	0.550	33.0
	CU9		200	0.541	
SII	CU10		50	0.551	
	CU11	30	100	0.543	32.5
	CU12		200	0.530	
	CU13		50	0.585	
	CU14	10	100	0.580	34.7
	CU15		200	0.573	
SIII	CU16		50	0.553	
	CU17	20	100	0.548	31.4
	CU18		200	0.538	
	CU19		50	0.579	
	CU20	30	100	0.568	17.8
	CU21		200	0.551	
SIII	CU22		50	0.639	
	CU23	10	100	0.633	32.4
	CU24		200	0.625	
	CU25		50	0.659	
	CU26	20	100	0.648	29.3
	CU27		200	0.639	
	CU28		50	0.761	
	CU29	30	100	0.753	16.2
	CU30		200	0.737	

类土的应力应变和应力路径的影响,同时,图4也给出了净砂的应力应变关系和应力路径。图4中部分子图进行了放大,同时,也在相应的子图中给出了全部的实测数据。从应力应变关系来看,砂类土SI和SII的峰值偏应力随着细粒含量的增加表现出先增加后减小,在10%时达最大值。这可能是由于细粒的形状为棱角状,而净砂的形状为圆形和亚圆形。因此,掺入少量细粒会增加摩擦强度,而随着细粒含量的增加,细粒起到润滑的作用。但由于砂类土SIII中细粒的颗粒粒径较小,细粒形状对强度

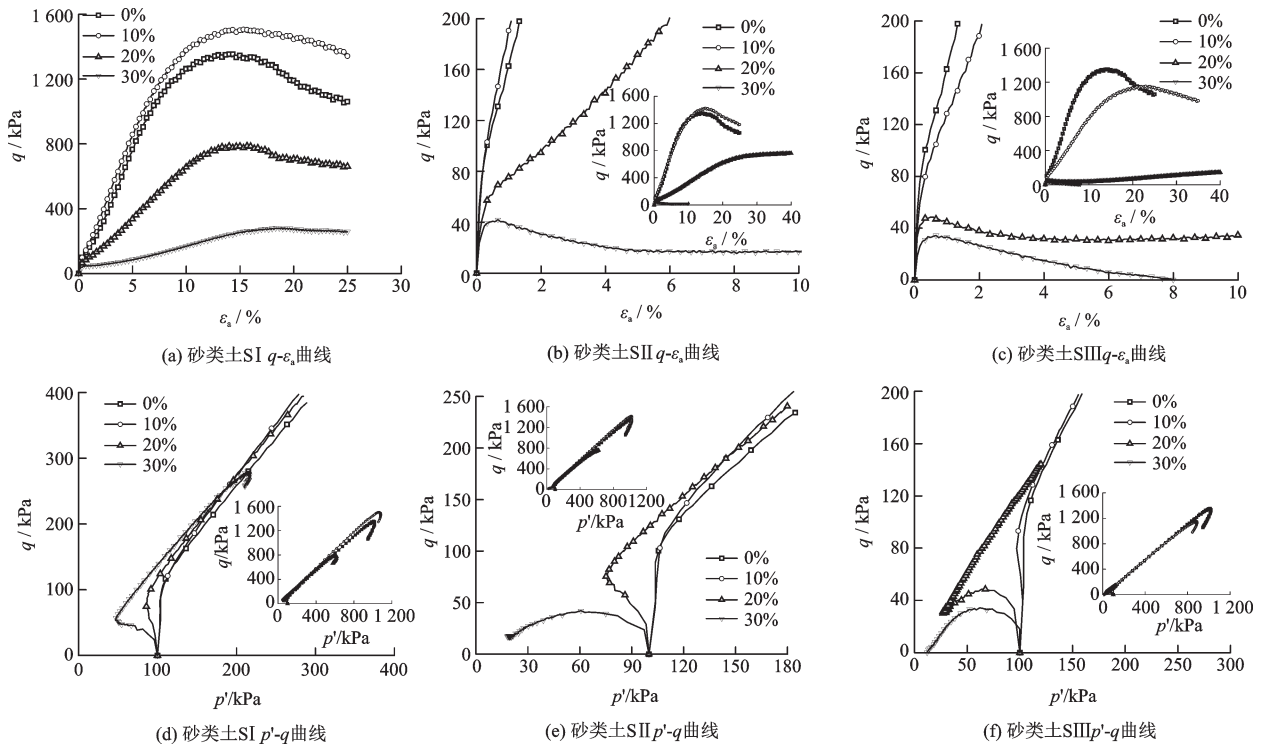


图4 100 kPa围压时不同细粒含量下的三种砂类土的应力应变和应力路径

Fig. 4 Influence of fine content on stress strain curves and stress paths for three sandy soils under a confining pressure of 100 kPa

的贡献相对较小,因此,砂类土SIII的峰值偏应力随着细粒含量的增加表现出逐渐减小的趋势。三种砂类土在 $FC = 20\%$ 和 $30\%$ 时峰值偏应力降低较为明显,而砂类土SIII在 $FC = 30\%$ 时出现了静态液化,这表明高细粒含量下中等密实状态的砂类土可以发生静态液化,这与P.V.Lade等<sup>[7]</sup>的试验结果较为吻合。

从应力路径图来看,中等密实状态的砂类土在不同细粒含量下的应力路径与相同条件下的松散砂有较大区别。在低细粒含量下松散砂一般表现为剪缩(P.V.Lade等<sup>[7]</sup>),而本文试验工况表现出三种状态:①剪胀状态,例如,净砂和 $FC = 10\%$ 时的砂类土SI;②先剪缩后剪胀,例如, $FC = 20\%$ 和 $30\%$ 时的砂类土SI以及 $FC = 20\%$ 时的砂类土SII和SIII;③剪缩状态,例如, $FC = 30\%$ 时的砂类土SII和SIII。采用等效骨架孔隙比和等效骨架状态参数的概念可以从宏观上描述砂类土剪胀及剪缩机制,详细情况可参考文献[21-22]。

## 2.2 细粒粒径对砂类土应力应变、应力路径及峰值强度的影响

图5给出了100 kPa下平均粒径比对三种砂类土的应力应变和应力路径的影响。可以看出,

随着平均粒径比 $R_d$ 的增大,三种饱和砂类土峰值偏应力均呈现递减趋势,这说明在骨架砂掺入平均粒径较小的细粒时,砂粒接触点或接触面上会存在较多的细粒,进而造成砂类土在剪切过程具有较高的体缩性,特别在细粒含量较高时,这种体缩性会更加明显。因此,砂类土SIII在细粒含量为 $30\%$ 时出现了静态液化现象,如图5(f)所示。因此,在评估饱和砂类土强度特性时,不仅仅要考虑非塑性细粒含量,而且还要考虑非塑性细粒粒径的不利影响。

图6给出了不同工况下峰值偏应力与平均粒径比的关系。可以进一步看出,在细粒含量较低时(即 $FC = 10\%$ 和 $20\%$ ),不同围压下的峰值偏应力随着 $R_d$ 的增大呈现近似线性递减关系,而在细粒含量较高时(即 $FC = 30\%$ 时),峰值偏应力在 $R_d$ 达到某个临界值迅速下降,而后基本保持不变或者缓慢下降。

此外,表2进一步给出了不同工况下有效峰值摩擦角,可以看出, $R_d$ 对有效峰值摩擦角的影响规律与 $R_d$ 对峰值偏应力的影响规律基本一致。由于砂类土SII和SIII在细粒含量为 $30\%$ 时出现静态液化,因此,其有效峰值摩擦角大幅降低。

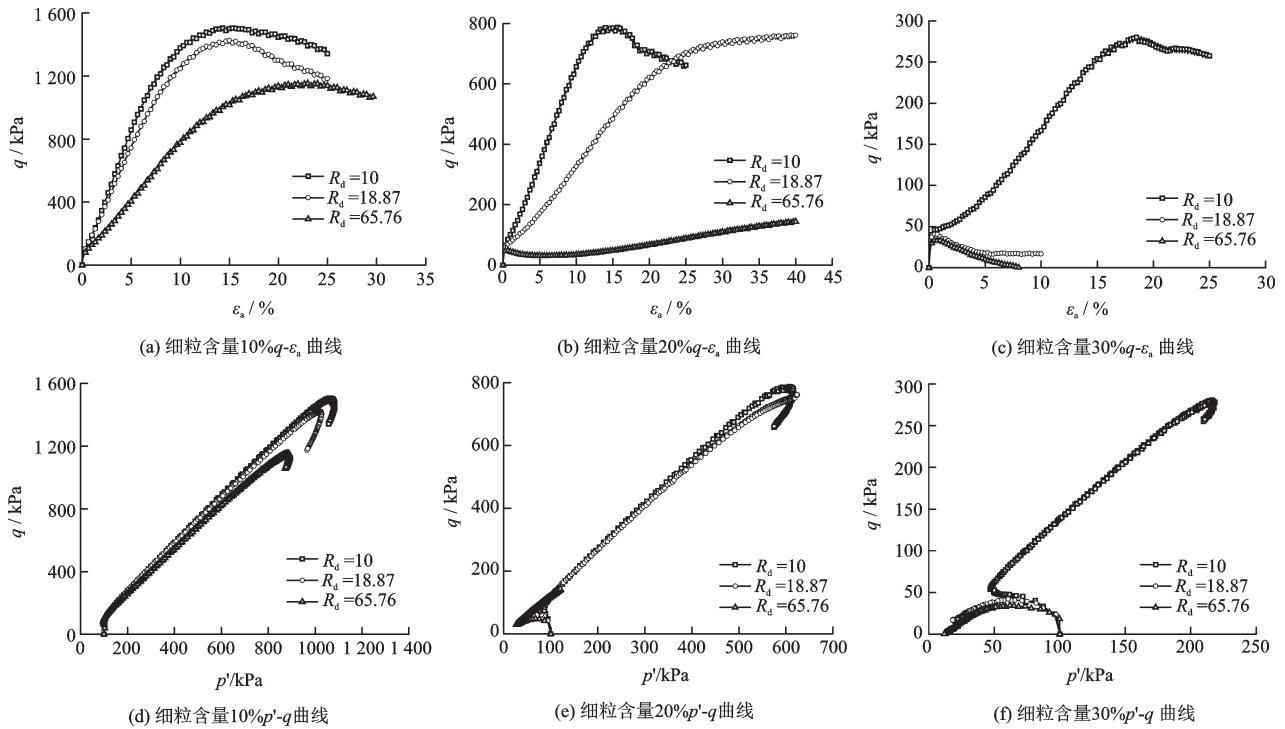


图5 100 kPa围压时不同平均粒径下的三种砂类土的应力应变和应力路径

Fig. 5 Influence of fine size on stress strain curves and stress paths for three sandy soils under a confining pressure of 100 kPa

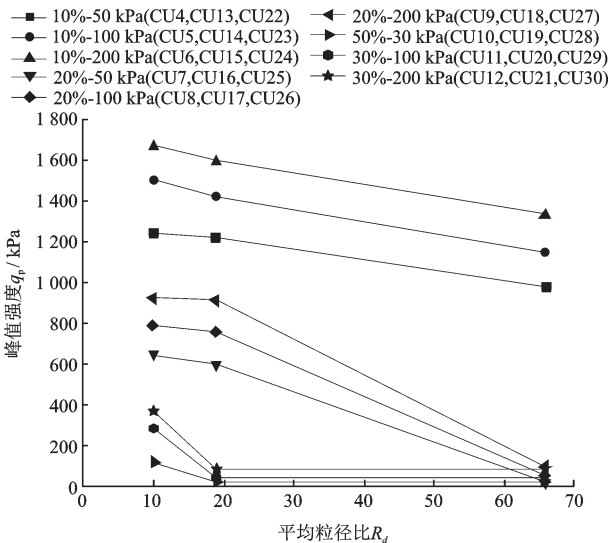


图6 峰值偏应力随平均粒径比变化关系

Fig. 6 Variation of peak deviatoric stress with the ratio of the average particle diameter

### 2.3 围压对砂类土应力应变和应力路径的影响

图7给出了细粒含量为30%时围压对三种砂类土的应力应变和应力路径的影响。试验表明,砂类土SI在三种围压下均没有发生静态液化,而砂类土SIII在三种围压下均发生了静态液化现象,且发生静态液化所需要的轴向应变随着围压的降低而降低,表明低围压下饱和砂类土更容易发生静态液

化,这与围压对松散砂静态液化的影响规律较为吻合(朱建群等<sup>[23]</sup>;P.V.Lade等<sup>[7]</sup>)。

### 3 结论

采用福建标准砂与三种不同粒径的石英粉进行混合,开展了一系列三轴不排水压缩试验。根据试验结果,得到以下结论:

(1)砂类土SI和SII的峰值偏应力随着细粒含量的增加表现出先增加后减小的趋势,在10%时达最大值。这可能是由于细粒的形状为棱角状,而净砂的形状为圆形和亚圆形。因此,掺入少量细粒会增强摩擦强度,而随着细粒含量的增加,细粒起到润滑的作用。但由于砂类土SIII中细粒的颗粒粒径较小,细粒形状对强度的贡献相对较小,因此,砂类土SIII的峰值偏应力随着细粒含量的增加表现出逐渐减小的趋势。

(2)随着平均粒径比 $R_d$ 的增大,相同细粒含量下的最大孔隙比和最小孔隙比均有增大趋势,说明平均粒径较小的细粒更容易处于砂粒接触点或接触面上,因此,相同情况下砂类土的峰值偏应力随着平均粒径比的增大而降低。在细粒含量较低时(即 $FC = 10\%$ 和 $20\%$ ),不同围压下的峰值偏应力

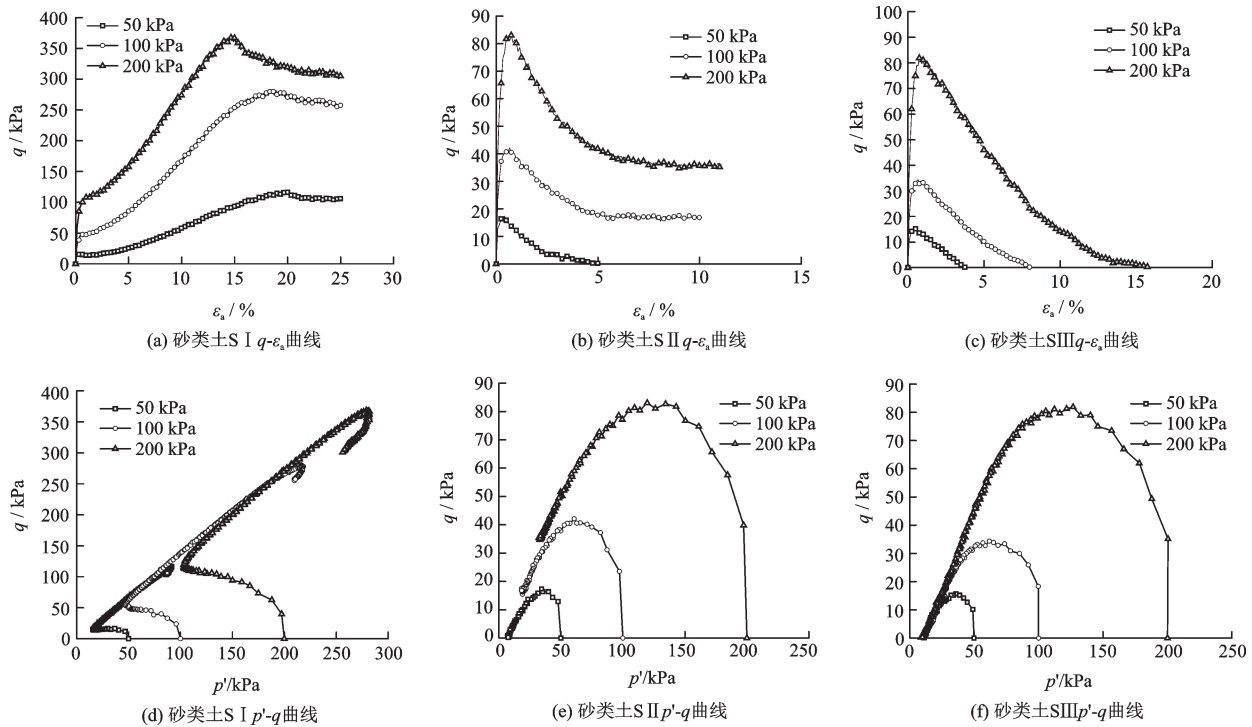


图7 细粒含量为30%时不同围压下的三种砂类土的应力应变和应力路径

Fig. 7 Influence of confining pressure on stress strain curves and stress path for three sandy soils under a fine content of 30%

随着  $R_d$  的增大呈现近似线性递减关系,而在细粒含量较高时(即  $FC = 30\%$ ),峰值偏应力在  $R_d$  达到某个临界值迅速下降,而后基本保持不变或者缓慢下降。 $R_d$  对有效峰值摩擦角的影响规律与  $R_d$  对峰值偏应力的影响规律基本一致。

(3)砂类土 SIII 在三种围压下均发生静态液化现象,但发生静态液化所需要的轴向应变随着围压的降低而降低,说明低围压下砂类土更容易发生静态液化。而砂类土 SI 在三种围压下均没有发生静态液化,因此,在评估饱和砂类土强度时不仅要考虑非塑性细粒含量,而且还要考虑非塑性细粒粒径的不利影响。

### 参考文献:

[1] 土的工程分类标准: GB/T50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.  
Standard for engineering classification of soil: GB/T50145—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)

[2] 钱寿易, 杜金声, 楼志刚, 等. 海洋土力学现状及发展[J]. 力学进展, 1980, 10(4), 1-14.  
Qian Sh Y, Du J Sh, Lou Zh G, et al. Present situation and development of marine soil mechanics[J]. Advanc-

es in Mechanics, 1980, 10(4), 1-14. (in Chinese)

[3] 周健, 杨永香, 贾敏才, 等. 细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J]. 水利学报, 2009, 140(10): 1 184-1 188.  
Zhou J, Yang Y X, Jia M C, et al. Effect of fines content on liquefaction properties of saturated silty sands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 140(10): 1 184-1 188. (in Chinese)

[4] 周炳强. 辽东湾地区吹填土电渗加固实验及模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
Zhou B Q. Experimental and simulating study of electro-osmotic consolidation of dredger fill in Liaodong Bay region[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[5] Seed H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12), 1 425-1 445.

[6] Yamamuro J A, Lade P V. Static liquefaction of very loose sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6), 905-917.

[7] Lade P V, Yamamuro J A. Effects of nonplastic fines on staticliquefaction of sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6), 918-928.

[8] Zlatovic S, Ishihara K. Normalized behavior of very loose non-plastic soils: effects of fabric [J]. Soils and

- Foundations, 1997, 37(4), 47-56.
- [9] Thevanayagam S, Shenthan T, Mohan S, et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(10), 849-859.
- [10] Huang Y T, Huang A B, Kuo Y C, et al. A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(9-10): 733-743.
- [11] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 粉粒含量对砂土强度特性的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(11): 1 647-1 652. Zhu J Q, Kong L W, Zhong F J. Effect of fines content on strength of silty sands [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(11): 1 647-1 652. (in Chinese)
- [12] 赵发祥. 松散粉砂静态液化特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. Zhao F X. Study on static liquefaction in loose silty sands [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] Rahman M M, Lo S R. Predicting the onset of static liquefaction of loose sand with fines [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 1 037-1 041.
- [14] Monkul M M, Etmian E, Şenol A. Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 89: 185-197.
- [15] Monkul M M, Yamamuro J A. Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(6): 931-942.
- [16] 陈志彬. 含细粒饱和砂土的静态液化试验研究 [D]. 厦门: 华侨大学, 2015. Chen Zh B. Experimental study on static liquefaction of saturated silty sand [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2015. (in Chinese)
- [17] Powers M C. A new roundness scale for sedimentary particles [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1953, 23(2): 117-119.
- [18] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. Standard for soil test method: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 朱建群, 孔令伟, 高文华, 等. 无黏性混合土临界细粒含量的多途径判别研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1 103-1 109. Zhu J Q, Kong L W, Gao W H, et al. Multi path discriminant study on critical fine particle content of cohesionless mixed soil [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(9): 1 103-1 109. (in Chinese)
- [20] Karim M E, Alam M J. Effect of non-plastic silt content on the liquefaction behavior of sand-silt mixture [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 65: 142-150.
- [21] Lashkari A. Recommendations for extension and re-calibration of an existing sand constitutive model taking into account varying non-plastic fines content [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 61: 212-238.
- [22] Rahman M M, Lo S C R, Dafalias Y F. Modelling the static liquefaction of sand with low-plasticity fines [J]. *Géotechnique*, 2014, 64(11): 881-894.
- [23] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 南京砂强度特征与静态液化现象分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(6): 1 461-1 465. Zhu J Q, Kong L W, Zhong F J. Analysis of strength characteristics of Nanjing sand and mechanism of static liquefaction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1 461-1 465. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)