

文章编号: 1000-7598 (2011) 09-2623-06

# 细粒含量对饱和砂土动弹性模量与 阻尼比的影响研究

王 勇<sup>1</sup>, 王艳丽<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 利用 GDS 循环三轴试验系统, 进行一系列不同细粒含量砂土的不排水动三轴试验, 研究细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响。试验结果表明, 砂土的动弹性模量随细粒含量的增加而减小, 但当超过细粒含量的临界值 30% 后, 变化趋势则相反; 阻尼比随着细粒含量的增加呈现先增大后减小的趋势, 其细粒含量的临界值也为 30%。当细粒含量小于 30% 时, 砂土的动力特性主要由粗粒决定, 粗粒间形成的骨架孔隙比随细粒含量的增加而增大, 相同应变水平下抵抗变形的能力随之减弱, 从而使动弹性模量减小。同时, 土颗粒间接触点的减少使应力波在土中传播速度变慢, 使得土体对动荷载反应的滞后性增强, 阻尼比随之增加; 当细粒含量大于 30% 后, 砂土的动力特性主要由细粒决定, 细粒间孔隙比随着细粒含量的增加而减小, 从而使砂土的动弹性模量与阻尼比呈现出相反的变化趋势。

**关 键 词:** 细粒含量; 动弹性模量; 阻尼比; 骨架孔隙比; 细粒间孔隙比

**中图分类号:** TV 148

**文献标识码:** A

## Study of effects of fines content on dynamic elastic modulus and damping ratio of saturated sand

WANG Yong<sup>1</sup>, WANG Yan-li<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With the GDS dynamic triaxial system, undrained dynamic triaxial tests on the saturated sand of different fines contents were performed; and effects of fines content on the dynamic elastic modulus and damping ratio were analyzed. Results show that the dynamic elastic modulus of sand decreases with increasing of fines content; but the trend is reversed beyond the critical value of fines content of 30%. The damping ratio of sand firstly increases and then decreases with increasing fines content at the same critical value of fines content of 30%. When fines content is less than 30%, the dynamic characteristics of sand is determined mainly by the coarse grains; the skeleton void ratio between coarse grains increases with the increase of fines content; and the ability to resist deformation under the same strain level weakens so that the elastic modulus decreases. Meanwhile, the stress wave propagation speed slows down because of the reduction of contact points between soil particles, hysteresis quality of the soil dynamic load response strengthens and the damping ratio increases; when the fines content is greater than 30%, the dynamic characteristics of sand is determined mainly by the fine grains; the interfine void ratio decreases with increasing of fines content; so that the dynamic properties of sand shows a reverse trend.

**Key words:** fines content; dynamic elastic modulus; damping ratio; skeleton void ratio; interfine void ratio

### 1 引 言

大量的现场调查资料表明, 与液化问题相关的土体多为粉砂和砂质粉土<sup>[1-2]</sup>。Baziar 和 Dobry<sup>[3]</sup>也

指出, 在自然界中均质砂并不多见, 且易产生流滑现象的多是冲填沉积砂土或填筑砂土, 它们在颗粒组成上与纯净砂明显不同, 均为含一定细粒的砂土。尽管不同的土层当中都存在细粒土, 然而国内外学

收稿日期: 2010-11-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No.10872210)。

第一作者简介: 王勇, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事特殊土力学与灾害防治技术的研究工作。E-mail: wang831yong@163.com

者在对饱和砂土研究较多的是均一的纯净砂,如加拿大的 Ottawa 砂、日本的 Toyoura 砂和我国的福建标准砂<sup>[4]</sup>。

单纯从细粒含量定量上研究其对砂土动力特性的影响,国外已有不少学者对该问题作了不同程度的研究,国内则是近些年才刚刚开始。然而这些研究多局限于其对动强度的影响<sup>[5-13]</sup>,且得到的结果不尽相同,涉及砂土动弹性模量和阻尼比的影响研究则很少,定量研究更鲜见报道。动弹性模量和阻尼比是描述土体动力特性的2个首要参数,是土层地震反应分析中必备的力学指标,也是场地地震安全性评价中必不可少的内容<sup>[14]</sup>。国内外许多研究者虽对不同地区土体的动剪模量和阻尼比进行过大量的试验研究,得出了许多有价值的成果<sup>[15-17]</sup>,然这些研究中多未考虑细粒含量的影响。基于此,本文通过人工配置不同细粒含量的砂土,对含细粒砂土的动弹模和阻尼比进行试验研究,从土体的微观结构特征出发,分析不同细粒含量对砂土动力特性的影响,以揭示其内在的影响机制。

## 2 试样制备、试验方法及试验仪器

### 2.1 试样制备

试验采用直径为 39.1 mm,高度为 80 mm 的重塑土样。原始土样取自长江某大桥桥位处的粉细砂,灰色、松散、圆粒状,分选性较好,主要矿物成分为石英、长石。制备试样前对所需使用的砂粒和细粒预先进行了分选:土样经风干后过 0.25 mm 和 0.075 mm 筛,选取粒径在 0.075~0.25 mm 范围内的砂粒为骨架砂;粒径小于 0.075 mm 的颗粒为细粒<sup>[4]</sup>。试验所用的重塑砂样由骨架砂与细粒按照不同比例充分混合、拌匀配制而成。由于以砂土作为研究对象,结合土的工程分类标准<sup>[18]</sup>,细粒含量的掺入比  $FC$  (占试样总质量的百分比含量)分别取 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%和 45%,故砂样命名主要为细砂和粉砂。试样按照同一干密度制样,其值在各细粒含量砂土的最大干密度  $\rho_{d\max}$  的极小值与最小干密度  $\rho_{d\min}$  的极大值之间取值。表 1 为不同细粒含量砂样的基本物理力学性质指标,由表可看出,试样干密度在 1.284~1.481 g/cm<sup>3</sup> 之间取值,本文试验选取配制砂样的干密度控制为 1.40 g/cm<sup>3</sup>。

### 2.2 试验方法及试验仪器

土样制备完成后,置入饱和器内进行抽真空饱和。砂样经真空饱和后,采用冰冻法成型并在试样开融前快速装样。冻样装入三轴室后,在小围压

(20 kPa)下自然解冻并进行反压饱和,按照操作规程进行试验操作,当孔压系数  $B$  大于 0.95 时,认为试样满足饱和度要求,然后进入固结阶段,当试样的体变在 5 min 之内不再增加时,即达到了等压固结标准。固结完成后施加循环荷载,振动波形为正弦波、振动频率 1 Hz,动弹性模量阻尼比试验采用应变控制,分 9~10 级应变施加,每级应变标准下振动 5 次,不同加荷周次的应力-应变滞回圈并不完全相同,由此算出的动剪切模量和阻尼比也不完全一样。因此,在分析整理试验成果时,动剪切模量以及阻尼比取 5 次结果的平均值。

表 1 不同细粒含量砂样的基本参数  
Table 1 Basic parameters for sand samples with different fine contents

细粒含量 FC/%	相对密 度 $G_s$	平均粒径 $D_{30}$ /mm	不均匀 系数 $C_u$	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )		相对密度 $D_r$
				最大值	最小值	
				$\rho_{d\max}$	$\rho_{d\min}$	
5	2.681	0.165	2.145	1.481	1.232	0.714
10	2.683	0.160	2.358	1.602	1.261	0.466
15	2.690	0.148	4.683	1.644	1.260	0.428
20	2.693	0.142	6.058	1.723	1.282	0.329
25	2.695	0.138	7.272	1.742	1.282	0.319
30	2.697	0.130	7.516	1.781	1.284	0.294
35	2.701	0.123	7.755	1.770	1.280	0.309
40	2.703	0.112	7.860	1.781	1.251	0.358
45	2.705	0.085	9.025	1.755	1.250	0.372

试验所用仪器为同济大学引进的 GDS 循环三轴仪,该仪器的主要功能和特点参见文[19]。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 动弹性模量

图 1 给出了不同细粒含量砂土动弹性模量  $E_d$  与动弹性应变  $\varepsilon_d$  的关系曲线。由图 1 可知,随着动弹性应变的逐渐增加,不同细粒含量砂土的动弹性模量均随之降低,出现刚度软化的现象。同一应变水平下,细粒含量对砂土动弹性模量的影响显著,其影响规律并非随着细粒含量呈单调变化。随细粒含量增大,砂土的动弹性模量逐渐减小,在细粒含量在 30%附近达到最小值;之后,随着细粒含量的增加,动弹性模量逐渐增大。

由图 1 还可看出,相同的动弹性应变水平下,不同细粒含量砂土的动弹性模量的大小虽不相同,但它们的动弹性模量随动弹性应变的发展模式可用同一模型来描述,不同细粒含量砂土的动弹性模量与动弹性应变之间关系可用双曲线模型来表示,如式(1)所示,区别在于不同细粒含量的砂土,参数  $a$ 、 $b$  的取值不同,其值列于表 2。

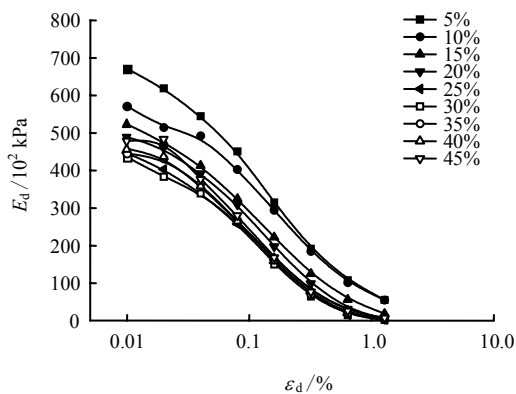


图 1 不同细粒含量砂土的  $E_d$ - $\varepsilon_d$  关系曲线

Fig.1 Relationships between  $E_d$  and  $\varepsilon_d$  of sand samples with different fines contents

$$E_d = \frac{1}{a + b\varepsilon_d} \quad (1)$$

式中： $E_d$  为动弹性模量； $\varepsilon_d$  为动弹性应变； $a$ 、 $b$  为与细粒含量有关的拟合参数。

表 2 式(1)中参数  $a$  和  $b$  的取值  
Table 3 Values of  $a$  and  $b$  in formula (1)

细粒含量 $FC/\%$	参数	
	$a/(10^2 \text{ kPa})^{-1}$	$b/(\text{kPa})^{-1}$
5	0.001 41	0.011 09
10	0.001 68	0.011 15
15	0.001 71	0.018 61
20	0.001 79	0.021 19
25	0.001 95	0.027 81
30	0.002 02	0.027 94
35	0.001 92	0.026 19
40	0.001 85	0.025 73
45	0.001 72	0.025 50

由表 2 可知，参数  $a$  和  $b$  均先随着细粒含量的增加而增大，并在细粒含量为 30% 时达到最大值，之后随着细粒含量的增加，参数  $a$  和  $b$  逐渐减小，不同的是参数  $b$  在细粒含量超过 30% 后，其减少的趋势相对较缓，如图 2、3 所示。

### 3.2 阻尼比

图 4 为不同细粒含量砂土阻尼比  $\lambda$  与动弹性应变  $\varepsilon_d$  的关系曲线。由图可知，砂土的阻尼比随着动弹性应变的增加而增大，在微小应变时，阻尼比随动弹性应变的增加迅速增长，此后曲线趋于平缓。细粒含量的变化对砂土阻尼比同样存在影响，相同动应变水平下，阻尼比随细粒含量的增加呈现先增大后减小的趋势，这种趋势在高应变水平下更趋明显，当细粒含量为 30% 时，砂土阻尼比达到最大值。

说明在细粒含量逐渐增大的情况下，砂土对动荷载反应的滞后性呈现先增高后又逐渐降低的趋势。

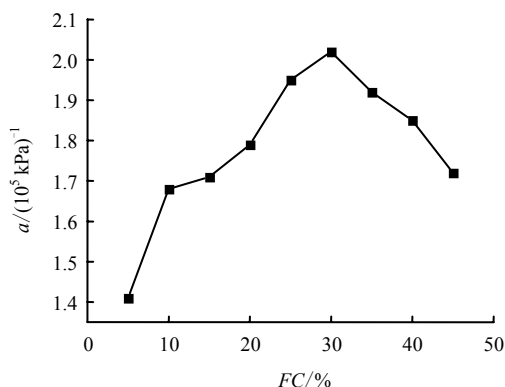


图 2 参数  $a$  与细粒含量  $FC$  的关系图

Fig.2 Relationship between parameter  $a$  and fines content

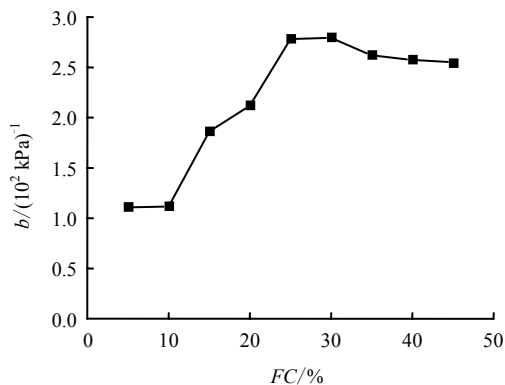


图 3 参数  $b$  与细粒含量  $FC$  的关系图

Fig.3 Relationship between parameter  $b$  and fines content

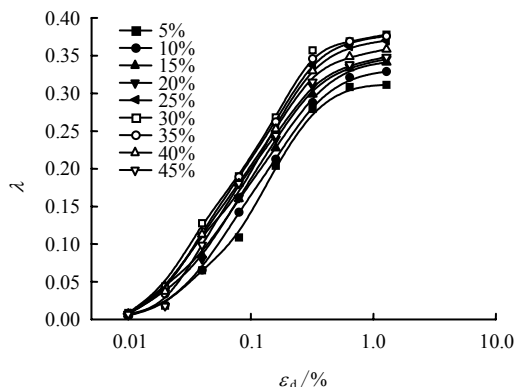


图 4 同细粒含量砂土  $\lambda$ - $\varepsilon_d$  关系曲线

Fig.4 Relationships between  $\lambda$  and  $\varepsilon_d$  of sand samples with different fines contents

由于  $E_d/E_{dmax}$  本身是动弹性应变的函数，因此，不同细粒含量下的阻尼比与动弹性应变的关系可借助阻尼比和动弹性模量之间关系来描述，即

$$\lambda = \lambda_{\max} \left( 1 - \frac{E_d}{E_{d\max}} \right)^m \quad (2)$$

式中： $\lambda_{\max}$  为最大阻尼比，可根据试验曲线确定； $E_{d\max}$  为最大动弹性模量； $m$  为与土性有关的试验常数。

图 5 给出了  $\lambda_{\max}$  随细粒含量的变化关系。由图可知，在细粒含量从 5% 到 45% 的变化过程中，最大阻尼比的量值在 0.3 到 0.4 之间变化。最大阻尼比随着细粒含量的增大也呈现出先增大后减小的趋势，并在细粒含量为 30% 时达到最大值。

由以上分析可知，细粒含量对砂土动力特性的影响不是单调变化的，无论对动弹性模量还是阻尼比，均存在一界限含量，使含细粒砂土在界限含量前后呈现相反的变化趋势。本次试验所用的含细粒砂土，临界细粒含量在 30% 左右。

需要说明的是本文试验采用应变控制且在不排水条件下进行，在试验过程中，孔隙水压力会有一些的累积，故本文试验得出的动弹性模量和阻尼比实际上是一种衰化动力参数<sup>[20]</sup>。

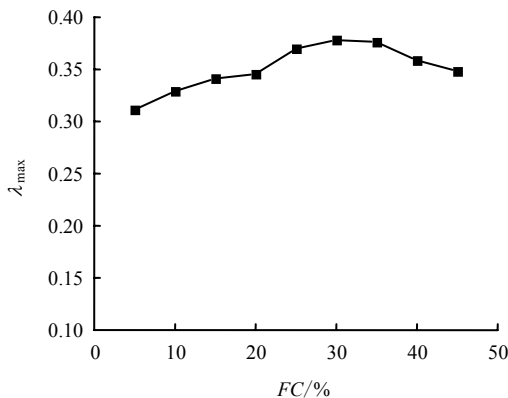


图 5 最大阻尼比  $\lambda_{\max}$  与细粒含量  $FC$  的关系  
Fig.5 Relationship between  $\lambda_{\max}$  and fines content

## 4 细粒含量的影响机制分析

### 4.1 含细粒砂土的微观结构特征

细粒含量对砂土动弹性模量和阻尼比的影响可从含细粒砂土的微观结构特征来阐释。含细粒砂土的微观结构是非常复杂的，它是各种大小不一的土粒或粒团通过某种或多种连接方式形成的集合体。土粒之间不同的组合连接或接触方式被称为“力链”，将导致砂土不同的宏观力学性状。Thevanayagam<sup>[21-22]</sup>对该问题进行了简化分析，以  $74 \mu\text{m}$  界将含细粒砂土颗粒划分为砂粒组和粉粒组，并认为含细粒砂土的微观结构主要可分为两大类：

①含细粒砂土的骨架主要由粗颗粒（砂粒）之间相互接触形成，其宏观力学性状由砂粒控制为主，细粒为辅，如图 6 (a)~(c) 所示。在图 6 (a) 所示的结构中，细粒几乎完全存在于砂粒间的孔隙内，对骨架的形成几乎不起作用，在图 6 (b) 所示的结构中，部分细粒存在于砂粒间的接触点上，部分参与骨架的形成。在图 6 (c) 所示的结构中，部分细粒起着分隔砂粒的作用。②含细粒砂土的骨架由细颗粒之间相互接触形成，其宏观力学性状由细粒控制为主，砂粒为辅，如图 6 (d) 所示。在整体孔隙比不变的情况下，随着细粒含量的增加，含细粒砂土的微观结构将从图 6 (a) 过渡到图 6 (d)，土体性状相应地将由砂粒组控制转换为细粒组控制，在这一过程中存在细粒含量的转折点  $FC_{th}$ ，即临界细粒含量。下面将以临界细粒含量为依据，引入粒间状态参量对不同细粒含量砂土的动弹性模量和阻尼比变化规律进行分析。

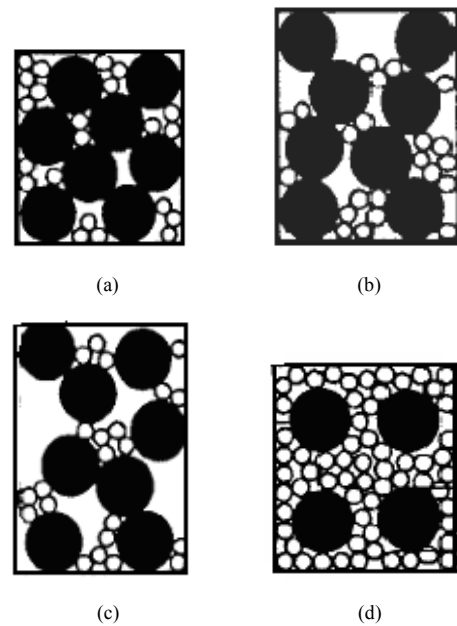


图 6 土体二元微观结构示意图<sup>[21]</sup>  
Fig.6 Schematic diagram for binary microstructure of sand<sup>[21]</sup>

当细粒含量  $FC < FC_{th}$ ，细粒组对含细粒砂土力学性状的宏观表象并未起到作用，或作用较小，则它的力链占土粒间相互作用比例不大。这种情形下粗粒作为土体的主骨架（如图 6 (a)~(c)），此时的骨架孔隙比又称粒间孔隙比  $e_s$ ，可按式<sup>[22]</sup>得到：

$$e_s = \frac{e + f_c}{1 - f_c} \quad (3)$$

式中： $e$  为土体总孔隙体积； $f_c$  为细粒含量(质量百分比数)。

当细粒含量  $FC > FC_{th}$  时，土体内部力链的形成和相互作用力的传递逐渐为细粒所控制，砂粒被粉粒包围于其中而成为悬浮颗粒，故其相互不接触或接触很少，对土体性状的影响很小。这种情形下细粒作为土体的主骨架（如图 6（d）），则细粒间孔隙比  $e_f$  定义为<sup>[22]</sup>：

$$e_f = \frac{e}{f_c} \quad (4)$$

#### 4.2 基于粒间状态参量的细粒影响机制分析

当细粒加入到纯净砂中形成粉细砂时，由于细粒含量较少，粗粒含量较大，粗粒相互排列形成骨架孔隙，细粒并未占据砂粒间的孔隙，而是较多地游离在骨架孔隙内，砂土的动力特性主要由粗粒决定。在  $FC < 30\%$  的情况下，当细粒含量逐渐增加时，粗粒之间形成的骨架孔隙比  $e_s$  逐渐变大，如图 7 所示，使得土颗粒之间的接触点减少，土体内部力链的相互作用力逐渐减小，相同应变水平下抵抗变形的能力也随之降低，从而使动弹性模量减小。同时，土颗粒间接触点的减小使应力波在土中的传播变慢，从而使土体对动荷载反应的滞后性增加，阻尼比随之增加。

在  $FC > 30\%$  的情况下，当细颗粒再进一步增加时，在细粒较多的情况下，细粒不但充满粗粒间的孔隙并包裹粗粒料，粗骨料不能起到骨架作用，砂土的动力特性主要由细粒决定，而细粒间孔隙比  $e_f$  则随着细粒含量的增加而逐渐减小，如图 8 所示。这使得砂土的动弹性模量和阻尼比与  $FC < 30\%$  的情况呈现相反的变化趋势。

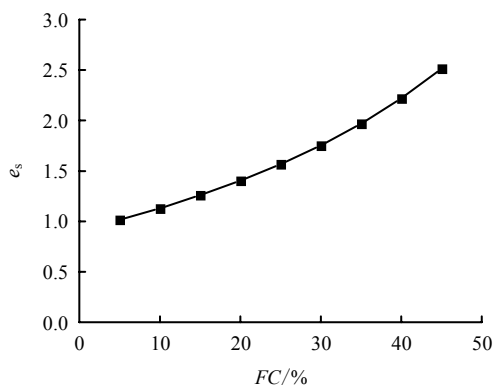


图 7 粒间孔隙比  $e_s$  与细粒含量的关系  
Fig.7 Relationship between intergranular void ratio  $e_s$  with different fines contents

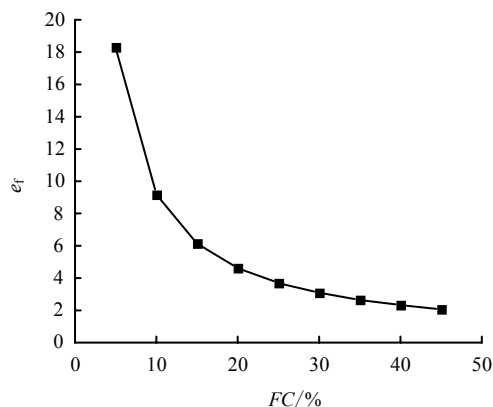


图 8 细粒间孔隙比  $e_f$  与细粒含量的关系  
Fig.8 Relationship between void ratio of fine particles  $e_f$  with different fines contents

### 5 结 论

(1) 对于同样的应变水平，细粒含量对砂土动弹性模量的影响较大，其影响并非随细粒含量的增加呈单调变化，而是随细粒含量的增大，动弹性模量先逐渐减小，在细粒含量达到 30% 时，达到最小值，之后，随着细粒含量的增加又逐渐增加。

(2) 细粒含量的变化对砂土阻尼比同样存在影响，在同一动应变水平下，阻尼比随着细粒含量的增加呈现出先增大后减小的趋势，这种趋势在高应变水平下更趋明显，在细粒含量为 30% 时，砂土的阻尼比达到最大值。

(3) 不同细粒含量的砂土，无论是动弹性模量还是阻尼比，均存在一个界限含量，使得含细粒砂土在界限含量前后的变化呈现相反的变化趋势。本文试验所用含细粒砂土，其临界细粒含量在 30% 左右。

(4) 细粒含量对饱和砂土动弹性模量和阻尼比的影响机制可由含细粒砂土的微观结构特征中得到阐释，并可借助含细粒砂土的粒间状态参量来分析。

#### 参 考 文 献

[1] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1972, 92 (6): 105—134.

[2] YOUD T L, BENNETT M J. Liquefaction sites, Imperial Valley, California[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 109 (3): 440—457.

[3] BAZIAR M H, DOBRY R. Liquefaction ground deformation predicted from laboratory tests[C]//Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St Louis: [s. n.], 1991:

- 451—458.
- [4] 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): 1647—1652.  
ZHU Jian-qun, KONG Ling-wei, ZHONG Fang-jie. Effect of fines content on strength of silty sands[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(11): 1647—1652.
- [5] CHANG N Y, YEH S T, KAUFMAN L P. Liquefaction potential of clean and silty sands[C]//Proceedings of The 3rd International Earthquake Microzonation Conference, [S. l.]: [s. n.], 1982: 1017—1032.
- [6] DEZFULIAN H. Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils[C]//Proceedings of Eighth World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco: [s. n.], 1982: 63—70.
- [7] AMINI F, QI G Z. Liquefaction testing of stratified silty sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2000, 126(3): 208—217.
- [8] SHEN C K, VRYMOED J L, UYENO C K. The effects of fines on liquefaction of sands[C]//Proceedings of The International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: [s. n.], 1977: 381—385.
- [9] FINN W D L, LEDBETTER R H, WU G. Liquefaction on silty soils: Design and analysis[C]// Proceedings of Ground Failures Under Seismic Conditions. New York: Geotechnical Special Publication, 1994: 51—76.
- [10] VAID V P. Liquefaction of silty soils[C]// Proceedings of Ground Failures Under Seismic Conditions. New York: Geotechnical Special Publication No44, 1994: 1—16.
- [11] ZLATOVIC S, ISHIHARA K. Normalized behavior of very loose non-plastic soils: Effects of fabric[J]. **Soils and Foundations**, 1997, 37(4): 47—56.
- [12] POLITO C P, MARTIN II J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(5): 408—415.
- [13] 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): 1184—1188.  
ZHOU Jian, YANG Yong-xiang, JIA Min-cai, et al. Effect of fines content on liquefaction properties of saturated silty sands[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2009, 140(10): 1184—1188.
- [14] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 133—139.  
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(4): 133—139.
- [15] 费涵昌, 吴一伟. 黄浦江大桥桥址土层的动力特性研究[C]//第三届全国土动力学学术会议. 上海: 同济大学出版社, 1990: 303—308.
- [16] 李刚, 陈正汉, 王权民. 厦门市海积粉细砂的动力特性试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(2): 33—36.  
LI Gang, CHEN Zheng-han, WANG Quan-min. The experimental study of dynamic characteristic of fine silt in Xiamen[J]. **Sichuan Building Science**, 2002, 28(2): 33—36.
- [17] 陈国兴, 刘雪珠. 南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1403—1410.  
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Testing study on ratio of dynamic shear moduli and ratio of damping for recently deposited soils in Nanjing and its neighboring areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1403—1410.
- [18] 孔军, 高翔著. 土力学与地基基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [19] 王艳丽, 饶锡保, 王勇, 等. 细粒含量对饱和砂土动孔压演化特性的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 录用待刊.  
WANG Yan-li, RAO Xi-bao, WANG Yong, et al. Effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, in press.
- [20] 王建华, 要明伦. 循环应变下饱和砂(粉)土衰化动力特性研究[J]. 水利学报, 1997, (7): 23—30.  
WANG Jian-hua, YAO Ming-lun. Degradation behavior of saturated sand and sandy loam under cyclic strain[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997, (7): 23—30.
- [21] THEVANAYAGAM S, FIORILLO M, LIANG J. Effect of nonplastic fines on undrained cyclic strength of silty sands[C]// Proceedings of Soil Dynamics and Liquefaction 2000. New York: Geotechnical Special Publication No.107, 2000: 77—91.
- [22] THEVANAYAGAM S. Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(6): 479—491.