

细粒含量对饱和砂土动孔压演化特性的影响

王艳丽^{1,2}, 饶锡保¹, 潘家军¹, 王 勇³

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 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)

摘要:利用 GDS 循环三轴仪, 对不同细粒含量砂土进行了不排水动三轴液化试验, 并基于 Seed 孔压应力模型, 研究了细粒含量对液化进程中动孔压演化特性的影响。研究表明: 细粒含量对砂土孔压发展影响较大, 其影响主要体现在孔压发展模式参数 θ 的不同。含细粒砂土中细粒含量与孔压参数 θ 的关系不是呈单调的线性关系。参数 θ 先随着细粒含量的增加而减小, 并在细粒含量为 30% 时达到最小值, 之后随着细粒含量的增加又逐渐增加, 不同的是参数 θ 在细粒含量超过 30% 后, 其增加的趋势相对平缓。通过对不同细粒含量砂土动孔压演化特性试验研究, 更进一步证明了临界含量的存在, 试验所用的含细粒砂土, 临界细粒含量在 30% 左右。

关键词: 细粒含量; 饱和砂土; 动孔压; 动三轴试验

中图分类号: TU435 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)03-0052-05

Effects of Fines Content on Evolutionary Characteristics of Dynamic Pore Water Pressure of Saturated Sands

WANG Yan-li^{1,2}, RAO Xi-bao¹, PAN Jia-jun¹, WANG Yong³

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

Abstract: With the GDS dynamic triaxial system, undrained dynamic triaxial tests on the saturated sand with different fines content are performed, and the effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands in the process of liquefaction are analyzed based on Seed pore water pressure stress model. It is found that fines content has great effect on the dynamic pore water pressure of saturated sands by the parameter θ for Seed model. The relationship between parameter θ and fines content isn't linear. Parameter θ decreases with the increase of fines content at first, and then reaches its smallest value when the critical value of fines content is 30%. After that, parameter θ increases gradually with the rise of fines content. According to the experimental study on effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands, the existence of critical fines content with 30% is further proved in the sandy soil used in the test.

Key words: fines content; saturated sands; dynamic pore water pressure; dynamic triaxial test

收稿日期: 2010-12-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2008BAB29B02); 长江科学院中央级公益科研院所基本科研业务费项目(CKSF2010016)

作者简介: 王艳丽(1981-), 女, 博士, 主要从事岩石渗流力学与土动力学方面的研究, (E-mail) wyldhh@126.com。

土体在振动作用下产生的孔隙水压力是影响其抗震稳定性的重要因素,土体的液化是在一定条件下由于荷载作用导致孔隙水压力增长的结果,探讨土体的液化机理可以从研究土体中孔隙水压力增长的机理入手^[1]。动荷载作用下孔隙水压力的变化是改变土体强度、引起土体变形的根本原因,也是应用有效应力法分析土体稳定性的关键影响因素。已有学者对饱和砂土的动孔压演化规律进行了研究,得到了许多有用的研究成果^[2-6],这些对饱和砂土动孔压演化特性的研究中,采用较多的是均一的纯净砂。事实上,自然界广泛分布着含有细颗粒的砂性土或砂质粉土等砂粉混合物。Baziar 和 Dobry(1991)^[7]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。

细粒含量的影响研究可追溯到砂土中细粒含量对动强度的影响研究上,此后细粒含量对地基液化的影响逐渐引起学术界和工程界的重视。国内外相继开展了细粒含量的影响研究,研究重点是细粒含量对动强度的影响^[8],并取得了大量的研究成果^[9-15],而针对细粒含量对砂土动孔压的影响研究方面则开展相对较少,定量的研究几乎鲜有报道。本文利用 GDS 循环三轴仪,对不同细粒含量砂土进行了不排水动三轴液化试验,并基于 Seed 孔压应力模型,研究细粒含量对液化进程中动孔压演化特性的影响。同时建立不同细粒含量影响的孔压应力发展模式,并对细粒含量对动孔压影响的机理进行了解释,研究结果可为估计同一地区不同细粒含量砂土的动孔压发展提供一定依据。

1 试验仪器试样制备、试验方法

1.1 试验仪器

试验仪器采用同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室的 GDS 循环三轴仪。它是由英国 GDS 公司研制生产的高精度三轴仪,利用高速直流伺服马达施加动荷载(轴向),根据电子荷重传感器和位移传感器的反馈对荷载和变形的大小进行计算机控制,其基本功能包括:1)可在 5 Hz 范围内进行单向轴压的循环加载;2)可在 5 Hz 范围内对试样施加循环的轴向变形;3)可进行常规的三轴试验,包括拉伸和压缩试验,应力控制和应变控制;其主要参数:1)最大轴力:7 kN;2)最大围压:1 700 kPa;3)试样直径:39.1 mm、50 mm、70 mm、100 mm;4)加载频率:

0~5 Hz。该仪器由以下几部分组成:制动单元、三轴压力室和平衡器、围压控制器、反压控制器、信号控制器、高速数据采集和控制卡(HSDAC 卡)。

1.2 试样制备

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 筛,然后在水中用 0.075 mm 筛子进行洗筛,选取 0.075 mm 筛上的砂样,其粒径在 0.075~0.25 mm 范围内作为骨架砂;将 0.075 mm 筛下的水溶液静置,待细颗粒沉淀,水变清后,倒出清水。晾干细颗粒土样即为小于 0.075 mm 的细粒,用碎土器磨碎土样,烘干。试验所用的砂样由砂粒与细粒按照不同比例重新配制而成,掺入的细粒含量 FC(占试样总质量)分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%。试验砂样按同一个干密度制样,制样的干密度应在最大干密度的极小值与最小干密度的极大值之间,本文试验确定砂土的干密度为 1.40 g/cm³。此时不同细粒含量砂土的相对密实度在 0.29~0.71 之间,属疏松到中密状态。表 1 为不同细粒含量砂样的基本物理力学性质指标。

制样时,控制配土试样的干密度 1.40 g/cm³,根据试样体积得到配土样的质量,按配土中的细粒含量分别计算出该配制土样中砂粒和细粒的质量,然后称取每个标准试样所需的砂粒和细粒的质量,秤好后,充分混合、拌匀,加入适量的无气水,控制含水率在 8%左右。将一定质量的水和土充分搅拌均匀后,在密封塑料袋内静置过夜,再取袋内不同位置处的砂土测试其含水量,其差值不应超过 1%。

试验采用直径为 39.1 mm,高度为 80 mm 的重塑土样。重塑土样的制备采用多层湿捣法,分 5 层捣实。根据土样的干密度及预先设计的含水率确定每层土样的重量,击实到相应高度,各层接触面刮毛,以保证上下层接触良好。

1.3 试验方法

土样制备完成后,放入饱和器内抽真空饱和,砂样经真空饱和后,需经冻结才能装样。冻样装入三轴室后在小侧压(20 kPa)下化冻并通脱气水,按照操作规程进行试验操作,当孔压系数 B 大于 0.95 时,可认为试样满足饱和度要求,然后进入固结阶段,所有试样均在固结围压 100 kPa 作用下进行排水固结,当试样的体变在 5 min 之内不再增加时认为达到了等压固结标准,固结完成后即施加循环荷载,振动波形为正弦波、振动频率 1 Hz,试验的液化标准有 2 种:1)孔压标准,即孔压等于围压认为试样

破坏。2) 变形标准, 即根据工程的重要经验和经验选定双向振幅应变值 $\epsilon_d = 5\%$ 为初始液化标准^[16]。

试验中采用双重固结标准: 即孔压标准 ($u_d = \sigma'_0$) 和变形标准 ($\epsilon_d = 5\%$)。

表 1 不同细粒含量砂样的基本物理性质指标

细粒含量 FC/%	比重 G_s	平均粒径 D_{50} /mm	不均匀系数 C_u	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		相对密度 D_r
				最大值	最小值	
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

2 试验结果与分析

2.1 细粒含量对动孔压的影响

图 1 给出了部分细粒含量试样孔压发展全过程的对比图。由图 1 可知, 在振次比一定的情况下, 不同细粒含量砂土孔压比增长量不同, 在振动的初始阶段, 孔隙水压力迅速升高, 且随着细粒含量的增加, 砂土孔压比的增长量呈现出先降低后增加的趋势。在细粒含量为 30% 时, 孔压比的增长量最小。当 N/N_f 达到 0.2 左右时, 孔压的增加趋缓; 当 N/N_f 达到 0.8 左右时, 孔压比又开始快速增加; 直到 N/N_f 为 1 时, 孔压接近达到围压时, 砂土发生液化。不同细粒含量砂土的动孔压增长模式可用 Seed 提出的动孔压发展模式 (1) 来表示, 区别是不同细粒含量的影响体现在系数值的不同。

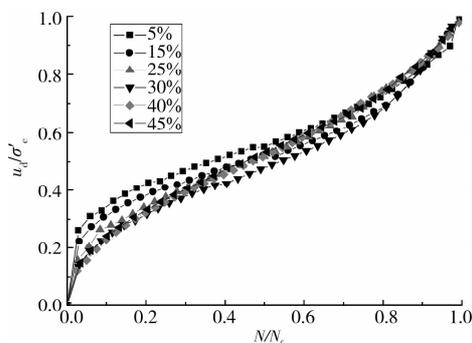


图 1 不同细粒含量砂土动孔压的发展曲线

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (1)$$

式中: θ 为试验常数, 取决于土类和试验条件, 而与

动应力和固结围压的大小无关。

2.2 细粒含量对试验参数的影响分析

图 2(a)~(f) 给出了归一化处理后部分细粒含量砂土的动孔压发展试验曲线与 Seed 拟合曲线, 试验常数 θ 值列于表 2。其拟合关系分别表示为:

当 $FC=5\%$ 时:

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2 \times 1.506}} \quad (2)$$

当 $FC=15\%$ 时:

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2 \times 1.246}} \quad (3)$$

当 $FC=25\%$ 时:

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2 \times 1.187}} \quad (4)$$

当 $FC=30\%$ 时:

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2 \times 1.003}} \quad (5)$$

当 $FC=40\%$ 时:

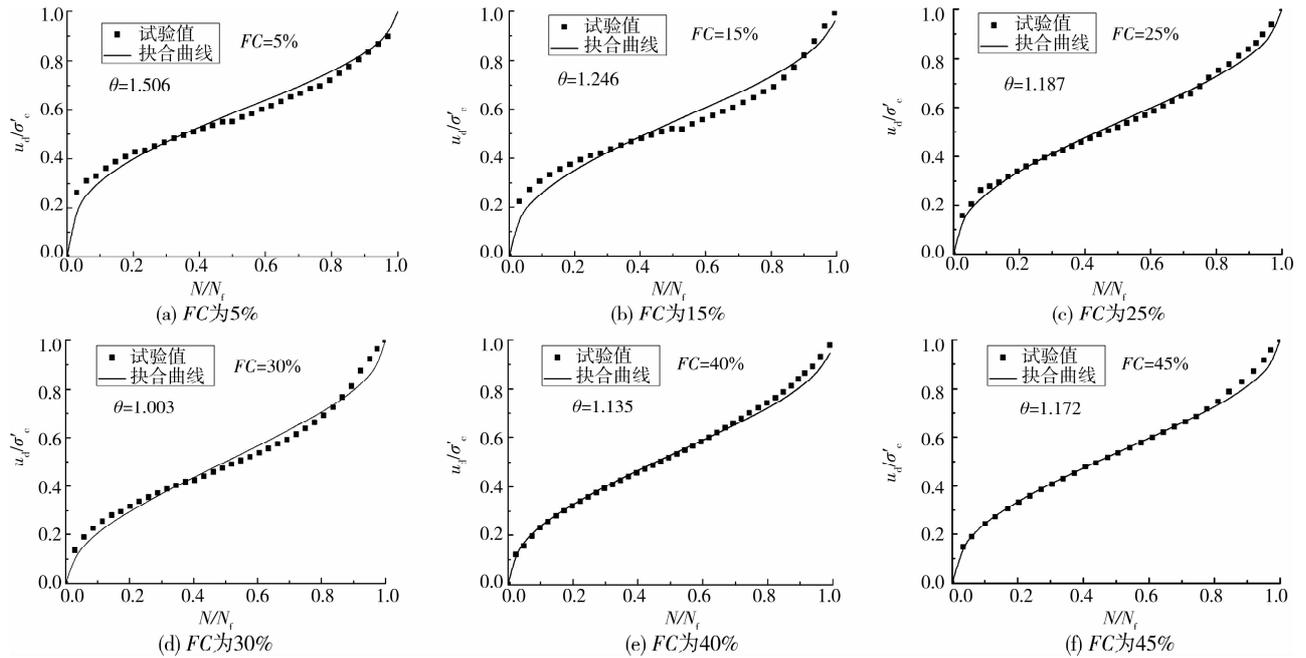
$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2 \times 1.135}} \quad (6)$$

当 $FC=45\%$ 时:

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{2 \times 1.172}} \quad (7)$$

表 2 细粒含量与参数 θ 的关系

细粒含量/%					
5	15	25	30	40	45
1.172	1.506	1.246	1.187	1.003	1.135

图 2 不同细粒含量砂土 u_d/σ'_c 与 N/N_f 的关系

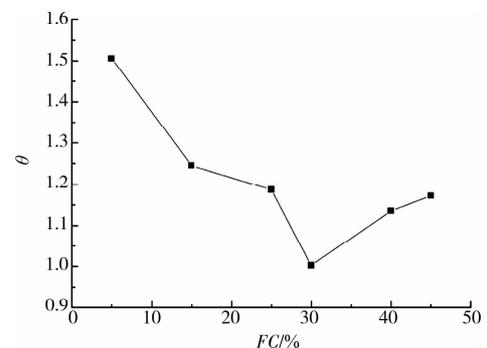
由表 2 可知,参数 θ 先随着细粒含量的增加而减小,并在细粒含量为 30% 时达到最小值,之后随着细粒含量的增加又逐渐增加,不同的是参数 θ 在细粒含量超过 30% 后,其增加的趋势相对平缓。参数 θ 随细粒含量的变化关系见图 3。

由以上分析可知,细粒含量对砂土动孔压的影响不是单调变化的,而是存在一个界限含量,使含细粒砂土的动孔压在界限含量前后的变化规律呈相反的变化趋势。对本次试验所用的含细粒砂土,临界细粒含量在 30% 左右。

3 细粒含量对砂土动孔压影响的机理研究

细粒含量对砂土动孔压的影响仍可从含细粒砂土的微观结构特征去解释。按颗粒大小不同,含细粒砂土中的颗粒可分为 2 种粒组,分别为粗粒组和细粒组。在 $FC < 30\%$ 的情况下,含细粒砂土的动力特性由粗粒组决定,当细粒含量逐渐增加时,粗粒之间形成的骨架孔隙比(粒间孔隙比) e_s 逐渐变大,随着骨架孔隙比(粒间孔隙比) e_s 的增大,砂土的振动孔压更易消散,发展的较慢,这是导致相同振次比作用下,含细粒砂土动孔压逐渐降低的原因。在 $FC > 30\%$ 的情况下,当细颗粒再进一步增加时,砂土的动力特性主要由细粒决定,而细粒之间形成的骨架孔隙比(细粒间孔隙比) e_f 则随着细粒含量的增加而逐渐减小,随着骨架孔隙比(细粒间孔隙比) e_f 的减小,

相同振次比作用下,砂土的振动孔压不易消散,因而发展较快,从而导致振次比相同的情况下,含细粒砂土的振动孔压又随细粒含量的增多呈逐渐变大的趋势。

图 3 参数 θ 随细粒含量的变化关系

4 结 论

利用 GDS 循环三轴仪,进行了不同细粒含量砂土不排水动三轴液化试验,并基于 Seed 孔压应力模型,研究了细粒含量对液化进程中动孔压演化特性的影响。主要得出以下几点结论:

1) 细粒含量对砂土动孔压发展的影响较大。其影响不是随着细粒含量的变化呈单调变化的趋势,在振次比一定的情况下,不同细粒含量砂土孔压比增长量不同,随着细粒含量的增加,砂土孔压比的增长量呈现出先降低后增加的趋势,这种趋势在振动的初始阶段尤为明显。

2) 采用 Seed 孔压应力模型进行分析时,细粒含

量的变化对砂土动孔压的影响主要体现在参数 θ 值的不同,参数 θ 先随着细粒含量的增加而减小,并在细粒含量为 30% 时达到最小值,之后随着细粒含量的增加又逐渐增加,不同的是参数 θ 在细粒含量超过 30% 后,其增加的趋势相对平缓。

3)通过对不同细粒含量砂土动孔压演化特性试验研究,更进一步证明了临界含量的存在,本次试验所用的含细粒砂土,临界细粒含量在 30% 左右。

参考文献:

- [1] 徐斌. 饱和砂砾料液化及液化后变形与强度特性试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.
- [2] 王艳丽,王勇. 饱和砂的动孔压演化特性试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(12):1603-1607. WANG YAN-LI, WANG YONG. Experimental study on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(12): 1603-1607.
- [3] 王艳丽,胡勇. 饱和砂土动力特性的动三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2):295-299. WANG YAN-LI, HU YONG. Dynamic triaxial testing study on dynamic characteristics of saturated sand [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2): 295-299.
- [4] 陈存礼,何军芳,胡再强,等. 动荷作用下饱和尾矿砂的孔压和残余应变演化特性[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):4034-4039. CHEN CUN-LI, HE JUN-FANG, HU ZAI-QIANG, et al. Development characteristics of pore water pressure and residual deformation of tailing sands under cyclic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 4034-4039.
- [5] 靳建军,张鸿儒. 砂土液化特性 MTS 动三轴试验研究[J]. 北京交通大学学报,2006,30(4):60-63. JIN JIAN-JUN, ZHANG HONG-RU. Study on sand liquefaction characteristics by MTS dynamic triaxial test [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30 (4):60-63.
- [6] 王权民,李刚,陈正汉,等. 厦门砂土的动力特性研究[J]. 岩土力学,2005,26(10):1628-1632. WANG QUAN-MIN, LI GANG, CHEN ZHENG-HAN, et al. Research on dynamic characteristics of sands in Xiamen city [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1628-1632.
- [7] 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, 1991: 451-458.
- [8] 曾长女. 细粒含量对粉土液化及液化后影响的试验研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [9] AMINI F, QI G Z. Liquefaction testing of stratified silty sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(3): 208-217.
- [10] STAMATOPOULOS C A. An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(8): 662-678.
- [11] BOBEI D C, LO S R, WANATOWSKI D, et al. Modified state parameter for characterizing static liquefaction of sand with fines [J]. Can. Geotech. J., 2009, 46(3): 281-295.
- [12] ATHANASOPOULOS G A, XENAKI V C. Liquefaction resistance of sands containing varying amounts of fines [C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of 4th decennial Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Sacramento, May 2008. New York: ASCE, 2008:1-10.
- [13] POLITO C P, MARTIN II J R. A reconciliation of the effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands reported in the literature [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(3):635-651.
- [14] KOKUSHO T. Liquefaction strengths of poorly-graded and well-graded granular soils investigated by lab tests [C]//KYRIAZIS D P. Earthquake Geotechnical Engineering. Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-invited Lectures, Thessaloniki, Greece, 25-28 June 2007, The Netherlands: Springer, 2007:159-184.
- [15] MOSTEFA B, AHMED A, NOUREDDINE D. Liquefaction resistance of chief river silty sand; effect of low plastic fines and other parameters [J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2010, 7(2):119-137.
- [16] 吴世明. 土动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000:124-125.

(编辑 王秀玲)