DOI: 10.11779/CJGE2019S2043

黏粒和粉粒的共存对砂土静动力液化影响的试验研究

李 涛,唐小微

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要:为了研究黏粒、粉粒与砂粒共存的土体中,黏粒和粉粒对砂土抗液化的影响规律,通过静力与动力三轴仪试验系统,对细粒(黏粒和粉粒)含量 FC 为 5%和 10%、三种不同细粒配比的试样进行静力与动力三轴试验。试验结果表明:相同细粒含量、不同细粒配比试样的抗液化强度不同;当细粒含量不同时,随着细粒中黏粒或粉粒含量的单调变化,试样所表现出的抗液化规律不同;FC=10%试样的抗液化强度整体高于 FC=5%试样的相应强度。随着细粒含量及细粒中黏粒与粉粒相对含量的变化,黏粒与粉粒对砂粒的填充、黏结与骨架作用所占比例不同。
关键词:混合土;细粒含量;细粒配比;黏粒含量;粉粒含量;抗液化强度
中图分类号:TU43 文献标识码:A 文章编号:1000-4548(2019)S2-0169-04
作者简介:李 涛(1989—),男,博士研究生,主要从事岩土工程数值及试验方面的研究工作。E-mail: litaodut@163.com。

Experimental study on effect of coexistence of clay and silt on static and dynamic liquefaction of sand

LI Tao, TANG Xiao-wei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to study the influence rules of clay and silt on the liquefaction resistance of sand in the mixture of clay, silt and sand, based on the static and dynamic triaxial tests, the sand specimens with two different fines (clay and silt) contents (FCs), 5% and 10%, and three different fines proportions are investigated by the static and dynamic triaxial system. The test results show that the liquefaction resistance of specimens with the same fines content and different fines proportions are different. When the fines content of the specimens is different, the laws of liquefaction resistance are different with the monotonous change of the clay or silt content in the fines. The liquefaction resistance of the specimens with FC of 10% are higher than that of the specimens with FC of 5%. The clay and silt play roles of filling, bonding and skeleton effects on the sand particles. And with the change of clay and silt content in the fines, the proportion of these three roles is different under different fines contents.

Key words: mixed soil; fines content; fines proportion; clay content; silt content; liquefaction resistance

0 引 言

近年来,全球范围内发生了多次强烈地震,对建 筑物及其地基造成了巨大的危害。例如 2008 年四川 省汶川县 8.0 级地震以及 2010 年海地 7.3 级地震等。 相关研究表明,地震中约有 50%的地基破坏是由地基 液化所引起的。对于均匀饱和纯净砂土液化的研究, 国内外学者已经取得了丰硕的成果。然而,实际工程 中,大多数砂土都含有一定量的细粒(黏粒和粉粒)^[1]。 关于细粒对土体液化的影响,相关学者做了大量的工 作。研究表明随着细粒含量 FC 的增加,砂土的抗液 化能力呈现出增大、减小以及非单调变化的趋势^[2]。 此外,针对含细粒砂土的室外试验研究,也取得了诸 多成果^[3]。然而,这些成果绝大多数只是单一研究了 黏粒或粉粒对砂土液化的影响。众所周知,粉粒与黏 粒是两种性质不同的细粒,并且这两种细粒对砂土的 抗液化影响规律不同^[4]。截止目前,有关砂中同时包 含粉粒与黏粒的混合土体液化研究成果较少。本文为 了探究静力与动力条件下黏粒与粉粒的共同添加对砂 土抗液化的影响规律,分别向砂中添加 5%与 10%含 量的细粒。文中将细粒质量与砂粒质量的比值定义为 细粒含量 FC,在每种细粒含量之下,依次改变细粒中 黏粒与粉粒的占比。例如当 FC=5%时,细粒中的黏粒 占比分别为 20%, 50%, 80%,相应的粉粒占比则依 此为 80%, 50%, 20%。为了方便后续对试验结果进 行分析与讨论,将该细粒含量、细粒配比的试样分别

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51639002); 国家重点研发计 划项目 (2018YFC1505305) 收稿日期: 2019 - 04 - 29

简记为 5-2 黏-8 粉、5-5 黏-5 粉和 5-8 黏-2 粉。同样方 法也适用于 FC=10%的试样。

1 试验概况

试验所用砂粒为粒径范围在 0.1~0.25 mm 的福 建标准砂,粉粒粒径范围为 0.02~0.075 mm,黏粒为 含 Ca 基的商用膨润土。

2 试验方案

试验中重塑样的尺寸为 39.1 mm×8 mm (直径× 高度)。本文采用湿击法将试样分为 4 层进行击实。经 测量,本文所用的砂粒、粉粒与黏粒的颗粒相对密度 *G*_s相差较小,为了便于统一计算及方便后期试验结果 的处理,本文中假定砂粒、粉粒与黏粒的颗粒相对密 度都为 2.65,相同的处理方法同样出现在其他学者的 研究之中^[5]。

表1 试验方案

Table 1 Test programs					
细粒含	细粒配比/%		砂骨架	试样	土颗粒
量 FC/%	黏粒	粉粒	孔隙比 e_s	孔隙比 e	混合比
5	20	80	0.98	0.8823	5-2 黏-8 粉
	50	50	0.98	0.8823	5-5 黏-5 粉
	80	20	0.98	0.8823	5-8 黏-2 粉
10	20	80	0.98	0.7967	10-2 黏-8 粉
	50	50	0.98	0.7967	10-5 黏-5 粉
	80	20	0.98	0.7967	10-8 黏-2 粉

表1为本文的试验设计方案,文所有试样均以砂 骨架孔隙比为控制参数。具体到实际制样时,确保试 样的砂骨架孔隙比恒定,即每个试样中砂粒的总质量 为定值,在此基础之上再向砂中中添加不同含量的粉 粒与黏粒。之后将制好的试样置于三轴仪上采用水头 饱和的方法对之进行饱和。完成饱和之后随即测量试 样的孔隙水压力系数 $B(B=\Delta u/\Delta \sigma_3)$,当B>0.95时 即认为试样达到饱和。

静力试验部分采用常规应变控制式静力三轴仪 分别对试样在 100,200,300 kPa 的围压下进行等压 固结不排水试验(CU试验),当试样的轴向应变达到 25%时停止试验。动力试验部分采用 CKC 全数字闭环 控制气动式三轴仪进行试验。试样全部首先在 200 kPa 的围压下进行等压固结,之后对固结完成的试样施加 频率 f=0.5 Hz 的半正弦荷载,将轴向应变 $\varepsilon_a = 5\%$ 作为 试样液化的破坏标准,当轴向应变达到 30%时结束试 验。试样的制备、饱和、固结以及加载均按照《土工 试验规程》(SL237—1999)进行^[6]。

3 试验结果

3.1 静力试验

静力荷载作用下,同一细粒含量、不同细粒配比

试样在相同围压下的应力 - 应变和孔压 - 应变曲线如 下图 1 所示。





confining pressures

从图 1 中 FC=5%试样的试验结果可以看出,在各 个围压作用下,FC=5%试样的应力值由小到大依次为 5-5 黏-5 粉<5-8 黏-2 粉<5-2 黏-8 粉;而相应的孔压值 顺序与此相反。细粒配比为 5-2 黏-8 粉与 5-8 黏-2 粉 试样的应力 - 应变曲线在各个围压下均表现出应变硬 化的特征,试样并未发生静态液化现象;相比之下, 5-5 黏-5 粉试样的应力 - 应变曲线在各个围压作用下 均呈现出应变软化特征,试样发生静态液化。

从图 1 中 FC=10%试样的试验结果可以看出,各 个围压作用下,FC=10%试样的应力值从小到大依次 为:10-8 黏-2 粉<10-5 黏-5 粉<10-2 黏-8 粉;而相应 的孔压值顺序与此相反。细粒配比为 10-2 黏-8 粉与 10-5 黏-5 粉的试样在各个围压作用下应力-应变曲线 全部表现出应变硬化的特征,试样均未发生静态液化; 类似 5-5 黏-5 粉的试样,在不同围压下,10-8 黏-2 粉 试样在剪切初期发生应变软化现象。相同细粒配比下, FC=10%试样的应力值总体上高于 FC=5%试样的相应 值。分析认为,由于本文中试样的砂骨架孔隙比保持 恒定,相较于 FC=5%的试样而言,当 FC=10%时,这 相当于在具有相同孔隙的砂土中添加进更多的细粒, 继而导致试样整体相对密实度的提升,最终使得相同 细粒配比下,高细粒含量试样的应力值大于低细粒含 量试样的相应值。

综合对比以上试验结果可以发现,当FC=5%时,随着细粒中粉粒含量的增加(或黏粒含量的减少),试样的静力抗液化强度呈现出非单调的变化规律,而FC=10%试样的抗液化强度单调递增。

3.2 动力试验

在循环动力荷载作用下,试样轴向应变随时间变 化曲线 ε_a - *T* 及动孔隙水压力随时间变化曲线 u - *T* 如图 2, 3 所示。



图 2 不同荷载幅值下 FC=5%试样的试验结果 Fig. 2 Results of specimens with FC of 5% under different

loadings

从图 2,3 可以看到,两种细粒含量、不同细粒配 比试样在动力荷载作用下,试样均发生液化破坏 (*ε*_a =5%),各个荷载幅值作用下试样的破坏时间差 异较大。在振动前期,试样的轴向应变几乎不发展, 而到了振动后期,轴向应变突然增加,直至试样发生 液化破坏;试样的孔隙水压力在前期经历了一小段时 间的快速增长,随即孔压的增长速度下降,类似轴向 应变,到了振动后期,孔压再次进入到快递增长的模 式,直至达到围压,试样发生液化破坏。

图 4 为两种细粒含量、3 种细粒配比试样在发生 液化破坏时,其循环应力比 CSR 随循环破坏振次 N_f 变 化的拟合曲线 CSR - N_f,其中循环应力比 CSR 的定义

如下:

$$CSR = \sigma_d / 2\sigma_3 \tag{1}$$

式中, σ_{d} 为循环动应力, σ_{3} 为试样所受的围压。



图 3 不同荷载幅值下 FC=10%试样的试验结果

Fig. 3 Results of specimens with FC of 10% under different loadings





Fig. 4 Curves of dynamic strength of specimens with different

fines contents and fines proportions

从图 4 中可以看到, FC=10%试样的 CSR - N_f 曲 线全部高于 FC=5%试样的相应曲线。当 FC=10%时, 随着细粒中黏粒含量的增加(或粉粒含量的减少),试样的抗液化强度依次减弱; 而当 FC=5%时,试样的抗液化强度并非呈现出单调变化的规律。

对比上述 FC=5%与 10%试样的静力与动力试验 结果可以发现:相同细粒含量、不同细粒配比试样的 抗液化强度不同。如果单一考虑细粒对砂粒的填充作 用,本文给定的砂骨架孔隙比所对应试样内部颗粒与 颗粒之间的孔隙较大,当 FC=5%,细粒将几乎全部填 充于孔隙之中,其并不会参与土体骨架的构建,进而 可以推测相同细粒含量、不同细粒配比试样的试验结 果应该是相同的。但通过对比可以发现,FC=5%、不 同细粒配比试样的静力与动力试验结果差异较大。反 观 FC=10%的试样,随着细粒中粉粒或黏粒含量的单 调增加,试样的抗液化强度变化规律较为明显。

综合考虑以上试验结果可以推断,黏粒、粉粒和 砂粒共存的土体中,黏粒和粉粒对砂粒的填充、黏结 与骨架作用同时存在,并且随着细粒含量与细粒配比 的变化,这些作用呈现出不同的主导地位。具体表现 为: 当细粒配比为 5-5 黏-5 粉时, "含量相当"的黏粒 与粉粒填充于砂粒的孔隙之中并且互相黏结,只有极 少一部分细粒参与到土体骨架的构建之中; 而当细粒 配比为 5-8 黏-2 粉或 5-2 黏-8 粉时,粉粒与黏粒的含 量相差较大,此时细粒中"含量相当"的粉粒与黏粒 填充于砂粒的孔隙之中并且相互黏结,而在"剩余" 的黏粒或粉粒中,一部分继续对砂粒孔隙进行填充, 另一部分则参与土体骨架的构建。细粒配比为 5-8 黏 -2 粉与 5-2 黏-8 粉的试样中, 黏粒、粉粒分别"剩余", 而粉粒的平均粒径又大于黏粒,在"剩余"的细粒中, 同等条件下相较于黏粒,将有更多的粉粒与砂粒一同 扮演土体骨架的角色,这些粉粒可以增强土颗粒之间 的摩擦作用,最终由于较大的颗粒间摩擦作用使得5-2 黏-8 粉的试样表现出较大的抗液化强度;而在 5-8 黏 -2 粉的试样中,"剩余"的黏粒分布在砂粒周围,在 一定程度上黏结砂粒,最终由于较大的颗粒间黏结力, 使得其表现出比 5-5 黏-5 粉试样更高的抗液化强度。 由于土是一种摩擦型材料,因此可以推断上述"剩余" 细粒中,粉粒对于土粒的摩擦作用强于黏粒对土粒的 黏结作用,最终使得 5-2 黏-8 粉试样的抗液化强度最 大,5-8 黏-2 粉试样的次之,5-5 黏-5 粉的相应值则最 小。当 FC=10%时,此时试样中细粒含量整体增大, 除了其中一部分细粒用于填充砂颗粒孔隙之外,更多 的细粒已经参与到土体骨架的构建之中,同样由于粉 粒对于土粒的摩擦作用强于黏粒对土粒的黏结作用, 此时摩擦作用占主导地位。因此随着细粒中粉粒含量 的增加,试样的抗液化强度单调增加。

4 结 论

本文以含两种不同细粒含量的砂土为研究对象, 以静力与动力三轴试验为研究手段,重点研究了黏粒 和粉粒的共存对砂土抗液化强度的影响规律,可以得 出下述结论: (1) 黏粒、粉粒和砂粒共存的土体中, 黏粒和粉 粒对砂粒的填充、黏结与骨架作用同时存在。随着细 粒中粉粒含量的增加(或黏粒含量的减少), FC=5% 试样的抗液化强度呈现出非单调的变化规律, 而 FC=10%试样的抗液化强度则单调递增。

(2) 5-5 黏-5 粉试样与 10-8 黏-2 粉试样发生了
静态液化; 5-2 黏-8 粉、5-8 黏-2 粉、10-2 黏-8 粉和
10-5 黏-5 粉试样的应力 - 应变曲线在各个围压下均表
现出明显的应变硬化特征,试样并未发生静态液化。

(3)细粒配比为 5-5 黏-5 粉时,"含量相当"的 黏粒与粉粒主要填充于砂粒的孔隙之中并且互相黏 结;当细粒配比为 5-2 黏-8 粉与 5-8 黏-2 粉时,其中 "含量相当"的粉粒与黏粒填充于砂粒的孔隙之中并 且相互黏结,而"剩余"的黏粒或粉粒中一部分细粒 继续对砂粒的孔隙进行填充,另一部分则参与到土体 骨架的构建之中,所以当 FC=5%时,细粒配比占主导 地位。当 FC=10%,除去其中一部分细粒用于填充砂 颗粒孔隙之外,剩余更多的细粒已经参与到土体骨架 的构建之中,相较于细粒配比,此时的细粒含量占据 主导地位。

参考文献:

- [1] YANG J, WEI L M. Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape[J]. Géotechnique, 2012, 62(12): 1111 1125.
- [2] XENAKI V C, ATHANASOPOULOS G A. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23: 183 – 194.
- [3] 董林,王兰民,夏坤,等.含细粒砂性土标贯液化判别方法改进研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2320 2325.
 (DONG Lin, WANG Lan-min1, XIA Kun, et al. Improvement of SPT-based liquefaction discrimination methods for fines-containing sandy soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2320 2325. (in Chinese))
- [4] CARRERA A, COOP M R, LANCELLOTTA R. Influence of grading on the mechanical behavior of stave tailings[J]. Géotechnique, 2011, 61(11): 935 - 946.
- [5] THEVANAYAGAM S, MOHAN S. Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands[J]. Géotechnique, 2000, 50(1): 1 - 23.
- [6] SL237-1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237-1999 Specification of Soil Test[S]. 1999. (in Chinese))