

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.017

颗粒级配对粒状材料不排水力学特性的影响

刘映晶^{1,2,3}, 李 罡^{2,4}, 尹振宇^{1,2}, 夏小和¹, 王建华¹

(1.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院土木工程系, 上海 200240; 2.南特中央理工大学 土木与力学学院, 法国 南特 44300;
3.上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235; 4.中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘 要: 为了研究颗粒级配对粒状材料不排水力学特性的影响, 采用两种形状自相似度很高的材料(玻璃球和 Hostun 砂)进行了一系列传统三轴不排水压缩试验。对于每种材料, 保持相近的相对密实度制作了 6 个不同颗粒级配(不均匀系数 $C_u = 1.1 \sim 20$)的试样, 然后进行剪切。试验结果表明, 颗粒级配对粒状材料的不排水力学性能存在明显影响: 两种材料试样的偏应力水平随着不均匀系数的增加而降低, 抗剪强度随着材料的不均匀系数 C_u 的增加而降低, 并在 $C_u > 5$ 后呈现出趋稳态势。基于不排水剪切试验中颗粒集合体二阶功的演化规律, 对材料受荷载过程中出现不稳定性的条件进行分析。结果表明, 在相同密实度下, 粒状材料的静态液化潜能随着材料不均匀系数 C_u 的提高而增强, 高不均匀系数的材料变得不稳定。

关 键 词: 颗粒级配; 三轴不排水试验; 不稳定性; 相对密实度; 粒状材料

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)02-0423-07

Influence of grain gradation on undrained mechanical behavior of granular materials

LIU Ying-jing^{1,2,3}, LI Gang^{2,4}, YIN Zhen-yu^{1,2}, XIA Xiao-he¹, WANG Jian-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Research Institute in Civil and Mechanical Engineering, UMR CNRS, 6183, Ecole Centrale Nantes, Nantes 44300, France;

3. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China;

4. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper studies the influence of grain gradation on the undrained mechanical behavior of granular materials. A series of conventional undrained triaxial compression tests is carried out on two different materials (glass balls and Hostun sand), which have high degree of shape self-similarity. For each material, 6 samples with similar relative density and different gradations ($C_u = 1.1 \sim 20$) are prepared, and then the samples are sheared. Test results show that the grain gradation has an obvious impact on the undrained mechanical behavior of granular material: both deviatoric stress level and undrained shear strength of two material samples decreases as the coefficient of uniformity (C_u) of the material increases, their variations tend to converge as coefficient of uniformity C_u surpasses 5. Based on the evolution of the value of the second-order work of the granular assembly during undrained triaxial loading, potential instability for the selected granular materials is also analyzed. The results demonstrate a significant influence of the grain gradation on stability: the higher of coefficient of uniformity (C_u), the larger of the potential of static liquefaction and the unstabler of materials.

Key words: grain gradation; undrained triaxial test; instability; relative density; granular material

1 前 言

粒状材料被广泛应用于岩土工程中, 比如堆石大坝, 铁路路基等, 涉及到大量粒状材料级配变动引起的工程问题。工程实践和室内试验表明, 破碎

导致的粒状材料的颗粒级配演化对其力学性能有显著的影响^[1-3]。研究不排水条件下粒状材料的某些力学特性, 如抗剪强度和的不稳定性, 对岩土工程有重要的科学与工程意义。近年来, 粒状材料不排水抗剪强度的影响因素得到了广泛的关注^[4-9]。然而,

收稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41240024, No. 41172251, No. 41372285, No. 51161130523, No. 41002095, No. 41272317); 欧盟玛丽居里行动计划(No. PIAPP-GA-2011-286397); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20110073120012); 上海市浦江人才计划项目(No. 11PJ1405700)。

第一作者简介: 刘映晶, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事土体本构关系及地下工程等方面的研究。E-mail: liuyj301@gmail.com

通讯作者: 尹振宇, 男, 1975 年生, 博士, 博士生导师, 主要从事土体本构及岩土工程应用方面的研究与教学工作。E-mail: zhenyu.yin@gmail.com

这些研究中大部分将颗粒级配的影响因素和其他因素混合在一起,比如平均粒径、颗粒形状等;此外,对于级配较宽的粒状材料(高不均匀系数 C_u)的研究较少;因此,这些方面需要进一步的研究。在不排水条件下,即使其应力状态未达到屈服阶段,粒状材料也会变得不稳定^[10-12]。“不稳定性”一般是指土体单元不能承受给定的很小的附加荷载而迅速产生大的塑性应变行为。通常认为,二阶功理论^[13-14]可以用来作为土体稳定的判断标准:如果在给定的力学状态下二阶功变为负值时,试样可能产生失稳。Lade 等^[15]通过试验验证了土体在加载过程中,二阶功出现负值的情况下,土体并不总是发生破坏的,增量载荷的方向以及控制这个增量荷载的力学变量是主要的影响因素。因此,二阶功理论对土体不稳定的判断仅仅是一个必要条件,而非充分条件^[11]。

本研究的主要任务是通过室内试验评估颗粒级配对粒状材料的不排水力学行为的影响。试验采用两种粒状材料,即 Hostun 砂和玻璃球。对于每一种材料,首先制作了不同颗粒级配但相对密度的相近试样,然后进行一系列的不排水三轴压缩试验。根据试验结果,分析和讨论颗粒级配对粒状材料不排水力学行为的影响。

2 试验方案

2.1 试验材料

正如前文所述,影响粒状材料力学性能的因素很多,研究^[16]表明,颗粒形状对粒状材料的力学性能影响明显;而很少有研究分析了被测材料的形状,即使是相同的粒状材料不同的颗粒尺寸下其形状并不总是相同的^[17]。研究者发现,增加颗粒的棱角将会导致孔隙比指数即 $e_{\max}$ (最大孔隙比)和 $e_{\min}$ (最小孔隙比)的增加^[18],以及材料的临界状态的摩擦角 φ_{cs} 的增加,而材料刚度则会降低^[19]。Ashmawy 等^[20]发现,颗粒形状对粒状材料液化灵敏度的影响是显著的。因此,为了突出颗粒级配的影响,研究时对以上所述的其他因素(如相对密度、平均粒径 d_{50} 、颗粒形状等)进行隔离分析,即保持这些因素相同仅改变材料的颗粒级配。对于相对密度、平均粒径 d_{50} 在试验中可以人为地控制,对于选用的试验材料的颗粒形状尤其是天然材料需要进行专门的分析。

本研究选用材料的颗粒级配曲线如图 1 所示,Hostun 砂和玻璃球均采用相同的颗粒级配曲线。其中不同颗粒级配材料的颗粒尺寸 d_{50} 保持为 0.9 mm,不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10}$ 从 1.1~20 之间变化。对于玻

璃球,由于是人工制造,不同尺寸的颗粒形状是相近的;而对于 Hostun 砂,颗粒形状的相似性必须经过测试才能用于试验。颗粒形状分析是基于扫描电子显微镜(SEM)的观测结果进行的。基于扫描结果,采用形状参数 β ^[21]来量化不同尺寸 Hostun 砂的相似性:

$$\beta = L_M / L_m \quad (1)$$

式中: L_M 和 L_m 分别为颗粒形状最小外接矩形的长边和短边。颗粒形状分析主要包括两个过程:成像过程(获得每个粒子的 β 值)和数学统计过程。

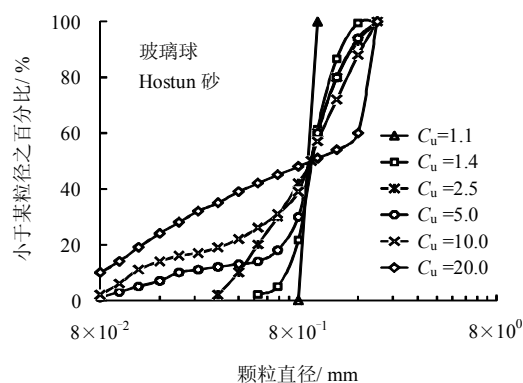


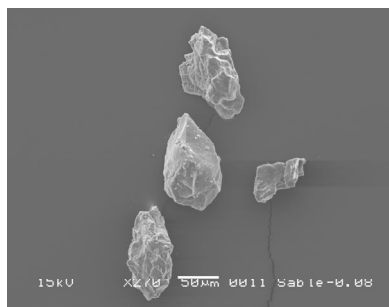
图 1 试验所用试样的颗粒级配
Fig.1 Grain gradations for all tested samples

成像过程包含以下 3 个步骤(参见图 2): (1) 通过扫描电镜成像每个颗粒的二维图像; (2) 进行图像二值化处理; (3) 使用开源的软件 ImageJ 确定颗粒的 L_M 和 L_m 。

颗粒形状分析的结果见图 3, 粒径分布范围为 0.08~2.00 mm (860 个颗粒)。由图中可见: 形状参数 β 的变化主要是从 1.0~1.4, 对应的累积频率范围高达 80%。因此, 在选定的颗粒直径范围内的 Hostun 砂的颗粒形状可以视为相似的, 满足本研究的要求。

2.2 试验方案

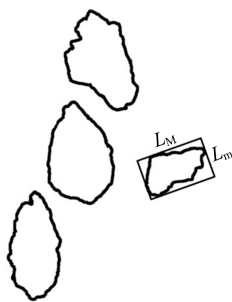
采用所选定的材料,进行了 12 个不排水三轴压缩试验。对于每种材料,为每个级制备一个试样,直径为 100 mm,高度为 200 mm。为了制备相对均匀的试样,采用文献[9]的压缩方法。首先,根据目标相对密度 $D_r = (e_{\max} - e)/(e_{\max} - e_{\min}) = 42\%$ (e 为天然孔隙比)估算好所需要的干颗粒的质量,并制作试样;放置好试样帽后,施加 10~20 kPa 的负压,接着拆掉模具;然后对试样进行饱和处理,直到 Skempton B 参数大于 0.97;随后进行常围压下的各向同性压缩固结,之后进行不排水压缩剪切。



(a) 扫描电镜成像



(b) 图像二值化



(c) 边界提取

图 2 数字图像处理

Fig.2 Digital image processing

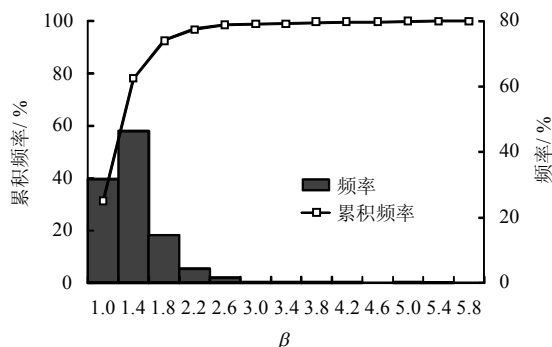


图 3 颗粒形状分析图

Fig.3 Histogram of grain shape analysis

表 1 中列出了对应各向同性压缩固结阶段结束后试样的初始孔隙比和相对密实度。需要注意的是初始孔隙比 e_0 的测定本文使用常规方法（测量试样高度、直径、质量和土体相对密度），与含水率法^[22]所获得的孔隙值存在 5~10 % 的差异。

表 1 试验材料的初始孔隙值和相对密实度
Table 1 Initial void ratios and relative densities for tested materials

级配	Hostun 砂		玻璃球	
	初始 孔隙比 e_0	相对密实度 D_r /%	初始 孔隙比 e_0	相对密实度 D_r /%
$C_u=1.1$	0.764	42.9	0.660	43.1
$C_u=1.4$	0.753	42.1	0.635	42.4
$C_u=2.5$	0.698	42.3	0.539	41.4
$C_u=5.0$	0.670	42.2	0.443	42.3
$C_u=10$	0.612	41.3	0.393	41.9
$C_u=20$	0.585	41.4	0.317	42.4

为保证孔隙水压力的变化在整个试样中的均衡性，本试验所有不排水三轴压缩试验均在一个较小的恒定应变加载速率（0.15%/min）下进行。试验设备采用传统三轴压缩仪，由于其端部约束，薄膜贯入以及试样大小等因素都不能忽略，一般认为，当加载到轴向应变值高于 20% 后得到的试验数据是不可靠的。基于此，本研究所有的试验数据仅选取到轴向应变为 20%。

2.3 试验结果和分析

2.3.1 Hostun 砂试验

图 4 给出了在 100 kPa 的围压下不同颗粒级配 Hostun 砂的不排水剪切特性。从图 4(a) 可见，在整个加载过程中，随着试样不均匀系数 C_u 的递增，试样偏应力逐渐降低。这种降低可能是随着试样不均匀性递增，小颗粒含量的逐步增多，从而导致同一相对密实度材料的压缩性增强，进而引起试样中超孔隙水压力的增加并导致其不排水抗剪强度的降低。

事实上，外部荷载是通过力链在整个颗粒体系中传递的。对于单颗粒分散材料，在连续加载的过程中，力链的破坏和重建不会造成重大的结构重组；而对于多颗粒聚分散材料，不同大小的颗粒之间的重组更为明显，导致初始较为松散的颗粒体系有更高的压缩性。

如图 4(b) 所示，试样的平均有效应力在加载的初始阶段出现明显的减小，这是由于试样中孔隙水压力有较大的增长引起的。这种孔隙水压力的增加可以大到足以导致出现所谓的静态液化现象（这种现象更容易发生在高 C_u 值材料）。试样的偏应力先减小后增加，然而这种偏应力减小只是暂时的，当达到特征状态（或相变状态）时就停止减小；然后在加载的第 2 阶段，孔隙水压力不断减小（见图 4(c)），应力路径沿着特征线一直上升，趋近于临界状态。

2.3.2 玻璃球试验

对于玻璃球，在较低的初始围压下（例如 $p'_0 =$

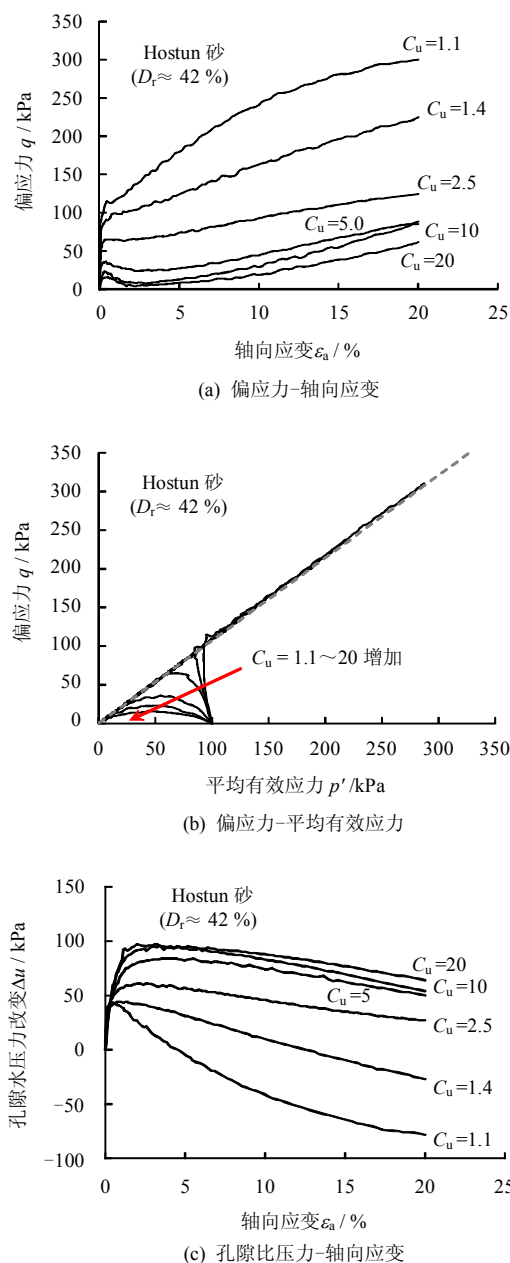


图4 不同级配 Hostun 砂试样的不排水应力-应变响应
Fig.4 Undrained stress-strain responses of Hostun sand specimens with different grain gradations

100 kPa), 黏滑现象^[23]会非常明显, 进而产生大量的噪点数据; 而噪点数据对数据的分析会产生明显的影响。实践中发现, 增加围压可以降低黏滑现象, 因此, 本研究所有的玻璃球试样均在较高的围压应力 ($p'_0 = 400$ kPa) 下加载。玻璃球的三轴不排水剪切试验中也出现了与 Hostun 砂试验类似的演化趋势, 玻璃球试样的抗剪强度是与级配相关的, 如图 5 所示。

2.3.3 不排水抗剪强度

本研究定义对应轴向应变为 20% 时的偏应力 ($q_{20\%}$) 为不排水抗剪强度 q_s 。对于玻璃球试验 (见图 5(a)), 轴向应变达到 20% 时所有试样的应力水平

基本达到稳定状态。而对于 Hostun 砂试验 (见图 4(a)), 偏应力仍然在增加, 直到加载结束, 因此, 不能认为对应轴向应变为 20% 时的抗剪强度值为最大的不排水抗剪强度。

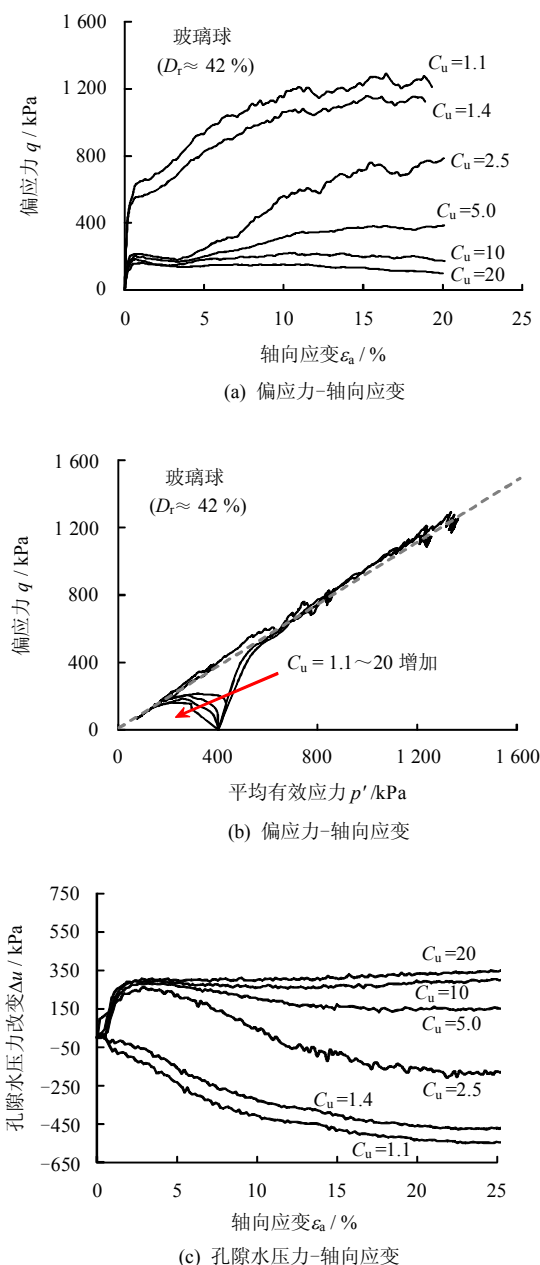


图5 不同级配玻璃球试样的不排水应力-应变响应
Fig.5 Undrained stress-strain responses of glass balls specimens with different grain gradations

尽管如此, 为了研究颗粒级配 (以 C_u 表示) 对粒状材料不排水剪切强度的影响, 将不同级配试样的不排水抗剪强度 $q_{20\%}$ 和相对应的颗粒级配指标 C_u 绘制在一起。实际试验中为了减小玻璃球试验数据的波动性以及减小 Hostun 砂受到较大剪应力而产生破碎的影响, 本文仅选用了两种围压下材料的不排水响应结果。通过将不排水抗剪强度对围压进

行无量纲化处理,以排除围压的干扰,如图6所示。图中两种材料的不排水抗剪强度 q_s 均随着材料不均匀系数 C_u 的增加而降低,在不均匀系数 C_u 高于5后呈现出趋稳势态。这意味着,对于产生颗粒破碎的情况,破碎引起的颗粒级配不断拓宽,不均匀系数 C_u 的逐步增大,粒状材料的不排水抗剪强度将逐渐降低;降低的程度随材料不均匀系数的增加而减弱。

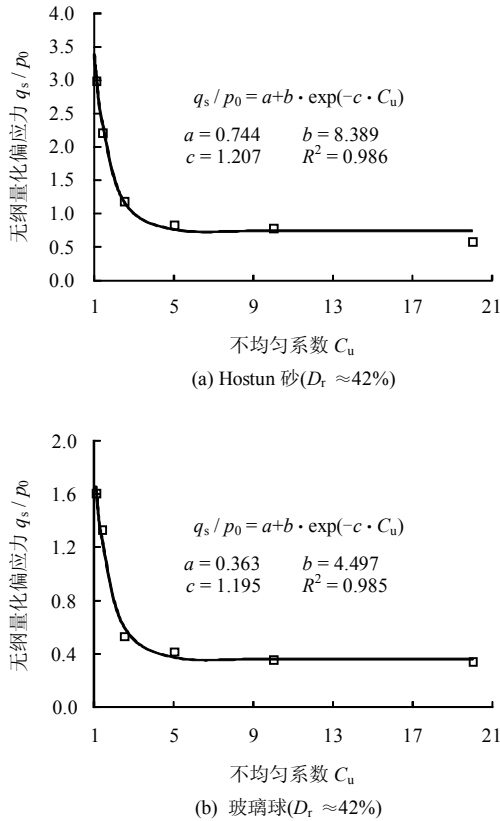


图6 不排水剪切强度和均匀系数的关系
Fig.6 Variations of undrained shear strength with uniformity coefficient

2.3.4 相变状态

当粒状材料在不排水剪切条件下,通常容易出现所谓的相变状态^[24]或特征状态^[25],对应于颗粒骨架的压缩和膨胀行为的过渡状态。对于本文研究的两种材料,可以发现材料的颗粒级配对其不排水相变状态的偏应力值影响是显著的(如图4和图5所示)。选取偏应力曲线中第1个转折点(对应孔隙水压力增长趋势的转折点)作为相变状态偏应力值 q_{pt} 并与材料的不均匀系数 C_u 绘制在一起,并且同样采用无量纲化处理,如图7所示。图中相变状态偏应力 q_{pt} 随着材料不均匀系数 C_u 的增加而降低。两者之间可以用指数关系来描述;通过拟合数据可见当材料的不均匀系数 C_u 高于10的时候,可以观察到相变状态偏应力 q_{pt} 趋于稳定。

2.3.5 不排水失稳

为了探讨不排水条件下粒状材料的失稳依据,计算不同级配试样的二阶功并进行分析。根据文献[14],如果二阶功严格是正值的情况下,能够保证材料的稳定状态;否则,当它趋于0或变为负值时,会有潜在的材料不稳定性。常规轴对称三轴试验的二阶功可以表示为

$$d^2w = dp'd\varepsilon_v + dq'd\varepsilon_d \quad (2)$$

式中: ε_v 为体积应变; ε_d 为偏应变; w 为二阶功。

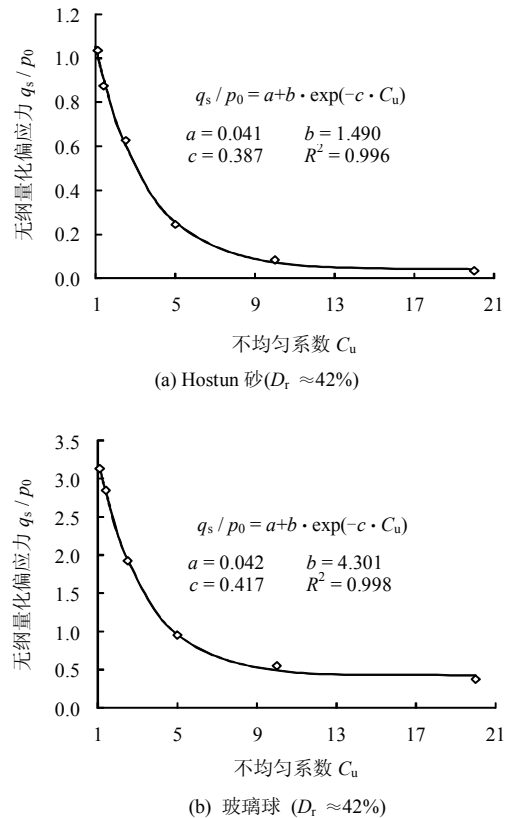


图7 相变偏应力和均匀系数的关系
Fig.7 Variations of phase transformation state deviatoric stress with uniformity coefficient

三轴不排水剪切条件下,体积的应变增量 $d\varepsilon_v = 0$ 和偏应变增量 $d\varepsilon_d = d\varepsilon_a$, ε_a 为轴向应变。二阶功的表达式可以简化为 $d^2w = dq'd\varepsilon_a$ 。随着剪切的进行,轴向应变不断地增加,所以且仅当 $dq \leq 0$ 时,二阶功为非负(即偏应力 q 在减小)。

如图8所示,随着试样不均匀系数 C_u 的增加,在较小轴向应变范围内部分试样的二阶功出现负值。例如,对于较高 C_u 值的试样($C_u = 2.5, 5.0, 10, 20$),在偏应力达到第1个峰值后二阶功变为负值,而对于具有较低 C_u 值的试样($C_u = 1.1, 1.4$)其二阶功始终保持为正值。这些结果表明,对同一

相对密度下,拥有较宽级配的粒状材料其出现静态液化的可能性越高。

需要说明本文的一个局限是没有对粒状材料的稳定状态进行讨论。对于 Hostun 砂,由于常规试验设备的限制,不排水试验没有剪切到出现稳定状态的应变水平;而对于玻璃球,由于存在黏滑现象以及围压过大会引起颗粒破碎改变原始颗粒级配,只进行了围压为 400 kPa 的不排水剪切试验,因此,这两种材料的稳定状态在本文中没有进行讨论。

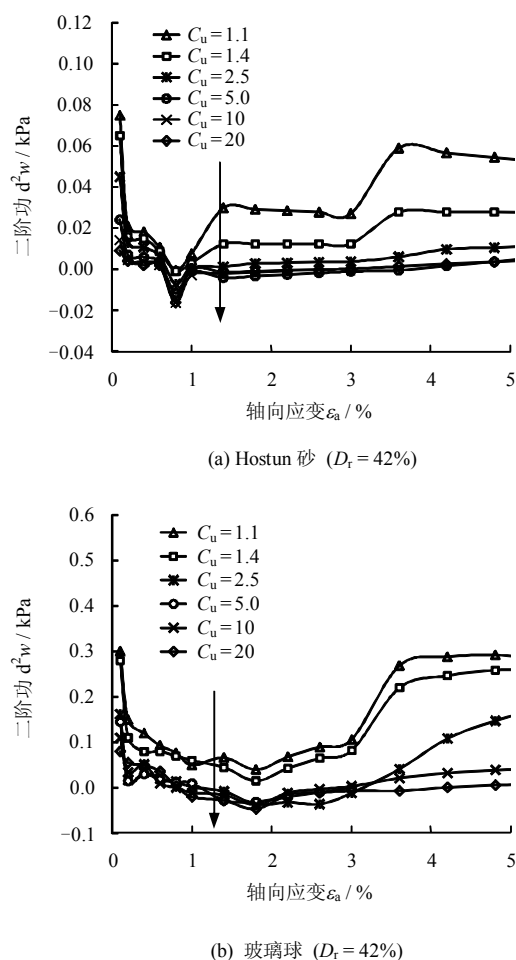


图 8 不排水试验的二阶功的演变规律

Fig.8 Evolution of second-order work in undrained testing

3 结 论

(1) 具有相同的相对密度不同级配下的同一种材料,其不排水抗剪强度和相变偏应力随不均匀系数 C_u 的增大而逐渐减小,当 $C_u > 10$ 后趋于稳定。不排水抗剪强度或者相位变换的偏应力和不均匀系数 C_u 之间存在指数关系,随着粒状材料不均匀系数的提高,材料在相同围压下的不排水抗剪强度和相变偏应力趋于稳定。

(2) 基于试样剪切过程中二阶功值的正负号,

分析了所有材料的不排水失稳可能性。结果表明,粒状材料的颗粒级配对其静态液化潜能有显著的影响,材料颗粒级配的拓宽(不均匀系数增大)会提高其静态液化势。

参 考 文 献

- [1] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究: 进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2170—2180.
YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: Review and development[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2170—2180.
- [2] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土本构模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3261—3267.
JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3261—3267.
- [3] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 模拟堆石料颗粒破碎对强度变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1691—1699.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Effect of particle breakage on strength and deformation of modeled rockfills[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1691—1699.
- [4] ISHIHARA K. Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes[J]. *Soils and Foundations*, 1977, 17(3): 1—17.
- [5] KRAMER S L, SEED H B. Initiation of soil liquefaction under static loading conditions[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(4): 412—430.
- [6] WAN R, GUO P. Effect of microstructure on undrained behaviour of sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(1): 16—28.
- [7] CHANG C, YIN Z Y. Modeling stress-dilatancy for sand under compression and extension loading conditions[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2010, 136(6): 777—786.
- [8] YIN Z Y, CHANG C S. Stress-dilatancy behavior for sand under loading and unloading conditions[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(8): 855—870.

- [9] BELKHATIR M, ARAB A, SCHANZ T, et al. Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: Effect of grading characteristics[J]. **Granular Matter**, 2011, 13(5): 599—609.
- [10] LADE P V. Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 118(1): 51—71.
- [11] DAOUADJI A, DARVE F, AL GALI H, et al. Diffuse failure in geomaterials: Experiments, theory and modelling[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2011, 35(16): 1731—1773.
- [12] CHANG C, YIN Z Y, HICHER P Y. Micromechanical analysis for interparticle and assembly instability of sand[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2011, 137(3): 155—168.
- [13] BISHOP J, HILL R. A theory of the plastic distortion of a polycrystalline aggregate under combined stresses[J]. **Philosophical Magazine**, 1951, 42(327): 414—427.
- [14] HILL R. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1958, 6(3): 236—249.
- [15] LADE P V, PRADEL D. Instability and plastic flow of soils. I: Experimental observations[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1990, 116(11): 2532—2550.
- [16] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(10): 2112—2119.
- KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2112—2119.
- [17] ABEDINZADEH Y, ABEDINZADEH R. Quantification of particle shape and angularity using the image analyzer[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1991, 14(3): 296—308.
- [18] BIAREZ J, HICHER P Y. Elementary mechanics of soil behaviours[M]. Rotterdam: Balkema, 1994.
- [19] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(5): 591—602.
- [20] ASHMAWY A K, SUKUMARAN B, HOANG V V. Evaluating the influence of particle shape on liquefaction behavior using discrete element modeling[C]//Proc. Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [21] CAVARRETTA I. The influence of particle characteristics on the engineering behaviour of granular materials[D]. London: Imperial College, 2009.
- [22] VERDUGO R, ISHIHARA K. The steady state of sandy soils[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36(2): 81—91.
- [23] WELLS J. Kinetic boundary friction[J]. **The Engineer**, 1929, 147: 454.
- [24] KENJI I, FUMIO T, SUSUMU Y. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses[J]. **Soils and Foundations**, 1975, 15(1): 29—44.
- [25] LUONG M. Stress-strain aspects of cohesionless soils under cyclic and transient loading[C]//Proc. of Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading. Rotterdam: Balkema, 1980.

地下工程设计施工手册

著译者: 夏明耀, 曾进伦, 精装, 小 16 开本, 1494 页, 定价: 198 元, 出版单位: 中国建筑工业出版社, 版次: 第 2 版, 出版时间: 2014 年 11 月, 标准书号: ISBN978-7-112-16459-2。

内容介绍: 本手册在上一版的基础上增加了土钉支护设计与施工、冻结法通道设计与施工、矿山法隧道设计与施工、锚杆设计与施工、反分析法及其在地下工程中的应用 5 个章节, 将气压沉箱设计与施工和沉井设计与施工合并为一章, 在事故与对策一章中增加隧道工程的事故与对策, 并根据我国新版设计与施工技术标准、规范和规程进行修订。

读者对象: 可供工程建设设计、施工、监理及从事建筑科研、教学人员参考使用。

摘自: 中国建筑书店