DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.007

孙明辉,朱俊高,沈靠山,等.密实度对砂卵砾石料强度及变形特性的影响[J].水利水运工程学报,2015(4):43-47. (SUN Ming-hui, ZHU Jun-gao, SHEN Kao-shan, et al. Density effects on strength and deformation behaviour of sandy gravel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4):43-47.)

密实度对砂卵砾石料强度及变形特性的影响

孙明辉^{1,2},朱俊高^{1,2},沈靠山³,轩向阳⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究 所, 江苏 南京 210098; 3. 钱塘江管理局勘测设计院, 浙江 杭州 310016; 4. 上海岩土工程勘察设计研究 院有限公司, 上海 200032)

摘要:为研究试样相对密度对砂卵砾石料强度及变形特性的影响,对4组不同相对密度的砂卵砾石料进行不同围压下的中型三轴固结排水剪切试验。试验结果表明:在试验的相对密度范围内,随着围压增大,相对密度小的试样应力应变曲线硬化特征逐渐明显,而相对密度大的试样无论围压大小,应力应变曲线都呈应变软化型;试样在剪切过程中均表现出不同程度的剪胀性;试样抗剪强度指标 φ 和 φ_0 随着试样相对密度 D_r 增大而增大,c 和 $\Delta \varphi$ 随 D_r 增大而减小,并建立了试样抗剪强度与相对密度的函数关系式;割线模量、切线体积模量都随 D_r 增大而增大,可近似用线性关系表示。

关键 词:砂卵砾石料;相对密度;三轴试验;应力应变

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2015)04-0043-05

近年来,随着我国土石坝建设的发展,有关粗粒土力学性质的研究也日渐增多^[1-4]。在覆盖层深厚的坝 址上修建土石坝,必须对其地基的力学性质有详细了解。然而,由于试验条件的限制等多种原因,对覆盖层 砂卵砾石料等粗粒土性质的研究较少。对山区河流深厚覆盖层上的土石坝,常常采用振冲桩等方法进行地 基处理。处理后的地基土变得密实,但压密后其强度及变形特性如何并不太清楚。因此,研究相对密度对其 力学性质的影响很有价值。

有关密度对土体力学性质的影响,国内许多学者曾做过一些研究。李振等^[5]通过对河床砂卵石的直接 剪切试验,指出其抗剪强度参数随干密度增大而增大,最终趋于某一稳定值;徐日庆等^[6]研究了不同初始相 对密度对砂土抗剪强度的影响,发现试样内摩擦角随着相对密度的增加基本呈线性增长;王俊杰等^[7]发现 粗粒土渗透系数随干密度增大而减小;黄浩然等^[8]研究出砂卵砾石料破坏时的大、小主应力之比随试样密 度的增大而增大。

本文通过对不同相对密度的砂卵砾石料进行中三轴固结排水剪试验,研究砂卵砾石料的强度及变形特性,为深入研究砂卵砾石料等粗粒土相关力学性质提供试验基础。

1 试验方案

试验在常规中型三轴仪上进行,按文献[9]规定的方法进行试验。试验采用长河坝覆盖层砂卵砾石料

收稿日期: 2014-11-27

- 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B04914);江苏省"六大人才高峰"计划资助项目(JZ-011); 国家自然科学基金资助项目(51479052)
- 作者简介:孙明辉(1989—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事粗粒土工程性质方面的研究。

E-mail: smh1129@163.com

经等量替代法缩尺后(最大粒径为 20 mm)的粗粒土。试样颗粒级配为:颗粒直径为 20~10 mm,10~5 mm 及小于 5 mm,对应粒组的质量含量分别为 43.68%,27.86%和 28.46%。试样干密度分别为 2.17, 2.22 和 2.26 g/cm³,相对密度 *D*_r分别为 0.7,0.8 和 0.9。

三轴试验试样直径为101 mm,高200 mm。试验固结围压分别控制为200,500,800 和1200 kPa。试样 饱和采用水头饱和,饱和时间控制为30 min,使试样充分饱和。

2 密度对强度及变形特性影响分析

2.1 密度对应力应变关系的影响

由三轴固结排水剪试验得到不同相对密度下各试样的偏应力 σ₁-σ₃,体积应变 ε_ν和轴向应变关系曲线 见图 1。当应力应变曲线出现峰值时,取峰值强度为土样强度;当轴向应变剪切到 15%,强度未出现峰值时, 取轴向应变 15%时的强度为土样强度。体积应变以剪缩为正,剪胀为负。



Fig. 1 Relationship curves between stress and strain

从图 1(a),(c),(e)可见,试样应力应变曲线有不同程度的软化特征,随 D,增大,软化特征逐渐明显。 产生这种现象的原因是:当试样松散时被压密,应力随应变增大而强化;而试样相对密度较大时,土颗粒排列 紧密,一部分颗粒翻过另一部分颗粒,需要克服咬合力,达到峰值后结构变松,抗剪强度也下降。

图 1(b),(d),(f)反映了体积变形与轴向变形的关系,可以看出,剪切开始阶段均呈剪缩变形,当土体 被压密到一定程度后,随着应变继续增大,土体体积增大,出现剪胀变形。

2.2 密度对强度特性的影响

表1列举了不同围压,不同相对密度各试样的偏应力峰值。从表中可见,相对密度对偏应力峰值有影响,在相同围压下,随相对密度的增大,偏应力峰值也增大。根据试验数据求出砂卵砾石料的抗剪强度指标 c, φ 值(见表1)。 表1 三轴试验偏应力峰值强度和砂卵砾石料抗剪强度

Tab. 1 Peak strength of triaxial tests and shear strength parameters of sandy gravel								
	三轴试验偏应力峰值/kPa				砂卵砾石料抗剪强度			
$D_{ m r}$	围压 200 kPa	围压 500 kPa	围压 800 kPa	围压 1 200 kPa -	线性		非线性	
					φ / °	c∕kPa	$\varphi / ^{\circ}$	c∕kPa
0. 7	1 149	2 348	3 660	4 686	40.0	145.9	50.20	7.76
0.8	1 206	2 587	3 645	5 130	41.3	128.6	51.06	7.53
0.9	1 260	2 637	3 811	5 598	43.0	94.3	51.25	6.70

线性强度指标 φ 和 c 值随相对密度的变化而变化。其中, c 值随着 D_r 的增大而减小, φ 值随着 D_r 的增大 而增大。若能知道土体的强度指标与相对密度的关系, 就能快捷地计算出不同相对密度土体的 c 和 φ 值, 为 实际工程带来方便。因此, 绘制 φ 与 D_r , c 与 D_r 的关系曲线, 见图 2。



图 2 φ - D_r 和 c - D_r 关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between φ - D_r and c- D_r

由图 2 可见,采用线性关系近似表示 φ, c 与 D_r的关系,用直线拟合得出直线斜率分别为 15 和-258。 这表明,对试验所用的砂卵砾石料而言,D_r每增加 0.1, φ 值增加 1.5°, c 值减小 25.8 kPa。可见相对密度对 土体的强度指标影响较大。

高压三轴试验资料表明,土体在高围压下的强度包线往往不呈直线,而是呈向下微弯的曲线,这表示内 摩擦角 φ 值随围压 σ_3 的增加而降低。许多学者^[10-11]提出适用于粗粒土的非线性抗剪强度公式,其中 J. M. Duncan 等提出 $\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \sigma_3 / p_a$,计算出 $\varphi_0 \not \Delta \varphi$ 。其中, $\varphi_0 \not \sigma_3 = p_a$ 时的 φ 值, $\Delta \varphi$ 为反映 φ 值随 σ_3 而 变化的一个参数。

不同相对密度试样的非线性抗剪强度指标见表 1。可见,随试样相对密度的增大, φ_0 值增大, $\Delta \varphi$ 值减 小,表明了土体被压实得越紧密,土体的非线性趋势越不明显。同样,将 φ_0 , $\Delta \varphi 与 D_r$ 的关系曲线拟合成直线 (见图 3)。



Fig. 3 Relationship curves of $\varphi_0 - D_r$ and $\Delta \varphi - D_r$

由图 3 可知, D_r 每增加 0.1, φ_0 增加 0.525°, $\Delta \varphi$ 减小 0.53°, 说明相对密度对土体的非线性强度指标也 有影响。

2.3 密度对变形特性的影响

为研究相对密度对砂卵砾石料变形特性的影响,整理出不同围压下割线模量 E_1 (轴向应变为 1%时对应的割线模量)、切线体积模量 B_1 与相对密度 D_r 的关系曲线(见图 4)。从图 4 可见,相同围压下, E_1 , B_1 的整体趋势均随 D_r 的增大而逐渐增大;相同 D_r ,围压越大, E_1 , B_1 越大。可见 D_r 对砂卵砾石料的 E_1 和 B_1 有较大影响,曾有学者发现密度是决定粗粒土初始弹性模量的根本因素^[12]。若用直线拟合图 4 中的点,则其斜率平均分别为 60.0和 128.4,也就是说在相同的 σ_3 下, D_r 每增大 0.1, E_1 平均增大 6 MPa, B_1 平均增大 12.84 MPa。



图 4 E_1 - D_r 和 B_1 - D_r 关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of E_1 - D_r and B_t - D_r

3 结 语

本文对长河坝覆盖层砂卵砾石料进行了中三轴固结排水剪试验,研究砂卵砾石料强度及变形特性,得出 以下结论:

(1)在试验的相对密度范围内,相对密度小的试样在低围压下应力应变曲线呈应变软化型,高围压下呈 应变硬化型,而相对密度大的试样无论围压大小,应力应变曲线都呈应变软化型。

(2)3种不同相对密度的试样在剪切过程中均表现出不同程度的剪胀性。

(3)试样抗剪强度指标 φ 和 φ₀ 随着试样相对密度 D_r增大而增大, c 和 Δφ 随 D_r增大而减小,且都与 D_r近 似呈线性关系。D_r每增加 0.1, φ 增加 1.5°, φ₀ 增加 0.525°, Δφ 减小 0.53°, c 减小 25.8 kPa。

(4)割线模量 *E*₁和体积变形模量 *B*₁随相对密度 *D*_r的增长都近似呈线性增长, *D*_r每增加 0.1, *E*₁增大 6 MPa, *B*₁增大 12.84 MPa。

参考文献:

- [1] 张嘎,张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591. (in Chinese))
- [2] 朱文君,张宗亮,袁友仁,等. 粗粒料单向压缩湿化变形试验研究[J]. 水利水运工程学报,2009(3):99-102. (ZHU Wen-jun, ZHANG Zong-liang, YUAN You-ren, et al. Study on wetting deformation behavior of coarse-grained materials under axial compression condition [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(3):99-102. (in Chinese))
- [3] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等. 堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7):
 1104-1111. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1104-1111. (in

Chinese))

- [4] 朱俊高, 轩向阳, 薄以霆. 表面振动压实仪法测定粗粒土密度的影响因素[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 15-19.
 (ZHU Jun-gao, XUAN Xiang-yang, BO Yi-ting. Influence factors of dry density of coarse-grained soil measured by surface vibrating compactor [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 15-19. (in Chinese))
- [5] 李振, 邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2255-2260. (LI Zhen, XING Yi-chuan. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and broken stone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2255-2260. (in Chinese))
- [6] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密实度对砂土强度特性影响的试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012, 33 (3): 345-349. (XU Ri-qing, WANG Xing-chen, ZHU Jian-feng, et al. Experiment of initial relative density effects on sand strength[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 345-349. (in Chinese))
- [7] 王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 16-20. (WANG Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 16-20. (in Chinese))
- [8] 黄浩然,朱俊高,方智荣,等. 砂卵砾石料变形与强度特性三轴试验研究[J].水电能源科学,2012,30(7):87-89. (HUANG Hao-ran, ZHU Jun-gao, FANG Zhi-rong, et al. Triaxial test study of deformation and strength behaviour of sand-gravel materials [J]. Water Resource and Power, 2012, 30(7):87-89. (in Chinese))
- [9] SL 237—1999 土工试验规程[S]. SL 237—1999 Specification of soil test[S]. (in Chinese))
- [10] 殷家瑜, 赖安宁, 姜朴. 高压力下尾矿砂的强度与变形特性[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(2): 1-10. (YIN Jia-yu, LAI An-ning, JIANG Pu. Strength and deformation characteristics of tailing under high pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(2): 1-10. (in Chinese))
- [11] DUNCAN J M, BYRNE P, WONG K S, et al. Stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movements in soil masses [R]. California: University of California, Berkeley, 1980.
- [12] 姜景山,刘汉龙,程展林,等.密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J].长江科学院院报,2009,26(8):46-50.(JIANG Jing-shan, LIU Han-long, CHENG Zhan-lin, et al. Influence of density and confining pressure on mechanical properties for coarse-grained soils [J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute, 2009, 26(8):46-50. (in Chinese))

Density effects on strength and deformation behaviour of sandy gravel

SUN Ming-hui^{1, 2}, ZHU Jun-gao^{1, 2}, SHEN Kao-shan³, XUAN Xiang-yang⁴

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Survey & Design Institute of Qiantang River Administration, Hangzhou 310016, China; 4. Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Triaxial tests of the sandy gravel with four different densities have been performed under different confining pressure in order to investigate the effects of relative density upon strength and deformation behaviour of the sandy gravel. The test results show that, within the range of the relative density of the experiments, the hardening characteristic of the stress-strain curves have become distinct with the increase of the confining pressure when the relative density is low; and the stress-strain curves appear as strain softening regardless of the value of confining pressure when the relative density is high. Different degrees of the dilatancy are showed during the lab tests. With the increase in the density, the values of φ and φ_0 increase, and the values of c and $\Delta \varphi$ decrease, therefore, a functional relationship between them has been established. The values of E_1 and B_1 show a linear growth with the increase of D_r .

Key words: sandy gravel; relative density; triaxial test; stress and strain