

表面振动压实仪法测定粗粒土密度的影响因素

朱俊高^{1,2}, 轩向阳^{1,2}, 薄以霆³

(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 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 苏州市水利工程质量检测中心有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:我国相关规范测定粗粒土最大干密度的方法之一为表面振动压实仪法,该法规定的激振时间及表面压重主要参考国外相关规范,国内这方面研究较少.采用表面振动压实仪法测定了2种粗粒土多种级配土料的干密度,研究了激振时间及表面压重对粗粒土干密度的影响规律.试验表明,在试验时间(8 min)内,粗粒土干密度和相对密度都随激振时间的增加而增大,但增幅逐渐减小;激振时间达到6 min时,干密度和相对密度基本达到最大值,趋于稳定.不同压重下的粗粒土干密度测定试验结果表明,在一定的压重范围内,粗粒土干密度和相对密度都随着压重的增加而增大,且增幅逐渐减小.

关键词:粗粒土;干密度;激振时间;压重

中图分类号:TU411

文献标志码:A

文章编号:1009-640X(2013)02-0015-05

堆石料等粗粒土具有抗剪强度高、压缩性低、透水性强等优良工程特性^[1-2],被广泛应用于土石坝、高层建筑地基换填以及海岸护岸等工程中.近年来,我国高土石坝发展迅速^[3-4],对堆石料力学性质的深入了解提出了更高要求,干密度作为坝体填筑密度控制的一个重要参数,其研究愈发受到重视.对高土石坝,其填筑要求的密度较高,尽管最终采用的填筑密度一般依据现场碾压试验确定,但在前期设计研究中,必须进行粗粒土物理力学性质室内试验研究,室内测定其最大干密度也是必须研究的内容之一.按照相关规范,室内可采用表面振动压实法或振动台法测定粗粒土最大干密度.

目前,有关粗粒土干密度的研究多是针对干密度的确定方法^[5-11],如朱俊高等^[12]研究了双江口粗粒土最大干密度,指出粗粒土最大干密度与 λ 之间具有二次曲线关系.近年来,我国的各类粗粒土试验规范开始把表面振动压实法列入,但对其相关问题的考虑并不成熟,如在表面振动压实试验中激振时间和压重对于粗粒土干密度影响如何、到底取值多大合适,还缺少更多相关研究.文献[13]规定激振时间为6 min,而文献[14]则规定激振时间为8 min,是否都合适?因此,很有必要对激振时间和压重对粗粒土的干密度的影响规律进行研究.

本文对2种土料进行了两类干密度影响因素的试验,研究表面振动压实法测定粗粒土最大干密度的影响因素,即:①压重相同、激振时间不同情况下,粗粒土干密度与激振时间的关系;②激振时间相同情况下,通过改变压重大小来分析粗粒土干密度与压重之间的关系.

1 试验设备与方案

本文干密度试验均采用表面振动压实仪法.所用主要仪器为振动器,电源电压为380 V,其振动夯功率为1 kW,振动频率50 Hz,激振力5 kN.试样高度为30 cm.

表面振动压实仪法测粗粒土干密度时,激振时间和压重是2个重要的控制指标.激振时间过短,测得粗

收稿日期:2012-08-15

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20110094110002)

作者简介:朱俊高(1964-),男,江苏兴化人,教授,主要从事土体基本性质与本构理论、土石坝工程等方面的研究.

E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

粒土干密度较小;时间过长,则粗粒土可能早已达到了最密实状态.文献[13]中规定表面振动压实仪法测粗粒土干密度时的激振时间应为 6 min.

本文对 2 种不同粗粒土进行相同压重下不同激振时间的干密度试验,来研究激振时间对干密度的影响.2 种粗粒土中,一种取自长河坝心墙堆石坝覆盖层的砂卵石料(简称长河坝料),另一种取自江苏六合某地的砂卵石料(简称六合料).其中,长河坝料岩性较硬,六合料较软,易破碎.2 种料的级配曲线如图 1 所示.

为了研究激振时间对粗粒土干密度的影响规律,本文对长河坝料进行了激振时间分别为 6,4,2 和 1 min 的试验,对六合料进行了激振时间分别为 8,6,4,2 和 1 min,以及 20 和 5 s 共 7 组试验.由于试验条件的限制,试样表面的压重没有达到规范规定的 13.8 kPa,而只有 8.609 kPa;但本文主要是针对影响规律的研究,因而结果仍有一定的参考价值.

为研究表面压重对粗粒土干密度的影响规律,本文同时测定了 3 组长河坝料相同激振时间,压重分别为 6.387,8.609 和 10.831 kPa 下的干密度,研究压重对干密度的影响.

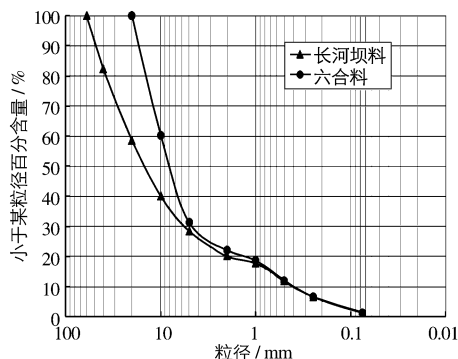


图 1 粗粒土级配曲线

Fig. 1 Size grading curve of coarse-grained soil

2 干密度影响因素分析

2.1 激振时间影响

首先对长河坝料进行不同激振时间的压实试验,测定相应干密度.以激振时间为 6 min 试验所测定的干密度为标准最大干密度,进而计算其他激振时间内试样的相对密度.试验得出,激振时间分别为 6,4,2 和 1 min 时,试样对应的干密度分别为 2.431,2.430,2.418 和 2.409 g/cm^3 ,相对密度为 1,0.998,0.970 和 0.949.同时,采用松填法测定其最小干密度,测得长河坝料最小干密度为 2.062 g/cm^3 .

长河坝料在不同激振时间内干密度变化规律见图 2(a).可见,随着激振时间的增加,粗粒土的干密度逐渐增大.当激振时间从 1 min 增加到 2 min 时,干密度增加了 0.009 g/cm^3 ,若假设干密度随时间均匀增加,则干密度增加速率为 0.15 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$;激振时间增至 4 min 时,干密度又增加了 0.012 g/cm^3 ,增加速率为 0.1 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$;当激振时间达到 6 min 时,干密度达到最大,相对于 4 min 时的干密度增加了 0.001 g/cm^3 ,干密度增加速率为 0.08 $\text{mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$.激振时间 4 min 时的干密度已经较大,随着激振时间增加,干密度增长已经很小,说明试样已经达到很密实状态,由此可见,文献[13]将激振时间规定为 6 min 有一定合理性.

为进一步研究不同粗粒土在不同激振时间内干密度的变化规律,本文同时对六合料进行了不同激振时间的压实试验,测定对应干密度(图 2(b)).同时采用松填法测定其最小干密度,测得的六合料最小干密度为 1.823 g/cm^3 .以激振时间 8 min 试验所测定的干密度为标准最大干密度,进而计算其他激振时间内试样的相对密度,试验结果见表 1.

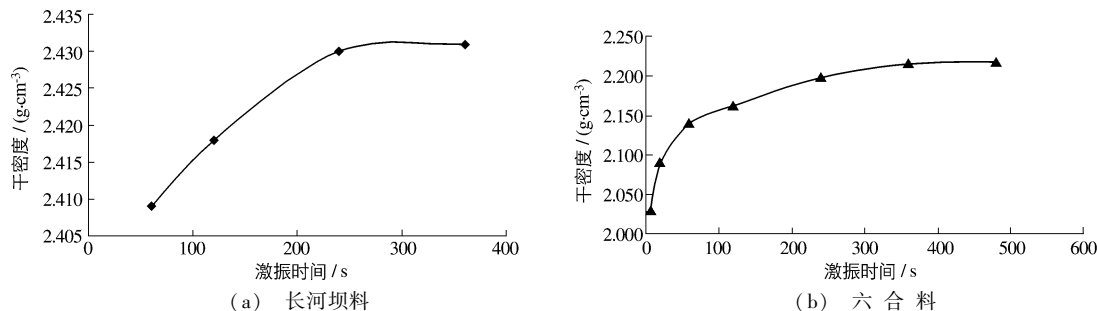


图 2 长河坝料和六合料的干密度与激振时间关系

Fig. 2 Relationship between vibrating time and dry density of Changhe dam soil and Luhai soil

表 1 六合料不同激振时间的击实试验

Tab.1 Compaction tests under different vibrating time for Luhe soil

试验 编号	激振时间/ s	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度	试验 编号	激振时间/ s	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度
L20-1	5	2.028	0.573	L20-5	240	2.198	0.960
L20-2	20	2.089	0.719	L20-6	360	2.215	0.996
L20-3	60	2.139	0.833	L20-7	480	2.217	1.000
L20-4	120	2.162	0.883				

六合料试验所得干密度随时间变化规律与长河坝料试验结果相似. 从图 2(b) 可见, 在 1 min 以内时, 六合料粗粒土的干密度迅速增加, 5 ~ 20 s 增长最快, 平均增量速率为 $4.1 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$, 激振时间 1 min 后, 密度增加速率减慢, 4 ~ 6 min 增量更小. 总体上, 激振时间 1 ~ 6 min 时, 粗粒土干密度增加较慢, 其干密度平均增长速率为 $0.4 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$; 激振时间从 6 至 8 min 时, 干密度仅增加 $0.002 \text{ g}/\text{cm}^3$. 表明在激振时间大于 6 min 后干密度基本稳定, 不再或很难增大. 进一步说明文献[13]和[14]规定的激振时间有一定的合理性.

为进一步研究同种粗粒土在不同激振时间内干密度的变化规律, 本文又对最大粒径为 60 mm 的六合料 (级配同图 1 的长河坝料) 进行了不同激振时间的压实试验, 测定对应干密度. 同时采用松填法测定其最小干密度, 测得此种六合料最小干密度为 $1.902 \text{ g}/\text{cm}^3$. 以激振时间 6 min 试验所测定的干密度为标准最大干密度, 进而计算其他激振时间下试样的相对密度. 表 2 为此种六合料在不同激振时间内的干密度试验结果, 激振时间与干密度的关系曲线如图 3 所示. 从表 2 和图 3 不难发现, 最大粒径为 60 mm 六合料和前面所述的 (最大粒径为 20 mm) 六合料干密度和激振时间的关系基本一致, 即干密度随着激振时间的增加而增加, 在激振时间小于 1 min 时, 密度随激振时间增加的速率较大, 此后增幅逐渐减小, 在 6 min 时趋于稳定. 4 ~ 6 min 内, 干密度平均增加速率为 $0.125 \text{ mg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$, 与最大粒径为 20 mm 的六合料相近, 说明级配对干密度随激振时间的变化规律的影响较小.

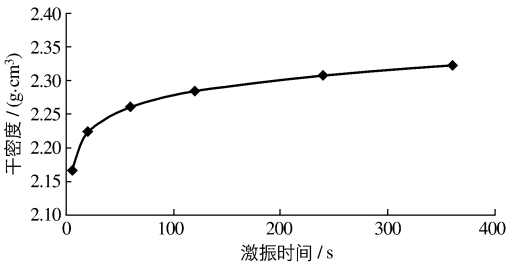


图 3 最大粒径 60 mm 六合料干密度与激振时间关系曲线

Fig.3 Relationship between vibrating time and dry density of Luhe soil ($d_{\max} = 60 \text{ mm}$)

表 2 最大粒径 60 mm 的六合料不同激振时间的击实试验

Tab.2 Compaction tests under different vibrating time for Luhe soil ($d_{\max} = 60 \text{ mm}$)

试验 编号	激振时间/ s	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度	试验 编号	激振时间/ s	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度
L60-1	5	2.166	0.674	L60-4	120	2.284	0.923
L60-2	20	2.223	0.798	L60-5	240	2.308	0.971
L60-3	60	2.261	0.877	L60-6	360	2.323	1.000

2.2 压重影响

表面振动压实法试验中, 另一个影响试验结果的重要因素是土样表面的压重. 文献[13]规定为 13.8 kPa, 文献[14]则规定为 14 kPa. 为研究表面压重对干密度影响规律, 作者对 3 种表面压重下长河坝料进行了干密度试验研究. 试验激振时间均为 6 min, 试验结果为: 压重 6.387, 8.609 和 10.831 kPa 下对应的干密度分别为 2.259, 2.431 和 $2.448 \text{ g}/\text{cm}^3$, 相对密度为 0.560, 0.963 和 1.000. 干密度与压重关系曲线如图 4 所示. 由于试验条件所限, 本文只进行了以上 3 种压重试验. 虽然测得数据较少, 但总体能反映压重对于粗粒土最大干密度的影响.

现有研究表明, 随压重增大干密度逐渐增大, 且压重大于一定值后干密度逐渐趋于稳定, 图 4 所体现的

规律也正是这样. 图 4 表明, 压重为 8.609 kPa 的干密度比 6.387 kPa 的增加了 0.188 g/cm^3 , 当压重变为 10.831 kPa 时, 最大干密度又增加 0.017 g/cm^3 . 假设粗粒土干密度是呈线性变化, 则从压重 6.387 kPa 到 8.609 kPa, 压重每增大 1 kPa 干密度增加 0.0846 g/cm^3 ; 而压重 8.609 kPa 到 10.831 kPa, 增加 1 kPa 压重, 最大干密度增大 0.00765 g/cm^3 . 显然增加的幅度越来越小而不是简单的线性增加.

尽管本文试验数据点少, 压重较大的试验点缺乏, 但是试验所得结果基本反映最大干密度随压重增加而增大的规律. 可以推测, 当压重为 11~14 kPa, 压重增加所引起的密度增加速率更小, 因此文献[13]及[14]规定的试样表面压重为 13.8 和 14 kPa 是合理的.

为进一步研究压重对相对密度的影响, 根据松填法测定的长河坝料最小干密度为 2.062 g/cm^3 , 近似以 10.831 kPa 压重下的密度为标准最大干密度, 则可得压重为 6.387 和 8.609 kPa 时的相对密度分别为 0.556 和 0.963. 试验结果表明, 相对密度随压重的增加而增大, 但增大幅度随压重增大而减小.

3 结 语

本文研究了表面振动压实仪法测定粗粒土干密度试验中, 激振时间、表面压重等对所测得干密度的影响. 进行了最大粒径为 60 mm 的长河坝料、最大粒径为 20 mm 六合料的分析比较, 并进行了最大粒径为 60 mm 六合料的对比试验, 得出干密度随激振时间和压重变化规律, 得到如下结论:

- (1) 随着激振时间的增加, 粗粒土的干密度逐渐增大. 激振时间 5~20 s 内, 干密度增大速率最快; 随后 20~60 s 继续较快增加; 1~6 min 增幅显著减小, 干密度增大较缓慢; 6~8 min 内干密度增加很小.
- (2) 不同压重试验结果表明, 压重 6.387, 8.609 和 10.831 kPa 所测得的干密度随着压重的增加而逐渐增大, 且增幅逐渐减小, 相对密度也随压重的增加而增大.
- (3) 目前规范规定的激振时间 6 或 8 min, 压重 13.8 或 14 kPa, 均是可行的. 但是, 建议不同行业的规范对一些控制性指标能够统一, 这样更便于使用和交流.

参 考 文 献:

- [1] 日本土工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 1995: 5-7. (Japan Soil Society. On-site compaction of coarse grained soils[M]. GUO Xi-ling, WEN Dan, translated. Beijing: China WaterPower Press, 1995: 5-7. (in Chinese))
- [2] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950-954. (ZHU Jun-gao, WANG Yuan-long, JIA Hua, et al. Experimental study on resilience behavior of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 950-954. (in Chinese))
- [3] 酆能惠. 土石坝安全监测分析评价预报系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (LI Neng-hui. Introduction to system of safety monitoring on earth-rock dam[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 陈志波, 朱俊高. 两河口心墙堆石坝应力变形及参数敏感性三维有限元分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 893-899. (CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao. Three-dimensional finite element analysis on stress-strain and materials parameters sensibility of Lianghekou core rock fill dam[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2010, 38(6): 893-899. (in Chinese))
- [5] 李祯祥, 李朝晖. 超径粗颗粒土最大干密度的确定方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(1): 17-19. (LI Zhen-xiang, LI Zhao-hui. Method for determining maximum dry density of oversize coarse-grained soil[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005, 3(1): 17-19. (in Chinese))

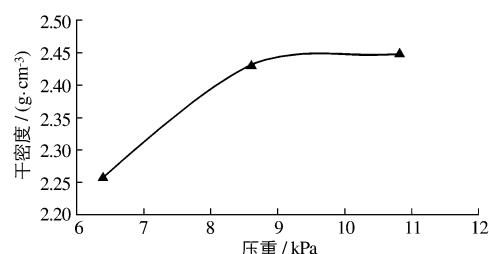


图 4 长河坝料压重与干密度之间的关系曲线

Fig. 4 Relationship between surface pressure and dry density of Changhe dam soil

- [6] 何军, 白建军. 粗粒土的最大干密度理论计算方法研究[J]. 交通标准化, 2009(4): 90-92. (HE Jun, BAI Jian-jun. Theoretical computing method of maximum coarse-grained soil[J]. Transport Standardization, 2009(4): 90-92. (in Chinese))
- [7] 史彦文. 大粒径砂卵石最大干密度的研究[J]. 土木工程学报, 1981(2): 55-60. (SHI Yan-wen. The study on maximum dry density of large sized sandy gravels[J]. China Civil Engineering Journal, 1981(2): 55-60. (in Chinese))
- [8] 刘贞草. 大粒径粗粒材料相对密度试验研究[J]. 土石坝工程, 1987(2): 59-64. (LIU Zhen-cai. Experimental study on relative density of large sized coarse-grained soil[J]. Earth Rock Fill Dam, 1987(2): 55-60. (in Chinese))
- [9] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. (GUO Qing-guo. The engineering properties and application of coarse granular soils[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1996. (in Chinese))
- [10] 于林平, 李胜德, 高潮, 等. 含超粒径非均质混合土最大干密度的计算方法[J]. 大连水产学院学报, 2004, 19(2): 101-104. (YU Lin-ping, LI Sheng-de, GAO Chao, et al. A calculation method of maximum dry density of heterogeneous soils with extra-large size particles[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2004, 19(2): 101-104. (in Chinese))
- [11] 朱崇辉, 严宝文, 刘俊民, 等. 巨粒混合土的相对密度的试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 749-753. (ZHU Chong-hui, YAN Bao-wen, LIU Jun-min, et al. Experimental study on relative density of soil mixtures with giant grains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 749-753. (in Chinese))
- [12] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2394-2398. (ZHU Jun-Gao, WENG Hou-yang, WU Xiao-ming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2394-2398. (in Chinese))
- [13] JTJ 051-1993, 公路土工试验规程[S]. (JTJ 051-1993, Test methods of soil for highway engineering[S]. (in Chinese))
- [14] DL/T 5356-2006, 水电水利工程粗粒土试验规程[S]. (DL/T 5356-2006, Code for coarse-grained soil tests for hydropower and water conservancy engineering. (in Chinese))

Influence factors of dry density of coarse-grained soil measured by surface vibrating compactor

ZHU Jun-gao^{1,2}, XUAN Xiang-yang^{1,2}, BO Yi-ting³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Suzhou Water Engineering Quality Test Center Co., Suzhou 215000, China)

Abstract: The surface vibrating compactor is a method to measure the maximum dry density of the coarse-grained soil, which is recommended by relevant testing standard codes. However, some parameters for surface pressure and vibrating time are determined by referring to some foreign standard codes, and the research on this area can almost not be found at home. The dry density of two kinds of coarse-grained soil is determined by using the surface vibrating compactor to investigate the influence of vibrating time and surface pressure on dry density. The test results indicate that the dry density and the relative density of the coarse-grained soil become bigger and the amplification reduces gradually with testing time. When the vibrating time is six minutes, the dry density and the relative density basically reach the maximum and tend to be stable. The tests of dry density under different surface pressures show that both the dry density and the relative density of the coarse-grained soil increase with the increase of surface pressure, but the amplification reduces gradually.

Key words: coarse-grained soil; dry density; vibrating time; surface pressure