

文章编号:1671-6833(2012)05-0049-04

# 堆石料制样方法对其强度和变形特性影响

傅华<sup>1</sup>, 凌华<sup>1</sup>, 张亚丽<sup>2</sup>, 韩华强<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏, 南京, 210029; 2. 中国水电顾问集团北京勘测设计研究院, 北京, 100024)

**摘要:** 进行了堆石料的表面振动器压实法和振动台法制样比较试验, 结果表明, 表面振动器压实法所得出的试样最大干密度值明显高于振动台法。同时, 针对这两种制样方法所得出的试样, 开展了大型三轴得出制样方法对堆石料的强度和变形指标具有明显影响, 表面振动器法对应试样的强度和变形指标均优于振动台法, 其中对变形特性指标的影响更为显著。考虑到表面振动器制样过程与土石坝实际施工碾压过程近乎一致, 因此, 建议将表面振动器压实法作为堆石料室内最大干密度的测试方法。随着重型碾压设备在土石坝碾压施工中的普遍使用, 可通过调整表面振动器底板静压力和延长振动时间来提高振动功率, 尽量减小堆石料室内制样密度与现场碾压密度的差异。

**关键词:** 堆石料; 制样方法; 最大干密度; 强度和变形特性

**中图分类号:** TU47 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.011

## 0 前言

堆石料是高土石坝的主要筑坝材料, 其强度和变形特性事关土石坝安全, 因此国内外学者针对堆石料的强度和变形特性开展了大量的研究工作, 取得了重要进展<sup>[1-5]</sup>。但堆石料室内试验制样方法对其强度和变形特性影响的研究很少有人涉及。堆石料的制样方法主要影响其干密度, 研究表明<sup>[6-11]</sup>, 堆石料的干密度对其剪胀效应、颗粒的破碎和重排均具有明显影响, 从而影响其强度和变形指标。随着水利水电开发进程的推进, 我国还将兴建一批高土石坝。为提高堆石料的密实度, 减小土石坝的后期变形, 重型碾压设备已在土石坝碾压施工中普遍使用, 对土石坝筑坝材料现场碾压的密实度要求也越来越高。因此, 研究堆石料室内试验制样方法对其强度变形指标的影响, 提出能合理模拟土石坝碾压施工过程的堆石料制样方法显得很有必要。

笔者分别针对棱角明显的堆石料和浑圆度较好的砂砾料, 进行了表面振动器压实法和振动台法制样比较试验, 研究了上述两种制样方法对其干密度以及相应强度和变形指标的影响, 在此基

础上对堆石料的制样方法提出了建议。

## 1 堆石料制样方法比较试验

最大干密度试验分别采用振动台法和表面振动器压实法进行, 试样筒尺寸为  $\Phi 300 \times 360$  mm。试验用料分别选用棱角明显的爆破料和颗粒浑圆度较好的砂砾石料, 其级配曲线如图 1 所示。振动台法制样时, 在试样表面施加荷重为 14 kPa 的静载, 在振幅为 0.64 mm 的振动台上连续振动 8 min; 表面振动器压实法制样时, 试样分 3 次铺装, 采用试样表面静载为 14 kPa, 振动频率为 40 Hz 的表面振动器对试样进行压实, 振动持续时间为 8 min。

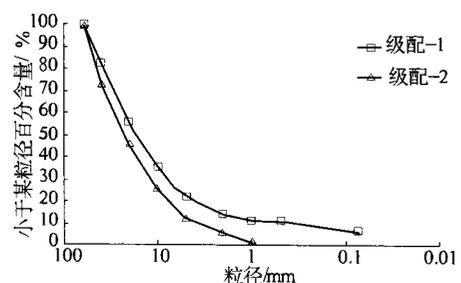


图 1 试验级配

Fig. 1 Gradation curves

收稿日期:2012-05-20; 修订日期:2012-06-20

基金项目:南京水利科学研究院

作者简介:傅华(1977-), 男, 江苏响水人, 南京水利科学研究院高级工程师, 博士研究生, 主要从事粗粒料工程试验研究工作, E-mail: hfu@nhri.cn.

试验得出的上述两种式样的干密度见表1. 从表中可以看出,对于同一级配的试样,表面振动器压实法得出的最大干密度值明显要高于振动台法得出的最大干密度值. 爆破料提高了  $0.06 \text{ g/cm}^3$ , 砂砾石料提高了  $0.10 \text{ g/cm}^3$ . 导致试样干密度产生上述差异的原因与制样方法有关. 振动台法制样时采用固定静载,通过试样下部的激振源使试样在一定振幅下振动密实;而表面振动器法制样时,将激振源和静载联合在一起,在试样表面进行振动密实,一方面表面振动器“活荷载”比振动台法的“死荷载”能够产生更大的冲击力,更易使试样产生颗粒破碎,有利于试样粗、细颗粒之间的滑移和充填,另一方面,现场坝体的填筑也是通过一定功率的碾压设备分层表面振动碾压,表

表1 两种试验方法的最大干密度比较

试验方法	爆破料	砂砾石料
振动台法	2.18	2.23
表面振动器法	2.24	2.33

面振动器制样方法更接近于土石坝施工碾压实际过程. 对于同样级配曲线,在同样的振动功率下,砂砾料的密度要明显高于堆石料,主要原因就是砂砾料的浑圆度要明显优于堆石料,在同样的振动功率下,粗、细颗粒之间更易于滑移和充填,形成较高的密实度.

## 2 堆石料强度与变形特性试验

针对上述两种制样方法得出的爆破料试样,利用大型三轴剪切仪对其强度和变形特性开展了试验研究,大型三轴剪切仪试样尺寸为  $\Phi 300 \times 700 \text{ mm}$ ,试样均处于自然风干状态,分  $60 \sim 40 \text{ mm}$ 、 $40 \sim 20 \text{ mm}$ 、 $20 \sim 10 \text{ mm}$ 、 $10 \sim 5 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \sim 0$  五种粒径范围进行试样的制备,制样过程中主要控制好两点:①进行分层铺装,尽量减少试样粗、细颗粒的离析;②分层振动,保证整个试样的密度均匀性,然后按要求分别进行不同围压和不同垂直应力条件下的试验.

### 2.1 制样方法对强度特性的影响

通过大型三轴试验所得不同围压下的破坏峰值和强度指标见表2.

表2 破坏峰值和强度指标

最大干密度 试验方法	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	围压 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$					抗剪强度指标	
		400 kPa	800 kPa	1 200 kPa	2 000 kPa	3 000 kPa	$c/\text{kPa}$	$\Phi/(\circ)$
振动台法	2.18	2 085.2	3 563.8	4 845.2	7 532.4	10 365.4	235.7	37.9
表面振动器法	2.24	2 214.7	3 680.8	5 074.4	7 745.2	10 674.7	257.4	38.3

表2显示,在每一级围压下,表面振动器法对应试样的破坏峰值均高于振动台法. 围压400 kPa时,振动台法的破坏峰值为2 085.2 kPa,表面振动器法对应试样的破坏峰值为2 214.7 kPa,较振动台法提高了129.5 kPa;围压3 000 kPa时,振动台法的破坏峰值为10 365.4 kPa,表面振动器法的为10 674.7 kPa,较振动台法提高了309.3 kPa. 两种试样破坏峰值的差值随围压的增大而增大,这是因为在低围压状态下密度的优势不明显,随着围压的增加,密度高的由于颗粒间咬合的越

### 2.2 制样方法对变形特性的影响

通过大型三轴试验所得两种制样方法所对应试样的应力应变曲线和体积曲线见图2和图3,整理出邓肯模型参数见表3.

表3 邓肯(E-B)模型试验参数

最大干密度 试验方法	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\Phi/(\circ)$	$\Delta\Phi/(\circ)$	$k$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
振动台法	2.18	50.8	7.9	883.3	0.34	0.64	456.6	0.20
表面振动器法	2.24	52.0	8.4	1162.4	0.29	0.65	624.9	0.19

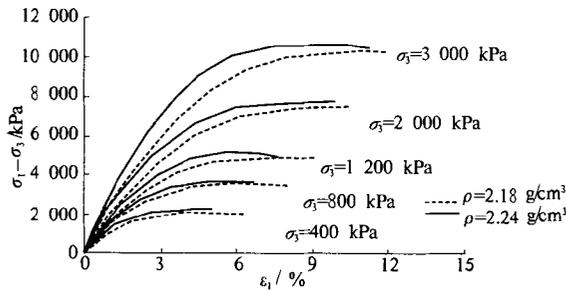


图 2 应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress - strain curves

(1) 应力 ~ 应变曲线. 图 2 表明, 两种应力应变曲线均属于应变软化性, 表面振动器法对应密度 2.24 g/cm<sup>3</sup> 试样的应力应变曲线要明显陡于振动台法对应密度 2.18 g/cm<sup>3</sup> 试样. 随着围压的增加, 曲线形状差别增大. 这种曲线形状差别反映了试样初试剪切模量  $E_i$  相差较大, 不同围压下初

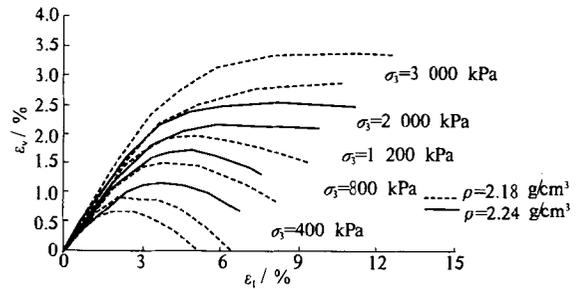


图 3 体积变化曲线

Fig. 3 Volume Change curves

始切线模量值  $E_i$  值见表 4. 密度值由 2.18 g/cm<sup>3</sup> 增加至 2.24 g/cm<sup>3</sup>, 相应于初试切线模量  $E_i$  则产生大幅度的增加, 增加率为 11.4% ~ 33.3%, 表现为邓肯模型参数则是  $k$  值由 883.3 增加至 1162.4, 提高了 31.6%.

表 4 不同围压下初始切线模量值

Tab. 4 Initial tangent modulus under different cell pressure

最大干密度 试验方法	$\rho/$ (g · cm <sup>-3</sup> )	$E_i$ (100 kPa)				
		400 kPa	800 kPa	1 200 kPa	2 000 kPa	3 000 kPa
振动台法	2.18	1 388.9	1 818.2	2 020.1	2 381.0	2 777.8
表面振动器法	2.24	1 851.9	2 040.8	2 250.6	2 941.2	3 225.8

(2) 体积变化曲线. 由图 3, 两种试样体积变化曲线在低围压下均发生了明显的剪胀, 随着围压的增大, 剪胀性逐渐减弱. 围压 400 kPa 时, 表面振动器法试样最大体变为 0.68%, 振动台法的最大体变为 1.17%; 围压 3 000 kPa 时, 表面振动器法的为 2.52%, 振动台法的体变为 3.38%. 表面振动器法所对应试样的密度大, 孔隙率小, 在各级围压下的体积变化均小于振动台法对应试样的体积变化, 并且这种差值随着围压的增大而逐渐变大. 试验结果表示为邓肯模型参数  $kb$  值由 456.6 提高至 624.9, 提高了 36.8%.

通过上述的试验比较, 可以看出, 表面振动器压实法得出的最大干密度值明显要高于振动台法得出的最大干密度值, 而制样密度的差异必然对堆石料的力学特性产生影响. ①对强度特性的影响, 用  $\Phi$  值表示, 提高了 1.06%, 用  $C$  值表示, 提高了 9.21%, 制样密度的差异对强度特性的影响较小; ②对变形特性的影响, 用邓肯模型参数  $K$  值表示, 提高了 31.6%, 用邓肯模型参数  $K_b$  值, 表示提高了 36.8%, 制样密度的差异对变形特性的影响则非常明显.

随着重型碾压设备在土石坝碾压施工中的普遍使用, 我国行业标准、规范规定的粗粒料的最大

干密度测试的振动台测试方法已远不能与高土石坝大功率的碾压设备相匹配. 自 20 世纪 80 年代开始, 以南京水科院为代表的我国水电水利行业部分单位均已采用表面振动器法来测定最大干密度, 目前, 表面振动器法也已写入到《水电水利工程土工试验规程》DL/T 5355—2006, 修订后《土工试验规程》SL 237—1999 也将编入表面振动器法. 考虑到堆石坝的填筑施工常用振动碾为 18 ~ 25 t, 最大已达到 32 t, 而目前室内表面振动器底板压应力常选用为 14 kPa, 因此即使选用表面振动器压实法, 仍会出现室内试验试样最大干密度达不到设计要求的情况. 考虑到密度是影响堆石料强度和变形特性的重要因素, 因此, 室内试验制样时, 可通过增大振动器底板静压力、延长振动时间来提高振动功率, 尽量减小室内的最大干密度与现场碾压密度的差异, 使室内试验成果能更准确反映现场堆石料的力学特性, 特别是变形特性.

### 3 结论

(1) 表面振动器压实法相对于振动台法由于更易使试样产生颗粒破碎, 有利于试样粗、细颗粒之间的滑移和充填, 用其得出的最大干密度值明显要高于振动台法. 表面振动器制样方法更接近

于土石坝施工碾压实际过程,将其作为堆石料室内试验制样方法是合适的。

(2)针对两种制样方法得出的试样进行的大型三轴剪切和压缩试验结果表明,制样方法对堆石料的强度和变形指标具有明显影响,表面振动器法对应试样的强度和变形指标均优于振动台法,其中对变形特性指标的影响更为显著。

(3)随着重型碾压设备在土石坝碾压施工中的普遍使用,堆石料室内试验制样时,应通过增大振动器底板静压力、延长振动时间来提高振动功率,尽量减小室内的最大干密度与现场碾压密度的差异,使室内试验成果能更准确反映现场堆石料的强度和变形特性。

### 参考文献:

- [1] 陈生水,韩华强,傅华.循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J].岩土工程学报,2010,32(8):1151-1157.
- [2] 张兵,高玉峰,毛金生,等.堆石料强度和变形性质的大型三轴试验及模型对比研究[J].防灾减灾工程学报,2008,28(1):122-126.
- [3] INDRARATNA B, WIJewardena L S S, BALASUBRAMANIAM A S. Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill[J]. Geotechnique, 1993, 43(1): 37-51.
- [4] 孔宪京,贾革续,邹德高,等.微小应变下堆石料的变形特性[J].岩土工程学报,2001,23(1):32-37.
- [5] 张克昌.堆石料的若干工程性质[J].浙江水利科技,1987(3):32-39.
- [6] 傅志安,凤家骥.混凝土面板堆石坝[M].武汉:华中理工大学出版社,1993:34-37.
- [7] 关志诚,杨辉.寒冷地区混凝土面板堆石坝设计[J].水利水电技术,1993(12):12-16.
- [8] 柏树田,周晓光.软岩堆石料的物理力学性质[J].水力发电学报,2002(4):34-44.
- [9] 王保田,余湘娟.面板堆石坝坝料力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):332-336.
- [10] 丁树云,蔡正银,凌华.堆石料的强度与变形特性及临界状态研究[J].岩土工程学报,2010,32(2):248-252.
- [11] 翁厚洋,景卫华,李永红,等.粗粒料缩尺效应影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(3):25-28,34.

## Effects of Sample Preparation Method on Rockfill's Strength and Deformation Behaviors

FU Hua<sup>1</sup>, LING Hua<sup>1</sup>, ZHANG Ya-li<sup>2</sup>, HAN Hua-qiang<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hydrochina Beijing Engineering Corporation, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Comparative tests of rockfill's sample preparation method between surface vibration compaction and shaking table declared that the maximum dry density which got by surface vibration is higher than that of shaking table's. According to the samples by this two different methods, large triaxial tests was conducted which declared that the sample preparation method has an obvious effect on rockfill's strength and especially on the deformation behaviors, the indexes which correspond to surface vibration method is better than that of shaking table's. It suggested that surface vibration method should be taken as the method of rockfill's laboratory maximum dry density determination by taking the process of sample preparation with surface vibration almost similar with the process of roller compaction during earth-rock dam's construction into account. With the common use of heavy roller equipment in earth-rock dam's construction, the density difference between laboratory and field can be reduced by improving the vibration power through adjusting the bottom static pressure and prolonging the vibration time.

**Key words:** rockfill; sample preparation method; maximum dry density; strength and deformation behavior