

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.012

堆石料强度的缩尺效应试验研究

凌 华^{1 2} 殷宗泽^{3 4} 朱俊高^{3 4} 蔡正银^{1 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所 江苏 南京 210024 ;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210024 ;

3. 河海大学岩土力学及堤坝工程教育部重点实验室 江苏 南京 210098 ; 4. 河海大学岩土工程科学研究所 江苏 南京 210098)

摘要 : 在超大型和大型三轴仪上开展了级配缩尺后不同最大粒径堆石料的强度试验 , 研究了强度的缩尺效应 . 试验结果表明 随着最大粒径的增大 , 强度指标 c 增大、 φ 变小 , 非线性强度指标 φ_0 变大、 $\Delta\varphi$ 变大 . 颗粒破碎是强度随着最大粒径变化的主要原因之一 . 同等应力条件下 , 颗粒破碎率随着最大粒径的增大而增大 ; 当应力较小时 , 不同最大粒径堆石料的破碎率相近 ; 在大应力条件下颗粒破碎率相差较大 . 根据试验结果 , 建立了考虑缩尺效应的强度公式 , 该公式可外推现场原型尺寸筑坝材料的强度 .

关键词 : 堆石料 ; 三轴试验 ; 缩尺效应 ; 强度 ; 颗粒破碎

中图分类号 : TV641.43 文献标志码 : A 文章编号 : 1000-1980(2011)05-0540-05

由于设计水平的提高和现代碾压机械设备的采用 , 土石料坝体填筑料的最大粒径已提高甚至超过 1 000 mm . 通常室内三轴试验试样尺寸为 300 mm , 试样最大允许粒径仅为 60 mm . 级配缩尺后的堆石料室内试验成果是否能准确反映现场原型堆石料的工程特性 缩尺效应对堆石料强度的影响规律以及如何通过室内试验 建立或外推现场原型堆石料的工程特性等 , 都是迫切需要解决的问题 .

关于强度的缩尺效应研究成果较多^[1-7] , 但仍然不成熟^[8] , 有些成果甚至得到了相反的结论 . 如 Marachi 等^[1]认为堆石料的 φ 随着试料最大粒径的减小而增大 ; 王继庄^[4]认为 , 试样直径小于 300 mm 时 , 对强度影响不大 ; 孟宪麒等^[2-3]认为 φ 随着平均粒径 d_0 的增大而增大 .

本文通过超大型和大型三轴仪上进行的 4 组堆石料的三轴排水剪切试验 , 分析缩尺效应对堆石料强度的影响 , 建立外推现场原型堆石料的强度公式 .

1 试验概况

1.1 级配与密度

试验试样材料采用某水利工程心墙堆石坝下游堆石区的填筑料——花岗岩 . 下游堆石区设计级配平均线见图 1 . 级配缩制方法一般分为 4 种 : 剔除法、等量替代法、相似级配法、混合法 . 混合法是国内目前应用最为广泛的级配缩制方法 . 该方法先采用相似级配法 , 使小于 60 mm 粒径的颗粒质量分数超过 60% , 再采用等量替代法进行级配缩制 . 本文采用混合法对设计级配进行缩制 . 4 组试样的最大粒径 $d_{\max}$ 分别为 100 mm、60 mm、40 mm、20 mm , 细颗粒(粒径小于 5 mm 颗粒) 质量分数分别为 8.7%、11.0%、17.0% 和 30.0% , 试验级配见图 1 . 工程中常根据孔隙率标准确定碾压标准 . 本文试验 4 组试样的孔隙率一致 , 密度为 2.06 g/cm³ .

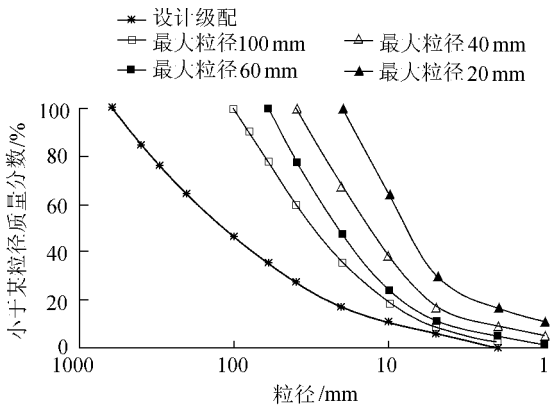


图 1 试验级配

Fig. 1 Grain size composition

1.2 试验方法

$d_{\max}$ 为 60 mm 40 mm 和 20 mm 的 3 组堆石料三轴排水剪切试验在南京水利科学研究院的大型三轴仪上完成,试样直径 300 mm,高度 700 mm。 $d_{\max}$ 为 100 mm 堆石料三轴排水剪切试验在南京水利科学研究院的超大型三轴仪上完成,试样直径 500 mm,高度 1 000 mm。该设备最大围压 4 MPa,最大轴向荷载 5 000 kN。

试验严格按照 SL 237—1999《土工试验规程》进行。根据所需密度、级配和试样尺寸称量,采用表面振动法分 5 层进行制样。试验围压分 4 级 300 kPa,600 kPa,1 000 kPa 和 1 500 kPa。采用水头饱和法进行试样饱和。当试样在围压 σ_3 下固结完成后,按 0.2%/min 的应变速率对试样进行剪切。当轴向应力出现峰值时,再剪切 3%~5% 应变停止试验;无峰值时轴向应变达到 15% 时停止试验。

2 强度特性

土力学中常用库伦破坏准则来描述土体的抗剪强度 τ_f :

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$$

(1)

式中: c ——黏聚力; φ ——内摩擦角; σ ——剪切面上的正应力。式(1)表明 τ_f 与 σ 呈线性关系。

堆石料为无黏性土,没有黏聚力,即 c 应为零。但按式(1)整理,往往堆石料的 c 并非为零,且随着密度而增大。此处 c 其实反映了堆石料颗粒间的咬合力,可视为表观黏聚力。工程实际中一般用非线性强度指标来描述堆石料的强度特性,即

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/P_a)$$

(2)

式中: P_a ——大气压; φ_0 ——围压为 P_a 时的 φ ; $\Delta\varphi$ —— $\varphi \sim \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系曲线上的斜率,反映了强度随着围压的降低。

各组试验在不同围压下的破坏主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 见表 1,由式(1)和(2)整理得到的强度指标见表 2,强度包线见图 2。

表 1 不同围压下的破坏主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$

Table 1 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ under different confining pressures

$d_{\max}/\text{mm}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/\text{kPa}$			
	$\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 600 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 1\,000 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 1\,500 \text{ kPa}$
100	1 897.9	2 827.9	4 123.5	5 680.3
60	1 887.0	2 820.7	4 200.9	5 771.4
40	1 819.6	2 783.5	4 217.7	5 925.7
20	1 741.0	2 857.1	4 381.9	6 089.7

表 2 强度指标

Table 2 Strength indicators

$d_{\max}/\text{mm}$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$
100	231.9	37.8	54.9	12.3
60	218.2	38.3	54.4	11.7
40	180.5	39.2	53.1	10.2
20	157.2	40.2	51.8	8.5

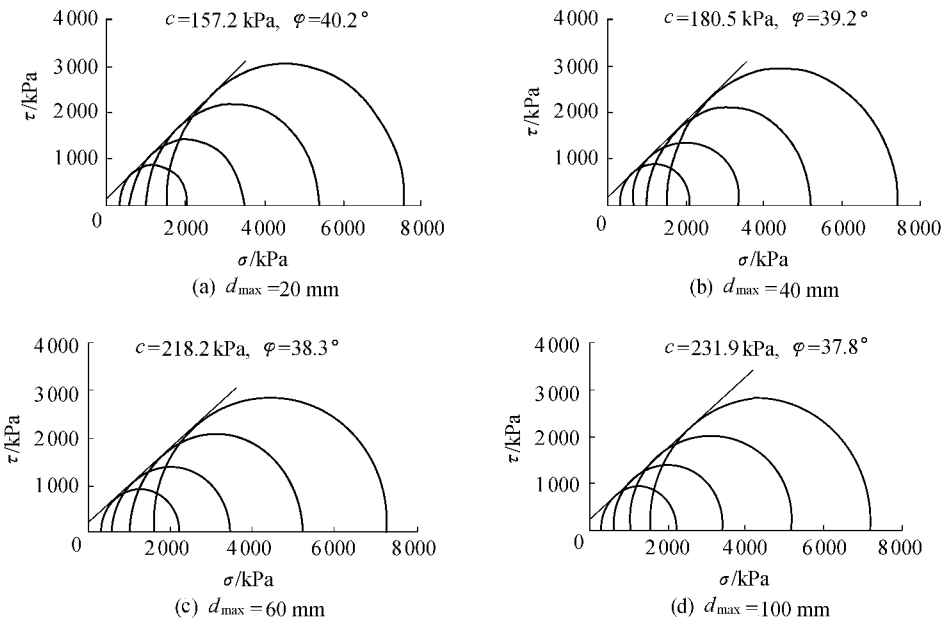


图 2 强度包线

Fig. 2 Strength envelopes

由表1和表2可知,当围压较低时,堆石料强度随着 $d_{\max}$ 的增大而增大.这是由于颗粒越大,其咬合力越大.如当围压为300 kPa时, $d_{\max}$ 为100 mm堆石料的破坏主应力差为1897.9 kPa, $d_{\max}$ 为20 mm的为1741 kPa.而当围压较大时,随着 $d_{\max}$ 的增大,堆石料强度降低.如当围压为1500 kPa时, $d_{\max}$ 为100 mm堆石料破坏主应力差为5680.3 kPa, $d_{\max}$ 为20 mm的为6089.7 kPa.由于在高低围压下堆石料强度随着 $d_{\max}$ 变化的规律不同,导致了 $d_{\max}$ 为100 mm试样的 c 值最大、 φ 最低、 φ_0 最大、 $\Delta\varphi$ 最大; $d_{\max}$ 为20 mm试样的 c 值最小、 φ 最大、 φ_0 最小、 $\Delta\varphi$ 最小,见表2.

粒径越大,反映堆石料颗粒间咬合力的 c 值越大.工程实际中,常利用这种特性来降低堆石的坡比.但是由于粒径越大,颗粒棱角越尖锐.当骨架由大颗粒形成时,棱角处产生了应力集中,易产生破碎.由于颗粒破碎的原因,导致了随着 $d_{\max}$ 的增长,非线性强度指标 $\Delta\varphi$ 增大.

破碎是堆石料颗粒的特征之一.研究表明,颗粒破碎是影响堆石料力学性质的重要因素^[9-12]. Marsal^[9]建议用破碎率 B_g 来表征颗粒破碎的程度, B_g 取试验前后某粒径组质量分数之差的正值之和,即

$$B_g = \sum \Delta W_K$$

(3)

其中

$$\Delta W_K = W_{Ki} - W_{Kf}$$

式中: W_{Ki} ——试验前某粒径组质量分数; W_{Kf} ——试验后某粒径组质量分数.

$d_{\max}$ 为20 mm、40 mm和60 mm试样试验后的粒径组质量分数及破碎率见表3.

表3 试验后破碎率

Table 3 Particle breakage rates after tests

$d_{\max}/\text{mm}$	$B_g/\%$			
	$\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 600 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 1000 \text{ kPa}$	$\sigma_3 = 1500 \text{ kPa}$
60	5.3	8.0	11.2	13.5
40	4.5	6.7	9.8	12.1
20	3.7	5.4	8.3	10.1

由表3可知,堆石料的颗粒破碎率随着应力和 $d_{\max}$ 的增大而增大.在小围压时,由于颗粒所受应力较小,大粒径堆石料的颗粒破碎率与小粒径的相差不大.而由于粗细颗粒咬合较好,级配比较优良,粒径大的堆石料的强度要高于粒径小的堆石料.也就是说,随着 $d_{\max}$ 的增大, c 值增大、 φ_0 增大.

但是当围压较大或应力较大时,由于粒径大的颗粒棱角相应尖锐,且破碎所需的应力比小粒径颗粒小,因此粒径大的堆石料的颗粒破碎率明显大于粒径小的堆石料.这使得当应力较大时,堆石料的强度随着 $d_{\max}$ 的增大而减少,反映在强度指标上,随着 $d_{\max}$ 的增大, $\Delta\varphi$ 变大、 φ 变小.

本文堆石料强度试验结果表明,随着 $d_{\max}$ 的增大,小应力时堆石料强度提高,应力变大到某一定范围时对强度可能影响不大,当应力再进一步提高后强度反而降低.这也可能是文献[1-2,4]出现不同结论的原因之一,工程实际中应根据坝体具体的情况和应力状态进行分析.

3 考虑缩尺效应的强度公式

由试验结果可知,随着粒径的增大, φ_0 变大, $\Delta\varphi$ 也随之增大. φ_0 和 $\Delta\varphi$ 随着 $d_{\max}$ 的变化情况见图3.

由图3可知:(a)对于本文试验,当 $d_{\max}$ 在5~60 mm之间时,堆石料 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 值的增长较快.(b)由于设备等条件的限制,本次没有进行 $d_{\max}$ 如200 mm等的特大型三轴排水剪切试验,但 $d_{\max} > 60 \text{ mm}$ 后 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 的增大趋缓.

本文试验表明,堆石料的非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 不可能随着 $d_{\max}$ 无限限制地增长, $d_{\max} > 60 \text{ mm}$ 后增加缓慢.而 $\varphi_0 \sim d_{\max}$ 、 $\Delta\varphi \sim d_{\max}$ 曲线形状与双曲线类似,因此建议采用式(4)和式(5)来描述强度指标随 $d_{\max}$ 的变化:

$$\varphi_0 = \frac{d_{\max}}{a_1 + b_1 d_{\max}}$$

(4)

$$\Delta\varphi = \frac{d_{\max}}{a_2 + b_2 d_{\max}}$$

(5)

式中: a_1, b_1 —— $d_{\max}/\varphi_0 \sim d_{\max}$ 直线段的截距和斜率; a_2, b_2 —— $d_{\max}/\Delta\varphi \sim d_{\max}$ 直线段的截距和斜率.

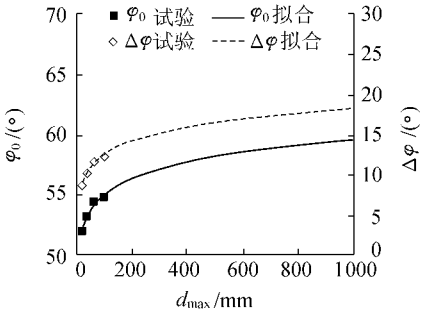


图3 φ_0 与 $\Delta\varphi$ 随 $d_{\max}$ 的变化

Fig. 3 Change of φ_0 and $\Delta\varphi$ with $d_{\max}$

对于本文试验所用堆石料, a_1 , b_1 , a_2 和 b_2 分别为 0.030 1 0.017 9 0.954 5 和 0.071 5. 外推现场原型堆石料 φ_0 , $\Delta\varphi$ 以及由式(4)和式(5)计算得到的堆石料强度指标计算结果见表 4.

由图 3 可见, 曲线拟合较好. 由表 4 可见, 式(4)和式(5)能反映随着 $d_{\max}$ 的增大, 非线性强度指标 φ_0 , $\Delta\varphi$ 的增大以及在小围压时堆石料强度增长, 大围压时强度降低的特性, 表明式(4)和式(5)能较好地描述堆石料强度的缩尺效应特性.

式(4)和式(5)的 4 个参数 a_1 , b_1 , a_2 和 b_2 , 可由 3~4 组不同 $d_{\max}$ 尺寸的堆石料强度试验确定, 参数的概念也比较清晰. 根据式(4)和式(5), 可以求得不同 $d_{\max}$ 堆石料的强度指标, 特别是可以外推现场原型尺寸堆石料的强度指标, 这是非常实用的. 公式建立的目的是为了外推现场原型尺寸筑坝材料或超特大粒径堆石料的强度. 当 $d_{\max}$ 较小时土性可能发生改变, 甚至变成粉土或黏土, 内推过多并不适宜. 如对于本文试验, 建议 $d_{\max} \geq 10$ mm.

本文进行的堆石料强度特性试验, 是在孔隙率一致即密度相同情况下得到的结果. 如控制相对密度相同, 结果应有新差异. 另外研究成果未必适合坝基覆盖层等砂砾料, 因为砂砾料颗粒浑圆, 颗粒破碎不明显, 其强度特性未必符合本文总结的规律.

4 结 论

- a. 在超大型和大型三轴试验仪上, 开展了堆石料强度的缩尺效应试验研究. 成果表明: 当围压较小时, 堆石料强度随着 $d_{\max}$ 的增大而增大; 当围压较大时, 堆石料强度随着 $d_{\max}$ 的增大而减少. 反映在强度指标上, 随着 $d_{\max}$ 的增大, c , φ_0 , $\Delta\varphi$ 增大, φ 减小; 随着 $d_{\max}$ 的减小, c , φ_0 , $\Delta\varphi$ 降低, φ 增大.
- b. 颗粒破碎率随着应力和 $d_{\max}$ 的增大而增大. 应力较小时, 不同 $d_{\max}$ 的堆石料破碎率相近, 应力增大后颗粒破碎率相差较大. 这是强度指标随着 $d_{\max}$ 变化规律或强度的缩尺效应影响规律形成的主要原因之一.
- c. 建立了考虑缩尺效应、可外推现场原型尺寸堆石料强度指标的强度公式. 该公式共有 4 个参数, 概念清晰, 可由 3~4 组不同最大粒径尺寸的堆石料强度试验确定.

参考文献:

[1] MARACHI N D , CHAN C K , SEEDH B. Evaluation of properties of rockfill mechanical[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations , Division , ASCE , 1972 , 98(1) 95-114.

[2] 孟宪麒 , 史彦文. 石头河土石坝砂卵石抗剪强度[J]. 岩土工程学报 , 1983 , 5(2) 92-103.(MENG Xian-qi , SHI Yan-wen. Shear strength of sandy-gravels in Shitouhe river dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1983 , 5(2) 92-103.(in Chinese))

[3] 翁厚洋 , 朱俊高 , 余挺 , 等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2009 , 37(4) 425-429.(WENG Hou-yang , ZHU Jun-gao , YU Ting , et al. Status quo and tendency of studies on scale effects of coarse-grained materia[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences , 2009 , 37(4) 425-429.(in Chinese))

[4] 王继庄. 粗粒料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报 , 1994 , 16(4) 89-95.(WANG Ji-zhuang. Deformation characteristics of coarse aggregates and the scale effec[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1994 , 16(4) 89-95.(in Chinese))

[5] 翁厚洋. 粗粒料缩尺效应试验研究[D]. 南京 : 河海大学 , 2008.

[6] 饶锡保 , 何晓民 , 刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报 , 1999 , 16(1) 21-25.(RAO Xi-bao , HE Xiao-min , LIU Ming. Influence of coarse-grained content on engineering properties of gravelly soi[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute , 1999 , 16(1) 21-25.(in Chinese))

[7] 郦能惠 , 朱铁 , 米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学 , 2001 , 19(2) 40-43.(LI Neng-hui , ZHU Tie , MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. Hydroelectric Energy , 2001 , 19(2) 39-42.(in Chinese))

[8] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2007.

[9] MARSAL R J. Mechanical poperties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York : Wiley , 1973 : 109-200.

- [10] 郭熙灵, 胡辉, 包承刚. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 83-88. (GUO Xi-ling, HU hui, BAO Cheng-gang. Effect of rockfill materials crashing on shear expansion characteristic and shear intensity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 83-88. (in Chinese))
- [11] 傅华, 凌华, 蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 75-79. (FU Hua, LING Hua, CAI Zheng-yi. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(1): 75-79. (in Chinese))
- [12] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562-566. (LIU Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-Feng et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 562-566. (in Chinese))

Experimental study of scale effect on strength of rockfill materials

LING hua^{1,2}, YIN Zong-ze^{3,4}, ZHU Jun-gao^{3,4}, CAI Zhen-yin^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The strength and scale effect of rockfill materials were studied by large-scale triaxial tests and super large-scale triaxial tests. The results show that with the maximum grain diameter $d_{\max}$ of rockfill materials increases, the strength index c increases and φ decreases, and the nonlinear strength indexes φ_0 and $\Delta\varphi$ increase. Particle breakage is the main cause of the strength change with the maximum grain diameters. The particle breakage rate increases with the increase of the maximum grain diameter under the same stress conditions. The particle breakage rate of rockfill materials with large $d_{\max}$ is slightly larger than that with small $d_{\max}$ under the low stress condition. Under the high stress condition, there is a significant difference between them. According to the experimental results, a strength formula considering scale effects is developed, by which the strength parameters of field dam materials can be obtained.

Key words: rockfill material; triaxial test; scale effect; strength; particle breakage