

文章编号:1671-6833(2020)03-0067-05

母岩变形特性差异对堆石料力学性质的影响

韩华强¹, 陈生水¹, 王占军^{2,3}, 郑澄锋¹, 傅 华¹

(1.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程国家重点实验室,江苏 南京 210024; 2.长江勘测规划设计研究院,湖北 武汉 430010; 3.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对当前研究中很少甚至忽略母岩变形特性对堆石料力学性质的影响,采用大型静力三轴仪及大型渗透仪,分别进行了 2 种堆石料三轴试验和渗透试验,得到了不同岩性堆石料强度、变形和渗透特性的变化规律,初步分析了母岩变形特性差异对堆石料力学性质的影响机制。试验结果表明:母岩单轴抗压强度相同条件下不同堆石料的强度并不相同,母岩变形特性对堆石料的力学特性同样具有重要影响,主要表现在对于堆石料的强度及变形特性的影响上,而对于堆石料渗透特性的影响则相对较小;影响机制则主要体现在由于母岩变形特性差异导致的堆石料累积体积变形的差异上,堆石料累积体积变形的差异进一步导致母岩弹性模量低的堆石料反而获得较大的峰值强度。建议应从母岩强度和变形特性两个方面研究母岩对堆石料力学特性的影响。

关键词: 堆石料; 母岩; 变形特性; 力学性质; 影响

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **doi:**10. 13705/j.issn.1671-6833. 2020.02. 017

0 引言

堆石料具有压实性能好、填筑密度大、沉陷变形小、透水性强以及抗剪强度高工程特性,因而被广泛应用于土石坝、公路、铁路、机场、房建等建筑工程中^[1]。堆石料的强度和变形特性事关建筑物的安全运行,国内外学者针对堆石料的力学特性及其影响因素开展了大量的研究工作^[2-10]。结果表明:除级配、颗粒破碎、劣化、缩尺效应、孔隙率、应力状态、加载路径等因素的影响外,堆石料的力学特性与其母岩性质也有着紧密联系。

母岩性质是影响堆石料力学特性的重要因素,目前关于母岩性质对堆石料力学性质的影响研究多集中于母岩的抗压强度及颗粒形状等方面,主要包括母岩颗粒大小、形状、强度以及表面粗糙程度等,一般认为其中某一因素的变化必然会引起堆石料力学特性的改变。母岩强度是影响堆石料力学特性的重要因素,母岩强度越高,产生破碎所需的压力也越高,堆石料的抗剪强度相应

也越高,反之亦然^[11-12]。然而迄今为止,母岩变形指标对堆石料力学特性影响的研究工作几乎无人涉及。为此,笔者采用大型静力三轴仪及大型渗透仪,选择了两种抗压强度大体相同而弹性模量差别较大的弱风化白云岩和弱风化闪长岩,研究了母岩变形指标差异对堆石料力学性质的影响。

1 堆石料母岩基本特性

图 1 为本次试验采用的弱风化白云岩试样和弱风化闪长岩试样照片,通过岩石试验得到两种岩体饱和条件下母岩的抗压强度、软化系数、弹性模量及泊松比等力学指标如表 1 所示。



(a) 弱风化白云岩 (b) 弱风化闪长岩

图 1 母岩照片对比

Figure 1 Photograph of mother rock

收稿日期:2019-10-01;修订日期:2019-12-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404804);国家自然科学基金资助项目(51609182);湖北省自然科学基金项目(2016CFB277)

作者简介:韩华强(1978—),男,河南郾城人,南京水利科学研究院教授级高工,博士,主要从事土石坝工程研究, Email: hqhan@nhri.cn。

表 1 母岩基本特性

Table 1 Basic characteristics of mother rock

岩性	弱风化白云岩	弱风化闪长岩
抗压强度/MPa	132.6	128.0
软化系数	0.73	0.73
弹性模量/GPa	67.0	48.7
泊松比	0.26	0.27

从表 1 可以看出,弱风化白云岩与弱风化闪长岩(简称白云岩试样与闪长岩试样)的抗压强度接近,但两者弹性模量差别较大,白云岩试样弹性模量为闪长岩试样弹性模量的 1.4 倍。

2 堆石料静力三轴试验方案及过程

2.1 试样制备

静力三轴试样尺寸均为 $\phi 300\text{ mm}\times 700\text{ mm}$,试验所用堆石料母岩分别为上述白云岩及闪长岩,堆石料试样级配如图 2 所示,根据 SL237—1999《土工试验规程》^[13]通过密度试验得到室内相关物理力学性质指标见表 2。

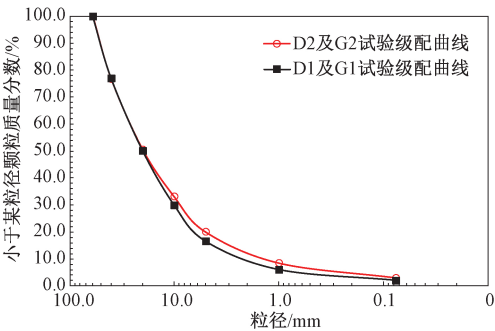


图 2 试验模拟级配

Figure 2 Test simulation grading

表 2 试样物理力学性质指标

Table 2 Basic physical property index of rockfill

试样编号	岩性	比重	最小干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	制样干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙率/%	相对密度
D1	弱风化	2.86	1.64	2.26	2.26	21	1.0
D2	白云岩		1.66	2.29	2.29	20	1.0
G1	弱风化	2.89	1.67	2.29	2.29	21	1.0
G2	闪长岩		1.72	2.32	2.32	20	1.0

2.2 试样条件

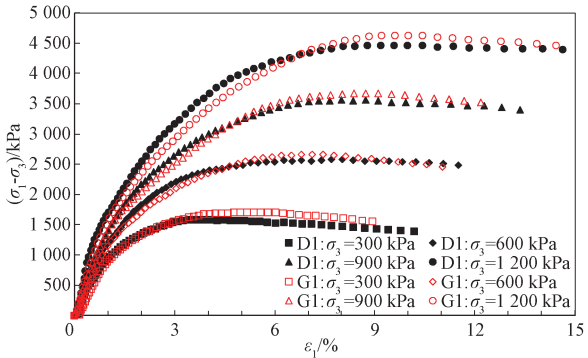
试验按照 SL237—1999《土工试验规程》进行,试样初始均处于自然风干状态,按规程分 60 mm~40 mm、40 mm~20 mm、20 mm~10 mm、10 mm~5 mm、5 mm~0 mm 5 种粒径范围进行制备。试样制好后采用水头饱和法自下而上对试样进行饱和,然后分别进行 300,600,900 及 1 200

kPa 围压条件下的静力三轴试验。

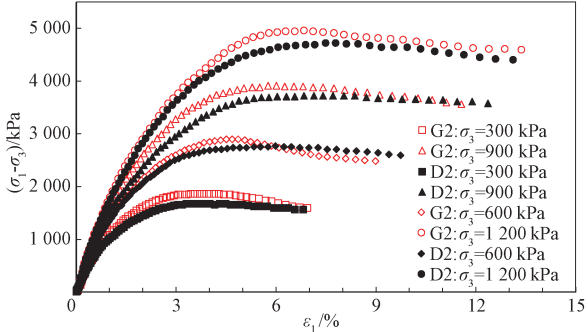
3 堆石料静力三轴试验结果分析

3.1 不同岩性的堆石料强度与变形特性

图 3 为白云岩试样和闪长岩试样两种堆石料三轴剪切试验应力-应变曲线,图 4 为两种堆石料的摩尔库仑强度包络线。由图 3 可以看出,不同围压条件下,闪长岩试样峰值强度均大于白云岩试样,但二者达到峰值强度的过程并不相同:图 3 (a)在剪切起始阶段,白云岩试样强度增长较闪长岩试样迅速,相同应变下,白云岩试样强度大于闪长岩试样;随着试样应变发展,闪长岩试样应力、应变线逐渐超越白云岩试样,表明随着应变发展,闪长岩试样的强度逐渐超过白云岩试样,在应力-应变曲线达到峰值后,闪长岩试样堆石料应力软化的特征也比白云岩试样更为显著;对比图 3 (b),闪长岩试样的应力增长速率和峰值强度均大于白云岩试样。为清楚起见,图 5 和图 6 分别给出了两种堆石料应力、应变发展过程以及剪切体积应变随轴向应变发展过程。从体积变形发展过程看,在低围压下,两者均发生了明显剪胀,但闪长岩试样剪胀程度明显强于白云岩试样;随着围压增大,堆石料颗粒破碎率提高,剪胀均受到抑制,但白云岩试样堆石料剪胀受到的抑制更为明



(a) D1与G1对比



(b) D2与G2对比

图 3 不同堆石料应力-应变曲线对比

Figure 3 Stress strain line

显,其剪胀现象几乎消失,而闪长岩试样仍能表现出较强的剪胀。

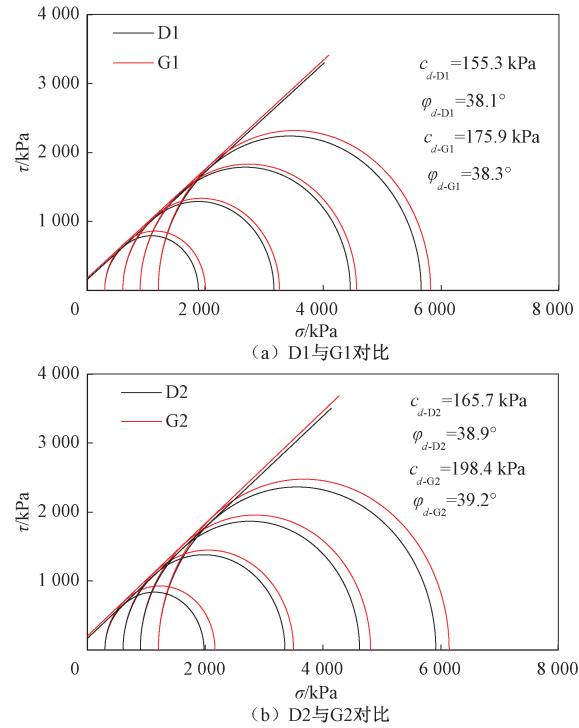


图4 不同堆石料摩尔库仑强度包线对比
Figure 4 Mohr Coulomb strength envelope

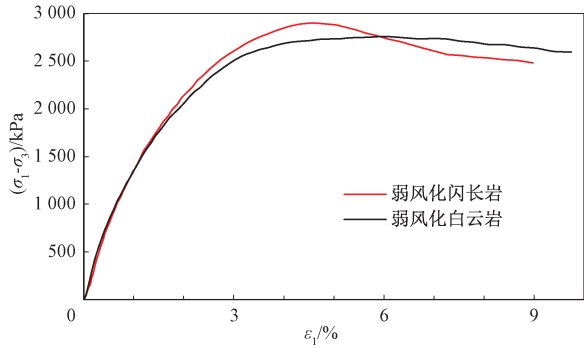


图5 堆石料应力-应变发展过程示意图
Figure 5 Diagrammatic sketch of stress and strain development process

3.2 母岩变形特性差异对堆石料力学性质影响机制探讨

从上述试验结果可以看出,尽管闪长岩试样母岩的强度略小于白云岩试样,但在相同孔隙率及级配条件下,从二者的强度指标凝聚力 c_d 及内摩擦角 φ_d 可以看出,由闪长岩构成的堆石料强度却大于由白云岩构成的堆石料强度,显然产生这一结果的原因应与其母岩的弹性模量不同有关。

在剪切起始阶段,白云岩试样的强度增长速率较闪长岩试样大,反映出混合料的初始弹性模量相对较大的特点,显然正相关于母岩的弹性模量,反映了白云岩母岩的弹性模量大于闪长岩母

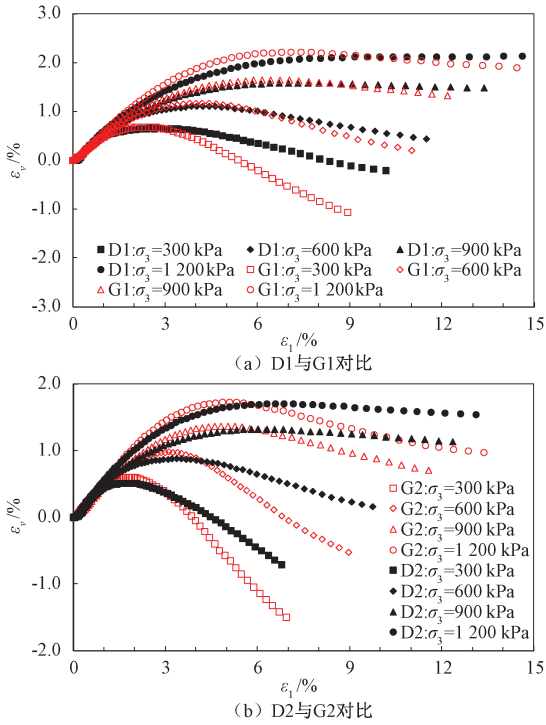


图6 堆石料体积应变-轴向应变关系曲线对比
Figure 6 Relationship curves of axial strain and volume strain

岩弹性模量的特点,由此产生混合料的初始弹性模量也相对较大,使得在相同应变下,白云岩试样混合料强度大于闪长岩试样。随着应变增长,在达到一定应力水平后,骨料分担荷载逐渐超过其母岩的破碎强度,堆石料开始产生明显的颗粒破碎,颗粒破碎的发生对堆石料的级配产生一定的调整作用。而随着应变的进一步增长,在接近峰值强度前,堆石料应力-应变曲线均逐渐变缓,白云岩试样堆石料应力-应变曲线变缓的趋势更加显著,导致闪长岩试样应力-应变曲线逐渐超越白云岩,并且在达到峰值强度后,白云岩试样的剪胀性也受到一定抑制,显然这主要和不同母岩堆石料颗粒破碎发展的过程并不同步有关,这种堆石料颗粒破碎发展过程的不同步也直观地体现在堆石料体积变形随应变的发展过程中。

从体积变形来看,由于闪长岩试样母岩初始弹性模量明显小于白云岩试样,在剪切起始阶段,闪长岩试样体变增长较白云岩试样迅速,堆石料剪缩及由此导致的堆石破碎量均较白云岩试样大,硬化程度相对较高。在达到一定应力水平时,随母岩骨料分担荷载的增大,由于前期已累积了相对较大的破碎量,后期闪长岩试样破碎量增加量相对白云岩试样变缓,应力-应变曲线增长变缓趋势相对不明显,随应变发展,使得闪长岩试样应力-应变曲线逐渐超越白云岩试样。同时,由于堆

石料的剪缩,一定程度上也提高了堆石料的峰值强度,使得闪长岩试样具有比弱风化白云岩试样更大的强度。

由此表明,堆石料的力学特性一方面受母岩强度的影响,母岩强度越高,发生颗粒破碎需要的压力越高,堆石料的抗剪强度也越高。另一方面堆石料的力学特性也与母岩的变形特性有关,母岩变形特性对堆石料力学特性的影响主要体现在颗粒破碎和剪缩两个方面。同等母岩强度条件下,母岩弹性模量越大,在剪切起始阶段,堆石料的强度增长越迅速,同等应变条件下,堆石料的轴向应力也越大,体积变形量及颗粒破碎量均相对较小,而母岩弹性模量小的堆石料累积了更大的体积变形及颗粒破碎量;随着应变发展,当达到一定应力水平时,母岩弹性模量相对较大的堆石料颗粒破碎量开始显著增加,堆石料的强度增长相对变缓,而母岩弹性模量相对较小的堆石料由于累积了相对较大的体积变形,同时由于剪缩作用,堆石料强度增长变缓的趋势相对较小,其混合料的峰值强度有可能超越母岩弹性模量大的堆石料。因此,宜从两个方面研究母岩对堆石料力学特性的影响:一方面应重视母岩强度对堆石料力学特性的影响;另一方面也应重视母岩的变形特性对堆石料力学特性的影响。

4 堆石料的渗透特性

渗流和渗透控制也是土石坝工程中一项极其重要的课题,直接关系到工程的安全和投资^[14],为此,进一步研究了母岩变形特性差异对堆石料渗透特性的影响。渗透试验采用常水头法,渗流方向为从下向上,试样尺寸为 $\phi 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,其中,300 mm 为渗径。装样时在透水孔直径为 2 mm 的透水板上部铺一层孔径 0.075 mm 细钢丝网,以减少颗粒离析造成透水板堵塞,具体试验步骤及渗透系数计算方法见 SL237—1999《土工试验规程》。渗透系数试验结果见表 3。

表 3 渗透试验结果
Table 3 Permeability test results

试样 编号	岩性	孔隙率/ %	ρ_d / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	k_{20} / ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
D1	弱风化白云岩	21	2.26	2.84×10^{-1}
G1	弱风化闪长岩	21	2.29	3.17×10^{-1}
D2	弱风化白云岩	20	2.29	7.35×10^{-2}
G2	弱风化闪长岩	20	2.32	6.26×10^{-2}

由表 3 可以看出,在相同孔隙率、相同级配、

相同制样相对密度条件下,不同变形特性母岩堆石料的渗透系数差别不大,两种堆石料渗透系数的差值基本上控制在规范规定的 2×10^{-n} 的差值范围内,由此表明,堆石料的渗透系数主要与堆石料的孔隙率、级配及相对密度有关,母岩性质的差异主要影响堆石料的力学特性,而对堆石料渗透系数的影响并不显著。

5 结论

(1)母岩变形特性差异对堆石料的力学性质有显著影响,母岩单轴抗压强度相同条件下,不同堆石料的强度随岩性差异而不同。本次试验条件下,单轴抗压强度较低的闪长岩堆石料的强度指标反而略高于单轴抗压强度较高的白云岩堆石料。

(2)堆石料的变形指标与母岩的变形指标有正相关的关系,虽然白云岩试样堆石料的强度指标低于闪长岩,但由于白云岩试样母岩的弹性模量明显高于闪长岩,在初始剪切阶段白云岩试样堆石料的初始弹性模量明显高于闪长岩。

(3)母岩变形特性对堆石料力学特性影响机制主要体现在颗粒破碎和剪缩两个方面。在剪切起始阶段,母岩弹性模量越大,堆石料的强度增长越迅速,同等应变条件下,堆石料的强度也越大,体积变形量及颗粒破碎量均相对较小,而母岩弹性模量小的堆石料累积了更大的体积变形及颗粒破碎量;随应变发展,当达到一定应力水平时,弹性模量相对较大的堆石料颗粒破碎量显著增加,堆石料的强度增长相对变缓,而母岩弹性模量相对较小的堆石料由于累积了相对较大的体积变形,由于剪缩作用,堆石料的强度增长变缓的趋势相对较小,其混合料的峰值强度有可能超越母岩弹性模量大的堆石料。

(4)岩性差异对堆石料力学特性的影响主要表现在强度及体积变形特性,对于堆石料渗透特性的影响相对较小。

(5)研究母岩对堆石料力学特性的影响,应从母岩强度和变形特性两个方面展开研究。

参考文献:

[1] 韩华强,陈生水,傅华,等.循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎特性[J].岩土工程学报,2017,39(10):1753-1760.
[2] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J].Proceedings

of royal society of London, series A: mathematical and physical sciences, 1962,269(1339): 500-527.

[3] 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.

[4] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1):1-28.

[5] 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.

[6] ISHIHARA K, OKADA S. Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand[J]. Soils and foundations, 1982, 22(3): 109-125.

[7] 柏树田, 崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997, 16(3):21-30.

[8] 程展林, 丁红顺, 吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1151-1158.

[9] 傅华, 韩华强, 凌华. 母岩性质对粗颗粒材料动力特性影响试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 56-59, 63.

[10] 崔允亮, 项鹏飞, 王新泉, 等. 考虑塑性体积应变的扰动状态本构模型改进[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(1):47-52.

[11] 张兵, 高玉峰, 刘伟, 等. 坝体填筑料压缩特性及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3):741-745.

[12] 张启岳, 司洪洋. 粗颗粒土大型三轴压缩试验的强度与应力-应变特性[J]. 水利学报, 1982, 13(9): 22-31.

[13] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程:SL237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.

[14] 吴军民, 喻石, 韩华强, 等. 砂砾石垫层料与堆石过渡料的联合抗渗试验研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(3):60-63, 72.

Influence of Deformation Characteristics of Mother Rock on Mechanical Properties of Rockfill Materials

HAN Huaqiang¹, Chen Shengshui¹, WANG Zhanjun^{2,3}, ZHENG Chengfeng¹, FU Hua¹

(1.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2.Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 3.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the large-scale static three axis instrument and the large permeability apparatus, the triaxial tests and permeability tests were carried on two kinds of rockfill materials. Finally, the variations of strength, deformation and permeability characteristics in different lithological rockfill materials were obtained, and the influence mechanisms of deformation characteristics of mother rock on mechanical properties of rockfill materials were preliminary analyzed. The result showed that the deformation characteristics of mother rock also played an important role in the mechanical properties of rockfill materials, namely the influence of mother rock on the mechanical properties of rockfill materials mainly lay in the strength and deformation characteristics, while the influence on permeability characteristics of rockfill was relatively small. The strength of different rockfill materials was not the same even though the mother rocks were under the same uniaxial compressive strength. The influence mechanism of deformation characteristics of mother rock on the mechanical properties of rockfill materials was mainly reflected in two aspects: particle crushing and shear shrinkage. The initial deformation index of rockfill materials had a positive correlation with the deformation index of the mother rock, and in the initial stage of shearing, the more the deformation index of mother rock, the faster and the greater the strength of rockfill materials were under the same strain condition, while the cumulative volume deformation and particle breakage were relatively small. With the development of rockfill strain, when a certain stress level was reached, rockfill materials with relatively small deformation index of the mother rock accumulated a relatively large volume deformation due to the shear shrinkage, which led a slow tendency of rockfill materials strength growth was relatively small. While the crushing amount of rockfill materials with large deformation index increased significantly, and led a relatively slow growth of rockfill strength. It was possible to obtain a larger peak strength even the deformation index of mother rock was low. Research conclusions indicated that the influence of mother rock on the mechanical properties of rockfill should be studied from two aspects of strength and deformation characteristics.

Key words: rockfill materials; mother rock; deformation characteristics; mechanical properties; influence