

DOI: 10.11779/CJGE202107023

考虑颗粒破碎的堆石料剪胀特性研究

石北啸^{1,2}, 刘赛朝^{*3}, 吴鑫磊³, 常伟坤³

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210024;
3. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对某高堆石坝的筑坝堆石料开展大型三轴排水剪切试验, 研究堆石料在不同孔隙比及不同应力状态下的颗粒破碎与剪胀特性关系, 结果表明, 不同孔隙比堆石料在低围压下都表现出剪胀, 但随围压增大, 堆石料的剪胀现象均逐渐消失并转为剪缩。提出了破坏剪胀率概念, 用以描述堆石料颗粒破碎与其剪胀特性的关系, 试验发现, 随着堆石料颗粒破碎率增加, 破坏剪胀率呈幂函数规律减小, 剪胀现象逐渐消失; 随着堆石料初始孔隙比增加, 破坏剪胀率减小, 但试验围压越大, 初始孔隙比对剪胀特性的影响越小。基于上述试验结果, 提出了堆石料初始孔隙比与其剪胀性和颗粒破碎的关系式, 用于不同围压下堆石料剪胀特性的预测。

关键词: 堆石料; 三轴试验; 相变应力比; 破坏剪胀率

中图分类号: TV641.43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)07-1360-06

作者简介: 石北啸(1976—), 男, 博士后, 正高级工程师, 主要从事粗颗粒料力学试验研究与土石坝安全的工程咨询工作。E-mail: shibeixiao@nhri.cn。

Dilatancy behaviors of rockfill materials considering particle breakage

SHI Bei-xiao^{1,2}, LIU Sai-chao³, WU Xin-lei³, CHANG Wei-kun³

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China; 3. School of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to study the relationship between particle breakage and dilatancy characteristics of rockfill materials under different porosity and stress conditions, the large-scale triaxial tests are carried out on the rockfill materials of a high rockfill dam. The results show that the of rockfill materials with different porosities exhibit different degrees of dilatancy under low confining pressure. As the confining pressure increases, the dilatancy phenomenon of the rockfill materials gradually disappears and turns into shrinkage. Therefore, the concept of breaking dilatancy ratio is put forward and used to describe the relationship between particle breakage and dilatancy characteristics. It is found that as the crushing rate of rockfill particles increases, the breaking dilatancy rate decreases in the form of a power function, and the dilatancy phenomenon gradually disappears. As the initial porosity of the rockfill materials increases, the failure dilatancy decreases, but the larger the confining pressure, the less the initial porosity has a smaller effect on the dilatancy characteristics. Based on the above test results, the relationship among the initial porosity of the rockfill materials, their dilatancy and particle breakage is established to predict the dilatancy of the rockfill materials under different confining pressures.

Key word: rockfill; triaxial test; phase transformation stress ratio; failure dilatancy ratio

0 引言

随着土石坝施工技术的不断提高, 筑坝高度也在不断突破。目前, 已建和在建的 9.8 万多座水库大坝中, 90%以上都是土石坝^[1]。堆石料作为土石坝的常用筑坝材料, 在较高应力下易发生颗粒破碎, 导致大坝产生较为明显的变形, 进而导致面板开裂, 接触位置渗漏量增大, 危及大坝安全, 这也是目前土石坝工程建设领域重点关注的热点和难题。因此, 研究堆石

料的颗粒破碎对高坝变形的影响就很有必要。

在堆石料颗粒破碎与其强度和变形关系方面, 国内外学者做了大量研究, 并取得了许多成果^[2-6]。凌华等^[7]研究了堆石料强度和变形与级配和细粒含量的关

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2018YFC1508502); 国家自然科学基金项目 (51679149, 51779152, U1765203)

收稿日期: 2020-08-03

***通信作者 (E-mail: 1143319854@qq.com)**

系, 结果表明同种岩性, 细粒含量越多, 其变形越小, 强度越大; 王子寒等^[8]研究颗粒破碎对堆石料强度的影响, 结果表明, 颗粒破碎与正应力呈双曲线关系; 郭万里等^[9]以剑桥模型为基础, 推导出了一种适用于粗粒土的剪胀方程; 秦红玉等^[10]研究堆石料强度和变形的影响因素, 结果表明堆石料的强度和变形与围压和泥沙含量有关。褚福永等^[11]对比 3 种不同密度的堆石料, 结果表明 Rowe 剪胀方程在一定程度上能反映堆石料剪胀性, 但高围压情况下会低估其压缩性和剪胀性; 陈晓斌^[12]研究了红砂岩堆石料的剪胀性, 结果表明红砂岩在 $\sigma_3 < 200$ kPa 时为剪胀, $\sigma_3 > 400$ kPa 时为剪缩。还有部分学者^[13-14]对堆石料的剪胀特性做了大量研究, 但因堆石料的岩性构成比较繁多, 其剪胀特性与土体颗粒内在机理尚未清楚, 未能提出根据堆石料初始物理性质判断其剪胀性的方法, 也未能系统提出颗粒破碎与剪胀性的关系。

一般认为, 在高应力作用下, 堆石料的颗粒破碎现象比较普遍, 在颗粒破碎的影响因素方面的研究成果较多, 但颗粒破碎后对堆石料变形的影响, 以及对剪胀和剪缩特性变化规律方面的研究较少。本文利用西南某堆石坝工程筑坝堆石料, 控制不同初始孔隙比的 3 种制样标准, 通过大型三轴剪切试验, 研究剪缩、剪胀和相变应力比与围压的变化关系, 破坏剪胀率与围压及初始孔隙比的关系, 颗粒破碎对剪胀性的影响, 并提出可用于预测堆石料剪胀特性的方程式, 为试验成果在工程上的推广应用提供了有益借鉴。

1 堆石料三轴试验

试验用料为西南地区某高土石坝堆石料, 该堆石料为新鲜灰岩料, 颗粒棱角分明, 受力易于破碎, 试验用不同粒径混合堆石料见图 1。



图 1 不同粒径混合堆石料

Fig. 1 Rockfill materials with different particle sizes

试验采用南京水利科学研究院自行研制的大型三轴试验仪, 仪器允许试样的最大尺寸为 $\phi 300$ mm \times 700 mm (最大试验限制粒径 60 mm), 最大试验围压可达 4 MPa, 最大剪切应变可达 40%, 体变测试精度为 0.1 mL, 位移测试精度为 0.003 mm。

控制试验不同初始孔隙比的 3 种制样标准见表 1。

表 1 试验堆石料物理性质

Table 1 Physical properties of rockfill materials			
试验编号	制样干密度 / (g·cm ⁻³)	土粒相对质量密度 G_s	初始孔隙比 e_0
1	2.20	2.71	0.23
2	2.17	2.71	0.25
3	2.14	2.71	0.27

试验所用堆石料按照规范^[15]要求进行缩制, 设计及试验级配曲线见图 2。根据试样要求的干密度装填, 采用振动击实法分 5 层制样。试样制备完成后, 采用水头饱和法对试样进行饱和, 饱和后的试样在排水条件下进行固结排水剪切试验, 控制轴向剪切速率为 2.0 mm/min。

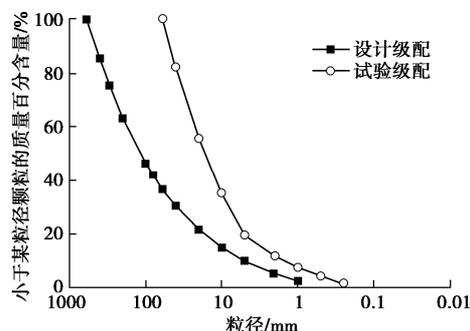


图 2 设计与试验级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of design and test

试样剪切过程中由计算机采集试样的轴向荷载、轴向变形、排水量或孔隙水压力, 并同步绘制应力 - 应变曲线, 直至试样破坏或至试样轴向应变的 15%。当应力 - 应变曲线有峰值时, 以峰值点为破坏点, 峰值点所对应的主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为该堆石料的破坏强度, 反之则取轴向应变的 15% 所对应的点为破坏点, 对应的主应力差为 $\sigma_1 - \sigma_3$ 该堆石料的破坏强度, 试验结束后对试样进行风干、筛分。

重复上述过程, 进行初始孔隙比分别为 0.23, 0.25, 0.27 的 3 组饱和三轴排水剪切试验, 每组试验包含 5 种围压 (0.4, 0.8, 1.2, 2.0, 3.2 MPa)。

2 试验结果分析

2.1 变形特性

堆石料的剪胀性一般分为可恢复性剪胀和不可恢复性剪胀两种^[16], 堆石料颗粒在剪切过程中逐渐被压密实, 达到相变点 (由剪胀转变为剪缩的临界点, 也可说为堆石料最密实的状态) 后继续被压缩, 堆石料一部分颗粒翻越相邻颗粒并达到相对稳定状态称之为不可恢复性剪胀, 另一部分颗粒未完全翻越, 当卸去荷载时, 颗粒回到原来位置, 称之为可恢复性剪胀。

将 3 组三轴剪切试验的体应变 - 轴应变、偏应

力 - 轴应变关系曲线绘制于图 3。从体应变 - 轴应变图中可以看出, 虽然试验初始孔隙比不同, 但 3 种堆石料在低围压下都表现出不同程度的剪胀现象, 且随着围压的增大, 堆石料的剪胀逐渐向剪缩转化。从偏应力 - 轴应变图中可以看出, 尽管初始孔隙比不同, 但 3 种堆石料出现软化时所对应的轴应变均随围压的增大而逐渐增大。

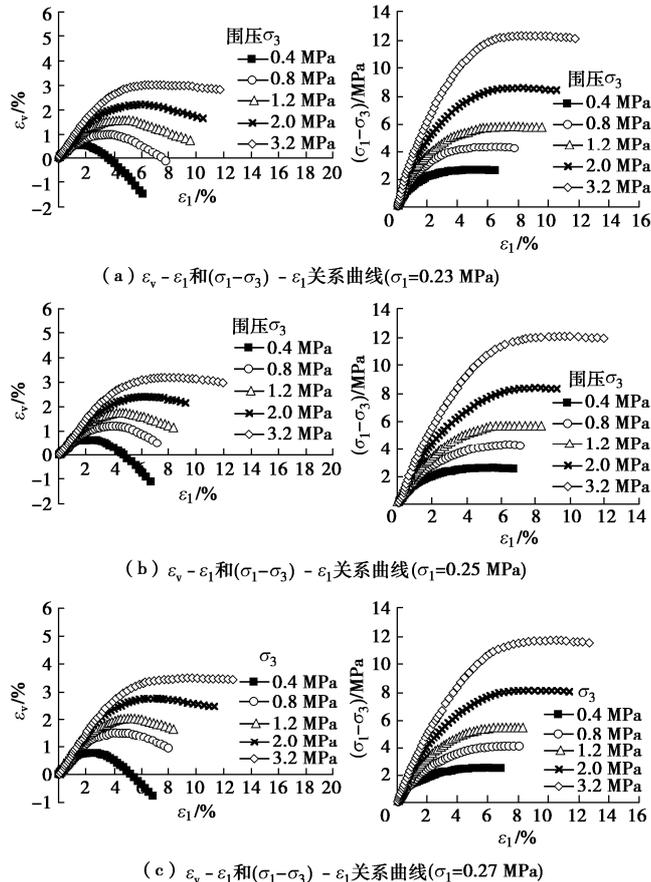


图 3 不同孔隙率的 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ and $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ under different porosities

出现上述现象的原因可能是: 围压较小时颗粒间的接触相对松散, 剪切作用下堆石颗粒的移动所需克服的外作用力 (主要是围压导致的颗粒间接触力) 较小, 也相对容易, 随着围压的增大, 堆石料内部颗粒接触更加紧密, 在剪切作用下颗粒移动需要克服的颗粒间作用力增大, 导致部分颗粒被挤压破碎, 颗粒破碎率增加, 进而导致细颗粒含量增多。破碎的细颗粒填充到原有较大颗粒间的孔隙之中, 使试样变得更加密实, 因颗粒间的孔隙被填充而导致体积逐渐减小, 从而表现出随围压增大而出现剪缩的现象。这一点, 从图 4 中相同围压、不同初始孔隙比下的体应变 - 轴应变曲线更能说明。从图 4 中看, 随着孔隙比的减小, 最大体变量也在降低, 且围压相同, 初始孔隙比不同时, 孔隙比越小其达到相变点时轴向应变 ε_1 越小; 偏

应力 - 轴应变图可以看出, 当围压相同时, 孔隙比越小其峰值应力越大。

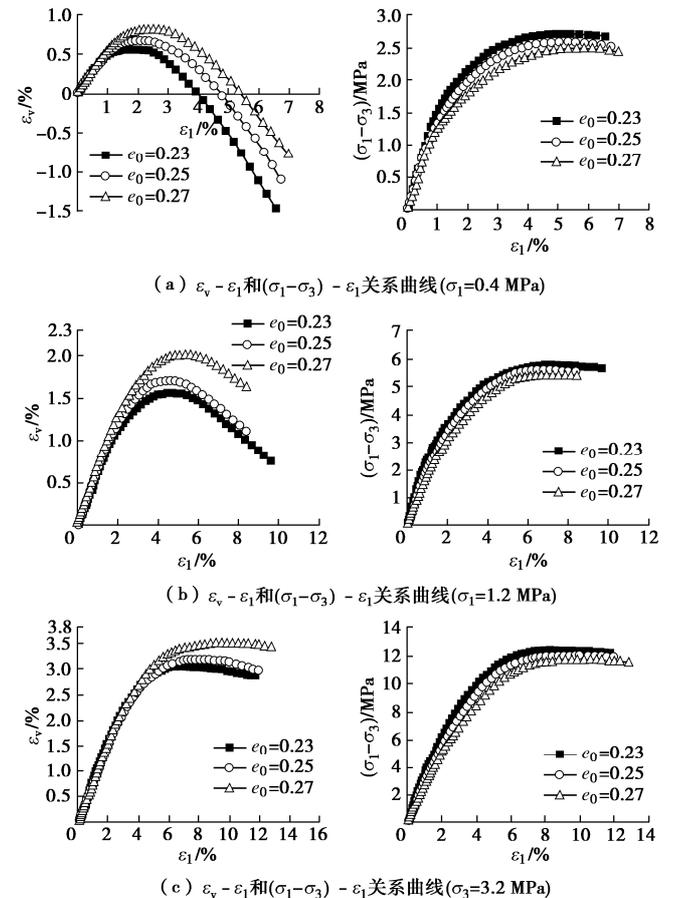


图 4 不同围压下 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ and $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ under different confining pressures

另外, 当围压为 0.4 MPa 时, 3 种堆石料的偏应力 - 轴应变线基本重合, 表明初始弹性模量基本相同, 而随着围压增大, 3 种堆石料之间的差别也逐渐增大, 初始孔隙比越小其初始弹性模量则越大。

对于上述现象, 早在 1997 年 Manzari 等^[17]就首次提出用状态相关的散粒体颗粒料剪胀特性来解释, 即用相变应力比 $M_{pt} = q/p$ (式中 q 为临界剪胀应力, p 为平均主应力) 表示。后来, 许多学者在堆石料的剪胀性研究中把相变应力比视为描述堆石料剪胀特性的重要参数之一。

为研究相变应力比 M_{pt} 与围压 σ_3 和初始孔隙比 e_0 的关系, 根据本次试验结果整理出了相变应力比 M_{pt} 与围压 σ_3 的关系, 如图 5 所示。从图 5 上看, 不同初始孔隙比下进行的三轴剪切试验, 相变应力比与围压所呈现出的规律性一致, 两者之间呈现出良好的幂函数关系, 表明随着围压的增加, 相变应力比逐渐减小, 围压相同时, 初始孔隙越小, 相变应力比越大。因此, 可以认为, 相变应力比可以较好地描述堆石料的剪胀特性, 剪胀的大小与初始孔隙比和试验围压关系密切。

表 2 不同孔隙比及围压下颗粒破碎率 B_r

Table 2 Values of particle breakage ratio B_r under different porosities and confining pressures

初始孔隙比 e_0	B_r / %				
	$\sigma_3=0.4$ MPa	$\sigma_3=0.8$ MPa	$\sigma_3=1.2$ MPa	$\sigma_3=2.0$ MPa	$\sigma_3=3.2$ MPa
0.23	5.2	6.7	9.0	10.7	14.6
0.25	5.7	7.4	9.7	11.4	15.0
0.27	6.0	8.1	10.2	12.2	15.8

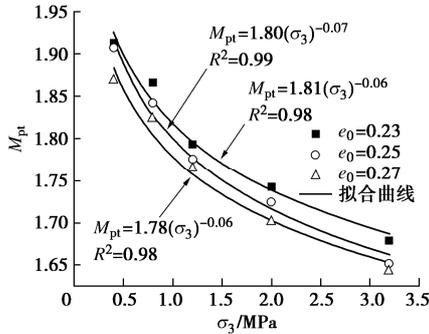


图 5 $M_{pt} - \sigma_3$ 关系曲线

Fig. 5 Relationship between M_{pt} and σ_3

对试验数据进行分析还发现, 临界剪应力 q 与平均主应力 p 呈良好的幂函数关系 (见图 6)。两者的关系可表示为

$$q/p_a = 2.35(p/p_a)^{0.92} \quad (1)$$

式中, p_a 为标准大气压, $p_a = 101.325$ kPa。

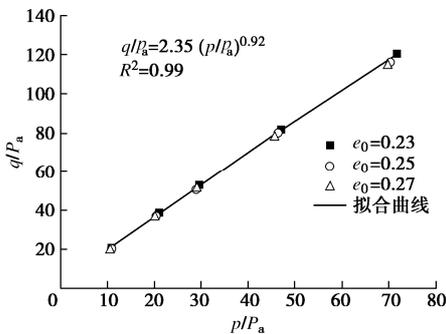


图 6 $q/p_a - p/p_a$ 关系曲线

Fig. 6 Relationship between q/p_a and p/p_a

从图 6 上还可以看出, 当 p 或 q 等于 0 时, 该拟合曲线过原点, 与经典剑桥模型一致。鉴于中国正在规划建设的新一批 300 m 级高土石坝, 其坝基处最大自重应力会达到 7 MPa, 将式 (1) 改写为

$$q/p = M_{pt} = 2.35 (p_a/p)^{0.08} \quad (2)$$

采用式 (2) 可根据低围压下堆石料的试验结果预测不同高围压下的堆石料相变应力比, 预知堆石料剪胀和剪缩转变时的应力状态。

为验证式 (2) 的普适性, 取浙江某水电工程 3 组三轴试验数据进行验证, 试验所采用的堆石料为微、弱风化凝灰岩混合料, 试验初始孔隙比为 0.22, 0.23 和 0.25, 每组试验 4 种围压, 分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 MPa。图 7 中曲线为根据式 (2) 绘制曲线, 散点

为堆石料试验结果。从图 7 上看, 3 组试验点都位于本文方程的曲线附近, 且孔隙比越小试验点越接近曲线, 由此可见, 本文所提出的公式对不同工程和岩性堆石料的相变应力比预测效果均较佳。

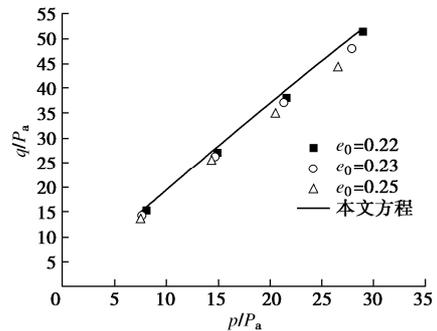


图 7 浙江某水电站工程料 $q/p_a - p/p_a$ 关系

Fig. 7 Relationship between q/p_a and p/p_a of rockfill

materials of a hydropower station in Zhejiang

2.2 颗粒破碎与剪胀特性

对试验前后不同初始孔隙比的试样进行风干后筛分, 研究不同围压和初始孔隙比下堆石料的颗粒破碎特性。采用 Marsal^[18] 定义的颗粒破碎率 $B_r = \sum |W_{ki} - W_{kf}|$ 来表示, 其中, W_{ki} 和 W_{kf} 分别代表试验前后某粒组百分含量。3 组试验后筛分、计算得到的颗粒破碎率见表 2。

图 8 为颗粒破碎率 B_r 与围压 σ_3 关系曲线。从图 8 可以看出, 随着围压的增加, 颗粒破碎率也相应增加, 其规律可用幂函数形式描述。当围压相等时, 初始孔隙比越大, 其颗粒破碎率越高。这是因为孔隙比越大其密实程度越低, 细颗粒填充孔隙越低, 颗粒间咬合力越大, 颗粒更容易破碎。

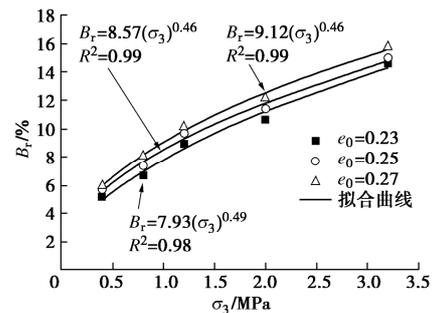


图 8 $B_r - \sigma_3$ 关系曲线

Fig. 8 Relationship between of B_r and σ_3

为描述堆石料的剪胀特性，定义堆石料的剪胀率 $\zeta = dv/d\varepsilon$ ，即，剪胀率为三轴剪切过程中塑性体应变增量 dv 与塑性剪应变增量 $d\varepsilon$ 的比值。研究表明^[19]，堆石料破坏时的剪胀率（称为破坏剪胀率，可用 ζ_f 表示）可作为判断堆石料剪胀的重要物理参数。从本次试验整理得到的破坏剪胀率 ζ_f 与颗粒破碎关系（图 9）可以看出，破坏剪胀率随着颗粒破碎率的增加，其绝对值逐渐减小，堆石料由剪胀逐渐转为剪缩，这一结论与 2.1 节中的结论可相互印证，说明破坏剪胀率可以很好地描述堆石料的剪胀性。且破坏剪胀率与颗粒破碎率呈良好的幂函数关系，对本次试验所用堆石料而言，其破坏剪胀率和颗粒破碎率的关系为

$$\zeta_f = -13.26B_f^{-2.04} \quad (3)$$

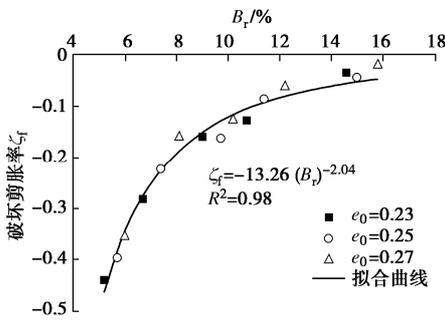


图 9 $\zeta_f - B_f$ 关系曲线

Fig. 9 Relationship between ζ_f and B_f

2.3 孔隙比与剪胀特性

前文提到，当孔隙比一定时，围压对堆石料的剪胀剪缩特性起关键作用，围压较小时发生剪胀，围压较大时则发生剪缩；而相同围压下，孔隙比越小，剪胀特性越明显，因此，有必要对围压和孔隙比与剪胀特性的关系进行研究。图 10 给出了破坏剪胀率 ζ_f 与围压 σ_3 的关系，从图 10 可以看出，试验围压相同时，孔隙比越大其破坏剪胀率绝对值越小，围压不同时，破坏剪胀率随围压的增加其绝对值逐渐减小，且 3 种不同孔隙比的堆石料均与围压呈良好的幂函数关系：

$$\zeta_f = a_1(\sigma_3/p_a)^{b_1} \quad (4)$$

式中， a_1 和 b_1 均为拟合参数， p_a 为标准大气压。

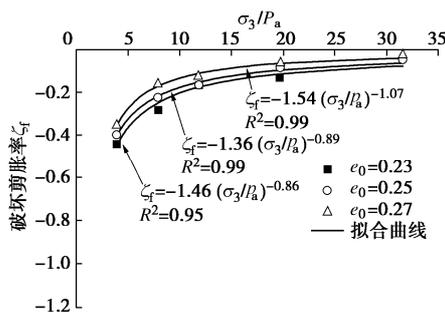


图 10 $\zeta_f - \sigma_3$ 关系曲线

Fig. 10 Relationship between ζ_f and σ_3

图 11 给出了堆石料初始孔隙比 e_0 与破坏剪胀率 ζ_f 的关系，二者之间呈良好的线性关系：

$$\zeta_f = a_2 e_0 + b_2 \quad (5)$$

式中， a_2 ， b_2 均为拟合参数， e_0 为初始孔隙比。

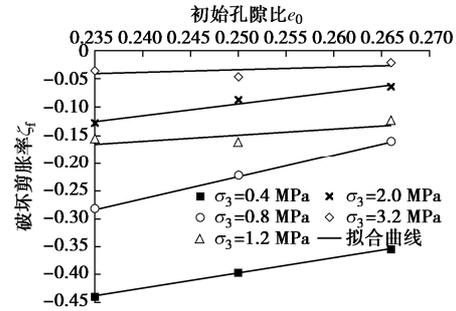


图 11 $\zeta_f - e_0$ 关系曲线

Fig. 11 Relationship between ζ_f and e_0

图 11 给出了初始孔隙比与破坏剪胀率的关系，图 11 表明试验堆石料的初始孔隙比相同时，围压越大，破坏剪胀率绝对值越小，且拟合曲线斜率在逐渐减小；初始孔隙比不同时，初始孔隙比越小，其破坏剪胀率绝对值越大，剪胀性越大。就本次试验而言，当围压为 3.2 MPa 时，拟合曲线近乎和横坐标平行，说明围压越大，孔隙比对剪胀性的影响越小。

为验证式 (5)，选取岩性为弱风化英安岩的堆石料，开展初始孔隙比分别为 0.27，0.28，0.30，试验围压分别为 0.4，1.2，3.2 MPa 时的三轴剪切试验，将试验初始孔隙比 e_0 与破坏剪胀率 ζ_f 绘制于如图 12，并采用式 (5) 进行拟合。从图 12 中可以看出，当试验围压较低时拟合值与试验值差距较大，随着围压增大拟合值与试验值接近，且规律性与本文所得结论基本一致。围压较低时拟合效果较差的主要原因是，本文研究结论是基于颗粒破碎条件下开展的，低围压下堆石料的颗粒破碎较小，规律虽一致，但精度欠佳。

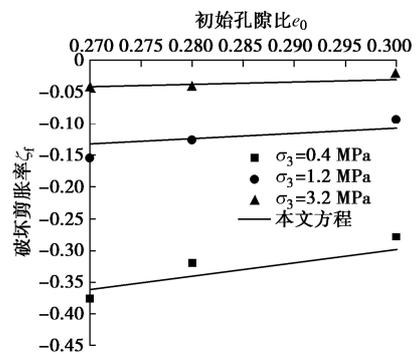


图 12 $\zeta_f - e_0$ 关系曲线

Fig. 12 Relationship between ζ_f and e_0

将式 (4) 和 (5) 合并，可以得到破坏剪胀率 ζ_f 与围压 σ_3 以及初始孔隙比 e_0 有如下关系：

$$\zeta_f = a + b(\sigma_3 / p_a)^c (e_0)^d, \quad (6)$$

式中, a , b , c , d 均为拟合参数。

针对本次试验堆石料, 利用式 (6) 进行非线性拟合得到 a , b , c 和 d 的参数值分别为 -232.0 , 232.1 , 0.0007 和 0.0022 。将拟合值与试验值绘制于图 13, 图中散点为试验数据, 光滑曲面为拟合曲面。从试验点在拟合曲面的分布上看, 式 (6) 能较好地反映剪胀性与初始孔隙比及围压的关系。因此, 对于给定级配的堆石料, 根据其初始孔隙比及试验围压, 可利用式 (6) 判断堆石料剪胀性。

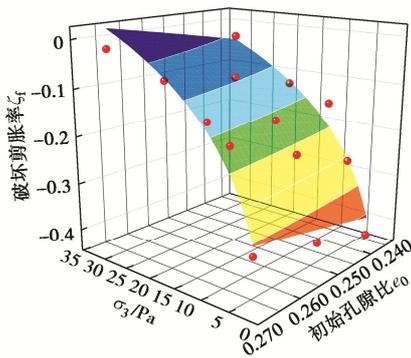


图 13 $\zeta_f - \sigma_3 - e_0$ 关系曲线

Fig. 13 Relationship among ζ_f , σ_3 and e_0

3 结 论

通过大型三轴剪切试验, 研究了不同孔隙比和不同应力状态下堆石料的剪胀特性及其影响因素, 得到如下 3 点结论。

(1) 相同孔隙比条件下的堆石料在低围压下表现为剪胀, 高围压时表现为剪缩; 围压相同时, 堆石料孔隙比越小, 其达到相变点时的轴向应变越小。

(2) 堆石料相变应力比随围压的增大而减小, 围压相同时, 孔隙比越小, 相变应力比大; 建议的表达式 $M_{pt} = 2.35(p_a/p)^{0.08}$ 可用于预测不同高围压下堆石料的相变应力比。

(3) 破坏剪胀率的绝对值随围压和堆石料颗粒破碎率的增加呈幂函数规律减小, 而破坏剪胀率与堆石料的初始孔隙比则呈线性关系, 围压越大初始孔隙比对剪胀性的影响越小; 建议的破坏剪胀率计算表达式 $\zeta_f = a + b(\sigma_3 / p_a)^c (e_0)^d$ 可用于判断已知孔隙比的堆石料在某试验围压下的剪胀特性。

上述结论是仅基于一种岩性堆石料试验结果得到的, 其对不同岩性堆石料的普遍适用性还有待进一步验证。

致 谢: 本文撰写及修订过程中, 得到了南京水利科学研究院

陈生水正高级工程师提供的帮助和指导, 在此诚恳致谢。

参考文献:

- [1] 石北啸, 蔡正银, 陈生水. 温度变化对堆石料变形影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 2): 299 - 305. (SHI Bei-xiao, CAI Zheng-yin, CHEN Sheng-shui. Experiments on influence of temperature on deformation of rock fills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 299 - 305. (in Chinese))
- [2] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineering, 1972, **98**(1): 95 - 114.
- [3] WAN R G, GUO R G. A pressure and density dependent dilatancy model for granular materials[J]. Journal of Engineering, 1999, **39**(6): 1 - 12.
- [4] YANG J, LI X S. State-dependent strength of sands from the perspective of unified modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, **130**(2): 186 - 198.
- [5] 徐卫卫, 石北啸, 陈生水, 等. 孔隙率对堆石料强度与变形的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 47 - 52. (XU Wei-wei, SHI Bei-xiao, CHEN Sheng-shui, et al. Effects of porosity on strength and deformation of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 47 - 52. (in Chinese))
- [6] 王 峰. 考虑颗粒破碎的堆石料级配演化和变形特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. (WANG Feng. Study on Grading Evolution and Deformation of Rockfill Materials Considering Particle Breakage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [7] 凌 华, 傅 华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 1): 12 - 16. (LING Hua, FU Hua, HAN Hua-qiang. Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 12 - 16. (in Chinese))
- [8] 王子寒, 周 健, 赵振平, 等. 粗粒土强度特性及颗粒破碎试验研究[J]. 工业建筑, 2013, **43**(8): 90 - 93, 14. (WANG Zi-han, ZHOU Jian, ZHAO Zhen-ping, et al. Experimental study on strength and crushing behavior of coarse-grained soil[J]. Industrial Construction, 2013, **43**(8): 90 - 93, 14. (in Chinese))

- [9] 郭万里, 朱俊高, 彭文明. 粗粒土的剪胀方程及广义塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(6): 1103 - 1110. (GUO Wan-li, ZHU Jun-gao, PENG Wen-ming. Dilatancy equation and generalized plastic constitutive model for coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(6): 1103 - 1110. (in Chinese))
- [10] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(10): 1575 - 1580. (QIN Hong-yu, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(10): 1575 - 1580. (in Chinese))
- [11] 褚福永, 朱俊高, 殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土剪胀性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2249 - 2254. (ZHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, YIN Jian-hua, et al. Study of dilatancy behaviors of coarse-grained soils in large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(8): 2249 - 2254. (in Chinese))
- [12] 陈晓斌. 红砂岩粗粒土剪胀效应大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 3145 - 3149. (CHEN Xiao-bin. Study of dilatancy effect of Redstone coarse grained soil by large scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3145 - 3149. (in Chinese))
- [13] 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. Influences of density and confining pressure on mechanical properties for coarse grained soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(8): 46 - 50. (in Chinese))
- [14] 陈守义. 各向异性线弹性体的剪胀与压斜[J]. 岩土力学, 1990, **11**(1): 41 - 50. (CHEN Shou-yi. Shearing dilatancy and isostatic deformity of anisotropic linear elastic material[J]. Rock & Soil Mechanics, 1990, **11**(1): 41 - 50. (in Chinese))
- [15] 土工试验方法标准: SL237—2019[S]. 2019. (Standard for Soil Test Method: SL237—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [16] 日本土质工学会. 粗粒土的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (Soil Engineering Society of Japan. Field Compaction of Coarse Materials[M]. GUO Xi-ling, WEN Dan, trans. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [17] MANZARI M T, DAFALIAS Y F. A critical state two-surface plasticity model for sands[J]. Géotechnique, 1997, **47**(2): 255 - 272.
- [18] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [19] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 205 - 211. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 205 - 211. (in Chinese))