

DOI: 10.11779/CJGE2016S2049

# 温度变化对堆石料变形影响的试验研究

石北啸<sup>1, 2</sup>, 蔡正银<sup>1, 2</sup>, 陈生水<sup>1, 2</sup>

(1. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 高土石坝建设使用的填筑堆石料在外界温度变化时, 变形和力学特性会发生改变, 可能影响坝体长期变形。首次采用自主研发的大型劣化三轴仪, 通过低温、常温、高温及不同温度循环次数下的堆石料流变试验, 研究温度对堆石料强度和变形的影响规律。试验发现: 堆石料的流变变形受温度影响较大, 温度升高, 流变量减小, 温度降低, 流变量增大; 经历温度循环次数越多, 最终轴向及体积流变量越大。随着流变过程中试样温度的增加, 轴向最终流变量呈减小趋势, 随着冷却或增热次数增加, 轴向和体积变形均呈逐渐减小的趋势。分析认为, 温度循环造成堆石料一定程度上的损伤, 导致其颗粒强度降低, 变形量增大, 经历多次温度循环后堆石料内部颗粒的劣化已经完成, 变形基本不在明显。

**关键词:** 高土石坝; 堆石料; 流变; 温度

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0299-07

作者简介: 石北啸(1976-), 男, 副教授, 主要从事粗粒料力学特性等方面的科研工作。E-mail: shibexiao@nhri.cn。

## Experiments on influence of temperature on deformation of rock fills

SHI Bei-xiao<sup>1, 2</sup>, CAI Zheng-yin<sup>1, 2</sup>, CHEN Sheng-shui<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing

210024, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The deformation and mechanical characteristics of rock fills in the construction of high earth-rock dams will be changed along with the temperature, which directly affect the deformation and safety of the dams. Through rheological tests on the rock fills under high, normal or low temperatures and different temperature cycle times by using the large degradation triaxial instrument, the effect of temperature on the strength and deformation of the rock fills is studied. The conclusion is drawn as follows: the deformation of rock fills is influenced by the temperature, the deformation decreases when the temperature increases, and the more the temperature cycle times, the higher the final axial deformation. Along with the increase of the temperature in rheological tests, the final axial deformation decreased, with the increase of the number of cooling or heating, and the final axial and volumetric deformations decrease. It is believed that the temperature cycle has a certain degree of damage to the rock fills, resulting in the decrease of the particle strength and the increase of the deformation, and the deformation is not obvious until the degradation of rock fills is completed after many times of the temperature cycle.

**Key words:** earth-rock dam; rock fill; rheology; temperature

## 0 引言

中国已建或在建的 9.8 万多座水库大坝中 90%以上为土石坝, 随着水资源开发的逐步推进, 一批主要由堆石料构筑而成的高土石坝正在中国西南、西北、东北等地区建设或即将开工建设, 这些高土石坝受当地筑坝材料的限制, 坝体部分材料不得不使用软岩或弱风化岩筑坝, 同时, 工程所在区域环境条件恶劣, 如年度内或昼夜温差大, 极寒或高温地区坝体冻融现象频现, 库水位大幅波动等, 容易导致其强度变形性质发生劣化, 宏观上表现为坝体产生的附加后期变形增大, 而过大的后期变形极易造成土石坝面板产生裂

缝, 对土石坝的长期安全性产生不利影响。内外大量已建土石坝安全监测资料显示, 堆石料具有长期变形的性质, 后期变形至稳定可能要持续几年、十几年甚至更长。如 1989 年中国建成的第一座面板堆石坝—西北口面板堆石坝, 运行 7 年后坝体仍产生较大的变形<sup>[1]</sup>。1971 建成的澳大利亚塞沙那 (Cethana) 坝运行 10 年后仍在沉降<sup>[2]</sup>。土石坝后期变形一般约为坝高的 0.1%。

基金项目: 水利部公益行业科研专项项目 (201501033); 中国博士后科学基金项目 (2015M581833); 南京水利科学研究院博士后基金项目 (BH31401)

收稿日期: 2016-05-19

但有些坝的后期变形较大,如天生桥面板堆石坝蓄水后陆续下沉量超过 1 m,蓄水 2 年后沉降达到最大坝高的 1.9%;中国高的西北面板坝,观测沉降最大的点在施工完成时的沉降为 36 cm,8 年后的沉降发展到 66 cm,堆石的工后变形量相当大<sup>[1]</sup>;巴西阿里亚坝实测的最大沉降量达到坝高的 2.36%<sup>[3]</sup>;土耳其 Ataturk 心墙堆石坝竣工后坝顶沉降达 2.5 m,坝体最大沉降达 7 m<sup>[4]</sup>。

众多研究学者逐渐意识到,堆石料除在浸水湿化或稳定荷载下发生长期流变变形外,大坝建设过程及正常使用期间,经历风吹雨淋、水位波动、干湿循环甚至地震动力荷载等外界环境作用,都会对堆石料的变形产生影响。Alberto 等<sup>[5]</sup>曾对经过 25 a 天然风化(水位波动和温度变化等)的玄武岩堆石料进行大型三轴和直剪试验,研究大坝护坡玄武岩堆石料的天然风化情况。Castellanza 等<sup>[6]</sup>将试样置于侧限压缩仪中施加一定的竖向荷载,在恒定荷载作用下从试样底部注入酸性溶液,观察试验用料的劣化及竖向变形,研究风化作用对易风化碳酸盐岩力学性质的影响。张丹和李广信等<sup>[7-9]</sup>进行了软岩粗粒土的增湿及干湿循环试验研究,研究结果表明,软岩粗粒土在初次增湿时产生很大的变形,但是在若干次的干湿循环后,试样的增湿变形逐渐变小;而试样在减湿过程中,除初次减湿产生明显的变形外,在反复的干湿循环过程中,减湿变形一直很明显,并成为长期干湿循环变形的主要部分。王海俊等<sup>[10]</sup>在常规三轴试验仪上研究了干湿循环对堆石料长期变形特性的影响,认为干湿循环作用引起的长期变形非常明显,对于坝体安全和稳定的影响不容忽视。并根据试验研究揭示的变形规律,建立了相应的计算干湿循环变形的数值模型。丁艳辉等<sup>[11]</sup>用模拟降雨入渗的方法控制堆石体的湿化饱和度,进行了侧限压缩条件下堆石体的非饱和湿化试验,认为只有小孔隙吸附水才是有效湿化含水率,堆石体的湿化变形主要发生在小含水率湿化阶段。孙国亮等<sup>[12-13]</sup>探讨了干湿、冷热循环作用下堆石料的力学性质,试验表明,干湿循环和湿冷-干热耦合循环均可导致堆石体产生较大幅度的附加变形,其变形机制包括湿化变形、堆石体颗粒湿胀和干缩循环变形以及堆石料的劣化变形等。并认为环境因素的循环变化可导致堆石体颗粒的劣化,堆石体劣化变形是高土石坝后期变形的重要组成部分。

## 1 坝体上游堆石料的温度影响分区

土石坝坝体不同部位的堆石料所处环境不同,在运行期内受库水位波动、降雨入渗与蒸发等作用的影

响,其所处环境也会有所变化。以心墙堆石坝为例(见图 1 所示),处在坝体上游浅表层的堆石区,可分为 3 个不同区域,堆石①区,因库水位的涨落而处于干燥到湿润再到饱和的波动状态,堆石料温度受外界环境变化影响明显;堆石②区虽位于浸润线以上,但受降雨入渗和日照蒸发的外界环境影响,也会出现干燥和饱和的不同状态,且外界温度变化对其影响颇为显著;堆石③区因长期位于浸润线以下,始终处于饱和状态,随水库内水温的变化也会有温度的缓慢升降过程。

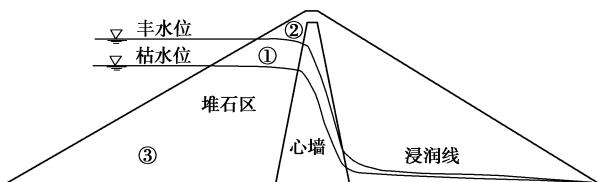


图 1 心墙堆石坝环境影响分区图

Fig. 1 Zoning of environmental impact for core wall rockfill dam

处于坝体中的堆石料长期处于流变的非稳定状态,而其流变量和流变速率在夏季和冬季是否发生变化,历经多年夏季高温到冬季低温的温度循环后,堆石料的强度和变形情况如何,这些都会对坝体的长期变形稳定造成影响,而该方面的研究工作因缺乏相应的试验设备和耗时长等条件限制很少有人涉足。采用大型劣化三轴仪,研究在一定应力状态下堆石料变形的温度效应,寻求温度变化引起的堆石料强度和变形规律,在保障大坝建设施工和运营期内的坝体长期变形稳定方面具有重要意义。

## 2 试验设备及方法

国内专家张丙印等<sup>[13]</sup>在大型压缩仪上改造成功堆石料风化仪,并进行了温度循环条件下堆石料变形特性研究,为堆石料温度循环变形特性研究提供了很好的研究思路,但该设备试样尺寸较小,直径仅为 150 mm,高度 150 mm,尺寸效应明显,且无法施加周围压力和准确获知试样的即时温度。

温度变化对堆石料强度和变形影响试验在南京水利科学研究院筑坝材料试验中心进行,该院自行研制成功的大型劣化仪及其控制系统见图 2 所示。该劣化仪采用私服电机带动 4 根滚珠丝杠进行轴向加载,围压加载也采用私服电机自动控制,控制精度分别为:轴向 0.05 kN,围压: 0.1 kPa,轴向位移 0.003 mm,体变量测精度为 1 mL,可在固定围压和应力水平下进行流变试验 60 d 以上。试样尺寸为: 直径 300 mm,高度 700 mm。

为实现堆石料在固定围压和一定应力水平下的温度循环,并准确获知堆石料试样温度,针对饱和试样

的固定温度和温度循环条件下的堆石料三轴试验, 在原有大型劣化仪的设计基础上稍加改造, 增加水加热(冷却)箱及其循环控制系统, 将固定温度的水在较小的固定压力下从试样底部送入, 从试样顶部流出后进入循环加热(冷却)箱, 冷却或加热后再次输送, 通过水体与堆石料颗粒的直接接触来冷却或加热试样, 试样两端透水板上土工布的阻挡作用, 试样中的细颗粒并未被带走流失, 采集进水口和出水口的水温即可知试样温度。



图 2 大型劣化三轴仪及其控制系统

Fig. 2 Large degradation triaxial instrument and control system

采用该设计方法进行堆石料的温度循环试验, 试样密度和应力水平均较低时, 可在几个小时内实现试样 10℃~40℃之间的一个温度循环过程。根据该方法设计的试样温度变化设计曲线见图 3 所示, 实际进行温度变化试验时, 为检验试样在达到设计温度后的稳定性, 当试样温度达到设计温度后并未马上进行升温或降温, 试验中试样温度随时间变化曲线见图 4。从该曲线上看, 在固定围压和应力水平下, 试样温度从常温降低到 10℃, 温度从 10℃上升到 40℃后回到常温, 一个过程所需时间约为 6 h, 并且, 温度达到某一设定值后可以持续保持试样恒温, 便于进行堆石料在某温度或温度多次循环后的流变试验。

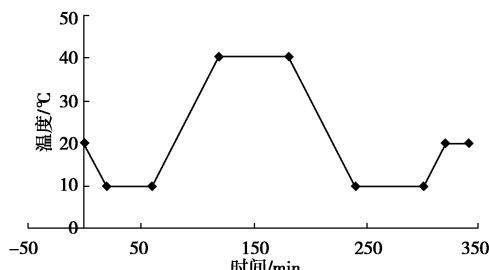


图 3 试样温度变化设计曲线

Fig. 3 Designed curve of temperature change

诚然, 因围压和应力水平较低时, 堆石料试样内部孔隙较多, 自由水流动和温度循环速度较快, 随围压和应力水平的提高, 流变时间越长, 试样越来越密实, 内部孔隙越来越少, 温度循环速度会变慢, 且随着循环次数增加, 循环速度也会逐渐变慢。

为研究不同温度下堆石料的剪切强度和流变变形特征, 不同温度循环次数后强度及流变变形特征, 从

某高土石坝料场采样得到的弱卸荷英安岩, 按照一定的设计级配缩尺后进行大型三轴试验级配设计, 试验级配及缩尺后的试验级配曲线见图 5。

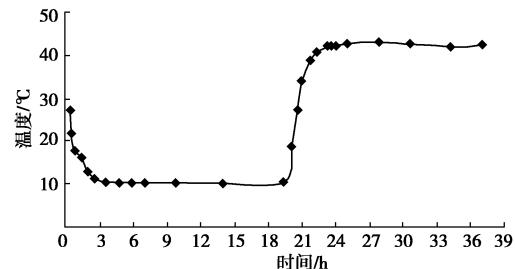


图 4 试样温度变化曲线

Fig. 4 Change curve of temperature

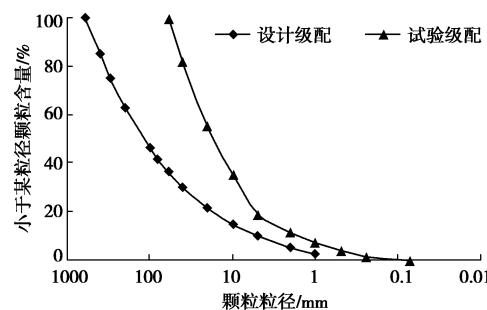


图 5 试验堆石料的级配曲线

Fig. 5 Grading curves of aggregate

将不同粒径堆石颗粒按设计级配称重后充分混合均匀, 分 5 层填装制样并击实, 控制试样干密度为 2.17 g/cm<sup>3</sup>。本次试验设计为围压 400 kPa 条件下的饱和堆石料试样三轴直接剪切试验, 应力水平均为 0.4 的 10℃, 20℃, 40℃ 温度下的流变后剪切试验, 从 10℃~40℃~10℃ 温度循环 1 次、循环 3 次的流变后剪切试验, 共进行 6 个温度引起堆石料变形特性的大型三轴试验, 各试验中的三轴剪切均为固结完成后的排水剪切试验, 试验完成后晾晒并进行筛分。试验过程严格按照《土工试验规程》(SL237—1999) 的规定执行。

为防止温度改变导致各量测数据失真, 试验失败, 对大型劣化三轴仪上所使用的各测量传感器, 如围压传感器、荷重传感器、千分位移传感器等仪器的温度效应进行标定, 并在进行体积变形计算时, 计入不同温度下三轴压力室的体积变形, 水的体积膨胀系数等, 尽量从技术上做到消除或避免测量系统的误差。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 温度对堆石料强度的影响

在固定围压和应力水平下, 堆石料经历流变的颗粒翻转、压密过程, 颗粒之间接触点增多, 孔隙减小, 试样更加密实, 因此, 现有堆石料室内大型三轴试验结果均表明, 在一定应力水平下经过流变后的堆石料

峰值抗剪强度要比三轴剪切得到的峰值抗剪强度高。但堆石料在不同温度下流变稳定后的剪切峰值强度是否有变化，并未见研究报道。为此，进行了20℃条件下的堆石料三轴剪切、10℃流变，20℃流变，40℃流变和温度循环1次、循环3次，在围压400kPa和应力水平0.4条件下流变稳定后剪切的峰值强度统计，结果可见图6所示。

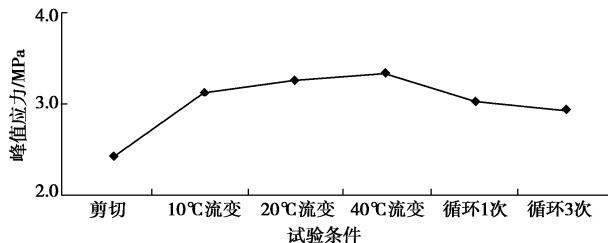


图6 不同试验条件下的峰值强度

Fig. 6 Peak strengths under different test conditions

从峰值强度上看，各温度下堆石料流变稳定后再剪切得到的峰值抗剪强度均比三轴直接剪切峰值强度高，随着试样温度的升高，试样流变稳定后剪切强度增加，但经历温度循环后峰值剪切强度明显降低，且随着循环次数增加，峰值强度逐渐降低。由此可以看出，温度对堆石料的强度影响明显，且温度循环变化会导致堆石料颗粒强度衰减，循环次数越多衰减越明显。

堆石料的各组成颗粒在温度升高后都会有热胀效应，颗粒越大体积膨胀明显，可以认为温度升高造成的颗粒体积膨胀改变了原来的试验级配，即所有颗粒的粒径均比原来试验级配中的颗粒粒径稍大。另外，经过流变后的堆石料孔隙率本来就已经比未经过流变的堆石料孔隙率低，各颗粒之间的接触更紧密，在固定围压和应力水平下，受热膨胀后各颗粒接触点增多，在剪应力作用下，尤其是大颗粒之间更容易接触和挤压，因此，宏观上表现出峰值抗剪强度的提高。

### 3.2 温度对堆石料轴向变形的影响

对温度循环3次试验中的每次冷却和加热过程轴向流变量进行统计，结果见图7所示。从图上看，制冷过程轴向流变量明显增大，而加热时轴向流变量则变为负值，说明堆石料试样在流变过程中逐渐密实，但受热后堆石料颗粒会膨胀，流变量减小。另外，从冷却和加热不同次数来看，随着循环次数的增加，制冷造成的轴向流变量增加和加热形成的轴向流变量减小，均呈逐渐降低的趋势。

对比不同温度下轴向流变量、温度循环1次和3次后的轴向流变量（见图8），随温度升高，最终轴向流变量逐渐减小，说明堆石料随温度升高而出现体积膨胀，轴向上的变形量也就明显变小。温度循环后流

变量明显增加，且循环次数越多越明显。这主要是因为温度的反复循环导致强度较弱或棱角较尖锐的堆石料颗粒破碎，加之围压和应力作用下堆石料各颗粒之间接触越来越紧密，造成堆石料轴向流变量逐渐增大。



图7 冷却和加热时的轴向流变量

Fig. 7 Axial flows during cooling and heating

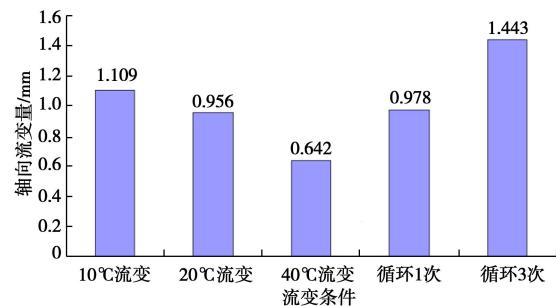


图8 不同试验条件下的轴向流变量

Fig. 8 Axial flows under different test conditions

整理温度循环3次流变稳定后剪切试验的轴向变形和温度曲线见图9所示，从图上可以看出，轴向变形随温度循环而呈规律性变化，总体表现为：温度升高，轴向变形减小，温度降低，轴向变形增大；循环次数越多，轴向变形的增大幅度和绝对变化量越小。正是因为堆石料颗粒的热胀冷缩效应，导致轴向变形量随温度的规律性变化，但由于温度循环的持续，造成的颗粒破碎未停止，轴向变形量仍持续增加，但随着循环次数的增加，堆石料颗粒破碎量逐渐减小，并逐渐趋于相对稳定后，轴向变形将不再显著增加。

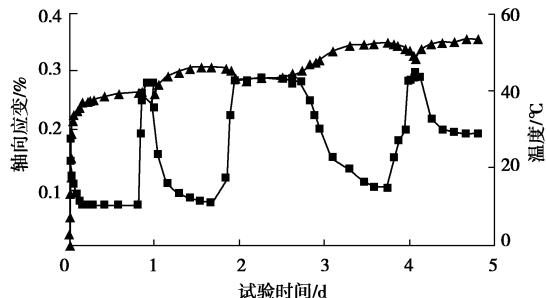


图9 轴向变形及温度曲线

Fig. 9 Axial deformations and temperature curves

### 3.3 温度对堆石料体积变形的影响

从温度对堆石料轴向变形的影响分析来看，温度

升高会导致堆石料的膨胀, 轴向变形减小, 因此, 必然会引起堆石料试样的体积膨胀。堆石料在固定围压和应力水平下的流变试验, 可以通过试样的排水量计算出试样的体积变形, 整理堆石料 3 次温度循环试验过程中的试样体积变形和温度变化曲线见图 10 所示。

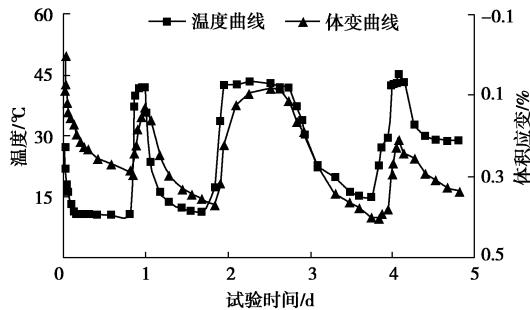


图 10 体积变形和温度曲线

Fig. 10 Volume deformations and temperature curves

图 10 可见, 试样的体积变化和温度变化规律基本一致, 即: 温度降低, 试样体积收缩变形增大, 温度升高, 试样发生体积膨胀, 但流变过程中的总体趋势依然是试样体积不断减小。对冷却和加热时堆石料的体积变形进行分析(见图 11)可以看出, 堆石料体积变形的热胀冷缩效应非常明显, 且随温度循环次数的增加逐渐减弱。

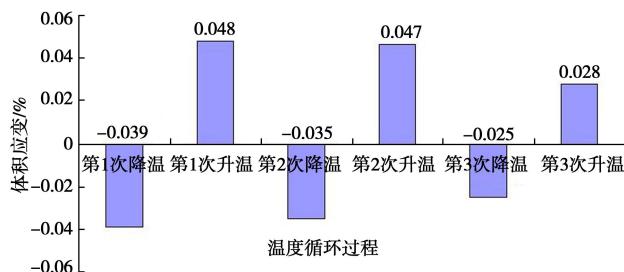


图 11 冷却和加热时的体积流变量

Fig. 11 Volume flows during cooling and heating

将相同应力水平条件下常规流变和温度循环 3 次流变试验的轴向变形和体积变形曲线分别绘制在同一图上对比分析(见图 12), 从图 12 可以看出, 在围压 400 kPa, 应力水平 0.4 条件下, 常规流变试验经过大致 3 d 时间, 轴向和体积变形基本稳定, 可以认为流变过程结束。而经历温度循环时轴向和体积变形都随温度有较大幅度的变动, 且 3 次温度循环后的轴向和体积变形趋势仍非常明显, 流变稳定时间明显比未经历温度循环时要长; 另外, 从图上还可以明显看出, 温度循环后的体积和轴向最终流变量会比常温下的体积和轴向变形量大。

堆石料流变的主要机理是高接触应力造成颗粒破碎和重新排列, 应力释放、颗粒位置调整和转移压密的循环过程, 只有当外界环境作用下颗粒不再发生破

碎而只有重新排列时, 堆石料才会慢慢趋近于较高的密实度和较小的孔隙比, 颗粒重新排列阶段的变形量较小而且比较平稳, 堆石体变形增量也表现出逐渐减小并趋于相对静止的趋势, 这个过程需要相当长的时间才能完成。可见, 堆石料的颗粒破碎对其流变过程的影响非常大, 只有颗粒不再破碎, 堆石料的流变过程才会基本平稳并趋于相对静止。

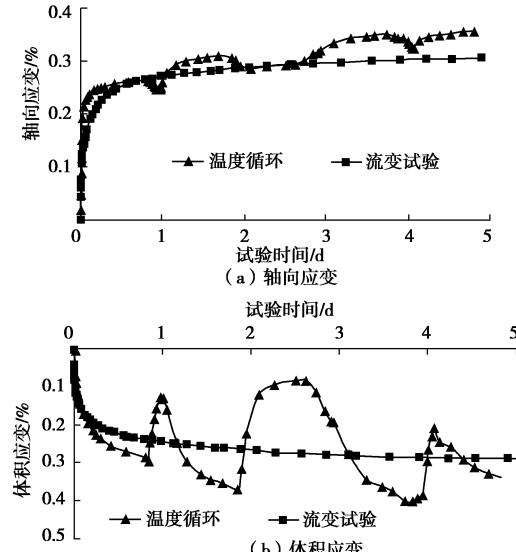


图 12 常温及温度循环时的流变变形

Fig. 12 Rheological deformations under normal temperature and temperature cycles

对常温、温度循环 1 次和温度循环 3 次条件下堆石料的颗粒破碎情况进行统计, 采用 Marsal 研究 Mica Dam 堆石料时建议的指标  $B_g$  描述颗粒破碎程度。即: 计算各粒组试验前后含量的差值  $\Delta W_k$ , 取所有正值的和作为颗粒破碎率  $B_g$ , 用百分数表示, 计算公式为

$$B_g = \sum \Delta W_k = \sum (W_{ki} - W_{kf}) \quad (1)$$

式中,  $W_{ki}$  为试验前某一级配粒组的含量,  $W_{kf}$  为试验后对应级配粒组的含量。

其结果见图 13 所示, 从图上可以明显看出, 经过温度循环后颗粒破碎率比常温下流变后的颗粒破碎率高; 温度循环次数越多, 颗粒破碎率越高, 表明温度循环造成了堆石料颗粒的劣化破碎。

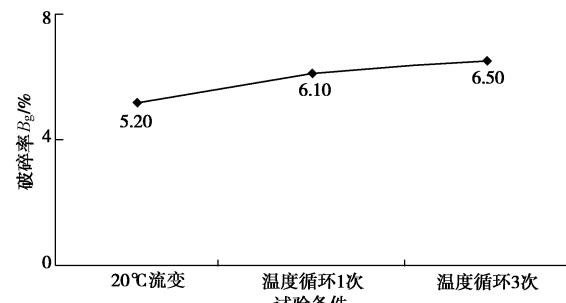


图 13 不同试验条件下的颗粒破碎率

Fig. 13 Particle breakage rates under different test conditions

流变过程中棱角较为明显的颗粒因高接触应力而易于破碎，较大颗粒又因自身缺陷，如微裂隙、空洞等的存在，在温度循环过程中受温度的影响而扩大、张开或缩小、闭合，导致大颗粒沿着微裂隙或空洞形成的薄弱面开裂，因此，温度循环后的颗粒破碎率增加。

从以上温度对堆石料强度和变形试验结果来看，温度的改变会影响堆石料的峰值抗剪强度；温度循环造成的堆石料颗粒破碎，对流变后的轴向和体积变形影响较大。无论是轴向变形还是体积变形，均随温度呈规律性变化：温度升高，变形量减小，温度降低，变形量增大。从每次由冷到热、由热到冷来看，随着冷却或增热次数增加，轴向和体积变形均呈逐渐减小的趋势，由此可以认为经历多次温度循环后，堆石料内部颗粒的劣化破碎基本完成后，流变变形将逐渐趋于相对稳定，因此，建议在进行堆石料室内流变试验时，应考虑流变量的温度效应，并根据工程实际情况，以多次温度循环后的流变量进行流变参数的整理。

## 4 结 论

通过多个不同温度和温度循环条件下的堆石料流变试验，对温度引起的堆石料变形进行分析，主要得到如下结论：

(1)首次采用大型三轴劣化仪对温度引起的堆石料变形问题进行研究，不同温度条件下流变后的剪切试验表明，温度会影响堆石料的峰值抗剪强度，堆石料强度随温度的升高而增大，但经历温度循环后的强度衰减明显，且循环次数越多越明显。

(2)堆石料的流变变形受温度影响较大，温度升高，轴向流变量减小，体积变形量增加，温度降低，轴向流变量增大，体积变形量减小；经历温度循环后的轴向和体积流变量均比未经历温度循环的流变量大，稳定时间延长，且循环次数越多，越明显；流变量随温度循环次数增加而逐渐减小，并最终趋于稳定。

(3)温度循环导致颗粒强度逐渐劣化而易于破碎，颗粒破碎率随温度循环次数的增加而逐渐增大，并导致堆石料的轴向和体积流变量均随温度循环次数的增加而增大，流变至基本稳定的时间明显延长。

(4)因温度对堆石料的流变变形影响较为明显，建议在进行堆石料流变试验时，应该考虑流变量的温度效应，以多次温度循环并流变稳定的流变量进行流变参数的整理更为科学。

需要指出的是，本次试验温度循环次数较少，且因堆石料级配、密度和母岩岩性等差别较大，上述结论仅是采用的弱风化英安岩在固定级配和密度条件下

的研究结果，其强度、变形和颗粒破碎等规律的普适性仍需大量试验验证。

## 参 考 文 献：

- [1] 彭正光. 西北面板堆石现蓄水 7 年变形分析[J]. 水利水电技术, 1999, 30(9): 24 - 27. (PENG Zheng-guang. Deformation analysis of 7 years of water storage in the northwest of China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(9): 24 - 27. (in Chinese))
- [2] MARANDA DAS N E, Advances in rockfill structure[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3] 杨 键. 天生桥一级水电站面板堆石坝沉降分析[J]. 云南水力发电, 2001, 17(2): 59 - 63. (YANG Jian. Settlement analysis of concrete face rockfill dam of Tianshengqiao Hydropower Station[J]. Yunnan Water Power, 2001, 17(2): 59 - 63. (in Chinese))
- [4] CETIN H, LAMAN M, ERTUNC A. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey[J]. Engineering Geological, 2000, 56(3): 225 - 242.
- [5] ALBERTO S F J, SAY O, PAULO C A, et al. Considerations on the shear strength behavior of weathered rock fills[C]// Committee for the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16th ICSMGE). Osaka, 2005.
- [6] Riccardo Castellanza and Roberto Nova. Oedometric tests on artificially weathered carbonatite soft rocks[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2004, 130(7): 728 - 739.
- [7] 张 丹. 软岩粗粒土的增湿及干湿循环试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2006. (ZHANG Dan. Study of moistening and wetting-drying experiment of coarse-grained weak rock[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese))
- [8] 张 丹, 李广信, 张其光. 软岩粗粒土增湿变形特性研究 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 52 - 55. (ZHANG Dan, LI Guang-xin, ZHANG Qi-guang. Research on moistening test of coarse-grained soil with weak rock[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2): 52 - 55. (in Chinese))
- [9] LI Guang-xin, ZHANG Dan, HANG Qi-gong. Test research on deformation of coarse-grained soil with weak rock due to wetting-drying cycle[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams. Nanjing, 2008: 122 - 126.

- [10] 王海俊, 殷宗泽. 堆石料长期变形的室内试验研究[J]. 水利学报, 2007, **38**(8): 914 – 919. (WANG Hai-jun, YIN Zong-zei. Experimental study on deformation of rockfill material due to long term cyclic wetting-drying[J]. SHUILI XUEBAO, 2007, **38**(8): 914 – 919. (in Chinese))
- [11] 丁艳辉, 袁会娜, 张丙印. 堆石料非饱和湿化变形特性试验研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(9): 139 – 144. (DING Yan-hui, YUAN Hui-na, ZHANG Bing-yin. Unsaturated wetting deformation characteristics of rockfill materials[J]. Engineering mechanics, 2013, **30**(9): 139 – 144. (in Chinese))
- [12] 孙国亮, 张丙印, 张其光, 等. 不同环境条件下堆石料变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1413 – 1420. (SUN Guo-liang, ZHANG Bing-yin, ZHANG Qi-guang. Experimental study of deformation characteristics of rockfill under different environmental conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1413 – 1420. (in Chinese))
- [13] 孙国亮. 堆石料风化过程中的抗剪强度和变形特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (SUN Guo-liang. Studies on shear strength and deformation characteristics of rockfill During Weathering[D]. Beijing: Tsinghua, 2009. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)