

# 堆石料的劣化变形和本构模型

张丙印<sup>1</sup>, 孙国亮<sup>1</sup>, 张宗亮<sup>2</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 利用新研制的大型堆石料风化试验仪, 对一典型泥质粉砂岩堆石料进行了荷载作用下干湿和温度耦合变化的风化试验。研究了在湿冷-干热耦合循环作用下堆石料颗粒的劣化机理, 分析了劣化过程所产生的堆石料变形的规律。试验结果表明: 湿冷-干热循环可使堆石料试样发生显著的劣化变形, 堆石料在自然环境中的劣化变形应是高堆石坝后期变形的重要组成部分。根据试验结果, 建立了可以描述堆石料劣化变形的4参数模型, 可采用初应变法进行有限元计算。

**关键词:** 风化; 堆石料; 劣化变形; 本构模型

中图分类号: TU43; TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)01-0098-06

作者简介: 张丙印(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土材料本构关系土石坝应力变形分析及环境岩土等方面的研究。E-mail: byzhang@mails.tsinghua.edu.cn

## Degrading deformation of rockfill materials and its constitutive model

ZHANG Bing-yin<sup>1</sup>, SUN Guo-liang<sup>1</sup>, ZHANG Zong-liang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Laboratory weathering tests on a loaded argillaceous siltstone rockfill are performed by use of a newly developed test apparatus. The degrading mechanism of rockfill particles and the degrading strain of rockfill materials under the coupled wetting-cooling and drying-heating cycles are investigated. The test results show that the coupled wetting-cooling and drying-heating cycles can induce a remarkable degrading strain for rockfill materials, therefore the degrading strain of rockfill materials owing to variation of natural environment conditions should be a main source of long-term deformation of a high rockfill dam. Based on the test results, a constitutive model for rockfill degrading with four parameters is established, which can be applied to the finite element analysis by the initial strain method.

**Key words:** weathering; rockfill material; degrading deformation; constitutive model

## 0 前 言

目前在我国一系列300 m级的超高堆石坝正在规划设计和建设中如糯扎渡(261.5 m)、两河口(292 m)、双江口(314 m)、古水(305 m)和其宗(352 m)等工程。由于这些工程规模浩大, 影响深远, 充分保证其安全性是进行工程建设的核心问题。高堆石坝建设的经验表明, 变形控制是高堆石坝工程的核心关键技术问题。对于安全余度相对较小的超高堆石坝变形控制难度显然会更大。

我国200 m级高堆石坝建设的经验表明, 后期变形是高堆石坝总体变形的重要构成部分, 同时也是经常对工程造成较大危害的变形。因此, 研究堆石坝后期变形的特性具有重要的工程实际意义。目前在堆石坝的变形计算中, 一般把堆石坝的后期变形归结为堆石料的浸水湿化变形和流变变形。其中尤其是对流变

变形发生的机理尚缺少深入的研究工作。

堆石坝总是由当地开采的堆石料填筑而成。强度高、压缩性小、工程性质长期稳定的材料通常是筑坝堆石料的首选。但在许多条件下, 一些易风化岩性的堆石料, 尤其是许多软岩料也被广泛应用于堆石坝的填筑。这些堆石料在坝体长期运行过程中, 由于水库蓄水位波动、降雨浸入、蒸发以及温度变化等都会发生力学性质的明显劣化, 也即风化(在本文中, 劣化指堆石料力学特性降低的过程, 风化指堆石料发生了明显的劣化)。另外, 堆石坝是当地材料坝, 填筑的堆石料需在当地开采, 因而会遇到各种岩性和状况的堆

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江重点项目(50639060); 国家自然科学基金项目(50879040); 国家973计划项目(2010CB732103)

收稿日期: 2008-11-04

石料, 难以仅用易风化或不风化进行简单区分。许多情况下需要对特定堆石料风化的难易程度及对力学特性的影响做出具体的评价。堆石料劣化过程会使坝体产生附加的后期变形, 对超高堆石坝的变形控制带来不利的影响。因而, 研究堆石料的劣化过程和劣化变形的规律是十分必要的。

本文利用新研制的大型堆石料风化试验仪, 对一典型泥质粉砂岩堆石料进行了荷载作用下干湿和温度耦合变化的风化试验, 研究了在湿冷-干热耦合循环作用下堆石料颗粒的劣化机理, 重点分析了由堆石料劣化过程所产生的堆石料变形的规律。

## 1 试验设备

堆石料的风化试验在新研制的大型堆石料风化试验仪<sup>[1]</sup>上进行。该设备的设计借鉴了大型压缩仪和大型直剪仪的结构特点, 并增加温度和干湿控制功能。试验仪器见图 1。

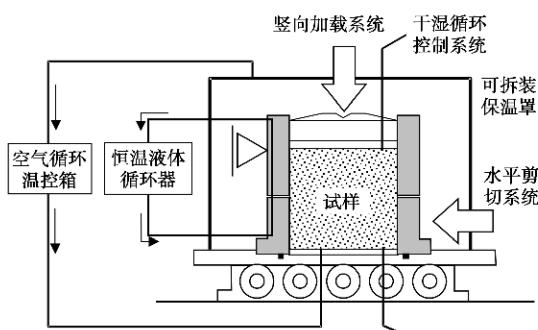


图 1 堆石料风化试验仪组成示意图

Fig. 1 Schematic view of weathering test apparatus for rockfill

(1) 竖向压缩仪系统。考虑到风化试验的周期较长, 为保证试验的稳定性, 选用了压缩仪的基本框架, 竖向荷载采取机械杠杆施加。试样尺寸直径  $f=15\text{ cm}$ 、高  $h=15\text{ cm}$ , 最大轴向荷载为 10 t, 对应竖向应力 5.5 MPa。

(2) 水平向直剪系统, 可在风化试验后直接就机测定试样的抗剪强度, 最大水平剪切力 100 kN。

(3) 冷热循环系统。采用加热(制冷)和保温一体化的温控系列措施, 实现对试样的快速冷热变化。在加热(制冷)方面, 一方面采用了冷热气体循环系统对试样内部进行快速均匀地变温; 另一方面, 采用高低温循环器使恒温的液体在试样侧壁中的U型套管内循环, 可使试样侧壁迅速达到所要求的高温或低温状态。试验结果证实, 采用上述的冷热循环系统, 可以很好地实现使试样在冷(10°C)和热(56°C)之间进行快速变化的控制要求。

(4) 干湿循环控制系统。通过位于试样上部的水

箱对试样进行浸水饱和。干燥时可将水从试样底部的排水孔排出, 再通过空气压缩机对试样进行风干。

有关试验仪器的详细情况见文献[1]。

## 2 试验概况及试验方法

应用新研制的大型堆石料风化试验仪, 对某高心墙堆石坝泥质粉砂岩堆石料进行了系列的劣化变形试验研究。试样尺寸为  $f=150\text{ mm}$ ,  $h=150\text{ mm}$ , 最大允许粒径为 30 mm。试样级配参照原始级配按照相似级配法和等量替代法进行了缩配。堆石料制样干密度为  $1.93\text{ g/cm}^3$ , 控制含水率为 1%。

堆石料的风化试验在给定的侧限压缩应力状态下进行。共进行了竖向应力分别为  $s_n=200, 600, 1000$  和  $1400\text{ kPa}$  四个应力状态的试验。

采用反复使受荷堆石料交替经历低温饱和状态和高温干燥状态的方法实现堆石料风化过程的加速。每顺次完成一次低温饱和状态和一次高温干燥状态称完成一次堆石料的湿冷-干热耦合循环。本文分别设定 10°C 和 56°C 为低温和高温状态。

试验时, 试样初始处于干燥和室温(一般约 20°C)状态。首先对试样施加所要求的竖向应力。为了消除流变变形的影响, 在施加竖向荷载后, 首先让试样进行充分的流变过程, 之后再进行相应的风化试验。该流变过程一般需要约 24~30 h。下文中的应变或变形均是指扣除了相应的荷载变形和流变变形后的附加部分。

通过水头饱和法完成浸水饱和状态, 同时对试样进行冷浴, 使试样温度降为 10°C。在试样饱和状态下, 降温的速度相对较快, 一般在 1 h 之内即可完成。通过排水和热浴相结合的方法使试样达到所要求的高温干燥状态。首先, 通过试样底部排水孔将试样孔隙中的自由水排出, 然后对试样通热风并进行热浴, 通风至出风口透明塑料软管上无水汽凝结后再通风 1 h 即可达到所要求的干热状态。

采用变形稳定作为结束低温饱和状态和高温干燥状态的控制条件。在本文的试验中以变形速率不超过  $0.01\text{ mm}/10\text{ min}$  作为控制标准。根据试验经验, 完成一个湿冷-干热耦合循环共需要约 7~8 h。

对每个应力点的试验分别进行了 0 次(不进行风化过程)、20 次、40 次和 70 次四种循环次数的试验, 共完成了 16 个湿冷-干热耦合循环试验, 试验完成后对每个试样进行了筛分, 以研究试验过程中颗粒的破碎情况。

## 3 堆石料劣化变形的试验规律

图 2 给出了 4 种法向应力下堆石料的竖向应变随

湿冷-干热耦合循环次数的变化关系。为了更细致的观察堆石料试样在湿冷-干热耦合循环过程中的变形过程,图3给出了法向应力 $\sigma_n=200\text{ kPa}$ 和 $1000\text{ kPa}$ 前10次湿冷-干热循环所得试样变形的局部图。

从图2可以看出,湿冷-干热耦合循环引起堆石料试样发生了较大幅度的变形。流变试验结果表明,试样在法向应力 $1.4\text{ MPa}$ 的作用下发生了约 $1.1\%$ 的瞬时竖向应变和 $0.48\%$ 的流变变形。而在法向应力为 $1.4\text{ MPa}$ 时相应70个湿冷-干热耦合循环使堆石料试样发生了约 $7.8\%$ 的竖向应变。这说明堆石料在环境因素作用下所发生的劣化变形不可忽视,可能是堆石坝发生后期变形的重要因素。

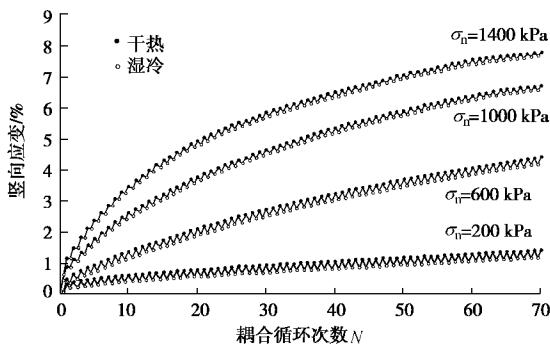


图2 竖向应变随循环次数关系曲线

Fig. 2 Relationship between vertical strain and cycle number

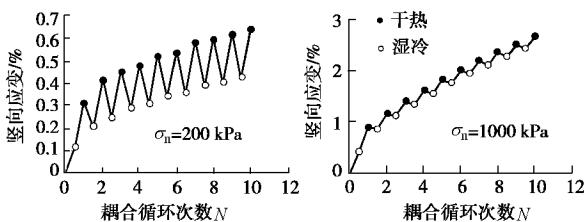


图3 竖向应变随循环次数细化图

Fig. 3 An enlarged view of relationship between vertical strain and cycle number

另由图2~4可见,试样的湿冷和干热过程对堆石料试样变形的影响是不同的。干热过程在整个试验过程中均使试样产生压缩变形。在开始阶段,单次干热过程的压缩变形相对较大,随着循环次数增加逐步减小,但在70个循环后,仍保持了一定的幅值。

试样的首次湿冷过程使试样产生了较大的压缩变形。从第二次湿冷过程开始,相反均会使试样产生一定的膨胀回弹变形,但前几次回弹变形较小。前几次湿冷过程产生压缩变形或回弹变形较小的原因,可认为是由于堆石料的初次湿化变形所致。在扣除初次湿化变形后,也可以认为试样在湿冷过程中总是产生回弹变形。试样在湿冷过程中发生回弹的原因,可能与本文试验所采用的泥质粉砂岩含有较多的黏土矿物有

关。

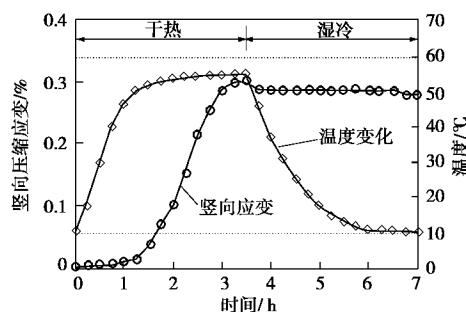


图4 典型湿冷-干热循环中的温度和应变

Fig. 4 Relationship among temperature, strain and time in a typical cycle

#### 4 堆石料劣化变形的发生机理分析

根据试验结果,竖向应变始终处于发展过程之中。这说明上述应变的产生,并不取决于堆石料试样所处的干热或湿冷的状态,而是和上述循环过程所导致的堆石料状态的改变(劣化)相关。

从作用机理上看,水与堆石料间物理和化学的相互作用以及温度变化所致堆石料颗粒的特性变化是干热-湿冷循环引起试样变形的内在原因。其中,物理作用包括,水可以使堆石料颗粒的接触部位发生润滑、使颗粒表层发生软化、热胀和冷缩等;化学作用包括水化、溶解、水解、碳酸化和氧化等。两种作用反复作用的结果可使堆石料颗粒表面发生软化、颗粒间发生滑移,反复多次地湿冷-干热循环还可使堆石料颗粒逐渐发生劣化甚至破碎。

本文所研究的堆石料是泥质粉砂岩,其含有较多的黏土矿物。黏土矿物具有显著的干缩湿胀特性。当黏土矿物遇水时,水渗入黏土矿物晶层之间,形成水膜夹层而引起晶格扩张,或者结合水膜加厚将固体颗粒楔开,使固体颗粒之间的距离增大,从而导致土体体积产生膨胀。在干燥过程中,土中结合水膜变薄或消失,楔力消除,粒间距离减小,从而导致体积的收缩。另外温度的升高,除可加速堆石料颗粒的蒸发干燥过程外,还可以蒸发出部分堆石颗粒表层的结晶水。

在堆石料的湿冷-干热循环交替过程中,其组成矿物的干缩湿胀以及热胀冷缩特性会使堆石料承受一个类似的加压和减压的往复荷载的作用,从而导致产生压缩变形的持续发展过程。

此外,在堆石料的湿冷-干热循环过程中,堆石颗粒本身也会发生不均匀的变形。因堆石料颗粒都或多或少的含有初始缺陷(微裂纹、微空洞等),这种反复地不均匀变形,会使得这些微裂隙逐步张开、扩大、加深和连通,从而破坏颗粒的完整性,同时又可为水

分的渗入和蒸发提供快速的通道, 进一步加速堆石料颗粒的劣化速度。这种循环作用最终可使颗粒强度降低, 发生破碎。这也是造成堆石试样变形持续增加的重要原因。

试验结果表明, 对所有竖向应力的试验, 在进行了 70 个湿冷 - 干热循环后, 堆石料试样都发生了可以观察到的十分明显的风化。图 5 给出了湿冷 - 干热耦合循环试验后大颗粒岩块的破損情况。可见颗粒发生了明显的破碎。



图 5 试验后岩块

Fig. 5 Photograph of rock particles after tests

为了具体考察堆石料试样随湿冷 - 干热循环次数劣化程度的变化过程, 对每个应力点对比分析了 0 次(不进行风化过程)、20 次、40 次和 70 次湿冷 - 干热循环试验的颗粒破碎情况。不同竖向应力下堆石料颗粒破碎率随循环次数的关系如图 6 所示。图中所采用的颗粒破碎度量指标是 Marsal 所定义的颗粒破碎率  $B_g$ , 即试验前后各粒组的质量含量差值的所有正值之和<sup>[2]</sup>。另外, 图中所示均为单纯由湿冷-干热循环过程所导致的破碎率。

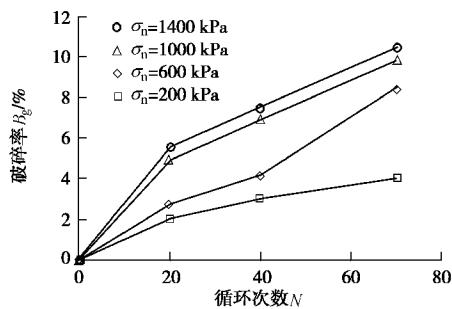


图 6 试验中破碎率的发展过程

Fig. 6 Evolution of breakage rate in the tests

从图 6 中可以看出, 四种法向应力下堆石料的颗粒破碎率随着循环次数的增加而增大。其中前 20 个循环的破碎率增长相对较快。表明堆石料的颗粒破碎是环境因素引起劣化变形的重要微观机制。

目前通常将高堆石坝后期变形中除湿化变形以外的部分归结为由堆石体流变产生。本文的试验结果表明, 堆石料在自然环境中劣化过程所导致的变形应是

高堆石坝后期变形的重要组成部分。环境因素的循环变化可导致堆石料颗粒的劣化, 并使堆石体产生不可忽视的变形。值得说明的是, 堆石料颗粒的劣化过程是缓慢逐步发生的, 完全风化仅是这种劣化过程的最终结果。在试验开始的最初阶段, 即使是本文试验所采用的较易风化的泥质粉砂岩, 也很难具体观察到堆石料的劣化, 但却可以量测到显著的劣化变形。

## 5 堆石料劣化变形的数学模型

在本文下面的分析中, 以试样处于干热状态的测点连线作为试样应变的试验结果, 不考虑其循环波动部分。

根据前述对试验结果和变形机理的分析, 可以认为, 试验所得的总竖向应变包括有湿化应变、堆石料颗粒往复干缩湿胀 - 热胀冷缩应变和颗粒劣化破碎应变等部分。目前, 湿化应变  $e_{wet}$  一般单独计算。后两项应变之和反映了堆石体在环境因素变化时发生的应变, 本文将其称为环境因素变化应变  $e_{wea}$ , 或简称劣化应变。因此, 试验所得总竖向应变  $e_{tot}$ ,

$$e_{tot} = e_{wet} + e_{wea} \quad (1)$$

劣化应变  $e_{wea}$  随试验循环次数  $N$  的增加逐步增加, 根据对试验结果的分析, 可以假定可通过下面的指数衰减函数来拟和,

$$e_{wea} = e_f [1 - e^{(-bN)}] \quad (2)$$

式中,  $e_f$  为该应力状态下堆石料劣化应变的最大值, 其大小与应力的大小相关。 $b$  可称为劣化指数, 为一反映堆石料劣化速度的系数, 其大小由堆石料岩性和环境因素变化的剧烈程度(如最大温度差等)相关。

湿化应变  $e_{wet}$  指的是初次充分浸水湿化所发生的变形。尽管本文试验的每次浸水时间比较长, 但在该时间内堆石料还是难于达到充分湿化, 根据对试验结果的分析, 可认为湿化应变一般发生在前 4~5 次浸水过程中。

试验所得试样的竖向应变包含劣化应变和湿化应变。可以采用最优拟合的方法, 根据式 (1)、(2) 具体将两者进行分离。图 7 以  $s_n=1400 \text{ kPa}$  试验结果为例, 图示了进行应变分离的方法。其中, 前 4~5 次浸水过程为湿化变形发生区, 其湿化应变的大小应根据试验拟合线和试验点的具体位置具体确定。表 1 给出了各试验初始段湿化变形的修正值和总湿化应变  $e_{wet}$  的拟合结果。

根据分离出的劣化应变的试验结果, 采用式 (2) 进行拟合可以得到各压力下的最大劣化应变  $e_f$  和劣化指数  $b$ 。当  $s_n=200, 600, 1000$  和  $1400 \text{ kPa}$  时,  $b$  值分别为 0.028, 0.029, 0.03 和 0.032, 其平均值为 0.0297。

可见,  $b$  基本不随竖向应力变化, 可近似为一试验常数。

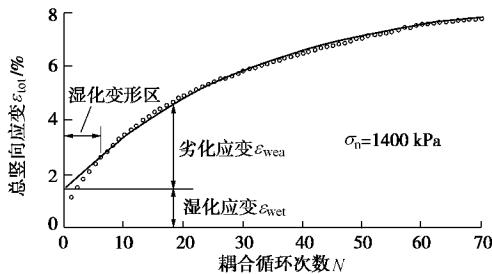


图 7 劣化应变和湿化应变的分离

Fig. 7 Separation of degrading strain and wetting strain

表 1 湿化应变修正

Table 1 Modification of wetting strain %

$s_n$ /kPa	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	总 $e_{wet}$
200	0.06	0.02	0	0	0	0.35
600	0.07	0.05	0.04	0.02	0.02	0.42
1000	0.31	0.23	0.18	0.14	0.08	1.03
1400	0.48	0.33	0.22	0.14	0.07	1.43

最大劣化应变  $e_f$  为不同应力状态下堆石料劣化应变的极限值, 其大小与应力的高低相关。根据试验结果, 最大劣化应变  $e_f$  与竖向应力  $s_n$  的关系可采用如下的双曲线来拟合,

$$e_f = \frac{s_n}{a + b s_n} , \quad (3)$$

式中,  $a$  和  $b$  为试验常数。

图 8 给出了式(3)对试验结果的拟合情况。试验常数  $a$  和  $b$  均具有一定的物理意义。它们的倒数分别为图 8 中双曲线的初始斜率和极限值。因此, 可将  $a$  和  $1/b$  分别定义为劣化初始压缩模量  $E_{f0}$  和极限劣化应变  $e_{ult}$ 。劣化初始压缩模量  $E_{f0}$  反映了竖向应力对最大竖向劣化应变的影响。极限劣化应变  $e_{ult}$  则是某种堆石料可以发生的最大极限劣化应变。

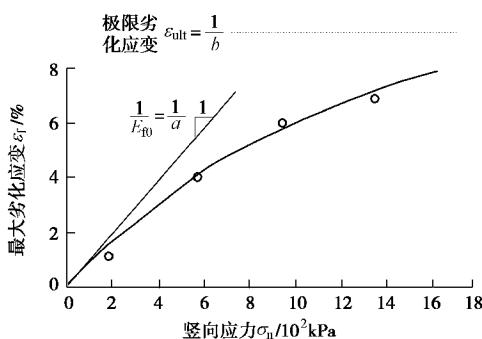


图 8 最大劣化应变的拟合

Fig. 8 Fitting curves for the maximum degrading strain

根据试验结果, 可以拟合得到上述劣化模型的试验参数:  $E_{f0}=10510$  kPa,  $e_{ult}=16.39\%$ ,  $b=0.0297$ 。根据上述参数反算结果与试验结果的对比见图 9 所示,

可见所建立的模型较好的拟合了试验结果的规律。

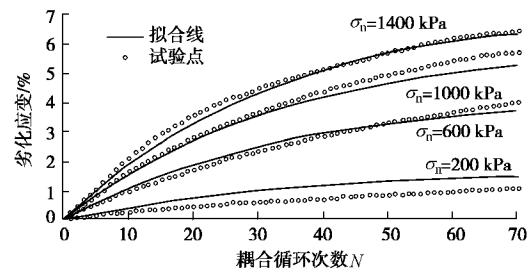


图 9 试验结果的拟合

Fig. 9 Fitting of test results

当采用增量算法时, 可将式(2)写成增量的形式:

$$\Delta e = e_f b e^{(-bN)} \Delta N , \quad (4)$$

并有,

$$\Delta e = b(e_f - e_N) \Delta N = b e_f \left(1 - \frac{e_N}{e_f}\right) \Delta N , \quad (5)$$

式中,  $e_N$  为第  $N$  个循环时累积的劣化应变, 代表已经发生的劣化变形。

对于一般应力状态, 可将这由侧限压缩试验得到的劣化变形规律推广为体积变形与剪切变形的增量形式, 即

$$\Delta e_v = b e_{vf} \left(1 - \frac{e_{vN}}{e_{vf}}\right) \Delta N , \quad (6)$$

$$\Delta e_s = b e_{sf} \left(1 - \frac{e_{sN}}{e_{sf}}\right) \Delta N , \quad (7)$$

式中,  $e_{vf}$  和  $e_{sf}$  分别为最终体积劣化应变和最终剪切劣化应变,  $e_{vN}$  和  $e_{sN}$  为第  $N$  个循环时累积的劣化应变。最终体积劣化应变  $e_{vf}$  的表达式可通过式(3)推广得到, 即

$$e_{vf} = \frac{s_m}{\frac{s_m}{K_{f0}} + e_{vult}} , \quad (8)$$

式中,  $s_m$  为平均主应力,  $K_{f0}$  为劣化初始压缩模量,  $e_{vult}$  为极限劣化体应变。

最终剪切劣化应变  $e_{sf}$  的具体表达式需要进行三轴风化试验研究确定。但目前进行此类复杂试验还存在较大困难。这里借鉴沈珠江流变模型的表达式<sup>[3-5]</sup>, 假定为应力水平的函数, 即

$$e_{sf} = d \frac{S_1}{1 - S_1} , \quad (9)$$

式中,  $S_1 = (s_1 - s_3)/(s_1 - s_3)_f$ ,  $d$  为  $S_1 = 0.5$  时的最终剪切劣化应变。

因而, 第  $N$  个循环时累积的体积劣化应变和剪切劣化应变,

$$e_{vN} = \sum \Delta e_{vN} , \quad (10)$$

$$e_{sN} = \sum \Delta e_{sN} . \quad (11)$$

采用 Prandtl-Reuss 流动法则可以得到劣化应变增量的各分量,

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{3} d_{ij} \Delta e_v + \frac{3}{2s_s} s_{ij} \Delta e_s , \quad (12)$$

式中,  $s_{ij}$  为偏应力张量,  $d_{ij}$  为 Kronecker  $\delta$  符号。在有限元计算中风化循环引起的变形可根据式(12)采用初应变方法进行计算。

上述模型共包含  $K_{f0}$ ,  $e_{vult}$ ,  $d$  和  $b$  共 4 个模型参数, 且均具有明确的物理意义。其中,  $b$  可通过本文的风化压缩试验直接确定, 其余参数可根据对压缩风化试验结果的拟合情况通过优化方法求取。当然, 当已经取得现场变形的观测资料时, 通过反演分析可以得到更加可靠的模型参数值。

劣化变形计算的另一个难点问题为干热 - 湿冷循环次数  $N$  和具体工程时间的对应关系。在试验中, 循环次数  $N$  代表了堆石料经历一次较充分地干燥和浸湿以及冷 (10°C) 和热 (56°C) 的变化。虽然在一定程度上可以和工程当地的气温变化和降水情况相联系, 但很难建立两者间的定量关系。另外, 在自然界还存在众多可以导致堆石料发生劣化的其它影响因素没有在室内试验中加以考虑, 如水的酸碱性、冰冻和微生物作用等。另外, 在坝体不同部位的循环次数  $N$  显然也是不同的。因而, 如何根据具体工程的当地条件, 对应循环次数  $N$  和工程时间的关系是一个需要深入加以研究的问题。

## 6 结 论

本文利用新研制的大型堆石料风化试验仪, 对一典型泥质粉砂岩堆石料进行了荷载作用下干湿和温度耦合变化的风化试验, 研究了在湿冷 - 干热耦合循环作用下堆石料颗粒的劣化机理, 分析了由堆石料劣化过程所产生的堆石料变形的规律。得到如下结论:

(1) 湿冷 - 干热耦合循环试验中引起了显著的劣化变形, 这表明堆石料在自然环境中劣化过程所导致的变形应是高堆石坝后期变形的重要组成部分。

(2) 试验所得的总应变包括有湿化应变、堆石料

颗粒往复干缩湿胀 - 热胀冷缩应变和颗粒劣化破碎应变等部分。70 次干热 - 湿冷循环后, 堆石料发生了明显的风化, 大颗粒岩块发生破损, 颗粒破碎严重。

(3) 劣化应变与湿冷 - 干热耦合循环次数的关系可用指数衰减函数来拟合。据此建立了可以描述堆石料劣化变形的 4 参数模型, 可采用初应变法进行有限元计算。

## 参考文献:

- [1] 孙国亮, 孙 逊, 张丙印. 堆石料风化试验仪的研制及应用 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1462 - 1466. (SUN Guo-liang, SUN Xun, ZHANG Bing-yin. Development and application of weathering test apparatus for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1462 - 1466. (in Chinese))
- [2] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(SM2): 27 - 43.
- [3] 沈珠江. 土石料的流变模型及其应用 [J]. 水利水运科学研究, 1994(4): 335 - 342. (SHEN Zhu-jiang. A creep model of rock-fill material and determination of its parameters by back analysis[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994(4): 335 - 342. (in Chinese))
- [4] 沈珠江, 左元明. 堆石料的流变特性试验研究[C]//第6届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 443 - 446. (SHEN Zhu-jiang, ZUO Yuan-ming. Experimental study on creep behavior of rockfills[C]// Proc the 6th Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 443 - 446. (in Chinese))
- [5] 沈珠江, 赵魁芝. 堆石坝流变变形的反馈分析 [J]. 水利学报, 1998, 6(6): 1 - 6. (SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi. Back analysis of creep deformation of rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 6(6): 1 - 6. (in Chinese))