

DOI: 10.11779/CJGE20230262

水循环荷载作用下高面板堆石坝长期变形特性研究

杨启贵¹, 王艳丽², 左永振²

(1. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 高面板堆石坝的长期变形是面板坝建设中的关键技术问题之一, 已有研究大多将长期变形归结为堆石体蠕变的结果, 但某些高面板堆石坝的变形原型监测资料显示, 仅从堆石体蠕变角度难以解释高面板堆石坝长期变形的机理。通过水布垭面板堆石坝 17 a 的变形监测资料分析和室内低频循环荷载作用下堆石料变形特性试验, 探讨了实际运行中库水位周期性变化形成的循环荷载对高面板堆石坝长期变形特性的影响。结果表明: ①坝体填筑和初次蓄水引起堆石体的瞬时变形和蠕变, 堆石体的后期变形主要是水循环荷载长期作用的结果。②水循环荷载作用下, 堆石体的变形表现为两种形式, 其一为不可恢复的永久变形(亦称为残余变形), 其二为可恢复的弹性变形。③室内低频循环荷载作用试验得到的堆石料变形及其增长规律很好地验证了水循环荷载与堆石坝后期变形的相互关系以及后期变形的力学意义。研究成果为高面板堆石坝长期变形特性研究提供了新的思路, 并为具有往复大消落特点的高面板堆石坝变形及安全控制提供借鉴。

关键词: 水循环荷载; 面板堆石坝; 长期变形; 实测资料; 周期性小主应力; 低频

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)06-1339-08

作者简介: 杨启贵(1964—), 男, 正高级工程师, 长期从事大型水利水电工程勘察设计与研究工作。E-mail: yangqigui@cjwsjy.com.cn。

Long-term deformation characteristics of high concrete-faced rockfill dams under cyclic loading of water

YANG Qigui¹, WANG Yanli², ZUO Yongzhen²

(1. CISPDR Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The long-term deformation of high concrete-faced rockfill dams is one of the key technical problems during their construction. Most studies have attributed the long-term deformation to rockfill creep, but the prototype monitoring data of some high concrete-faced rockfill dams show that it is difficult to explain the mechanism of their long-term deformation only from the viewpoint of rockfill creep. In this study, based on the analysis of the deformation monitoring data of Shuibuya concrete-faced rockfill dam for 17 years and the tests of the deformation characteristics of rockfill materials under low-frequency cyclic loading, the influences of cyclic loading caused by periodic change of reservoir water level on the long-term deformation characteristics of high concrete-faced rockfill dams are discussed. The results show that: (1) The instantaneous deformation and creep of rockfills body are caused by dam filling and initial water impoundment, and the post deformation of rockfill mainly results from the long-term action of cyclic loading of water. (2) When considering cycle loading of water, the deformation of rockfills exhibits two forms: one is the irrecoverable permanent deformation (also known as residual deformation), and the other is the recoverable elastic deformation. (3) The deformation of rockfills and its growth response obtained from the low-frequency cyclic load tests well verify the relationship between the cyclic loading of water and the post deformation of the rockfill dam as well as the mechanical significance of the later deformation. The research provides a new idea for the studies on the long-term deformation characteristics of high concrete-faced rockfill dams, and it also provides reference for the deformation and safety control of high concrete-faced rockfill dams with reciprocating characteristics.

Key words: cyclic loading of water; concreted face rockfill dam; long-term deformation; measured data; periodic minor principal stress; low frequency

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A20158); 国家自然科学基金面上项目(51779017); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2021484/YT)

收稿日期: 2023-03-27

*通信作者 (E-mail: wyldhh@126.com)

0 引言

自 20 世纪中期以来,面板堆石坝的建设得到了飞速的发展,无论是设计水平还是筑坝技术都取得了显著的进步。大量高面板堆石坝的建设,充分体现了面板堆石坝在安全性、适用性以及经济性等方面的巨大优势,目前已成为世界高坝建设的 3 大坝型之一^[1]。高面板堆石坝变形演化特征和变形控制一直是高面板堆石坝设计、建设以及运行过程中重点关注的问题^[2]。在面板堆石坝的发展历程中亦不乏因长期变形导致面板挤压破坏或反复挤压破坏、接缝止水失效等问题,影响大坝正常运行^[3-8]。

混凝土面板堆石坝坝体变形大致可以分为填筑阶段、集中蓄水阶段、稳定运行阶段 3 个阶段^[9]。从研究现状来看,学者们已普遍认识到稳定运行阶段坝体变形对大坝安全的重要性,并以堆石料蠕变特性为切入点,通过试验研究和计算分析等手段预测大坝的变形^[10-12],得出绝大多数面板堆石坝变形可在竣工后 10 a 内实现收敛的结论,然而长期变形监测资料表明^[13-20],大量面板堆石坝在经过多年运行后,坝体的变形仍然持续增加,没有很快收敛,同时堆石体蠕变无论是持续时间上还是量值上都不足以完全反映坝体稳定运行期的变形。其主要原因在于,上述研究均未考虑坝体稳定运行阶段水循环荷载(库水位往复升降产生的低频周期性荷载)对大坝变形的影响,且缺乏水循环荷载对大坝长期变形作用机理正确的认知,导致高面板堆石坝长期运行工作性态无法准确评估。已有研究表明库水位的循环升降作用,会加剧大坝混凝土面板的脱空现象,对面板乃至大坝的安全稳定运行造成不利影响^[21-23]。

鉴于此,本文以具有代表性的水布垭高面板堆石坝为研究对象,通过分析 2004 年 12 月—2021 年 12 月近 17 a 的坝体变形监测资料,并开展低频循环荷载作用下的堆石料变形特性试验,分析大坝变形与水循环荷载的关系,揭示高面板堆石坝稳定运行期的变形演化规律,为改进完善高面板堆石坝长期变形控制方法和措施,保障高面板堆石坝的建设和长期安全运行提供理论参考和技术支撑。

1 工程概况

水布垭水电站位于清江中游河段湖北省巴东县境内,总库容 $45.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,水电装机总容量为 1840 MW。挡水建筑物为面板堆石坝,大坝坝顶高程 409 m,正常蓄水位 400 m,坝轴线长 660 m,最大坝高 233 m,为世界已投入运行的最高面板堆石坝^[24-25]。

该工程 2002 年 10 月实现截流,大坝从 2003 年 2 月开始填筑施工,2006 年 10 月大坝填筑至 405 m 高程,导流洞下闸蓄水,2007 年 4 月,上游水位达 265.45 m,水库开始集中蓄水,2007 年 9 月蓄水至水位 389.61 m,之后库水位在 355.68~399.51 m 呈年周期性变化(其中 2008 年 11 月库水位初次达到 399.51 m)^[9],2008 年 4 月大坝填筑至 409 m 高程。

水布垭面板堆石坝坝体内部共布设了 3 个监测断面,其中桩号 0+212 断面为最大坝高监测断面(以下称为最大断面),共布设了 5 条测线合计 38 个测点,用于监测坝体变形,分别位于 235, 265, 300, 340, 370 m 高程,分布如图 1 所示。

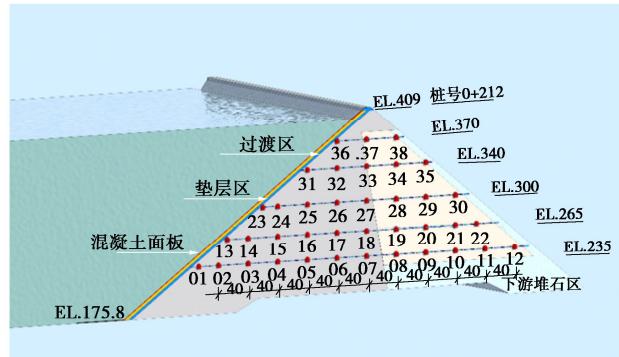


图 1 0+212 断面堆石体内部变形测点布置图

Fig. 1 Layout of measuring points for internal deformation of 0+212 section

2 坝体的沉降

2.1 坝体的总沉降过程

最大断面 300 m 高程 8 个测点(从上游至下游编号为 23, 24, …, 30) 总沉降演化曲线如图 2 所示。

(1) I -1 阶段(填筑荷载引起的变形)

2004 年 12 月 4 日(300 m 高程以上坝体开始填筑)—2006 年 9 月 14 日(坝体填筑完成),各测点沉降随着填筑施工的进行快速增加,这期间的沉降主要是填筑荷载引起的瞬时变形。

(2) I -2 阶段(蠕变)

2006 年 9 月 14—2006 年 12 月 26 日,约 3.5 个月时段内,各测点的沉降持续增长,这期间的沉降主要为填筑荷载施加完成后的蠕变变形。

(3) II -1 阶段(水荷载引起的变形)

2007 年 4 月 18 日—2007 年 9 月 22 日,初期集中蓄水阶段完成,水荷载产生的大坝沉降明显。

(4) II -2 阶段(蠕变)

2007 年 9 月 22 日—2008 年 2 月 16 日,库水位经一定时段波动后下降到 373 m,各测点的沉降仍然持续增长。该阶段变形仍然分为两部分:①水荷载引起的瞬时变形;②水荷载完成后的蠕变变形。

(5) III-1 阶段 (后期变形)

2008年2月16日后, 即初次蓄水完成后, 测点沉降变形逐渐趋缓, 之后随水位变动发生周期性波动演化, 直到2021年12月21日, 测点沉降变形仍有缓慢增加且未完全收敛, 此阶段的变形称为稳定运行期的变形, 简称后期变形。

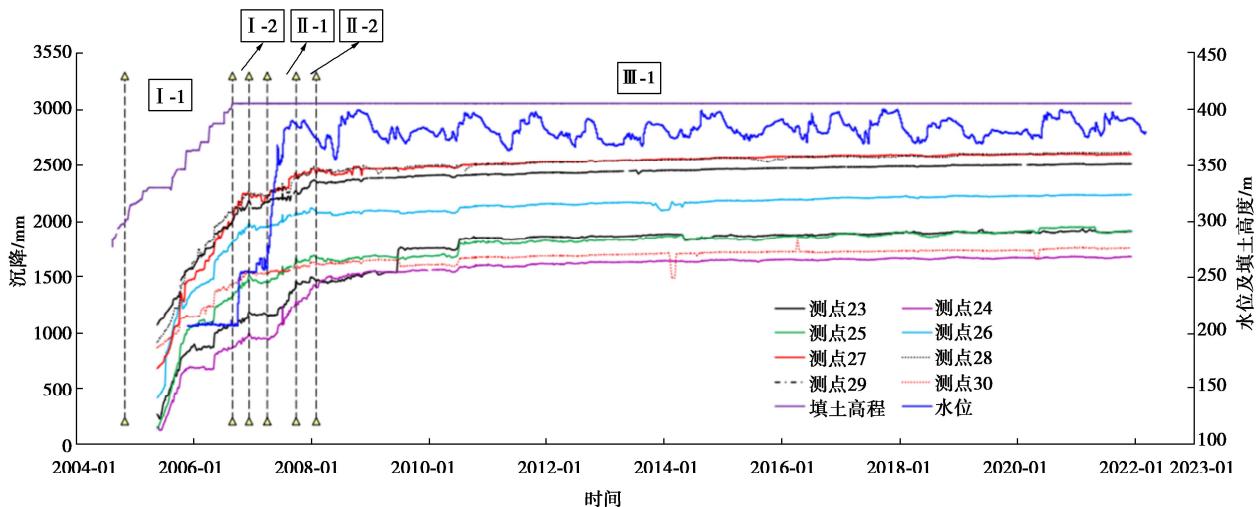
坝体总沉降过程研究结果表明, 坝体的沉降过程与荷载过程关系清晰, 不同位置观测点的沉降过程反映了加载过程和测点位置的关系。各测点的沉降过程均呈现出一个明显规律, 在荷载(自重及水压力)作用时及之后的一段时间内坝体沉降持续增长, 之后沉降增长速率出现明显骤减。两个时段沉降速率的差异性应该与作用机制有关, 前期反映的是荷载作用下堆石体的弹塑性变形和蠕变, 但如果把后期长时间的持

续变形仅看成是持续蠕变值得商榷。

2.2 坝体的后期沉降过程

为了突出显示后期变形的特征, 以2008年2月16日作为起始时间, 建立主要测点后期沉降与时间的关系, 如图3所示。由图3可知: ①14 a间堆石坝后期沉降增量明显; ②后期沉降与库水位同频波动; ③沉降变形逐渐趋于平缓。

由于2008年年初—2010年年中, 对测量基准点进行调整, 沉降过程线出现陡增现象, 另外, 在一些时段, 部分测点的沉降出现异常。为了消除测量误差的影响, 选择有效监测数据, 采用双曲线模型对各测点的后期沉降进行了拟合分析。图4给出了部分测点后期沉降实测和拟合结果, 由图4可知: ①长时段累积的后期沉降与时间关系符合双曲线关系。②图中双



注: I-1: 填筑荷载引起的变形; I-2: 蠕变; II-1: 水荷载引起的变形; II-2: 蠕变; III-1: 后期变形

图2 最大断面中部(高程300 m)测点沉降演化曲线

Fig. 2 Evolution curves of settlement at measuring points in middle of maximum section (elevation: 300 m)

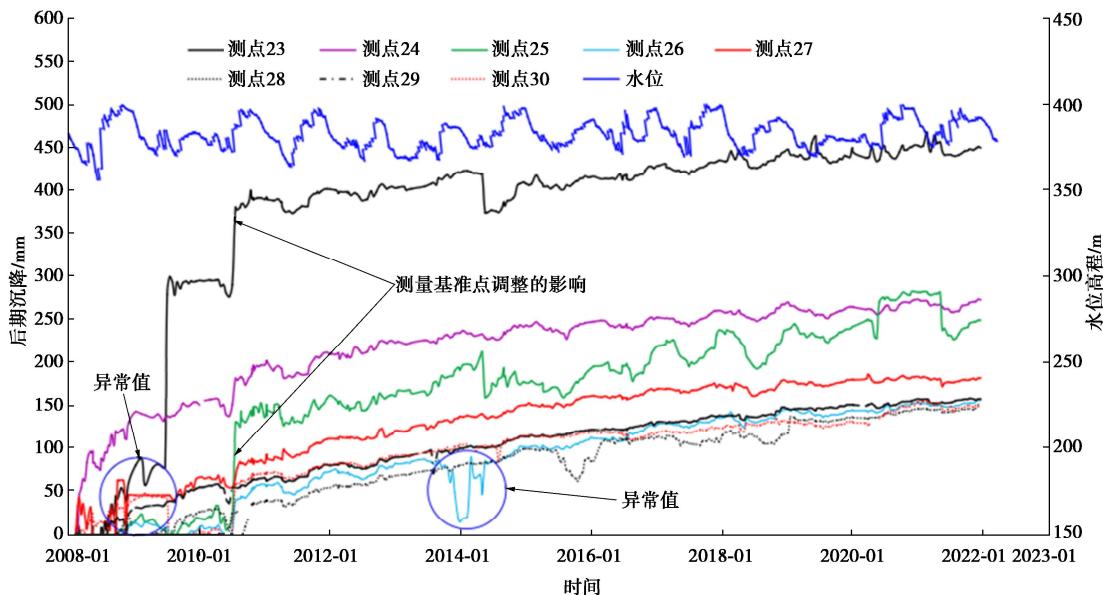


图3 最大断面中部(高程300 m)测点后期沉降实测值演化曲线

Fig. 3 Evolution curves of measured values of post settlement at measuring points in middle of maximum section (elevation: 300 m)

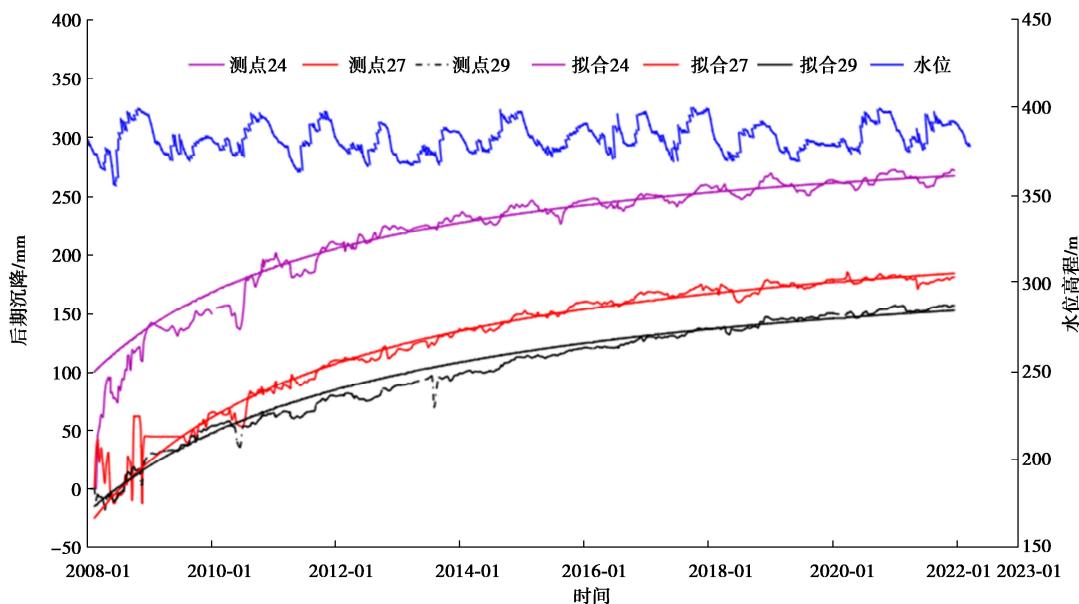


图 4 最大断面中部 (高程 300 m) 部分测点后期沉降实测值与拟合值演化曲线

Fig. 4 Evolution curves of measured and fitting values of post settlement at partial measuring points in middle of maximum section (elevation: 300 m)

表 1 最大断面中部 (高程 300 m) 测点后期最大沉降预测值

Table 1 Predicted values of maximum post-settlement at measuring points in middle of maximum section (elevation: 300 m)

测点 编号	坝体总沉降实测值(到 2021 年 12 月 21 日)/mm	水循环荷载引起坝体后期沉降当前 值(到 2021 年 12 月 21 日)/mm	水循环荷载引起坝体最终 后期沉降预测值/mm	后期沉降完成率 /%
23	1911.2	173	230	75
24	1678.6	167	201	83
25	1916.2	213	261	82
26	2238.0	233	280	83
27	2604.9	209	250	84
28	2621.0	167	213	79
29	2511.3	164	207	81
30	1755.9	156	202	77

曲线可认为是循环荷载下堆石坝累积的不可恢复的永久变形,而在循环荷载作用下,实测的变形曲线围绕这条双曲线上下波动,该部分波动量可认为是水循环荷载引起的堆石坝可恢复的弹性变形。③从变形的波动过程与水循环荷载的相关性,可以认为水循环荷载是引起堆石坝长期变形的重要因素。④当水荷载增加到最大值时,测点后期沉降量持续增加,并未到最大值,而是在水荷载降低一定程度时,后期沉降量持续增加至最大值,然后随着水荷载的继续降低而逐渐降低。这说明水循环荷载引起坝体的后期沉降过程具有明显的滞后现象,且滞后时间约为 2~3 个月。

2.3 坝体的后期沉降年增量

为进一步探讨水循环荷载引起的坝体后期变形的发展趋势,针对最大坝高断面高程 300 m 测点后期沉降监测成果,采用双曲线拟合方法,预测各测点最终后期沉降量,结果见表 1 所示。由表 1 可知,截止 2021 年 12 月 21 日,大部分测点水循环荷载引起后期沉降完成率超过 80%。同一断面的同一高程测点后期沉降完成率应该基本一致,不同测点的差异一定程度上反

映监测成果的质量和拟合过程中数据选择的合理性,表 1 成果仍然反映了堆石坝的整体变形趋势。为更好地说明后期沉降发展规律,表 2 给出了从 2008 年 2 月开始典型测点后期沉降完成率预测值,由表 2 可知,30 a 后坝体变形基本收敛。

表 2 典型测点 24 后期沉降完成率预测值

Table 2 Predicted values of post-settlement completion rate at typical measuring point No. 24 in later period

时间/a	后期沉降预测值/mm	后期沉降完成率/%
1	42	21
5	119	59
10	153	76
15	170	85
20	180	90
25	186	93
30	191	95
35	194	97
40	197	98

图 5 为不同测点年后期沉降拟合曲线,图 6 为不同测点后期沉降年增量值。由图 6 可知,从整体来看,测点后期沉降年增长量呈逐年降低的趋势。2021 年,各测点的后期沉降增量整体较小,大部分测点的沉降

增量低于3 mm/a。这说明堆石坝后期沉降呈逐渐收敛的趋势。

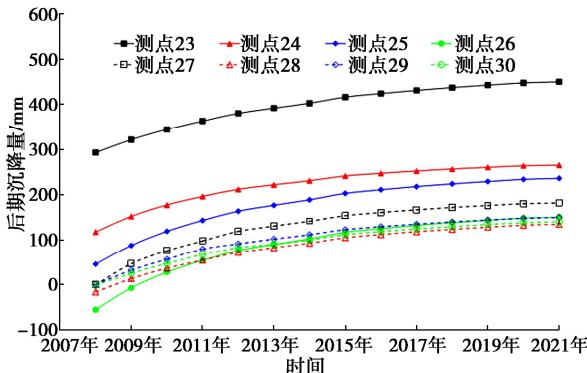


图5 最大断面中部(高程300 m)测点年后期沉降拟合曲线
Fig. 5 Fitting curves of settlement at measuring points in middle of maximum section (elevation: 300 m)

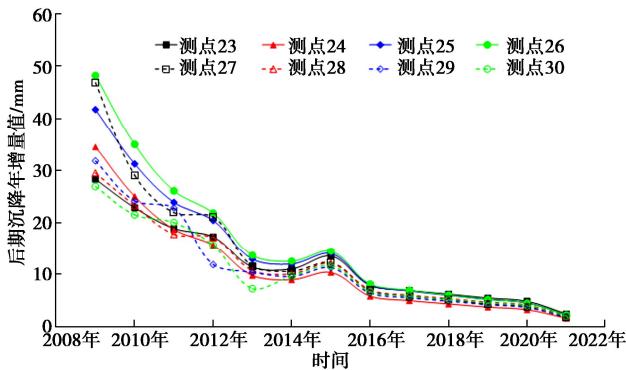


图6 最大断面中部(高程300 m)测点后期沉降年增量值
Fig. 6 Annual increment values of post settlement at measuring points in middle of maximum section (elevation: 300 m)

3 低频循环荷载作用下的堆石料变形特性

依据堆石坝沉降实测资料, 分析认为堆石坝后期沉降主要与水循环荷载相关。依据弹塑性理论, 低频重复加卸荷只引起弹性变形, 是否会引起残余变形需要进一步探讨。为此, 在室内设计了一种试验, 研究低频循环荷载作用下的堆石料变形特性。该试验反映堆石坝中一单元体的应力状态, 模拟水循环荷载, 探讨水循环荷载作用下的变形演化规律。

3.1 试验级配与密度

为使试验成果更符合工程实际, 试验料为茅口组灰岩, 原始级配采用水布垭堆石料填筑过程中的检测级配统计平均值, 按规范^[26]进行级配缩尺后得到本次试验的试验级配, 试验级配最大粒径为60 mm, 小于5 mm含量为13%。

3.2 试验方案

采用大型三轴仪开展本次试验研究。试验方案见表3, 共开展3组试验, 以比较试样密度、应力状态、加卸荷幅值的影响。

表3 试验方案

Table 3 Test plan

试验编号	试验干密度/(g·cm ⁻³)	小主应力变化范围/MPa
T1	2.07	1.5→1.0→1.5→2.0→1.5
T2	2.11	1.5→1.0→1.5→2.0→1.5
T3	2.07	1.5→1.2→1.5→1.8→1.5

循环加载应力路径如图7所示, 3组试验的大主应力相同, 均保持3.0 MPa保持不变, 以模拟上部堆载的自重应力。小主应力进行卸载/加载循环, 模拟水位变幅。

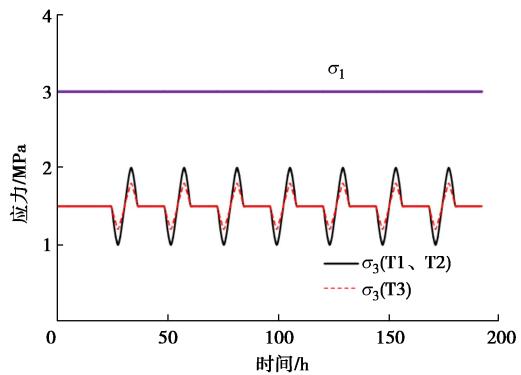


图7 循环荷载加载路径示意图

Fig.7 Schematic diagram of cyclic loading path

试验过程中, 先对试样施加到预定应力状态并稳定, 然后保持大主应力不变, 进行小主应力的卸载→加载→卸载的循环试验。具体实施中从小主应力变幅平均值开始, 先卸载至最小值, 然后加载至平均值, 再到最大值, 最后再卸载至平均值, 为1个完整的循环过程, 完成1个加卸载循环的时间为24 h。记录试验过程中的轴向变形, 并进行多循环次数的试验。

为更准确获得加卸载过程曲线变化, 每个加卸载步骤又细分了3级, 如表3中, 小主应力从1.5 MPa卸载到1.0 MPa, 细分为1.5 MPa→1.3 MPa→1.1 MPa→1.0 MPa。

3.3 试验成果

(1) 累积应变

3组试验的变形规律基本相同, 图8给出了典型的轴向应变与小主应力的变化关系。由图8可以看出, 小主应力的加卸载循环时, 试样的轴向应变不是简单的重复, 而是随循环次数的增加而不断增加, 表明低频加卸载循环不仅引起弹性变形, 而且会引起残余变形。

以每个循环结束时对应的轴向应变值代表本次循环的累积应变值, 图9给出了累积轴向应变值与循环次数的关系曲线。第1次加卸载循环变形量如同是图2中的初次蓄水阶段变形, 从第2次加卸载循环开始后的变形是周期性水荷载作用下的后期残余变形。由图9可见, 试样密度不同、小主应力变化范围不同的

3 组试验, 得到的累积轴向应变大小不同, 但变形随循环次数的增长规律是一致的。累积轴向应变在循环次数较小时增加较快, 随循环次数的增加而逐渐减缓。

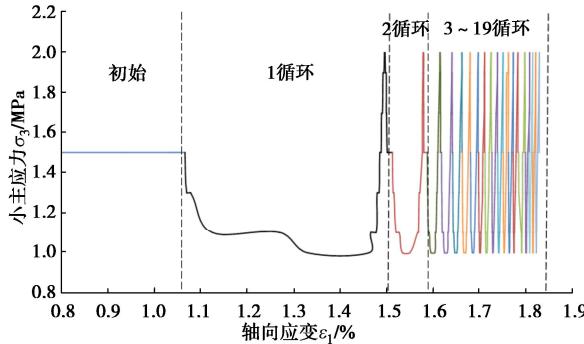


图 8 T2 组试验轴向应变与围压关系

Fig. 8 Relationship between axial strain and confining pressure in T2 group tests

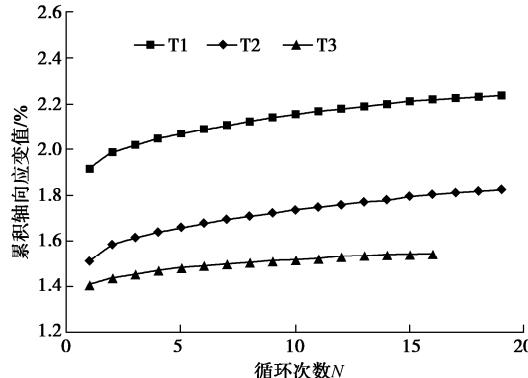


图 9 累积轴向应变与循环次数的关系

Fig. 9 Relationship between cumulative axial strain and number of cycles

比较图 5, 9 不难看出, 实际堆石坝后期变形及其增长规律与低频循环荷载作用下的堆石料累积变形及其增长规律是一致的, 故有理由相信, 堆石坝后期变形是水循环荷载作用的结果。

(2) 轴向应变增量

为了描述轴向应变增量与循环次数的变化规律, 采用每个循环所对应的应变值之差代表本次循环的应变增量。轴向应变单次循环增量随循环次数的变化规律见图 10 所示, 由图 10 可知, 轴向应变增量随着循环次数的增加逐渐减小。

比较图 6, 10, 两者变形趋势具有相同的规律, 表明室内低频循环荷载作用很好地反映出堆石坝后期变形的增长规律。

3.4 变形表达式与参数

对图 10 的轴向应变增量与循环次数进行拟合, 发现采用幂函数能较好地拟合轴向应变增量与循环次数的关系 (图 11) :

$$\varepsilon_{1c} = a \cdot n^{-b} \quad (1)$$

式中: ε_{1c} 为轴向应变增量; n 为循环次数; a, b 为拟

合参数。本次试验 T1 的 $a=0.124$, $b=1.000$ 。

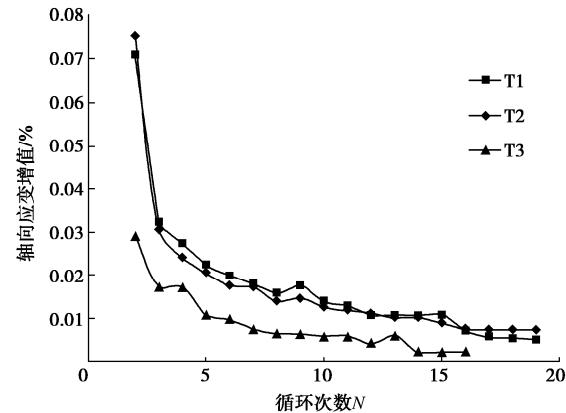


图 10 轴向应变增量与循环次数关系 (扣除第 1 次)

Fig. 10 Relationship between axial strain amplitude and number of cycles

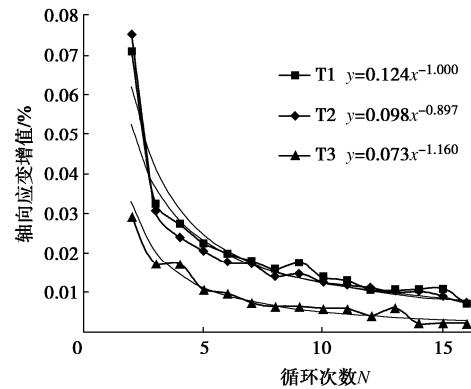


图 11 轴向应变增量与循环次数关系拟合

Fig. 11 Fitting curves of relationship between axial strain amplitude and number of cycles

3.5 与蠕变试验结果对比分析

为了研究低频循环荷载作用引起变形与蠕变变形之间的区别与联系, 采用 T1 组的备样条件, 开展了试验干密度 2.07 g/cm^3 、围压为 1.5 MPa 、应力水平为 0.35 的蠕变试验, 成果见图 12, 蠕变试验规律与文献 [10] 的试验规律相同。

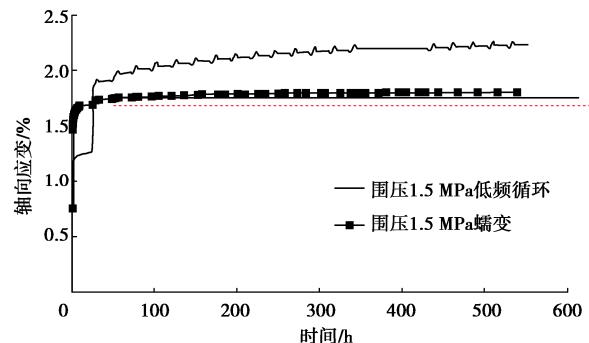


图 12 堆石料三轴蠕变时间关系曲线

Fig. 12 Relationship curves of triaxial creep-time of rockfill materials

T1 组试验保持大主应力不变, 因小主应力的变化, 导致应力水平为 $0.26 \sim 0.47$, 围压 1.5 MPa 对应

的平均应力水平约为 0.35。低频循环试验与蠕变试验的干密度、围压、应力水平平均相同, 成果具有可比性。

由图 12 可知, 在应力不变条件下, 堆石料蠕变初期增量较大, 后期增量较小, 逐渐接近于水平。与 T1 组低频循环荷载作用下的变形, 应变随时间的增长过程完全不同, 与图 5 堆石坝后期变形增长规律也不同。进一步证明了堆石坝的后期变形主要是由水循环荷载引起的, 其变形机理不同于蠕变。

实测资料和室内试验相互验证, 揭示了水循环荷载长期作用会引起坝体不可恢复残余变形的规律, 水循环荷载长期作用是堆石体长期变形的重要因素。

长期以来, 国内外学者们认为面板堆石坝稳定运行期的变形是由堆石料蠕变引起的, 而忽视了库水循环荷载的影响, 上述研究成果充分证明了水循环荷载的重要作用, 充分揭示出堆石坝后期变形的力学意义, 这对于理解堆石坝后期变形的长期性和大小是十分有意义的。

4 结 论

通过对水布垭面板堆石坝典型测点长期实测数据分析和室内低频循环荷载作用试验, 研究了堆石坝坝体后期变形规律, 得到 4 点结论。

(1) 水布垭面板堆石坝体的变形客观地反映了坝体自重荷载、水荷载、水循环荷载长期作用下的堆石体变形特性。自重荷载和水荷载引起堆石体的瞬时变形和蠕变, 堆石体的后期变形主要是水循环荷载长期作用的结果。

(2) 水循环荷载作用下, 堆石体的变形表现为两种形式, 其一为弹性变形, 其二不可恢复永久变形(亦称为残余变形)。弹性变形表现出堆石坝的后期变形与库水位同频波动; 不可恢复永久变形实质是堆石体的塑性变形, 随每年库水位周期性变动逐年增加, 且持续时间较长, 年增量随时间逐年降低并趋于稳定。

(3) 室内低频循环荷载作用试验给出的堆石料变形及其增长规律很好地验证了水循环荷载与堆石坝后期变形的相互关系以及后期变形的力学意义。

(4) 水布垭实测资料表明, 水循环荷载引起坝体最终最大沉降约 280 mm, 经 14 a 运行, 水循环荷载引起的后期沉降完成率约 80%, 30 a 后坝体变形基本收敛。

高坝大库往往伴随着库水位的大幅消落, 在建的大石峡(消落高差 110 m)、拉哇(消落高差 30 m)、玉龙喀什(消落高差 90 m)等超高面板坝工程均具有这个特点, 考虑到水循环荷载对长期变形的影响, 建议在建和在研的类似工程, 在做好坝体变形控制的同时, 需要重视大变幅水循环荷载对大坝长期变形及防

渗体安全影响, 进一步提升工程的安全度。

参考文献:

- [1] 周伟, 花俊杰, 常晓林, 等. 水布垭高面板堆石坝运行期工作性态评价及变形预测[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 72-77. (ZHOU Wei, HUA Junjie, CHANG Xiaolin, et al. Estimation of work status and deformation prediction of Shuibuya CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 72-77. (in Chinese))
- [2] 杨启贵, 常晓林, 周创兵, 等. 水布垭超高面板堆石坝变形控制方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 247-253. (YANG Qigui, CHANG Xiaolin, ZHOU Chuangbing, et al. Study of dam deformation control method for Shuibuya high concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 247-253. (in Chinese))
- [3] MA Hongqi, CHI Fudong. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams[J]. Engineering, 2016, 2(3): 148-163.
- [4] 曹克明, 汪易森, 张宗亮. 高混凝土面板堆石坝的设计与施工[J]. 水力发电, 2001, 27(10): 49-52, 72. (CAO Keming, WANG Yisen, ZHANG Zongliang. Design and construction of high concrete face rockfill dam[J]. Water Power, 2001, 27(10): 49-52, 72. (in Chinese))
- [5] 郎能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1143-1150. (LI Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1143-1150. (in Chinese))
- [6] 谭界雄, 王秘学, 高大水. 白云水电站混凝土面板堆石坝渗漏处理设计[J]. 大坝与安全, 2016(4): 1-5. (TAN Jiexiong, WANG Mixue, GAO Dashui. Seepage treatment design for concrete face rockfill dam of Baiyun hydropower station[J]. Dam & Safety, 2016(4): 1-5. (in Chinese))
- [7] 周墨臻, 张丙印, 张宗亮, 等. 超高面板堆石坝面板挤压破坏机理及数值模拟方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1426-1432. (ZHOU Mozhen, ZHANG Bingyin, ZHANG Zongliang, et al. Mechanisms and simulation methods for extrusion damage of concrete faces of high concrete-faced rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1426-1432. (in Chinese))
- [8] COOKE J B. Concrete-faced rockfill dam[J]. International Water Power and Dam Construction, 1991, 43(1): 11-15.
- [9] 徐琨, 杨启贵. 水布垭面板堆石坝坝体后期变形时空分布规律研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(7): 51-57. (XU Kun, YANG Qigui. Spatiotemporal distribution of post-operation deformation of shuibuya concrete-faced rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research

- Institute, 2021, **38**(7): 51-57. (in Chinese))
- [10] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 473-476. (CHENG Zhanlin, DING Hongshun. Creep test for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 473-476. (in Chinese))
- [11] 周伟, 胡颖, 杨启贵, 等. 高混凝土面板堆石坝流变机理及长期变形预测[J]. 水利学报, 2007, **38**(增刊 1): 100-105. (ZHOU Wei, HU Ying, YANG Qigui, et al. Study on creep mechanism and long-term deformation prediction for high concrete face rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **38**(S1): 100-105. (in Chinese))
- [12] 朱晟, 张远, 加力别克·阿哈力别克, 等. 基于增量分析的堆石坝瞬变-流变参数联合反演[J]. 岩土力学, 2021, **42**(5): 1453-1461. (ZHU Sheng, ZHANG Yuan, JIALIBIEKE Ahalibieke, et al. Joint inversion method of instantaneous and creep parameters of rockfill dam based on incremental analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(5): 1453-1461. (in Chinese))
- [13] 程展林, 潘家军. 水布垭面板堆石坝应力变形监测资料分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2299-2306. (CHENG Zhanlin, PAN Jiajun. Analysis of monitoring data of stress and deformation for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2299-2306. (in Chinese))
- [14] 甘孝清, 杨弘, 宁晶. 白莲河抽水蓄能电站面板堆石坝监测设计与监测资料分析[J]. 大坝与安全, 2014(1): 50-53, 56. (GAN Xiaoqing, YANG Hong, NING Jing. Monitoring design and data analysis of concrete faced rockfill dam of Bailianhe pumped storage station[J]. Dam & Safety, 2014(1): 50-53, 56. (in Chinese))
- [15] 李文红, 潘久武. 潘坑混凝土面板坝变形监测与分析[J]. 水电自动化与大坝监测, 2013, **37**(3): 51-55. (LI Wenhong, PU Jiuwu. Deformation monitoring and analysis for tankeng concrete face rockfill dam[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2013, **37**(3): 51-55. (in Chinese))
- [16] 李为, 苗喆. 察汗乌苏面板坝监测资料分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 30-35. (LI Wei, MIAO Zhe. Stress and deformation analysis of Chahanwusu concrete face rockfill dam(CFRD) based on monitoring data[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(5): 30-35. (in Chinese))
- [17] 傅世平. 混凝土面板堆石坝监测资料分析与安全评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (FU Shiping. Observations Analysis and Safety Evaluation of Concrete Face Rock-Fill Dam[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [18] DASCAL O. Postconstruction deformations of rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(1): 46-59.
- [19] CLEMENTS R P. Post-construction deformation of rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **110**(7): 821-840.
- [20] GURBUZ A, PEKER I. Monitored performance of a concrete-faced sand-gravel dam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, **30**(5): 401-601.
- [21] 杨旭前. 库水位升降变化对关门山水库大坝应力和面板脱空的影响分析[J]. 中国水能及电气化, 2021(4): 47-50. (YANG Xuqian. Analysis of the influence of reservoir water level change on the dam stress and face slab disengagement of Guanmenshan Reservoir[J]. China Water Power & Electrification, 2021(4): 47-50. (in Chinese))
- [22] 党发宁, 杨超, 薛海斌, 等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(4): 435-442. (DANG Faning, YANG Chao, XUE Haibin, et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(4): 435-442. (in Chinese))
- [23] 李炎隆, 卜鹏, 吴海波, 等. 面板堆石坝混凝土面板脱空影响因素敏感性分析[J]. 应用力学学报, 2022, **39**(6): 1108-1116. (LI Yanlong, BU Peng, WU Haibo, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of separation between concrete face and cushion layer of CFRD[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, **39**(6): 1108-1116. (in Chinese))
- [24] 皮军华, 杨威, 李婧. 水布垭面板堆石坝运行初期水上部分面板脱空检测与分析[J]. 水电与新能源, 2020, **34**(3): 67-73. (PI Junhua, YANG Wei, LI Jing. Detection and analysis of face slab void above water in early operation stage of shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Hydropower and New Energy, 2020, **34**(3): 67-73. (in Chinese))
- [25] 徐昆振, 段国学, 丁林, 等. 水布垭面板坝堆石体安全监测成果分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, **5**(6): 58-68. (XU Kunzhen, DUAN Guoxue, DING Lin, et al. Analysis on monitoring results of the rockfill of shuibuya CFRD[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, **5**(6): 58-68. (in Chinese))
- [26] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))