

软岩料填筑面板堆石坝的流变和湿化效应研究

贾飞¹, 王瑞骏¹, 贾伟², 张帅¹, 彭兆轩¹, 赵洋¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了研究不同时期下软岩料流变及湿化效应对面板堆石坝的应力及变形影响。对比软岩料的流变和湿化模型,分析已有的软岩料流变、湿化效应的有限元实现方法。以某面板堆石坝为例,按大坝的不同时期和是否考虑流变、湿化效应制定了4种计算工况,分别进行大坝的三维有限元应力变形计算,通过对比分析4种工况的计算结果,系统总结了软岩料的流变、湿化效应对软岩料填筑面板坝在竣工期和蓄水期应力变形的影响规律。结果表明:无论是竣工期还是蓄水期,在考虑流变和湿化后,大坝横断面最大垂直位移、水平位移、大主应力均有显著的增加,但相对而言在蓄水期增加的更多。可见软岩料的流变和湿化效应对软岩料填筑面板坝应力变形有较大的影响,且在蓄水期影响更加明显。

关键词: 软岩料填筑面板坝; 流变; 湿化; 竣工期; 蓄水期

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0212-08

Study on rheological and humidification effect of rockfill dam filled with soft rock

JIA Fei¹, WANG Ruijun¹, JIA Wei², ZHANG Shuai¹, PENG Zhaoxuan¹, ZHAO Yang¹

(1. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the effect of rheological and humidification effects of soft rock materials on the stress and deformation of face rockfill dam at different syages. The rheological and humidification models of soft rock materials were searched and compared, and the existing finite element method for the rheological and humidification effects of soft rock materials was analyzed and studied. Taking a face rockfill dam as an example, four calculation conditions were established according to different periods of the dam and whether rheological and humidification effects are taken into account, and then the three-dimensional finite element stress deformation of the dam was calculated respectively. Based on the calculation results of four working conditions, the influence laws of rheological and humidification effects of soft rock on the stress deformation of soft rock materials during the completion period and the water storage period of the rockfill dam filled with soft rock were summarized. The results showed that the maximum vertical displacement, horizontal displacement and main stress of the cross section of the dam increase significantly during the completion period and the water storage period, but increase more in the water storage period. It can be seen that the rheological and humidification effects of soft rock material have a great influence on the stress and deformation of soft rock material filling panel dam, and the influence is more obvious in the water storage period.

Key words: soft rock filled concrete face rockfill dam; rheology; humidification; completion period; storage period

1 研究背景

现代混凝土面板堆石坝筑坝技术诞生于20世

纪60年代中期,是现代坝工建设领域取得的一项具有重大意义的技术成就。现代面板堆石坝的一个重要特点是采用分层碾压的方式进行施工,为保证面

收稿日期:2017-10-30; 修回日期:2018-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介:贾飞(1993-),男,陕西榆林人,在读硕士研究生,主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者:王瑞骏(1963-),男,陕西宝鸡人,博士,教授,博士生导师,主要从事坝工应力研究。

板尽可能不产生裂缝或少产生裂缝,现代的面板堆石坝在设计中十分强调对坝体堆石变形的控制^[1]。近10年来,软岩料在面板坝体填筑中的应用范围逐步扩大,但是这类岩体抗压强度较低,具有明显的流变特性,蠕变变形量较大,容易引起坝体的失稳和破坏^[2-3],软岩和含有泥质充填物的松散岩体的流变性最显著^[4-6]。为了减少堆石体的变形,以往筑坝材料通常选用较为坚硬的岩石,随着对面板坝变形特性的深入研究和丰富的工程经验的积累,筑坝材料的使用拓宽,性质相对较弱的软弱岩石也可以用于工程建设中。

软岩料有其独特的工程特性,坝体随时间的变化会产生较大的流变,且浸水的同时会伴随湿化变形,这对面板堆石坝的坝体应力变形具有较大影响,对严重危害面板堆石坝的安全。对坝体流变及湿化效应的理论研究局限于硬岩料面板堆石坝。对软岩料筑坝的研究,通常不考虑软岩料的流变及湿化特性,或者只单一考虑流变或湿化一种特性对坝体应力变形的影响^[7-10],其计算结果往往与实测数据有一定偏差,国内外还没有对软岩料面板坝流变及湿化效应系统的总结分析,在工程设计时缺乏切实可行的理论依据。因此,本文将对软岩料填筑的面板堆石坝同时计入流变及和湿化变形,进行大坝的三维有限元应力变形计算,揭示软岩料筑坝的流变、湿化效应在竣工期和蓄水期的变化规律。

2 软岩料流变和湿化计算模型

2.1 软岩料流变模型

堆石料的变形非常复杂,包括弹性变形、塑性变形和流变变形3个部分,在分类上包括压缩变形和滑动变形,在时间上各类变形又相互交替作用,因此对堆石料的流变变形的研究十分困难。前人的不断探索研究总结出了多种反映堆石料流变性质的计算模型,目前工程界中有几种应用较多的经验流变模型^[11],主要有三参数流变模型、改进的三参数流变模型、双屈服面流变模型、冥函数流变模型、七参数流变模型等。考虑到对七参数指数衰减型流变模型的研究较多,其理论相对成熟,模型中参数计算也比较简便,对于有限元程序设计和计算分析较方便,本文采用七参数法计算堆石料的流变变形。七参数指数衰减型流变模型^[12]假定材料的流变量随荷载的增加呈现非线性关系,材料的最终体积流变如下所示:

$$\varepsilon_{vf} = b \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{m_1} + c \left(\frac{q}{p_a} \right)^{m_2} \quad (1)$$

最终剪切流变 γ_f :

$$\gamma_f = d \left(\frac{S_L}{1 - S_L} \right)^{m_3} \quad (2)$$

材料的体积变形速率和剪切变形速率分别为:

$$\dot{\varepsilon}_v = \alpha \varepsilon_{vf} \left(1 - \frac{\varepsilon_{vt}}{\varepsilon_{vf}} \right) \quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = \alpha \gamma_f \left(1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_f} \right) \quad (4)$$

式中: ε_{vf} 为最终体积流变量; γ_f 为最终剪切流变量; $\dot{\varepsilon}_v$ 和 $\dot{\gamma}$ 分别为材料的体积变形速率和剪切变形速率; ε_{vt} 和 γ_t 分别表示堆石料在 t 时刻时已累计的体积流变变形值和剪切流变变形值;应力水平 S_L ,kPa;围压 σ_3 ,kPa。

此模型中包括 b 、 c 、 d 、 α 、 m_1 、 m_2 和 m_3 共7个参数,称此模型为七参数流变模型。

2.2 软岩料湿化模型^[13]

现有的关于湿化变形计算的数学模型,都是经验(或半经验)模型,研究湿化变形的途径,基本上都是按照“双线法”或“单线法”试验的思路,得出试验结果,然后用数学方法拟合,得到湿化变形的计算模型。目前,根据“双线法”试验思路得出的计算模型有李广信、殷宗泽、Nobari、等湿化模型,根据“单线法”试验思路得出的计算模型有陈慧远、刘祖德、Marsall、卢廷浩、沈珠江等湿化模型。

沈珠江^[14]进行了大量的不同偏应力条件下的湿化变形试验后,建议了下列浸水体应变和偏应变的计算公式:

$$\Delta \varepsilon_w = c_w \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon_a = D_w S_L / (1 - S_L) \quad (6)$$

式中: $\Delta \varepsilon_w$ 为体积应变增量; $\Delta \varepsilon_a$ 为轴向应变增量; $S_L = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为浸水时的剪应力水平,kPa; C_w 和 D_w 为两个系数。假设干样及饱和样两条应力应变曲线均为双曲线,起始切线模量一致,其强度比为:

$$R_w = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f_w} \quad (7)$$

则可按式计算浸水引起的大主应变增量:

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_t} \left(\frac{1}{1 - S_L/R} - \frac{1}{1 - S_L} \right) \quad (8)$$

式中: R_w 为强度比; $\Delta \varepsilon_1$ 为大主应变增量; σ_1 为第一主应力,kPa; σ_3 为第三主应力,kPa; S_L 为应力水平,kPa; E_t 为切线模量; R 为半径,m。

李全明等^[15]根据试验结果,认为围压与湿化引

起的体应变有关,改进了沈珠江湿化模型:

$$\begin{cases} \varepsilon_v = \sigma_3 / (a + b\sigma_3) \\ \varepsilon_a = D_w S_L / (1 - S_L) \end{cases} \quad (9)$$

式中: ε_v 和 ε_a 分别为湿化体积应变和轴向应变; D_w 、 a 、 b 为模型参数,由试验得到。

本文采用改进的沈珠江湿化模型作为程序设计和计算分析的湿化模型。

3 应用实例

3.1 工程概况

九甸峡水利枢纽^[16]工程位于黄河支流洮河中游九甸峡峡口处,地处甘肃省卓尼、临潭两县交界,

是甘肃省引洮供水工程的龙头水库。九甸峡大坝坝顶宽 11 m,坝顶上游设 L 形防浪墙,墙底高程 2 203 m,高于正常蓄水位 1 m,墙顶高程 2 206.5 m,墙高 3.5 m,坝顶以上 1.2 m,确定坝顶高程 2 205.3 m,大坝坝顶长度 232.0 m。上游坝坡比 1: 1.4,下游坝坡分 2 段,坡比在 2 170.5 m 以上为 1: 1.5,以下为 1: 1.4。九甸峡面板堆石坝典型剖面见图 1。

3.2 软岩料填筑方案

为了尽可能的利用软岩料,本文根据相应的规范,通过改变次堆石区上游边界线的坡比,扩大了软岩料的利用范围见图 2,图中 b 表示软岩料范围扩大后的上游边界线,坡比 1: 0.2。

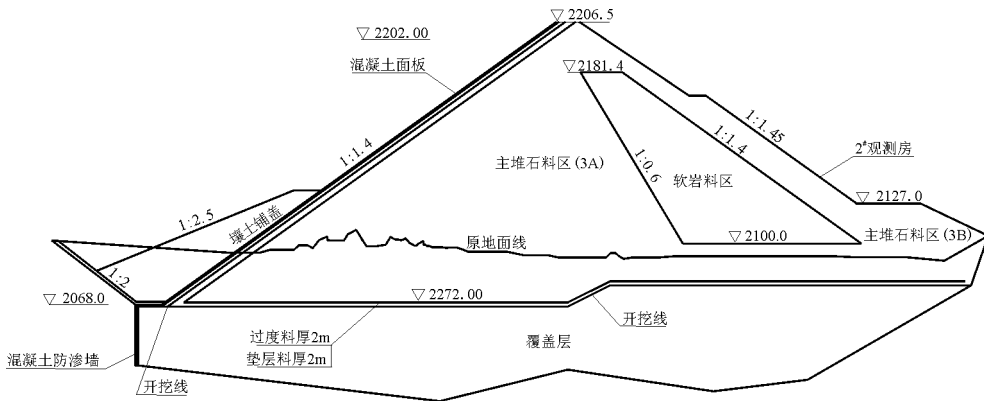


图 1 九甸峡面板堆石坝典型剖面图

3.3 渗流分析

坝体稳定渗流期的浸润线作为湿化变形的范围边界线,浸润线以下计算时考虑湿化变形,浸润线以上不考虑湿化变形。因此大坝的浸润线位置的确定非常重要,本实例拟定大坝稳定渗流计算工况为:大坝正常运行,上游水位为 2 202 m,下游无水。本文采用 GEO - SLOPE 软件中的 Seep/W 模块进行大坝最大断面的二维稳定渗流分析计算,计算参数见表 1,结果见图 3。

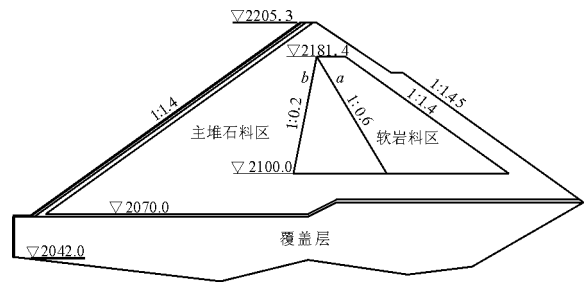


图 2 软岩料利用方案示意图

表 1 坝体材料及坝基渗透系数

混凝土面板	垫层	过渡层	主堆石区	次堆石区	覆盖层	防渗墙	基岩
1×10^{-8}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}	2.04×10^{-2}	5×10^{-2}	5×10^{-7}	1.6×10^{-5}

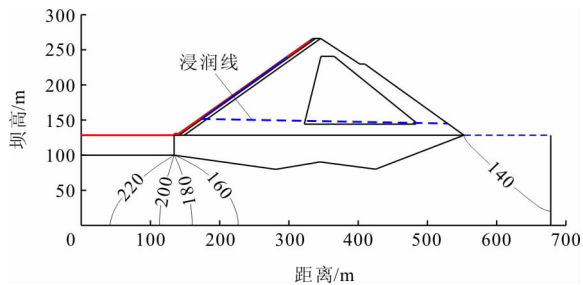


图 3 浸润线及渗流水头(单位:m)等值线图

3.4 有限元模型

本文三维计算模型按照横断面图和纵剖面图^[17],计算时坝基取至基岩面,上游取至防渗墙向上游 30 m,下游取至排水棱体,同时不考虑左右岸边岩体变形。坝基底部为固定铰约束,在坝肩左右两侧施加法向约束,上游坝坡坡比取 1: 1.4,下游坝坡取平均坝坡 1: 1.45,不考虑上坝公路。

整个模型一共划分 8 个材料区,网格主要采用 8 节点六面体,共 3 492 个单元,4 029 个节点。九甸峡面板堆石坝三维有限元网格图见图 4,九甸峡面板堆石坝典型断面网格图见图 5。

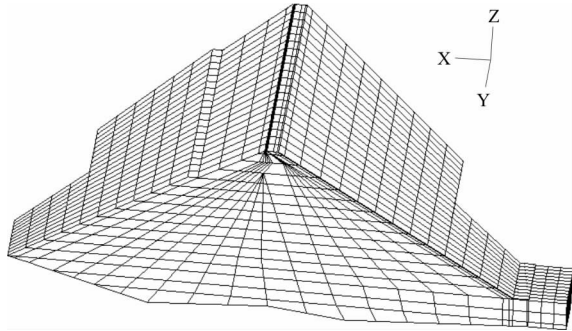


图 4 九甸峡面板堆石坝三维有限元网格图

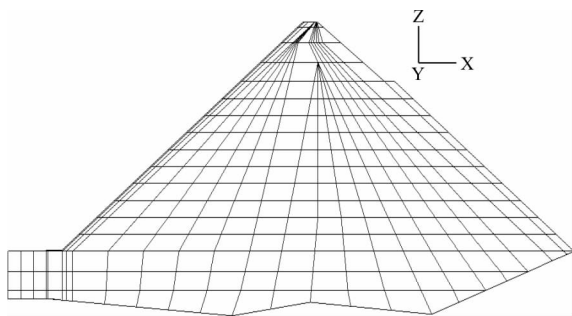


图 5 九甸峡面板堆石坝最大断面网格图

3.5 计算参数和计算工况

在软件计算中,防渗墙、趾板、连接板和面板涉及

参数见表 2。堆石料和覆盖层都采用 Duncan - ChangE - B 本构模型^[18]计算,大坝土石料所需的参数来自室内大型三轴试验成果^[19-21],涉及参数见表 3。由于本文所采用流变和湿化模型所需参数缺少其相关资料,因此采用工程类比法,确定了七参数流变模型参数和改进的沈珠江湿化模型参数见表 4~5。

本文的研究重点是软岩料的流变、湿化效应对软岩料填筑面板坝在竣工期和蓄水期应力变形的影响。按不考虑软岩料流变、湿化效应大坝的竣工期和蓄水期以及考虑软岩料流变、湿化效应大坝的竣工期和蓄水期 4 种工况,分别进行其应力变形的三维有限元计算。

3.6 计算结果分析

4 种工况坝体横断面垂直位移等值线图分别见图 6~9。从图 6~9 中可以看出,不考虑流变和湿化的竣工期、蓄水期大坝横断面最大垂直位移分别为 -0.451、-0.459 m,考虑流变及湿化后的竣工期、蓄水期大坝横断面最大垂直位移分别为 -0.507、-0.526 m,不同工况下坝体横断面最大垂直位移三维有限元计算结果见表 6。

从表 6 可以看出:(1)考虑流变和湿化变形比不考虑流变和湿化变形的竣工期、蓄水期大坝横断面最大垂直位移分别增加了 0.056、0.067 m,可见无论是竣工期还是蓄水期,在计入流变和湿化后,大坝横断面最大垂直位移都有显著的增大,但相对而

表 2 线弹性材料参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ
趾板、连接板、面板	2400	30.0	0.167
防渗墙	2400	25.5	0.167

表 3 坝体材料 Duncan - ChangE - B 本构模型的参数表

材料	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C / Pa	$\varphi / (^\circ)$	$\Delta \varphi / (^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
垫层料	2280	0	58.1	14.5	1750	0.43	0.768	1200	0.41	3500	0.43
过渡料	2250	0	54.1	10.5	1500	0.55	0.907	1250	0	3000	0.55
主堆石	2200	0	50.9	8.5	1400	0.53	0.919	1000	0	2800	0.53
次堆石料	2160	0	50.9	8.5	1120	0.53	0.919	800	0	2240	0.53
覆盖层	2090	0	46.4	5.8	700	0.31	0.798	210	0.28	1400	0.31

表 4 七参数流变模型参数

材料	a	b	c	d	m_1	m_2	m_3
主堆石料	0.006	0.0006	0.0002	0.004	0.769	0.635	0.550
次堆石料	0.005	0.0007	0.0004	0.0043	0.802	0.664	0.717
覆盖层	0.007	0.0003	0.0001	0.0025	0.770	0.631	0.530

表5 湿化模型计算参数

材料	a	b	D_w
垫层料	1.90	14.60	0.30
过渡料	0.80	2.40	1.70
主堆石	1.20	1.00	0.90
覆盖层	0.93	0.59	0.58
次堆石	1.50	5.20	0.90

言流变和湿化对蓄水期的影响更大,说明材料的流

变和湿化效应对变形量影响显著。(2)另外在都不考虑流变和湿化时,蓄水期大坝横断面最大垂直位移比竣工期增加了0.008 m,在都考虑流变和湿化时,蓄水期大坝横断面最大垂直位移比竣工期增加了0.019 m,可见无论是否考虑流变和湿化,蓄水期大坝横断面最大垂直位移相比竣工期都略有增加,但相对而言考虑流变和湿化后,蓄水期大坝横断面最大垂直位移比竣工期增加的更多。

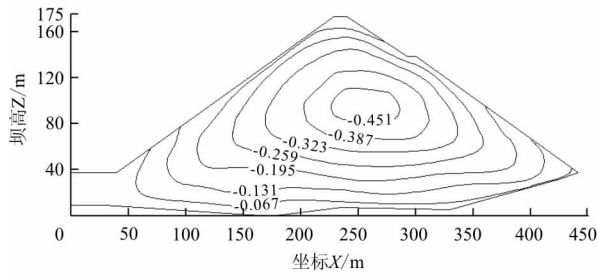


图6 不考虑流变和湿化竣工期坝体横断面垂直位移等值线图(单位:m)

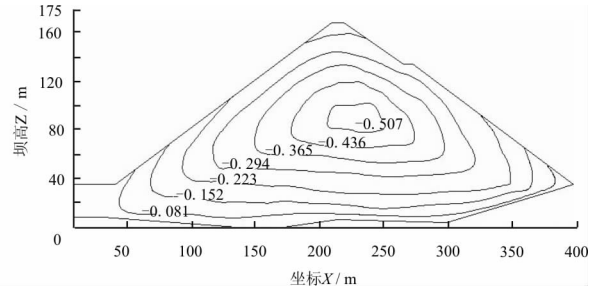


图7 考虑流变和湿化竣工期坝体横断面垂直位移等值线图(单位:m)

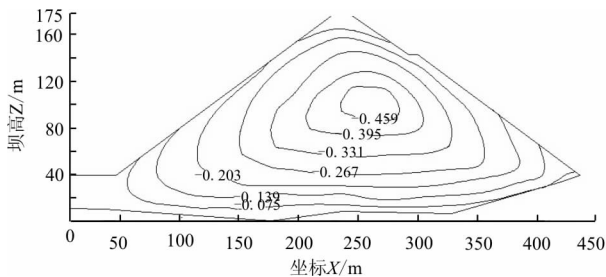


图8 不考虑流变和湿化蓄水期坝体横断面垂直位移等值线图(单位:m)

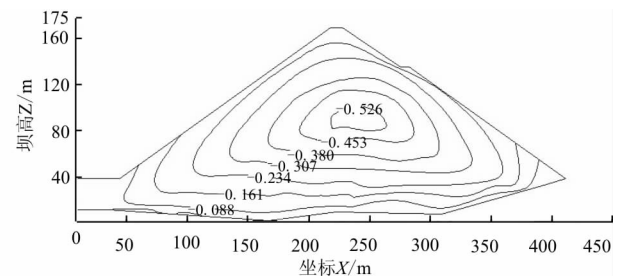


图9 考虑流变和湿化蓄水期坝体横断面垂直位移等值线图(单位:m)

表6 不同工况下坝体横断面最大垂直位移

不计流变及湿化竣工期(1)	计流变及湿化竣工期(2)	不计流变及湿化蓄水期(3)	计流变及湿化蓄水期(4)	(3) - (1)	(4) - (2)	(2) - (1)	(4) - (3)
-0.451	-0.507	-0.459	-0.526	-0.008	-0.019	-0.056	-0.067

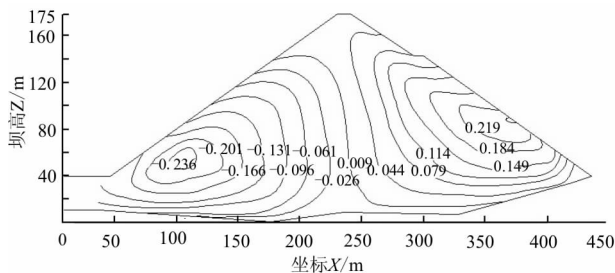


图10 不考虑流变和湿化竣工期坝体横断面水平位移等值线图(单位:m)

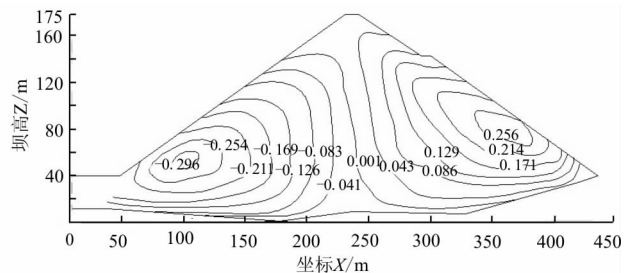


图11 考虑流变和湿化竣工期坝体横断面水平位移等值线图(单位:m)

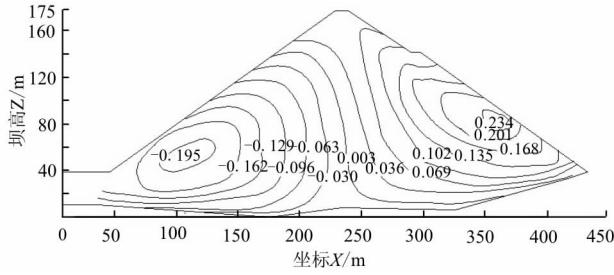


图 12 不考虑流变和湿化蓄水期坝体横断面水平位移等值线图(单位:m)

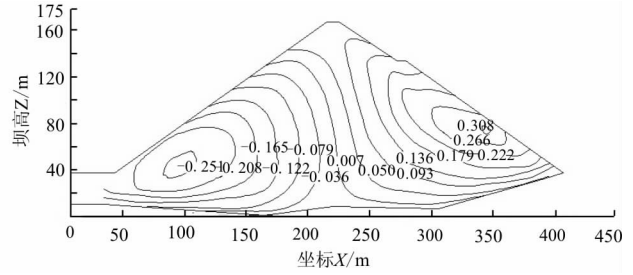


图 13 考虑流变和湿化蓄水期坝体横断面水平位移等值线图(单位:m)

4 种工况坝体横断面水平位移等值线图分别见图 10 ~ 13。

从图 10 ~ 13 中可以看出,不考虑流变和湿化坝体横断面竣工期大坝向上游最大位移为 -0.236 m,位置在坝体的底部且靠近上游坝坡,向下游最大位移为 0.222 m,约在大坝的 1/3 处且接近下游坝坡,蓄水后向上游最大位移为 -0.195 m,向下游最大位移为 0.234 m。考虑流变和湿化蓄水期坝体向上游最大位移分别为 -0.296、-0.251 m,向下游最大位移分别为 0.256、0.308 mm。不同工况下坝体横断面最大水平位移三维有限元计算结果见表 7。

从表 7 可以看出:(1)考虑流变和湿化变形比不考虑流变和湿化变形的竣工期、蓄水期大坝向上游最大位移分别增加了 0.06、0.056 m,向下游最大位移分别增加了 0.034、0.074 m,可见无论是竣工期还是蓄水期,在计入流变和湿化后,坝体向上游、向下游位移都有显著的增大,在上游,竣工期影响略大,在下游,蓄水期影响略大。(2)蓄水后由于水荷载的作用和坝体材料的湿化变形坝体向上游位移量明显减小,向下

游位移量明显增加,可见蓄水后对坝体横断面影响较大。在都不考虑流变和湿化时,蓄水期大坝向上游最大位移比竣工期减少了 0.041 m,向下游最大位移比竣工期增加了 0.012 m,在都考虑流变和湿化时,蓄水期大坝向上游最大位移比竣工期减少了 0.045 m,向下游最大位移比竣工期增加了 0.052 m,可见无论是否考虑流变和湿化,蓄水期大坝向上游最大位移相比竣工期都减少了,蓄水期大坝向下游最大位移相比竣工期都增加了,但相对而言考虑流变和湿化后,蓄水期大坝向上游、向下游最大位移比竣工期分别减少的更多和增加的更多。

4 种工况坝体横断面大主应力等值线图分别见图 14 ~ 17:

从图 14 ~ 17 中可以看出,不考虑流变和湿化的竣工期、蓄水期大坝大主应力最大值分别为 2.326、2.487 MPa,考虑流变和湿化后的竣工期、蓄水期大坝大主应力最大值分别为 2.439、2.605 MPa,不同工况下坝体横断面大主应力最大值三维有限元计算结果见表 8。

表 7 不同工况下坝体横断面最大水平位移

不计流变及湿化竣工期(1)	计流变及湿化竣工期(2)	不计流变及湿化蓄水期(3)	计流变及湿化蓄水期(4)	(3) - (1)	(4) - (2)	(2) - (1)	(4) - (3)
-0.236	-0.296	-0.195	-0.251	0.041	0.045	-0.06	-0.056
0.222	0.256	0.234	0.308	0.012	0.052	0.034	0.074

注:最大水平位移为负值表示向上游位移,为正值表示向下游位移。

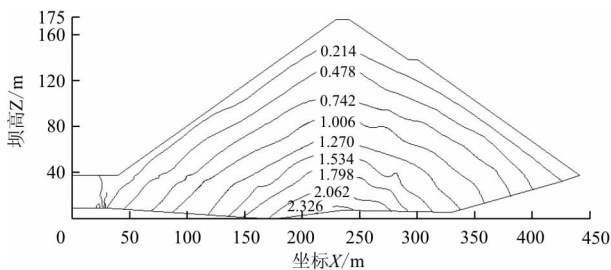


图 14 不考虑流变和湿化竣工期坝体横断面大主应力等值线图(单位:MPa)

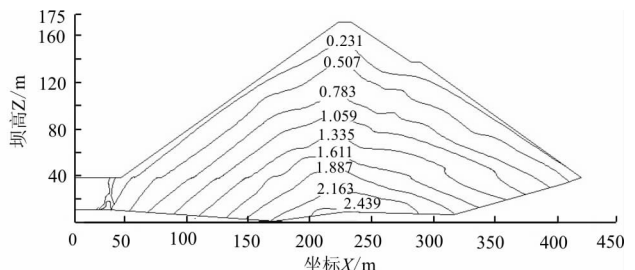


图 15 考虑流变和湿化竣工期坝体横断面大主应力等值线图(单位:MPa)

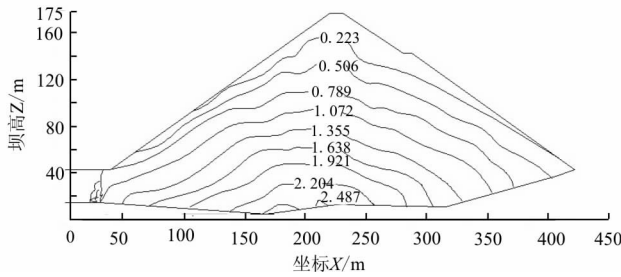


图 16 不考虑流变和湿化蓄水期坝体横断面
大主应力等值线图(单位:MPa)

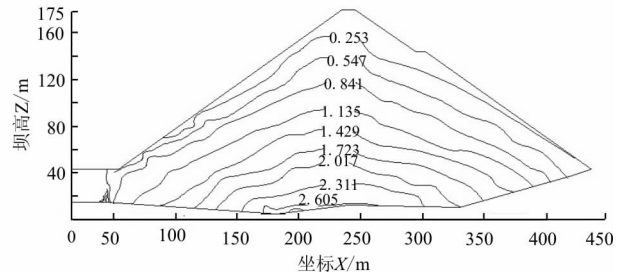


图 17 考虑流变和湿化蓄水期坝体横断面
大主应力等值线图(单位:MPa)

表 8 不同工况下坝体横断面大主应力最大值

				MPa			
不计流变及湿 化竣工期(1)	计流变及湿 化竣工期(2)	不计流变及湿 化蓄水期(3)	计流变及湿 化蓄水期(4)	(3) - (1)	(4) - (2)	(2) - (1)	(4) - (3)
2.326	2.439	2.487	2.605	0.161	0.166	0.113	0.118

从表 8 可以看出:(1)考虑流变和湿化变形比不考虑流变和湿化变形的竣工期、蓄水期大坝横断面大主应力最大值分别增加了 0.113、0.118 MPa,可见无论是竣工期还是蓄水期,在考虑流变和湿化后,坝体横断面的主应力都有显著的增大,但相对而言流变和湿化对蓄水期的影响略大。(2)另外在都不考虑流变和湿化时,蓄水期大坝横断面大主应力最大值比竣工期增加了 0.161 MPa,在都考虑流变和湿化时,蓄水期大坝横断面大主应力最大值比竣工期增加了 0.166 MPa,可见无论是否考虑流变和湿化,蓄水期大坝横断面大主应力最大值相比竣工期都显著增加,但相对而言考虑流变和湿化后,蓄水期大坝横断面大主应力最大值比竣工期增加的更多。

4 结 论

随着面板堆石坝坝高的不断增加、坝址地形条件的日趋复杂以及使用筑坝材料类型的不断扩宽,对面板堆石坝的理论与试验研究将更加深入,软岩料的利用也会越来越多,因此其长期的流变、湿化效应对软岩料填筑面板坝安全至关重要。本文在软岩料流变、湿化特性进行分析的基础上,进行其应力变形的三维有限元计算。对比以上计算成果可以发现:

(1) 无论是否考虑流变和湿化,蓄水期大坝横断面最大垂直位移、向下游位移、大主应力相比竣工期都有增加,但蓄水期大坝向上游最大位移比竣工期减少了,但相对而言考虑流变和湿化后增加和减少的更明显。

(2) 无论是竣工期还是蓄水期,在考虑流变和湿化后,大坝横断面最大垂直位移、水平位移、大主

应力都有显著的增大,但相对而言流变和湿化对蓄水期大坝的影响更大,可见软岩料的流变和湿化效应对坝体有较大的影响,并且在大坝蓄水时,更需要对其湿化与流变性能进行研究,以确保坝体的安全稳定。

因此,在竣工期考虑软岩料的流变效应,在蓄水期考虑软岩料的流变和湿化效应是必要的,在实际工程施工中,应基于坝体软岩料流变、湿化分析结果,采取相应的措施,尽量减小软岩料流变、湿化对于坝体及面板应力变形的影响。

参考文献:

- [1] 徐泽平,邵宇,梁建辉. 软岩筑面板堆石坝的坝体断面分区研究[J]. 水利学报,2004(1):62-66.
- [2] 胡洲,刁心宏,王继飞. 浅谈软岩流变性的研究[J]. 江西科学,2006(3):309-313.
- [3] 花俊杰,常晓林,周伟. 高堆石坝流变研究进展[J]. 水力发电学报,2010,29(4):194-199.
- [4] DAVIS O R. Pounding of buildings modeled by an impact oscillator [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992,21(3):253-274.
- [5] CHAU K T, WEI X X. Pounding of structures modelled as non-linear impacts of two oscillators [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001,30(5):633-651.
- [6] JANKOWSKI R. Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10):2818-2829.
- [7] 赵跃辉. 金峰水库沥青混凝土心墙堆石坝坝壳料流变及其湿化变形[J]. 中国水能及电气化,2017(6):44-48+70.

- [8] 孙振远. 堆石料工程特性及面板堆石坝应力变形研究 [D]. 南京:南京水利科学研究院,2003.
- [9] PAPADRAKAKIS M, MOUZAKIS H P. Earthquake simulator testing of pounding between adjacent buildings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 24 (6): 811 - 834.
- [10] 孙振远, 蒋新文, 韩华强. 不同试验方法对堆石料湿化变形的影响 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16 (1): 189 - 193.
- [11] 米占宽. 高面板坝坝体流变性状研究 [D]. 南京:南京水利科学研究院,2001.
- [12] 方维凤. 混凝土面板堆石坝流变研究 [D]. 南京:河海大学,2003.
- [13] 王刚, 王瑞骏, 陈前玲, 等. 软岩料填筑面板堆石坝湿化变形分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23 (1): 135 - 138 + 141.
- [14] 沈珠江. 土石料的本构模型和土质心墙坝蓄水变形数值模拟 [M]. 南京:南京水利科学研究院,1989.
- [15] 李全明, 于玉贞, 张丙印, 等. 黄河公伯峡面板堆石坝三维湿化变形分析 [J]. *水力发电学报*, 2005 (3): 24 - 29.
- [16] 关志诚. 混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [17] 赵一新. 深覆盖层地基高面板堆石坝应力变形动力有限元分析 [D]. 西安:西安理工大学,2009.
- [18] 吴桂兰, 迟守旭, 李永华. 在有限元软件中开发实现 Duncan - Chang 本构模型的方法研究 [J]. *水利水电工程设计*, 2010, 29 (4): 8 - 11.
- [19] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30 (5): 1237 - 1240 + 1246.
- [20] 彭凯, 朱俊高, 王观琪. 堆石料湿化变形三轴试验研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41 (5): 1953 - 1960.
- [21] 陈金锋, 徐明, 宋二祥, 等. 不同应力路径下石灰岩碎石力学特性的大型三轴试验研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29 (8): 195 - 201.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库 (Chinese Science Citation Database, 简称 CSCD) 收录为 2017 - 2018 年度来源期刊。2017 年又被中国科学评价中心 (RCCE)、武汉大学图书馆和中国科教评价网联合完成的第五版《中国学术期刊评价报告 (2017 - 2018)》评价为 A 类核心期刊。