

流变对面板砂砾石坝应力变形的影响研究

李 阳¹, 任 亮², 王瑞骏¹, 荆慧斌¹, 牛文龙¹, 郭兰春¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 为研究砂砾石料流变对面板砂砾石坝应力变形的影响规律, 在对砂砾石料的流变机理及其分析方法进行分析与选择的基础上, 以某高面板砂砾石坝为例, 运用三维有限元法, 按不考虑砂砾石料流变效应和考虑砂砾石料流变效应两种计算方案, 分别进行其应力变形的三维有限元计算, 然后通过对计算方案所获计算结果的对比分析, 系统总结砂砾石料流变对面板砂砾石坝应力变形的影响规律。结果表明: 砂砾石料流变使得坝体的应力变形呈现逐渐增大的趋势; 流变对于坝体向上游水平位移的影响最大, 对坝体向下游水平位移和坝体竖向位移的影响次之, 对面板挠度和面板顺坡向应力的影响则相对较小。因此, 在实际面板砂砾石坝工程设计中, 考虑砂砾石料的流变效应是十分必要的。

关键词: 面板砂砾石坝; 流变特性; 应力变形; 砂砾石料

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0123-06

Study on effect of rheological on stress and deformation of sand-gravel-fill dam

LI Yang¹, REN Liang², WANG Ruijun¹, JING Huibin¹, NIU Wenlong¹, GUO Lanchun¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The paper studied the law of influence of sand-gravel-fill rheology on stress deformation of CFRD. By means of analyzing and selecting the rheological mechanism and rheological analysis of the sand-gravel-fill, and combining with the engineering practice of concrete face sand-gravel-fill dam, and using three-dimensional nonlinear finite element method, the paper analyzed the effect of rheological on stress and deformation of the dam and used two calculation program of considering sand-gravel rheological effects or not. It then analyzed and compared the the results of two calculation program, and systematically summarized the effect of rheological on stress and deformation of dam. The results show that the rheology makes the stress and deformation of dam and the panel shows a tendency of increase. The effect of rheology on the displacement of upstream of dam is greater, and that on downstream and vertical displacement is lesser. The effect on panel deflection and panel stress along downslope is very small. Therefore, it is necessary to consider the rheological effect of sand-gravel-fill in engineering practice.

Key words: concrete-faced sand-gravel-fill dam; rheological property; stress and deformation; sand-gravel

面板堆石坝的主体筑坝材料为砂砾石料。面板砂砾石坝的结构分析目前大多是根据邓肯-张 E-B 模型或沈珠江双屈服面弹塑性模型采用非线性有限元法和弹塑性有限元方法进行计算分析, 此分析方法所计算的结果能较好地反映大坝结构的应力应

变状况^[1]。然而, 实际的砂砾石料既不是弹性体也不是塑性体, 而是具有弹性、塑性和粘性的综合体, 其压缩变形不只是应力状态的函数, 而且与时间因素有关, 即具有流变效应。而上述非线性有限元法和弹塑性有限元法均未考虑砂砾石料的流变效应的影响, 其计算结果不能完全反映大坝的真实应力变

收稿日期: 2014-04-11; 修回日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介: 李 阳(1991-), 男, 陕西延安人, 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, 教授, 主要从事坝工应力研究。

形性态,且实际观测中砂砾石料的流变变形也比较明显^[2]。砂砾石面板堆石坝由于砂砾石料级配不均匀、施工易产生粗细骨料分离等原因易引起坝体产生流变效应,因此对砂砾石面板堆石坝在结构分析时考虑砾石料的流变特性是十分必要的。本研究拟结合面板砂砾石坝工程实际,在对砂砾石料的流变特性、流变计算模型及其有限元计算方法进行分析与选择的基础上,结合国内一高面板砂砾石坝工程实例,研究和探讨砂砾石流变效应对面板砂砾石坝应力变形的影响规律,以期对砂砾石坝的应力应变分析提供参考。

1 砂砾石料的流变机理及其分析方法

1.1 砂砾石料的流变机理

砂砾石料的流变特性分析实际上很复杂,它不但涉及到填筑料的力学特性而且还与其物理性质有关。就材料变形产生的机理分析,主要包括外力变形和流变变形两个阶段^[3]。其中第一阶段也称为主压缩变形阶段,表现为砂砾石料在施工碾压作用下由松散的颗粒状态逐渐转化为密实状态,此阶段伴随着颗粒棱角大量破碎、空隙减小及结构重新调整。而流变变形阶段是以施工完成为起点,整个坝体随时间在自身和外界因素影响下,颗粒间接触点继续错动或破坏,并在到达一定程度后趋于稳定。外界因素所引起的流变变形主要是由于填筑料在日晒雨淋、温度循环、大气氧化等侵蚀下颗粒间接触面积以及摩阻力减小造成的。总体上坝体的流变变形是在不断的颗粒破碎、滑移、重新排列-接触应力释放、调整和应力重新分配的循环中进行的,最后在较长时间内变形增量逐步放缓并趋于停止,填筑料不再发生破碎^[4]。

1.2 砂砾石料的流变模型

目前工程界中有几种应用较多的经验流变模型,其中包括三参数模型,改进后的三参数模型,双屈服面模型,九参数幂级数模型,七参数模型。这几种模型中,三参数模型虽然能在一定程度上反映出填筑料的流变发展规律,但对于处于复杂应力环境下的高面板砂砾石坝,所得的结果可能会存在较大的误差^[5]。改进后的三参数模型,在一定程度上完善了最终剪切流变和最终体积流变的应力水平和围压的关系,但是未计入高应力水平对最终体积流变的影响。双屈服面模型假定填筑料的变形包括压缩变形、膨胀变形以及与时间有关的流变变形,这种模型可以较为真实的描述材料的流变发展过程,但在

理论上不成熟,且在实际应用上也较为复杂,所以在实际应用中受到限制;相比之下,经过改进后的七参数模型不仅计入了材料的围压作用,同时也考虑了剪应力的影响,并且在模拟中更真实的体现了流变量随荷载增加其增量逐渐减小的趋势。另外,考虑到现今相关学者对其研究比较深入,模型理论和参数也较为简便,因此本文拟选用七参数模型作为工程实例部分的输入对象。

下面对七参数模型进行简要介绍:七参数 Merchant 粘弹性模型^[6-8],在常应力下 $\varepsilon-t$ 衰减曲线形式如下:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_i + \varepsilon_f(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

式中: ε_t 为 t 时刻的流变量; ε_i 为初始流变量; ε_f 为时间 t 开始的最终流变量; α 为初始相对变形率。对上式求导得流变速率,将流变速率分解为体积流变速率 $\dot{\varepsilon}_v$ 和剪切变形速率 $\dot{\gamma}$,计算公式如下:

$$\dot{\varepsilon}_v = \alpha \varepsilon_{vf}(1 - \varepsilon_{vt}/\varepsilon_{vf}) \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \alpha \gamma_f(1 - \gamma_t/\gamma_f) \quad (3)$$

式中: ε_{vf} 和 γ_f 为最终体积流变和最终剪切流变量; ε_{vt} 和 γ_t 为 t 时刻已经累计的体积流变和剪切流变量; α 为初始相对变形率。

公式中 ε_{vf} 和 γ_f 按下式计算:

$$\varepsilon_{vf} = b(\sigma_3/p_a)^{m_1} + c(q/p_a)^{m_2} \quad (4)$$

$$\gamma_f = d(S_l/(1 - S_l))^{m_3} \quad (5)$$

式中: $\alpha, m_1, m_2, m_3, b, c, d$ 为计算公式的 7 个参数; σ_3 为小主应力; p_a 为一个标准大气压; S_l 为应力水平值; q 为剪应力。

公式中 ε_{vt} 和 γ_t 按下式计算:

$$\varepsilon_{vt} = \sum \dot{\varepsilon}_v \Delta t, \gamma_t = \sum \dot{\gamma} \Delta t \quad (6)$$

在 Prandtl - Reuss^[9-10] 的假设下,应变率的张量可以表示为:

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \dot{\varepsilon}_v/3 + \dot{\gamma}\{s\}/\sigma_s \quad (7)$$

式中: $\{s\}$ 为偏应力; σ_s 为广义剪应力。

1.3 砂砾石料流变分析的有限元法

为了模拟面板坝分层填筑的施工过程,程序中加荷也采用分级加载的方案。然而砂砾石料流变效应的发生是从填筑完成后即刻开始的,由于坝体各填筑层的完成时间受到施工碾压的影响,因此不同部分的流变变形起始时间也有所差异。为解决此问题,本文程序拟采用增量分析方法模拟坝体的流变发展^[11]。

设在某一时间段 Δt 内,填筑料的体积流变增量 $\Delta\varepsilon_v$ 和剪切流变增量 $\Delta\gamma$ 分别为:

$$\Delta \varepsilon_v = \dot{\varepsilon}_v \Delta t, \Delta \gamma = \dot{\gamma} \Delta t \tag{8}$$

则在 $t = \sum \Delta t$ 时刻累积的体积流变量 ε_{vt} 和剪切流变量 γ_t 可以表示为:

$$\varepsilon_{vt} = \sum \dot{\varepsilon}_v \Delta t = \sum \alpha \varepsilon_{vf} (1 - \varepsilon_{vt} / \varepsilon_{vf}) \Delta t \tag{9}$$

$$\gamma_t = \sum \dot{\gamma} \Delta t = \sum \alpha \gamma_f (1 - \gamma_t / \gamma_f) \Delta t \tag{10}$$

根据 prandtl - Reuss 流动法则填筑料的变形速率张量表示为:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_v + \dot{\gamma} \frac{\{S\}}{\sigma_s} \tag{11}$$

相应流变增量的分量可以表示成:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \varepsilon_{xy} \\ \Delta \varepsilon_{yz} \\ \Delta \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_v \Delta t \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \frac{\dot{\gamma}}{q} \Delta t \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ 2\tau_{xy} \\ 2\tau_{yz} \\ 2\tau_{zx} \end{Bmatrix} \tag{12}$$

式中: q 为广义剪应力, $\{S_x, S_y, S_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{yz}, 2\tau_{zx}\}^T$ 为偏应力。

增量分析法在计算中仅与时间增量 Δt 有关,而与其他因素无关,这就避免了因各填筑层的流变变形起始时间点不同而带来的计算困难。流变有限元分析采用初应力法进行计算。

表 1 填筑料的 E - B 模型参数										$t/m^3, MPa, (^{\circ})$
材 料	ρ_d	c	ϕ	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
垫层料	2.21	0	51.2	1337	0.34	0.91	973	0.23	1500	0.34
过渡料	2.18	0	48.3	887	0.28	0.85	654	0.33	1420	0.28
主堆石料	2.24	0	48.8	1420	0.34	0.89	890	0.31	1600	0.34
次堆石料	2.22	0	46.2	596	0.38	0.76	476	0.27	1020	0.38
坝基覆盖层	2.25	20	44.0	1500	0.30	0.89	1000	0.25	1800	0.30

表 2 七参数流变模型参数							
材 料	a	b	c	d	m_1	m_2	m_3
主堆石区(砂砾石料)	0.007	0.0003	0.0001	0.0025	0.770	0.631	0.530
次堆石区(石渣料)	0.006	0.0006	0.0002	0.0040	0.769	0.635	0.550

2.3 有限元模型

本工程实例利用有限元软件 ADINA 辅助计算。考虑到该坝坝址段的河谷情况,整个坝体模型的剖分主要采用六面体八节点单元,局部辅以四面体四节点单元。接触面单元选用 Goodman 单元。在进行网格剖分时,尽可能地保证单元表面垂向相交,最终剖分得到实体单元 5 778 个,接触面单元 306 个,节点总数 6 707 个。材料分区按大坝设计断面图共

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某水电站大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高为 123.5 m,总填筑量 544 万 m^3 ,其中砂砾石料约为 421 万 m^3 ,防浪墙高 4.7 m,大坝坝顶高程 2 894.5 m,正常蓄水位为 2 887.5 m,坝顶长 438 m,上游坝坡 1: 1.55,下游设有三级马道,其上部坝坡 1: 1.5,其余 1: 1.4。

大坝的标准剖面见图 1 所示。

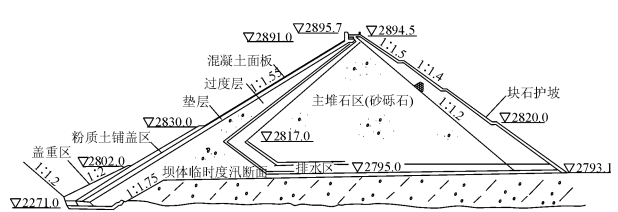


图 1 大坝面板堆石坝标准断面图

2.2 材料的计算参数

经过对本算例面板堆石坝垫层料、过渡料、堆石料和覆盖层进行分析,决定材料的本构模型参数与流变模型参数均参照公伯峡面板堆石坝试验参数^[12-13]。填筑料的 E - B 模型参数见表 1 ,流变模型参数见表 2。

分 6 个区进行模拟,并在面板与下游垫层料之间设置面 - 面接触。坝体三维网格和标准断面网格剖分图如图 2 和图 3 所示。

2.4 计算工况

在计入材料流变影响的有限元分析中,本工程实例共按两种工况进行:(1)蓄水期,共分 24 步进行,每步历时一个月,其中前 16 步模拟大坝填筑到顶高程 2 894.50 m,第 17 到 22 步为半年预留沉降

期,第 23 步浇筑混凝土面板,第 24 步蓄水至正常高水位 2 887.75 m。(2)蓄水后运行两年,整个坝体完成蓄水后再计入材料的两年流变作用时长,即总步数为 48 步。

2.5 计算结果分析

通过软件有限元计算,在蓄水期考虑流变和不考虑流变 2 种计算方案得到的坝体标准横剖面的竖向位移和水平位移分布图分别见图 4~7。从图 4、6 可以看出,不考虑流变下竖向位移值为 0.393 m,在计入材料的流变影响后,蓄水期的坝体最大沉降值为 0.525 m,和不考虑流变时相比增长了 33.6%。由图 5、7 可以看出,不考虑流变时蓄水期向上游位移 0.063 m,向下游 0.126 m。在计入材料的流变影响后,坝体蓄水期的沿河向上游位移为 0.096 m,向下游 0.158 m,和不考虑流变时相比分别增长了 52.4% 和 26.4%,且位移为零的等值线相对于前者更靠近坝轴处。两种方案下的等值线分布趋势都因受到水荷载的推动作用,而整体偏向下游。分析以上计算结果,可以看出材料的流变作用对坝体变形中的沉降量和向上游水平位移影响较大,而对坝体变形的整体分布趋势影响较小。

蓄水期,在考虑流变和不考虑流变 2 种计算方案下,计算得到的面板挠度和顺坡向应力分布图分别见图 8~11。

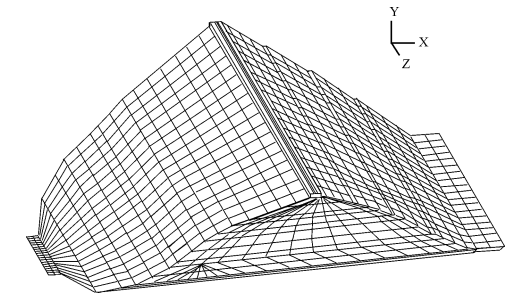


图 2 面板砂砾石坝三维有限元模型

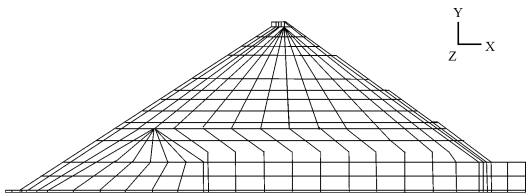


图 3 面板砂砾石坝标准断面网格图

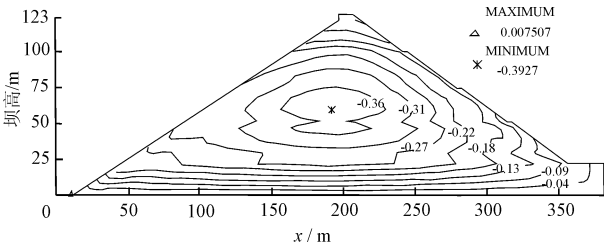


图 4 不考虑流变大坝横断面竖向位移图(单位:m)

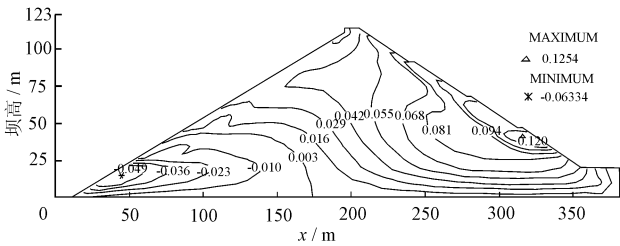


图 5 不考虑流变大坝横断面水平位移图(单位:m)

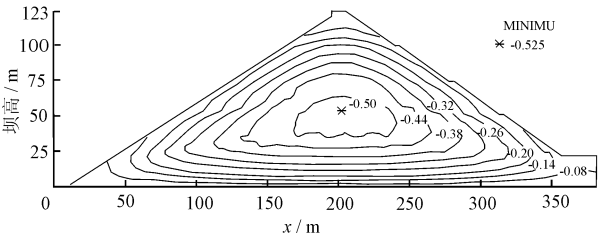


图 6 考虑流变大坝横断面竖向位移图(单位:m)

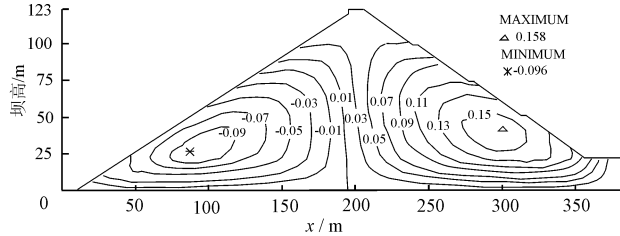


图 7 考虑流变大坝横断面水平位移图(单位:m)

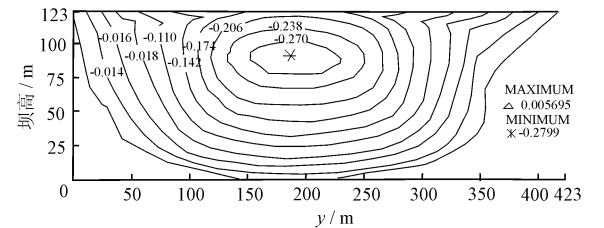


图 8 不考虑流变面板挠度等值线图(单位:m)

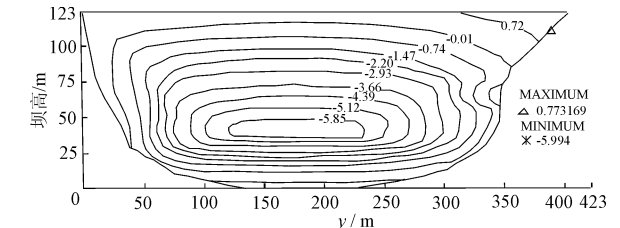


图 9 不考虑流变面板顺坡向应力等值线图(单位:MPa)

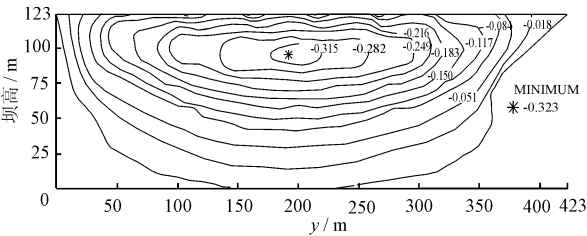


图 10 考虑流变面板挠度等值线图(单位:m)

从图 8、10 可以看出,不考虑流变时混凝土面板的坝内向挠度值为 0.280 m,峰值位于面板中部偏上。考虑流变时面板的挠度为 0.323 m,分布基本上都位于面板的中部偏上处,其中蓄水期的挠度相对于不考虑流变时增加了 15.4%。从图 9、11 可以看出,不考虑流变时,顺坡向压应力峰值大致位于河谷中央的 1/3 坝高处,其值为 5.944 MPa,并在两岸偏上部 and 面板顶部有小范围的拉应力分布区,最大值为 0.773 MPa。在计入材料的流变影响后,面板的顺坡向应力的等值线分布趋势呈扁平状,峰值位于河谷中央的 1/3 坝高处,对应最大值分别为 6.213 MPa,并在两岸偏上部和面板顶部有小范围的拉应力分布区,拉应力最大值对应为 0.941 MPa;

在蓄水后运行两年考虑流变情况下得到的坝体标准横剖面的竖向位移和水平位移分布图分别见图 12 ~ 13,面板挠度和顺坡向应力分布图分别见图 14 ~ 15。

从图 12 可以看出,蓄水运行两年后沉降量有小幅度增加达到 0.553 m,但是这时蓄水期工况沉降量分布规律基本未发生太大变化。从图 13 可以看

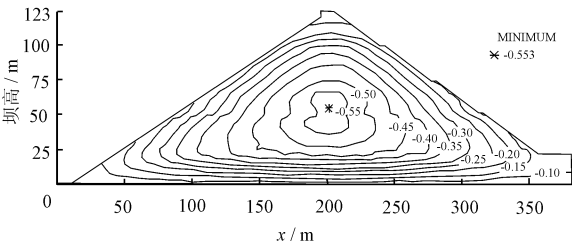


图 12 蓄水运行两年坝体竖向位移等值线图(单位:m)

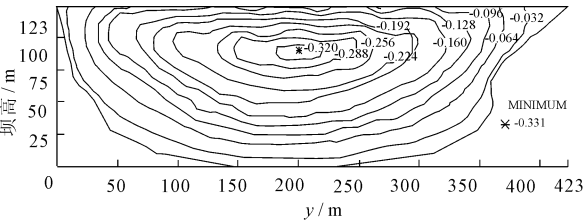


图 14 蓄水运行两年面板的挠度等值线图(单位:m)

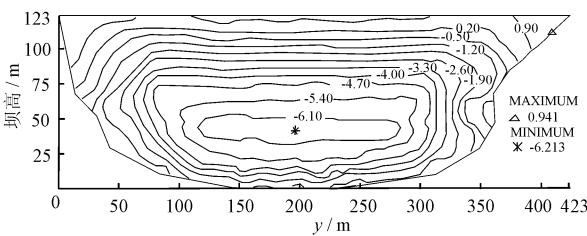


图 11 考虑流变面板顺坡向应力等值线图(单位:MPa)

出蓄水运行两年后向上游水平位移为 0.103 m,向下游 0.164 m,相比于蓄水期数值变化不大,且两种工况下的等值线分布趋势都因受到水荷载的推动作用,而整体偏向下流。从图 14 ~ 15 可以看出,蓄水运行两年后面板的挠度为 0.331 m,分布基本上都位于面板的中部偏上处。面板的顺坡向应力的等值线分布趋势呈扁平状,峰值位于河谷中央的 1/3 坝高处,对应最大值 6.290 MPa,并在两岸偏上部和面板顶部有小范围的拉应力分布区,拉应力最大值对应为 1.020 MPa。

面板坝应力变形三维有限元计算结果汇总表 3。

由表 3 位移和应力计算结果分析,坝体砂砾石料计入流变效应的各项结果均比未计入流变效应结果有所增加,说明砂砾石料在围压作用下颗粒产生破碎、滑移、充填孔隙、引起应力重分布,如此重复直到砂砾石料内部孔隙基本完全充填密实才停止,在宏观上就表现出位移和应力随时间的增加而增大并呈衰减趋势,从而体现出流变对坝体应力变形的影响。具体的流变影响主要体现在以下几个方面:

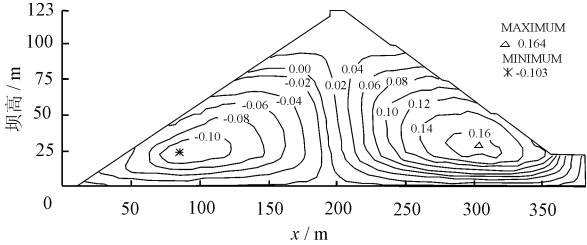


图 13 蓄水运行两年坝体水平向位移等值线图(单位:m)

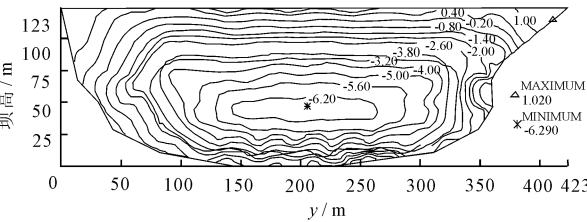


图 15 蓄水运行两年面板的顺坡向应力等值线图(单位:MPa)

表 3 面板坝应力、变形三维有限元计算结果 m, MPa, %

名 称			蓄水期			蓄水运行两年 (计入流变)
			不计入流变	计入流变	增长率	
大坝位移	垂向位移	向下	0.393	0.525	33.6	0.553
		向下游	0.125	0.158	26.4	0.164
	沿河向位移	向上游	0.063	0.096	52.4	0.103
混凝土面板位移	挠度	向坝内	0.280	0.323	15.4	0.331
混凝土面板应力	顺坡向应力	压	5.944	6.213	4.5	6.290
		拉	0.773	0.941	21.7	1.020

(1)对蓄水期的坝体位移分析,考虑流变作用的位移分布规律和不考虑时的基本变化不大,这说明材料的流变效应对坝体变形规律无明显作用。但对于位移量影响较大,其中沿河向上游的位移增加了 52.4%,其余方向也均增加了 30% 左右,说明材料的流变效应对变形量影响显著。

(2)对蓄水期的面板应力变形分析,可以看出材料的流变效应影响较大,这是由于坝体砂砾石料的变形增加,导致面板的应力应变随之变化,因此在设计中需充分考虑材料的流变特性,以防止面板接缝处产生破坏,进而威胁大坝的安全运行。

(3)将考虑流变的蓄水期和蓄水运行两年后的模拟结果进行对比,可以看出无论是应力变形规律还是其数值的变化都不大,这也验证了坝体在流变作用下变形趋于稳定的观点。

(4)分析计算所得有限元结果,虽然在计入砂砾石料的流变作用后坝体的应力变形量均有不同程度的增长,但通过与其他类似工程对比,证明本次成果总体上是合理的。因此,基于有限元结果采取相应的工程措施,这对面板坝的安全正常运行具有一定的积极意义。

3 结 语

作为一种良好的筑坝材料,砂砾石料具有低压缩性、较高的抗剪强度和变形模量,且易开采上坝等优点,在实际工程中,可以优先考虑,但是其长期的流变变形特性对大坝安全至关重要。本文在对砂砾石料的流变分析方法进行分析与选择的基础上,以某高面板砂砾石坝为例,运用三维有限元法,按不考虑砂砾石料流变效应和考虑砂砾石流变效应两种计算方案,分别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:在考虑材料的流变作用后,坝体的应力变形均呈现逐渐增大的趋势。流变对于坝体向上游水平位移的影响最大,对坝体向下游水平位移和坝体竖向位移的影响次之,对面板

挠度和面板顺坡向应力的影响则相对较小。因此,在实际工程设计中,考虑砂砾石料的流变效应是必要的;在实际工程施工中,为尽量减小砂砾石料流变对于坝体及面板应力变形的影响,应基于坝体流变分析结果,在坝体堆石填筑施工后,预留足够的面板施工滞后时间。

参考文献:

[1] 方维凤. 混凝土面板堆石坝流变研究[D]. 南京:河海大学,2003.

[2] 岑威钧. 堆石料亚塑性本构模型及面板堆石坝数值分析[D]. 南京:河海大学,2005.

[3] 单宏伟. 高面板堆石坝模型参数反演及应力变形分析[D]. 北京:清华大学,2008.

[4] 张献才. 考虑堆石流变特性的面板坝三维有限元分析[D]. 南京:河海大学,2007.

[5] 陈沅江. 岩石流变的本构模型及其智能辨识研究[D]. 长沙:中南大学,2003.

[6] 卢继旺,余亚鹏,卢继旺,等. 200 m 级面板堆石坝流变分析[J]. 水电能源科学,2010,28(4):90-92+160.

[7] 周伟,常晓林. 高混凝土面板堆石坝流变的三维有限元数值模拟[J]. 岩土力学,2006,27(8):1389-1392+1397.

[8] 郦能惠,杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. 岩土工程学报,2012,34(8):1361-1368.

[9] 王海俊. 土石坝堆石料的长期变形特性研究[D]. 南京:河海大学,2008

[10] 周治刚. 堆石料变模型及其在面板堆石坝中的应用[D]. 南京:河海大学,2007.

[11] 梁军. 高面板堆石坝流变特性研究[D]. 南京:河海大学,2003.

[12] 李昌彩. 水布垭面板堆石坝前期关键技术研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.

[13] 国家电力公司西北勘测设计研究院. 黄河公伯峡水电站工程初步设计重编报告(第五篇). 枢纽布置及建筑物[R]. 西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,2000.