

砂砾石面板堆石坝流变特性研究

丁战峰¹, 王瑞骏¹, 耿计计², 苏桐麟³, 崔纯厚⁴

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710016;
3. 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 甘肃 兰州 730000; 4. 陕西户县水务局水利管理站, 陕西 西安 710300)

摘要:以乌鲁瓦提砂砾石面板堆石坝为例,分析砂砾石面板坝在考虑流变和不考虑流变情况下坝体在竣工期和蓄水期的位移和应力分布规律,总结流变效应对坝体应力和变形的影响。计算结果表明:计入流变影响后坝体竖向位移和水平位移较未计入流变效应结果都有所增大,大主应力和小主应力也有所增加;从坝体沉降历时曲线和流变附加节点荷载计算结果可以看出,砂砾石料的变形主要在施工期完成,在蓄水后一年流变变形基本结束坝体位移趋于稳定,且计入流变的计算结果与坝体实际检测结果相近。因此,在进行砂砾石面板堆石坝坝体应力变形计算时考虑砂砾石的流变效应是必要的。

关键词:砂砾石; 混凝土面板堆石坝; 流变特性; 应力变形

中图分类号:TV641.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2012)02-0132-05

Research on rheological properties of rock filled dam with sand-gravel face

DING Zhanfeng¹, WANG Ruijun¹, GENG Jiji², SU Tong-lin³, CUI Chunhou⁴

(1. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Sino Hydro Engineering Bureau 3 Co., Ltd, Xi'an 710016, China; 3. Gansu Institute of Water Resources and Hydropower Investigation and Design, Lanzhou 730000, China; 4. Shaanxi Water Conservancy Management Station of Hu County, Xi'an 710300, China)

Abstract: This paper took Wuluwati concrete face sand-gravel dam for example, analyzed the dam displacement and stress distributions of completion period and water storage period in the case of considering sand-gravel rheological or not, and summed up the influence of rheological effect on the stress and deformation of the dam. The results show that the vertical and horizontal displacement of the dam in considering the rheological effect is bigger than the one in not considering the rheological effect, the major and minor principal stress are also increased; from the calculation result of the settlement-time curve and additional node load it can be seen that the deformation of dam is mainly concentrated in the period of construction, the rheological deformation of the dam tends to be stable after a year of water storage, and the rheological calculation result is close to the actual observations result. Therefore, it's necessary to consider the rheological effect when calculating the stress and deformation of concrete face sand-gravel dam.

Key words: sandy gravel; CFRD; rheological property; stress-strain

面板堆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的反映大坝结构的应力应变状况^[1]。然而,实际的堆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,其压缩变形形态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堆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的应力变形性

态,且实际观测中堆石料的流变变形也比较明显^[2]。对于砂砾石填筑的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十分必要。

本文拟结合乌鲁瓦提面板砂砾石坝,采用七参数流变模型分析砂砾石面板堆石坝考虑流变影响的应力变形形态,研究砂砾石面板堆石坝在施工期和运行期的应力变形特性,并与实测结果进行比较,以期对砂砾石面板堆石坝考虑流变效应的结构分析提供参考。

收稿日期:2011-09-21; 修回日期:2011-11-08

作者简介:丁战峰(1986-),男,陕西渭南人,在读硕士,主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

1 流变产生机理及其有限元法

1.1 流变产生机理

面板堆石坝的堆石料属散粒体材料,其颗粒多呈块状、浑圆状等,颗粒之间以邻接接触和咬合连接的形式组成。对于砂砾石料由于其级配不均匀,粗细骨料易分离使颗粒填充不能完全密实,颗粒间接触面易产生滑移。依据变形机理将砂砾石料的变形分为两个阶段:首先是外力变形阶段,经过施工震动碾压使砂砾石料变密实,颗粒之间由于接触点处的应力很高而引起颗粒的分解细化、相对移动、相互充填和结构调整从而产生变形,但外力做功有限,颗粒细化不能完全充填孔隙,变形也只能维持在一个相对稳定的水平;其次是流变变形阶段,此时砂砾石的震动碾压已经结束,但由于颗粒骨架应力的重新分布导致粗细颗粒间产生相对滑移,颗粒排列进一步调整,坝料逐渐趋于密实状态,在宏观上则表现为堆石体的缓慢变形,即流变变形^[3-5],这个阶段的变形量较小且比较平稳,所需时间较长。

1.2 流变本构模型的建立

根据砂砾石料的流变机理和流变特性,流变模型选用指数衰减的7参数 Merchant 粘弹性模型^[1-2,6-7],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 表示最终体积流变和最终剪切流变量; ε_{vt} 和 γ_t 表示 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:

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

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

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_t 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 的假设下,应变率的张量可以表示为:

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

上式中 $\{s\}$ 为偏应力; σ 为广义剪应力^[6]。

1.3 流变有限元分析方法

流变有限元分析采用初应力法进行计算^[2],假定坝体分 N 填筑,每一级荷载分 M 步施加,堆石料采用 E - B 本构模型,按非线性有限元方法计算第 i 个时段内堆石料的弹性变形,得到单元的应力状态,假定这个时间段应力状态不变,求出该时段内的流变分量和松弛应力分量,并计算流变引起的附加荷载增量,将此荷载与上步计算的荷载叠加重新形成荷载列阵和单元刚度矩阵,重新计算应力增量和位移增量,并将其作为下一步计算的初始应力状态。如此反复计算直到所有时间步计算完成则计算结束,有限元计算具体步骤如下^[8-9]。

(1) $T = 0$ 时刻,设定该时刻的位移 $\{\delta\}^0$ 、流变应变 $\{\varepsilon_t\}^0$ 、松弛应力 $\{\sigma_t\}^0$ 及增量 $\{\Delta\delta\}^0$ 、 $\{\Delta\varepsilon_t\}^0$ 、 $\{\Delta\sigma_t\}^0$ 均为 0,初始应力场为自重应力场。

(2) $T > 0$ 时刻,设定坝体共分 N 级荷载填筑,每级荷载各分 M 级加载,第 M_i 级加载对应的时间为 t_i 。

1) 弹性计算。

① 在第 i 级荷载下,时间为 t_i ,按弹性矩阵 $[D]$ 形成劲度矩阵 $[K]$,荷载增量为 $[\Delta R]_i$,根据平衡方程 $[K]\{\Delta\delta\}_i = \{\Delta R\}_i$,求得弹性位移增量 $\{\Delta\delta\}_i$,再根据几何方程求得 $\{\Delta\varepsilon_t\}_i$,由物理方程求得 $\{\Delta\sigma_t\}_i$;

② 应力累加, $\{\delta\}_i = \{\delta\}_{i-1} + \{\Delta\delta\}_i$ 。

2) 流变应变计算。

① 假定 δ_i 在很短时间间隔 $(t_{i+1} - t_i)$ 内保持不变,材料特性也保持不变,根据上述流变模型,分别按(2)、(3)式求得时段内流变应变 $\{\Delta\varepsilon_t\}_i$;

② 确定松弛应力增量, $\{\Delta\sigma_t\}_i = [D]\{\Delta\varepsilon_t\}_i$;

③ 形成 $[D]_i$ 和整体劲度矩阵 $[K]_i$;

④ 形成等效结点附加荷载增量 $\{\Delta R_t\}_i$;

⑤ 求解位移增量 $\{\Delta\delta\}_i = ([K]_i^{-1}) \cdot (\{\Delta R\}_i + \{\Delta R_t\}_i)$;

⑥ 计算应力增量 $\{\Delta\sigma_t\}_i = [D]_i([\Delta\delta\}_i) - \{\Delta\sigma_t\}_i$;

(3) 位移、应力和应变的累加。

$$\{\delta\}_{i+1} = \{\delta\}_i + \{\Delta\delta\}_i$$

$$\{\sigma\}_{i+1} = \{\sigma\}_i + \{\Delta\sigma_t\}_i$$

$$\{\varepsilon\}_{i+1} = \{\varepsilon\}_i + \{\Delta\varepsilon_t\}_i$$

$$\{\sigma_t\}_{i+1} = \{\sigma_t\}_i + \{\Delta\sigma_t\}_i$$

$$\{\varepsilon_t\}_{i+1} = \{\varepsilon_t\}_i + \{\Delta\varepsilon_t\}_i$$

(4) 重复以上步骤,直到计算结束。根据上述理论编制有限元计算程序,以公伯峡面板堆石坝为例验

证程序的正确性,通过计算结果与实际观察结果的对比分析,所编制的程序计算合理,各项计算结果与坝体实际观察结果相近,故证实了程序的可靠性和流变效应计算的合理性,可以在流变计算分析使用。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

乌鲁瓦提水利枢纽大坝由主坝和副坝组成,本文以主坝为例研究分析。主坝设计坝高 138 m,竣工期坝高 133 m,设计坝顶高程 1 965.8 m,防浪墙顶高程 1 967 m,坝顶长度 365 m,上游坝坡 1:1.6,下游设“之”字形马道,平均坝坡 1:1.5,坝体主要填筑材料为河床砂砾石料,下游局部坝体填筑料采用开挖石渣料。下游护坡采用预制六边形混凝土板和干砌石护坡^[10]。坝体标准剖面见图 1。

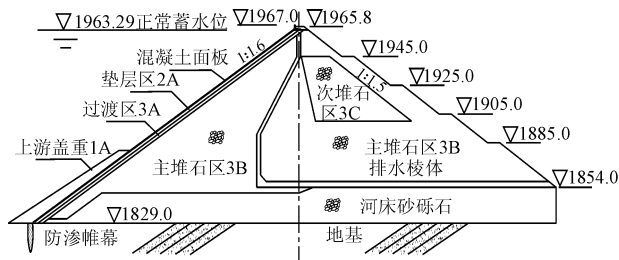


图 1 乌鲁瓦提面板砂砾石坝标准断面图

2.2 计算参数

结构分析时,混凝土面板按线弹性材料考虑,取材料密度 $\rho_d = 2\ 450\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E = 2.0$ 万 MPa,堆石体材料采用邓肯-张 E-B 模型,坝体各分区材料参数见表 1^[10]。其中 ρ_d 表示干密度, c 表示粘聚力, K 表示压缩模量系数, n 表示压缩模量指数, R_f 表示破坏比, m 表示体积模量指数, K_b 表示体积模量系数, K_{ur} 表示卸荷模量系数, n_{ur} 表示卸荷模量指数, φ 表示内摩擦角。

表 1 堆石料 E-B 模型参数 $\text{kg/m}^3, \text{MPa}, (^\circ)$

材料	ρ_d	c	φ	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
垫层料	2.250	0	49	1100	0.40	0.80	1650	0.35	1350	0.40
过渡料	2.250	0	49	1100	0.30	0.75	1650	0.40	1320	0.30
主堆石	2.293	0	43	900	0.35	0.75	1350	0.44	1080	0.35
次堆石	2.254	0	46	400	0.30	0.70	400	0.45	500	0.30
坝基	2.254	0	45	1100	0.40	0.70	1500	0.35	1350	0.40

流变分析采用七参数 Merchant 粘弹性模型,根据流变模型参数选取原则,采用工程类比法^[11]。考虑到乌鲁瓦提面板堆石坝主要坝料为砂砾石料,其最大粒径 600 mm,小于 5 mm 粒径含量为 15.5% ~ 16%,设计干密度为 $2.2\ \text{g/cm}^3$;而公伯峡面板堆石

坝主堆石 3B II 区砂砾石料最大粒径 450 mm,小于 5 mm 粒径含量为 15% ~ 40%,设计干密度为 $2.16\ \text{g/cm}^3$,两种材料级配、抗剪强度指标和施工质量等各项指标均相接近,故可以采用工程类比法确定其计算参数。研究人员对公伯峡面板堆石坝的主要坝料进行流变特性试验分析,得出了坝体各材料对应的七参数流变模型的参数指标^[12]。因此,本文借鉴此研究成果,采用公伯峡面板堆石坝主堆石 3B II 区砂砾石材料的流变参数分析乌鲁瓦提面板堆石坝的流变特性。考虑到乌鲁瓦提面板堆石坝坝体主要填筑料为砂砾石,垫层料、过渡料和次堆石料相对较少,在不影响分析结果的前提下对坝体各材料的流变参数均采用砂砾石料的流变参数进行近似计算,材料参数见表 2。

表 2 砂砾石料流变模型参数

材料	α	m_1	m_2	m_3	b	c	d
砂砾石	0.007	0.770	0.631	0.530	0.00030	0.00010	0.0025

2.3 计算模型

坝体模型计算范围坝基取到基岩面,上游取到趾板顶端,下游取到下游坝角,左右岸取到坝肩基岩。坝体采用八节点六面体单元剖分,按大坝设计断面图模拟面板、垫层区、过渡区、主堆石区和次堆石区等坝体材料的分区布置,在面板与垫层料之间设置接触单元以模拟其接触行为。坝体面板采用线弹性材料,堆石料采用 E-B 模型材料模拟计算。流变分析时流变模型采用七参数 Merchant 粘弹性模型计算。有限元模型设置了单元生死时间,以模拟坝体施工及蓄水过程,坝体分 12 步填筑,分 3 步蓄水,每步历时 30 d,坝体填筑到浇筑面板间隔 180 d,面板浇筑完工即开始蓄水。由于流变在坝体各层填筑后就开始发生,因此在流变分析时,每层坝体填筑完成即开始本层单元的流变分量计算,模型计算总共 40 步,计算到蓄水以后两年时间结束。坝体最大剖面有限元网格如图 2 所示。

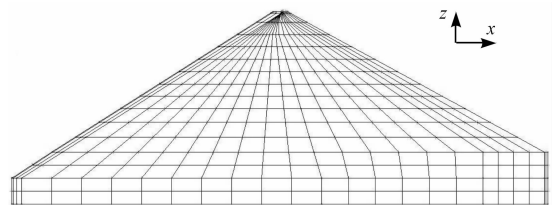


图 2 乌鲁瓦提面板砂砾石坝标准剖面计算网格图

2.4 计算结果分析

利用编写的面板坝三维有限元计算程序分计入流变和不计入流变两种工况,计算乌鲁瓦提面板砂

砾石坝在竣工期、蓄水期的应力变形分布规律和流变特性,根据计算结果分别从坝体位移变形和应力分布两个方面分析流变对计算结果的影响。

(1)流变对坝体位移变形的影响。蓄水期坝体未计入流变和计入流变的竖向位移计算结果如图3和图4所示,从计算结果可见,在未计入流变效应的情况下,坝体竖向位移最大值为43.3 cm,位置发生在坝体中上部,偏下游侧;计入流变效应的情况下,坝体竖向位移最大值为48.8 cm,发生位置和分布规律都与未计入流变计算结果相同。可见流变效应引起坝体竖向位移增大了5.5 cm,增幅为12.7%。

蓄水期坝体未计入流变和计入流变的水平位移计算结果如图5和图6所示,从计算结果可见,在未计入流变效应的情况下,坝体向上游水平位移为16.6 cm,向下游水平位移为20.1 cm,水平位移分布规律基本上沿坝轴线对称分布,位移最大值发生在坝体上下游测中下部;计入流变效应的情况下,坝体向上游水平位移20.4 cm,向下游24.2 cm,分布规律与未计入流变位移分布规律相同。可以看出流变效应引起坝体向上下游水平位移分别增大3.8和4.1 cm,增幅分别为22.9%和20.4%。

(2)流变对坝体应力分布的影响。蓄水期坝体未计入流变和计入流变的大主应力计算结果如图7和图8所示,小主应力计算结果如图9和图10所示。从计算结果可见,在未计入流变效应的情况下,坝体大主应力最大值为2.62 MPa,小主应力最大值为1.03 MPa,应力分布规律如图所示;计入流变效应的情况下,坝体大主应力最大值为2.78 MPa,小主应力最大值为1.17 MPa,应力分布规律都与未计入流变计算结果相近。可以看出,计入流变效应后

坝体大主应力增大了0.16 MPa,增幅为6.2%;小主应力增大了0.14 MPa,增幅为13.6%。

由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。

(3)流变引起的坝体长期变形特性。由坝体监测资料可以看出,坝体变形要持续很长时间才能稳定,而坝体的弹性变形在施工期已经完成,所以坝体的持续变形是由于坝体内材料的流变变形导致的。由流变产生机理可知,随着时间的增加,流变引起的附加节点荷载呈指数型衰减规律,随着时间的增加荷载趋于稳定。图11为本计算模型某一节点的流变附加荷载历时曲线,由图可见,在施工期随着上部填筑高度的增加节点的围压不断增加,流变附加节点荷载也随着增加;当围压增加到一定程度,流变附加荷载不再随围压的增加而增加,而是随着时间的增加逐渐减小,呈指数型衰减,在蓄水一年后附加荷载已很小且趋于稳定,坝体的流变变形也相应趋于稳定。

(4)计算结果与实际观测结果对比。坝体计算模型在计入流变和不计入流变情况下分别计算竣工期、蓄水期和蓄水两年后坝体的应力变形状态,并与实测资料进行比较,计算及观测结果如表3所示。

由表3可见计算中计入流变效应所得各项计算结果较未计入流变效应所得各结果数值有所增加,且与坝体变形的实际观察值更为接近^[13]。通过比较分析可知砂砾石填筑混凝土面板堆石坝使坝体的

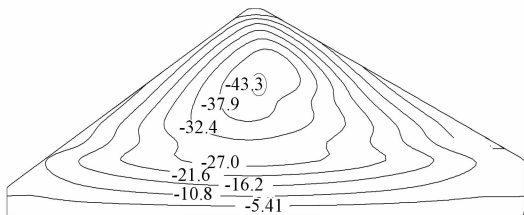


图3 未考虑流变蓄水期坝体竖向位移图(单位:cm)

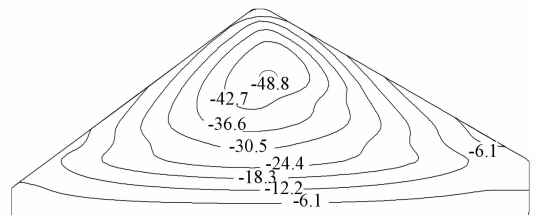


图4 考虑流变蓄水期坝体竖向位移图(单位:cm)

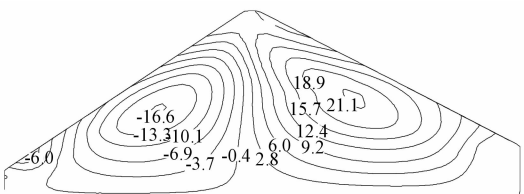


图5 未考虑流变蓄水期坝体水平位移图(单位:cm)

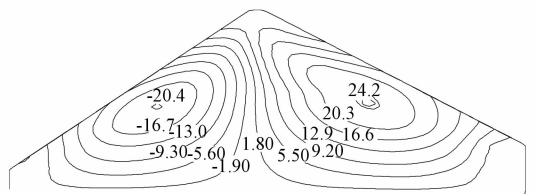


图6 考虑流变蓄水期坝体水平位移图(单位:cm)

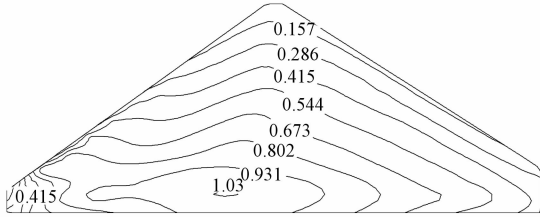


图7 未考虑流变蓄水期坝体大主应力图(单位:MPa)

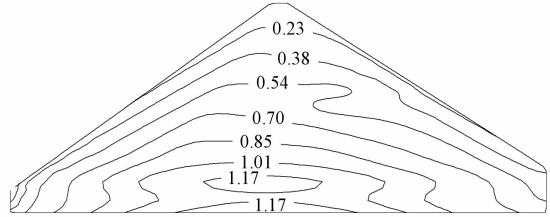


图8 考虑流变蓄水期坝体大主应力图(单位:MPa)

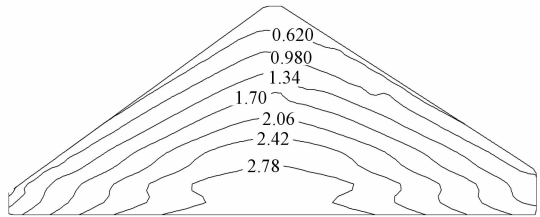


图9 未考虑流变蓄水期坝体小主应力图(单位:MPa)

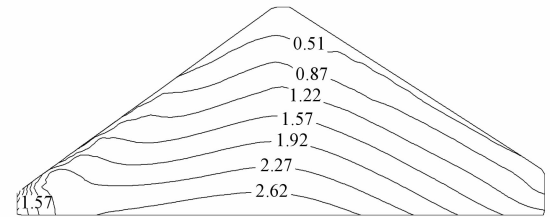


图10 考虑流变蓄水期坝体小主应力图(单位:MPa)

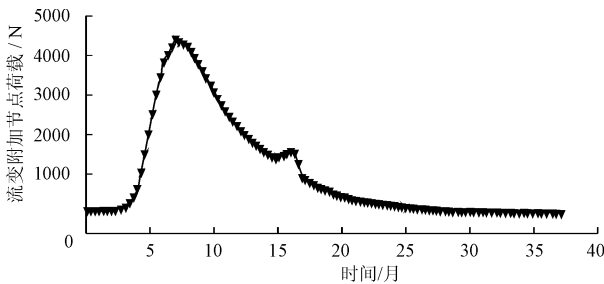


图11 流变附加节点荷载历时曲线图

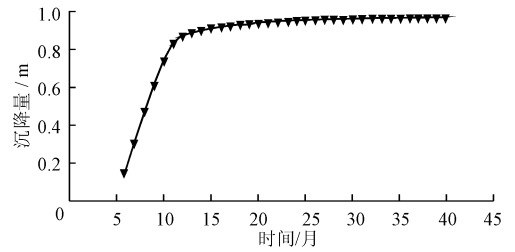


图12 坝体最大沉降点位移历时曲线图

表3 乌鲁瓦提面板砂砾石坝有限元计算结果与观测结果对比 cm, MPa

计算工况	竖向位移	水平位移		大主应力	小主应力
		向上游	向下游		
竣工期	不考虑流变	41.7	17.4	2.49	0.82
	考虑流变	46.2	19.7	2.67	1.01
	观测结果	48.5	20.6		
蓄水期	不考虑流变	43.3	20.1	2.62	1.03
	考虑流变	48.8	24.2	2.78	1.17
	观测结果	49.7	25.8		
蓄水两年后	考虑流变	50.1	25.4	2.82	1.18
	观测结果	51.3	26.3		

变形可以大部分集中在施工期完成:在竣工期坝体的沉降位移占总沉降位移的92%;在蓄水后坝体的沉降位移已经占总沉降位移的97%。图12为坝体内最大沉降点的沉降历时曲线,可以看出砂砾料填筑的混凝土面板堆石坝坝体沉降速率较快,对面板施工所预留的坝体沉降时间较短,有利于缩短工期。另外从结果可以得出砂砾石流变效应在蓄水后期对坝体变形的影响很小,这个对于面板的运行是很有利的,可以防止面板产生裂缝而漏水,因此可以得出,采用砂砾石填筑面板堆石坝在变形控制方面对

坝体的施工和运行都是有利的,其流变效应对蓄水后坝体的变形影响很小。

3 结语

本文采用7参数Merchant粘弹性模型分析了乌鲁瓦提面板砂砾石坝在各工况下计入流变的应力变形特性,通过分析流变机理和计入与未计入流变效应的有限元计算结果说明乌鲁瓦提面板砂砾石坝的流变特性。分析结果表明:

(1)在计入流变效应后,蓄水期坝体竖向位移增幅12.7%,向上游水平位移增幅22.9%,向下游水平位移增幅20.4%,大主应力增幅6.2%,小主应力增幅13.6%。计算结果说明坝体流变效应使砂砾石料在围压作用下颗粒发生破碎、滑移、充填孔隙使坝体位移增加并引起应力重分布,并随着孔隙充填的不断充分坝体位移和应力的增加随时间增长也趋于稳定,结果显示在大坝蓄水一年以后坝体沉降基本趋于稳定。

(2)由坝体沉降历时曲线和流变附加荷载历时曲线可以看出,坝体变形速率较快,流变效应对坝体

(下转第141页)

的施工设计资料不能全部取得以及在建立数据库过程中有所遗漏,桥梁的数据库不能涵盖施工管理的全部内容,所以需要充实完备。

(3)系统的通用性能需要提高。系统的研究仅仅通过崖门子大桥的施工的测试,还不能在桥梁施工中通用。主要原因是在构建3D模型的过程中采用3Dmax软件,不能通过直接输入模型尺寸生成设计的3D模型,但是有些构件模型的尺寸比较复杂,系统还不具备自动建模识别功能,所以带来了在通用性方面的能力较差。

本系统成功地实现了通过VR平台展示界面对access和VB程序的调用及传递,为桥梁施工管理可视化系统的开发提供了必要的前提条件,接下来的研究将对系统进行纵向加深及横向扩展。

接下来的研究是使整个系统更加完善,增加对工程的成本、机械、材料以及劳动力的计划进行实时更新,尝试通过access对施工管理可视化三维管理系统进行二次开发,能通过更为简单的建模手段来满足该系统的应用方面的通用性。

参考文献:

- [1] 张利,张希黔,陶全军,等.虚拟建造技术及其应用展望[J].建筑技术,2003(5):334-337.
- [2] 李晓梅,黄朝辉.科学计算可视化导论[M].长沙:国防

科技大学出版社,1996.

- [3] 韦建中,李巧鸽.工程可视化设计技术应用研究.[J]工程建设与设计,2005(4):31-33.
- [4] Ip W H, Yung K L, Dingwei Wang. A branch and bound algorithm for sub-contractor selection in agile manufacturing environment[J]. International Journal of Production Economics,2004,87(2):195-205.
- [5] Heng Li, Zhiliang Ma, Qiping Shen, et al. Virtual experiment of innovative construction operations[J]. Automation in Construction,2003(12):561-575.
- [6] Hadikusumo B H W. Rowlinson Steve. Integration of virtually real construction model and design for safety process database[J]. Automation in Construction,2002,8:501-509.
- [7] Wilkins Brian, Barrett John. The virtual construction site: a web-based teaching/learning environment in construction technology[J]. Automation in Construction,2000,11:169-179.
- [8] 陆铁坚,蒋友良,余志武.桥梁三维造型及其视景仿真[J].中南大学学报(自然科版),2005,36(3):501-504.
- [9] 储备.基于参数化的立交建模算法及可视化技术[J].西安公路交通大学学报,1998,18(4):45-50.
- [10] 杨吉新,陈定方.可视化桥梁结构计算系统VMAS[J].交通与计算机,2000,18(3):49-52.
- [11] 张晓东,黄守刚.铁路工程施工可视化管理技术的研究与开发[J].2007,16(1):1-3.

(上接第136页)

面板的施工和运行影响不大。由于砂砾石料具有较高的压缩模量和较低的流变效应因此用砂砾石填筑面板坝无论是对施工进度,施工质量还有工程造价都是有利的。

(3)由坝体计算结果与实际观测结果对比分析可知,考虑流变效应计算所得结果比未考虑流变效应更接近实测值,从而说明在坝体应力变形分析时考虑流变效应是十分必要的,所得结果也是合理的,并验证了本计算方法的正确性。

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,2003:4-41.
- [2] 梁军.高面板堆石坝流变特性研究[D].南京:河海大学,2003:12-81.
- [3] 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,2007:8-22.
- [4] 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):194-197.

- [5] 周治刚.堆石流变模型及其在面板堆石坝中的应用[D].南京:河海大学,2007:13-28.
- [6] 李国英,赵魁芝,米占宽.堆石体流变对混凝土面板坝应力变形特性的影响[J].岩土力学,2005,26(增刊):117-120.
- [7] 余亚鹏,王永明,卢继旺,等.200m级面板堆石坝流变研究[J].水电能源科学,2010,28(4):90-92.
- [8] 王辉,常晓林,周伟.流变效应对高混凝土面板堆石坝应力变形的影响[J].岩土力学,2006,27(增刊):85-89.
- [9] 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.
- [10] 王柏乐.中国当代土石坝工程[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [11] 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,2008:45-47.
- [12] 李国英,米占宽,傅华,等.混凝土高面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J].岩土力学,2004,25(11):1712-1416.
- [13] 蒋国澄.中国混凝土面板堆石坝20年[M].北京:中国水利水电出版社,2005.