

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.018

新疆某高混凝土面板堆石坝流变反演分析

马洪玉

(新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 该工程坝内部变形和表面变形在同类型级工程中偏大,且尚未收敛,现场检查发现坝顶和坝后出现了混凝土结构破坏等现象。为择机修复坝体防渗结构,对坝体内部测点和表面测点观测值的相对沉降值进行反演分析,通过反演分析确定“南水”双屈服面弹塑性模型和流变模型的参数。并基于反演分析结果,预测体沉降变形程度及最终沉降时间,计算成果表明:目前坝体沉降约占总沉降的83%,后期尚有17%的变量,估计坝体最大变形量为2.07 m。为后期修复坝体防渗结构提供依据。

关键词: 混凝土面板堆石坝;大变形;反演分析;“南水”双屈服面弹塑性模型;流变模型

中图分类号: TV641.4⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)04—0111—06

Rheological Inversion Analysis of a High Concrete Face Rockfill Dam in Xinjiang

MA Hongyu

(Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: There is a dam in Xinjiang which facing problems of large and ever increasing internal and surface deformation. Field investigation was first carried out to analyze the concrete structure damage occurred at the dam crest and behind the dam. In order to repair the seepage control structure of the dam, the relative settlement values of the observation points inside and on the surface of the dam are used for inversion analysis, and the parameters of the elasto-plastic model and rheological model of “nanshui” double yield surface are determined by inversion analysis. The degree of settlement deformation and the final settlement time are predicted. The calculation results show that the dam settlement accounts for 83% of the total settlement at present, and there are still 17% variables in the later stage. The maximum deformation of the dam is estimated to be 207.3 m. The results could provide a basis for the later restoration of the dam seepage control structure.

Keywords: concrete face rockfill dam; large deformation; inversion analysis; Two yield surface elastic-plastic model of nanshai; Rheological model

混凝土面板堆石坝具有适应地形能力强、经济安全、施工快捷等诸多优点,近些年深受水利工程建设者的青睐。从20世纪80年代距今,短短30多年我国已建成和在建的堆石坝已突破400余座^[1]。然而,对于此类坝型来说最核心的问题是如何控制坝体填筑期及工后变形量,这对整个刚性防渗体结构至关重要^[2-5]。基于本工程实测数据对填筑完工后坝顶沉降、面板挠度,竣工时坝体最大沉降,以及多

年运行后坝体变形沉降进行分析后,可知坝体的变形均偏大,且未收敛。因此,有必要根据现场原位观测资料来反演分析堆石体的流变参数,确定坝体最大沉降量及目前沉降阶段和最终沉降时间,为坝体修复以及后期安全运行提供指导和技术支撑。

1 工程概况

本水电站主要任务为发电,总库容2.32亿m³,

属大(2)型Ⅱ等工程。工程中主要建筑物为混凝土面板堆石坝、表孔溢洪洞、深孔泄洪洞、引水发电洞及坝后地面电站厂房等建筑物组成。大坝为混凝土面板堆石坝最大坝高 140.3 m,为 1 级建筑物,表孔溢洪洞、深孔泄洪洞为 2 级建筑物,引水发电洞及地面厂房为 3 级建筑物。地面厂房布置在坝下游左Ⅱ级阶地上,枢纽平面布置见图 1。

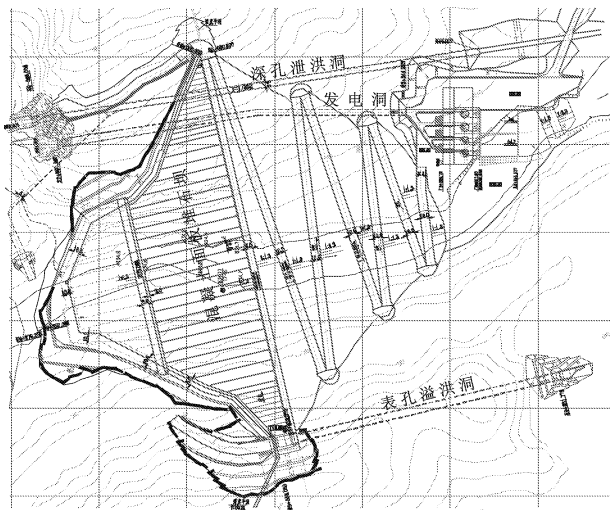


图 1 工程平面布置图

1.1 坝体分区设计及筑坝材料

(1) 大坝布置。大坝为混凝土面板堆石坝,布置于主河床处。坝顶宽 8.0 m,坝轴线的长 446 m,防浪墙顶高程 757.5 m,坝顶高程 756.3 m,最大坝高

140.3m。大坝上游坝坡坡比 1.0: 1.5,采用钢筋混凝土面板,上游坝面高程 695.0 m 以下设铺盖区;下游坝坡坡比 1.0: 1.3,采用大块石护坡,下游坝坡设 6 级 10 m 宽、纵坡为 8% 的上坝道路,最大断面平均坡度约为 1.0: 1.7。

(2) 坝体分区及填筑设计。混凝土面板堆石坝主要采用花岗岩爆破料筑坝。堆石坝坝体分区(见图 2)从上游至下游分为上游盖重区、上游铺盖区、混凝土面板、垫层区、特殊垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区、下游堆石护坡。

1.2 大坝变形情况

2009 年 6 月开工建设,2013 年 4 月 30 日左岸填筑至防浪墙底高程,2014 年 1 月 20 日二次蓄水至今坝体变形过大。现场坝顶路面伸缩缝张开变形明显、错动、局部开裂、混凝土剥落;上游侧混凝土防浪墙伸缩缝张开变形明显、局部开裂、混凝土剥落、骨料外露、露筋。下游侧混凝土路缘石局部挤压破坏严重、开裂破损。大坝上游混凝土面板水位以上部位进行了外观检查,混凝土面板板面较平整,无隆起、凹陷、破损等现象;面板垂直缝顶部止水外观无异常现象。下游坝坡块石护坡整体情况较好,局部存在隆起、塌陷现象;踏步混凝土存在局部剪切错动、挤压破坏严重、开裂破损等现象。“之”字形上坝公路路面混凝土局部存在裂缝,路面外侧路基局部塌陷。下游坝脚电站厂房外侧路面及回车平台混凝土开裂。

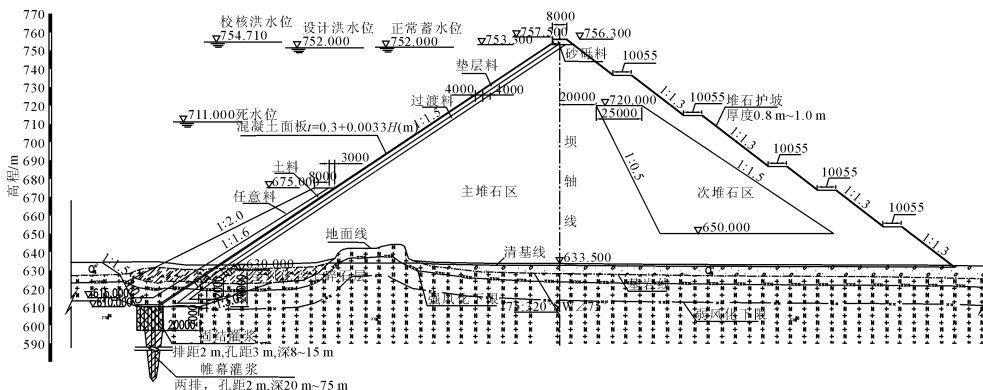


图 2 大坝结构分区图(单位:mm)

1.3 大坝变形监测资料分析

根据图 3 大坝表面沉降变形观测资料可知,坝顶大坝中间 LD13、LD14 测点的变化较大,2018 年 5 月至 2020 年 10 月,沉降量已达 97.8 mm、89.5 mm,近两年大坝下游坝坡堆石体变形偏大,且尚未完全收敛。

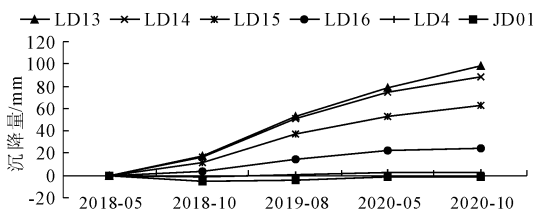


图 3 大坝表面垂直位移过程线图

根据图 4 大坝内部沉降变形观测资料,截至 2020 年 6 月 26 日,坝体垂直位移最大值为 1 309.8 mm(坝 0+305 剖面 721 m 高程的 ES(4)4-1 测点),最小值为 78.3 mm(坝 0+261 剖面 682 m 高程的 ES(6)2-3 测点)。坝体 0+261 断面坝体垂直位移分布沿上下游方向、沿坝高分布无明显规律,坝体中下部的下游侧沉降略大,坝体上部的上游侧沉降略大。坝体 0+305 断面坝体垂直位移分布沿上下游方向表现为上游侧沉降略大,向下游沉降逐渐减小。

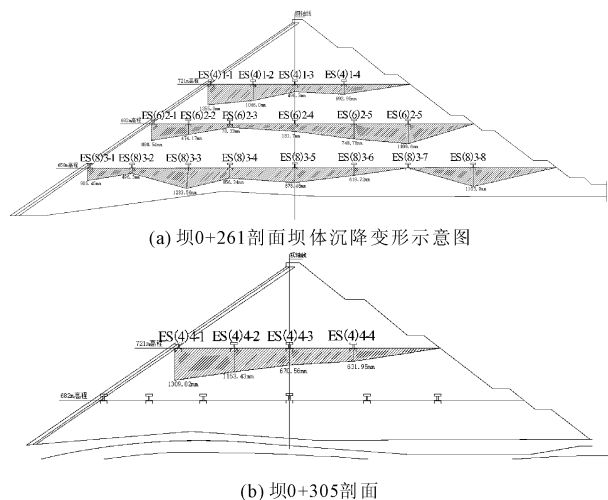


图 4 大坝内部垂直位移分布(2020 年 6 月 26 日)

1.4 沉降监测成果分析

从图 4 大坝内部沉降监测成果来看,内部沉降测值大小和规律总体较为异常。例如,大部分测点

沉降测值存在较大波动,虽然本工程为不完全年调节水库,库水位年变幅大,但从抽水蓄能电站大坝运行期的变形性态来看,库水位的波动,可能会对蓄水运行初期的变形有一定影响,对运行几年的大坝变形影响有限,坝体运行期变形受控于流变变形,即库水位的波动不是导致沉降测值产生较大波动的原因,沉降测值大幅波动很可能还是水管式沉降仪的通气管和排水管存在故障所致。部分测点运行过程中沉降出现逐渐减小现象。不同剖面 720 m 高程纵桩号相同位置测点,右岸小断面坝 0+305 测点沉降总体比河床最大断面 0+261 断面测点沉降大,这些都是不符合面板坝变形一般规律的。由此可以判断大部分内部沉降观测成果不够可靠。从大坝外部沉降监测成果来看,河床中间测点沉降大,两岸测点沉降小,沉降规律符合面板坝变形一般规律。

鉴于国内外 100 m ~ 200 m 级混凝土面板堆石坝沉降量统计情况来看^[6],如表 1 所示。类似本工程同类型大坝竣工期及工后沉降变形均小于坝高的 1% 和 0.3%,目前,本工程大坝坝体总沉降量、坝顶沉降量均较同类型工程大,且没有收敛趋势。因此,为了解本工程坝体沉降变形程度及最终沉降时间,及后期修复坝体防渗结构提供依据。采用坝体内部测点和表面测点观测值的相对沉降值进行反演分析,通过反演分析,确定“南水”双屈服面弹塑性模型和流变模型的参数。基于反演分析结果,预测体沉降变形程度及最终沉降时间。

表 1 国内外 100 m ~ 200 m 级混凝土面板堆石坝沉降量统计情况

大坝名称	坝高 /m	坝长 /m	堆石料	竣工最大沉降量/m	工后最大沉降量/m	面板最大挠度/m	建年	国家
Glevard	110	275	石英岩	0.75	—	0.25	2012	伊朗
苗家坝	110	348	凝灰岩	0.91	0.28	0.30	2011	中国
Potrerrillos	116	395	石灰岩	0.82	0.29	0.30	1995	阿根廷
Turimiquire	115	410	灰岩	—	0.27	0.25	1982	委内瑞拉
Reece	122	374	辉绿岩	0.23	0.22	0.26	1986	澳大利亚
Ita	125	880	玄武岩	—	0.60	0.51	1999	巴西
引子渡	129.5	267	灰岩	1.10	—	0.20	2004	中国
公伯峡	132.2	429	石灰岩	0.35	0.15	0.18	2002	中国
珊溪	132.5	448	凝灰岩	0.95	—	0.20	2000	中国
九甸峡	136	232	石灰岩	1.24	0.42	0.84	2008	中国
Los Caracoles	136	605	石灰岩	1.01	0.38	0.41	2009	阿根廷
马鹿塘	154	493	花岗岩	1.50	0.25	0.28	2009	中国
紫平铺	156	664	石灰岩	0.71	0.21	0.25	2006	中国
吉林台一级	157	445	凝灰岩	0.59	—	0.24	2006	中国
滩坑	162	507	凝灰岩	0.81	0.15	0.17	2008	中国
洪家渡	179.5	428	灰岩	1.24	0.32	0.35	2005	中国
三板溪	185	423	粉砂岩	1.05	—	0.17	2007	中国

2 坝体变形反演计算分析

2.1 计算模型

堆石体是大坝的主体结构,其应力应变关系的合理模拟,对大坝变形计算结果准确性至关重要。常用的堆石体本构模型分为非线性弹性模型与弹塑性模型^[7]。非线性弹性模型主要以 Duncan E-v 模型、Duncan E-B 模型为代表。弹塑性模型以“南水”双屈服面模型为代表。“南水”双屈服面弹塑性模型与非线性弹性模型相比,可以考虑堆石体的剪胀和剪缩特性,能够较为真实地反映坝体的应力应变性状。因此,反馈分析堆石体的本构模型仍采用“南水”双屈服面弹塑性模型^[8]。

2.2 有限元建模

图 5 为大坝-基岩精细化三维有限元网格图,其单元总数为 74 692,结点总数为 75 903。图 6 分别为大坝模型、坝 0+260 剖面模型、大坝与坝基间设置的接触单元模型。建模时,空间实体单元,为适应坝体边界的变化,边界部分退化为三棱体或四面体单元^[9-10]。坐标系定义为: X 为轴向,指向右岸为正,零点设置在坝 0+0.0 断面; Y 为顺河向,指向下游为正,零点为轴线 0+0.0 位置; Z 为竖直向,以其高程为垂直向坐标值。

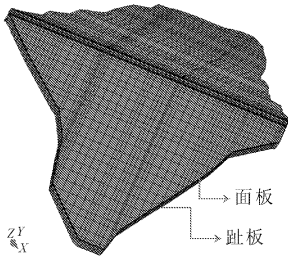


图 5 大坝三维有限元网格图

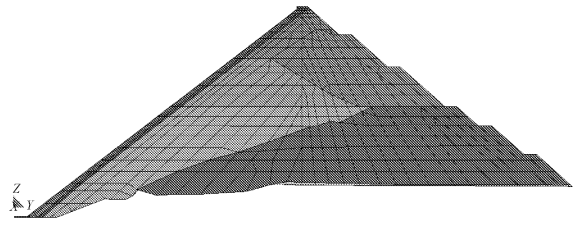


图 6 坝 0+260 剖面有限元网格图

2.3 堆石体南水模型、流变模型计算参数

参考以往大连理工大学、中国水科院、河海大学的计算资料,结合类似工程堆石料参数资料^[11-15],拟定的初始坝料南水模型参数。反馈计算时,只对于堆石坝料的本构模型参数,选取对变形较为敏感的参数 $K(K_{ur})$ 、 c_d 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 等进行反演;对于堆石坝料的流变模型参数,选取对变形较为敏感的参数 b 、 c 、 d 等进行反演;对于线弹性材料和接触面,参数为固定值,混凝土结构和基岩参数见表 2,接触面模型见表 3,坝料南水模型和流变模型计算反演参数结果见表 4、表 5。基于南水模型参数计算出的应力场下,根据大坝的变形速率再次反演坝体的流变参数见表 6。

表 2 线弹性材料参数

材料名称	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	ν
面板	2.40	30	0.167
趾板	2.40	30	0.167
基岩	2.65	15	0.250

表 3 接触面参数

接触面名称	K'	n'	R'_f	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
垫层-面板	4800	0.56	0.74	0	36.0
堆石料-基岩	4950	0.40	0.70	0	36.6

表 4 坝体南水模型参数反演结果

材料名称	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	R_f	c/kPa	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	K	K_{ur}	n	$c_d/\%$	n_d	R_d
垫层	2.25	0.87	0	47.5	6.5	990	1485	0.35	0.34	0.78	0.69
过渡层	2.22	0.65	0	48.5	8.2	900	1350	0.35	0.36	0.78	0.69
主堆石区	2.15	0.81	0	46.0	6.1	627	941	0.41	0.47	0.83	0.48
次堆石区	2.05	0.85	0	44.6	5.4	404	606	0.45	0.64	0.86	0.52

表 5 坝体流变模型参数反演结果

材料名称	α	$b/\%$	$c/\%$	$d/\%$	m_1	m_2	m_3
垫层	0.003	0.154	0.033	0.322	0.406	0.525	0.580
过渡层	0.003	0.163	0.035	0.391	0.406	0.525	0.580
主堆石区	0.002	0.213	0.053	0.590	0.441	0.453	0.720
次堆石区	0.001	0.311	0.077	0.875	0.431	0.480	0.710

表6 坝体流变反演参数汇总表

材料名称	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K	K_{ur}	$c_d/\%$	$b/\%$	$c/\%$	$d/\%$
垫层	47.5	6.5	990	1485	0.34	0.154	0.033	0.322
过渡层	48.5	8.2	900	1350	0.36	0.163	0.035	0.391
主堆石区	46.0	6.1	627	941	0.47	0.213	0.053	0.590
次堆石区	44.6	5.4	404	606	0.64	0.311	0.077	0.875

2.4 反演参数计算分析成果

图7给出了反演参数计算出的2018年5月30日—2020年6月30日期间坝顶沉降过程,反演结果与外观监测结果较为吻合,说明反演参数基本反映了工程坝料的实际力学特性。

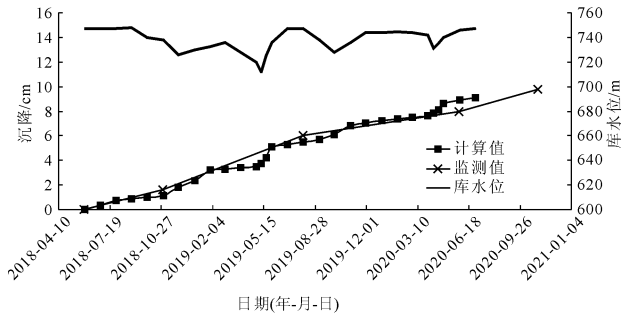
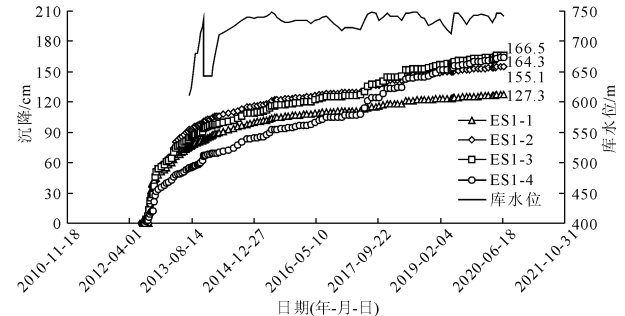


图7 2018年5月至2020年6月坝顶沉降过程线

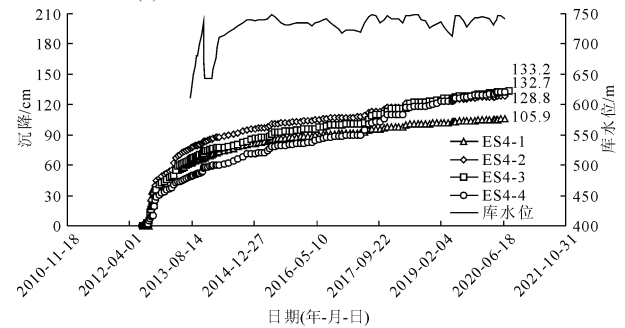
图8为反演计算出的坝0+261剖面、坝0+305剖面720m高程内部沉降测点位置沉降发展过程线。从坝体变形计算结果来看,至2020年6月底河床最大断面坝0+261最大沉降为172.1cm,发生在坝轴线上游7.5m高程710m处,该量值约占坝高的1.2%,变形偏大且处于尚未收敛状态。

从表7中可知,至2020年6月底面板挠度最大值为140.1cm,但是面板挠度最大变形值发生在河

床坝0+248剖面715m高程,为179.7cm,面板挠曲率约为0.86%,量值偏大,超过了国内同类型面板堆石坝的面板挠度正常范围。



(a) 坝0+261剖面720m高程内部沉降测点位置



(b) 坝0+305剖面720m高程内部沉降测点位置

图8 计算出的高程720m内部沉降测点位置沉降过程线

表7 反演计算成果统计表

时间	上游水平变形/cm		下游水平变形/cm		沉降/cm		715m高程面板 挠度最大值/cm (剖面位置)	710m面板 应力/MPa	
	坝0+261	坝0+305	坝0+261	坝0+305	坝0+261	坝0+305		轴向	顺坡向
2013年5月 10日坝体填筑至753.3m	26.6	17.2	36.3	24.5	108.0	84.3	—	—	—
2013年11月 17日第一次蓄水至736.0m	18.5	13.0	43.6	29.4	120.0	94.5	—	—	—
2015年5月 19日第二次蓄水至748.8m	6.8	6.4	53.7	38.2	137.4	109.9	75.2 (0+236)	5.36/ -22.46	1.32/ -19.61
2020年6月 30日库水位降水至742.6m	0.3	0.5	93.0	76.3	172.1	140.1	179.7 (0+248)	6.46/ -31.81	4.76/ -30.07

至2020年6月底面板轴向和顺坡向的压应力、拉应力均有过大现象,26#、27#面板710m高程附近

存在小范围的轴向压应力大于30MPa区域,该区域发生压裂破坏的可能性大,15#—19#面板底部以及

36#—39#面板周边缝附近存在轴向拉应力大于 3 MPa 的拉裂区,26#面板 710 m 高程附近顺坡向压应力略超 30 MPa,混凝土发生压裂破坏的可能性大,9#—19#面板底部以及 35#—40#面板周边缝附近存在顺坡向拉应力大于 3 MPa 的拉裂区。计算揭示出的应力异常区域和面板实际裂隙发生区域基本是对应的。计算出的裂隙分布与实际裂隙分布存在一定差异,差异主要集中在 712 m ~ 748 m 间水位变幅区面板产生了较多横向裂缝,该区域的横向裂缝很可能是由于干湿、温度变化引起的。

2.5 坝体应力变形预测分析

库水位自 2020 年 6 月 30 日起按 745 m 高程运行考虑,计算出的自 2018 年 5 月 30 日开始的坝顶沉降增量过程线见图 9。计算时间段内,坝顶沉降随时间不断增长,2018 年 5 月 30 日—2020 年 6 月 30 日期间完成的沉降约占总沉降的 83%,2022 年 6 月左右沉降逐渐趋于稳定,沉降最大值为 11.0 cm。

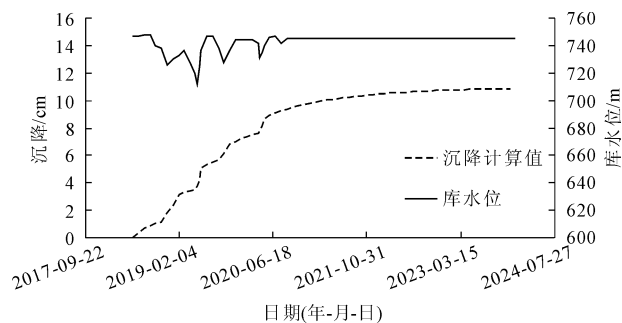


图 9 自 2018 年 5 月 30 日开始坝顶沉降增量过程线

3 结 论

本工程的坝体变形在同类型工程较大,基于外部变形及内部变形数据,通过三维有限法反演分析坝体变形参数及多年后流变参数,得出以下结论:

(1) 外观沉降反演结果与外观监测结果较为吻合,说明反演出的筑坝材料瞬时变形和流变变形主要参数是合适的,可用于面板坝应力变形评价和预测分析。

(2) 自 2018 年 5 月 30 日开始的坝顶沉降增量计算结果显示,坝顶沉降随时间不断增长,2020 年 6 月 30 日沉降约占计算时间段内总沉降的 83%,且底河床最大断面坝 0+261 最大沉降为 172.1 cm,发生在坝轴线上游 7.5 m 高程 710 m 处,该量值约占坝高的 1.2%,变形偏大且处于尚未收敛状态。直至 2022 年 6 月左右沉降逐渐趋于稳定,计算时间

段内坝顶沉降最大值为 11.0 cm。由于坝体绝大部分变形已完成,后期尚有 17% 的变量,估计坝体最大变形量为 207.3 cm。

(3) 针对此类坝体长期变形尚未收敛造成防渗系统受损的工程,无法预估修复时段,可采用坝体内部或外部变形监测资料反演坝体变形所处阶段及后期剩余变形量,为修复坝体防渗结构提供依据。

参考文献:

- [1] 吴俊杰. 阿尔塔什水利枢纽工程混凝土面板堆石坝抗震工程措施及静、动力有限元计算分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 130-137.
- [2] 酆能惠. 中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 165-173.
- [3] 罗井伦, 包亚军. 天生桥一级面板堆石坝情况及工程启示[C]//中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会学术年会暨混凝土面板堆石坝安全监测技术研讨会, 2010.
- [4] 贾金生. 高混凝土面板坝安全关键技术研究[M]. 中国水利水电出版社, 2014.
- [5] 宗敦峰. 高混凝土面板堆石坝施工关键技术[M]. 中国水利水电出版社, 2014.
- [6] 黄祥志. 西林水库面板堆石坝应力变形的三维非线性静力分析[J]. 浙江水利科技, 2018, 46(4): 63-68, 71.
- [7] 康雁德, 杨志磊, 马莹. 纳子峡面板砂砾石坝地震永久变形有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 34-37.
- [8] 吴俊杰, 马洪玉, 袁磊. 阿尔塔什水利枢纽工程坝体三维渗流有限元计算分析[J]. 水利规划与设计, 2020(8): 128-133.
- [9] 温立峰, 柴军瑞, 许增光, 等. 面板堆石坝性状的初步统计分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1312-1320.
- [10] 温立峰. 复杂地质条件下混凝土面板堆石坝力学特性规律统计及数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学.
- [11] 沈婷, 李国英. 镶嵌式面板堆石坝应力应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 266-271.
- [12] 刘小平. 考虑混凝土不均匀性的面板堆石坝面板动力损伤分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [13] 韩峰, 徐磊, 周昌巧, 等. 深覆盖层面板堆石坝连接板长度敏感性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 112-117.
- [14] 程博, 刘斌云, 李海芳. 两河口堆石坝堆石料蠕变特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(5): 67-69, 101.
- [15] 任艳, 凌华, 米占宽, 等. 特高面板坝砂砾石料工程特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 106-110.