

土石坝加高工程老坝防渗墙施工时机优选

曹艺凡¹, 岑威钧¹, 邓成发², 魏江梁¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要:针对老旧水库大坝加高工程中混凝土防渗墙的修建时机对其自身应力变形影响很大,可能对坝体防渗系统造成安全隐患的问题,以某土石坝加高工程为例,采用三维有限元法对大坝加高过程进行模拟计算,分析比较了不同施工方案下防渗墙的应力变形特性,以优选防渗墙施工时机。模拟计算结果表明:在加高坝填筑至215 m或此之前修建老坝防渗墙时墙体应力变形较小,此时竣工期与蓄水期防渗墙顺河向最大位移分别为-1.56 cm与4.91 cm,大主应力极值分别为1.01 MPa与1.67 MPa,小主应力极值分别为-0.41 MPa与-0.66 MPa,防渗墙与连接板接缝的切向错动和相对沉降变形极值分别为4.84 mm与8.11 mm,能够满足安全运行要求。相比加高坝填筑后期施工防渗墙,在加高坝填筑开始前或填筑至与老坝同高之前完成防渗墙的施工,可改善防渗墙的应力变形状态并降低防渗墙与连接板接缝的切向错动和相对沉降。

关键词:防渗墙;土石坝;坝体加高;应力变形;施工时机

中图分类号:TV641.8

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0087-07

Optimization of construction timing of cut-off wall of old dam in an earth-rockfill dam heightening project//CAO Yifan¹, CEN Weijun¹, DENG Chengfa², WEI Jiangliang¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The construction timing of concrete cut-off walls in the old reservoir dam heightening project has a great influence on its own stress and deformation, which may cause potential safety hazards to the anti-seepage system of the dam body. Taking a heightening project of an earth-rockfill dam as an example, the three-dimensional finite element method was used to simulate the heightening process of the dam, analyze and compare the stress and deformation characteristics of the cut-off wall under different construction schemes, and discuss the optimal construction timing of the cut-off wall. The calculation results show that under the conditions that the cut-off wall of the old dam is built when or before the heightened dam is filled to 215 m, the stress and deformation of the cut-off wall are lower, and during the completion period and the water storage period, the displacements of the cut-off wall along the river are about -1.56 cm and 4.91 cm, the maximum principal stresses are about 1.01 MPa and 1.67 MPa, and the minimum principal stresses are about -0.41 MPa and -0.66 MPa, respectively. The extreme values of the tangential displacement and relative settlement of the joint between the cut-off wall and the connecting plate are 4.84 mm and 8.11 mm, respectively, which can meet the requirements of safe operation. Compared with the cut-off wall constructed in the late stage of heightening dam filling, completing the construction of the cut-off wall before the filling of the heightening dam starts or before the filling reaches the same height as the old dam can improve the stress and deformation state of the cut-off wall and reduce the tangential displacement and relative settlement of the joint between the cut-off wall and the connecting plate.

Key words: cut-off wall; earth-rockfill dam; heightening of dam; stress and deformation; construction timing

目前,我国已建水库近10万座,其中大部分中小型水库修建于20世纪50—70年代,坝型主要为土石坝。经过半个多世纪的运行,一些水库由于泥沙淤积问题严重或工农业用水需求不断增大,导致水库库容不足,防洪能力不达标,难以满足防洪、发

电、灌溉、引水等要求^[1];还有部分水库大坝存在下游坝坡稳定性不足、绕坝渗漏^[2]等问题,这部分大坝往往需要除险加固或重建。若将水库的除险加固和加高扩容相结合,既消除了安全隐患,又提升了功能需求,可显著降低经济成本并缩短施工周期^[3-4]。

基金项目:浙江省水利厅科技计划项目(RB2214)

作者简介:曹艺凡(1999—),男,硕士研究生,主要从事土石坝工程安全分析研究。E-mail:136848185@qq.com

通信作者:岑威钧(1977—),男,教授,博士,主事从事土石坝抗震和水工结构安全分析研究。E-mail:hhucwj@163.com

已建类似工程案例中,浙江省横山水库、四川省竹寿水库等均是在原黏土心墙坝之上加高扩建混凝土面板堆石坝,大幅度提升了水库的综合效益。对于该类土石坝的加高,关键问题之一是需在原黏土心墙或均质坝体中浇筑混凝土防渗墙,通过连接板和趾板与加高的面板坝相连,以形成新老坝封闭的防渗系统。因此,准确把握老坝混凝土防渗墙的应力变形特性与施工时机,对防渗墙施工乃至大坝安全具有重要意义。

当前国内对于土石坝加高的研究主要集中在理论计算方面。例如:黄理军等^[5]对某心墙坝加高前后的应力应变进行有限元分析,得出加高后的坝体正应力增大 23%~28%,正应力比相应部位的静水压力大,加高后不会发生水力破坏;张运花等^[6]采用三维有限元分析了由黏土心墙碾压石渣坝加高为混凝土面板坝的应力和变形变化规律,验证了设计方案的可行性。对于防渗墙的应力变形和施工时机的问题,大多集中于建于深厚覆盖层上的土石坝^[7-8]。例如:郦能惠等^[9]对深覆盖层上混凝土面板堆石坝的防渗墙应力变形性状进行了研究,结果表明先填筑部分坝体再建造防渗墙的施工可改善防渗墙的应力状态;吕高峰等^[10]运用渗流场与应力场耦合模拟折线型防渗墙的不同施工顺序,认为推迟防渗墙的施工可以减小防渗墙的大主应力和竣工期的顺河向位移,但会增大蓄水期位移;吴铭^[11]运用二次开发的 $E-B$ 模型对某堆石坝防渗墙不同施工方案进行有限元分析,研究表明在坝体填筑过程中进行防渗墙的施工,可以提高防渗墙承担水压的能力。

由此可见,对于土石坝加高后坝内混凝土防渗墙应力变形以及接缝变形尚缺乏相关研究,同时对于土石坝加高后坝内混凝土防渗墙施工时机选择及影响缺乏全面系统的认识。鉴于此,为准确模拟土石坝加高工程老坝坝内防渗墙应力变形并把握防渗墙在加高坝填筑过程中的最优施工时机,本文以某黏土心墙土石坝加高面板堆石坝工程为例,开展加

高后大坝三维整体有限元多方案计算,分析防渗墙在不同施工时机下的变形及应力分布变化规律以及与连接板之间的接缝变形,优选防渗墙施工时机,以期该类土石坝加高工程设计、施工提供理论支撑。

1 工程概况

某黏土心墙坝坝顶高程 226.70 m, 最大坝高 28.25 m, 水库总库容 116 万 m^3 , 坝顶长 210 m, 坝顶宽 5.5 m。水库库容偏小且已淤积, 坝体渗漏较为严重, 无法正常蓄水, 水库常年处于低水位状态, 不能满足灌溉用水要求; 坝顶高程不达标, 防洪能力差, 行洪能力不足。为增加供水量以及提高水库防洪能力, 拟在原坝基础上进行加高(尚未施工), 加高坝型主要为混凝土面板堆石坝。加高后坝顶高程 235.50 m, 坝顶宽度 5.0 m, 坝顶总长 598.0 m(含延伸段), 从左岸至右岸主要建筑物分别为: 左岸新建混凝土重力坝段, 最大坝高 15 m; 新建溢洪道; 老坝混凝土面板堆石坝加高段, 加高后最大坝高 35 m; 右岸新建混凝土面板堆石坝段, 最大坝高 20 m。

水库加高后正常蓄水位 232.00 m,总库容扩大至 209 万 m^3 ,老坝加高段下游坝坡上部马道以上坡比为 1:1.6,以下坡比为 1:1.4。由于老坝修建于 20 世纪 50 年代,受当时筑坝技术和施工条件的限制,已建老坝坝体中黏土心墙渗透性较大,且存在多处集中渗漏问题,不满足大坝防渗要求,故本次加高时在老坝加高段内增设厚 0.8 m 的 C20 混凝土防渗墙。加高坝趾板置于老坝清基后 222.00 m 的坝顶高程之上,通过连接板与混凝土防渗墙连接,防渗墙高 27.6 m,嵌入岩石 0.5 m 深,如图 1 所示。

2 有限元计算模型及计算条件

2.1 有限元计算模型

根据坝址区地形地质条件和坝体结构设计,合理选定计算域,建立三维有限元模型(上下游及两岸地基自坝端向外延伸约 200 m,坝基底边界截取至建基面底部以下约 100 m)。有限元网格节点数

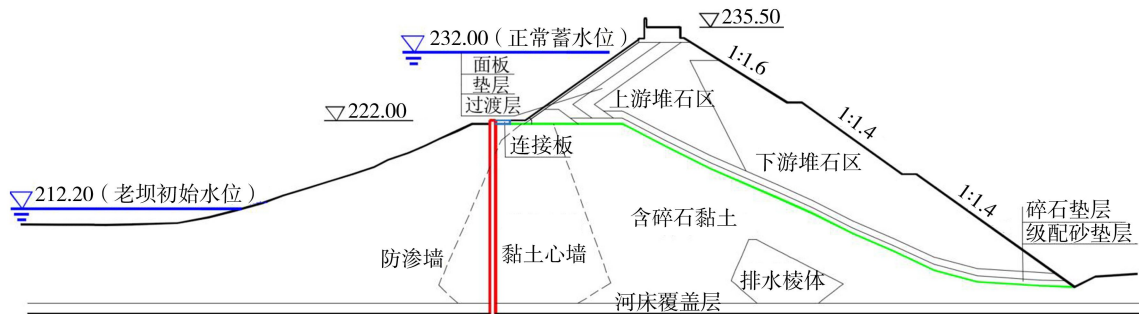


图 1 某黏土心墙坝加高工程最大断面(单位:m)

为 30 158 个,单元数为 30 075 个,以六面体单元为主,在建基面、材料分界线和分期填筑线等局部部位适当填充五面体单元和四面体单元,以更好地适应相关部位几何形状的剧烈变化,如图 2(a)所示。在防渗墙与连接板、连接板与趾板、趾板与面板连接处设结构缝,为准确模拟防渗墙底部与河谷基岩的连接以及与变形特性差异较大的材料之间的相互作用,分别在防渗墙底部嵌入端与基岩、防渗墙与坝体之间设置接触单元,防渗墙网格见图 2(b)。

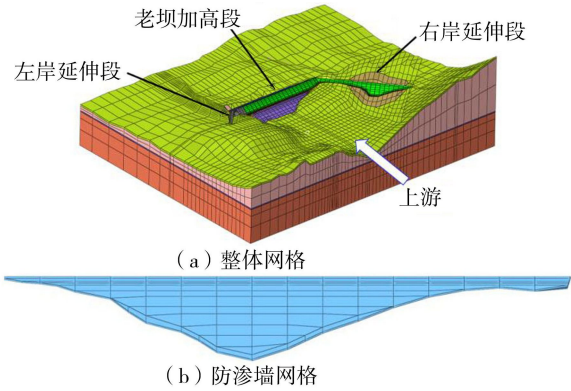


图2 坝体三维有限元网格

2.2 计算条件

图 3 为模型分期加载过程示意图,详细模拟了新老坝体填筑施工、水库蓄水加载全过程。将地基加载、老坝分期填筑、蓄水及清基处理、防渗墙开挖与浇筑、面板加高坝填筑、加高后水库蓄水加载过程共分为 30 级。第 1 级模拟地基,第 2~13 级模拟老

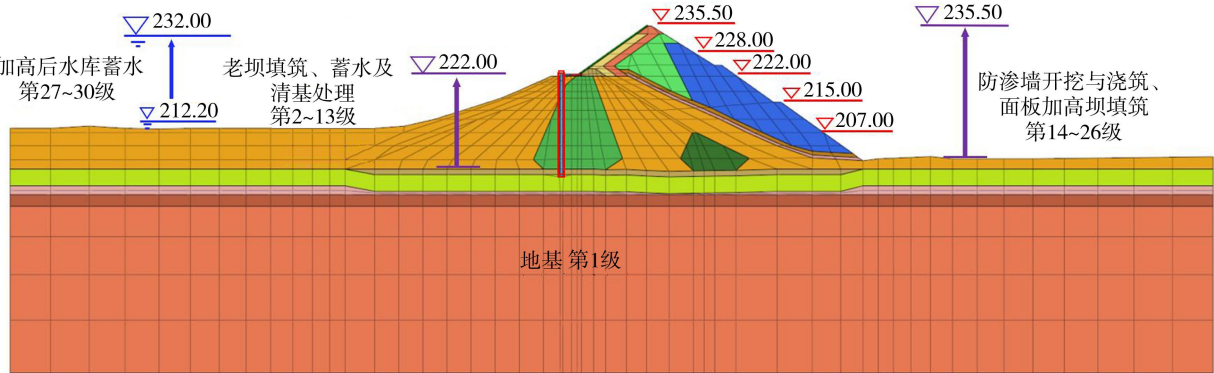


图3 模型分期加载过程示意图(单位:m)

坝填筑、蓄水及清基处理,第 14~26 级模拟防渗墙开挖与浇筑、面板加高坝填筑,第 27~30 级模拟加高后水库蓄水,如图 3 所示。由于老坝已服役较长时间,其坝体变形已基本稳定,故计算时扣除老坝已产生的位移对后续加高坝的影响,即在第 13 级加载步末清除老坝位移。

为优选防渗墙在加高坝填筑过程中的施工时机,考虑了 6 种施工方案,见表 1。计算中,坝基底部采用完全位移约束,侧面采用法向位移约束;防渗墙的开挖施工采用“单元生死法”进行模拟,不同方案下防渗墙的施工通过不同加载步激活实现。

表1 计算方案

方案	方案描述
1	加高坝填筑之前修建防渗墙
2	加高坝填筑至 207 m 修建防渗墙
3	加高坝填筑至 215 m 修建防渗墙
4	加高坝填筑至 222 m 修建防渗墙
5	加高坝填筑至 228 m 修建防渗墙
6	加高坝填筑完成后修建防渗墙

2.3 计算参数

材料应力应变关系采用 E - B 模型模拟,其参数根据经验和相关土工试验资料合理拟定,见表 2。接触单元计算参数: $K_1=4\ 800$, $n_1=0.56$, $R_f=0.74$, $\varphi=36.6^\circ$,其中, K_1 、 n_1 为接触材料切线模量参数; φ 为摩擦角。混凝土防渗墙、面板、趾板、基岩均采用线弹性模型模拟,防渗墙弹性模量 $E=25.5\text{ GPa}$,泊

表2 坝料 E-B 模型计算参数

区域	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	K	n	R_f	K_b	m
垫层	2.22	51.1	8.0	0	918	0.28	0.68	576	0.12
过渡层	2.16	50.4	7.5	0	838	0.28	0.60	476	0.12
上游堆石区	2.20	50.1	6.5	0	829	0.28	0.74	410	0.28
下游堆石区	2.12	45.6	6.2	0	783	0.25	0.75	380	0.25
碎石垫层	2.16	49.9	6.5	0	820	0.27	0.64	451	0.13
级配砂垫层	2.14	49.5	6.3	0	809	0.27	0.64	426	0.13
含碎石黏土	1.85	30.0	0	20.0	500	0.43	0.60	230	0.35
黏土	1.96	25.5	0	22.5	400	0.45	0.60	180	0.35
覆盖层	1.88	22.0	0	21.0	300	0.53	0.60	140	0.40

注: ρ 为干密度; φ_0 、 $\Delta\varphi$ 、 c 为强度参数; K 、 n 为土石料切线模量参数; R_f 为破坏比; K_b 、 m 为土石料体积模量参数。

3 计算结果与分析

3.1 坝体变形

根据三维有限元计算结果,以方案 1 为例对加高后坝体变形规律进行分析。图 4 和图 5 分别为竣工期与蓄水期加高后坝体典型剖面水平位移与沉降分布云图,其中水平位移以向下游为正,沉降以向上为正。

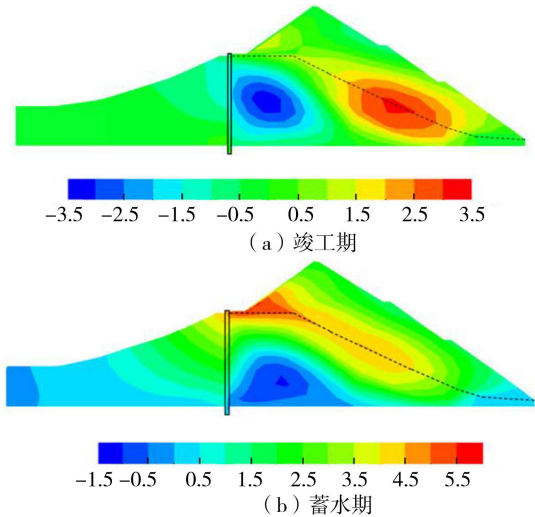


图 4 加高后坝体典型剖面水平位移分布(单位:cm)

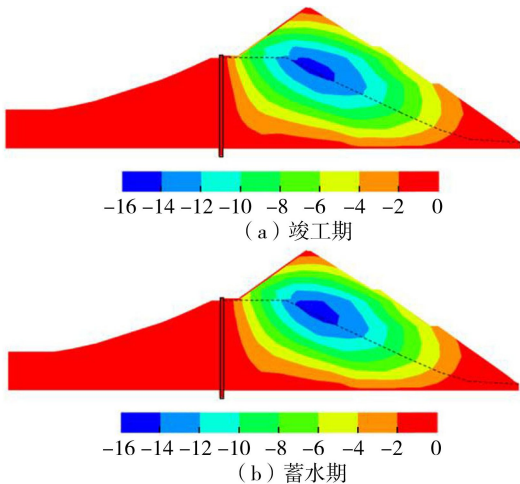


图 5 加高后坝体典型剖面沉降分布(单位:cm)

由图 4 和图 5 可知,竣工期在加高坝压重下,整个坝体向上游位移极值出现在老坝中部 1/2 高程附近,为-3.30 cm,防渗墙上游侧坝体水平变形明显小于下游侧,可见防渗墙明显限制了其下游侧坝体向上游变形,承担了较大的侧向土压力。由于加高坝与老坝材料差异较大,且填筑时间相差过久,加高坝在其自重作用下可能存在沿新老坝体结合面向下游滑动的趋势,坝体向下游位移极值出现在新老坝体结合面附近,为 3.09 cm。蓄水之后,水压力进一步改变了坝体水平位移分布,坝体向上游变形大幅降低,仅老坝中部 1/3 高程以下的部分区域向上游变

形,位移极值为-1.09 cm。由于水压力垂直作用于上部防渗面板,方向近似平行于新老坝体结合面,增大了上部加高坝的下滑趋势,加高坝上游坝脚处向下游位移增至 5.71 cm。竣工期与蓄水期,加高后坝体的沉降极值均出现在坝轴线附近的老坝顶部,沉降极值分别为-14.71 cm 和-14.88 cm。

3.2 防渗墙应力变形特性

表 3 为各施工方案下防渗墙变形与应力极值。由表 3 可见,在加高坝填筑至 215 m 或之前修建防渗墙,防渗墙施工时机对其自身应力变形影响很小,墙体应力变形极值基本一致;当在加高坝填筑至 222 m 之后修建防渗墙,防渗墙的施工时机对其自身应力变形影响较大,随着防渗墙施工时间的延后,竣工期防渗墙顺河向位移与大、小主应力大幅降低,而蓄水之后明显升高。

表 3 防渗墙变形与应力极值

方案	顺河向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
1	-1.56	4.91	1.01	1.67	-0.41	-0.66
2	-1.57	4.90	1.02	1.67	-0.41	-0.66
3	-1.58	4.88	1.02	1.66	-0.41	-0.65
4	-1.42	4.93	0.96	1.78	-0.32	-0.69
5	-0.73	5.17	0.56	1.88	-0.08	-0.78
6	-0.11	5.84	0.33	1.98	-0.03	-0.89

根据三维有限元计算结果,以方案 1 为例对防渗墙的应力变形分布规律进行分析。图 6 为防渗墙顺河向变形等值线,竣工期防渗墙受侧向土压力作用,向上游侧产生变形。其中,因墙底及两侧嵌入基岩,故变形几乎为零;墙顶所受荷载小,且与连接板相连,故变形也趋近于零。最大变形出现在墙体 17 m 高度附近,最大位移值为-1.56 cm。蓄水后,在水压力作用下,防渗墙向下游侧产生变形。受水压力及河谷基岩约束作用,顺河向位移从嵌入端至墙顶逐渐增大,最大位移由竣工期的防渗墙中部转移至防渗墙顶部,为 4.91 cm。

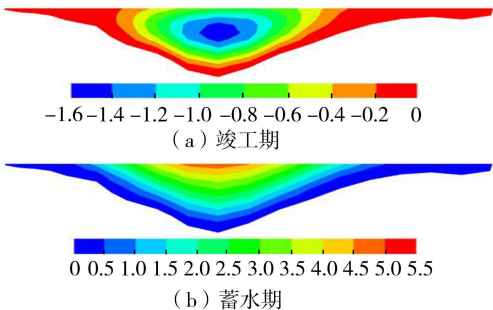


图 6 防渗墙顺河向变形(单位:cm)

图 7 和图 8 分别为竣工期与蓄水期防渗墙大、小主应力分布,其中主应力以压为正,拉为负。竣工期防渗墙大主应力以压应力为主,随着高程的降低而增大,应力极值位于墙底靠近基岩处,为

1.01 MPa;小主应力以拉应力为主,由墙体中部至嵌入端逐渐增大,在嵌入端出现一定的应力集中现象^[12-13],应力极值为-0.41 MPa。蓄水后,在水压力作用下,防渗墙由指向上游的变形转为向下游变形,且变形幅度有较大提高,使得大、小主应力均有所增大,分布规律基本不变,应力极值分别为 1.67 MPa 和-0.66 MPa。由于老坝材料强度较低且防渗墙形态较为狭长,使得拉应力区域相对较大,与修建于深厚覆盖层上的常规面板堆石坝的防渗墙应力规律^[14-15]存在一定差异。

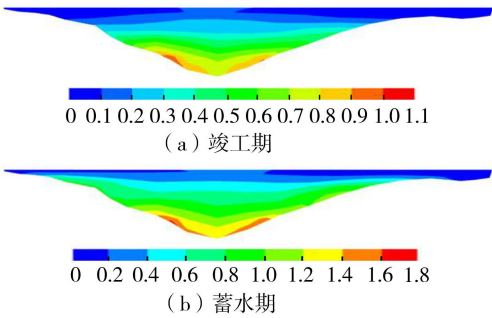


图7 防渗墙大主应力分布(单位:MPa)

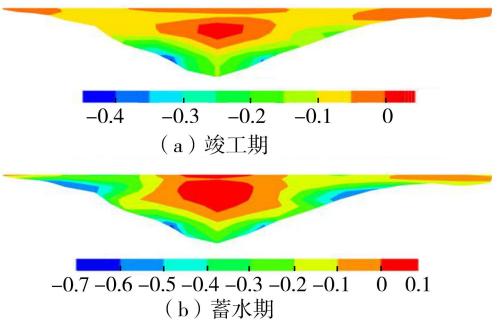


图8 防渗墙小主应力分布(单位:MPa)

3.3 接缝相对变形

表4列出了各施工方案下水库蓄水后连接板与防渗墙之间接缝变形极值。由表4可见,在加高坝填筑至215 m或此之前修建防渗墙,防渗墙与连接板接缝变形几乎不变。而随着防渗墙施工时机的延后,防渗墙与连接板接缝张拉与压缩变形极值分别呈增大和减小趋势,但变化幅度较小,防渗墙施工时机对防渗墙与连接板接缝的切向错动与相对沉陷变形影响较为明显,在加高坝填筑至215 m或此之前修建防渗墙,可明显降低防渗墙与连接板接缝的切

表4 防渗墙与连接板接缝变形极值

方案	变形/mm		
	切向错动	相对沉陷	拉压变形
1	4.84	8.11	-2.23/3.17
2	4.84	8.11	-2.23/3.17
3	4.84	8.11	-2.23/3.17
4	4.87	8.15	-2.24/3.15
5	4.94	9.89	-2.25/3.12
6	5.14	11.46	-2.27/3.06

注:拉压变形以张拉为负,压缩为正。

向错动和相对沉陷变形。

4 防渗墙施工时机优选

图9为不同施工方案下竣工期和蓄水期防渗墙顺河向位移轴向分布,不同施工方案下防渗墙变形分布规律基本相似。竣工期,各方案下防渗墙均有向上游变形的趋势,最大值均位于墙高17 m附近。方案1防渗墙经历了整个加高坝填筑过程,受到加高坝填筑传递的荷载作用较大,使得水平变形较大,顺河向位移极值为-1.56 cm;方案2、3与方案1顺河向位移相差较小,这是因为当加高坝填筑至215 m之前,已填筑坝体高度较低,对防渗墙影响较小,故防渗墙仍几乎承受了整个加高坝所产生的填筑荷载作用;方案4防渗墙水平变形略微减小,位移极值为-1.42 cm;方案5、6受加高坝填筑荷载作用较小,防渗墙水平变形明显减小,其中方案6防渗墙几乎不产生变形,位移极值为-0.11 cm。蓄水期,水压力使得防渗墙向下游变形,方案1~3由于加高坝填筑使防渗墙在竣工期产生的向上游变形抵消了部分蓄水期由水压力引起的变形,故顺河向位移较小,均为4.91 cm左右;方案4~6防渗墙水平变形逐渐增大,其中方案6蓄水期顺河向位移极值最大,为5.84 cm。

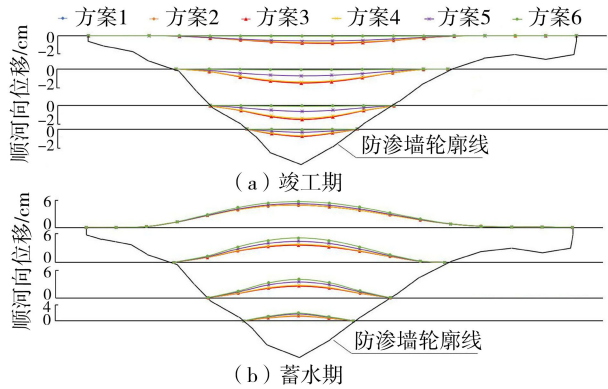


图9 不同方案下防渗墙顺河向位移轴向分布

图10为不同施工方案下防渗墙沿高程方向应力分布,可以看出,除方案5和方案6竣工期大、小主应力的分布与其他方案略有差异外,其他方案下同一时期大、小主应力极值沿高程分布变化规律基本保持一致。而方案5、6竣工期由于防渗墙在加高坝几乎填筑完成后施工,尚未充分受力,因此与其他方案略有差异。

竣工期,方案1防渗墙虽经历了整个加高坝填筑过程,但由于加高坝高度较低,填筑荷载作用不大,防渗墙应力总体上仍较小,大、小主应力极值分别为1.01 MPa和-0.41 MPa;方案2、3虽在防渗墙

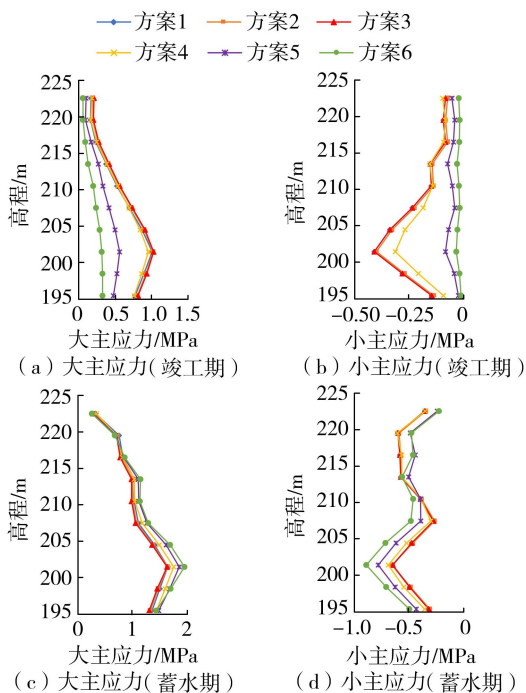


图 10 不同方案下防渗墙沿高程方向应力分布

修建前已填筑部分加高坝,但填筑高度总体较低,对防渗墙影响小,故应力结果与方案 1 基本一致。蓄水后,防渗墙大、小主应力均有所增大。对比蓄水期各方案下防渗墙应力分布情况可以发现,方案 1~3 防渗墙大、小主应力状况明显好于方案 5、6。方案 1 下,上游水压力一定程度上平衡了加高坝填筑给防渗墙带来的下游侧向土压力,加之防渗墙在加高坝填筑过程中已较好地与周边坝体进行位移的协调,故大、小主应力均较小,分别为 1.67 MPa 和 -0.66 MPa。方案 2、3 应力结果与方案 1 基本一致。在加高坝填筑至 222 m 后,随着防渗墙施工时机的延后,蓄水期应力状况逐渐变差。其中,方案 6 虽在竣工期应力最小,但由于与周边坝体缺乏良好的位移协调过程,因此在蓄水期大、小主应力极值明显大于其余方案,应力极值达 1.98 MPa 和 -0.89 MPa,墙体拉应力较大。

综上,在加高坝填筑至 215 m 或此之前修建防渗墙,蓄水后墙体应力变形均较小,虽使得竣工期变形与应力大于其余方案,但变形总体偏小且应力极值远小于混凝土极限抗压、抗拉强度,且可减小防渗墙与连接板接缝的切向错动与相对沉降;反之,在加高坝填筑至 222 m 之后修建防渗墙,蓄水期后墙体应力变形以及防渗墙与连接板接缝变形均偏大,由于大坝长期处于蓄水状态,对防渗系统不利^[16-18]。因此,对于该土石坝加高工程建议在加高坝填筑至 215 m 或此之前修建防渗墙。

依托该工程防渗墙最优施工时机计算分析,对黏土心墙坝上加高面板堆石坝的土石坝加高工程进

行类比应用,建议在加高坝填筑开始前或填筑至与老坝同高之前完成防渗墙的施工,一方面,防渗墙施工完成后,加高坝仍有较长的填筑过程,防渗墙有足够的时间进行应力和变形的协调;另一方面,受加高坝影响,防渗墙在竣工期向上游变形较大,可以部分抵消蓄水后水荷载引起的水平变形,此时,蓄水后墙体应力与变形相对较小,防渗墙应力变形状态以及防渗墙与连接板之间接缝变形状态较佳。

5 结 论

a. 竣工期,加高后坝体向上、下游各自变形,其值分别为 -3.30 cm 和 3.09 cm;蓄水后,加高坝上游坝脚处位移大幅增大,大坝水平位移极值分别为 -1.09 cm 和 5.71 cm。竣工期与蓄水期沉降极值分别为 -14.71 cm 和 -14.88 cm,加高后坝体变形分布及极值符合一般规律。

b. 在加高坝填筑至 215 m 时或此之前修建防渗墙,蓄水后墙体变形与应力较小,竣工期与蓄水期防渗墙顺河向最大位移分别为 -1.56 cm 与 4.91 cm,大主应力极值分别为 1.01 MPa 与 1.67 MPa,小主应力极值分别为 -0.41 MPa 与 -0.66 MPa。

c. 在加高坝填筑至 222 m 之后修建防渗墙,随着施工时机延后,竣工期墙体变形与应力逐渐减小,但蓄水期明显增大。当加高坝填筑完成后修建防渗墙,竣工期与蓄水期防渗墙顺河向最大位移分别为 -0.11 cm 与 5.84 cm,大主应力极值分别为 0.33 MPa 与 1.98 MPa,小主应力极值分别为 -0.03 MPa 与 -0.89 MPa。

d. 相较加高坝填筑后期修建防渗墙,在加高坝填筑至 215 m 或此之前修建防渗墙,可明显降低防渗墙与连接板接缝之间的切向错动和相对沉降变形,变形极值分别为 4.84 mm 与 8.11 mm。

e. 基于本文计算成果,对于该类黏土心墙坝上加高面板堆石坝的土石坝加高工程,建议在加高坝填筑开始前或填筑至与老坝同高之前完成防渗墙的施工,较为提前的施工时机可以改善墙体应力变形状态以及防渗墙与连接板之间的接缝变形状态,以确保防渗系统安全。

参考文献:

- [1] 李云龙. 基于 ANSYS 的浆砌石坝二次加高静动力分析 [D]. 北京:华北水利水电大学,2018.
- [2] 耿计计,王瑞骏,赵一新,等. 土石坝绕坝渗流分析及防渗措施研究 [J]. 水资源与水工程学报,2009,20(5):77-81. (GENG Jiji, WANG Ruijun, ZHAO Yixin, et al. Study on the analysis method and the anti-seepage

- measures for the seepage around the earth-rockfill dam [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5):77-81. (in Chinese))
- [3] 金宇松. 混凝土重力坝加高新老混凝土黏结有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [4] CHRAIBI A F. Heightening of the Sidimohamed Ben Abdallah Dam, Morocco [J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2004, 11(5): 114-117.
- [5] 黄理军, 张文萍. 南方土石坝加高问题的研究[C]//湖南省水力发电工程学会, 中南勘测设计研究院. 2007年湖南水电科普论坛论文集. 长沙: [出版者不详], 2007: 329-335.
- [6] 张运花, 雷杨. 竹寿水库扩容及调水工程大坝加高设计及应力变形三维有限元分析[J]. 四川水力发电, 2017, 36(4): 107-110. (ZHANG Yunhua, LEI Yang. Three-dimensional finite element analysis of dam height design and stress and deformation of Zhushou Reservoir expansion and water diversion project [J]. Sichuan Water Power, 2017, 36(4): 107-110. (in Chinese))
- [7] 王相烜, 刘得潭, 何传凯, 等. 长河坝水电站特高心墙堆石坝双防渗墙渗流控制特性反演分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 88-93. (WANG Xiangxuan, LIU Detan, HE Chuankai, et al. Inversion analysis on seepage control characteristics of double cut-off walls for the extra-high core rockfill dam at Changheba Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 88-93. (in Chinese))
- [8] 沈振中, 邱莉婷, 周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 27-35. (SHEN Zhenzhong, QIU Liting, ZHOU Hualei. Review of seepage control of earth-rockfill dams on thick overburden layer [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 27-35. (in Chinese))
- [9] 郇能惠, 米占宽, 孙大伟. 深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形性状影响因素的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 26-31. (LI Nenghui, MI Zhankuan, SUN Dawei. Study on affecting factors of stress-deformation of diaphragm walls for concrete face rockfill dams built on thick alluvium deposit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 26-31. (in Chinese))
- [10] 吕高峰, 金远征, 朱锦杰. 不同施工顺序对深厚覆盖层坝基折线型防渗墙应力变形的影响[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 86-89. (LYU Gaofeng, JIN Yuanzheng, ZHU Jinjie. Analysis of construction sequence on stress-deformation of polygonal line cut-off wall in deep overburden [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9): 86-89. (in Chinese))
- [11] 吴铭. 深覆盖层混凝土面板堆石坝防渗墙方案优化研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [12] 余翔, 孔宪京, 邹德高. 混凝土防渗墙变形与应力分布特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(9): 1704-1711. (YU Xiang, KONG Xianjing, ZOU Degao. Deformation and stress distribution characteristics of concrete cut-off wall [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(9): 1704-1711. (in Chinese))
- [13] 温立峰, 柴军瑞, 王晓, 等. 深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 84-91. (WEN Lifeng, CHAI Junrui, WANG Xiao, et al. Deformation and stress distribution characteristics of concrete cut-off wall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 84-91. (in Chinese))
- [14] 温立峰, 李炎隆, 柴军瑞. 坝基混凝土防渗墙力学性状的统计分析[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 241-254. (WEN Lifeng, LI Yanlong, CHAI Junrui. Statistical analysis of mechanical properties of dam foundation concrete cut-off wall [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 241-254. (in Chinese))
- [15] 王刚, 张建民, 濮家骊. 坝基混凝土防渗墙应力位移影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 73-77. (WANG Gang, ZHANG Jianmin, PU Jialiu. An evaluation of the factors influencing the stress and deformation of concrete diaphragm wall in dams [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 73-77. (in Chinese))
- [16] 钱玉林, 李辉, 殷宗泽. 堤防防渗墙体的破坏准则研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 120-124. (QIAN Yulin, LI Hui, YIN Zongze. Study on failure criterion of diaphragm wall in levee project [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 120-124. (in Chinese))
- [17] 邓传贵, 甘磊, 邓家铮, 等. 隧道穿越江堤段防渗体消险加固处理技术[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 80-84. (DENG Chuangui, GAN Lei, DENG Jiazheng, et al. Risk elimination and reinforcement technology of anti-seepage for river embankment in tunnel crossing section [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 80-84. (in Chinese))
- [18] 甘磊, 吴健, 戴寿晔, 等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 85-90. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-11-11 编辑: 骆超)