

DOI: 10.11779/CJGE2016S2010

锚固面板堆石坝的构筑方法及其稳定性分析

邵 帅¹, 杨春鸣³, 邵生俊^{1, 2}

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 四川大渡河双江口水电开发有限公司, 四川 阿坝 624000)

摘要: 面板堆石坝是一种常见的挡水构筑物。在堆石填筑技术的基础上, 通过堆石体中布设预应力锚索和下游坝坡增设钢筋混凝土框架网, 将锚索分别与上游坝坡面板和下游坝坡框架锚固起来, 提出了一种堆石体与锚固体协同工作、增强稳定性、减少填筑体的新型坝体结构——锚固面板堆石坝。阐述了锚固面板堆石坝的构筑方法, 应用邓肯—张 E-B 模型的有限元数值方法, 比较分析了堆石坝有、无预应力锚索加固条件下的变形特征及稳定性。分析表明锚固面板可以提高坝体的稳定性、缩短坝体底宽、减少填筑工程量, 获得了经济效益。

关键词: 锚固面板堆石坝; 预应力锚索; 变形; 坝坡稳定

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0061-06

作者简介: 邵 帅(1990-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事土动力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

Construction method for anchoring face rockfill dam and its stability

SHAO Shuai¹, YANG Chun-ming³, SHAO Sheng-jun^{1, 2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering of Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China; 3. Sichuan Dadu River Shuangjiangkou Hydropower Development Co., Ltd., Aba 624000, China)

Abstract: The concrete face rockfill dam is a kind of common water retaining structures. A new structural pattern of rockfill dam, named as anchoring face rockfill dam, is proposed by the prestress cable anchoring the upstream concrete face and downstream concrete framework. The prestress anchorage cable in the rockfill dam could work together with rockfill and concrete face and framework to keep the stability. The construction method for the anchoring face rockfill dam is expressed. The deformation characteristics and stability of anchoring face rockfill dam are analyzed by the numerical method with Duncan-Chang E-B model. The deformation characteristics and stability of the rockfill dam with and without prestressed anchorage cable are compared and analyzed. According to the deformation characteristics during construction and storage period analyzing results, the anchoring face rockfill dam can increase the dam slope rate. The stability of dam slope is analyzed by using the strength reduction method. It is shown that the width of the bottom of dam for the anchoring face rockfill dam can reduce, and the filling quantity decrease to obtain the economic benefit.

Key words: anchoring face rockfill dam; prestress anchorage cable; deformation; dam slope stability

0 引言

面板堆石坝是以压实填筑堆石为主体, 以混凝土面板为防渗体的土石坝坝型^[1-3]。该坝型因其断面较小、施工方便、适用性强、造价低等优点, 受到国内外坝工界的广泛重视, 得到普遍的推广和应用, 从目前已建成坝的运行状况来看, 大多数坝的运行情况良好^[4-7]。虽然面板堆石坝有着良好的应用前景, 但面板堆石坝的设计还依赖于大量的实践经验, 坝体的工作特性在理论上还需要开展深入研究, 完善设计理论。并且, 在实际运行过程中依旧存在长期运行期变形增大、稳定性变差等一些问题亟待解决。

坝体变形和坝坡稳定性是当今面板堆石坝面临的主要问题, 尤其是高混凝土面板堆石坝, 其变形和强度稳定性问题更为突出。由于堆石体是多种材料组成的散粒体, 散粒体颗粒组成局部级配不良和填筑后长期变形未完成的工程特性, 决定了其在自重和水荷载作用下会产生较大的变形。然而, 面板刚度相对较大, 难与堆石体的变形协调, 使得面板与垫层之间发生相对错动, 导致面板与垫层料可能产生脱空, 面板的受力状态和工作条件发生改变。当过大的面板脱空超过面板的承受极限时, 面板会产生裂缝, 对面板的防渗

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320)

收稿日期: 2016-05-19

性能和周边缝止水工作性状产生很大影响。已有的研究通过采取技术手段和抗震措施来提升坝体整体的抗震稳定性,但由于堆石料及面板与堆石体接触面的动力特性和破坏机理非常复杂,坝体抗震稳定性分析与设计理论还不够完善^[8-13]。因此,对于位于地震烈度较高地区的面板堆石坝,为满足稳定性要求,坝坡设计相对较缓,导致在坝高一定的前提下,坝底宽度较大,这不仅增大了坝体的填筑量,也使得输水建筑物和泄水建筑物长度增加,枢纽布置不够紧凑。

锚固面板堆石坝是在面板堆石坝中布设预应力锚索进行加固,形成堆石体与预应力锚索协同工作,增强面板与堆石体相互作用,共同抵抗外荷载的坝体结构。本文将通过计算分析研究现有坝体由于堆石体与混凝土面板之间变形不协调而发生相对错动,致使面板的受力状态和工作条件发生改变的问题,同时对比分析锚固面板提高坝体的稳定性、适当增大设计坝坡、减小坝底宽度、以及减少坝体的填筑量的技术经济效益。

1 锚固面板堆石坝的构筑方法

1.1 锚固面板堆石坝的结构分区

不同颗粒组成堆石料的强度、渗透性、压缩性不同。从坝体防渗和增强稳定性角度出发,在面板堆石坝体内一般采用分区填筑。从坝体的上游面至下游面依次设置有混凝土面板、垫层区、过渡层、主堆石区、下游堆石区、下游护坡。在坝体的周边缝下游侧设置特殊垫层区。对于较高的坝体,宜在混凝土面板的底部处设置上游铺盖区及盖重区。另外,根据具体要求,还可以设置排水区和反滤层。

锚固面板堆石坝通过在坝体上、下游两侧同时布置

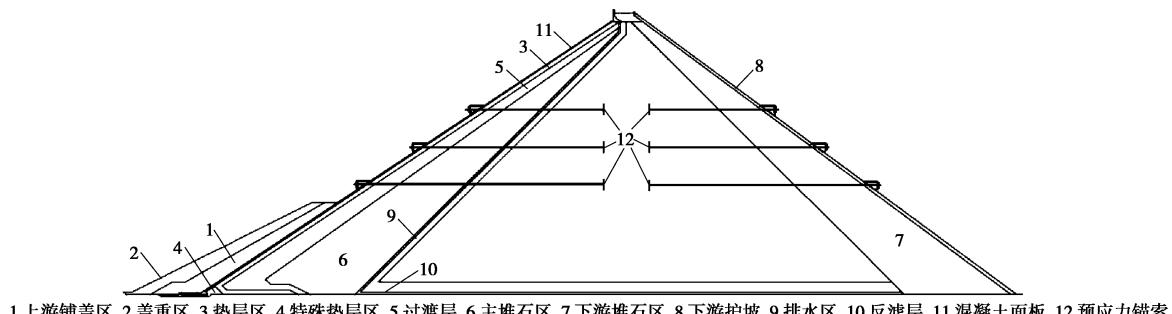


图1 锚固面板堆石坝结构示意图
Fig. 1 Sketch of anchoring face rockfill dam

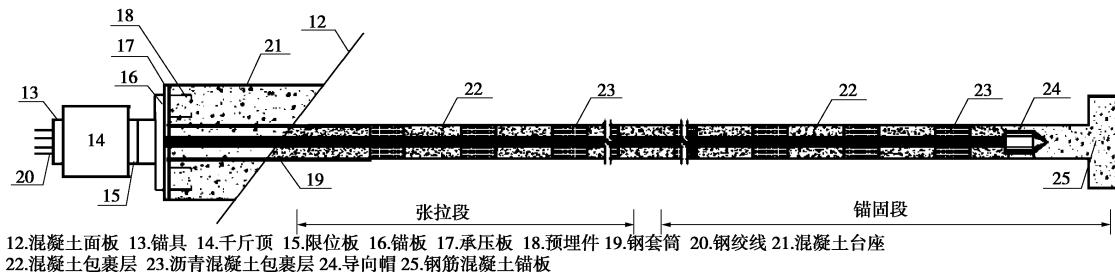


图2 预应力锚索结构示意图
Fig. 2 Sketch of prestress anchorage cable

预应力锚索,形成填筑体与锚索协同受力的结构形式,如图1所示。在坝体的上游侧,预应力锚索的一端通过锚板埋置在堆石体内部,另一端依次穿过主堆石区、过渡层、垫层区,借助混凝土台座锚固于混凝土面板上;在下游一侧,预应力锚索的一端亦通过锚板埋置于堆石体内部,另一端依次穿过下游堆石区及下游护坡后,借助混凝土台座锚固于下游护坡的混凝土框架梁上。

1.2 预应力锚索的结构形式

锚固面板堆石坝中的预应力锚索包括锚固段和张拉段。锚固段的端部设有钢筋混凝土的端部扩大体(锚板),钢绞线的一端通过导向帽与端部扩大体连接。钢绞线外围沿全长被间隔布置的混凝土包裹段和沥青混凝土包裹段保护。混凝土包裹段与沥青混凝土包裹段之间能够紧密的黏结,对钢绞线起到很好的防水保护作用。混凝土包裹段和沥青混凝土包裹段均为现浇而成。混凝土包裹段主要起到增强与填筑体之间锚固的作用,而沥青混凝土包裹段既能够与周围的混凝土包裹层很好的密闭连接,防止钢绞线因为空气和水的进入而锈蚀,又可在预应力张拉时产生拉伸或压缩的协调变形,改善锚索的受力条件。

在张拉段穿过混凝土面板或框架梁处的钢绞线外围设有钢套筒,可以起到辅助定位及抵抗此处较大的剪切力的作用。钢绞线及套筒的出露端被混凝土台座包裹,混凝土台座的外侧利用预埋件连接承压板和锚板,锚板外侧通过限位板连接千斤顶和锚具,采用千斤顶进行钢绞线的张拉以施加预应力,依靠锚具及锚板将预应力传递到承压板上,进而传递到锚索内部使锚固范围内的堆石体挤压紧密。预应力锚索的结构见图2。

1.3 锚固面板堆石坝的施工过程

考虑预制锚索的结构特点, 锚固面板堆石坝的构筑过程按以下步骤实施:

(1) 大坝堆石体的填筑

按照锚固面板堆石坝施工的技术要求, 采用薄层碾压的方法, 垫层料、过渡料和主堆石的填筑分层、同步施工。

(2) 预应力锚索的安装

混凝土分段包裹的锚索及其连接锚板可在现场预制。当堆石体填筑至锚索埋设高程时, 将预制锚索的锚板端埋置于填筑层设计位置, 然后拉伸锚索, 另一端伸出上、下游填筑坡面。伸展锚索的混凝土包裹段之间再安装模板, 现场浇筑沥青混凝土包裹段。当钢绞线被混凝土和沥青混凝土分段包围密封完好后, 在锚索伸出上游坝面一端安装钢套筒, 即可进行下一层堆石体的填筑施工。

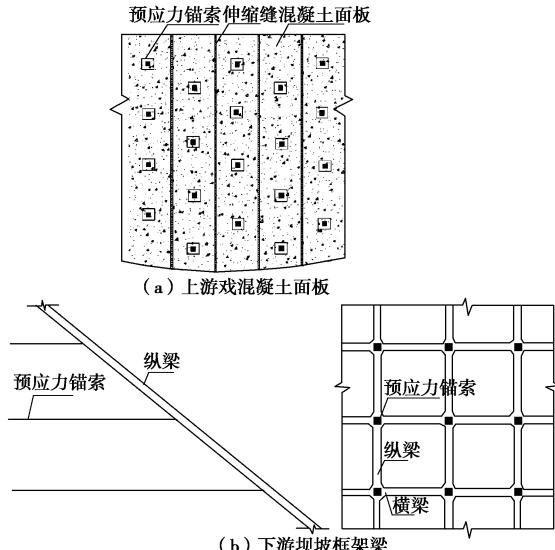


图 3 上游混凝土面板及下游坝坡框架梁结构示意图

Fig. 3 Sketch of concrete face and framed girder

(3) 上游混凝土面板及下游框架梁的浇筑

当坝体填筑达到一定高程后, 或者完成坝体填筑后, 在上游坝面上采用滑模进行混凝土面板的浇筑, 浇筑时预留出预应力锚索外端伸出口, 以便后续进行锚索张拉。下游预应力锚索出露点设置浇筑混凝土框架梁节点, 浇筑时亦预留出预应力锚索外端伸出口, 以便锚索的一端能够固定到框架梁上。根据下游锚索的布设位置, 确定框架梁横梁和纵梁的位置、间距、截面尺寸。框架梁应自坝坡脚开始向坡顶浇注, 每片框架梁应整体浇筑, 一次完成。框架梁将预应力锚索提供的锚索张拉力分散到坝坡土体中, 以抵抗坡体滑动产生的推力, 从而改变坡体的应力分布。上游面板及下游预应力锚索框架梁的结构形式如图 3 所示。

(4) 预应力张拉机具的布设

在上游露出面板及下游露出框架梁横、纵梁交叉

处理设的钢套筒周围浇筑混凝土台座, 混凝土台座外侧通过预埋件连接承压板及锚板, 锚板外侧通过限位板安装千斤顶和锚具, 钢绞线的一端依次穿过承压板、锚板、限位板、千斤顶, 通过锚具进行固定连接。

(5) 锚索的预应力张拉

锚索预制时应先对单根钢绞线进行预紧, 以使锚索各钢绞线受力均匀并确保每根钢绞线顺直。埋置于填土体内的锚索再通过千斤顶将所有钢绞线一起整体张拉至张拉荷载, 将锚头锁定以保持钢绞线的张拉力进而完成对锚索施加预应力的工作。预应力锚索应待上游面板及下游框架梁混凝土强度达到设计值后才能进行张拉。预应力锚索的张拉由下向上分层进行。

(6) 锚头封闭

锚索张拉完成后, 将锚索的锚固段和混凝土台座浇筑为一体。

2 锚固面板堆石坝的变形特征分析

2.1 计算模型与参数

针对某坝体的典型断面建立计算模型, 坐标原点选定在覆盖层底部上游侧角点处。计算坐标系及有限元计算选取范围: X 方向为顺河流方向, Z 方向垂直向上, 以高程为坐标。在上游趾板外边线以外截取 300 m, 即截至 $X=0$ m; 在下游坝体外边线外截取 300 m, 即截至 $X=940$ m。最大坝高 110 m, 坝顶宽 10 m, 上游坝坡为钢筋混凝土面板, 坡度 1:1.5, 下游坝坡为干砌石护坡, 坡度为 1:1.6。

利用 Adina 有限元分析软件, 采用邓肯-张 $E-B$ 模型分析堆石体材料的变形特性, 材料参数见表 1。施工期以每一次堆载作为一个荷载步, 面板的浇注作为施工期的最后一个荷载步。蓄水期通过定义时间函数及空间函数来划分不同的荷载步以模拟蓄水过程。

锚固面板堆石坝的预应力锚索是在坝体堆载过程中, 当填筑至需布设锚索的设计高程时, 在坝体的上、下游侧分别进行布设。本次计算考虑坝体在施工期共分九级进行填筑, 每一级填筑进行一次锚索的布设, 上、下游两侧沿坝高分别布设八排预应力锚索, 表 2 为预应力锚索计算参数。

2.2 锚固面板堆石坝的变形特性分析

根据计算结果, 在未布设预应力锚索时, 施工期和蓄水期最大竖向位移均出现在坝体中部, 最大竖向位移分别为 0.968 m 和 0.965 m, 上游堆石体产生向上游方向的水平位移, 施工期和蓄水期向上游方向的最大位移分别为 0.126 m 和 0.027 m, 下游堆石体产生向下游方向的水平位移, 施工期和蓄水期向下游方向的最大位移分别为 0.190 m 和 0.205 m。在布设预应力锚索时, 施工期和蓄水期最大竖向位移仍然出现在坝体

表 1 邓肯-张 E-B 模型计算参数

Table 1 Parameters of Duncan-Chang E-B model

材料	$\Delta\varphi$	φ	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}	ρ
主堆石料	11.8	46	800	0.34	0.75	400	0.40	2100	1600	0.34
垫层料	7.8	45	910	0.37	0.65	455	0.40	2200	1820	0.37
过渡层	8.1	46	850	0.37	0.65	425	0.48	2150	1700	0.37
下游堆石	8.5	42	300	0.17	0.82	166	0.28	2100	600	0.17

表 2 预应力锚索计算参数

Table 2 Parameters of prestress anchorage cable

弹性模量/Pa	泊松比	屈服应力/Pa	锚固力/kN	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
1.0×10^{11}	0.3	2.0×10^8	100	1.0×10^9	7000

中部, 最大竖向位移分别为 0.973 m 和 0.963 m, 上游堆石发生向上游方向的水平位移, 施工期和蓄水期最大水平位移分别为 0.115 m 和 0.029 m, 下游堆石发生向下游方向的水平位移, 施工期和蓄水期最大水平位移分别为 0.163 m 和 0.185 m。有无预应力锚索条件下不同阶段坝体位移的分布情况如图 4~7 所示。

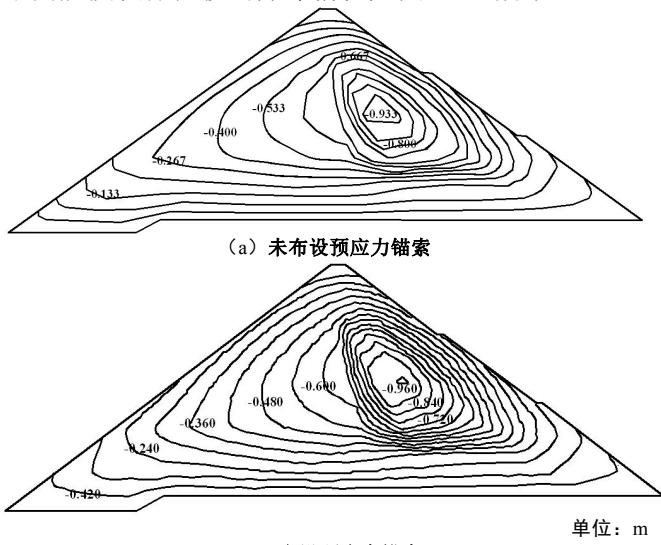


图 4 施工期坝体竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement in construction period

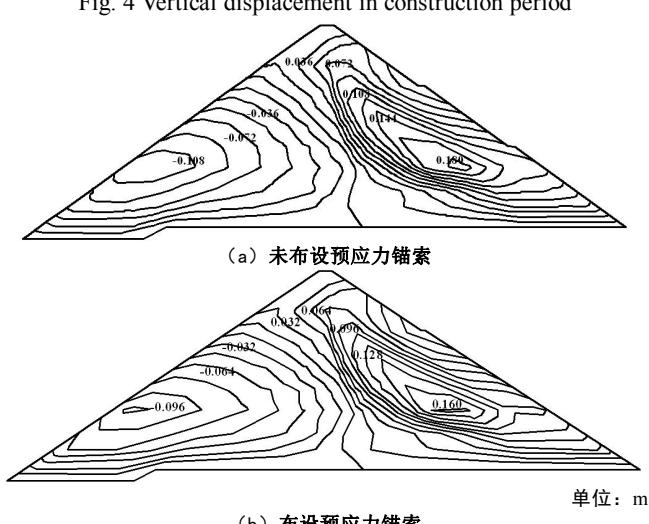


图 5 施工期坝体水平位移

Fig. 5 Horizontal displacements in construction period

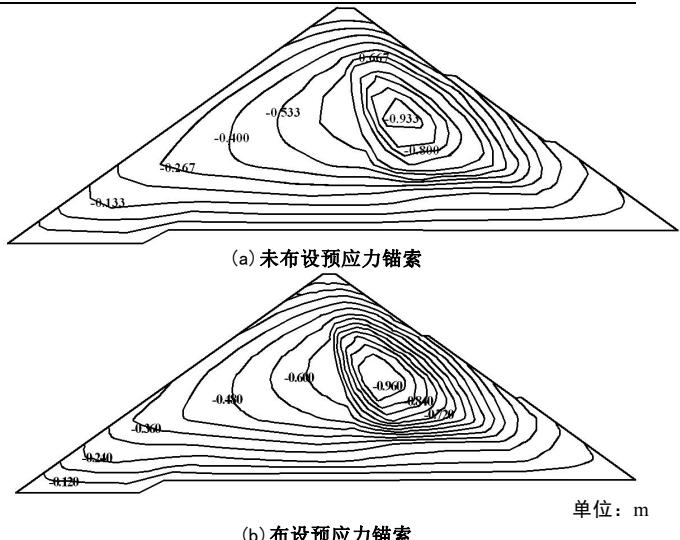
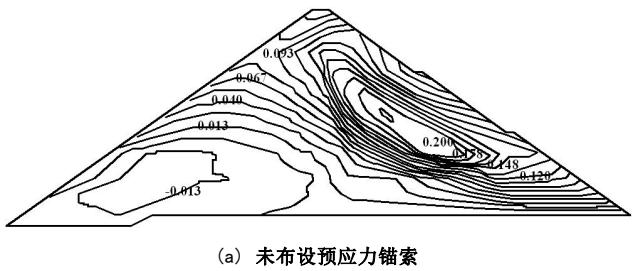
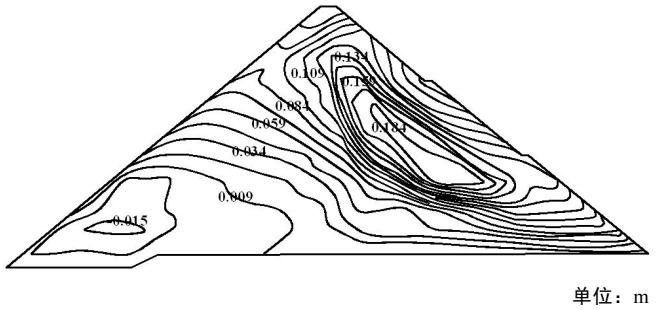


图 6 蓄水期坝体竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement in sluice period



(a) 未布设预应力锚索



(b) 布设预应力锚索

图 7 蓄水期坝体水平位移

Fig. 7 Horizontal displacements in sluice period

可以看出, 虽然坡度较之于下游坝坡稍大, 但由于上覆刚度较大的混凝土面板的限制以及蓄水期水荷载的作用, 上游坝坡并无明显向坡底滑动的趋势。下游侧由于堆石体强度较低, 在堆载及蓄水期考虑水荷

载作用的情况下, 坚向位移的最大值出现在坝体中部偏向下游的一侧, 且偏向下游侧的水平位移值也较大。坝体的坚向位移主要是由施工期决定, 在此期间, 锚索并未进行预应力张拉, 因此, 锚索对于坝体坚向位移的抑制作用并不明显, 而在蓄水期, 由于预应力锚索的存在, 坝体的水平位移得到了很好的控制。通过比较可知, 预应力锚索有助于控制坝体的水平位移, 对于增强坝坡的稳定性有着非常重要的意义。

3 锚固面板堆石坝坝坡稳定性分析

根据《混凝土面板堆石坝设计规范》, 当筑坝材料为硬岩堆石料时, 上、下游坝坡可采用 1:1.3~1:1.4^[14]。在考虑布置预应力锚索的情况下, 将上、下游坝坡的坡度增大至规范允许的最大值, 即将坡度均调整为 1:1.3, 计算坝体的变形情况并对坝坡稳定性进行分析。

对坝坡稳定性分析采用强度折减法, 首先选择初始强度折减系数 F_s , 将坝坡中每一个单元的强度指标按下式进行折减后进行有限元计算, 不断增加折减系数, 直至不收敛为止, 此时前一步的折减系数即为边坡的安全系数。由于混凝土面板的作用以及蓄水期水荷载对于上游坝坡的稳定性是有利的, 其合力的方向指向下游, 因此, 稳定性的验算只针对下游坝坡进行。

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{1}{F_s} \tan \varphi\right) \quad , \quad (1)$$

$$c' = \frac{1}{F_s} c \quad . \quad (2)$$

E-B 模型的强度指标有两种表示方法: 一种是用线性的莫尔库仑参数表示, 强度指标包括 c 和 φ , 另外一种是用大小随围压 σ_3 不断变化的 φ 表示, 参数有 $\Delta\varphi$ 和 φ_0 。将表 1 中的参数 $\Delta\varphi$ 和 φ_0 代入式 (3) 计算 φ 值的大小。对于堆石体材料, 黏聚力 c 为 0, 强度折减过程只需考虑对 φ 按式 (1) 进行折减, σ_3 取坝高中部处的围压。

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) \quad . \quad (3)$$

根据计算结果, 下游坝坡安全系数 F_s 为 1.52, 此时坝体在蓄水期的广义剪应变如图 8 所示。

通过对布设预应力锚索且上、下游坝坡坡度均增大至 1:1.3 的情况下坝体变形的计算, 验证了在保证坝坡稳定的前提下, 预应力锚索可以实现增大坝坡坡度以达到缩短坝底宽度, 减小坝体填筑工程量的目的。在该算例中, 与未布置锚索的情况相比较, 计算断面的面积减小了 3062 m², 考虑该工程坝顶长度为 280 m, 则通过增大坝坡所减少的填筑量约为 86 万 m³,

占总填筑量的 8.6%, 经济效益显著。

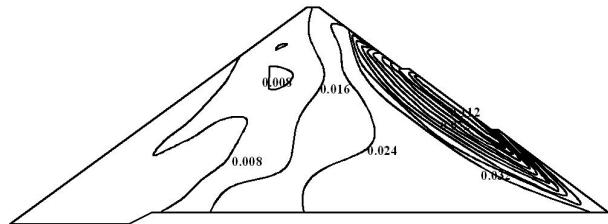


图 8 蓄水运行条件下坝坡的广义剪应变分布

Fig. 8 Generalized shear strains in sluice period

4 结 论

锚固面板堆石坝是在现有面板堆石坝布置分区的基础之上改进的坝型, 即在堆石体中布设预应力锚索使得堆石体与锚固体协同工作、共同抵抗荷载, 以增强坝体的整体稳定性。坝体内的预应力锚索采用混凝土、沥青混凝土分段间隔密封保护, 可在现场就地预制, 当填筑至锚索布设位置高程时, 进行锚索布设。混凝土和沥青混凝土分段保护的锚索既可以增强锚索与填筑体的相互作用, 又可以适应预加荷载张拉, 是一种适宜于填筑体埋设使用的新型锚索。通过对有、无锚索锚固两种情况下堆石坝的填筑过程与蓄水运行的变形比较分析, 以及在布置预应力锚索情况下增大坝坡坡度的稳定性分析, 得出了以下结论:

(1) 坝体在堆载及蓄水过程中上游坝坡稳定性较高, 下游坝坡由于堆石体的强度指标较低会发生相对较大的位移。最大的坚向位移出现在坝体中部, 上游堆石体发生向上游侧的水平位移, 下游堆石体发生向下游侧的水平位移。

(2) 预应力锚索对于坝体的坚向位移影响不大, 但可以显著地抑制水平位移的发展, 预应力锚索的挤压加固作用使得坝体上、下游的水平位移大小都得到了有效的控制, 最大水平位移值明显减小。

(3) 在布设预应力锚索的情况下, 将上、下游的坝坡坡度均增大至 1:1.3, 采用强度折减法对下游坝坡进行稳定性分析, 计算得出安全系数为 1.52, 说明在预应力锚索的作用下, 增大坝坡坡度后仍可以满足坝坡稳定的要求。

(4) 布设预应力锚索后, 增大坝坡坡度, 在保证坝坡稳定性及坝高不变的情况下, 可减小坝底宽度。此算例坝体堆石的填筑工程量可减少约 86 万 m³, 经济效益十分可观。

参考文献:

- [1] 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. (FU Zhi-an, FENG Jia-ji. Concrete-face

- rockfill dam[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 左东启, 王世夏, 林益才. 水工建筑物[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995. (ZUO Dong-qi, WANG Shi-xia, LIN Yi-cai. Hydraulic structure[M]. Nanjing: HoHai University Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 张光斗. 混凝土面板碾压堆石坝的设计与施工[J]. 水利发电学报, 1994(1): 53 - 68. (ZHANG Guang-dou. Design and construction of the concrete-face rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1994(1): 53 - 68. (in Chinese))
- [4] 蒋国澄, 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. (JIANG Guo-cheng, FU Zhi-an, FENG Jia-ji. Engineering of the concrete-face rockfill dam[M]. Wuhan: Science & Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [5] 蒋国澄. 混凝土面板堆石坝进展概述[J]. 贵州水力发电, 1999, 12(4): 46 - 55. (JIANG Guo-cheng. Summary of development of the concrete-face rockfill dam[J]. Guizhou Water Power, 1999, 12(4): 46 - 55. (in Chinese))
- [6] 郭诚谦. 论混凝土面板堆石坝的设计[J]. 水利学报, 1993. (GUO Cheng-qian. Deformation analysis of high concrete face rockfill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993. (in Chinese))
- [7] 蒋国澄. 中国的混凝土面板堆石坝[J]. 水力发电学报, 1994(3): 67 - 78. (JIANG Guo-cheng. Concrete face rockfill dam in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1994(3): 67 - 78. (in Chinese))
- [8] SHERARD J L, COOK J B. The concrete rockfill dam[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113(10): 1096 - 1112.
- [9] COOKE J B. Progress in rockfill dams[J]. 18th Terzaghi Lecture. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(10): 1383 - 1414.
- [10] 陈生水, 沈珠江. 钢筋混凝土面板坝的地震永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 66 - 72. (CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang. Analysis on the earthquake permanent deformation of the Concrete-face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 66 - 72. (in Chinese))
- [11] 李红军, 迟世春, 林皋高. 心墙堆石坝坡加筋抗震稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1881 - 1887. (LI Hong-jun, CHI Shi-chun, LIN Gao. Aseismic stability analysis for reinforced slopes of high core rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1881 - 1887. (in Chinese))
- [12] 虞一鸣, 何蕴龙, 伍小玉. 高堆石坝土工格栅抗震加固效果分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1425 - 1433. (YU Yi-ming, HE Yun-long, WU Xiao-yu. Aseismic strengthening effect of geogrid in high rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1425 - 1433. (in Chinese))
- [13] 孔宪京, 张宇, 邹德高. 超高面板堆石坝面板地震应力改善措施研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 419 - 426. (KONG Xian-jing, ZHANG Yu, ZOU De-gao. Study on aseismic measures of high concrete-face rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 419 - 426. (in Chinese))
- [14] SL 228—98 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL 228—98 Design code for concrete face rockfill dams[S]. Beijing: China Waterpower Press, 1999. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)