

瀑布沟高心墙土石坝渗流分析

涂扬举¹, 王文涛², 薛新华³

(1. 国电新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在深覆盖层地基上修建高土石坝,其防渗体系的可靠性是一项关键技术问题. 防渗墙与土质防渗体连接处是抵御渗透破坏的关键部位. 根据瀑布沟土石坝防渗体系的结构特点,利用有限元方法对瀑布沟土石坝进行了渗流分析. 结果表明:坝体渗流与应力变形计算时,副防渗墙按40%承担水头较为合适;连接部位的渗透坡降是非均匀变化的,混凝土结构顶部的渗透坡降较大,心墙底部出口处的渗透坡降较小;坝体与两岸相接部位心墙底部渗流出口处的坡降最大. 研究结论可以为类似工程提供参考和借鉴.

关 键 词: 防渗结构; 渗流; 渗透坡降; 瀑布沟水电站

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)05-0077-06

对于修建在深厚覆盖层的土质心墙坝而言,主要是通过坝基防渗墙和土质心墙防渗体的连接构成完整的防渗体系. 由于防渗墙的刚度较之覆盖层要大许多,覆盖层的压缩沉降要比防渗墙大得多,防渗墙与覆盖层在垂直方向上的变形差别必将在防渗墙侧面产生较大的摩擦力. 同时由于防渗墙-廊道对心墙的顶托,使廊道附近的心墙土体内出现应力场和位移场的畸变,产生应力集中,从而出现剪切破坏,并导致心墙土料出现裂缝,从而严重降低心墙的抗渗性能. 工程实践表明,防渗墙与坝体土质防渗体的连接是大坝-地基整个防渗系统中最薄弱的环节^[1]. 因此,防渗墙的上部,尤其是与大坝土质防渗体连接处,是渗流控制的关键部位. 上游防渗墙渗流控制的失效,往往造成大坝防渗体的渗透破坏^[2].

防渗墙与大坝土质心墙的连接目前主要有两种形式:一种是墙顶设廊道的形式;另一种是防渗墙直接插入土质防渗体一定深度的形式. 墙顶设置廊道,墙中间预留灌浆孔,可以在墙体局部失效时进行补强灌浆. 插入式连接由于插入段墙外侧向土压力的作用,墙与填土之间能够紧密结合,不容易发生渗流接触冲刷,因而是一种结构简单而且效果较好的连接方式. 由于坝高的发展和防渗墙允许渗流梯度的限制,一些深厚覆盖层地基上的高水头土石坝采用了两道防渗墙,如瀑布沟砾石土心墙土石坝等. 虽然目前土石坝渗流方面的相关文献[3-9]已有一些发表,但对于设置两道防渗墙与土质心墙底部的渗流性状进行分析的文章较为鲜见. 因此,以瀑布沟砾石土心墙土石坝为例,分析了瀑布沟水电站心墙土石坝两道防渗墙与土质心墙底部的渗流性状,可以为今后类似工程两道防渗墙与心墙底部连接处防渗结构设计,以及坝体和坝基防渗设计优化提供参考,具有十分重要的理论价值和工程意义.

1 工程概况

瀑布沟水电站坝址位于大渡河中游尼日河汇口上游觉托附近,地跨四川省西部汉源县和甘洛两县境内,下距乌斯河镇7 km,距成昆铁路汉源车站9 km,上距汉源县城28 km. 电站采用坝式开发,是一座以发电为主,兼有防洪、拦沙等综合利用效益的大型水电站. 瀑布沟水电站采用心墙土石坝坝型,最低高程670 m,坝

收稿日期: 2013-04-08

作者简介: 涂扬举(1964-),男,四川邛崃人,教授级高级工程师,主要从事水电工程建设管理工作.

通信作者: 薛新华(E-mail: scuxxh@163.com)

高 186 m, 坝顶轴线长 573 m, 宽 14 m, 坝体最大底宽约 780 m. 坝顶上游侧设混凝土防浪墙, 墙顶高程 857.20 m, 大坝上游 795 m 高程设 5 m 宽马道, 马道以上坝坡 1:2.0, 以下坝坡 1:2.25. 大坝下游坝坡布置有“之”字形道路, 道路布置在 1:1.8 坡比之外. 大坝心墙部分主要是由砾石土防渗体和人工反滤体系组成, 心墙砾石土防渗体的顶高程为 854 m, 顶宽 4 m, 底高程 670 m, 上、下游坡均为 1:0.25. 土料以宽级配砾石土为主, 心墙底部、心墙与岸坡接触带、防渗墙顶和混凝土廊道周围设高塑性黏土. 心墙上、下游侧各设两层反滤, 上游两层厚均为 4 m, 下游两层厚均为 6 m, 反滤层以外为过渡料和坝壳料. 心墙下部河床覆盖层采用两道各厚 1.2 m、间隔 14 m 的混凝土防渗墙防渗, 其中一道为主墙, 一道为副墙, 心墙底面以下最大墙深约 78 m. 基础防渗墙与心墙间采用插入式连接, 防渗墙插入心墙深度为 15 m, 墙间设混凝土廊道, 瀑布沟水电站心墙土石坝剖面见图 1.

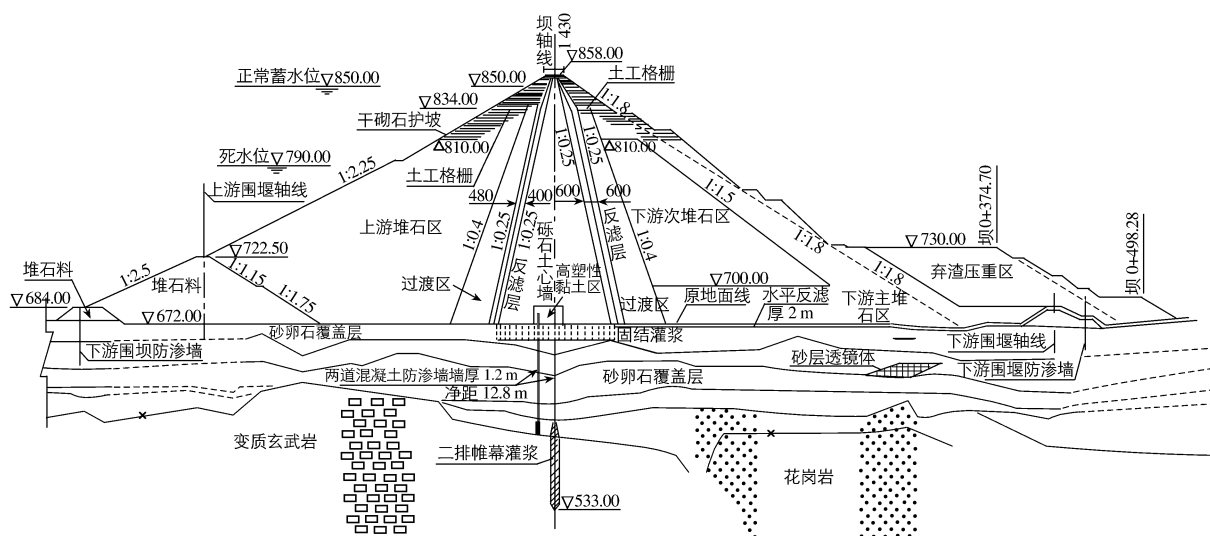


图 1 瀑布沟心墙土石坝剖面

Fig. 1 Profile of Pubugou earth-rockfill dam

2 坝基渗流计算与防渗墙的水头分担比例确定

技施阶段委托清华大学和中国科学院力学研究所对瀑布沟心墙堆石坝进行了渗流分析^[10]. 利用自编有限元程序对瀑布沟砾石土心墙坝进行了渗流计算. 计算主要分为两个阶段, 第一个阶段主要是为了满足心墙底部局部渗流分析与应力变形分析要求, 确定两道防渗墙的水头分担比例而取局部区域进行的渗流计算; 第二个阶段是完成优化论证以后, 对整个坝体与坝基进行全面渗流分析.

2.1 计算模型和计算网格

坝基渗流计算的主要目的是确定两道防渗墙的水头分担比例. 由于坝肩上部的渗流对覆盖层内的渗流性状影响很小, 渗流的上边界只取到高程 750 m. 从心墙内部进入防渗墙之间的渗流量远小于坝基岩体绕渗的渗流量, 因而坝体的渗流对坝基的流场影响可以忽略, 在坝基渗流计算中可以不包含坝体部分, 以减小计算的规模, 提高模型的精细程度.

图 2 为坝基渗流计算的有限元网格, 计算的范围取为 450 至 750 m 高程, 顺河向取坝轴线上、下游各 200 m, 坝轴向取约 900 m. 网格共计 12 976 个 20 节点六面体单元, 56 492 个节点. 计算所选取的边界条件为: 上游覆盖层表面节点、两岸山体表面和模型上游断面的覆盖层表面节点作为上游已知水头边界; 下

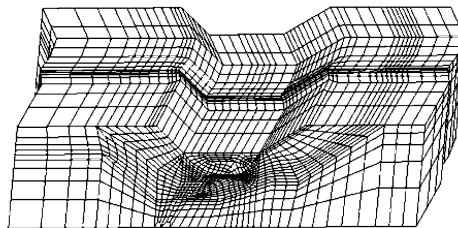


图 2 坝基渗流计算有限元网格

Fig. 2 3D meshes of a model

河覆盖层表面节点和模型下游断面的覆盖层表面节点作为下游溢出面边界;其他边界均为不透水边界. 计算上游水位为 850 m,下游水位 670 m 时坝基的稳定渗流场.

2.2 计算参数和计算条件

图 3 为防渗墙剖面基岩渗流参数与帷幕布置,副防渗墙的帷幕灌浆范围在 0+230.00 以左取最大深度往下 20 m,以右取最大深度往下 10 m. 主防渗墙帷幕灌浆范围依照工程布置图中大坝剖面图的灌浆范围确定.

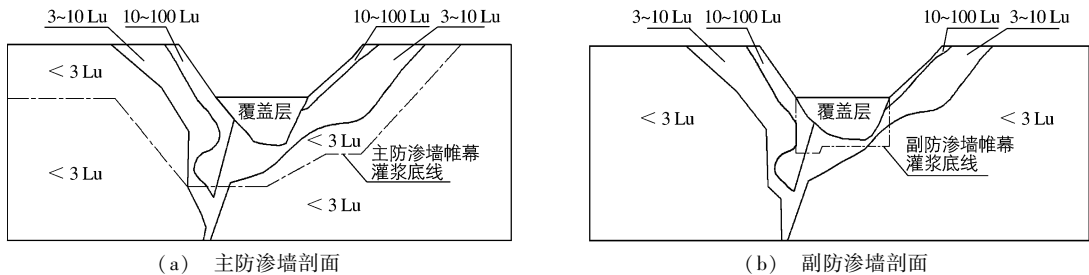


图 3 渗流参数与帷幕布置
Fig. 3 Parameters of seepage and curtain arrangement

河床覆盖层各层均属强透水层,渗透系数差异不大,在 0.023 ~ 0.104 cm/s 范围内,各层中均有局部架空层分布,架空层渗透系数 K 值为 0.116 ~ 0.580 cm/s. 覆盖层材料按同一参数取值. 灌浆帷幕厚度取为 2.6 m. 渗流计算采用 3 组参数,见表 1. 第 1 组参数为基本参数,第 2 组参数防渗墙的渗透系数降低,用于分析防渗墙参数对水头分担结果的敏感性,第 3 组参数岩石的渗透系数略为放大,分析岩石参数取值偏差的敏感性.

表 1 各材料渗透系数
Tab. 1 Seepage parameters of different materials (cm · s⁻¹)

材 料	防 渗 墙	灌浆帷幕	覆 盖 层	强风化岩 (10 ~ 100 Lu)	弱风化岩 (3 ~ 10 Lu)	微风化岩 (<3 Lu)
第 1 组	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	8.0×10^{-2}	2.5×10^{-4}	5.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
第 2 组	2.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	8.0×10^{-2}	2.5×10^{-4}	5.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
第 3 组	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	8.0×10^{-2}	3.0×10^{-4}	6.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}

2.3 计算结果分析

3 组参数计算的各部位水头消耗比例分别为:第 1 组,副防渗墙 41.5%,主防渗墙 58.3%,覆盖层 0.2%;第 2 组,副防渗墙 38.6%,主防渗墙 61.4%,覆盖层 0.2%;第 3 组,副防渗墙 40.1%,主防渗墙 59.5%,覆盖层 0.4%. 可见,副墙上消耗的水头比例为 40% 左右,主墙上为 60% 左右,河床覆盖层上消耗的水头比例可以忽略不计;在岩石和灌浆帷幕的渗透系数不变的情况下,防渗墙的渗透系数降低为原来的 90%,主防渗墙承担的水头比例有 3% 的增长,在防渗墙和帷幕灌浆的渗透系数不变的情况下,岩石的渗透系数取偏大值,主防渗墙承担的水头比例有 1% 的增长,故主副防渗墙的水头分担比例基本上为 6 : 4.

综上所述,坝体渗流与应力变形计算时副防渗墙按 40% 承担水头来计算防渗墙的应力变形是合适的.

3 坝体与坝基整体三维渗流计算

3.1 计算模型与计算网格

如图 4 所示,整体网格的计算范围左岸截断处断面距离河谷中心线(坝轴线处桩号 0+286.00) 870 m 左右;右岸截断处距离河谷中心线 600 m 左右. 上下游断面均垂直于河流方向,上游断面河谷中心处距离坝轴线

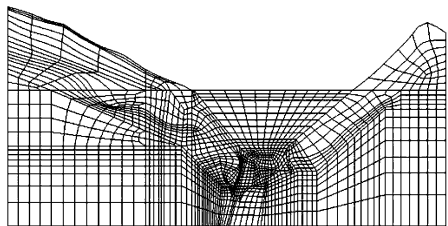


图 4 三维有限元计算网格
Fig. 4 3D meshes of the model

850 m,下游断面河谷中心处距离坝轴线 870 m.底部断面为高程 400 m 的平面.共剖分 62 904 个 20 节点六面体单元,266 118 个节点,坐标系沿坝轴线桩号增加方向为 x 轴正方向,垂直坝轴线平面指向下游为 y 轴正方向,沿高程增加方向为 z 轴正方向^[10].

3.2 河谷两侧地下水位反演

根据水文地质资料,左岸 ZK46 孔年水位动态变化 873.65 ~ 894.03 m,右岸 ZH47 孔年水位动态变化范围为 893.45 ~ 899.57 m,左岸平均水力坡度为 14° ~ 17°,右岸平均水力坡度为 22° ~ 25°,两岸地下水向河谷中间排泄,由于河道在折弯段前后基本顺直,可近似认为天然地下水的渗流状况为垂直河流方向的二维渗流.通过坝轴线河谷横剖面的渗流场计算来对三维模型两岸截断处的地下水位进行反演.通过改变两侧边界水头进行试算,最终确定的左侧边界水头为 900 m,右侧边界水头为 1 030 m,得到的地下水等孔压线如下图 5 所示.

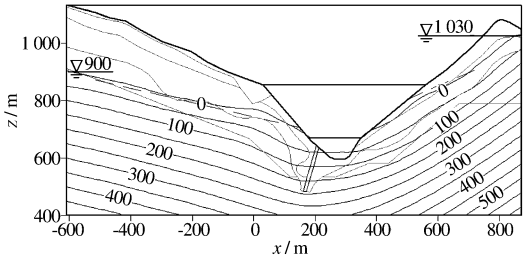


图 5 边界水头反演渗流场
Fig. 5 Boundary head inversion seepage field

3.3 计算参数和计算条件

图 6 为防渗墙剖面的材料分区与帷幕布置,副防渗墙的帷幕灌浆范围在 0+230.00 m 以左取最大深度往下 20 m,以右取最大深度往下 10 m.主防渗墙帷幕灌浆范围依照工程布置图中大坝剖面图的灌浆范围确定.

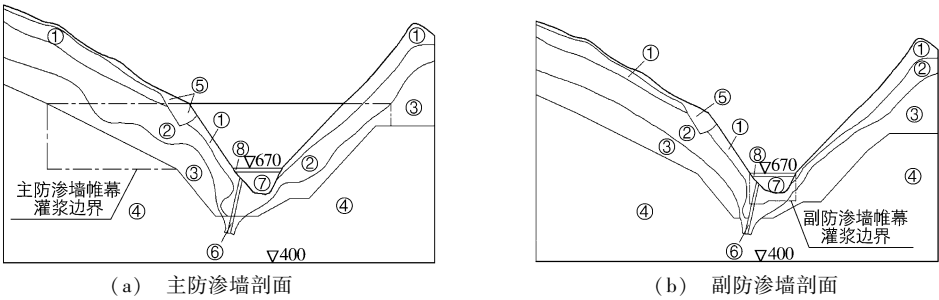


图 6 材料分区与帷幕布置
Fig. 6 Zoning of materials and curtain arrangement

整体渗流计算网格的材料参数见表 2,各河床覆盖层均属强透水层,渗透系数差异不大,在 0.023 ~ 0.104 cm/s 范围内,故按同一参数取值.计算工况为稳定渗流工况,上游水位 850 m,下游水位 670 m.

表 2 坝基渗流计算参数

Tab. 2 Seepage parameters of dam foundation (cm · s⁻¹)

材料编号	材料种类	渗透系数	材料编号	材料种类	渗透系数
①	10 ~ 100 Lu	2.5 × 10 ⁻⁴	⑧	固结灌浆	2.0 × 10 ⁻⁵
②	3 ~ 10 Lu	5.0 × 10 ⁻⁵	⑨	帷幕灌浆	1.0 × 10 ⁻⁵
③	1 ~ 3 Lu	2.0 × 10 ⁻⁵	⑩	防渗墙	1.0 × 10 ⁻⁶
④	<1 Lu	1.0 × 10 ⁻⁵	⑪	心墙料	1.0 × 10 ⁻⁵
⑤	崩积堆积	8.0 × 10 ⁻²	⑫	反滤层	5.0 × 10 ⁻³
⑥	F2 断层	1.0 × 10 ⁻²	⑬	堆石	1.0 × 10 ⁻¹
⑦	覆盖层	8.0 × 10 ⁻²			

3.4 计算结果分析

通过对瀑布沟工程区水位地质资料和钻孔观测水位等资料的分析研究,建立了瀑布沟工程区天然渗流场计算分析模型,并通过多组切取边界水位的模拟计算分析,拟合出一组与“观测渗流场”较为相近的三维天然渗流场及其相应切取边界的地下水位边界条件,为三维渗流控制分析研究提供了基础.计算分析表明:

(1)在现设计渗控方案及相应参数(防渗帷幕渗透系数 1.0×10^{-5} cm/s)条件下,左岸岩石外表面混凝土板下游溢出点高程 681.8 m,右岸岩石外表面混凝土板下游溢出点高程 681.2 m,略高于河谷中心水面线,在河床部位,坝体最大断面心墙下游反滤层后堆石体内水面线高程为 680.8 m.在考虑边界水头的情况下,防渗墙处的水头降落要略小于无边界水头的情况.副墙上的水头降落约占总水头的 38.5%,主墙上的水头降落约占 54.6%,两道防渗墙水头分担比例约为 4:6,整体的计算结果与局部计算结果基本一致.在 F2 断层以及左岸坝肩的崩积岩体处由于渗透系数较大,水头有明显的下降,覆盖层内的水头降落较小.

(2)在设计初拟渗控方案及相应参数(防渗帷幕渗透系数 1.0×10^{-5} cm/s)条件库水通过防渗平面向下游的渗透量为 $13\,009\text{ m}^3/\text{d}$,其中透过坝体渗流量为 $862\text{ m}^3/\text{d}$,0+286 m 左右的渗流量为 $10\,176\text{ m}^3/\text{d}$,以右的渗流量为 $1\,971\text{ m}^3/\text{d}$.

(3)心墙上部的渗透坡降较小,下部较大,心墙 710 m 高程以上的渗透坡降一般不大于 2.5.心墙内部高塑性黏土范围以外一般渗透系数小于 4,而廊道和副墙顶部的高塑性黏土渗透坡降较大,最大值达到 16.廊道与副墙之间高塑性黏土下部的渗透坡降小于 1.河谷中心部分心墙下游侧底部与覆盖层相接部位渗透坡降小于 4.5,而与岸坡相接处渗透坡降比较大,最大值达到 10.7.心墙下游面的下部渗透坡降介于 2~2.5 之间,下游面出口渗透坡降是很安全的.心墙底部与固结灌浆后的覆盖层接触部位渗透坡降由廊道向下游逐步减小,渗透坡降在河谷中部也比较小,最大值高塑性黏土内小于 5,砾质土内小于 3.5,在坡脚比较大.由于底部设置了 0.5 m 厚的水泥土,接触面又处于受压状态,土颗粒进入灌浆覆盖层和接触冲刷的可能性不大.

(4)覆盖层内的渗透坡降较小,约为 0.01,小于覆盖层的准许渗透坡降(0.07~0.4).最大坡降位于主防渗墙底部,约为 6.7,副防渗墙底部最大坡降约为 5.5,主防渗墙顶部与坝体连接处的坡降也较大,约为 4.5.

(5)左岸侧由于 10~100 Lu 岩体范围较大,且有 F_2 断层发育,渗流速度较右岸侧大.最大流速位于防渗帷幕范围以外的断层内部,达到 $14\text{ m}/\text{d}$,此处是渗漏的主要通道.因此,左岸侧 0+126~0+286 m 范围内的防渗帷幕适当加深,以能覆盖住断层的影响范围为宜.

4 结 语

深厚覆盖层中防渗墙与土石坝防渗体的连接往往是大坝防渗体系的关键因素,也是防渗体系的薄弱环节,对防渗墙的应力状态和安全具有决定性影响,因此,对于设置两道防渗墙与土质心墙底部的渗流性状进行分析计算是十分必要的.本文通过对瀑布沟砾石土心墙土石坝防渗墙与坝基渗流等进行了分析,可以得出以下结论:

(1)坝体渗流与应力变形计算时,副防渗墙按 40% 承担水头来计算防渗墙的应力变形是比较合适的.

(2)连接部位的渗透坡降是非均匀变化的,防渗墙与廊道顶部的渗透坡降大,渗流出口的渗透坡降小.

(3)设两道防渗墙时,混凝土结构插入土质防渗体的深度可以通过有限元计算进行优化设计.

(4)连接处土体和混凝土结构接触面一般处于紧压闭合状态,高塑性黏土仅设于混凝土结构顶部即可满足防渗要求.

参 考 文 献:

- [1] 吴梦喜,余学明,叶发明.高心墙堆石坝坝基防渗墙与心墙连接方案研究[J].长江科学院院报,2010,27(9):59-63.
(WU Meng-xi, YU Xue-ming, YE Fa-ming. Research on conjoining scheme for anti-seepage wall of high rockfill dam with earth core [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(9): 59-63. (in Chinese))
- [2] 刘杰.混凝土防渗墙渗流控制几个问题实例分析[J].大坝观测与土工测试,1992,16(5):39-43. (LIU Jie. Case study of concrete diaphragm walls seepage control [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1992, 16(5): 39-43. (in Chinese))
- [3] 郭成谦.论双排防渗墙的设计[J].水力发电,1992(9):18-22. (GUO Cheng-qian. On the design of two anti-seepage walls [J]. Water Power, 1992(9): 18-22. (in Chinese))
- [4] 肖白云.混凝土防渗墙墙体材料及接头型式的研究[J].水力发电,1998(3):29-31. (XIAO Bai-yun. Research on

- material and joint type of anti-seepage wall[J]. *Water Power*, 1998(3): 29-31. (in Chinese))
- [5] 陈刚, 马光文, 付兴友, 等. 瀑布沟大坝基础防渗墙廊道连接型式研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2005, 37(3): 32-36. (CHEN Gang, MA Guang-wen, FU Xing-you, et al. Research for the joint type by gallery between dam imperious wall and core wall of Pubugou project[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2005, 37(3): 32-36. (in Chinese))
- [6] 傅少君, 陈胜宏. 瀑布沟堆石坝防渗体自适应有限元分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(3): 499-504. (FU Shao-jun, CHEN Sheng-hong. Analysis of seepage prevention system of Pubugou rockfill dam by adaptive FEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 499-504. (in Chinese))
- [7] 吴秋军, 傅少君. 子模型方法研究瀑布沟土石坝防渗结构[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2006, 39(3): 55-59. (WU Qiu-jun, FU Shao-jun. Study on seepage prevention structure for Pubugou earth-rock dam by sub-model method[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2006, 39(3): 55-59. (in Chinese))
- [8] 邢玉玲, 束一鸣, 花加凤, 等. 膜土联合防渗系统对高土石坝心墙拱效应的影响[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(4): 456-459. (XING Yu-ling, SHU Yi-ming, HUA Jia-feng, et al. Effect of geomembrance and core-wall united imperious system on arch effect of core-wall in high earth-rock dams[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2007, 35(4): 456-459. (in Chinese))
- [9] 段祥宝, 李祖贻. 瀑布沟水电站大坝三维渗流数值模拟研究[J]. *水电站设计*, 1997, 13(1): 29-38. (DUAN Xiang-bao, LI Zu-yi. Numerical simulation research on three-dimensional seepage flow for Pubugou earth rockfill dam[J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1997, 13(1): 29-38. (in Chinese))
- [10] 成都勘测设计研究院. 四川省大渡河瀑布沟水电站枢纽工程蓄水安全鉴定设计自检报告[R]. 成都: 成都勘测设计研究院, 2009. (Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute. Key project storage safety appraisal design self-check report of Pubugou[R]. Chengdu: Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute, 2009. (in Chinese))

Seepage analysis of Pubugou high earth-rockfill dam

TU Yang-ju¹, WANG Wen-tao², XUE Xin-hua³

(1. *Guodian Xinjiang Power Co., Ltd., Wulumuqi 830063, China*; 2. *Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China*; 3. *College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract: The reliability of seepage prevention system is a key problem for high earth-rockfill dam located in a foundation of large overburden depth. The conjoining area of the anti-seepage soil body and the concrete diaphragm wall is a key part against seepage induced failure. According to the characteristics of the seepage prevention system of the Pubugou earth-rockfill dam, a finite element method (FEM) is applied to analyze the seepage flow of the whole dam. The analysis results show that the appurtenant impervious wall taking 40% water head is suitable, and that the seepage gradient in the conjoined area is inhomogeneous around the concrete structure. The seepage gradient at the top of the structure is much bigger than that at the outlet of the earth core wall base. The analysis results can be taken as the references for similar projects (works) in the future.

Key words: seepage prevention structure; seepage; seepage gradient; Pubugou hydroelectric project