

溪柄碾压混凝土薄拱坝坝体渗漏处理

叶源新, 刘光廷, 李鹏辉, 陈凤岐

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:介绍溪柄大坝蓄水后出现的严重渗漏情况, 分析渗漏原因, 重点阐述防止渗漏所采取的措施。通过比较, 选择从坝顶竖直向下钻孔、垂直于层间缝面的交缝灌浆形式对层间缺陷进行堵漏防渗兼补强灌浆。进行了灌浆施工设计, 根据既要防渗堵漏又要补强的灌浆目的提出了特殊的施工要求: 灌注低浓度浆液的时间适当放长, 确保小孔隙得到较好灌注; 不许采用间歇式灌浆方法提高灌浆效率; 对单孔灌浆时间和注浆总量不设上限控制。灌浆后对大坝进行查勘, 原先的渗出点不再出现渗水, 表明施工效果良好。

关键词:碾压混凝土坝; 坝体渗漏; 交缝灌浆; 溪柄大坝

中图分类号:TV642.4⁺2; TV543⁺.6 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2005)03-0027-05

Dealing with leakage of Xibing roller compacted concrete thin arch dam//YE Yuan-xin, LIU Guang-ting, LI Peng-hui, CHEN Feng-qi (Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In allusion to the serious leakage occurring in the Xibing dam body after water impoundment, the causes of leakage were analyzed, with emphasis on the measures for seepage control adopted for treatment of inter-layer defects, such as boring from the top toward the bottom of the dam body and placement of grout holes perpendicular to the joint face. In consideration of the objectives of the project, special requirements of construction were put forward, including prolonging low-concentration grouting to ensure the sufficient grouting in small pores, avoiding the adoption of batch-type grouting to improve the grouting efficiency, and without setting the upper limit of the time and total amount of grout filling in single holes. The survey of the dam after grouting shows that there is no leakage from the original seepage points, demonstrating the good effect of construction.

Key words: roller compacted concrete dam; seepage of dam body; joint grouting; Xibing dam

溪柄一级电站大坝为碾压混凝土薄拱坝(最大厚度 12 m), 坝顶弧长 95.50 m, 坝底高程 580.50 m, 坝顶高程 644.00 m, 最大坝高 63.50 m。水库死水位为 610.00 m 高程, 正常蓄水位为 639.00 m 高程, 校核洪水位为 642.70 m 高程。电站为引水式电站, 大坝下游除汛期泄洪外一般处于无水状态。为了减少坝体结构对碾压混凝土快速施工的干扰, 坝体内未设置排水廊道, 只在 590.00 m 高程的坝肩设了灌浆排水平洞(见图 1)。1994 年 11 月中旬开始浇筑碾压混凝土, 1995 年 4 月完工, 5 月蓄水。

溪柄大坝完工蓄水后, 渗漏严重, 先后于 1996 年 3 月、1996 年 10 月至 1997 年 6 月和 1998 年 11 月至 1999 年 2 月进行了 3 次坝体堵漏补强灌浆和坝肩帷幕灌浆, 渗漏情况有了一定改善。2001 年坝体渗漏再次发展, 层间渗漏比较严重。渗透水流会削弱层间结合并沿着可能的竖向通道在竖直方向上侵蚀溶蚀坝体混凝土, 降低坝体梁向和拱向的承载力, 不

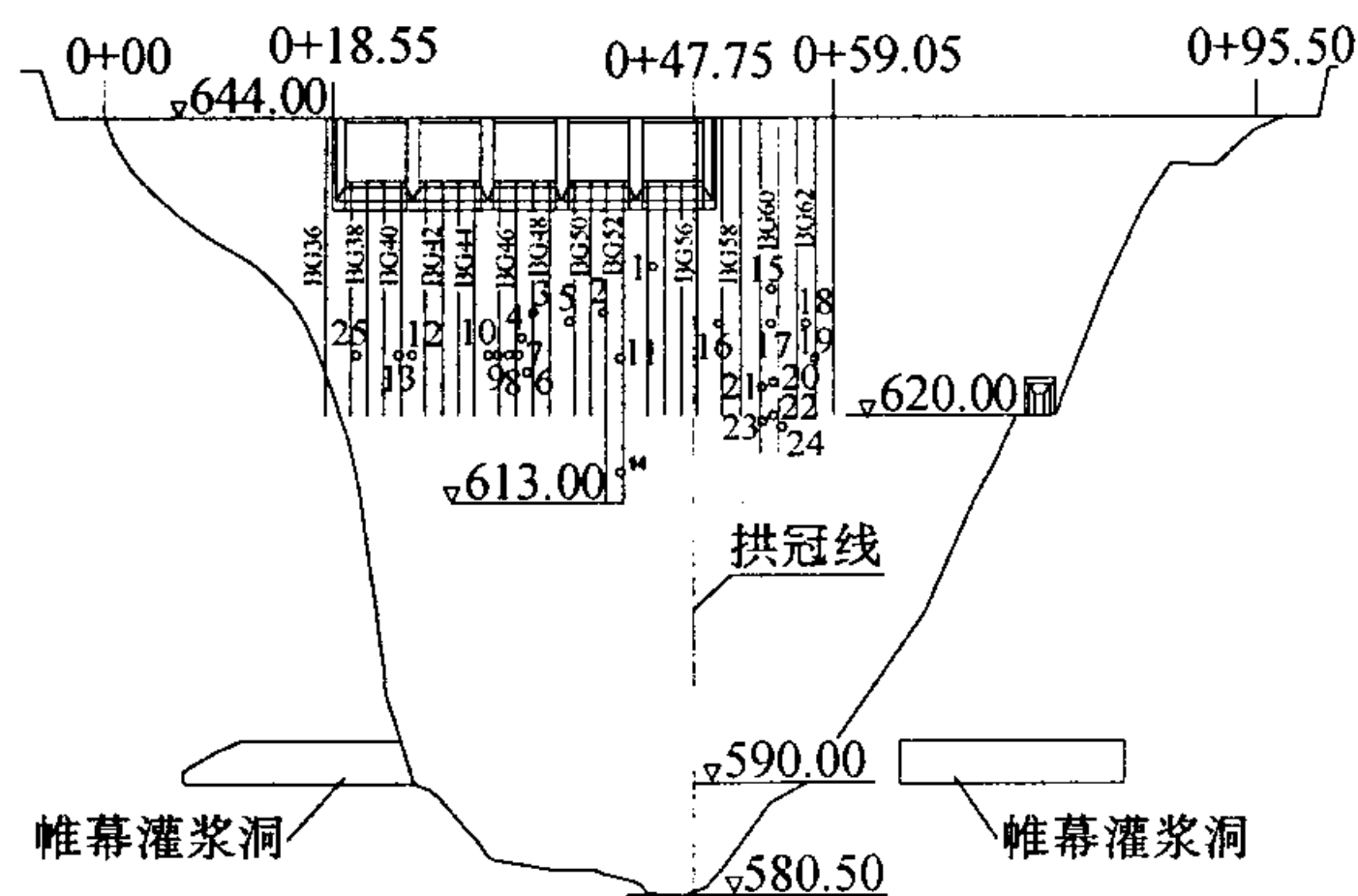


图 1 灌浆孔位上游立面布置(单位: m)

利于大坝安全。需要进一步对渗漏进行调查处理, 本文只讨论坝体部分的渗漏处理, 不包括绕坝渗漏。

1 渗漏状况调查

2001 年 11 月, 在上游水位为 635.70 m 高程时, 检查大坝下游表面的渗漏点、渗漏裂缝和渗漏面。坝体主要漏水发生在下游坝面 620.00 ~ 629.00 m 高程

范围内,有 10 多处呈小射流状态,其他有 20 余处滴水外漏.进一步确定渗漏的位置,并进行相应编号,按测量结果绘制成渗漏分布图(图 1).图 1 中 1~25 为观察的坝体下游面渗漏点,图中竖直线为灌浆孔位.

综合调查结果显示溪柄拱坝的渗漏情况属于大面积散渗(面渗漏)、线渗漏和集中渗漏(点渗漏)混合,漏水和射流并存的严重渗漏.水位越高渗漏点越多,渗漏越严重,水位逐渐降低时渗漏点的高程也随之下降.可以判断坝体的渗水主要是从上游坝面通过层间裂缝孔洞渗透到下游坝面的.

2 渗漏成因分析

碾压混凝土的层面渗透具有明显的不均匀性,这种不均匀性是由施工的离散性所致^[1].溪柄大坝的渗漏成因可以从碾压混凝土坝这种坝型的特殊施工方式来探寻,主要有以下两个方面.

a. 施工质量差.据溪柄电站工程指挥部在 1995 年 8 月 22 日发出的《关于要求从速派员前来处理溪柄电站大坝漏水问题的函》中记录,坝体中间部位漏水的主要原因是大坝施工过程中存在 4 方面的问题:①上游坝面的常态混凝土振捣不均,有些地方粗骨料集中,平仓、振捣不够;施工碾压过程中使用的是木模板,模板刚度不够,变形严重导致坝面不平整;模板在多次使用后破损严重,混凝土浇筑过程中的漏浆造成坝面出现多处条带状“蜂窝孔洞”,极大地削弱了混凝土表面乳浆层的抗渗能力,构成了渗水通常的入口,降低了坝体的整体防渗能力.②由于没有小振动碾,大振动碾又不方便靠外边缘碾压,因此,上、下游坝面两侧每层都有约 10~20 cm 宽条带的混凝土碾压不到.每层碾压混凝土下部坡底经常占去常态混凝土的位置,常态混凝土成锯齿状断面上升,最薄处常常不到 50 cm.在连续上升过程中,这些松散斜坡没有进行削坡铲除,形成了松散薄弱带,对坝体受力和防渗很不利.③上、下层常态混凝土的连接问题,尤其是在 600.00 m 高程以上,气温及浇筑温度逐渐升高,初凝时间缩短,而施工间隔时间拉长,超过初凝时间,上、下交接面处理又不够认真,造成水平冷缝,再加上大振动碾压不到位造成的上、下层常态混凝土交接面的有效宽度减小,可能形成较短的漏水通道.④大坝上游面 620.00 m 高程以下采用加拿大赛柏斯化学公司出品的赛柏斯(XYPEX)防水材料作防渗处理,仍然发生少量漏水,除上述原因外,很有可能是防渗处理的施工方法不当或是局部漏涂.

另外有些部位常态混凝土和碾压混凝土搭接不好,也会形成竖直向的通道.此次灌浆施工中也验证

了这一判断.比如 BG56 号孔灌浆时,自下而上灌至第三灌段 630.00~635.00 m 高程时,上游坝面 625.00~630.00 m 高程出现 3 处以上的漏浆.表明坝体内除了水平向的层间缝还有竖向通道与之交错.

b. 运行管理不善.溪柄坝连续多年超校核洪水位蓄水.下游面拱冠处拉应力过大,层间薄弱面在拉应力下抗渗性降低,坝表面的缺损处抗渗能力更加恶化.当因水力破坏而形成渗流通道,则伴生了混凝土的侵蚀溶蚀,进一步降低了坝体的抗渗能力,导致渗漏情况恶化.

3 处理措施

防水堵漏应尽可能靠近渗漏源头^[2].凡条件容许,应尽量在迎水面堵截,这样既可以直接止住渗漏,又可将水封闭在混凝土结构物以外,防止渗漏水对结构物的侵蚀或溶蚀,降低内部渗透压力,有利于建筑物稳定.对于复杂的散渗点或渗漏缝群,堵住渗水源头,可能会止住多个散渗点或裂缝的渗漏.渗漏处理最好在无水期或枯水期内进行.选择修补材料时,要考虑修补材料对水质的污染和修补材料在特定环境下的耐久性.

3.1 堵漏方法的比较选择

溪柄坝的渗漏通道主要是由层间薄弱面形成的水平缝和部分由于常态混凝土和碾压混凝土搭接不好形成的竖向通道交错形成.水从上游面渗入,从下游面渗出,那么从上游面或靠近上游面进行堵截应是首选的方案.

如果要从上游坝面进行直接堵漏和涂抹覆盖将出现一系列难以解决的问题.首先,由于碾压混凝土的层面渗透具有明显不均匀性,坝体内的实际渗流通道非常复杂,很难从下游面的渗出点准确判断和找到上游对应的渗入点,对迎水面实现准确堵截;其次,渗漏点多,而且比较隐蔽,很难找到所有的入渗点进行有效地封堵;再次,施工较困难,需要高空悬挂作业,部分还需要在水下作业;最后,表面的封堵不能保证承受高水头压力运作.

现今,用施加预应力锚索的方法也是闭合水平裂缝或减小其开合度、提高混凝土坝抗裂或恢复坝的整体性的有效办法之一^[3].但该方法同样会遇到裂缝位置不易确定的困难,而且造价较高.

综合比较,灌浆方法是最适合的办法.它可以适应复杂的渗漏通道,能较好地封堵渗漏通道,同时也密实了坝体混凝土,增强了坝体的整体抗渗性,起着堵漏防渗和补强的双重作用.

1998 年 11 月至 1999 年 2 月进行的第三次坝体补强灌浆采用了从坝下游面的渗出点风钻造孔向上

游反灌的骑缝灌浆方法.这样的灌浆方式仍然存在难以确定渗漏通道的问题,部分孔没有钻进透水层.坝面散渗的地方分布太广,很难逐个钻孔,有相当大的地方没有布孔,易变成新的漏水点.更重要的是,封缝止浆要求高,灌浆压力受限制,扩散范围小^[2].由于从坝下游面反灌,浆液很难走到上游面,未能实现在迎水面堵截,也就没有控制渗漏源头.水仍能够从上游面入渗坝体,重新侵蚀溶蚀灌浆修补的部分或者击破其他薄弱面形成新的渗流通道.所以第三次修补灌浆后的防渗效果在短期内明显,但时间一长,渗漏又重新发展.

在综合对比了骑缝灌浆和交缝灌浆(斜孔灌浆)的工程量、施工效果以及施工难度后,决定采用交缝灌浆.从坝顶竖直向下钻孔,垂直穿过发生渗漏的水平层面,使浆液沿破损的水平层面扩散进行堵漏和补强,施工方便易行.钻孔施工尽可能靠近上游坝面,对入渗水流实现迎水面堵截.

3.2 灌浆材料的选择

此次灌浆的目的为防渗兼补强,应选择与混凝土黏结性能好的浆材.溪柄大坝有着特殊的不利灌浆条件,水平缝隙宽度很小(小于或等于0.5 mm),而且在水库水位下降后承受压力.化学灌浆由于其灌入性好,是理想的选择,但综合考虑经济因素和对环境的影响以及当地施工队伍的施工能力,工程采取水泥净浆灌注.尽量选用颗粒细小凝结强度高水泥.一般认为,要使某一粒径的水泥颗粒顺利地通过某一裂隙宽度,裂隙的宽度应大于3倍的最大颗粒粒径.施工中采用了42.5R水泥配制水泥净浆,其粒径 $D_{95}=0.06\text{ mm}$,对于宽度0.18 mm以上的裂隙具有可灌性.

3.3 施工设计

3.3.1 孔位布置

溪柄拱坝坝体堵漏补强灌浆在坝顶距离坝轴线1 m处布置灌浆孔BG36~BG63,具体的孔位布置见图1和图2.实际施工时根据机械的许可尽量向上游面靠近以便缩短浆液向上游的渗径,尽量实现在上游面(迎水面)堵截水的入渗.偶数编号的孔作为一序孔,奇数编号的孔作为二序孔.先钻灌一序孔,后钻灌二序孔.对于所有的一序孔都要求回填封孔,二序孔扫孔保留.等到设计的孔都灌浆完成后,观察620.00 m高程以下的坝体渗漏情况以确定哪些孔位需要进一步钻深灌浆.在实际灌浆过程中,发现了620.00 m高程以下的渗漏点,把二序孔中的BG45~BG55改钻灌到600.00 m高程,BG37钻灌到593.00 m高程.所有灌浆都结束后采用机械灌浆法进行二序孔的回填封孔.

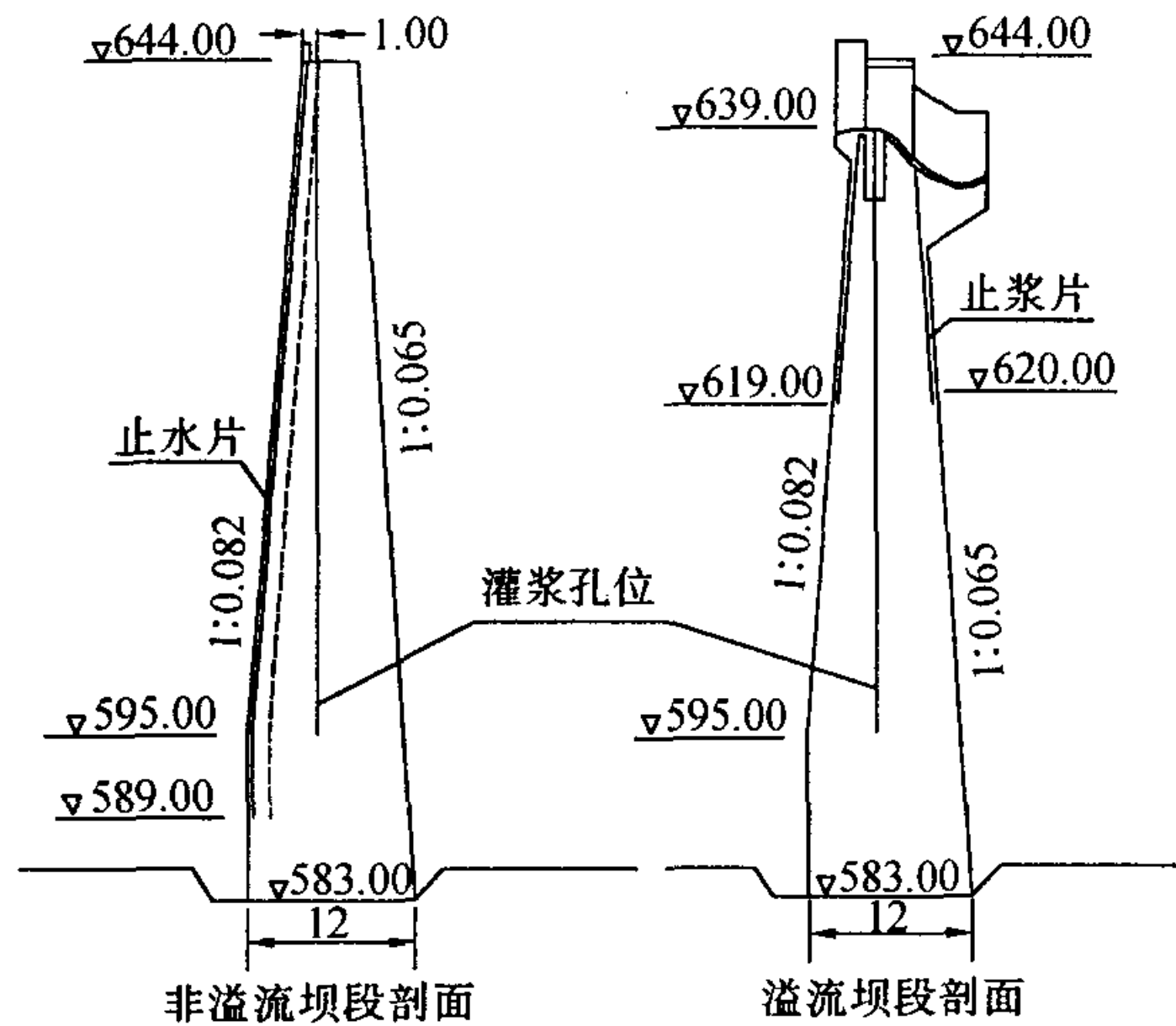


图2 灌浆孔位断面布置(单位:m)

3.3.2 灌浆浓度和压力

根据灌浆理论结合溪柄坝的具体情况来确定合适的灌浆压力和水灰比.

溪柄坝体灌浆条件比较差:①溪柄大坝在灌浆施工阶段照常运行,故不能采用大的灌浆压力,以免引起混凝土的劈裂而形成新的裂缝和缺陷,甚至引发危险.②混凝土排水条件差,坝体内的水很难排出去,这些水将要占据一定的空间,不利于形成好的水泥结石,所以不能采取过大的水灰比.但所要灌注的缝隙很窄,要尽量多的浆液灌注到细微的缝隙中密实混凝土则浆液又不可过浓,否则可灌性差.

首先确定灌浆压力,我国常采用式(1)确定灌浆压力^[4]:

$$p_1 = p_0 + mD \quad (1)$$

式中: p_1 为灌浆压力,MPa; p_0 为岩石表面允许的压力,MPa; m 为灌浆段顶板在岩石中每加深1 m所允许增加的压力值,MPa/m; D 为灌浆段顶板以上岩石厚度,m.计算中 p_0 取值为0.1 MPa;根据坝体混凝土的施工质量,选用 m 值为0.025 MPa/m;坝顶高程为644.00 m,则所有灌浆段的允许压力计算结果为:灌浆段顶板高程600.00 m,605.00 m,610.00 m,615.00 m,620.00 m,625.00 m,630.00 m,635.00 m和640.00 m的灌浆允许压力分别为1.20 MPa,1.075 MPa,0.95 MPa,0.825 MPa,0.70 MPa,0.575 MPa,0.45 MPa,0.325 MPa和0.20 MPa.

试验研究表明水泥浆由牛顿流体转变为宾汉姆流体的临界水灰比在水灰比接近1处.水灰比大于1的属于牛顿流体,水灰比小于1的为宾汉姆流体^[5].保守起见,采用适用于宾汉姆流体的维科特(Wittke)和沃尔尼(Wallner)公式^[5]估算浆液的扩散半径 R :

$$R = \frac{p\delta}{2\tau_0} + r_0 \quad (2)$$

式中: p 为孔内裂隙面处压力, MPa; r_0 为钻孔半径, m; δ 为裂隙宽度, m; τ_0 为浆液的屈服强度, MPa.

式(2)中 τ_0 与水灰比 η 之间的关系, 可以近似地用下述方程式表达^[4]:

$$\tau_0 = T_0 e^{K/\eta} \quad (3)$$

式中: T_0 为经验系数, $T_0 = 0.35 \times 10^{-6}$ MPa; K 为常数, $K = 2.1$. 当 η 取值为 1 时, τ_0 值约为 2.9×10^{-6} MPa.

计算中 p 取值为 0.3 MPa, r_0 取值为 0.055 m, δ 取值为 0.2 mm. 计算得扩散半径 R 约为 10.45 m, 完全可以满足浆液灌注坝体全断面的要求.

综合考虑, 决定最大灌浆压力采用 0.3 MPa, 此压力值系指装在孔口处回浆管上的压力表所指示的压力值. 起灌水灰比 3:1, 逐级加浓至 1:1. 同时为防止坝体被浆液抬动, 溢流坝段灌至 636.00 m 高程, 非溢流坝段灌至 640.00 m 高程, 确保灌浆段以上有足够的压重.

3.3.3 特殊要求

灌浆在水库枯水期进行, 水库水位降到 620.00 m 高程以下, 可以对大多数渗漏点进行无水修补, 保证了堵漏和补强的效果. 灌浆施工按照 SL62-94《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》^[6] 进行(主要按照帷幕灌浆的要求进行施工).

针对溪柄坝体不利的灌浆条件和防渗兼顾补强的双重目的, 笔者对灌浆的压力控制和浆液浓度的变换提出了新的要求. 灌浆采用自下而上分段进行, 每段不得大于 5 m, 如果因为止浆塞封堵不密实, 应优先把止浆塞向下移动至合适位置以实现良好的封堵效果. 使用 42.5R 水泥配制水泥净浆, 起灌水灰比 3:1, 并逐级加浓至 1:1, 同时要求施工中在高水灰比时尽量多地灌注浆液, 不必急于加浓, 以便细小的孔隙能够灌注充分. 灌浆压力在 630.00 m 高程以下控制在 0.2 ~ 0.3 MPa, 630.00 m 高程以上控制在 0.25 MPa 以下. 灌浆时要求尽快升到规定灌浆压力, 避免孔隙在低压下提前被堵塞, 以便能较多地灌进一些浆液. 灌浆时密切监视上下游面的出浆情况, 如果发现成股出浆应立即封堵, 再进行灌浆; 如果发现少量的析浆则按照规范中特殊情况处理规定进行相应的处理; 如果出水则应该先把渗流通道里的水用浆液挤出, 灌至出浆再按出浆要求操作. 此外, 当吃浆量大时, 不采用间歇式灌浆, 在加大浆液浓度的同时保证灌注尽量多的水泥浆体进入坝体以同时达到加固密实坝体的效果, 而无须对灌浆时间和吸浆总量进行控制.

3.3.4 封孔

封孔采用机械压浆法^[7], 按照帷幕灌浆的结束标准结束灌浆. 当全孔灌浆完毕后, 将灌浆管下入孔

底(不再使用栓塞), 采用泵送方法向孔内压入水泥砂浆, 将孔内积水全部用砂浆置换, 直至孔口冒出砂浆为止. 完毕后待凝 3 ~ 5 d, 再用同样的方法回填空余部分, 直至全孔回填密实. 最后, 将孔口表面抹平.

4 处理效果

坝体灌浆从 2002 年 1 月中旬开始, 到 4 月初结束. 水库技术管理人员在 2002 年 6 月 27 日对大坝的检查结果显示, 经过灌浆的坝体部分的渗漏得到了有效控制, 原先发现的渗漏点(图 1)都不再渗水, 下游坝面基本处于干燥状态. 大坝运行良好, 并于 2002 年 6 月通过工程验收. 检查中另外发现了几处新的渗漏点, 这些点位于未布孔或孔深未达到的地方. 这说明在浆液灌注到的地方抗渗性得到显著增强后, 入渗的水只好寻找其他软弱部位排出, 可见坝体内仍存在破损的贯穿通道. 同时也证明了碾压混凝土渗透性的极不均匀性. 业主和设计单位正在对新出现的个别渗漏点进行观察以决定下一阶段的处理方法.

5 存在问题

大坝大面积水平受压缝的灌浆在工程上缺乏可借鉴的经验. 现有的灌浆规范大多是针对岩土而言, 而对大体积混凝土灌浆则没有相应的规范可依照执行, 缺乏对此类施工的指导和约束, 一般借用帷幕灌浆的标准来指导施工. 虽然施工界认为帷幕灌浆的施工标准是灌浆中最高的, 但由于施工对象和施工目的的差异, 简单地套用该标准是不合适的. 首先, 两者的排水条件不同. 帷幕灌浆是在岩石里进行灌浆加固, 一般而言岩石的排水条件要优于坝体混凝土的排水条件, 在碾压混凝土坝体内, 排水是困难的. 其次, 两者的目的具有很大的差别. 帷幕灌浆目的是在坝基前沿和两岸形成一道渗透性低的岩石条带, 主要起到防渗作用. 为防止较宽大的裂隙浆液流串过远而造成浪费, 以及影响施工进度等, 就可以采用间歇式灌浆、分级升压以及 GIN 灌浆法^[8]等方法来控制吸浆量, 提高灌浆效率, 只要防渗条带满足一定的宽度即可. 而对于坝体堵漏补强则不仅是追求灌浆孔周围坝体的抗渗性, 而且要尽可能增大渗径, 灌注尽量多的浆液以密实坝体. 那么上述帷幕灌浆中的提高效率的措施只能使钻孔周围短距离内的混凝土密实了, 但本可灌注到的更远的孔洞则未能灌到, 所以单纯以提高钻孔周围小范围区域内的抗渗性以形成抗渗带的帷幕灌浆和坝体堵漏兼补强灌浆的目的还是有明显差别的.

目前碾压混凝土坝的修建正处于蓬勃上升的阶

段,而层间水平缝的渗漏处理可能将会是一个难以避免的问题,需要对这方面的修补技术作进一步的探索.对坝体混凝土这类大体积混凝土的灌浆机理和探伤手段也有待做深入的研究.灌浆浓度的变换、灌浆压力控制以及灌浆结束标准等施工设计规定都应和岩石灌浆以及普通的横纵缝灌浆有所区别,需要制订相关的施工规范以满足这一特殊灌浆修补形式的发展要求.

6 小 结

对坝体中位置不确定的水平受压缝进行渗漏处理是对坝体修补技术的新探索.对于像溪柄坝这种渗漏点多的层间渗漏的修补,交缝灌浆即从坝顶钻孔垂直穿过发生渗漏的层面进行灌浆是施工易行、效果良好的方法.坝体灌浆和岩石灌浆的排水机制有很大的不同,坝体堵漏补强和通常的固结灌浆、帷幕灌浆的目的也存在着较大的差别,需要针对具体情况合理设计.溪柄大坝的修补在帷幕灌浆标准的基础上,加入了特殊的要求对施工进行指导控制,工

(上接第 23 页)改善较大,其中,带隔板空心方块严格码放到顶(平面转角 $\pm 0^\circ$)的方案透水最小,在相同水头差情况下,透过的流量甚至比抛石堤还要小.在 60 cm 水头差情况下,其透过的单宽流量仅为 $0.6\text{ m}^2/\text{s}$.带隔板空心方块严格码放到顶平面转角 $\pm 45^\circ$ 方案与带隔板空心方块严格码放到顶平面转角 $\pm 15^\circ$ 方案的透水性比较接近,前者略大.在 60 cm 水头差情况下,前者透过的单宽流量为 $2.4\text{ m}^2/\text{s}$,后者为 $2.2\text{ m}^2/\text{s}$.

为考察模型由于在一定原则下摆放的随机性对试验结果的影响,笔者做了一组敏感性分析试验.针对 1.3 节中第 4 种结构(即原设计导堤改进方案 2:堤心用带隔板空心方块允许平面转角 $\pm 45^\circ$ 码放到顶)开展了重复性的水槽试验,同一结构的两组试验结果进行比较见图 4,可见试验结果非常接近,说明遵循一定结构原则下块体摆放的差异对试验结果的影响非常小,以上水槽试验可以反映不同结构的透

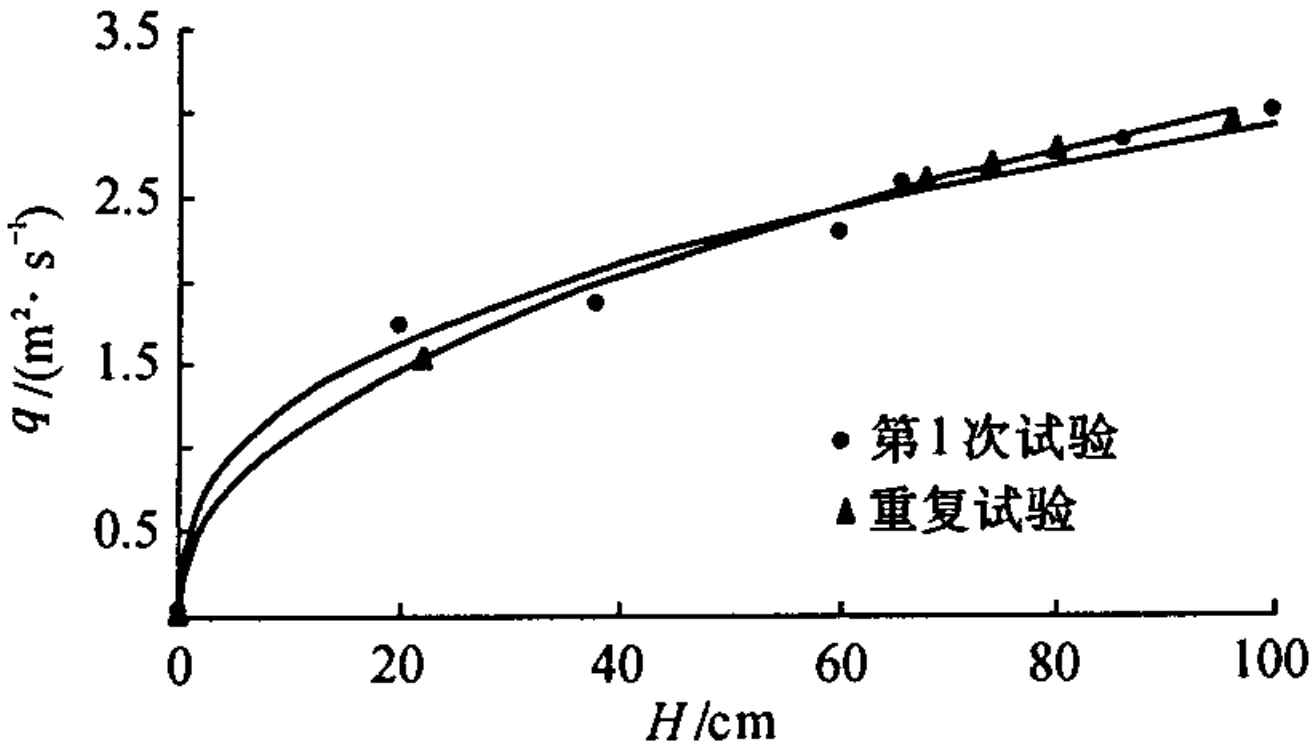


图 4 空心方块导堤透水性重复试验结果比较
(带隔板方块码放到顶平面 $\pm 45^\circ$ 转角)

程实际效果证明这样的方法是有效易行的,对同类工程有较好的借鉴作用.

参考文献:

[1] 杨华全,任旭华.碾压混凝土的层面结合与渗流[M].北京:中国水利水电出版社,1999.32.
[2] 黄国兴,陈改新.水工混凝土建筑物修补技术及应用[M].北京:中国水利水电出版社,1999.95—103;107.
[3] 邓进标,邹志晖,韩伯鲤.水工混凝土建筑物裂缝分析及其处理[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1998.66—69.
[4] 孙钊.大坝岩石基础灌浆施工[M].北京:水利电力出版社,1987.10;62—64.
[5] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.50;84—85.
[6] SL62-94,水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].
[7] 梁炯鋈.锚固与灌浆技术手册[M].北京:中国电力出版社,1999.408.
[8] 马国彦,林秀山.水利水电工程灌浆与地下水排水[M].北京:中国水利水电出版社,2001.203—217.

(收稿日期:2004-08-19 编辑:骆超)

水性实质,基于这些试验结果得到的认识和结论是可信的.

3 主要结论

a. 以长江口深水航道治理二期工程北导堤 N II C 区段空心方块斜坡堤结构为实例,本文提出了通过水槽正态模型试验研究空心方块斜坡堤结构透水性的方法,试验成果可指导空心方块斜坡堤结构的优化设计.

b. 试验结果说明,原设计的空心方块斜坡堤导堤结构比丁坝结构的透水程度大.

c. 在改进导堤结构中,堤心用带隔板空心方块严格码放到顶(平面转角 $\pm 0^\circ$)的方案透水最小,效果最好.在满足结构稳定性的前提下推荐采用该方案.

d. 若选择堤心用带隔板空心方块简单码放到顶的方案,则平面转角对透水性的影响不大,施工时可放松对平面转角的控制以提高效率.

参考文献:

[1] 黄胜,卢启苗.河口动力学[M].北京:水利电力出版社,1995.273—303.
[2] 杨火其,王文杰.强潮河口丁坝坝头块体抗冲稳定分析[J].泥沙研究,2001(5):14—18.
[3] 韩海骞,杨永楚,王卫标,等.钱塘江河口闻家堰段护底抛石研究[J].泥沙研究,2002(2):29—34.

(收稿日期:2004-07-28 编辑:高建群)