



胶凝砂砾石坝 在砂卵砾石深覆盖层基础上的应用

韦 瑛, 黄冰梅

(中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要: 目前国内外工程实例的胶凝砂砾石坝均选用岩石基础作为建基面, 在砂卵砾石覆盖层基础建设胶凝砂砾石坝尚未有先例。结合岷江犍为航电枢纽工程库区防洪堤工程实例, 利用材料力学法和有限元法探讨在砂卵砾石深覆盖层基础上采用胶凝砂砾石坝。进行截面设计、稳定及应力分析、坝体构造设计及防渗设计等, 并提出砂卵砾石深覆盖层基础上建设胶凝砂砾石坝的地基处理方案。

关键词: 胶凝砂砾石坝; 犍为航电枢纽; 砂卵砾石基础

中图分类号: U 641; TV 532

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0129-06

Application of cementitious gravel dam on the foundation of deep overburden of sand and gravel

WEI Ying, HUANG Bing-mei

(China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: At present, the cemented gravel dams of domestic and foreign engineering examples all use rock foundations as the foundation surface. There is no precedent for the construction of cemented gravel dams on the foundation of sandy gravel overburden. Combining the example of the flood control embankment project in the reservoir area of the Minjiang Qianwei navigation-power junction, this paper uses the material mechanics method and the finite element method to explore the design of cemented gravel dam on the sandy gravel foundation. The cross-section design, stability and stress analysis, dam structure design and anti-seepage design, etc. are carried out, and a foundation treatment plan for building a cemented gravel dam on the foundation of a deep sandy and gravel is proposed.

Keywords: cemented gravel dam; Qianwei navigation-power junction; sandy gravel foundation

胶凝砂砾石坝是一种结合了碾压混凝土坝和面板堆石坝技术优势的新坝型。经过近 40 年的探索、发展以及工程实践, 证明胶凝砂砾石坝具有节约工程投资、施工快速、环境适应性好等显著优点^[1], 但是胶凝砂砾石坝坝体强度低和离散性大的特点使得其在设计 and 应用上还有较大的局限性, 胶凝砂砾石坝型对基础适应性还存在较大的开拓空

间。目前国内外的胶凝砂砾石坝大多选用岩石基础作为建基面, 犍为航电枢纽工程库区防洪堤工程首次在砂卵砾石覆盖层基础上建设胶凝砂砾石坝。

本文结合岷江犍为航电枢纽工程库区防洪堤建设工程实例, 探讨砂卵砾石覆盖层基础上采用胶凝砂砾石坝进行截面设计、稳定及应力分析、坝体构造设计及防渗设计等方面的问题。

收稿日期: 2021-05-28

作者简介: 韦瑛(1971—), 男, 高级工程师, 从事水电工程水工建筑物设计工作。

1 工程概述

1.1 工程概况

岷江犍为航电枢纽工程位于四川岷江干流下游河段,是岷江下游河段(乐山—宜宾)航运和水电规划的第3个梯级,坝址位于乐山市犍为县城上游3 km处。水库正常蓄水位为335.0 m,总库容为2.27亿m³,总装机容量为500 MW,为河床式电站、闸坝式挡水建筑物,Ⅲ级船闸通航1 000吨级船舶。工程等级为二等,工程规模为大(2)型,永久性主要水工建筑物为2级。

库区塘坝乡防护工程位于坝址上游右岸的塘坝乡,由防洪堤、泵站及排涝隧洞组成。防洪堤布置在镇江坝内过洪沟右侧,由距坝址约3.6 km处向上游延伸,长约2.755 km。堤防工程级别为4级,设防标准为20 a一遇洪水($Q=36\ 100\text{ m}^3/\text{s}$),设计水位为335.12 m,防洪堤堤顶高程为336.10 m,防浪墙顶高程为337.30 m。

1.2 地质条件

岷江犍为航电枢纽工程防护堤地基土的特征为:覆盖层冲洪积层总厚度8.5~17.6 m,为双层结构。表部为粉土或砂质粉土②层,一般厚0.5~1.5 m,上游侧堤头部分范围达到5.8 m;下部为卵石③层,厚度9.0~15.6 m,稍密-中密结构。基岩顶板高程310.68~328.76 m,为三叠系上统须家河T3xj泥质粉砂岩、泥岩夹灰黑色碳质页岩及砂岩。根据现场勘查和试验,砂卵石③层的力学强度较好,地基承载力为300~400 kPa,可作为堤防地基持力层,取建基面最低高程为323.2 m,堤防最大提高14.1 m。

综合分析工程环境特征及挡水条件,采用胶凝砂砾石坝作为防洪堤身,具有坝体断面较小、工程永久占地少、工程区建坝材料丰富、环境适应性好、施工方便快捷的优点,而且考虑胶凝砂砾石坝本身具有一定抗冲刷能力、在发生超标洪水翻坝时不易溃坝,有利于防护区的安全,本工程采用胶凝砂砾石坝型优势较明显。

2 坝体断面设计

胶凝砂砾石坝主要靠自身重力维持稳定,而坝

体的重力主要取决于坝的形状和尺寸。依据重力坝理论,以坝体不产生拉应力和满足胶凝砂砾石材料抗压强度要求作为坝体设计的应力控制标准^[2]。

目前国内外已建胶凝砂砾石坝普遍为对称的梯形断面,边坡一般为1:0.5~1:0.7,同时满足坝体整体稳定要求。根据本工程情况,考虑坝顶交通和堤防的运行维护要求,堤顶宽度选定为6 m。参考国内外已建胶凝砂砾石坝断面上下游坡比,选择1:0.5~1:0.8的对称梯形断面,坝体抗滑稳定采用抗剪强度公式进行计算,进而确定坝体剖面,这种方法目前也是胶凝砂砾石坝的主要设计方法^[3]。如工程遇到复杂地基,坝体稳定应力计算应采用有限元等效应力法^[4]。

2.1 材料力学法

防洪堤稳定应力计算按照GB 50286—2013《堤防工程设计规范》进行。抗滑稳定计算采用抗剪强度计算公式:

$$K_c = \frac{f \sum W}{\sum P} \quad (1)$$

式中: K_c 为抗滑稳定安全系数; f 为底板与堤基之间的摩擦系数,本工程取0.5; $\sum W$ 为作用于防洪堤上全部垂直力的总和(kN); $\sum P$ 为作用于防洪堤上全部水平力的总和(kN)。

防洪堤基底截面的垂直应力公式为:

$$\sigma_y = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M}{\sum W} \quad (2)$$

式中: σ_y 为坝踵、坝趾垂直应力(kPa); $\sum G$ 为垂直荷载(kN); A 为底板面积(m²); $\sum M$ 为荷载对底板形心轴的力矩(kN·m); $\sum W$ 为底板的截面系数(m³);+、-根据不同工况确定。

胶凝砂砾石堤坝拟建在砂卵砾石层上,堤防工程级别为4级。根据GB 50286—1998《堤防工程设计规范》及SL 678—2014《胶结颗粒料筑坝技术导则》,抗滑稳定安全控制标准如下:正常运用条件下抗滑稳定安全系数不小于1.20,非常运用条件下不小于1.05。防洪堤各计算工况下基底的最

大压应力小于地基的允许承载力,本工程地基允许承载力为 300 kPa。且基底应力的最大值与最小值之比的允许值在正常运用条件下小于 2.0、非常运用条件下小于 2.5。

2.2 结果分析

坝高 8、10、12、14 m,上下游坝坡坡比为 1:0.8、1:0.7、1:0.6、1:0.5 时坝体的稳定应力情况见表 1。

表 1 抗滑稳定计算结果

| 工况 | 坡比 | 堤高/m | 抗滑稳定安全系数 | 基底应力/kPa | | 应力比 |
|------|-------|------|----------|----------|-----|------|
| | | | | 坝踵 | 坝趾 | |
| 正常工况 | 1:0.8 | 14 | 2.70 | 143 | 183 | 1.28 |
| | 1:0.7 | 14 | 2.73 | 153 | 211 | 1.37 |
| | 1:0.6 | 14 | 2.22 | 127 | 208 | 1.64 |
| | 1:0.5 | 14 | 2.21 | 131 | 246 | 1.88 |
| 校核工况 | 1:0.8 | 14 | 3.38 | 129 | 145 | 1.13 |
| | 1:0.7 | 14 | 3.12 | 125 | 154 | 1.23 |
| | 1:0.6 | 14 | 2.56 | 111 | 182 | 1.64 |
| | 1:0.5 | 14 | 2.56 | 111 | 182 | 1.64 |
| 地震工况 | 1:0.8 | 14 | 1.92 | 126 | 199 | 1.58 |
| | 1:0.7 | 14 | 1.95 | 130 | 234 | 1.80 |
| | 1:0.6 | 14 | 1.60 | 101 | 234 | 2.32 |
| | 1:0.5 | 14 | 1.59 | 98 | 279 | 2.85 |

从表 1 可见,当上下游坝坡坡比均为 1:0.5 时,各工况坝体的抗滑稳定能满足规范要求,且坝体垂直应力小于基础承载力;但当坝高超过 10 m后,地震工况坝体基底应力最大值与最小值之比大于 2.5,不满足要求。当上下游坝坡均大于 1:0.6时,各工况的坝体抗滑稳定满足规范要求,基底应力小于基础承载力且最大基底应力与最小应力比值满足规范要求。

基于以上计算结果,进一步研究上游坡比为 1:0.5,下游坡比为 1:0.6、1:0.7、1:0.8 的坝体断

面的稳定应力情况,结果见表 2。从表 2 可见,上游坡比为 1:0.5、下游坡比为 1:0.6~1:0.8 时坝体断面抗滑稳定及基底应力情况均能满足要求。

比较分析表 1 和表 2 抗滑稳定安全系数及应力,上游坝坡坡比为 1:0.5、下游坝坡坡比为 1:0.8 与上游坝坡坡比为 1:0.5、下游坝坡坡比为 1:0.7这两种坝体断面的工况下基底应力分布较为均匀,安全系数亦相对较高。根据计算结果,考虑堤坝工程的经济性,建议采用上游坝坡坡比为 1:0.5、下游坝坡坡比为 1:0.7 的坝体断面。

表 2 基底应力

| 工况 | 坡比 上游 | 下游 | 堤高/m | 抗滑稳定安全系数 | 基底应力/kPa | | 应力比 |
|------|----------|-------|------|----------|----------|-----|------|
| | | | | | 坝踵 | 坝趾 | |
| 正常工况 | 1:0.5 | 1:0.8 | 14 | 2.40 | 172 | 184 | 1.07 |
| | 1:0.5 | 1:0.7 | 14 | 2.42 | 164 | 198 | 1.21 |
| | 1:0.5 | 1:0.6 | 14 | 2.31 | 149 | 220 | 1.22 |
| 校核工况 | 1:0.5 | 1:0.8 | 14 | 2.91 | 148 | 126 | 1.17 |
| | 1:0.5 | 1:0.7 | 14 | 2.79 | 138 | 142 | 1.03 |
| | 1:0.5 | 1:0.6 | 14 | 2.68 | 126 | 160 | 1.27 |
| 地震工况 | 1:0.5 | 1:0.8 | 14 | 1.68 | 146 | 210 | 1.44 |
| | 1:0.5 | 1:0.7 | 14 | 1.72 | 138 | 225 | 1.63 |
| | 1:0.5 | 1:0.6 | 14 | 1.65 | 120 | 250 | 2.09 |

2.3 有限元法

根据初始地基参数，保持综合坡比为 1.2 不变的前提下，对上游坡比为 1:0.5、1:0.55、1:0.6 且下游坡比为 1:0.7、1:0.65、1:0.6 共 3 种不同堤体体型进行有限元分析^[5]。

对不同断面体型的抗滑稳定分析，完工与正常蓄水位工况下不同体型的堤体沉降、最大和最

小主应力见表 3。计算结果表明，各种体型下均满足规范要求的正常运用条件下抗滑稳定安全系数不小于 1.2、非常运用条件下不小于 1.05 的规定。综合稳定、沉降、最大主应力、最小主应力及地基应力情况，坝体坡比采用设计体型，即上游坡比 1:0.5、下游坡比 1:0.7。防洪堤设计断面见图 1。

表 3 不同体型堤体的稳定系数、沉降、主应力

| 编号 | 顶宽/ m | 上游坡比 1:m | 下游坡比 1:n | 综合坡比 m+n | 抗滑稳定安全系数 | | 最大沉降量/cm | | 最大主应力/kPa | | 最小主应力/kPa | |
|----|----------|-------------|-------------|-------------|----------|------|----------|------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | | | | 正常工况 | 地震工况 | 完工工况 | 正常工况 | 完工工况 | 正常工况 | 完工工况 | 正常工况 |
| 1 | 6 | 1:0.5 | 1:0.7 | 1.2 | 2.44 | 1.52 | 4.99 | 5.30 | 897.0 | 8 29.8 | -507.5 | -438.1 |
| 2 | 6 | 1:0.55 | 1:0.65 | 1.2 | 2.46 | 1.53 | 4.62 | 5.02 | 903.3 | 8 83.9 | -536.0 | -429.9 |
| 3 | 6 | 1:0.6 | 1:0.6 | 1.2 | 2.49 | 1.54 | 4.41 | 4.84 | 906.1 | 9 42.5 | -559.2 | -402.4 |

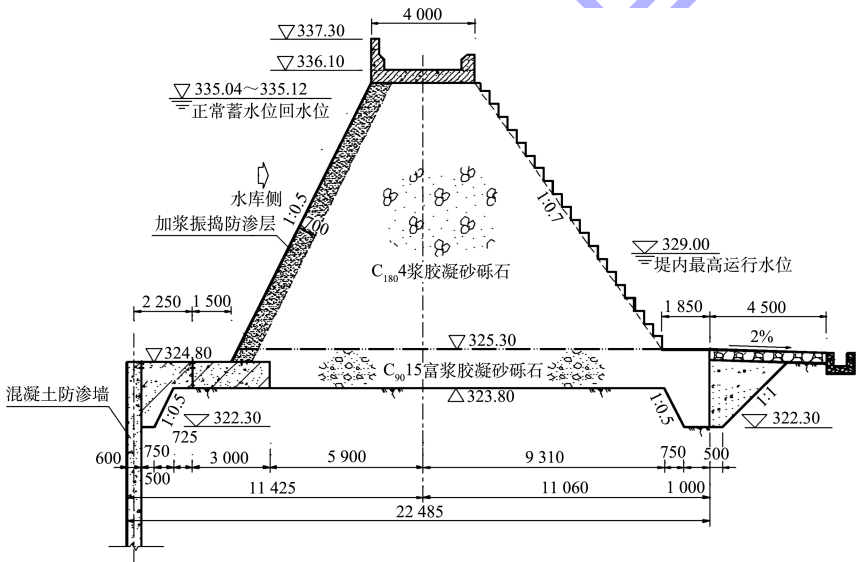


图 1 防洪堤设计断面 (高程：m；尺寸：mm)

3 沉降影响分析

3.1 沉降分析

相比于基岩上的胶凝砂砾石堤，原状卵石层上的胶凝砂砾石堤变形分布具有以下特点：1) 修建在均匀、坚硬的岩石上的胶凝砂砾石堤变形较均匀、基岩变形梯度较小；修建于砂卵石地基上的胶凝砂砾石堤，由于砂卵石材料变形模量较低、堤体沉降较大，基础变形主要集中在较浅的表层内，变形梯度较大。2) 卵石层弹性模量较低而泊

松比较大，造成堤体沉降量较大，还在堤体建基面底部出现顺河向的拉应力。

根据岷江犍为航电枢纽工程防护堤的地质情况调查，地基土砂卵石层比较厚，而非传统岩石地基。因此，在砂卵石地基修建胶凝砂砾石堤，需要经过一定的地基处理才能满足建坝要求。地基处理前各种工况下堤体沉降量、拉应力计算结果见表 4。典型的主拉应力分布区和主拉应力方向见图 2。

表 4 不同体型堤体的沉降、主应力

| 工况 | 顶宽/m | 上游坡比 1:m | 下游坡比 1:n | 最大沉降量/mm | 最大主应力/kPa | 最小主应力/kPa |
|------|------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 正常工况 | 6 | 1:0.5 | 1:0.7 | 53.0 | 829.8 | 438.1 |
| 完工工况 | 6 | 1:0.5 | 1:0.7 | 49.9 | 897.0 | 507.5 |

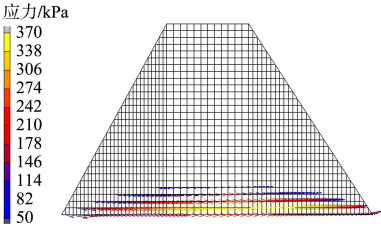


图 2 典型的主拉应力分布区和主拉应力方向

3.2 沉降影响处理措施

由于胶凝砂砾石本体强度较低, 一般应使其在受压状态下工作。沉降分析结果表明堤体底部出现了顺河向的主拉应力, 拉应力值约为 0.6 kPa。由于砂卵石基础的变形主要集中在浅表层, 变形梯度较大, 初步考虑对砂卵石层采用富浆胶凝砂砾石进行置换。根据富浆胶凝砂砾石的材料要求、置换范围建立有限元计算模型, 采用上游坡比 1:0.55、下游坡比 1:0.65 体型进行计算, 方案见表 5, 有限元模型见图 3。

| 表 5 地基置换方案 | | | |
|------------|--------------------------------------|--------|--------|
| 方案编号 | 富浆胶凝砂砾石 | 转换厚度/m | 置换范围/m |
| 1 | $C_{180} 10$ $E = 18 \text{ GPa}$ | 1.0 | 5.0 |
| 2 | | 1.5 | 5.0 |
| 3 | | 2.0 | 5.0 |
| 4 | $C_{180} 15$ $E = 22 \text{ GPa}$ | 1.0 | 5.0 |
| 5 | | 1.5 | 5.0 |
| 6 | | 2.0 | 5.0 |

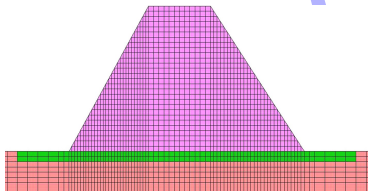
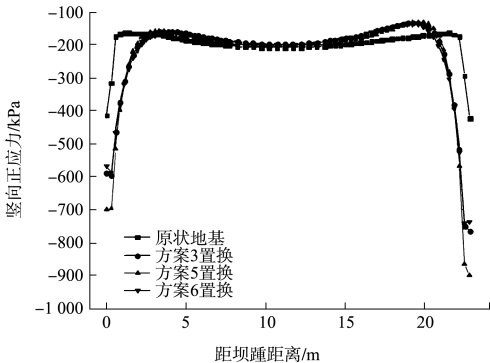


图 3 方案 1 地基置换局部有限元模型

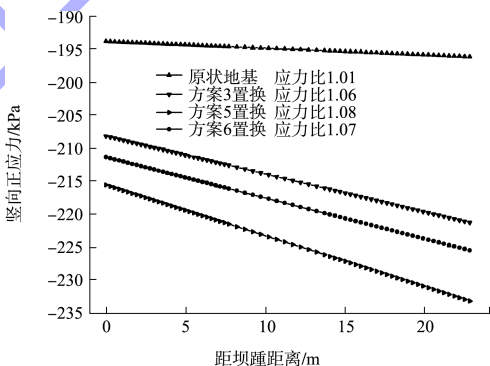
6 种处理方案下堤体最大沉降变形量见表 6。不同工况下的堤体最大主应力计算结果为: 方案 3、5、6 堤体底部基本无主拉应力。

| 表 6 不同地基置换方案下堤体最大沉降变形量 | | | |
|------------------------|--------------------------------------|------------|--------|
| 方案编号 | 富浆胶凝砂砾石 | 最大沉降变形量/mm | |
| | | 完建工况 | 正常蓄水工况 |
| 1 | $C_{180} 10$ $E = 18 \text{ GPa}$ | 13.1 | 11.8 |
| 2 | | 12.3 | 11.0 |
| 3 | | 11.6 | 10.4 |
| 4 | $C_{180} 15$ $E = 22 \text{ GPa}$ | 13.0 | 11.7 |
| 5 | | 12.2 | 10.9 |
| 6 | | 11.5 | 10.3 |

对基础砂卵石进行局部置换, 由于基础刚度增大, 堤体的堤踵和堤趾部位将出现较大压应力。通过有限元方法和有限元等效应力方法, 计算所得的建基面竖向正应力分布及其与原状地基的对比, 见图 4。根据有限元等效应力结果, 3 个方案的竖向压应力均小于 240 kPa, 最大、最小应力比为 1.06~1.08, 均能满足要求。



a) 有限元结果



b) 有限元等效应力结果

图 4 原状地基与不同置换方案建基面竖向正应力对比

综合上述分析, 14 m 高的防洪堤完建期沉降量为 12.2 mm, 加之经过地基处理, 实际基础沉降量应小于计算值, 且竖向压应力与最大、最小应力比均能满足要求, 所以在砂砾石上建堤是可行的。

4 防渗设计

4.1 基础防渗

由于本工程的胶凝砂砾石坝基础为砂卵石层, 根据以往工程经验, 拟采用混凝土防渗墙做基础防渗, 坝基变形较大且易产生不均匀沉降, 防渗墙与坝体连接为薄弱部位。

采用有限元法进行基础应力分析, 混凝土防渗

墙弹性模量比坝体、基础大很多(坝体变形模量为 10.0 GPa,基础变形模量为 0.04 GPa,防渗墙弹性模量为 25.5 GPa),防渗墙对坝体有顶托作用,这样上游坝踵的应力较规范算法小很多,甚至出现拉应力,造成坝趾坝踵应力比相差很大(堤防、水闸规范要求堤趾堤踵应力比要小于 2,且基底不应出现拉应力),按堤趾堤踵应力比作为约束条件的话就无解。为适应坝体和坝基可能产生变形的情况,调整防渗墙布置,采用防渗铺盖的形式连接防渗墙与坝体。

4.2 坝体防渗

胶凝砂砾石具备一定的抗渗能力,对于围堰等临时工程,可采用胶凝砂砾石本体防渗^[6]。对于永久工程,由于胶凝砂砾石的胶凝材料用量较低、长期耐久性指标相对较低,为了保障长期运行安全,大坝上下游面水下部分须设置防渗层、坝面应设保护层,保护层设置可与防渗层结合考虑。在胶凝砂砾石坝的坝体结构设计中,可采用

功能分开的原则:坝体胶凝砂砾石主要满足大坝应力与稳定的要求,而不必考虑材料的抗渗能力和耐久性;在坝体胶凝砂砾石外部设置保护和防渗层来满足大坝的防渗和耐久性要求,两者联合实现坝体稳定和挡水功能。

坝面防渗层可依据工程实际、施工条件等采用常态混凝土、碾压混凝土、富浆胶凝砂砾石、变态胶凝砂砾石和堆石混凝土等,厚度满足坝体防渗、耐久性和施工要求。本工程设计中采用的坝体防渗方式是在迎水面设置 2 m 厚富胶凝砂砾石,防渗保护层的混凝土要求达到 C9015F50W6。对防渗保护层富浆胶凝砂砾石配合比和强度进行了 12 组对比试验,优选推荐施工配合比见表 7。实际施工时,可根据砂砾石料的砂率情况,控制保护层富浆胶凝砂砾石的胶凝材料用量在 151~203 kg/m³、粉煤灰掺量为 40%,90 d 龄期的抗渗等级大于 W8,抗冻等级大于 F100。

表 7 防渗保护层富浆胶凝砂砾石配合比及强度试验结果

| 砂率/% | 减水剂/% | 引气剂/% | 水胶比 | 材料用量/(kg·m ⁻³) | | | | | 坍落度/ cm | 含气量/ % | 抗压强度/MPa | |
|------|-------|-------|------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|------------|-----------|----------|------|
| | | | | 水 | 胶料 | 水泥 | 粉煤灰 | 砂砾石 | | | 28 d | 90 d |
| 28.1 | 0.8 | 0.008 | 0.65 | 132 | 203 | 122 | 81 | 2 157 | 7.3 | 5.3 | 15.6 | 25.7 |
| 18.0 | 0.8 | 0.006 | 0.65 | 98 | 151 | 91 | 60 | 2 281 | 5.3 | 4.1 | 19.6 | 28.9 |

5 结语

- 1)通过材料力学法及有限元法计算分析,综合稳定、沉降、最大主应力、最小主应力及地基应力情况,确定犍为航电枢纽工程防护堤坝体上游坡比为 1:0.5、下游坡比为 1:0.7。
- 2)对犍为防护堤地基沉降及基础应力进行分析,提出了采用富浆胶凝砂砾石对砂卵石层地基进行局部置换的方案,有限元计算结果表明方案 3、5、6 共 3 种方案均能满足建坝要求,即在砂砾石上建堤是可行的。
- 3)为适应坝体和坝基可能产生变形的情况,基础防渗采用防渗铺盖的形式连接防渗墙与坝体,坝体防渗方式为在迎水面设置 2 m 厚的富胶凝砂砾石进行防渗。
- 4)胶凝砂砾石坝是一种胶结强度较低的坝,主要靠自身重力维持稳定,具有节约工程投资、

施工快速、基础适应性强的优点,应用前景广泛。

参考文献:

[1] 贾金生,刘宁,郑瑾莹,等.胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J].水利学报,2016,47(3):315-323.

[2] 贾金生.中国大坝建设 60 年[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[3] 刘志明.胶凝砂砾石坝基本剖面研究[J].水利规划与设计,2016(11):1-2.

[4] 郭戎.胶凝砂砾石坝稳定及应力分析[J].中国水能及电气化,2017(5):60-63.

[5] 中国水利水电科学研究院.岷江航电犍为枢纽工程胶凝砂砾石防护堤科研试验研究报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2016.

[6] 中国水利水电科学研究院.岷江犍为航电枢纽工程胶凝砂砾石试验段检测成果总结报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2017.

(本文编辑 武亚庆)