

老木孔航电工程胶凝砂砾石堤结构分析

裴广超, 周正军

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 笔者计算分析老木孔航电工程胶凝砂砾石防洪堤不同工况下的应力变形情况, 并分析不同施工方案下防渗墙、连接板等部位应力变形特性, 推荐合理施工方案。结果表明: 各工况下防护堤及堤基的变形量值不大, 处于厘米量级; 护堤及堤基的大主应力量值总体不大, 满足规范中“在任何工况下, 胶凝砂砾石坝坝体最大主压应力应小于材料允许压应力”的规定; 不同施工方案下最大拉应力有一定差异, 方案一优于方案二。经计算分析, 老木孔航电工程胶凝砂砾石防洪堤结构断面设计是合理的。

关键词: 老木孔航电工程; 胶凝砂砾石; 防洪堤; 应力变形

中图分类号: [TV84]; TV314

文献标志码: A

文章编号: 1001-2184(2023)06-0086-06

Structural Analysis of Cementitious Sand Gravel Flood Embankment in Laomukong Avionics Project

PEI Guangchao, ZHOU Zhengjun

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

Abstract: The paper calculates and analyzes the stress and deformation of cementitious sand gravel embankment of Laomukong Avionics Project under different working conditions, and analyzes the stress and deformation characteristics of the cut-off walls and connecting plate under different construction schemes, and recommends a reasonable construction scheme. The results show that the deformation values of the protective embankment and its foundation are small and in the order of centimeters; the principal stress values of the embankment and the foundation are not large in general, which meet the requirement of "under any working condition, the maximum principal compressive stress of the cementitious sand gravel dam should be less than the allowable compressive stress of the material" in the code; there are some difference in the maximum tensile stress under different construction schemes, scheme one is better than scheme two. The calculation and analysis show that the structure section design of cementitious sand gravel embankment in Laomukong Avionics Project is reasonable.

Key words: Laomukong Avionics Project; Cementitious sand gravel; Flood embankment; Stress deformation

0 引言

胶凝砂砾石堤是在碾压混凝土筑堤技术和面板堆石筑坝技术的基础上发展起来的一种新堤型, 其特点是采用胶凝材料与砂砾石材料拌合筑堤, 使用高效率的土石方运输机械和压实机械施工^[1]。胶结砂砾石坝具有缩小坝体断面、背水面抗冲刷能力强、超标洪水翻坝后不易溃坝等优点, 并且可就地取材、减少弃料, 具有安全、经济和保障等特点^[2-3]。胶凝砂砾石防护堤可以在满足概算投资的基础上大幅提升防护堤的抗超标洪水风险的能力^[4]。国外已建最大堤高 107.0 m 胶凝砂砾石坝, 国内已相继在福建、云南、贵州等地建

成多座围堰, 经历了过水考验, 水利部已将胶凝砂砾石筑堤坝术列为中小型水利工程的推广应用项目。

1 工程概况

老木孔航电工程坝址位于乐山市牛华镇下游约 0.7 km 的杨花渡口附近, 上游距乐山大佛约 11.7 km。老木孔航电工程以航运为主, 结合发电, 工程为二等大(2)型工程, 航电工程库区河谷开阔, 心滩、边滩发育, 要使该段航道达到Ⅲ级航道标准, 依靠河道整治难度太大。因此, 只有依靠修建拦河闸坝、库区防洪堤以形成水库拦蓄洪水, 再通过航道疏浚达到Ⅲ级航道标准。左右两岸防洪堤总长约 17.76 km, 防洪堤防洪标准为 20 a 一遇洪水标准, 堤防工程等别为 4 级, 代表堤型为

收稿日期: 2023-04-12

胶凝砂砾石堤,最大提高 16.3 m。

2 胶凝砂砾石堤结构分析

2.1 计算断面

防洪堤设计典型断面见图 1。标准断面胶凝砂砾石堤堤顶宽 4.5 m,迎水面坡度 1:0.5,背水面坡度 1:0.7。迎水面从外到内为 70 cm 厚

C15 加浆振捣防渗层,C4 胶凝砂砾石堤体,C4 加浆保护背坡,基础采用 1.5 m 厚 C15 富胶凝砂砾石。迎水坡防渗层底部为 3.00 m 长,1.0 m 厚 C25 趾板,向上游接 2.25 m 长,1.0 m 厚 C25 连接板,然后接防渗墙。计算中选取堤高较大断面进行平面应力变形计算。

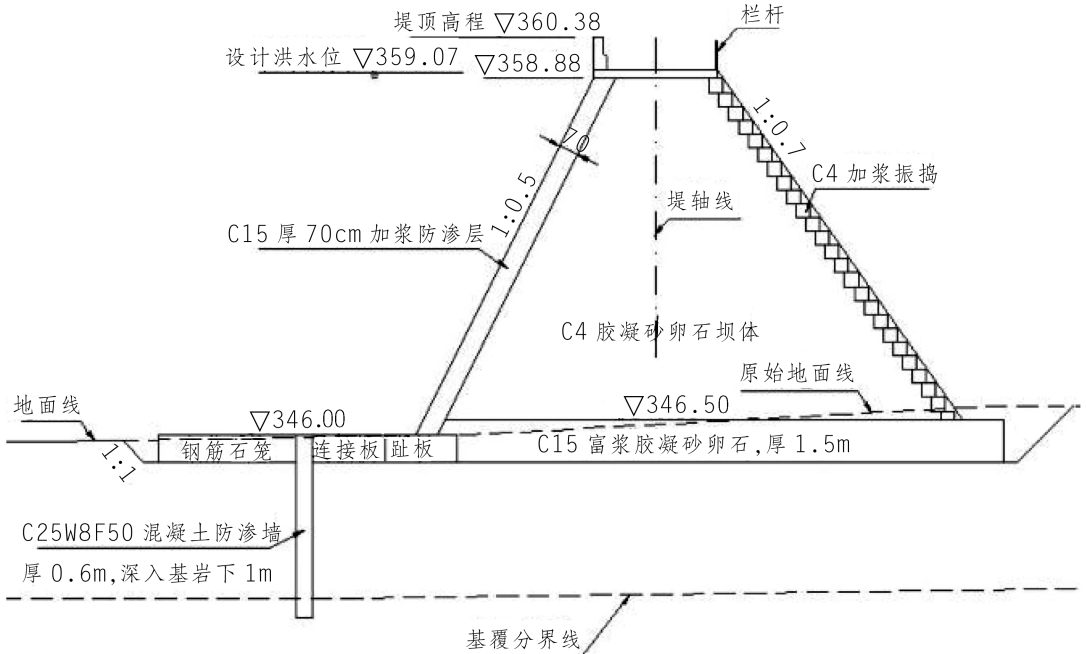


图 1 防洪堤设计典型断面

2.2 计算模型及方案

根据防护堤剖面 and 工程地质剖面对胶凝砂砾石的防护堤及地基进行有限元网格划分。计算分析网格采用对覆盖层地基、防渗墙、连接板防护堤分区都进行了精细网格划分。计算防护堤及堤基应力变形分析网格见图 2,共包含 7 156 个节点,3 442 个单元。

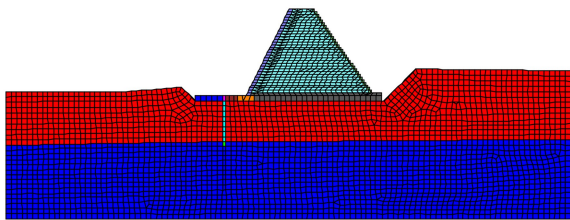


图 2 防护堤及堤基应力变形分析网格

防护堤施工填筑采用水平填筑的方式进行模拟,对于防渗连接板的施工考虑两种方案:方案一是先施工防渗墙和防护堤,待防护堤填筑施工完后施工防渗墙与趾板之间的连接板;方案二是先施工防渗墙,防渗连接板与防护堤同步施工。

2.3 计算理论及材料参数

计算分析中,覆盖层地基选用非线性邓肯 E-B 模型,防护堤、防渗墙及连接板都选用弹性理论。

计算分析采用的胶凝砂砾石材料参考相关工程经验确定,覆盖层材料的参数采用类似工程参数,混凝土材料的参数根据相关规范和类似工程资料确定。具体采用参数,胶凝砂砾石及混凝土材料参数见表 1 和覆盖层材料参数见表 2。

抗压强度:坝体胶凝砂砾石抗压强度最小值为 6.00 MPa,富浆胶凝砂砾石为 19.00 MPa;正常工况下,按 4 倍抗压强度安全系数考虑,坝体胶凝砂砾石允许压应力为 1.50 MPa,富浆胶凝砂砾石允许压应力为 4.75 MPa。

2.4 计算结果分析

2.4.1 方案一计算成果

(1)完建期计算成果。完建期防护堤及堤基的水平位移(顺河向)整体都很小,都处于厘米量级。最大的水平位移出现于防护堤的地基上游堤

表 1 胶凝砂砾石及混凝土材料参数

材料	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 /GPa	泊松比
富浆胶凝砂砾石	23.8	25	0.19
胶凝砂砾石	23.6	13	0.15
加浆防渗层	24.0	25	0.19
C25 混凝土	24.0	28	0.20
基岩	23.5	3	0.30
钢筋石笼	23.5	3	0.30

表 2 覆盖层材料参数

材料	$\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	K	n	Kb	m	Rf	φ	$\Delta\varphi$
砂砾石	21	500	0.38	300	0.22	0.85	30	5

脚位置,主要产生原因是防护堤的沉降引起的侧向挤出作用。完建期防护堤顺河向水平位移分布图见图 3。

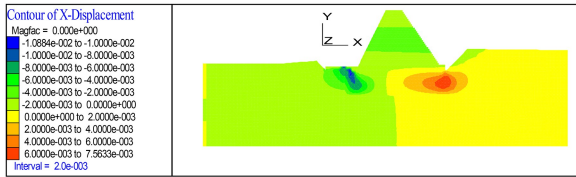


图 3 完建期防护堤顺河向水平位移分布图(单位:m)

最大沉降区域出现在靠近上游的坝脚位置,以防护堤轴线为界,上游的防护堤堤基的沉降略大于下游的沉降。产生这一现象的主要原因如下:①受防洪堤上游坡要稍陡于下游坡这一几何形态的影响,靠近上游坝脚的压应力高于靠下游坝脚的位置;②计算断面中下游填土较高,下游填筑对堤与地基的侧向约束要强于上游侧。综合这两方面原因,上游堤基的沉降大于下游。最大沉降约为 4.2 cm。完建期防护堤沉降分布见图 4。

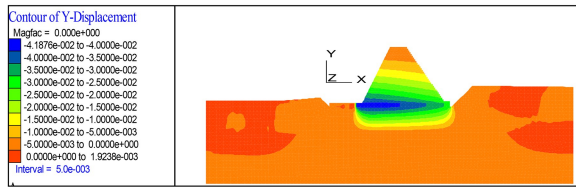


图 4 完建期防护堤沉降分布图(单位:m)

完建期,防护堤及堤基的大主应力量值总体不大,最大值为 0.84 MPa。大主应力的极大值区出现在防护堤的坝踵和坝趾附近。建期防护堤及堤基大主应力分布图见图 5。

富浆胶凝砂砾石防渗体靠近坝踵的位置大主应力最大值为 0.84 MPa,根据设计要求,按照 4 倍抗压安全系数考虑,富浆胶凝砂砾石的容许抗压强度为 4.75 MPa,富浆胶凝砂砾石区域的最大应力小于允许抗压强度。防护堤其他区域大主应

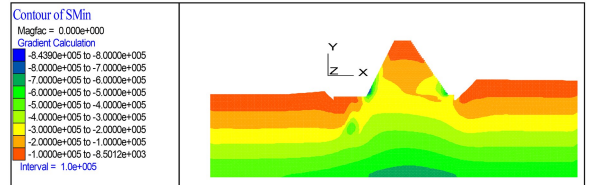


图 5 完建期防护堤及堤基大主应力分布图(单位:Pa)

力值较低,一般小于 1 MPa,小于坝体胶凝砂砾石容许压应力 1.5 MPa。在完建期,防护堤的大主应力值满足规范^[5]中“在任何工况下,胶凝砂砾石坝坝体最大主压应力应小于材料允许压应力”的规定。

防渗墙及连接板的大主应力极大值出现在连接板区域。大主应力最大值为 0.5 MPa。防渗墙大主应力小于 C25 混凝土的允许压应力。完建期防渗墙及连接板大主应力分布图见图 6。

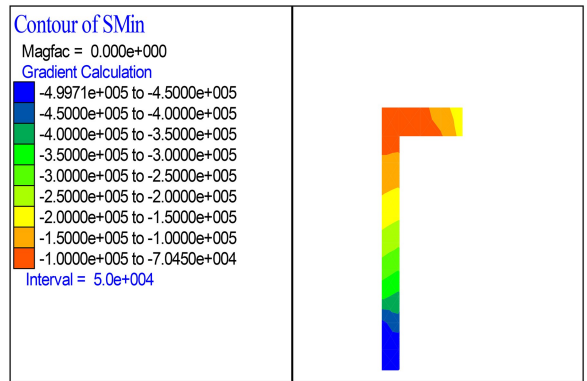


图 6 完建期防渗墙及连接板大主应力分布图(单位:Pa)

完建期,防护堤及堤基的小主应力的拉应力量值总体不大,最大拉应力值为 0.4 MPa,出现在堤底防渗层区。防渗墙、防渗墙与连接板连接区出现一定的拉应力,但量值很小,基本小于 0.05 MPa。完建期防护堤及堤基小主应力分布图见图 7,完建期防渗墙及连接板小主应力分布图见图 8。

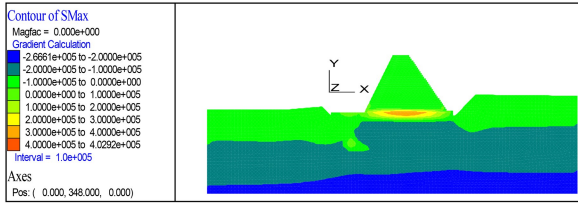


图7 完建期防护堤及堤基小主应力分布图(单位:Pa)

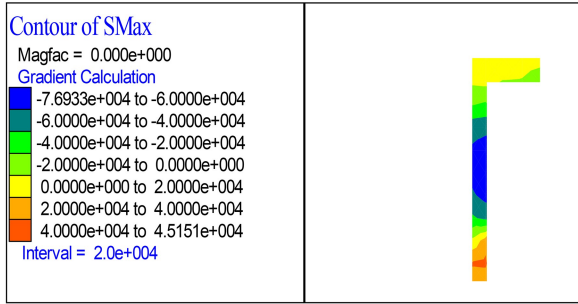


图8 完建期防渗墙及连接板小主应力分布图(单位:Pa)

(2) 满蓄期计算成果。满蓄期防护堤及堤基

的水平位移(顺河向)基本向下游,量值不大,处于厘米量级。最大的水平位移出现堤顶附近,约为2.4 cm。满蓄期防护堤顺河向水平位移分布图见图9。

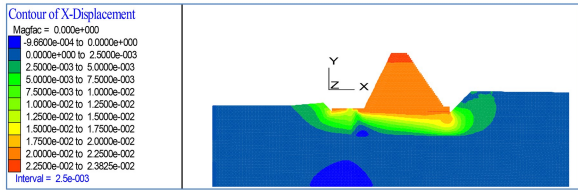


图9 满蓄期防护堤顺河向水平位移分布图(单位:m)

满蓄期,沉降分布趋势与完建期基本一致。在水库水推力及压力的作用下,沉降的量值有所增加,最大沉降值增大至4.6 cm。出现的位置依旧在坝踵处。满蓄期防护堤沉降分布图见图10。

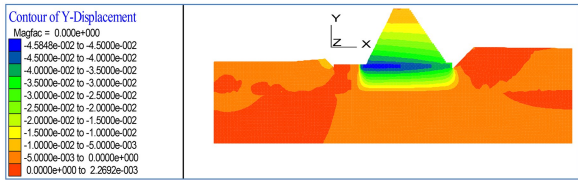


图10 满蓄期防护堤沉降分布图(单位:m)

满蓄期,防护堤及堤基的大主应力量值总体不大,最大值为1.28 MPa。大主应力的极大值区出现在防护堤的坝踵附近。满蓄期防护堤及堤基大主应力分布图见图11。

满蓄期富浆胶凝砂砾石防渗体靠近坝踵的位置大主应力最大值为1.28 MPa,根据设计要求,

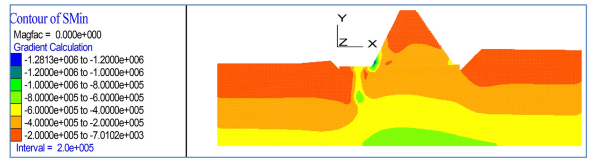


图11 满蓄期防护堤及堤基大主应力分布图(单位:Pa)

按照4倍抗压安全系数考虑,富浆胶凝砂砾石的容许抗压强度为4.75 MPa,富浆胶凝砂砾石区域的最大应力小于允许抗压强度。防护堤其他区域大主应力值较低,一般小于1.00 MPa,小于坝体胶凝砂砾石容许压应力1.50 MPa。在满蓄期,防护堤的大主应力值满足规范中“在任何工况下,胶凝砂砾石坝坝体最大主压应力应小于材料允许压应力”的规定。

防渗墙及连接板的大主应力极大值出现在连接板区域。大主应力最大值为0.75 MPa。防渗墙大主应力小于C25混凝土的允许压应力。满蓄期防渗墙及连接板大主应力分布图见图12。

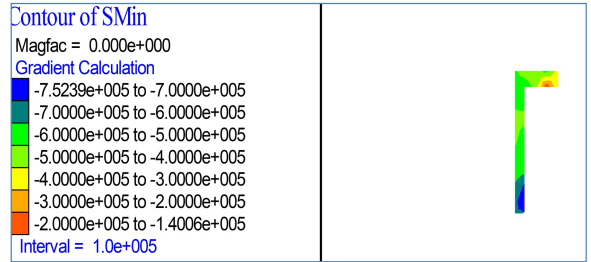


图12 满蓄期防渗墙及连接板大主应力分布图(单位:Pa)

满蓄期,防护堤及堤基的小主应力的拉应力量值总体不大,最大拉应力量值为0.32 MPa,出现在堤踵附近。防渗墙、防渗墙与连接板连接区出现一定的拉应力,在0.24 MPa以内。满蓄期防护堤及堤基小主应力分布图见图13,满蓄期防渗墙及连接板小主应力分布图见图14。

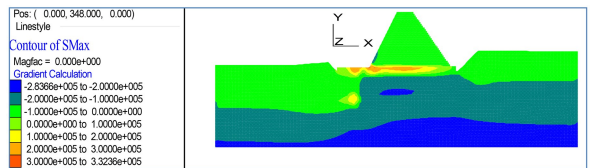


图13 满蓄期防护堤及堤基小主应力分布图(单位:Pa)

2.4.2 方案二计算成果

(1) 完建期计算成果。完建期防护堤及堤基的水平位移(顺河向)整体都很小,都处于毫米量级。最大的水平位移出现于防护堤的基下游堤脚位置,主要产生原因是防护堤的沉降引起的侧

向挤出作用。完建期防护堤顺河向水平位移分布图见图 15。

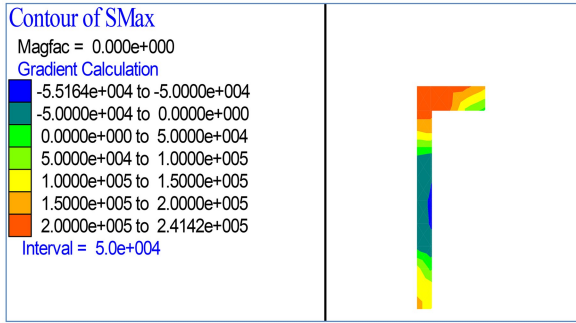


图 14 满蓄期防渗墙及连接板小主应力分布图(单位:Pa)

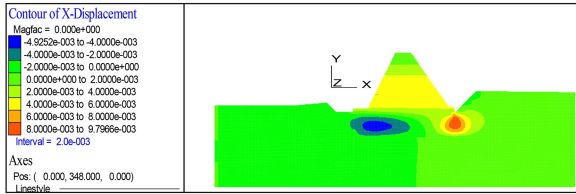


图 15 完建期防护堤顺河向水平位移分布图(单位:m)

最大沉降区域出现在靠近下游的坝脚位置,以防护堤轴线为界,上游的防护堤及堤基的沉降小于下游的沉降。产生这一现象的主要原因在于上游堤基内修筑有防渗墙限制,防渗墙相对于覆盖层地基具有较高的变形模量。一方面,防渗墙的存在增强了上游堤基的复合变形模量,使得上游堤基的变形模量高于下游堤基。另一方面,防渗墙的存在也限制了堤基向上游发生变形,起到了一定的约束作用。综合这两方面原因,上游堤基的沉降小于下游。最大沉降约为 4.2 cm。完建期防护堤沉降分布图见图 16。

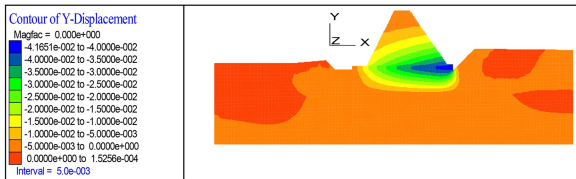


图 16 完建期防护堤沉降分布图(单位:m)

完建期,防护堤及堤基的大主应力力量值总体不大,最大值为 2.87 MPa。大主应力的极大值区出现在防护堤的坝踵附近。完建期防护堤及堤基大主应力分布图见图 17。

富浆胶凝砂砾石防渗体靠近坝踵的位置大主应力最大值为 2.87 MPa,根据设计要求,按照 4 倍抗压安全系数考虑,富浆胶凝砂砾石的容许抗压强度为 4.75 MPa,富浆胶凝砂砾石区域的最

大应力小于允许抗压强度。防护堤其他区域大主应力值较低,一般小于 1.00 MPa,小于坝体胶凝砂砾石容许压应力 1.50 MPa。在完建期,防护堤的大主应力值满足规范中“在任何工况下,胶凝砂砾石坝体最大主压应力应小于材料允许压应力”的规定。

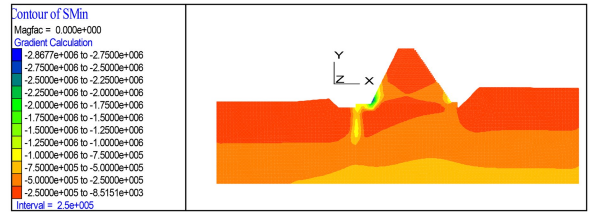


图 17 完建期防护堤及堤基大主应力分布图(单位:Pa)

防渗墙及连接板的大主应力极大值出现在连接板区域。大主应力最大值为 1.00 MPa。防渗墙大主应力小于 C25 混凝土的允许压应力。完建期防渗墙及连接板大主应力分布图见图 18。

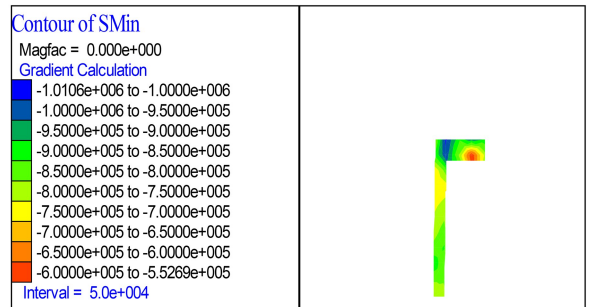


图 18 完建期防渗墙及连接板大主应力分布图(单位:Pa)

完建期,防护堤及堤基的小主应力的拉应力力量值总体不大,最大拉应力值为 0.74 MPa,出现在堤趾板和底防渗层区。防渗墙、防渗墙与连接板连接区出现一定的拉应力,最大值出现在防渗连接板上部,最大拉应力值为 0.56 MPa。完建期防护堤及堤基小主应力分布图见图 19,完建期防渗墙及连接板小主应力分布图见图 20。

(2)满蓄期计算成果。满蓄期防护堤及堤基的水平位移(顺河向)基本向下游,量值不大,处于厘米量级。最大的水平位移出现堤顶附近,约为

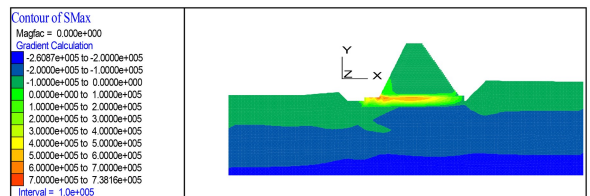


图 19 完建期防护堤及堤基小主应力分布图(单位:Pa)

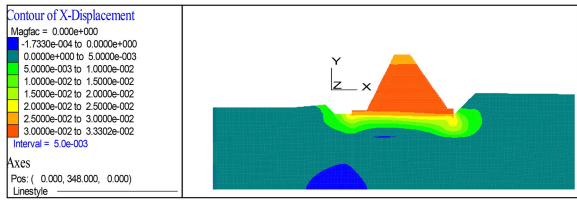


图 20 完建期防渗墙及连接板小主应力分布图(单位:Pa)

3.3 cm。满蓄期防护堤顺河向水平位移分布图见图 21。

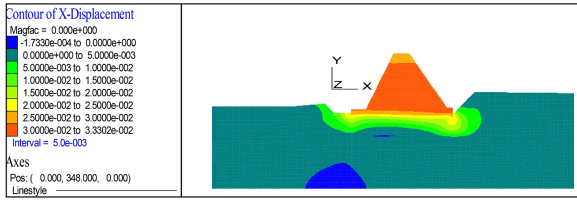


图 21 满蓄期防护堤顺河向水平位移分布图(单位:m)

满蓄期,沉降分布趋势与完建期基本一致。在水库水推力及压力的作用下,沉降的量值有所增加,最大沉降值增大至 4.9 cm。出现的位置依旧在下游的坝脚位置。满蓄期防护堤沉降分布图见图 22。

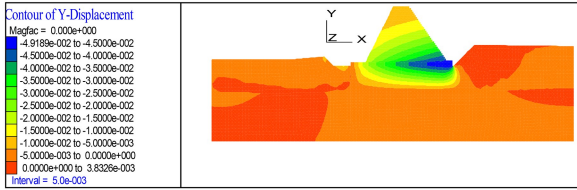


图 22 满蓄期防护堤沉降分布图(单位:m)

满蓄期,防护堤及堤基的大主应力值总体不大,最大值为 3.34 MPa。大主应力的极大值区出现在防护堤的坝踵附近。满蓄期防护堤及堤基大主应力分布图见图 23。

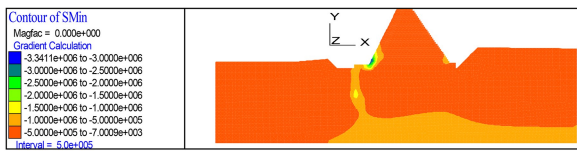


图 23 满蓄期防护堤及堤基大主应力分布图(单位:Pa)

满蓄期富浆胶凝砂砾石防渗体靠近坝踵的位置大主应力最大值为 3.34 MPa,根据设计要求,按照 4 倍抗压安全系数考虑,富浆胶凝砂砾石的容许抗压强度为 4.75 MPa,富浆胶凝砂砾石区域的最大应力小于允许抗压强度。防护堤其他区域大主应力值较低,一般小于 1.00 MPa,小于坝体胶凝砂砾石容许压应力 1.50 MPa。在满蓄

期,防护堤的大主应力值满足规范中“在任何工况下,胶凝砂砾石坝坝体最大主压应力应小于材料允许压应力”的规定。

防渗墙及连接板的大主应力极大值出现在连接板区域。大主应力最大值为 1.15 MPa。防渗墙大主应力小于 C25 混凝土的允许压应力。满蓄期防渗墙及连接板大主应力分布图见图 24。

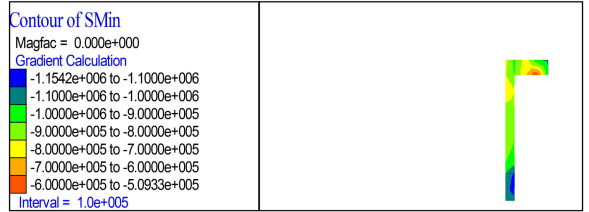


图 24 满蓄期防渗墙及连接板大主应力分布图(单位:Pa)

满蓄期,防护堤及堤基的小主应力的拉应力值总体不大,最大拉应力值为 0.97 MPa,出现在堤踵附近。防渗墙、防渗墙与连接板连接区出现一定的拉应力,在 0.56 MPa 以内。满蓄期防护堤及堤基小主应力分布图见图 25,满蓄期防渗墙及连接板小主应力分布图见图 26。

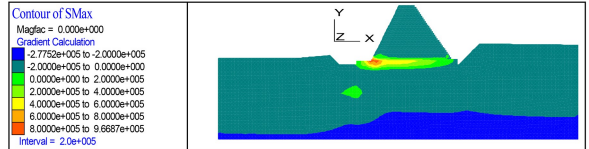


图 25 满蓄期防护堤及堤基小主应力分布图(单位:Pa)

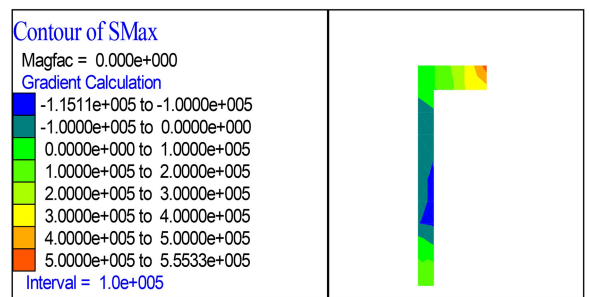


图 26 满蓄期防渗墙及连接板小主应力分布图(单位:Pa)

3 结论

各工况下防护堤及堤基的水平、竖直变形量值均不大,处于厘米量级;护堤及堤基的大主应力值总体不大,满足规范中“在任何工况下,胶凝砂砾石坝坝体最大主压应力应小于材料允许压应力”的规定;不同施工方案下防护堤及堤基拉应力

(下转第 102 页)

[3] 鄢勇. 梯级水电站面临堰塞湖灾害时应对措施研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(4): 87-90.

[4] 周招, 蔡耀军, 李建清, 等. 堰塞湖溃决过程人工干预试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 109-114.

[5] 李松培. 堰塞湖洪水影响下游水电站应急处置实践与思考[J]. 人民长江, 2022, 53(增刊 1): 111-114.

作者简介:

彭 峥(1993-), 男, 土家族, 湖北恩施人, 工程师, 硕士, 主要从事

(上接第 10 页)

随着软件系统的不断完善和提高, 未来可应用于施工或 EPC 总承包领域, 为材料统计、钢筋下料、数控加工、物流配送、装配式安装等提供管理手段和数据支撑。

参考文献:

[1] 张艳宁. 白水江多诺水电站混凝土防渗墙施工技术[J]. 科学与财富, 2020(15): 254.

[2] 李竞波, 黄志澎, 蒋媛媛. 基于 RebarSmart 的廊道结构数字化钢筋设计[J]. 科技创新与应用, 2017(32): 1-2.

[3] 蔡庆, 黄志澎, 文伏灵. BIM 技术在猴子岩电站尾水闸室设计中的应用[J]. 四川水利发电, 2018, 37(5): 120-122.

[4] 杜研平, 黄志澎, 朱先文. 洞式溢洪道引渠导墙优化设计及三维布筋研[J]. 人民长江 2020, 51(11): 164-165.

(上接第 91 页)

有一定差异, 先施工防渗墙和防护堤方案优于先施工防渗墙方案, 但总体量值均不大, 均能满足设计要求。综上, 老木孔航电工程胶凝砂砾石防洪堤结构断面设计是合理的。

参考文献:

[1] 贾金生, 马锋玲, 李新宇, 等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 578-582.

[2] 冯炜. 胶凝砂砾石坝筑坝材料特性研究与工程应用[D]. 北京: 中国水利水电工程科学研究院, 2013.

[3] 冯炜, 贾金生, 马锋玲. 胶凝砂砾石坝筑坝材料耐久性性能研

水利水电工程施工组织设计;

孔 科(1984-), 男, 四川邻水人, 正高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程、水工结构及水电工程施工组织设计;

周顺文(1986-), 男, 广西百色人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程施工组织设计;

张有山(1973-), 男, 河南南阳人, 正高级工程师, 工学学士, 主要从事水利水电工程施工组织设计.

(责任编辑: 廖益斌)

[5] 李金洋, 黄志澎, 裴广超, 等. 基于 RebarSmart 全三维钢筋图出图模式的应用[J]. 人民黄河 2019, 41(增刊 1): 74-75.

[6] 黄志澎, 张志伟, 文伏灵. RebarSmart 钢筋数字化设计交付解决方案及水电工程应用[J]. 水电站设计, 2018, 34(4): 1-6.

作者简介:

王 蕊(1987-), 女, 彝族, 四川凉山, 工程师, 工学学士, 主要从事工程数字化应用推广研究、BIM 设计工作;

冯学敏(1977-), 男, 湖北蕲春人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工结构、岩土工程科研及工程数字化技术应用研究等;

黄志澎(1980-), 男, 福建仙游人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水工结构设计与数值分析、三维数字化设计全生命周期管理研究工作.

(责任编辑: 廖益斌)

究及新型防护材料的研发[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 500-504.

[4] 罗先满, 梁萌帆, 廖柳霞. 岷江犍为航电枢纽工程塘坝胶凝砂砾石防洪堤与市政绿化的结合应用[J]. 水运工程, 2021(12): 139-144.

[5] 胶结颗粒料筑坝技术导则, SL 678-2014[S].

作者简介:

裴广超(1987-), 女, 内蒙赤峰人, 工程师, 硕士, 主要从事水工结构设计工作;

周正军(1986-), 男, 湖北汉川人, 高级工程师, 博士, 主要从事水工结构设计工作.

(责任编辑: 廖益斌)

新集水电站 2 号机组正式投产发电

11 月 27 日, 水电四局安装调试的新集水电站 2 号机组完成机组启动验收, 顺利并网发电, 实现“一年两投”目标。汉江新集水电站是襄阳市目前单体投资最大的工程, 也是汉江流域梯级开发电站中的“收官之作”, 坝址位于汉江中游河段襄阳樊城区太平店镇境内, 为汉江夹河以下干流综合利用规划中 9 个梯级中的第 4 个。该工程以发电为主、结合航运等综合利用, 水库建成后, 具有灌溉、旅游等功能。新集水电站共安装 4 台单机容量 30 兆瓦的灯泡贯流式水轮发电机组, 总装机容量 120 兆瓦, 年发电量 5.09 亿千瓦·小时, 由水电四局负责 4 台机组及附属设备安装调试任务等。新集水电站 2 号机组于 2022 年 4 月 30 日正式开始施工, 11 月 14 日, 首次开机启动成功; 11 月 23 日, 正式进入 72 小时试运行阶段, 11 月 27 日下午 6 点, 顺利通过机组启动验收, 实现并网发电。为了确保 2 号机组顺利发电, 项目部提前分析部署, 制定机组启动试运行大纲, 同时借鉴 1 号机组并网成功经验, 提前制定发电计划, 相继完成发电机短路试验、空载特性试验、励磁特性试验等各项关键性试验, 高质量推进 2 号机组并网发电各项工作。据水电四局安装分局负责人李海平介绍, 当前, 新集水电站 1 号机组已于 9 月 15 日并网发电, 3 号机组、4 号机组正在进行安装, 全部机组计划于 2024 年 3 月底投产发电。

(新闻来源: 中国电建水电四局)