

轴向分区面板坝分区模量影响分析

梁勤正, 樊一璟, 王东, 周泽泽, 刘后露, 金浩博, 郭广鑫

Analysis of modulus influence of axial zoned concrete-faced rockfill dam

LIANG Qinzheng, FAN Yijing, WANG Dong, ZHOU Zeze, LIU Houlu, JIN Haobo, GUO Guangxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220527002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PFMA在混凝土面板堆石坝安全监测优化布置中的应用

Application of PFMA in safety monitoring of concrete face rockfill dams

水利水电工程学报. 2021(2): 124 <https://doi.org/10.12170/20201120001>

组合型混凝土面板堆石坝应力应变特性分析

Stress and deformation properties of combined CFRD

水利水电工程学报. 2018(5): 56 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.008>

坝踵混凝土体型对混凝土面板应力变形的影响

Influence of concrete heel shape on stress and deformation of concrete slab of a dam

水利水电工程学报. 2019(1): 11 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.002>

定向爆破堆石坝应力变形特性研究

Stress-deformation behavior of a blast-fill dam

水利水电工程学报. 2020(5): 86 <https://doi.org/10.12170/20190930001>

考虑坝体-地基接触效应的特高心墙堆石坝结构安全性研究

Study on safety of a high earth-core rockfill dam considering contact effect between dam and foundation

水利水电工程学报. 2019(6): 107 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.012>

带裂缝混凝土轴拉力学性能及Kaiser效应试验研究

Experimental studies on mechanical properties and Kaiser effect of concrete with cracks under axial tensile stress

水利水电工程学报. 2019(3): 67 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.009>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220527002

梁勤正, 樊一璟, 王东, 等. 轴向分区面板坝分区模量影响分析 [J]. 水利水运工程学报, 2023(2): 113-120. (LIANG Qinzheng, FAN Yijing, WANG Dong, et al. Analysis of modulus influence of axial zoned concrete-faced rockfill dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(2): 113-120. (in Chinese))

轴向分区面板坝分区模量影响分析

梁勤正¹, 樊一璟², 王东¹, 周泽泽³, 刘后露^{1,4}, 金浩博⁴, 郭广鑫¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川综合能源服务有限公司, 四川 成都 611130; 3. 温江区水务局, 四川 成都 611130; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 轴向分区面板坝设计中, 通过沿坝轴线方向将坝壳分为岸坡区、侧分区和中央区, 依次填筑不同模量的材料, 形成沿坝轴线方向的梯度模量来缩减坝壳的三维聚心变形、减小轴向位移, 提高坝体变形协调性进而解决高面板坝挤压破坏问题。以锅浪跷面板坝工程为依托, 通过数值计算模拟, 对比研究了 36 种模量梯度组合的轴向分区面板坝的面板挤压破坏参考指标, 分析轴向分区设计效果和分区模量对坝体及面板应力变形的影响。根据面板挤压破坏原理, 以蓄水期面板的挠度和轴向压应力、面板最大挠度附近高程轴向位移及压应力、坝体的沉降和轴向位移为挤压破坏参考指标。结果显示, 50% 梯度方案与常规面板堆石坝相比, 坝体向左右岸的轴向位移分别减小 12.76% 和 14.73%, 沉降减小 14.42%, 面板挠度减小 15.28%, 轴向压应力减小 11.35%。研究为解决高面板坝的面板挤压破坏问题提供了新思路。

关键词: 聚心变形; 轴向位移; 轴向分区; 混凝土面板堆石坝

中图分类号: TV641.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2023)02-0113-08

混凝土面板堆石坝因具有良好的适应性、安全性和经济性而得到广泛应用, 但近些年在 200 m 级高面板堆石坝取得宝贵经验的同时, 也有不少工程出现面板挤压破坏、坝体渗漏量较大等病害, 是面板坝迈向 300 m 级时需要面对的技术挑战^[1]。针对超高面板堆石坝可能出现的面板挤压破坏问题, 不少学者开展了相关研究。陆希等^[2] 提出在面板堆石坝上游下部设置混凝土坝形成镶嵌组合坝的研究思路; 沈婷等^[3] 进一步对该坝型应力应变特性进行研究, 认为该设计对面板静态状况有所改善, 但动态状况稍有不力; 王玉孝等^[4] 研究表明镶嵌坝型缩短了面板和垂直缝长度从而有效改善了面板应力应变状况; 李炎隆等^[5-6] 对坝踵混凝土体型影响研究得出与王玉孝等^[4] 相似结论, 且在镶嵌坝主堆石区设置高模量区并进行优化设计, 进一步改善了坝体和面板的变形应力^[7]; 刘静等^[6] 指出复式结构可有效提高坝踵及趾板可检修性; 周恒等^[8] 对复式结构特高面板堆石坝的正常使用状态和抗震稳定性进行了论证; 蔡新合等^[9] 提出在坝体中下部填筑高模量材料代替常规堆石料, 形成高模量的基础垫座从而降低堆石坝坝高, 将镶嵌坝及在主堆石区设置高模量区的思路进一步拓展; 陆静等^[10] 研究发现可以通过在堆石体顶部设置增模区并缩小下游次堆石区范围来控制坝体变形; 王东等^[11] 提出一种缩减三维变形的防挤压面板坝设计, 通过沿坝轴线纵向分区和非线性超填来缩减坝体三维变形, 结合微凸面板、弧形纵向垂直结构缝等设计来改善面板工作状态, 避免挤压破坏; 徐泽平^[12] 指出可以进一步优化坝体的断面分区以实现坝体的变形协调; 湛正刚等^[13] 系统提出了包含“适应纵向变形”的坝体变形控制方法并取得良好效果。

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407103-1)

作者简介: 梁勤正(1997—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事水工结构及安全监测研究。

E-mail: liangqinzheng@163.com 通信作者: 王东(E-mail: wd@scu.edu.cn)

本文针对面板挤压破坏问题,按文献[11,15]改善坝体和面板变形、应力的思路,将坝体按轴向分区,并依次填筑不同模量的材料,形成沿坝轴线方向的模量梯度,通过数值模拟计算研究分区模量对坝体和面板应力变形的影响,对轴向分区设计的改善面板挤压破坏的效果及分区模量影响进行研究。

1 面板坝轴向分区设计

混凝土面板堆石坝因其结构的几何及复合材料特征,整体存在向河床中心、坝体中上部变形的“三维聚心变形”效应,其中坝壳中上部较大的轴向向心位移在面板底部产生两岸相向摩擦力,带动面板往河床中心变位,若该变位抵消了面板间缝隙的变形余量,则面板间刚性接触形成挤压状态;在水荷载作用下,面板呈三维内陷变形,板块间形成梯度次第变化的偏转,使得原本板间平行的缝面变为顶端接触而底部张开的形式,使可能的面接触变成线接触,从而引起缝面顶部挤压应力集中,远超混凝土抗压强度而破坏。面板纵缝的转动接触和挤压效应^[14],是导致面板挤压破坏的直接原因,其根本原因仍是坝体的“三维聚心变形”。

本文基于文献[11,15]专利方案,在传统面板坝主、次堆石横向分区基础上,沿坝轴线方向对称划分中央区、侧分区、岸坡区。根据坝体变形规律,在中央区填筑高模量材料,侧分区、岸坡区填筑料变形模量次第降低,形成轴向分区效果,以期控制坝壳轴向位移、改善轴向位移梯度等分布特征,减小面板底部摩擦力及由此带来的侧向位移,从而改善面板工作状态进而避免挤压破坏。

2 研究案例

本文依托四川锅浪跷面板堆石坝建立简化模型。河谷呈“V”形,坡角 $40^{\circ}\sim 65^{\circ}$,左岸较右岸陡,基岩以花岗岩为主,最大坝高186.3 m,坝顶高程1 283.3 m,坝顶宽12 m,设4 m高的“L”形防浪墙,大坝上游坝坡1:1.4,下游坡上缓下陡,以1:1.5、1:1.5、1:1.4、1:1.4坡比分设4级宽5 m的马道。混凝土面板顶部厚0.3 m,底部厚0.94 m。坝体横剖面主要分为上游盖重区、面板、垫层区、过渡层、主堆石区、下游堆石区等;包裹于下游坝壳中的下游堆石区顶宽65.0 m,顶高程1 225.0 m,底高程1 134.0 m,上游倒坡1:0.5,下游坡1:1.4;垫层区宽3.0 m,过渡层宽5.0 m。坝体标准剖面见图1。

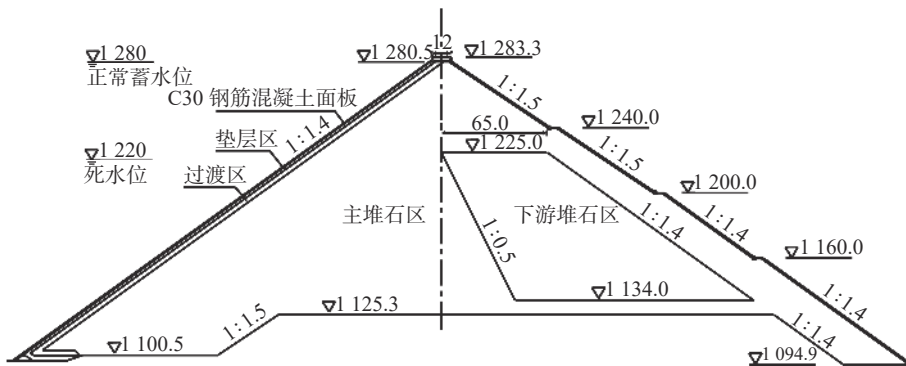


图1 锅浪跷混凝土面板堆石坝标准横剖面图(单位:m)

Fig. 1 Typical profile of Guolangqiao concrete-faced rockfill dam (CFRD) (unit: m)

2.1 计算方案

为对比轴向分区设计方案(下文皆简称分区坝)不同分区模量与常规设计方案(下文皆简称常规坝)的

挤压破坏指标的影响, 按原设计参数拟定常规坝计算方案, 通过分级填筑、分期蓄水模拟常规坝应力变形, 得到初始挤压破坏参考指标, 并根据模拟结果, 将坝体进行轴向分区。

按面板挠度与面板轴向应力分布, 将挠度和轴向压应力较大的区域划为中央区(③), 两岸划为岸坡区(①、⑤), 其余部位划为侧分区(②、④), 轴向分区坝模型如图 2, 分区宽度见图 3。

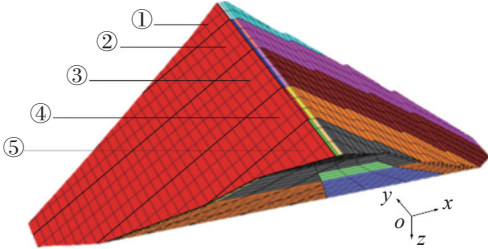


图 2 轴向分区坝有限元模型

Fig. 2 Finite element model of axial zoned CFRD

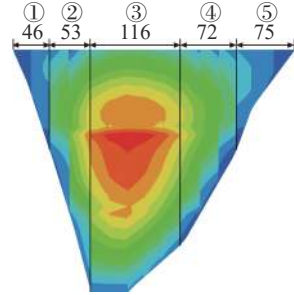


图 3 常规坝方案面板挠度分布及分区宽度(单位: m)

Fig. 3 Deflection distribution and zoned width of conventional dam scheme (unit: m)

根据轴向分区坝设计, 通过协调坝体变形来改善面板挤压破坏情况, 参考李炎隆等^[7]对高模量区的参数梯度设计, 按中央区、侧分区、岸坡区模量递减的思路, 将材料的初始弹性模量基数 k 、初始体积模量基数 k_b 值较原设计参数按中央区增加 0、10%、20%、30%、40%、50%, 岸坡区材料减小 0、10%、20%、30%、40%、50%, 侧分区维持原设计参数的组合形成模量梯度, 共设 36 组方案, 其中“-00+00”即为常规坝方案, 其余皆为轴向分区坝方案。

2.2 有限元计算模型及参数

设顺水流方向为 X 轴, 向下游为正; 坝轴线方向为 Y 轴, 向左岸为正; 竖直方向为 Z 方向, 向下为正。模型坝高 186.3 m, 3 650 个单元, 4 615 个节点。模型坝基、坝肩固定约束, 面板两侧法向约束, 其余为自由边界, 堆石体材料采用邓肯-张 E-B 模型。模拟坝体填筑分层高度为 6 m, 有限元模拟过程中的本构模型采用表 1 的材料参数。混凝土面板采用弹性本构模型, 密度 ρ_d 取 2 400 kg/m³, 弹性模量 E 取 30 GPa, 黏聚力 c 取 2 MPa, 内摩擦角 φ_1 取 48°, 泊松比 μ 取 0.167。在面板与垫层间、面板横缝间设置无厚度 Interface 接触面, 用库伦(Coulomb)剪切模型模拟, 其中面板与垫层接触面切向刚度 K_{s1} 取 1.0×10^8 , 法向刚度 K_{n1} 取 1.0×10^8 , 内摩擦角 φ_2 取 30°; 面板横缝间接触面切向刚度 K_{s2} 取 1.5×10^8 , 法向刚度 K_{n2} 取 1.5×10^8 , 内摩擦角 φ_3 取 54°。

表 1 筑坝材料邓肯-张 E-B 模型参数

Tab. 1 Calculation parameters of Duncan-Chang E-B model for dam construction materials

材料	$\rho_d / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K_{ur}	$\varphi_0 / ^\circ$	$\Delta\varphi / ^\circ$	K	n	R_f	K_b	m
主堆石	2 190	2 600	60.59	12.65	1 300	0.357	0.85	900	-0.035
下游堆石	2 150	2 500	60.30	11.80	1 250	0.337	0.85	900	-0.040
过渡料	2 310	2 600	60.06	10.87	1 300	0.416	0.84	900	-0.047
垫层料	2 390	2 800	60.88	11.77	1 400	0.488	0.80	1 000	-0.060

注: ρ_d 为密度; K_{ur} 为卸载再加载时的弹性模量基数; φ_0 为初始内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为围压增加 1 个对数周期下摩擦角的减小值; n 为弹性模量指数; R_f 为破坏比; m 为体积模量指数。

2.3 加载过程

共分 34 级加载模拟浇筑面板至坝顶, 其中第 1~10 级模拟填筑坝体 0~60 m, 第 11 级模拟浇筑面板 0~60 m, 第 12~21 级模拟填筑坝体 60~120 m, 第 22 级模拟浇筑面板 60~120 m, 第 23~33 级模拟填筑至坝

顶,第 34 级模拟浇筑面板至坝顶。分 3 级蓄水施加水荷载,即 0~120 m、120~175 m、175~180 m 蓄至正常水位 1 280 m。

3 计算结果及分析

3.1 挤压破坏指标选择

根据面板坝挤压破坏原理,挤压破坏主要受面板偏转与轴向位移挤压的影响^[12]。前者主要反映在面板挠度变化上,后者主要由面板轴向位移所体现,根本上是受坝体的轴向位移影响^[13]。面板轴向位移量较小,坝体的轴向位移变化更能反映位移挤压变化。因未能有效模拟面板偏转后的接触应力变化,面板轴向应力分布仅作为分区参考。因此本文选择面板的挠度、轴向位移、轴向压应力、坝体的沉降、轴向位移作为挤压破坏参考指标,并以关注面板挠度及坝体轴向位移变化为主。

数值模拟结果显示,在面板无偏转或转动较小的情况下,轴向位移引起的面板挤压应力极值远小于面板 C30 混凝土的极限抗压强度,且蓄水期面板轴向位移极值出现高程与面板挠度极值出现高程并不一致。因面板挤压破坏可能出现的位置是坝高 2/3 以上至坝顶区域,面板挠度极值出现的高程也在坝高 2/3 左右(114~120 m),所以分析该高程的面板轴向位移变化比分析面板压应力极值和轴向位移极值变化更能反映面板挤压破坏是否得到改善。

3.2 模量 50% 梯度方案对比

蓄水期坝体变形、应力极值见表 2。由表 2 可知,分区坝“-50+50”方案相较于常规坝“-00+00”方案,在蓄水期坝体挤压破坏参考指标均有明显改善:最大沉降减小 14.42%;顺河向位移向上游减小 71.66%,向下游减小 19.62%,有效控制了整体变形;轴向最大位移向左岸减小 12.76%,向右岸减小 14.73%;在主应力方面,大主应力增大 0.053 MPa,小主应力增大 0.055 MPa,与常规坝基本保持一致。

表 2 蓄水期坝体变形、应力极值

Tab. 2 Extreme values of deformation and stress of dam body during impoundment period

方案	坝型	沉降/cm	顺河向位移/cm		轴向位移/cm		主应力/MPa	
			向上游	向下游	向左岸	向右岸	σ_1	σ_3
-00+00	常规坝	42.235	2.548	14.810	6.898	5.526	-2.589	-0.384
-50+50	分区坝	36.143	0.722	11.905	6.018	4.712	-2.624	-0.439

蓄水期面板挤压破坏参考指标见表 3。由表 3 可知,分区坝“-50+50”方案相较于常规坝“-00+00”方案,蓄水期面板挤压破坏指标均有明显改善:最大挠度减小 15.28%;高程 114~120 m 的轴向位移向左岸减小 6.61%,向右岸减小 9.65%,平均减小 8.13%;轴向压应力减小 11.35%。面板最大挠度、轴向位移、轴向压应力的减小,可有效改善面板挤压破坏。

表 3 蓄水期面板挤压破坏参考指标极值

Tab. 3 Extreme values of deformation and stress of face slab during impoundment period

方案	坝型	挠度/cm	114~120 m 高程轴向位移/cm		轴向压应力/MPa
			向左岸	向右岸	
-00+00	常规坝	19.884	4.057	2.923	-4.342
-50+50	分区坝	16.846	3.789	2.641	-3.849

3.3 不同分区模量结果

蓄水期坝体挤压参考指标分布见图 4。可见,随中央区模量增加,蓄水期坝体最大沉降、左右岸轴向位

移极值减小趋势明显。保持中央区模量增加百分比不变, 随岸坡区模量减小, 坝体沉降基本保持一致, 坝体向左、右岸最大轴向位移均呈微弱上升趋势, 但变化率小于中央区。

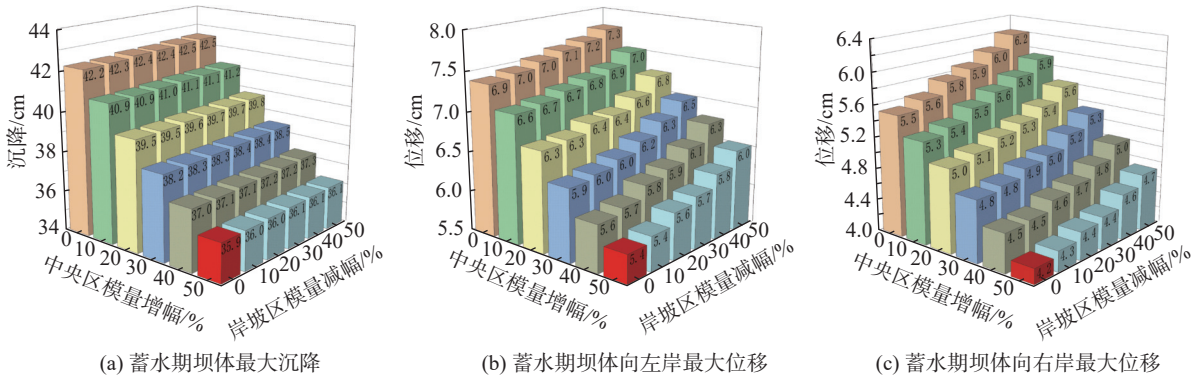


图 4 蓄水期坝体挤压破坏参考指标

Fig. 4 Reference indexes of dam body during impoundment period

中央区模量增加对控制坝体沉降、减小坝体轴向位移作用显著, 岸坡区模量减小对坝体最大沉降影响较小, 对坝体向左、右岸最大轴向位移的影响小于中央区模量增加的影响。分析认为因坝体最大沉降一般出现在中央区的 1/2 坝高附近, 所以该值受中央区模量增加影响较为明显。坝体左右岸轴向位移的变化, 一方面是随中央区模量增加带来坝体变形减小从而导致其水平位移分量减小, 另一方面是岸坡区模量减小使两岸变形的水平分量增加, 从而使轴向位移呈现随其模量减小而上升的趋势。坝体左右岸位移趋势的差别, 来自于左右岸岸坡的坡度与形状的差别, 与分区宽度的不同也有联系。从坝体挤压破坏参考指标的变化看, 轴向分区设计的效果比较明显。

蓄水期面板最大挠度及最大轴向压应力见图 5。可见两指标均随中央区模量增大而减小, 趋势明显; 随岸坡区模量减小而略有起伏。蓄水期面板 114~120 m 高程挤压破坏参考指标如图 6 所示, 在 114~120 m 高程范围内, 面板向左右岸最大轴向位移、面板最大轴向压应力均随中央区模量增大而明显减小; 随岸坡区模量减小而有所起伏。

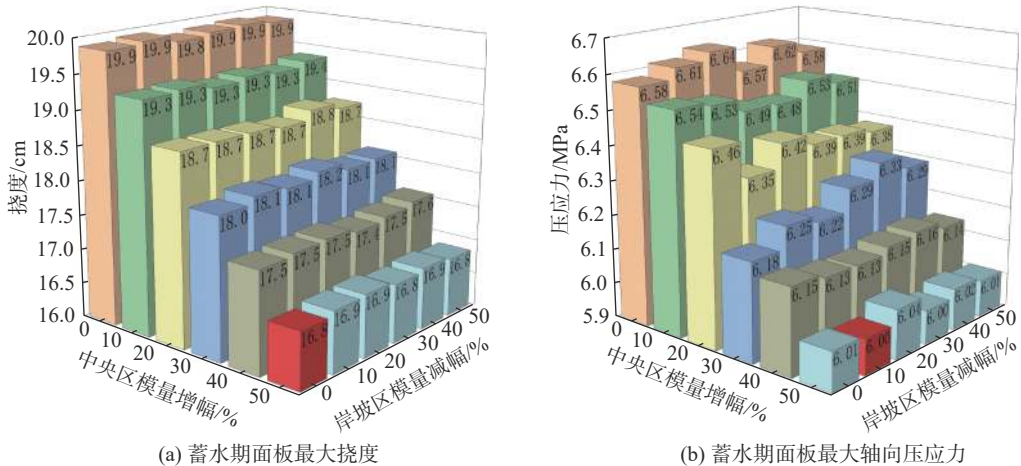


图 5 蓄水期面板最大挠度及最大轴向压应力

Fig. 5 Extreme value of deflection and axial compressive stress of face slab during impoundment period

中央区模量增加对减小面板挠度、最大轴向压应力、114~120 m 高程轴向位移、轴向压应力极值效果显著, 分区模量梯度存在最优组合以改善面板挤压破坏参考指标。分析认为因面板挠度、最大轴向压应力

均出现在中央区,故其主要受中央区模量的控制,岸坡区模量对其影响较小。面板最大轴向位移受中央区影响明显,但模量增大超出 20% 后,其削弱效果在左右岸方向均减弱。从挤压破坏参考指标变化看,轴向分区设计效果显著。

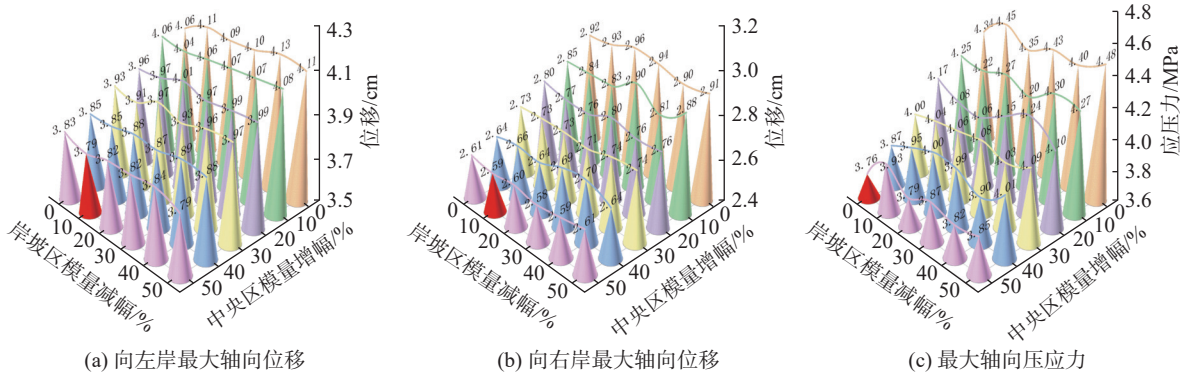


图 6 蓄水期面板 114~120 m 高程挤压破坏参考指标

Fig. 6 Reference indexes of face slab (114~120 m) during impoundment period

4 讨 论

从不同分区模量梯度计算结果来看,随中央区材料模量增大,各挤压破坏参考指标改善明显,但随模量进一步增大,各指标改善幅度明显变小,进一步提高材料模量的性价比变差;保持中央区模量增加率不变,随岸坡区模量减小,各指标均有波动,存在局部最优值,使用低模量材料成本也相应较小。所以应综合考虑,选择合适的分区模量梯度,可最大程度发挥轴向分区效应,更加经济地改善面板工作状态,避免挤压破坏。

轴向分区可将数值模拟结果中面板最大挠度的 100%~80% 对应区域划为中央区,80%~40% 区域为侧分区,其余为岸坡区;同时参考面板轴向压应力分布及面板最大挠度所在高程附近轴向位移分布进行调整。

本文削减岸坡区模量仅为研究分区模量梯度的影响规律,在工程实践中直接削减其模量可能导致周边缝变形恶化。因此,工程应用中形成轴向分区模量梯度,岸坡区模量可选择常规的材料标准,从岸坡区、侧分区、中央区依次增加模量来实现轴向分区设计。而增大材料模量可以通过适当增大碾压遍数和提高碾压机具吨位、使用复合浆材堆石体技术、添加胶结砂砾石材料,或间隔填筑胶结砂砾石材料等方式来实现。

5 结 语

针对面板坝面板挠曲变形、挤压破坏的问题,研究了轴向分区面板坝的结构形式。分析认为轴向分区模量,特别是中央区模量,对高面板坝坝体沉降、轴向位移、面板挠度、轴向压应力等面板挤压破坏参考指标影响显著,而岸坡区模量对坝体轴向位移有一定影响,对其他指标影响较小;轴向分区可依据数值模拟结果中面板挠度分布进行划分,参考其他指标进行调整。

轴向分区面板坝在保持坝体应力情况与常规坝基本一致的情况下,在坝体变形上有较好表现,对改善面板挤压破坏指标作用较明显。因此,通过合适的模量梯度设计,有望提高坝体变形协调性进而解决面板挤压破坏问题。

参 考 文 献:

- [1] 杨泽艳, 周建平, 王富强, 等. 300 m级高面板堆石坝安全性及关键技术研究综述[J]. *水力发电*, 2016, 42(9): 41-45, 63. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, WANG Fuqiang, et al. Research summary on safety and key technologies of 300 m-level face rockfill dam[J]. *Water Power*, 2016, 42(9): 41-45, 63. (in Chinese))
- [2] 陆希, 徐宏璐. 镶嵌组合坝混凝土坝体结构体型探讨[J]. *西北水电*, 2014(6): 30-33, 45. (LU Xi, XU Honglu. Study on concrete dam structural outline of embedded composite dam[J]. *Northwest Hydropower*, 2014(6): 30-33, 45. (in Chinese))
- [3] 沈婷, 李国英. 镶嵌式面板堆石坝应力应变特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊2): 266-271. (SHEN Ting, LI Guoying. Stress-strain characteristics of embedded concrete face rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Suppl2): 266-271. (in Chinese))
- [4] 王玉孝, 沈婷, 李国英. 组合型混凝土面板堆石坝应力应变特性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2018(5): 56-62. (WANG Yuxiao, SHEN Ting, LI Guoying. Stress and deformation properties of combined CFRD[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(5): 56-62. (in Chinese))
- [5] 李炎隆, 张宁, 曹智昶, 等. 坝踵混凝土体型对混凝土面板应力变形的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2019(1): 11-17. (LI Yanlong, ZHANG Ning, CAO Zhichang, et al. Influence of concrete heel shape on stress and deformation of concrete slab of a dam[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(1): 11-17. (in Chinese))
- [6] 刘静, 陆希, 党发宁. 混凝土重力坝-面板堆石坝复式结构型式研究[J]. *水利水运工程学报*, 2022(2): 92-100. (LIU Jing, LU Xi, DANG Faning. Study on compound structure of concrete gravity dam-face rockfill dam[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(2): 92-100. (in Chinese))
- [7] 李炎隆, 张再望, 卜鹏, 等. 镶嵌面板坝高模量区优化设计研究[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(2): 358-364, 455. (LI Yanlong, ZHANG Zaiwang, BU Peng, et al. The optimization design of high modulus zone to inlaid concrete faced rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, 35(2): 358-364, 455. (in Chinese))
- [8] 周恒, 刘静, 陆希. 复式结构特高面板堆石坝安全性论证[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(3): 87-90. (ZHOU Heng, LIU Jing, LU Xi. Safety demonstration of compound structure extra-high face rockfill dam[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(3): 87-90. (in Chinese))
- [9] 蔡新合, 姚栓喜, 雷艳. 高模量基础垫座特高面板堆石坝研究[J]. *西北水电*, 2020(6): 21-25. (CAI Xinhe, YAO Shuanxi, LEI Yan. Study on extra-high CFRD with high modulus foundation cushion[J]. *Northwest Hydropower*, 2020(6): 21-25. (in Chinese))
- [10] 陆静, 高志永. 坝体材料分区对高面板堆石坝应力变形的影响[J]. *人民黄河*, 2016, 38(2): 90-94. (LU Jing, GAO Zhiyong. Influence of material partition on stress and deformation of high CFRD[J]. *Yellow River*, 2016, 38(2): 90-94. (in Chinese))
- [11] 王东, 周泽泽, 郭广鑫, 等. 缩减三维变形的防挤压破坏的面板坝: CN108517840B[P]. 2020-02-21. (WANG Dong, ZHOU Zeze, GUO Guangxin, et al. Concrete face dam with reduced three-dimensional deformation and anti extrusion failure: CN108517840B[P]. 2020-02-21. (in Chinese))
- [12] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 62-74. (XU Zeping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 62-74. (in Chinese))
- [13] 湛正刚, 张合作, 程瑞林, 等. 高面板坝全寿命周期变形控制方法及应用[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(6): 1141-1147. (ZHAN Zhenggang, ZHANG Hezuo, CHENG Ruilin, et al. Application of methods for life-cycle deformation control of high concrete-faced rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(6): 1141-1147. (in Chinese))
- [14] 周墨臻, 张丙印, 张宗亮, 等. 超高面板堆石坝面板挤压破坏机理及数值模拟方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(8): 1426-1432. (ZHOU Mozhen, ZHANG Bingyin, ZHANG Zongliang, et al. Mechanisms and simulation methods for extrusion damage of concrete faces of high concrete-faced rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(8): 1426-1432. (in Chinese))
- [15] 周泽泽, 王东, 胡再国. 缩减三维变形的防挤压破坏面板坝设计[J]. *水利建设与管理*, 2019, 39(8): 22-25. (ZHOU Zeze, WANG Dong, HU Zaiguo. Design of anti-extrusion failure panel dam to reduce 3D deformation[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2019, 39(8): 22-25. (in Chinese))

Analysis of modulus influence of axial zoned concrete-faced rockfill dam

LIANG Qinzheng¹, FAN Yijing², WANG Dong¹, ZHOU Zeze³, LIU Houlu^{1,4}, JIN Haobo⁴, GUO Guangxin¹

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Sichuan Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Chengdu 611130, China; 3. Wenjiang Water Resources Bureau, Chengdu 611130, China; 4. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: Axial zoned concrete-faced rockfill dam (CFRD) divides the dam shell along the dam axis into bank slope area, transition area and central area. By filling different modulus materials in turn to form gradient modulus along the axis of the dam, the three-dimensional centralization deformation and the axial displacement of the dam shell can be reduced, which can improve the deformation compatibility of the dam body, thus the extrusion failure problem of high CFRD can be solved. According to the principle of face slab rupture of high CFRD, several reference indexes of face slab rupture problem (F-indexes) during the impoundment period were selected, including the deflection and the axial displacement of the face slab, and the compressive stress of the elevation near the maximum deflection of the face slab, the settlement and axial displacement of the dam body. Based on a 200 m level CFRD project, the F-index of axial zoned CFRD with 36 kinds of modulus gradient combinations was studied by numerical simulation. The effects of axial zoned CFRD design and modulus influence of axial zoned CFRD were analyzed. The results show that in 50% of gradient schemes, the axial displacement of the dam body decreases by 12.76% to the left bank and 14.73% to the right bank, and the settlement decreases by 14.42%. The deflection of the face slab decreases by 15.28%, and the extreme value of axial compressive stress of the face slab is reduced by 11.35%. The study provides a new idea for solving the problem of slab rupture of high CFRDs.

Key words: centralization deformation; axial displacement; axial zoned; concrete-faced rockfill dam (CFRD)