

基于 Autobank 的湘江汛期某堤坝稳定性计算

姚纪华¹, 朱龔飞², 庄艳红³, 廖武², 贺文双², 何香建¹, 宋文杰¹

(1. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南长沙 410007; 2. 湖南九一工程设计有限公司, 湖南长沙 410018;
3. 韶关市水利水电勘测设计咨询有限公司, 广东韶关 512025)

摘要: 堤坝稳定性一直是防汛难题, 汛期高洪水位和汛退时水位陡降常导致堤坝渗透破坏和内外堤坡失稳, 甚至引发溃堤。根据地质法获得汛期某已出险堤坝岩土物理力学参数, 利用有限元法建模反演汛期稳定性, 并通过汛期堤坝在不同水位状态下渗漏和变形失稳实测资料, 对模拟计算采用参数进行校正, 同时对设计加固堤坝的渗透和抗滑稳定性进行计算分析。结果表明: 汛前原堤坝在设计水位、坝顶水位和水位陡降时会发生渗透破坏和堤坡失稳; 加固堤坝在坝顶水位和水位陡降工况下内、外坡抗滑稳定, 但在坝顶和设计水位时内、外坡脚会发生渗透破坏; 调整加固方案后, 抗渗和抗滑稳定性皆满足要求, 调整后设计方案是可行的。

关键词: 堤坝稳定性; 汛期; 有限元法; 设计水位; 坝顶水位; 水位陡降; 湘江

中图分类号: TV871.3; TV223.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)02-0185-05

Flood season stability calculation of a dam in Xiangjiang River using Autobank

YAO Jihua¹, ZHU Yanfei², ZHUANG Yanhong³, LIAO Wu², HE Wenshuang²,
HE Xiangjian¹, SONG Wenjie¹

(1. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China;
2. Hunan Jiuyi Engineering Design Co., Ltd., Changsha 410018, China; 3. Shaoguan Water Conservancy
and Hydropower Survey and Design Consulting Co., Ltd., Shaoguan 512025, China)

Abstract: Dam stability has always been a challenge for the flood control, and high flood water level in flood season and steep drop of water level in flood recession often lead to seepage failure, instability of inner and outer slopes, and even dam breaches. The physical and mechanical parameters of the rock and soil of a damaged dam in flood season were obtained by the geological method, and the dam stability in flood season was inverted by the finite element method modeling. With the measured data of seepage and deformation instability of the dam in different water levels in flood season, the parameters used in the simulation calculation were calibrated, and the seepage and anti-sliding stability of the designed reinforced dam were calculated and analyzed. The results indicate that the seepage failure and slope instability will occur when the original dam is at designed water level, dam crest water level and steeply dropped water level before flood season. Whereas the inner and outer slopes of the reinforced dam will maintain stable when the reinforced dam is at dam crest water level and steeply dropped water level, but seepage failure will occur at the inner and outer dam feet at dam crest water level and designed water level. After adjusting the reinforcement scheme, the anti-seepage and anti-sliding stability can meet the requirements; therefore the adjusted design scheme is feasible.

Key words: dam stability; flood season; finite element method; designed water level; dam crest water level; steep drop of water level; Xiangjiang River

收稿日期: 2019-09-18; 修回日期: 2019-11-06

基金项目: 湖南省重大水利科技项目(XSKJ2018179-33、湘水科计[2017]230-30); 湖南省一般水利科技项目(XSKJ2018179-44、XSKJ2018179-46、湘水科计[2017]230-44)

作者简介: 姚纪华(1986-), 男, 湖南郴州人, 硕士, 工程师, 主要从事水工环地质设计与研究工作。

1 研究背景

江河湖堤坝稳定性一直是汛期亟待解决的难题,汛期湍急水流持续冲刷、高洪水位渗透作用及河水位陡降时堤内水外渗作用,极易引发堤坝渗透破坏和堤外坡失稳滑坡,特别是病险、隐患堤坝,常常引发堤坝溃口,导致水患灾害。因此,为缓解防汛压力,研究汛期堤坝渗透破坏和内外坡失稳的原理和成因,探究失稳堤坝加固措施显得尤为重要。

由于堤坝形式、填筑材料、堤地质条件和水力条件的差异性,导致堤坝渗流和抗滑稳定性计算极其复杂。因此,学者们在数学理论解方面进行了很多探索,主要有堤坝非均质各向异性稳定性数学解^[1-3]、基于一定边界和排水条件的解析解^[4]和半经验半理论公式的近似解^[5]。在数值模拟计算方面,主要利用有限元计算软件对特定水位^[6-8]、水位涨落^[9]、地震+特定水位^[10-11]等多种工况下堤坝稳定性进行模拟求解。考虑到堤坝稳定性计算的困难,也有学者通过室内模型试验研究堤坝稳定性^[12-15]。此外,许多学者基于监测和物探分析对堤坝稳定性进行了研究^[16-20]。

上述研究从多方面、多角度揭示了不同条件下堤坝稳定性的特性,但汛期江河湖堤坝通常会出现长时间高洪水位运行后水位陡降的复杂状况,其渗流和抗滑稳定具有突变性和特殊性,一旦发生渗透破坏和堤岸失稳,可能引发巨大的灾害。因此,研究汛期堤坝稳定特性及灾后加固措施是十分必要的。

本文采用现场钻探、室内外土工试验等方法获得汛期某段垮塌堤坝岩土的物理力学参数,对原堤坝利用有限元模型进行了稳定性分析,通过校正计算参数,分析计算加固后堤坝的稳定性。本研究成果可为江河湖堤坝汛期稳定分析、抢险及灾后加固重建提供参考。

2 基本原理

2.1 渗流分析理论

对于稳定渗流,符合达西定律的非均各向异性二维饱和-非饱和渗流微分方程^[21]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + Q = [C(h) + \lambda S_s] \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: Q 为单位时间平面边界入渗量, m^3/d ; $C(h)$ 为容水度; S_s 为贮水系数; x, y 为平面坐标; φ 为水

头势函数; K_x, K_y 为 x, y 轴方向的渗透系数, m/d 。

当某边界上单位时间渗流量 Q 已知时,公式(1)右边体积含水量变化率为0时,可简化为:

$$K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} l_y = -Q \quad (2)$$

式中: l_x, l_y 为边界表面向外法线在 x, y 方向的余弦。

根据堤坝实际情况,建立地质概化模型,并进行有限元离散,在给定堤外河水位及水位陡降变幅的基础上,利用Autobank中渗流稳定模块对堤坝的渗流场进行模拟计算,求解过程是通过节点流量平衡法在迭代计算的基础上,自动确定浸润线位置和渗流量^[22]。

2.2 抗滑稳定理论

根据参考文献^[23]稳定渗流期附加孔隙水压力已经消散不予考虑,而施工期和水位降落期对粘性土应该计入附加孔隙水压力^[23]。堤坝在坝顶水位和设计水位时抗滑稳定计算采用忽略孔隙水压力的总应力法;在河水位陡降时采用有效应力法。在没有实测资料的情况下,附加孔隙水压力=孔压系数 \times 土条有效重量的增量^[24]。

本次计算抗滑稳定性计算采用Autobank中的Bishop模块,其安全系数 F_s 计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{m_{\theta_i}} [c_i l_i \cos \theta_i + (G_i + G_{bi} - U_i \cos \theta_i) \tan \varphi_i]}{\sum_{i=1}^m (G_i + G_{bi}) \sin \theta_i + Q_i \cos \theta_i} \quad (3)$$

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \varphi_i}{F_s} \quad (4)$$

式中: $c_i, \varphi_i, l_i, \theta_i$ 分别为第 i 计算条块滑面的黏聚力、内摩擦角、长度和倾角; U_i, G_i, G_{bi}, Q_i 分别为第 i 计算条块的滑面单位宽度总水压力、单位宽度自重、单位宽度竖向附加荷载、单位宽度水平荷载。

3 工程概况

堤坝位于湘江干流某水闸上游1 km范围内,2019年7月该河段遭遇50~100年一遇洪水威胁,长达7~8 d处于警戒水位以上,4~5 d处于保证水位以上,最大洪峰过境时,两岸堤防长达3 h处于河水漫堤状态,且堤内坡下部出现多处散浸和集中渗漏,但渗漏水多为先浑浊后迅速变清,同时堤内为大片居民区和农耕地,防汛形势严峻。现场采取了提前疏散居民、堤顶沙袋筑填加高、渗漏点加设反滤层等多项应急措施。但局部堤外坡在汛期高速水流和

退洪时陡降水位的作用下,发生堤内坡连续崩塌和滑坡现象。堤坝汛前横断面图如图 1 所示。

4 模型建立及参数确定

为获得该河段堤防在高洪水位及陡降水位作用下,其渗流、抗滑稳定的变化规律和原因,选取其中某外坡滑坡段堤防为研究对象,其汛前坝顶宽 4.4 m,堤高为 8.0 m,内、外坡坡比皆为 1:2,堤坝断面有限元模型如图 2 所示。并采用现场测量、钻孔取样室内试验、现场孔内注水试验等手段获得堤坝岩土体物理力学参数,根据堤坝在汛期高洪水位状态

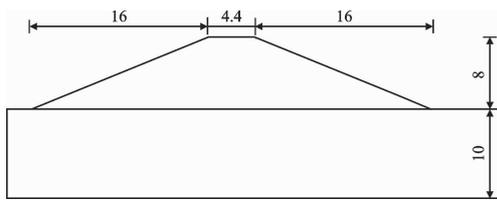


图 1 堤坝汛前横断面图(单位:m)

下堤内坡脚渗漏点位置和渗漏量大小,及退洪时水位陡降导致堤内坡滑坡的事实,对计算得出的参数进行校核和修正,最终获得的堤坝岩土体物理力学修正参数见表 1。

5 原坝堤数值模拟结果与分析

5.1 有限元渗流数值模拟结果

根据已建立的堤坝有限元物理力学模型,利用 Autobank 中渗流稳定模块对汛前原堤坝在设计水位和堤顶水位的渗流稳定性进行模拟计算,其计算结果如图 3、4 所示。

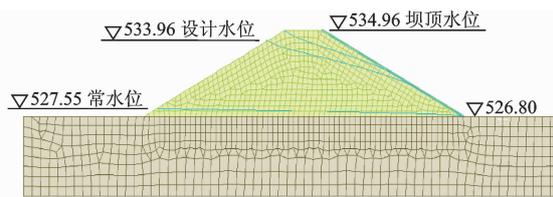


图 2 堤坝断面有限元模型

表 1 堤坝岩土体物理力学修正参数统计表

岩土类型	容重/ ($kN \cdot m^{-3}$)	浮容重/ ($kN \cdot m^{-3}$)	有效应力 c /kPa	有效内摩擦角 / ($^{\circ}$)	水下有效应力 c /kPa	水下有效内摩擦角 / ($^{\circ}$)	水平渗透系数 $K_x / (cm \cdot s^{-1})$	垂直渗透系数 $K_y / (cm \cdot s^{-1})$	允许渗透坡降
堤坝土	19.2	9.2	18.2	16.3	11.4	13.8	8.9×10^{-4}	6.3×10^{-4}	0.40
堤基土	21.3	11.3	24.6	20.5	18.9	16.1	7.2×10^{-5}	5.6×10^{-5}	0.55

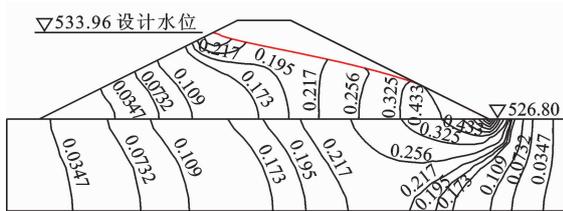


图 3 设计水位状态下渗流数值模拟结果(高程单位:m)

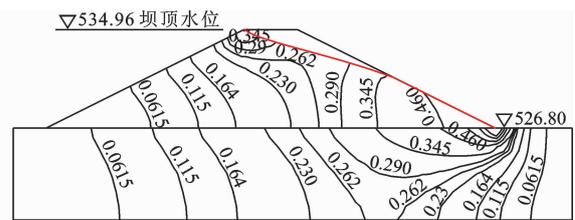


图 4 坝顶水位状态下渗流数值模拟结果(高程单位:m)

由图 3 和 4 可知,汛前堤坝在坝顶水位和设计水位(保证水位)状态下,堤坝内侧坡脚高程 531.0 和 529.7 m 以下范围渗流坡降皆大于坝体允许渗透坡降 0.4,该范围内堤坝会发生渗透破坏;下游坝脚坝体与堤基接触带上堤基渗透坡降最大分别达 1.03 和 0.98,远大于堤基土体允许渗透坡降 0.55,该坝脚接触地带会发生渗透破坏。

上述计算结果与汛期下游实际观测到的散浸位置和范围,以及坝体坝脚与堤基接触带上存在集中渗漏较为一致,表明表 1 修正后堤坝的岩土体物理力学参数较为符合实际。

5.2 有限元抗滑稳定数值模拟结果

采用 Autobank 中的 Bishop 模块对汛前原堤坝

的在坝顶水位和水位从坝顶水位陡降至常水位时的抗滑稳定性进行模拟,其计算结果如图 5、6。

由图 5 和 6 可知,汛前堤坝在坝顶水位状态下,上、下游堤坡稳定性最差的圆弧滑动面稳定性系数分别为 1.76 和 0.88,规范要求堤坝坝坡稳定性系数不低于 1.25,即坝顶水位状态下堤外坡稳定,而堤内坡将发生失稳;水位陡降(设计水位陡降至常水位)状态下,上、下游堤坡稳定性最差的圆弧滑动面稳定性系数分别为 1.17 和 1.31,即水位陡降状态下堤外坡失稳,而堤内坡稳定。

上述计算结果与汛期洪水漫顶时堤内坡发生滑坡变形、洪水退却时堤外坡发生滑坡和垮塌的情况较为一致。

6 加固后堤坝数值模拟结果与分析

汛期,为保证该堤坝不溃堤,抢险时,只做了一些临时加固措施,如下游增设排水孔和反滤层降低浸润线、临时加固上下游坝坡等。汛后,针对该段堤坝的险情现状,拟采取堤外坡砌筑浆砌石挡墙,墙前

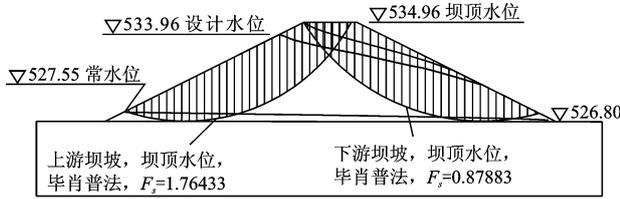


图5 坝顶水位状态下抗滑稳定数值模拟结果(高程单位:m)

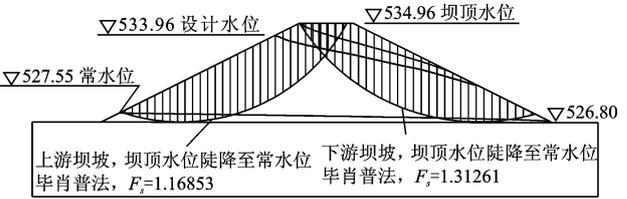
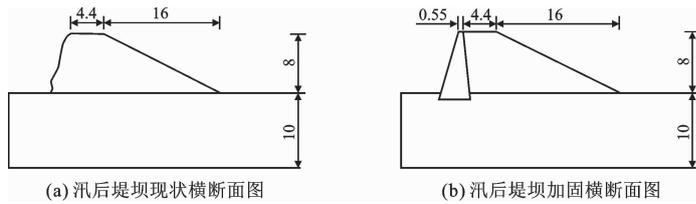


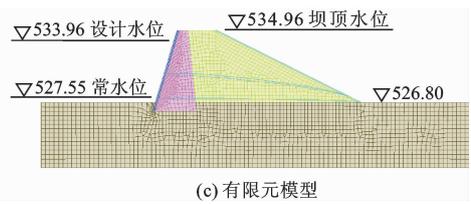
图6 水位陡降状态下抗滑稳定数值模拟结果(高程单位:m)



(a) 汛后堤坝现状横断面图

(b) 汛后堤坝加固横断面图

图7 加固堤坝横剖面图(单位:m)



(c) 有限元模型

由图8和9可知,加固堤坝在坝顶水位和设计水位(保证水位)状态下,堤坝内坡脚高程527.7和527.5m以下范围内渗流坡降皆大于坝体允许渗透坡降0.4,该范围内堤坝会发生渗透破坏;下游坝脚坝体与堤基接触带上堤基渗透坡降最大分别达0.82和0.75,远大于堤基土体允许渗透坡降0.55,该坝脚接触地带会发生渗透破坏,这是由于堤坝和堤基中渗流会在堤内坡脚及堤脚与堤基接触地带集中汇聚,水受堤坝与堤基低渗透性土体阻碍无法顺畅排出,形成较大渗透力和渗透坡降。且两个水位状态下,堤外坡防渗面板底部与堤脚相交地带其渗透坡降也分别达到了3.43和2.61,远大于堤基允许渗透坡降0.55,这是因为坝基与防渗面板之间存在接触空隙,水在高水头压力作用下沿着接触带向防渗面板后面强透水性、大孔隙率的浆砌石汇聚,且渗流路径极短,但由于浆砌石内侧堤坝及堤基中低渗透性、小孔隙率土体的阻碍无法向下游堤坝渗透,于是在防渗面板、浆砌石和堤基接触地带形成了强渗透

力和高水力梯度。

基于上述结果,调整了加固方案,延长堤基上防渗面板的长度至3m;浆砌石底部增设混凝土防渗垫层与防渗面板相连,并向后嵌入至墙后堤基中;浆砌石加固外坡坡脚堤基土;防渗面板、浆砌石和堤基接触地带设置从堤基向浆砌石由细变粗的反滤层;下游堤坝内坡脚设置排水体或反滤层加强排水等的补充措施。对加固方案调整后的堤坝在设计水和坝顶水位状态下的渗流稳定性重新进行计算,其坝基土和堤坝填土中最大水力梯度分别为0.47和0.33,低于堤坝和堤基允许渗透坡降0.40和0.55。可见,调整后加固设计方案是可行的。调整后加固设计方案在设计水位和坝顶水位的渗流稳定性模拟计算结果如图8、9所示。

6.2 加固方案堤坝抗滑稳定分析

调整加固方案后堤坝在坝顶水位和坝顶水位陡降至常水位两种状态下的抗滑稳定性模拟计算结果如图12、13所示。

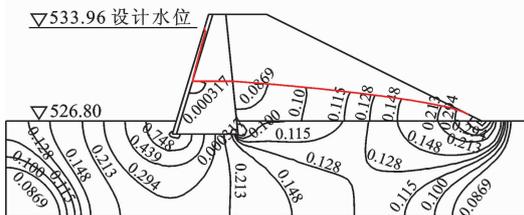


图8 加固后堤坝在设计水位状态下渗流数值模拟结果

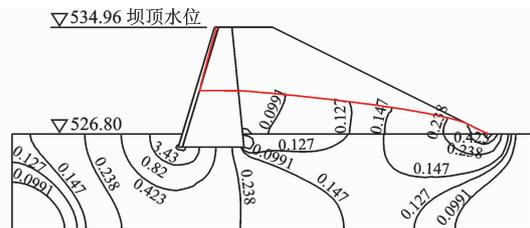


图9 加固后堤坝在坝顶水位状态下渗流数值模拟结果

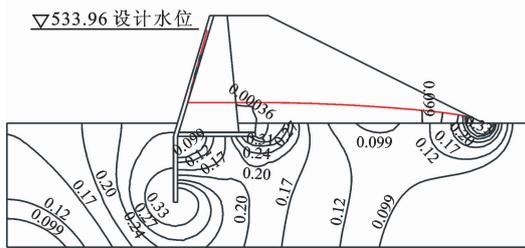


图 10 调整后加固设计方案在设计水位状态下渗流数值模拟结果

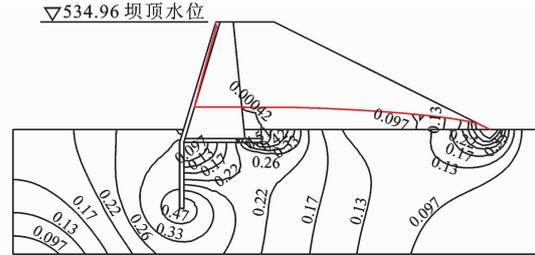


图 11 调整后加固设计方案在坝顶水位状态下渗流数值模拟结果

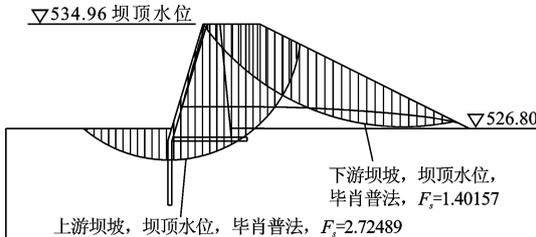


图 12 调整后加固设计方案在坝顶水位状态下抗滑稳定数值模拟结果

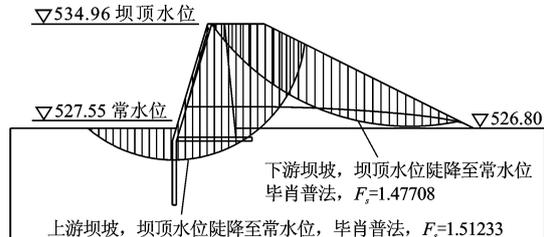


图 13 调整后加固设计方案在水位陡降状态下抗滑稳定数值模拟结果

由图 12 和 13 可知,调整加固方案后堤坝在坝顶水位状态下,上、下游堤坡稳定性最差的圆弧滑动面稳定性系数分别为 2.72 和 1.40,即坝顶水位状态下堤外、内坡皆稳定;水位陡降(坝顶水位陡降至常水位)状态下,上、下游堤坡稳定性最差的圆弧滑动面稳定性系数分别为 1.51 和 1.48,即水位陡降状态下堤外、内坡也是稳定的。该计算结果表明,调整加固方案后堤坝在坝顶水位和水位陡降状态下外、内堤坡处于稳定状态。调整后的加固方案是可行的。

7 结论

本文通过对湘江某堤坝在汛期设计水位、坝顶水位以及水位由坝顶水位陡降至常水位工况下,加固前后堤坝的稳定性进行了有限元分析研究,而且通过对汛期不同水位的实测堤坝险情情况,校正模拟计算参数,并调整加固方案,然后对设计的加固方案进行了可行性分析。得出以下结论:

(1) 汛期堤坝在外河设计、坝顶水位状态下,堤内坡脚高程 531.0 和 529.7 m 以下范围发生渗透破坏,表现为内坡脚大面积散浸与集中渗漏。

(2) 堤坝在外河坝顶水位时,内坡失稳;水位陡降时,外坡失稳。

(3) 加固堤坝在坝顶水位和水位陡降工况下内、外堤坡抗滑稳定;但在设计水位和坝顶水位时堤内、外坡脚会发生渗透破坏,调整加固方案后重新计算,加固堤坝满足渗流和抗滑稳定要求,调整后的加

固设计方案是可行的。

(5) 江河湖堤坝在汛期一旦失稳,后果极其严重,本文仅对汛期和汛后堤坝的稳定性进行研究,但汛期预警和抢险也极为重要,应加强相关理论和实践的研究。

参考文献:

- [1] 王成华,殷忠平,李军. 堤坝 Forchheim 型非达西渗流场特性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015,32(3):66-69.
- [2] 郑丽霞. 基于极限平衡理论的堤坝边坡稳定分析[J]. 地下水,2019,41(1):217-219.
- [3] 李海燕,卢晶荣. 土石坝饱和-非饱和渗流场影响分析[J]. 价值工程,2018,37(36):260-262.
- [4] 吴世余,宋新江. 不透水地基上设有排水棱体堤坝渗流计算的理论解[J]. 岩土工程学报,2012,34(1):102-109.
- [5] 刘子方,孙辉. 堤坝非稳定渗流观测资料分析方法[J]. 岩土工程学报,2011,33(11):1807-1811.
- [6] 叶立龙. 二维稳定渗流有限元法在土坝渗流稳定计算中的应用[J]. 安徽农学通报,2018,24(8):121-123.
- [7] 谷黎明,郝瑞霞. 基于 Autobank 的苏家庄淤地坝防渗改造及渗流分析[J]. 水电能源科学,2019,37(7):58-61.
- [8] 倪成. Autobank 在堤防防渗加固设计中的应用[J]. 吉林水利,2019(7):16-21.
- [9] 王开拓,谢利云,刘辉. 库水位降落作用下均质土石坝渗流场及坝坡稳定性分析[J]. 水电能源科学,2018,36(8):81-84+51.

(下转第 195 页)

- 14(3):324-336.
- [10] 柳俊哲,闫加利,巴明芳,等. 碳化对水泥混凝土内氯离子分布的影响[J]. 建筑材料学报,2015,18(1):113-117.
- [11] 徐鹏,张妍,荆杰. 混凝土中氯离子侵蚀综述[J]. 混凝土,2017(9):45-48.
- [12] 勾密峰,管学茂,张海波,等. 水化程度对水泥基材料固化氯离子的影响[J]. 材料导报,2011,25(20):125-127.
- [13] ZHANG Zhenwen, LI Yushun, LIU Rui. Failure behavior of adhesive bonded interface between steel and bamboo plywood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016,30(19):2081-2099.
- [14] YUAN Qiang, SHI Caijun, SCHUTTER G D, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment—A review[J]. Construction and Building Materials,2009,23(1):1-13.
- [15] WENG Zhicai, YU Hongfa, SUN Wei, et al. Influence of water-cement ratio and cement content on chloride binding capacity of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2006,28(3):47-50.
- [16] ANN K Y, AHN J H, RYOU J S. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2009,23(1):239-245.
- [17] NGALA V T. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes[J]. Cement and Concrete Research,1997,27(7):995-1007.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T50082-2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [19] HIRAO H, YAMADA K, TAKAHASHI H, et al. Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005,3(1):77-84.
- [20] LUPING T, NISSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research,1993,23(2):247-253.
- [21] 牛荻涛,孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. 硅酸盐学报,2013,41(8):1094-1099.

(上接第189页)

- [10] 吴平,万燎榕. 库水位骤降偶遇地震作用下黏土心墙坝渗透及抗震稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):194-199.
- [11] 赵丹. 不同工况下梯级土石坝溃决模型对比研究[J]. 水利规划与设计,2018(3):74-78.
- [12] 罗日洪,董海洲,张令,等. 堤坝渗漏通道热流耦合模型及试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S1):32-38.
- [13] 吴大志,余璐. 土工膜缺陷对堤坝渗流影响的试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2016,35(3):474-478.
- [14] 李嘉,王博,张景伟. 高聚物防渗墙土质堤坝地震加速度响应的动力离心试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2016,36(6):1-10.
- [15] 黄娟,刘栋,纪君娜. 抛石堤坝稳定性试验[J]. 交通科学与工程,2014,30(1):56-59+92.
- [16] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-58.
- [17] 李宏恩,徐海峰,李铮,等. 地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(4):1627-1634.
- [18] 姚斌斌,陈亮,李月奇,等. 堤坝渗漏广义示踪法室内试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2017,34(2):43-49.
- [19] 张汝凯,张晓培,吕守航,等. 三维高密度电阻率法在堤坝工程中的模拟试验[J]. 世界地质,2016,35(4):1133-1137.
- [20] 姚纪华,宋汉周,罗仕军,等. 综合示踪法在岩溶水库渗漏探测中的应用[J]. 工程勘察,2014,42(5):93-98.
- [21] 张守仁. 考虑饱和-非饱和渗流的土石坝渗流及稳定性计算[J]. 安徽建筑,2019,26(9):196-197+234.
- [22] 叶楠. 爆破振动对水库大坝及建筑物安全影响分析[J]. 小水电,2018,203(5):28-30.
- [23] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册:第五版[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018:341-342.
- [24] 赵明阶,邹颖,张欣. 含隐患土石坝的三维波场数值模拟及其特征分析[J]. 水利学报,2016,47(5):599-607.