

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.003

新干航电枢纽工程右岸浸没评价与控制

李明远¹,周志芳¹,杨 蕴¹,信亚雯¹,刘亚南¹,
郭生根²,朱云江³,金 丹³

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098;

2. 江西省港航建设投资有限公司赣江新干航电枢纽工程项目建设管理办公室,江西 南昌 330038;

3. 中水珠江规划勘测设计有限公司,广东 广州 510610)

摘要:为预测赣江新干航电枢纽工程库区浸没范围和程度,以库区右岸为例,建立新干航电枢纽工程右岸浸没评价的地下水三维非稳定流有限元渗流模型,模拟预测在多年平均水文条件下,库区蓄水后浸没程度及范围,并对比布设防渗墙和防渗墙与减压井联合布设对计算区的浸没控制效果。结果表明:无防渗措施工况下坝址下游发生渗漏型浸没,坝址上游发生顶托型浸没,在坝址处形成浸没程度过渡带;防渗墙能够延缓浸没发生,但在275 d后仍然发生严重浸没现象,不能满足设计要求,故采用防渗墙和减压井相联合的工程措施,能够有效控制计算区浸没范围达到控制浸没要求,且防渗墙能够大幅度减小减压井排水量。

关键词:库区浸没;数值模拟;防渗墙;减压井;赣江新干航电枢纽工程

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)03-0203-08

Immersion assessment and control of the right bank of Xingan Navigation and Power Junction

LI Mingyuan¹, ZHOU Zhifang¹, YANG Yun¹, XIN Yawen¹, LIU Yanan¹
GUO Shenggen², ZHU Yunjiang³, JIN Dan³

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Xingan Navigation and Power Junction Construction Management Office of Jiangxi Provincial Port and
Waterway Construction Investment Co., Nanchang 330038, China;

3. China Water Resources Pearl River Planning Surveying and Designing Co. Ltd, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to predicate the immersion range and degree of the Xingan Navigation and Power Junction on the Xingan section of Ganjiang River, taking the right bank of reservoir as an example, a numerical model of three-dimensional transient flow based on the finite element method was established for the predication and assessment of immersion range and degree of the right bank of Xingan reservoir. Furthermore, based on the simulation model, a comparison was made for the effectiveness of immersion control with two operation conditions including the impervious wall and relief well combined with the impervious wall. When there is no operating conditions, the results indicate that the leakage immersion occurred at the downstream of dam site, the backwater immersion occurred at the upstream, and the immersed transition zone is formed at the dam site. Although the impervious wall can retard the immersion process, serious phenomenon of groundwater immersion will emerge after 275 days. The

基金项目:国家自然科学基金(41572209);国家重点研发计划(2016YFC0402803)

作者简介:李明远(1992—),男,硕士研究生,主要从事地质资源与地质工程研究。E-mail:liming549169@163.com

通信作者:周志芳,教授。E-mail:zhouzf@hhu.edu.cn

引用本文:李明远,周志芳,杨蕴,等.新干航电枢纽工程右岸浸没评价与控制[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):203-210.

LI Mingyuan, ZHOU Zhifang, YANG Yun, et al. Immersion assessment and control of the right bank of Xingan Navigation and Power Junction[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(3): 203-210.

assessment results showed that the measure combining impervious wall and relief well can effectively control the immersion range, and the impervious wall can greatly reduce the displacement of the relief well. The findings can provide scientific basis for the immersion evaluation and controlling of the Xingan Navigation and Power Junction.

Key words: reservoir immersion; numerical simulation; impervious wall; relief well; the Xingan Navigation and Power Junction

水库浸没问题是由于水库蓄水,原地下水排泄受阻,促使地下水水位壅高引起的,是水库库区四大工程地质问题之一^[1]。以往关于库区浸没评价计算一般按照水利水电工程地质规范及手册提供的预测方法进行,该方法主要是根据北方水库浸没情况总结出的一套预测方法,并不适合于南方河槽型水库浸没预测评价^[2]。对于具有二元结构的平原型水库的浸没评价,常采用解析法和数值模拟法^[3]。但解析法大多只能描述地下水的稳定流态,不能动态地刻画库区实际复杂水文地质条件的地下水^[4-6]。地下水三维非稳定流数值模型克服了解析法计算存在的问题,大幅度提高了计算精度^[7-8]。骆祖江等^[9]采用有限差分法计算了松原壅水坝工程库区左岸不同防渗方案浸没影响;秦雨等^[3]建立三维非稳定流数值模型,预测哈尔滨市松北区水库库区浸没范围。

垂直防渗墙和减压井是库区主要防渗及浸没控制手段,在堤防工程中得到广泛的应用^[10-11]。近年来,许多学者对采用防渗墙和减压井控制库区渗漏及浸没进行了深入研究。冶雪艳等^[12]通过对比不同防渗墙长度下库区渗漏量及渗流比降,找到最优防渗方案;王晓燕等^[13]采用有限元法对悬挂式防渗墙深度的确定进行了深入研究;曹洪等^[14]通过开展试验观测,总结出影响减压井排水效果的一些控制因素,如减压井贯入深度、井管直径、井间距和出水口高程等。

本文以赣江新干航电枢纽工程库区右岸浸没为例,采用有限元法^[15]建立了新干航电枢纽工程右岸浸没评价的地下水三维非稳定流有限元渗流模型,模拟预测正常蓄水位条件下计算区浸没程度和范围。同时,本文提出采用防渗墙和减压井工程措施控制库区浸没,基于数值模拟分析,评价不同工况下的库区浸没治理效果,为新干航电枢纽工程库区浸没评价与控制设计提供科学依据。

1 工程区概况

1.1 工程概况

江西赣江新干航电枢纽工程位于江西省吉安市新干县大洋洲镇的赣江中游末段,正常蓄水位为 32.5 m,回水长度 56 km,总库容 5 亿 m³,集水面积 64 776 km²,坝址处多年平均径流量为 533 亿 m³,多年平均流量为 1 690 m³/s,主要建筑级别为 3 级,次要建筑物为 4 级,是以航运为主、兼顾发电等综合效益的二等工程。在项目可研阶段,解析解计算堤围台地内可能浸没面积(范围至坝址区一带)约为 44 km²,因此对库区浸没的影响评价和治理措施效果的研究具有十分重要的意义。

1.2 地形地貌与地质条件

坝址区位于赣江中游冲积平原上,两岸地貌单元主要为河流侵蚀堆积类型。坝址两岸冲积平原由河流一级阶地构成,库区右岸河流一级阶地在莒洲岛(库中江心洲)上游断续分布、下游则基本连续分布,阶地地势平坦,地面高程一般在 31 ~ 33 m 之间,与蓄水位相近,可能发生大范围浸没。赣江从南往北流经本区,属于少沙河流,河谷平缓开阔,河宽约 820 ~ 920 m(枯期为 450 ~ 750 m),河床面高程为 20 ~ 25 m,坝址处赣江多年平均水位 26 ~ 27 m。库区右岸内还分布有漂江、湄湘河、沂江 3 条较大支流,其中漂江流域面积 210 km²,河长 34.9 km。

库区两岸地层主要为上覆的第四系全新统(Q₄)松散沉积物,下伏第三系新余群上段(E_{3s})红层。全新统地层至低山丘陵区逐渐消失,下第三系新余群上段地层在低山丘陵区出露。第四系全新统地层由人工堆积层(Q₄^{al})和河流冲积层(Q₄^{al})构成,为典型的二元结构。上层为壤土和粉质黏土盖层,厚约 2 ~ 8 m,下层为含泥粉细砂和砂卵砾石含水层,总厚 6 ~ 12 m。河床切穿砂卵砾石层,赣江与砂卵砾石含水层水力联系密切。库区右岸东南方向约 2 km 处见低缓残丘分布,从基本地质条件初步判断库区右岸属渗漏顶托型浸没区。

2 库区右岸浸没计算模型与校正

2.1 库区右岸水文地质概念模型

取坝址右岸作为模拟区,如图1所示。研究区范围包括漂江北侧的赣东堤区和南侧的王山堤区,平面上北至白门楼村,南至上凰山村,西侧以赣江河道为界,东侧取地形分水岭,南北长约15.33 km,东西长约6.17 km,全区总面积约39.70 km²,其中阶地面积约为29.33 km²。

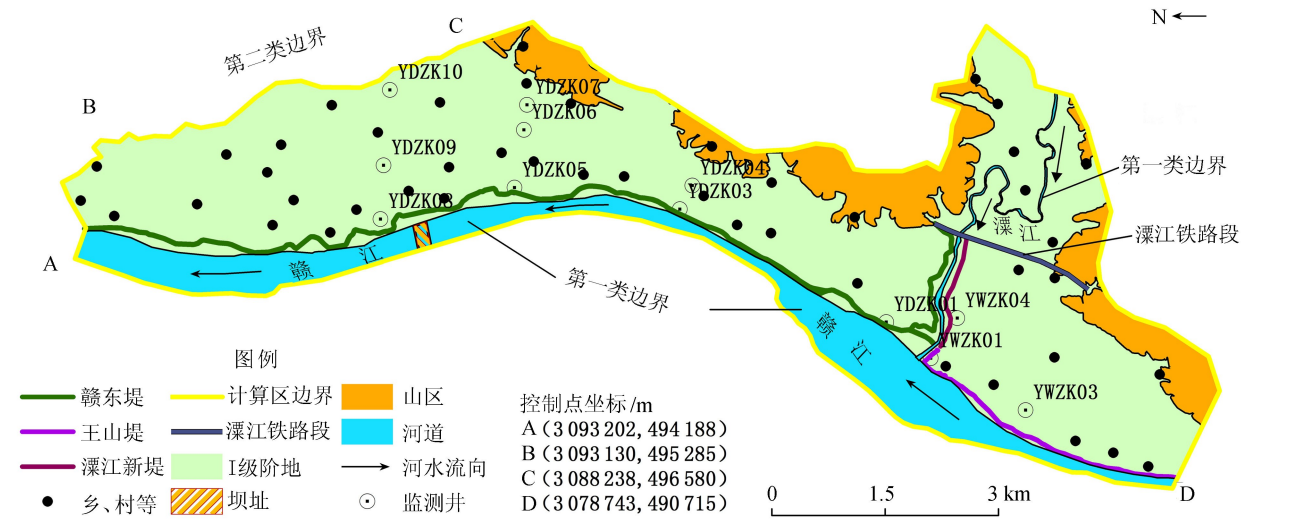


图1 计算区分布范围
Fig.1 Distribution map of the calculating area

计算含水层从上到下共分5层,分别为第四系全新统填土层(layer1)、粉质黏土层(layer2)、细砂层(layer3)、砂卵砾石层(layer4)和下第三系新余群上段基岩底板(layer5)。填土覆盖阶地和山区,其余第四系地层由西向东,逐渐在山前消失,河床处仅有砂卵砾石层和基岩层,模型结构如图2(a)所示。赣江和漂江为第一类边界,模型东北边界(图1中BC段)视为第二类边界,其流量以YDZK08、YDZK09和YDZK10监测井实测水位推算得到,其余为零通量边界。模型底部为隔水边界,模型顶部为自由水面边界,接受降雨入渗补给和蒸发排泄。

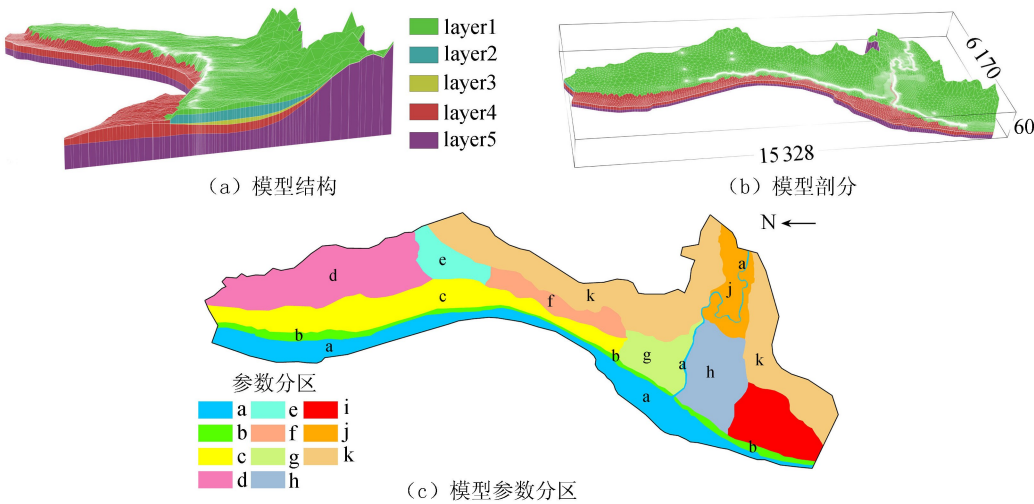


图2 模型结构、剖分和参数分区(单位:m)
Fig.2 Structure, mesh subdivision and parameter partition of the simulating field(units:m)

2.2 数学模型

根据上述水文地质概念模型,将蓄水前后库区地下水运动过程概化为非均质各向同性三维非稳定流数学模型^[16-17]。

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial H}{\partial z}\right)+W=S_s\frac{\partial H}{\partial t} \quad (x,y,z)\in\Omega \\ H(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z,t_0) \quad (x,y,z)\in\Omega \\ H(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=H_1(x,y,z,t) \quad (x,y,z)\in\Gamma_1 \\ K\frac{\partial H}{\partial n}=q(x,y,z,t) \quad (x,y,z)\in\Gamma_2 \\ \frac{\partial H}{\partial n}=0 \quad (x,y,z)\in\Gamma_2 \\ H(x,y,z,t)=z \quad (x,y,z)\in\Gamma_3 \\ K\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2+K\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2-K\frac{\partial H}{\partial z}+\varepsilon=\mu\frac{\partial H}{\partial t} \quad (x,y,z)\in\Gamma_3 \end{array}\right. \quad (1)$$

式中: H ——点 (x,y,z) 在 t 时刻的水头值,m; K ——含水层渗透系数,m/d; S_s ——贮水率,1/m; W ——单位时间从单位体积含水层流入或流出的水量,1/d; ε ——单位时间在垂向上从单位面积含水层自由面流入或流出的水量,m/d; t ——时间,d; μ ——饱和差或给水度^[9]; q ——第二类边界上单位面积补给量,m/d; n ——边界外法线方向; H_1 ——第一类边界水头值,m; H_0 ——非稳定流模拟时的流场初始条件,m; $x、y、z$ ——空间坐标; Ω ——计算区; $\Gamma_1、\Gamma_2、\Gamma_3$ ——第一类边界、第二类边界和自由面边界。

2.3 模型识别与校正

模型平面上剖分 34 892 个节点,最小三角形边长约 3 m,模型共 346 695 个单元,如图 2(b)所示。以 2017 年 1 月 1 日至 6 月 30 日作为模型校正时段,时间步长为 1 d。通过坝址上游约 17 km 处新干水文站的逐日水位数据,采用新干县至坝址处平均水力比降 0.028%,插值得到赣江段天然水位。根据水文地质条件,结合地形地貌、农田、村庄分布等因素,将计算区分为 11 个区,如图 2(c)所示。

在给定模型的初始条件、边界条件及各项补排量的基础上,手动试错调整渗透系数、给水度、贮水率和净补给系数(地下水净补给量与降水量比值)4 个参数,使计算水位与实际观测水位能较好地拟合。经识别和验证,模型各分区参数见表 1。选择研究区内 12 口监测井实测水位值与计算值进行拟合,结果如图 3 所示。拟合结果显示,水位变幅在 0.5 m 以下范围的监测井占 82.4%,在 0.5~1 m 范围内的监测井占 16.2%,大于 1 m 的监测井占 1.4%;误差值最小为 0.01 m,最大为 1.41 m,平均误差为 0.33 m。校验结果表明,右岸区模型能够良好地体现天然地下水形态,基本符合实际情况,可用来进行枢纽工程库区右岸浸没情况和防治方案的预测。

表 1 各含水层水文地质参数
Table 1 Hydrogeological parameters of aquifers

参数分区	$K/(m\cdot d^{-1})$					μ		S_s/m^{-1}			净补给系数
	Layer1	Layer2	Layer3	Layer4	Layer5	Layer1	Layer2	Layer3	Layer4	Layer5	
a	60.00	60.00	60.00	60.00	0.01			4.92×10^{-6}	1.23×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0
b	10.00	1.00	1.00	50.00	0.01	0.050	0.050	1.00×10^{-5}	1.23×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0.0022
c	0.20	0.08	1.00	52.00	0.01	0.040	0.030	1.00×10^{-5}	1.07×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0.0300
d	0.10	0.09	1.00	55.00	0.01	0.040	0.020	1.00×10^{-5}	2.35×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0.0095
e	0.10	0.08	0.60	50.00	0.01	0.033	0.020	1.50×10^{-5}	1.01×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0.0100
f	0.10	0.08	0.50	50.00	0.01	0.033	0.020	1.50×10^{-5}	7.60×10^{-7}	1.00×10^{-9}	0.0120
g	0.10	0.07	1.00	45.00	0.01	0.051	0.020	1.00×10^{-5}	8.94×10^{-7}	1.00×10^{-9}	0.0200
h	0.10	0.07	1.00	45.00	0.01	0.028	0.020	1.00×10^{-5}	7.15×10^{-7}	1.00×10^{-9}	0.0320
i	0.10	0.08	1.00	50.00	0.01	0.028	0.020	1.00×10^{-5}	1.25×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0.0422
j	0.10	0.08	1.00	50.00	0.01	0.050	0.020	1.00×10^{-5}	1.25×10^{-6}	1.00×10^{-9}	0.0265
k	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.050		5.00×10^{-9}	1.25×10^{-9}	1.00×10^{-9}	0.0055

3 库区右岸浸没预测评价与控制

3.1 浸没评判标准

研究区地下水临界埋深值(H_{CR})是水库浸没的评判依据,当水库正常蓄水后某处地下水埋深值小于 H_{CR} ,则判断为浸没区。浸没地下水临界埋深按式(2)求得^[18]:

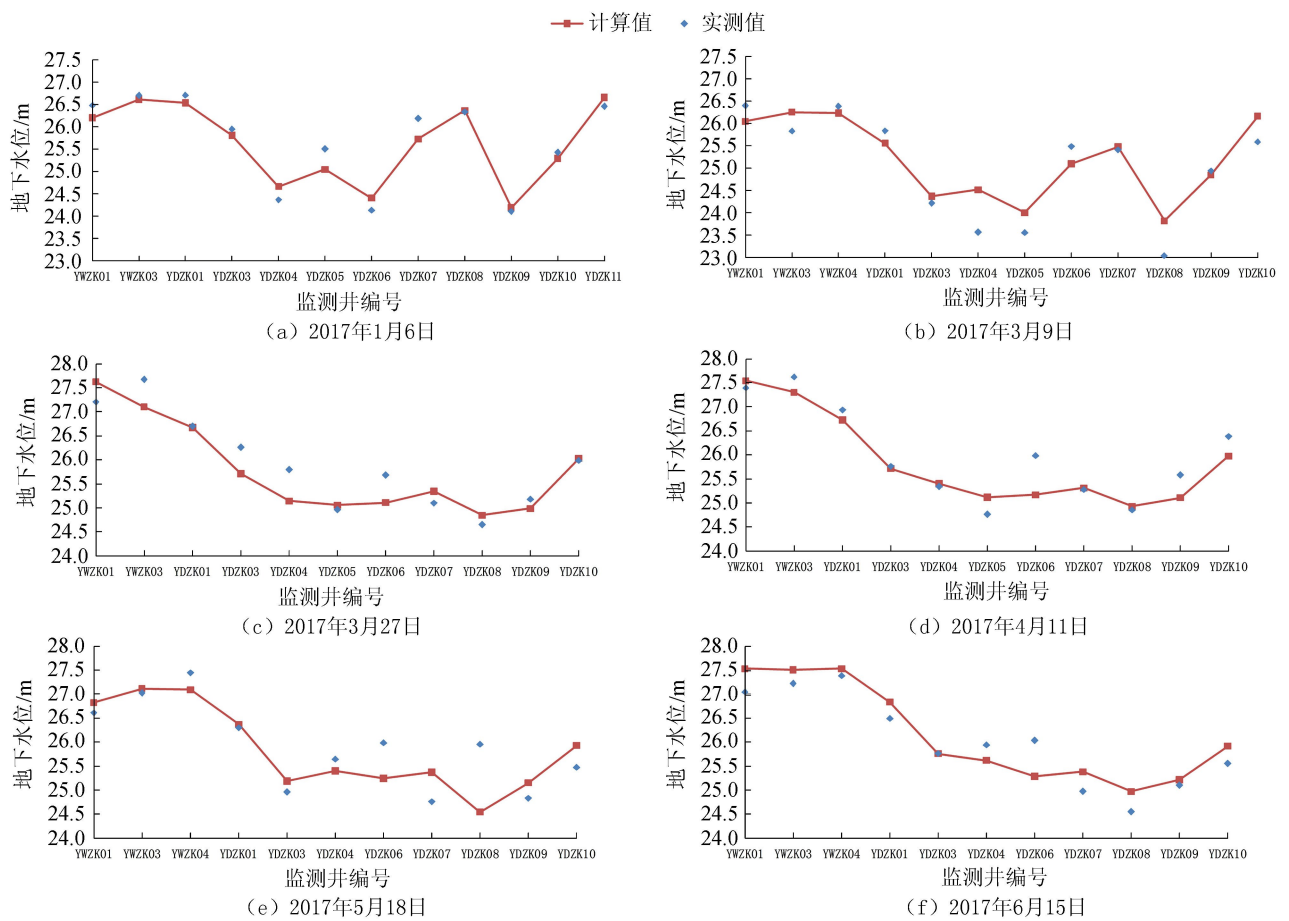


图 3 地下水位计算值与实测值拟合

Fig.3 Fitting of measured and calculated hydraulic heads in observing wells

$$H_{CR} = H_K + \Delta H \tag{2}$$

式中: H_K ——土壤毛细上升高度,m; ΔH ——安全超高值,m。

根据野外实测勘察及水文地质资料,土壤毛细上升高度取 0.6 m。由工程地质报告,水田、旱田、民舍和城镇对应的安全超高值分别为 0.7 m、1.35 m、1.75 m、2.25 m,划分严重、重度、中度、轻度 4 种浸没程度,结合式(2),对应地下水临近埋深分别为 1.3 m、1.3 ~ 1.95 m、1.95 ~ 2.35 m、2.35 ~ 2.85 m。

3.2 浸没预测

新干航电枢纽工程为满足通航需求,需要常年保持库水位在 32.5 m,且模拟区内赣江和漂江均在回水范围之内,故赣江在坝址上游和漂江均设置为定水头边界 32.5 m,坝址下游按天然水位变化,以 2018 年 1 月 1 日作为预测初始时刻,预测 3 年内工况 1(无防渗措施)下浸没程度。

工况 1 下预测计算区浸没程度和范围如图 4 所示。预测结果表明,赣东堤区由于库水向下游渗漏发生渗漏型浸没,坝址下游受赣江天然水位影响,在坝址附近形成浸没程度过渡带,越靠近坝址下游,浸没程度越小。而坝址上游,由于赣江和漂江水位上升,改变地下水补排条件,排泄出路封堵,造成顶托型浸没。浸没范围由于地形特征呈条带状分布,且因为阶地面地表高程由河岸至山前逐渐增高(阶地面高程 31 ~ 33 m,山前地表高程 34 ~ 36 m),故距离赣江和漂江越近,浸没程度越大。

3.3 浸没控制

采用垂直截渗防渗墙和减压井 2 种浸没控制措施。对比分析工况 2(仅布设防渗墙)、工况 3(防渗墙和减压井联合布设)和工况 4(仅布设减压井)计算区的浸没情况。

为不影响居民用水,防渗墙布设方式为局部堤段布设,根据工艺分为高压旋喷防渗墙、射水造墙防渗墙和混凝土防渗墙,沿赣东堤、王山堤和漂江新堤布设,如图 5 所示。赣东堤处,高压旋喷和射水造墙相间布设,防渗墙始于坝址(①号控制点),止于漂江出水口(②号控制点);王山堤处,高压旋喷和射水造墙也为相

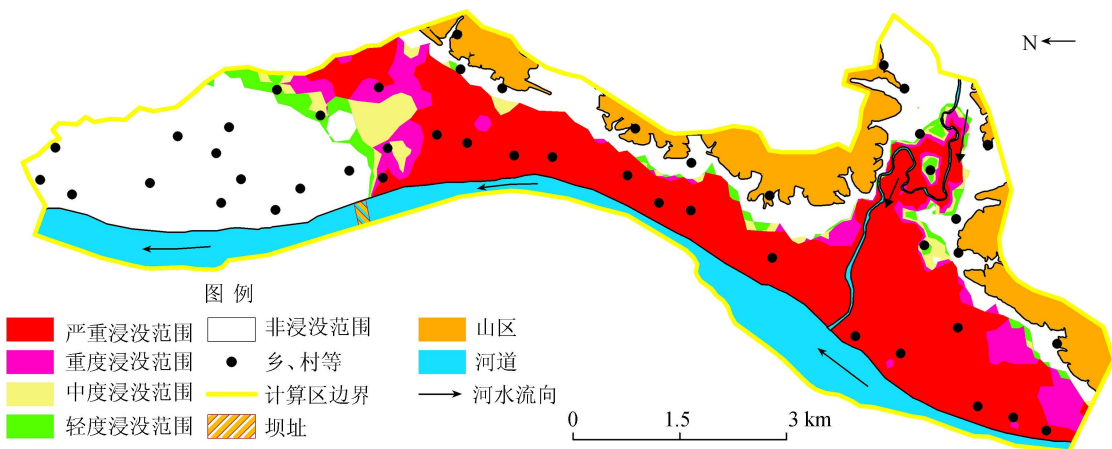


图4 工况1下计算区浸没范围和程度

Fig.4 Immersion range and degree of the calculating domain under condition 1

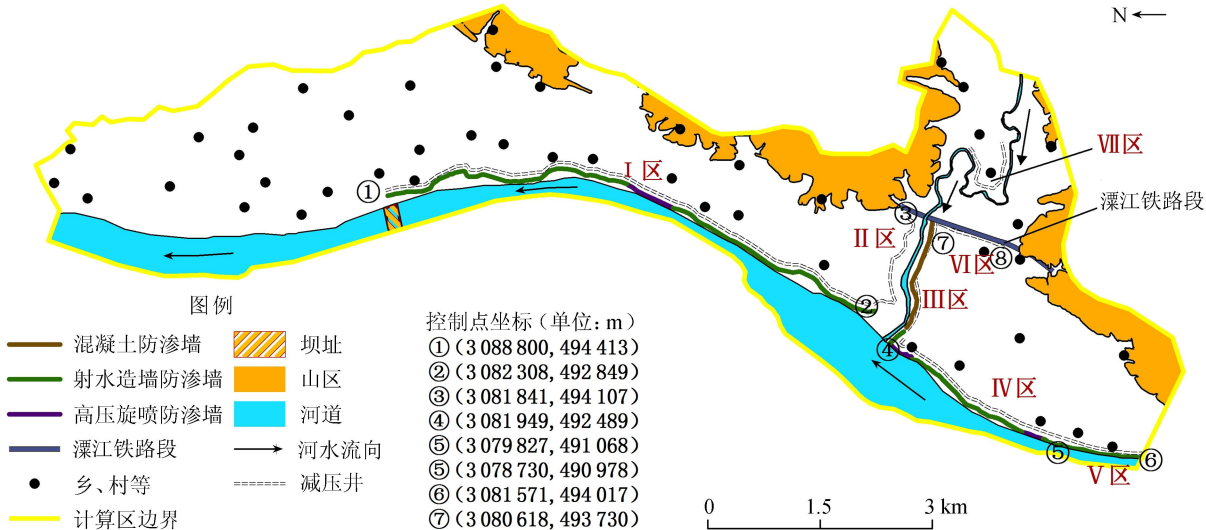


图5 防渗墙和减压井布设示意图

Fig.5 Distribution map of the impervious wall and the relief well

间布设,从溧江出水口(④号控制点)开始,至模型最南端(⑥号控制点)结束;溧江新堤处(④~⑦号控制点)布设混凝土防渗墙。防渗墙均贯穿至基岩,防渗墙单元结构为三棱柱体,由于防渗墙实际厚度远小于模型三角剖分单元长度,而有限单元剖分太小,影响模型稳定和计算精度,故按防渗墙加密处三角形单元边长平均值4.5 m 折算^[19],射水造墙防渗墙和混凝土防渗墙厚度分别为0.22 m 和0.40 m,其设计渗透系数均为 $8.64\times10^{-3}\text{ m/d}$ ($1\times10^{-5}\text{ cm/s}$),折算后分别为 $1.77\times10^{-1}\text{ m/d}$ 和 $9.72\times10^{-2}\text{ m/d}$;高压旋喷防渗墙厚度为0.60 m,设计渗透系数为 $8.64\times10^{-4}\text{ m/d}$ ($1\times10^{-6}\text{ cm/s}$),折算后为 $6.48\times10^{-3}\text{ m/d}$ 。

按照设计要求,减压井出水口与堤防后排水管道相连,管道深埋地下,距堤脚30 m 内,对于Ⅶ区则沿溧江半封闭布设,并根据减压井是否布设在防渗墙后及地表高程划定7个布设分区,编号Ⅰ~Ⅶ,如图5所示。为最大限度发挥减压井减排效果,减压井布设应贯穿至主要含水层——砂卵砾石层,井径为0.3 m。由野外抽水试验结合模型参数,反算其影响半径为12.19~70.16 m,结合实际施工要求,井间距均设为30 m。为最大限度发挥减压井浸没控制效果,Ⅲ区井口高程可设为26 m,Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅵ区为27 m,Ⅳ区为27 m,Ⅴ区和Ⅶ区为29 m。

对工况2和工况3进行库区浸没预测,浸没面积统计见表2。

工况2与工况1对比,浸没范围减小,但减小幅度不大,主要发生在坝址附近,源于局部堤段布设防渗墙,并未完全切割赣江、溧江和地下水水力联系,仅在一定程度上阻挡了地下水运动,延长了地下水渗流途径,起到延缓浸没发生的作用,且模型在275 d 后,地下水位高于蓄水位,此时防渗墙会拦截地下水向赣江、

漂江排泄,使地下水位进一步壅高,造成王山堤区浸没范围进一步扩大。

表 2 各工况下计算区浸没面积统计

Table 2 Immersion area of the calculating domain under different conditions

区域	工况	浸没范围/10 ⁴ m ²					阶地面积/ 10 ⁴ m ²	浸没占比
		严重浸没	重度浸没	中度浸没	轻度浸没	总浸没		
赣东堤区	1	699.35	124.86	89.45	72.51	986.18	2 109.58	0.467
	2	581.29	153.11	64.29	114.34	913.03		0.433
	3	80.84	8.04	5.44	10.87	105.19		0.050
王山堤区	1	530.24	92.13	19.99	19.55	661.91	823.77	0.804
	2	558.51	66.58	22.90	15.09	663.09		0.805
	3	65.49	15.38	5.05	8.10	94.02		0.114
模型计算区	1	1 229.59	216.99	109.44	92.07	1 648.09	2 933.35	0.562
	2	1 139.80	219.70	87.19	129.43	1 576.12		0.537
	3	146.33	23.42	10.48	18.97	199.21		0.068

工况 3 条件下,赣东堤区和王山堤区浸没范围均位于堤外,而漂江铁路东部沿漂江发生浸没,但未影响到村庄,且防渗墙处水力坡降为 7.4~23.4,符合施工质量要求(限值 60)。因此,工况 3 结合减压井和防渗墙 2 种工程措施组成的联合工况,能够有效控制右岸浸没范围,满足浸没设计要求。

由工况 3 和工况 4 下减压井排水量对比可知,防渗墙可帮助减压井减少排水量约 41.69 万 m³/d,约为工况 3 条件下排水量的 2.9 倍,单井约 701.92 m³/d,大幅度减小了减压井排水压力,节约了工程成本。

4 结 论

- a. 新干航电枢纽库区右岸浸没范围主要分布在坝址上游,为顶托型浸没,呈条带状分布;坝址下游为渗漏型浸没,在坝址处形成浸没过渡带,越靠近坝址下游,浸没程度越小。
- b. 局部堤段布设防渗墙不能完全切割地表水与地下水水力联系,仅在一定程度上延缓浸没的发生,当地下水位高于蓄水位时,防渗墙会拦截地下水向赣江、漂江排泄,使王山堤区浸没范围进一步扩大。
- c. 防渗墙和减压井联合工况下,计算区浸没范围得到有效控制,达到浸没设计要求;防渗墙能帮助减压井减小约 2.9 倍的排水量,降低减排压力,节约工程成本。

参考文献:

[1] 史永康,李文华. 关于官厅水库浸没区治理的建议[J]. 河北水利,2007(5):46. (SHI Yongkang,LI Wenhua. Suggestion on the management of the immersion zones in Guanting Reservoir[J]. Hebei Water Resources, 2007(5):46. (in Chinese))

[2] 曹正之. 对江南地区水库浸没预测评价的浅见[J]. 水力发电,1986(1):27-30. (CAO Zhengzhi. Humble opinioms on prediction and evaluation to reservoir immersion in Yangtze River regions[J]. Water Power, 1986(1):27-30. (in Chinese))

[3] 秦雨,张立杰. 哈尔滨市松北区水库雍水浸没评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(1):135-139. (QIN Yu, ZHANG Lijie. Evaluation on reservoir immersion in Songbei District of Harbin[J]. Journal of Jilin Unviersity(Earth Science Edition), 2010,40(1):135-139. (in Chinese))

[4] SUN N Z. Applications of numerical methods to simulate the movement of contaminants in groundwater[J]. Environmental Health Perspectives, 1989,83:97-115.

[5] GEORGE P K. Developments on mdeling of groundwater flow and contaminant transport[J]. Water Resour Manage, 2017,31(10):3235-3244.

[6] HAO Qichen,SHAO Jingli,CUI Yali,et al. Applications of numerical methods to simulate the movement of contaminants in groundwater[J]. Journal of Earth Science, 2014,25(3):575-586.

[7] BOCHESKA T,FISZER J,KALISZ M. Prediction of groundwater inflow into copper mines of the Lubin Glogów Copper District [J]. Environmental Geology, 2000,39(6):587-594.

[8] 孙从军,韩振波,赵振,等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程,2013,31(5):9-13. (SUN Congjun, HAN Zhenbo,ZHAO Zhen,et al. Advances in research and application of groundwater numerical simulation[J]. Environmental Engineering, 2013,31(5):9-13. (in Chinese))

[9] 骆祖江,杨林,李占军,等. 松原壅水坝工程库区左岸浸没预测三维数值模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(3):129-134.

- (LUO Zujang, YANG Li, LI Zhanjun, et al. Three-dimensional numerical simulation for immersion prediction of left bank of Songyuan reservoir project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 129-134. (in Chinese))
- [10] 张挺, 曹洪, 詹杰民, 等. 北江大堤石角堤段防渗工程效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2235-2241. (ZHANG Ting, CAO Hong, ZHAN Jiemin, et al. Effect analysis of preventing seepage engineering in Shijiao segment of north river level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2235-2241. (in Chinese))
- [11] 束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 20-26. (SHU Yiming. Progress in geomembrane barriers for seepage prevention in reservoirs and dams in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 20-26. (in Chinese))
- [12] 冶雪艳, 杜新强, 杨悦锁. 绥化市红兴水库渗漏分析及渗控方案模拟预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 128-133. (YE Xueyan, DU Xinqiang, YANG Yuesuo. Seepage analysis and forecast of the seepage-control schemes of Hongxing reservoir in Suihua City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(1): 128-133. (in Chinese))
- [13] 王晓燕, 党发宁, 田威, 等. 大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的确定[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1564-1568. (WANG Xiaoyan, DANG Faning, TIAN Wei, et al. Determination of depth of suspended cut-off walls in cofferdam of a hydraulic power station in Dadu River[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1564-1568. (in Chinese))
- [14] 曹洪, 尹小玲, 魏旭辉, 等. 潮州供水枢纽工程库区浸没影响初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 862-866. (CAO Hong, YI Xiaoling, WEI Xuhui, et al. Primary study on effects of immersion by reservoir of Chaozhou water supply project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 862-866. (in Chinese))
- [15] DIERSCH HANS-JÖRG G. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [16] SAMANI N, KOMPANI-ZARE M, BARRY D A. MODFLOW equipped with a new method for the accurate simulation of axisymmetric flow[J]. Advances in Water Resources, 2004, 21(1): 31-45.
- [17] CHE Chongxi, KUANG Xingxing, JIAO Jiu Jimmy. Methods to derive the differential equation of the free surface boundary[J]. Ground Water, 2010, 48(3): 329-332.
- [18] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程地质勘察规范: GB487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [19] 曹洪, 孙子钧, 李俊, 等. 潮州城区浸没影响的预测与实测资料分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2161-2166. (CAO Hong, SUN Zijun, LI Jun, et al. Prediction and monitoring analysis of immersion effects of Chaozhou City zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2161-2166. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-09-18 编辑: 张志琴)