水利水运工程学报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

平原河网地区全库盆土工膜防渗水库膜下排水减压分析

卢斌，谭海劲，张宝森，何妙妙，张宇，谢兴华

Analysis of sub-membrane drainage and pressure reduction in full-reservoir geomembrane systems in plain river network areas

LU Bin, TAN Haijin, ZHANG Baosen, HE Miaomiao, ZHANG Yu, XIE Xinghua

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20230823005

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

土工膜界面动力剪切特性数值模拟及应用
Numerical simulation of dynamic shear characteristics of geomembrane interface and its application
水利水运工程学报. 2021(2): 103 https://doi.org/10.12170/20200216002

基于适宜生态水位的通州区平原河网引排水研究
Study on water diversion and drainage of plain river network in Tongzhou district based on suitable ecological water level
水利水运工程学报. 2022(2): 51 https://doi.org/10.12170/20210722002

淤地坝防渗改造渗流及坝坡稳定分析
Analysis of seepage and dam slope stability for anti-seepage transformation of silt dam
水利水运工程学报. 2022(6): 129 https://doi.org/10.12170/20210509001

城镇化背景下平原河网区暴雨洪水重现期变化分析——以太湖流域武澄锡虞区为例
Change in return period of storm flood in plain river network area under urbanization—taking Wuchengxiyu region of Taihu Lake basin as a case study
水利水运工程学报. 2019(5): 27 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.004

高聚物防渗墙在交通荷载作用下的应变特征
Strain characteristics of polymer anti-seepage wall under traffic load
水利水运工程学报. 2020(4): 103 https://doi.org/10.12170/20190520001

感潮河网口门处舾装码头工程对引排水的影响
Influence of outfitting wharf project at the entrance of tidal river network on water diversion and drainage
水利水运工程学报. 2023(3): 10 https://doi.org/10.12170/20220307001

扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

水 利 水 运 工 程 学 报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

DOI:10.12170/20230823005
卢斌, 谭海劲, 张宝森, 等. 平原河网地区全库盆土工膜防渗水库膜下排水减压分析 [J]. 水利水运工程学报. (LU Bin, TAN Haijin, ZHANG Baosen, et al. Analysis of sub-membrane drainage and pressure reduction in full-reservoir geomembrane systems in plain river network areas[J]. Hydro-Science and Engineering(in Chinese))

平原河网地区全库盆土工膜防渗水库膜下排水减压分析

卢 斌[1,2], 谭海劲[3], 张宝森[1], 何妙妙[4], 张 宇[2], 谢兴华[2]

(1. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635; 4. 苏州市吴中区水务局, 江苏 苏州 215200)

摘要: 平原河网地区地下水与河道联系紧密, 在地质条件较差或有隔污等要求时建库, 常采用全库盆土工膜防渗方案。为了满足土工膜抗浮稳定及防止气胀等问题, 通过膜下布设排水管网进行排水减压。依托某引调水工程全库盆土工膜防渗平原水库, 采用多孔介质渗流和管道流耦合的地下水流模拟方法, 模拟复杂排水管网和库区岩土体共同作用的复合渗流场。通过对比不同排水方案、土层渗透性能等条件下的渗透压力分布表明, 正交管网闭合小区内膜下渗透压力从小区中心向四周排水管逐渐降低, 闭合小区内减压效果明显, 坝脚位置膜下渗透压力明显高于库内区域, 需增设坝脚排水管。淤泥质粉细砂层渗透性对膜下渗透压力影响较大, 水库低水位运行期间应加强对膜下渗透压力的监测。研究结果可为平原河网地区全库盆土工膜防渗水库工程的渗控设计和安全运行提供参考。

关 键 词: 平原水库; 土工膜; 全库盆防渗; 渗透压力; 排水减压

中图分类号: TV44 **文献标志码:** A **文章编号:**

平原水库一般采用库区开挖和填筑围坝相结合的方式建设, 具有库盆面积大、围坝轴线长、蓄水水头低等典型特征[1-2]。主要分布于冲积平原地区, 库区多含有强渗透性土层, 库盆通常无连续、稳定的天然防渗层, 如不采取适当的防渗措施则水库渗漏问题突出, 将带来水资源浪费、农田浸没、次生盐碱化等一系列安全与环境问题[3-4]。平原水库防渗主要有垂直防渗和水平防渗两种方式, 若库区相对不透水层埋深较浅, 则通常采用防渗墙、连体搅拌桩等垂直截渗的型式。若库区无相对不透水层或埋深较深, 则采用水平防渗, 当工程地质条件较差或用于隔离污染物时, 则需要采用全库盆防渗的方案[5]。

考虑到材料的易获性、施工的复杂性及成本等因素, 大面积铺设土工膜是一种极具竞争力的全库盆防渗方案。土工膜具有防渗性能高、适应变形能力强、施工简单、造价低等特点, 广泛应用于垃圾填埋场、平原水库、岩溶洼地水库、污水池等工程的防渗[6-10]。平原水库全库盆铺设土工膜用量巨大, 平面上大面积的铺设容易使膜下形成局部相对封闭空间, 特别是当库区地下水位和库水位快速变化时, 会造成膜下扬压力升高或气体聚集顶托现象, 导致膜体局部破坏渗漏[11-15]。因此, 应根据实际情况采取膜下排水(气)、膜上压重等措施[2,16]。李传奇等[17] 采用平原水库二维断面模型, 对比分析了土工膜完好与不同缺陷条件下的坝体浸润线和渗漏量; 甘磊等[18] 通过建立土工膜防渗平原水库二维断面模型, 模拟分析了土工膜缺陷点尺寸大小、数量和位置对库底土工膜稳定性和渗漏量的影响; 王琳等[19] 针对干旱区平原水库渗漏引起的坝后土壤

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目(LSDP202203); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y122001); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑 [2020]4Y024)

作者简介: 卢 斌(1985—), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 博士, 主要从事工程地下水安全与调控等工作。
E-mail: blu@nhri.cn 通信作者: 谢兴华(E-mail: xiexh@nhri.cn)

盐碱化问题，采用二维断面模型，分析比较了水平铺盖防渗、垂直防渗墙与坝后截水沟联合渗控下的降水效果；李杰等[2] 基于改进结点虚流量法，采用加密高斯点技术有效缩减平原水库三维模型网格数量，模拟了红兴水库三维渗流场，并优化了垂直防渗方案设计；周建芬等[20] 建立了大屯水库全库盆土工膜防渗三维渗流模型，研究了库区及坝基区域地下水位在水库蓄水过程中的动态变化过程。由于全库盆土工膜防渗平原水库三维渗流模型中，土工膜厚度、排水管管径与库区尺寸差异巨大，排水管网布置数量多、并在整个库盆分布，给整体三维渗流模拟带来一定的困难，多数研究中并没有考虑膜下复杂排水管网措施。

综上可见，目前对土工膜防渗平原水库的研究主要集中在土工膜破损渗漏等方面，对于膜下复杂排水管网排水减压效果的研究较少。本文以某引调水工程全库盆土工膜防渗平原水库为研究对象，采用多孔介质渗流和管道流耦合的地下水流模拟方法，分析不同河道水位、排水方案、土层渗透性能等条件下的渗透压力分布，评价膜下复杂排水管网的排水减压效果，以期为类似全库盆土工膜防渗水库工程的渗控设计和安全运行提供参考。

1 工程概况

GXS 水库为某引调水工程的一座调节水库，坐落在河口三角洲平原河网三角形地块，地势较为平坦，如图 1(a) 所示，水库东西两侧临近河道，库区地下水和河水位联系紧密，河道水位受潮汐影响，多年平均潮差 1 m 左右。库盆开挖深约 2~3 m，开挖揭露地层为淤泥质黏土层和淤质粉细砂层，粉细砂层具中等透水性。

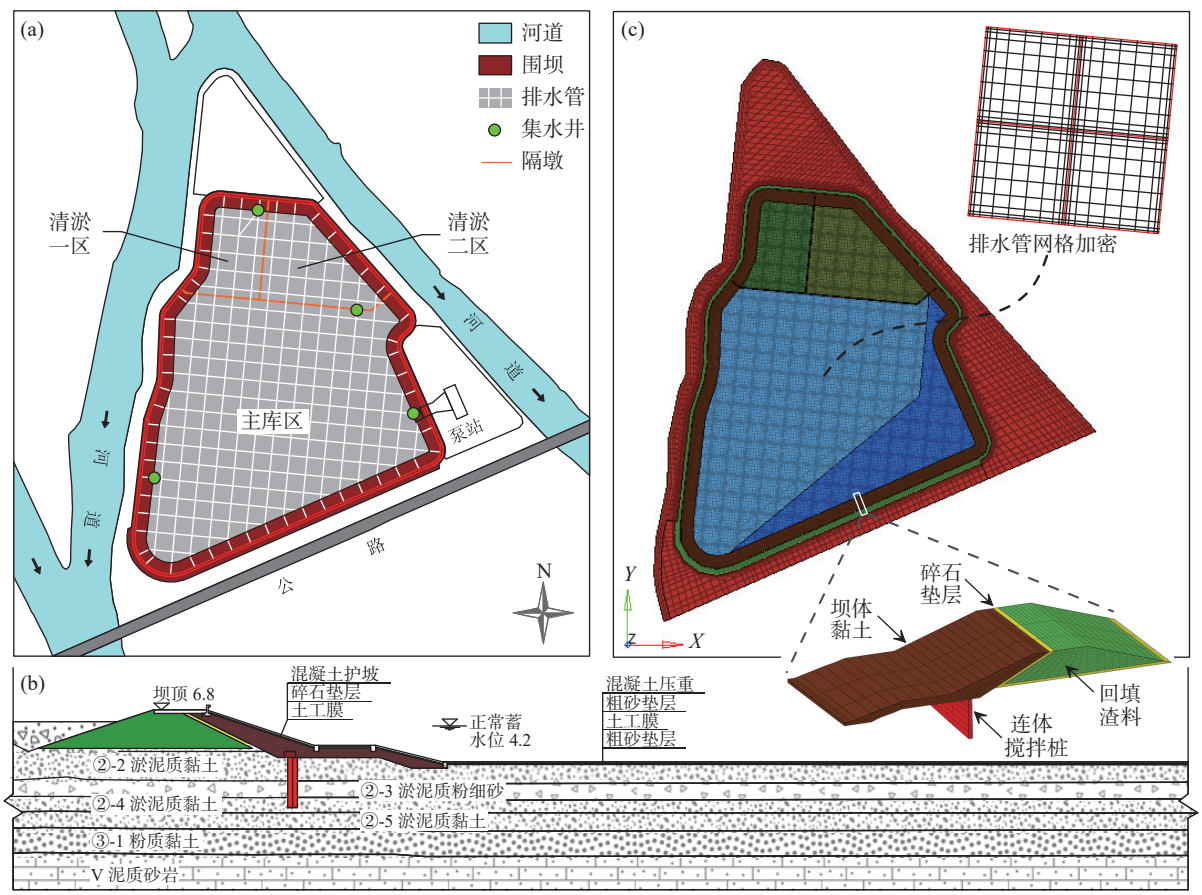


图 1 水库布置及模型网格

Fig. 1 Reservoir layout and model grid

围坝坝型为分区土坝, 坝长约 3 772 m, 坝顶高程 6.80 m, 库底开挖高程为−2.00 m。库内坡比为 1∶3 和 1∶4, 背水坡坡比为 1∶3。坝体典型断面见图 1(b), 自库内至库外依次布置混凝土护坡、粗砂碎石垫层、复合土工膜、坝体填筑土、级配碎石垫层、坝体回填渣料。土坝基础为软土地基, 采用水泥搅拌桩提高承载力。并沿围坝坝轴线设两排 *Φ*800 连体水泥搅拌桩作为垂直防渗, 桩端伸至②-4 淤泥质黏土层 2 m, 防渗墙顶回填高塑性黏土, 与坝身黏土形成封闭区。

库内划分为 3 个区域, 北侧左为清淤一区, 北侧右为清淤二区, 南侧为主库区, 采用隔墩分隔, 北侧两区轮流进行放空清淤, 保证工程不断水。库盆防渗为全库盆铺设土工膜, 采用两布一膜、膜布分置, PE 膜厚度为 0.5 mm。膜下布设排水(气)管沟网, 沟断面为 300 mm × 300 mm 的正方形, 沟内布设 Φ200 软式透水管, 管周回填碎石, 碎石外包一层土工布。管网整体呈正交棋盘格状(见图 1(a)), 间距为 60 m。排水管网与集水井连通, 集水井分布位置见图 1(a)。土工膜上铺设 100 mm 厚粗砂垫层和 200 mm 厚 C25 混凝土板压重。

2　地下水流模拟方法

本文采用多孔介质渗流和管道流耦合的地下水流模拟方法, 模拟复杂排水管网和库区岩土体共同作用的复合渗流场, “渗流-管流”耦合方法在混合抽水试验、水平井流、岩溶管道地下水模拟等问题的研究中已开展了初步应用[21]。根据 Darcy 定律和水流连续性方程, 库区整体地下水渗流控制方程为:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial x}\left(k\dfrac{\partial h}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(k\dfrac{\partial h}{\partial y}\right)+\dfrac{\partial}{\partial z}\left(k\dfrac{\partial h}{\partial z}\right)+w=S_{\mathrm{s}}\dfrac{\partial h}{\partial t} & (x,y,z)\in\Omega \\ h(x,y,z,0)=h_0 & (x,y,z)\in\Omega \\ h(x,y,z,t)\big|_{\Gamma_1}=h_1 & (x,y,z)\in\Gamma_1 \\ k\dfrac{\partial h}{\partial n}\Big|_{\Gamma_2}=q & (x,y,z)\in\Gamma_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中: h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值; k 为渗透系数; S_{s} 为贮水率; w 为源汇项; Ω 为地下水渗流模拟区域; h_0 为初始水位; h_1 为第一类边界水位; q 为第二类边界上单位面积流量; Γ_1 为第一类边界; Γ_2 为第二类边界; x, y, z 为空间坐标; n 为边界面的法向方向。

膜下排水管网管径远远小于整个库区平面尺寸, 排水管可概化为一维线单元, 描述其水流运动的管道流控制方程为:

$$\begin{cases} Q=\int_0^R u2\pi\, r\mathrm{d}r=\dfrac{\pi\,\Delta p}{2\upsilon l}\int_0^R(R^2-r^2)r\mathrm{d}r=\dfrac{\pi\,\Delta p}{8\upsilon l}R^2 \\ u=\dfrac{\Delta p}{4\upsilon l}(R^2-r^2) \end{cases} \tag{2}$$

式中: Q 为管道内流量; u 为管道内流速; Δp 为作用在管道两端的压力差; l 为管道长度; R、r 分别为管道半径与管内任意半径; υ 为黏滞系数。

库区地下水多孔介质渗流和管道流耦合的控制方程为:

$$\begin{cases} [BS_0+\varepsilon(S-S_{\mathrm{r}})]\dfrac{\partial h}{\partial t}+B\varepsilon\dfrac{\partial s}{\partial t}+\nabla(Bq)=Q \\ v=-K(\nabla h+\chi e) \end{cases} \tag{3}$$

式中: B 为过水断面厚度; S_0 为单位储水系数; ε 为孔隙度; S 为饱和度; S_{r} 为剩余饱和度; v 为流速; ∇h 为水头梯度; χ 为浮力系数。

3 模型与模拟条件

3.1 模型及边界条件

库区整体三维模型网格如图 1(c) 所示，模型东西两侧以河道为边界，南侧以坝轴线平行外移约 75 m 为边界，模型平面面积约为 1.68 km^2。由于模型垂直方向与水平方向尺寸差别较大，综合考虑计算精度与成本，对库外部使用较粗的网格，对坝体及库区使用较小的网格进行细致剖分。模型网格以六面体单元为主，单元总数约为 41 万个，其中，围坝单元数约为 12 万个，坝体垂直方向网格尺寸为 0.5 m，沿坝轴线方向网格尺寸约为 5~10 m，坝体模型典型网格见图 1(c)。

库底按照排水管网布置形状划分平面网格，并对排水管网位置进行网格加密处理(见图 1(c) 局部放大图)，排水管线单元节点数量为 4 264 个。库盆开挖后揭露淤泥质黏土层和淤泥质粉细砂层，分别为弱透水性和中等透水性，淤质粉细砂层主要分布在库区东南侧，模型中将库盆中、弱透水层分界线做概化处理。模型东西临河两侧设为定水头边界条件，具体水位值见计算工况。模型底部深入相对不透水层，底部为不透水边界。本文主要研究库内无水时膜下渗透压力，因此，整个库盆表面为不透水边界。采用一维线单元模拟管道流，通过设定集水井(节点)水位模拟排水效果。

3.2 材料渗透系数

根据本工程地勘资料，筑坝材料和坝基材料渗透系数取值见表 1。库内钻孔揭露地下水类型主要为孔隙水，岩土层自上至下依次为：②-2 淤泥质黏土层、②-3 淤泥质粉细砂层、②-4/②-5 淤质黏土层、③-1 粉质黏土层。其中，表层②-2 淤泥质黏土层微透水性，为相对隔水层，平均厚度为 4.5 m，可起到一定的天然防渗铺盖作用，局部厚度较薄或缺失。②-3 淤质细砂层具中等透水性，平均厚度为 4.5 m，由于现场试验和实验室试验测定的该层土料渗透系数结果出现较大差异，现场试验测定值(k_1)为 3.2×10^{-5} cm/s，而实验室重塑样试验测定值(k_2)为 4.0×10^{-3} cm/s，考虑到该砂层真实空间分布可能存在非均质性和随机性，模拟时将 k_2 作为对比工况，对两种渗透系数工况进行因素对比研究。

表 1 坝体及坝基土层渗透系数

Tab. 1 Dam body and foundation soil permeability coefficients

筑坝材料名称	渗透系数/(cm/s)	坝基材料名称	渗透系数/(cm/s)
坝体填筑黏土	1.53×10^{-6}	人工填土层	1.0×10^{-5}
回填渣料	1.62×10^{-4}	②-2淤泥质黏土	1.0×10^{-6}
级配碎石垫层	1.0×10^{-2}	②-3淤泥质粉细砂	现场3.2×10^{-5}、实验室4.0×10^{-3}
粗砂垫层	4.0×10^{-3}	②-4淤泥质黏土	2.0×10^{-7}
连体搅拌桩	5.0×10^{-6}	③-1粉质黏土	9.0×10^{-8}

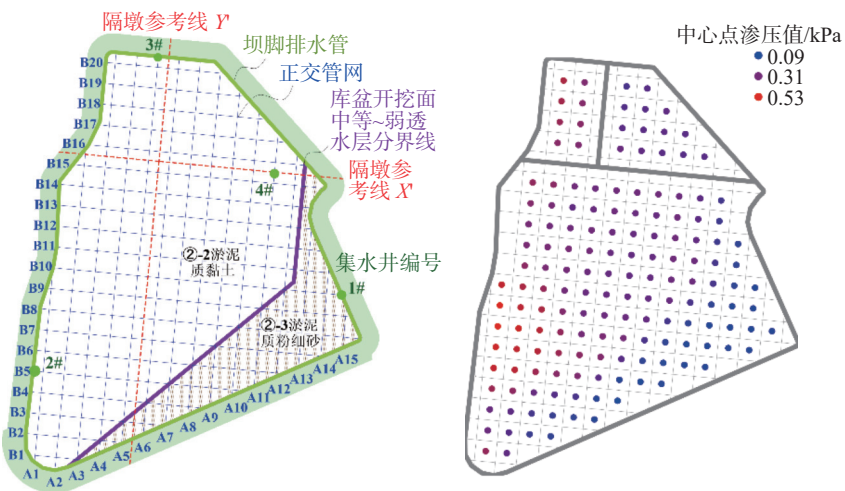
3.3 模拟工况与数据处理

库底土工膜抗浮问题重点关注库内放空检修或清淤等场景，因此，本文模拟设定为库内无水情况。模拟工况考虑的因素主要包括淤泥质粉细砂层渗透系数(K)、排水管布置(P)、集水井状态(W)、河道水位(R)，根据不同因素组合共计 15 组工况，影响因素设置及工况组合见表 3。排水管布置分为无排水管(P1)、正交管网(P2)、正交管网+坝脚排水管(P3)3 种工况，其中，无排水管工况(P1)是一种假设工况，目的是为了对比分析排水管网的排水减压效果。工况 P3 中坝脚排水管是为了解决坝脚扬压力较高问题而增加的布置方案(坝脚排水管布置见图 2)。

表 3　膜下扬压力水头最大值与集水井运行水位

Tab. 3　Maximum submerged pressure head and operating water level of collection wells

淤泥质粉细砂层渗透系数	排水管布置	河道水位/m	集水井水位−2.0 m条件下膜下扬压力水头		库内无水时推算的集水井(排水管)运行水位$H_{井}$/m
			最大值/m	出现位置	
K1: 3.2×10^{-5} cm/s	P2:正交管网	2.99	0.31	东侧直角转弯处	−1.61
		4.16	0.34	东侧直角转弯处	−1.64
		4.48	0.35	东侧直角转弯处	−1.65
K2: 4.0×10^{-3} cm/s	P3:正交管网+坝脚排水管	2.99	0.75	北侧闭合小区中心	−2.05
		4.16	0.92	北侧闭合小区中心	−2.22
		4.48	0.97	北侧闭合小区中心	−2.27



(a) 排水管布置及编号　　(b) 正交管网闭合小区中心位置及渗透压力值表征

图 2　库底排水管编号与闭合小区中心

Fig. 2　Reservoir bottom drainage pipe numbering and closed area center

表 2　影响因素及模拟工况设置

Tab. 2　Influencing factors and simulation conditions settings

工况编号	工况考虑因素			
	②-3淤泥质粉细砂层渗透系数	排水管布置	集水井状态	河道水位
K1-P1-W1-R1/2/3	k_1: 3.2×10^{-5} cm/s	P1: 无排水管	W1: 不抽水	R1: 2.99 m R2: 4.16 m R3: 4.48 m
K2-P1-W1-R1/2/3	k_2: 4.0×10^{-3} cm/s			
K1-P2-W2-R1/2/3	k_1: 3.2×10^{-5} cm/s	P2: 正交管网	W2: 抽水至−2.0 m高程	
K2-P2-W2-R1/2/3	k_2: 4.0×10^{-3} cm/s			
K2-P3-W2-R1/2/3		P3: 正交管网+坝脚排水管		

库区地下水通过排水管网汇集到集水井, 当运行期库内水位较高时, 膜上水压力大于膜下扬压力, 集水井不需要抽水。当库内放空检修或清淤时, 需要集水井抽水降低膜下扬压力, 保证土工膜抗浮稳定。对于集水井抽水工况, 集水井需要达到的抽水水位需要根据膜下扬压力来确定, 本文模拟时统一将集水井水位设定为−2.0 m(即库底防渗膜高程)的定水头边界, 找出库盆膜下渗透压力分布差异和最大值, 从而可计算

得到集水井的实际运行水位。集水井运行水位推算公式为:

$$H_{井}=H_{膜上}-H_{膜下}+H_{位置} \tag{4}$$

式中: $H_{膜上}$为膜上压力水头, 由库内水体和膜上压重两部分组成, 库内无水时, 膜上垫层与压重可承担约 0.7 m 扬压力水头; $H_{膜下}$为库底膜下最大扬压力水头; $H_{位置}$为库底位置水头, 为−2.0 m。

为了便于对渗流模拟结果进行分析说明, 将库底排水管按顺序依次编号, 其中, 纵向(南北布置)排水管 15 组(A1 ~ A15), 横向(东西布置)排水管 20 组(B1 ~ B20), 编号见图 2(a), 图中红色虚线为位置参考线, 为库内隔墩中轴线。管网将库底划分为 223 个小区, 其中近坝脚小区 54 个, 面积不等。为了对比库底排水管减压效果, 取正交管网闭合小区内几何中心位置(见图 2(b))渗透压力值进行分析, 定义中心点减压比为:

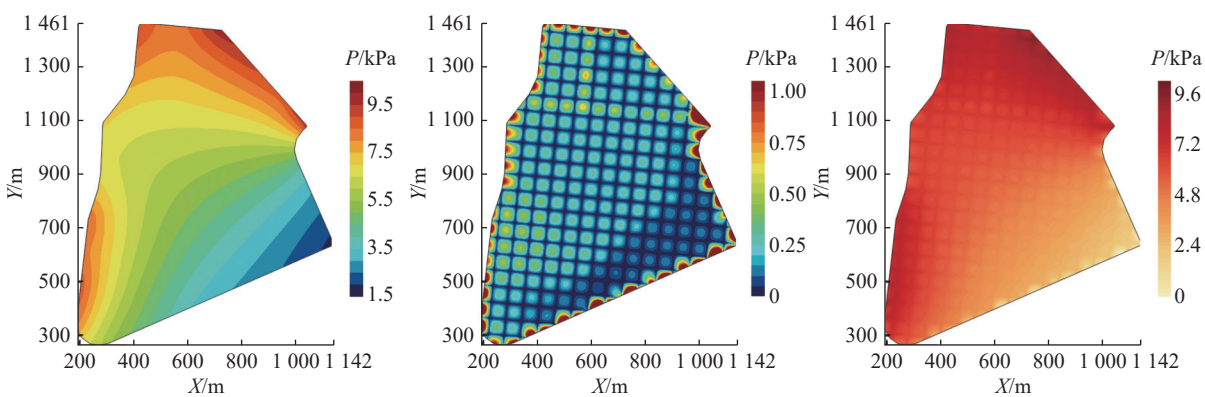
$$\beta=\frac{P_{\mathrm{i}}-P_{\mathrm{p}}}{P_{\mathrm{i}}} \tag{5}$$

式中: P_{i} 为无排水管工况中心点渗透压力值; P_{p} 为同样条件下有排水管工况中心点渗透压力值; β 为中心点减压比, β 值越大说明减压效果越好。

4 结果与分析

4.1 膜下渗透压力分布

本文以河道水位 2.99 m 工况为例进行分析, 在淤泥质粉细砂渗透系数采用现场试验测定值 k_1 条件下, 无排水管和管网排水工况膜下渗透压力分布见图 3(a)、3(b)。可见, 无排水管工况下, 膜下渗透压力为 1.5~9.8 kPa, 膜下渗透压力整体上分布规律为: 北侧和西侧局部渗透压力略高, 并向东南侧逐渐降低, 东北角渗透压力最大, 最大值为 9.8 kPa。不同河道水位工况渗透压力分布规律类似, 整体渗流场分布与河道位置密切相关。



(a) K1-P1-W1-R1 工况 (b) K1-P2-W2-R1 工况 (c) K1-P1 与 K1-P2 工况对比渗压差

图 3 河道水位 2.99 m、渗透系数 K1 条件下有无排水管工况膜下渗透压力分布

Fig. 3 Sub-membrane seepage pressure distribution with and without drainage pipes under river water level at 2.99 m and permeability coefficient K1 conditions

与无排水工况相比, 河道水位 2.99 m 条件下, 库底采用正交管网排水(集水井水位—2.0 m)后, 膜下渗透压力分布发生显著改变, 其整体分布规律为: 正交管网将整个库底分割成若干个小区, 弱透水开挖面渗透压力略高于中等透水开挖面, 坝脚区高于库内区域。弱透水区普遍渗透压力约为 0~0.6 kPa, 最大值为 1.8 kPa, 位于库区西侧 B1 ~ B2 管之间坝脚区域。中等透水区(②-3 淤泥质粉细砂层开挖面)膜下普遍渗透压力约为 0~0.15 kPa, 普遍低于弱透水区。中等透水区膜下渗透压力最大值为 3.1 kPa, 位于库区东侧 B15 ~ B16 管之间坝脚区域: 一方面, 由于该位置开挖揭露土层为中等透水区域, 且距离东侧河道较近, 库盆地下水与

外侧水道连通较紧密; 另一方面, 该位置坝轴线出现近直角转弯, 排水管布置空间受到限制, 对该区域排水造成了一定影响。图 3(c) 为有无管网工况渗透压力压差分布。可见, 采用正交管网排水后整体渗透压力显著降低, 排水减压效果明显。

进一步对管网排水工况典型小区和中心断面进行分析, 图 4 为闭合(四面排水)和不闭合(三面排水)小区内膜下地下水流向和渗透压力分布。由图 4 可见, 对于四周排水管闭合的小区, 地下水从小区中心流向四周排水管, 小区内中心渗透压力最大。对于坝脚无排水管的小区, 地下水从坝脚侧流向排水管, 坝脚中心处渗透压力最大。图 5 为典型平行相邻排水管中心线断面膜下渗透压力沿程分布曲线, 图中横坐标以隔墩参考线位置为 0 点。可见, 各中心线断面沿程渗透压力呈起伏波动状分布, 在排水管位置最低, 相邻排水管中心较大, 在两端坝脚处出现陡增。在南侧、东侧坝脚处个别断面(A11 ~ A12、B7 ~ B8、B17 ~ B18)出现先增后降现象, 这是由于该位置坝脚线倾斜布置, 与所取断面相交位置并非为坝脚线中心压力最大处。

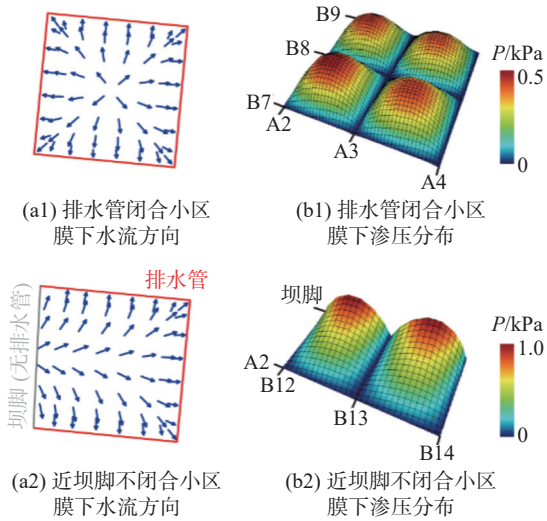


图 4　典型排水管闭合与不闭合小区

Fig. 4　Typical closed and unclosed drainage pipe zones

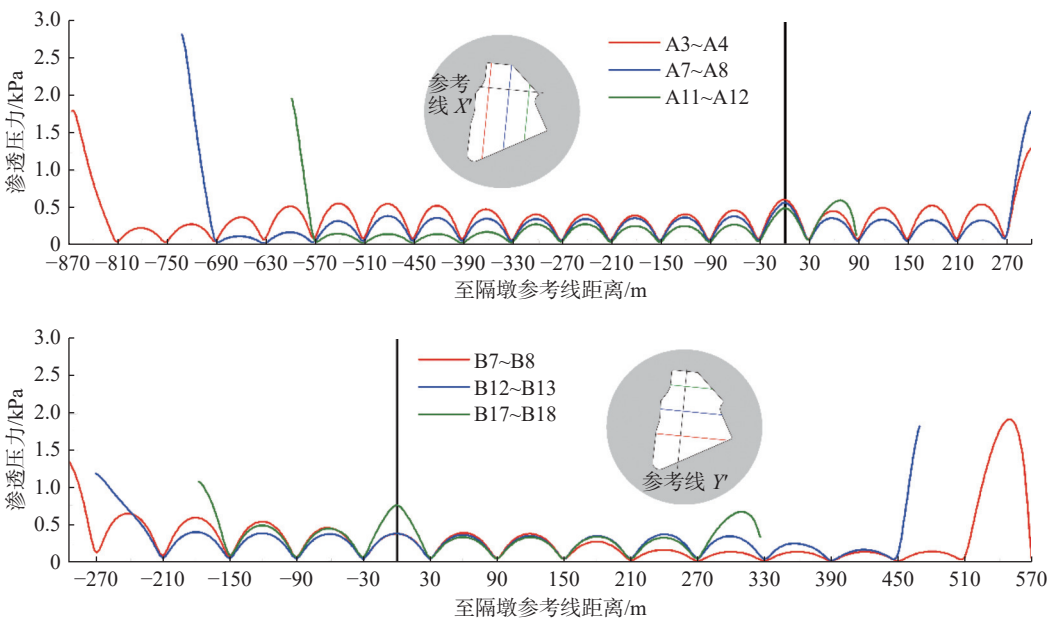
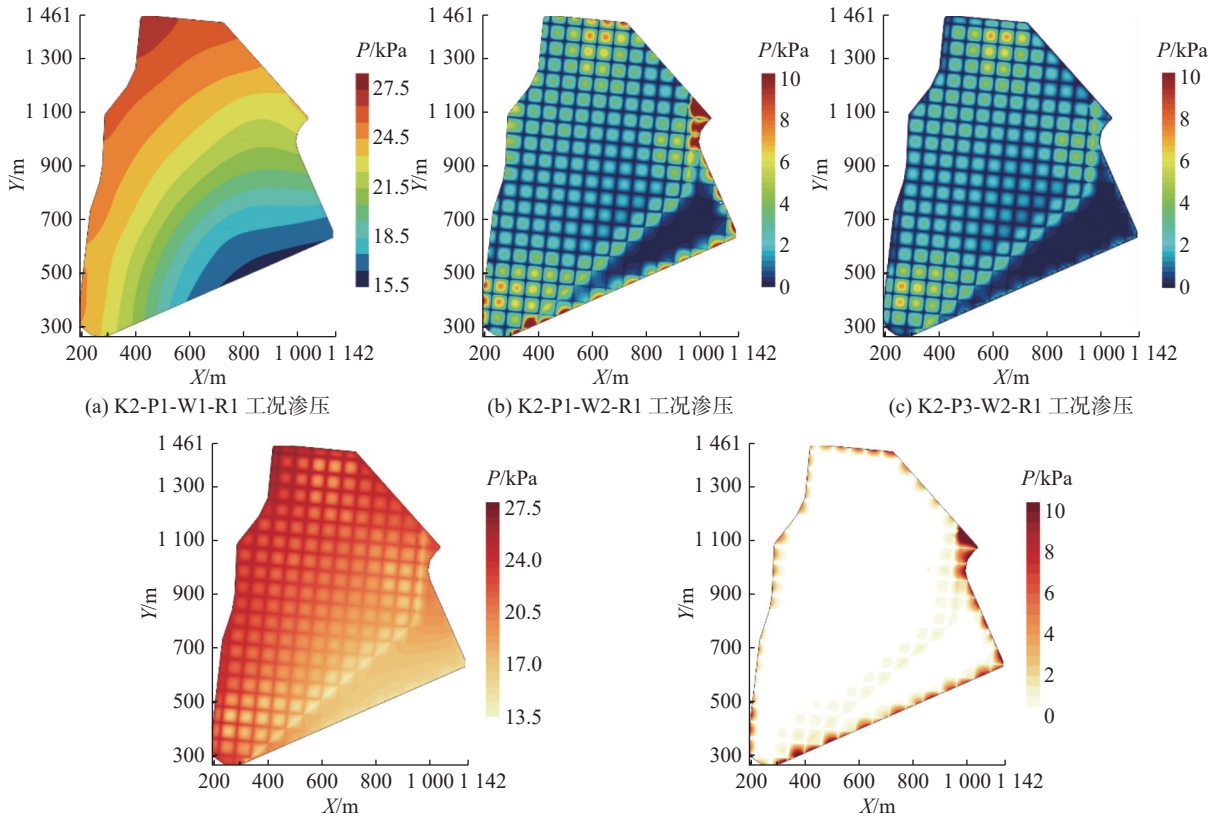


图 5　典型平行相邻排水管中心线断面膜下渗透压力沿程分布(K1-P2-W2-R1 工况)

Fig. 5　Along-profile distribution of sub-membrane seepage pressure in the centerline section of typical parallel adjacent drainage pipes (working condition: K1-P2-W2-R1)

4.2　粉细砂层渗透性的影响

淤泥质粉细砂渗透系数采用实验室测定值 k_2, 河道水位 2.99 m 条件下, 无排水管工况膜下渗透压力分布见图 6(a), 与淤泥质粉细砂渗透系数取现场试验值 k_1(K1 工况)结果相比较可见, 增大淤泥质粉细砂渗透系数对膜下渗透压力分布影响较大, 无排水管工况整体渗透压力分布呈西北向东南递减的趋势, 膜下渗透压力为 15.5~27.5 kPa, 相比于 K1 工况整体提高约 15 kPa。



(a) K2-P1-W1-R1 工况渗压 (b) K2-P1-W2-R1 工况渗压 (c) K2-P3-W2-R1 工况渗压

(d) K2-P1 与 K2-P3 工况对比整体渗压差 (e) K2-P2 与 K2-P3 工况对比坝脚渗压差

图 6 河道水位 2.99 m、渗透系数 K2 条件下各工况膜下渗透压力分布

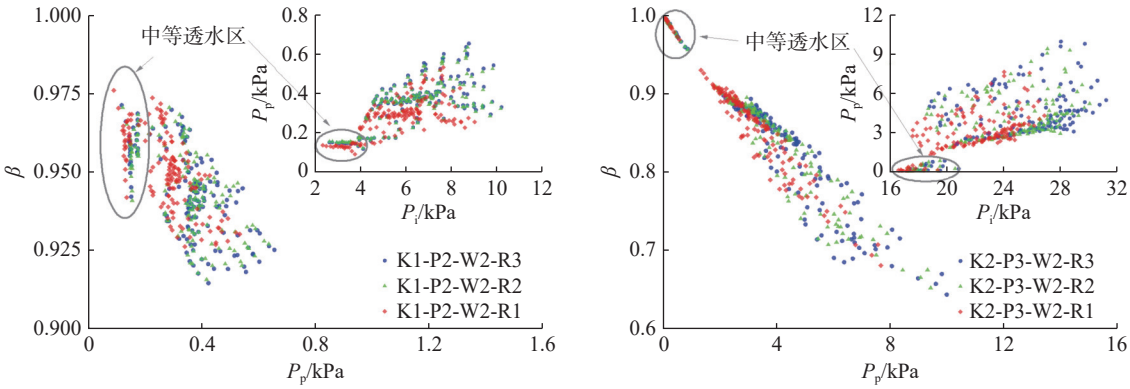
Fig. 6 Distribution of sub-membrane seepage pressure under various conditions with river water level at 2.99 m and permeability coefficient K2

淤泥质粉细砂渗透系数采用实验室测定值 k_2，河道水位 2.99 m 条件下，排水管网排水工况膜下渗透压力分布如图 6(b) 和 6(c) 所示。可见，库底仅布置正交管网排水工况膜下渗透压力值整体高于 K1 同条件工况，这说明该土层渗透性对膜下渗透压力影响较大。中等透水区膜下普遍渗透压力为 0~2 kPa，最大值为 21.2 kPa，位置同样位于库区东侧 B15 ~ B16 管之间区域。弱透水区普遍渗透压力为 0~6 kPa，最大值为 9.6 kPa。总体分布规律仍是正交管网将整个库底分割成若干个小区，弱透水开挖面渗透压力高于中等透水开挖面，但与 K1 工况对比也有所差异，K2 工况在库底北侧、东侧和西南侧出现局部高压力区。

由图 6(c) 可见，工况 K2-P3 通过在库底增设坝脚排水管后，坝脚周围膜下高渗透压力区消失。图 6(d)、图 6(e) 分别为 K2-P3 工况与 K2-P1(无排水管)工况、K2-P2(仅布置正交管网)工况渗透压力压差分布。可见，采用管网排水后整体渗透压力降低 13~27 kPa，排水减压效果明显，同时，坝脚排水管可有效降低坝脚周围渗透压力。

4.3 管网减压效果

根据前文分析可知，库底采用正交管网+坝脚排水管排水措施后，膜体抗浮稳定主要取决于闭合小区几何中心位置渗透压力大小，提取各小区中心位置(位置分布见图 2(b))有、无排水管工况膜下渗透压力数据，分别绘制 $P_p \sim P_i$ 和 $\beta \sim P_p$ 关系散点图如图 7 所示。图 7(a)、图 7(b) 中 P_p 分别为 K1-P2 工况和 K2-P3 工况小区中心位置膜下渗透压力值，P_i 分别为 K1-P1 工况和 K2-P1 工况对应位置的渗透压力值，β 为排水后对应位置的减压比。可见，无排水管工况几何中心渗透压力越大的小区，其排水后膜下渗透压力也较大，但 $P_p \sim P_i$ 数据点分布较离散。



(a) K1-P2 工况　　(b) K2-P3 工况

图 7　排水管闭合小区中心点渗透压力及减压比关系

Fig. 7　Relationship between sub-membrane seepage pressure and pressure reduction ratio at the center point of closed drainage pipe zones

减压比 β 总体上随着 P_p 的增大而减小，但由于 K1、K2 工况淤泥质粉细砂层渗透系数差别较大，两组工况的 β~P_p 分布规律存在一定差别。其中，K1-P2 工况淤泥质粉细砂层渗透系数较小，排水后小区膜下渗透压力较小，其减压比整体较大，β 值范围为 0.91~0.98。K2-P3 工况淤泥质粉细砂层渗透系数较大，排水后小区膜下渗透压力分布范围较广，β 值范围为 0.64~0.99。图 7 中椭圆形内散点为中等透水区（淤泥质粉细砂层开挖面）小区数据，K2-P3 工况中等透水区减压比 β 为 0.95~0.99，明显高于同工况弱透水区，这说明淤泥质粉细砂层渗透性更强的条件下，其开挖区膜下排水减压效果更好。

4.4　集水井运行水位

集水井水位设定为−2.0 m 条件下，采用数值模拟得到库底排水后（K1-P2 和 K2-P3 工况）膜下的扬压力水头最大值汇总于表 3，根据式（4）可推算出库内无水条件下集水井的运行水位，K1-P2 工况集水井运行水位为−1.61~−1.65 m，即当集水井水位维持在该水位以下时，在相应的河道水位条件下库底土工膜可满足抗浮稳定。

K2-P3 工况膜下扬压力水头为 K1-P2 工况的 2.4~2.8 倍，若要维持土工膜抗浮稳定，排水管水位需要达到−2.05~−2.27 m，但目前排水管的设计高程为−2.0 m，需要通过优化排水管网布置型式（如减小管网间距、降低排水管高程等），来进一步降低膜下扬压力，或增加膜上压重厚度，以保证土工膜抗浮稳定。

5　结　语

本文采用多孔介质渗流和管道流耦合的地下水流模拟方法，模拟了某全库盆土工膜防渗平原水库渗流场，对比分析了不同河道水位、排水方案、土层渗透性能等条件下的膜下渗透压力分布，评价了复杂排水管网的排水减压效果，主要结论如下：

（1）多孔介质渗流和管道流耦合的地下水流模拟方法，能够模拟复杂排水管网和库区岩土体共同作用的复合渗流场，结果可较好反映全库盆防渗土工膜膜下复杂排水管网的排水减压效果。

（2）在由正交管网分割形成的小区内，膜下渗透压力从小区中心向四周排水管逐渐降低，小区范围内得到有效减压控制，当坝脚未设排水管时，坝脚膜下渗透压力最大值为 3.1~3.5 kPa（K1 工况），高于库内区域，因此，建议采用正交管网+坝脚排水管联合的布置型式。

（3）淤泥质粉细砂层渗透性对膜下渗透压力影响较大，由于其真实空间分布可能存在非均质性和随机性，水库运行过程中应加强对膜下渗透压力的监测，并根据监测渗压调整集水井的实际运行水位。

参 考 文 献:

[1] 王殿武, 于本洋. 平原水库工程技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (WANG Dianwu, YU Benyang. Research and practice of plain reservoir engineering technology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))

[2] 李杰, 严俊, 蔡红, 等. 平原水库库区三维渗流分析方法及渗控措施研究[J]. 水力发电, 2016, 42(2): 33-37. (LI Jie, YAN Jun, CAI Hong, et al. Researches on three dimensional seepage analysis method and seepage control measures for plain reservoir[J]. Water Power, 2016, 42(2): 33-37. (in Chinese))

[3] 何庆海, 周荣星, 金瑞清, 等. 山东省平原水库的典型生态环境问题及对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(10): 53-54,58. (HE Qinghai, ZHOU Rongxing, JIN Ruiqing, et al. Typical eco-environmental problems and countermeasures of plain reservoirs in Shandong province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(10): 53-54,58. (in Chinese))

[4] 毛海涛, 樊哲超, 何华祥, 等. 干旱、半干旱区平原水库对坝后盐渍化的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 74-79. (MAO Haitao, FAN Zhechao, HE Huaxiang, et al. On the effects of reservoirs in plain area to soil salinization in arid and semi-arid area[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 74-79. (in Chinese))

[5] 李晓丽, 付庆旭, 王文杰. 平原水库库底铺塑排气(水)措施探讨[J]. 水利技术监督, 2021(8): 175-178. (LI Xiaoli, FU Qingxu, WANG Wenjie. Discussion on exhaust (water) measures of plastic paving at the bottom of plain reservoir[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(8): 175-178. (in Chinese))

[6] 顾淦臣. 土工膜用于水库防渗工程的经验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 34-38,48. (GU Ganchen. Experience of applying geomembrane in reservoir seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 34-38,48. (in Chinese))

[7] 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))

[8] 陈国良, 罗书靖, 唐杰. 抽水蓄能电站全库盆土工膜防渗设计研究[J]. 大坝与安全, 2019(6): 17-21. (CHEN Guoliang, LUO Shujing, TANG Jie. Research on reservoir basin surface anti-seepage design with geomembrane[J]. Dam & Safety, 2019(6): 17-21. (in Chinese))

[9] 路强. 土石坝全库盘土工膜防渗技术探讨[J]. 水利规划与设计, 2017(7): 130-132,136. (LU Qiang. Discussion on geomembrane seepage prevention technology of whole reservoir basin of rockfill dam[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(7): 130-132,136. (in Chinese))

[10] TOUZE-FOLTZ N, BANNOUR H, BARRAL C, et al. A review of the performance of geosynthetics for environmental protection[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(5): 656-672.

[11] 袁俊平, 曹雪山, 和桂玲, 等. 平原水库防渗膜下气胀现象产生机制现场试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 67-73. (YUAN Junping, CAO Xueshan, HE Guiling, et al. Field test study of mechanism of bulge phenomenon under geomembrane in plain reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 67-73. (in Chinese))

[12] 沈振中, 江沆, 沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1091-1095. (SHEN Zhenzhong, JIANG Hang, SHEN Changsong. Numerical simulation of composite geomembrane defect leakage experiment based on saturated-unsaturated seepage theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1091-1095. (in Chinese))

[13] 姜海波, 侍克斌, 李玉建. 库盘大面积土工膜防渗体的渗漏估算[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 58-61. (JIANG Haibo, SHI Kebin, LI Yujian. Leakage analysis of leakproof geomembrane for large area of reservoir basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 58-61. (in Chinese))

[14] WANG L J, LIU S H, SHEN C M, et al. Laboratory test and modelling of gas pressure under geomembrane subjected to the rise of groundwater in plain reservoirs[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1): 81-96.

[15] 岑威钧, 温朗昇, 和浩楠. 水库工程防渗土工膜的强度、渗漏与稳定若干关键问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(6): 1183-1192. (CEN Weijun, WEN Langsheng, HE Haonan. Strength, leakage and stability problems of impermeable geomembrane for reservior project[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(6): 1183-1192. (in Chinese))

[16] 刘正国, 单冬敏. 土工膜防渗设计中的排水减压措施及计算方法[J]. 人民黄河, 2005, 27(8): 51-52. (LIU Zhengguo, SHAN

Dongmin. Drainage and pressure reducing measures and calculation method in geomembrane anti seepage design[J]. Yellow River, 2005, 27(8): 51-52. (in Chinese))

[17] 李传奇, 李超超, 王帅, 等. 平原水库土工膜防渗特性分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(4): 135-139. (LI Chuanqi, LI Chaochao, WANG Shuai, et al. Anti-seepage performance of geomembrane used in plain reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(4): 135-139. (in Chinese))

[18] 甘磊, 刘静楠, 谭海劲, 等. 土工膜防渗低水头平原水库渗流场及膜体稳定性[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 45-50. (GAN Lei, LIU Jingnan, TAN Haijin, et al. Seepage field and membrane stability of a low-head plain reservoir with geomembrane anti-seepage measures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 45-50. (in Chinese))

[19] 王琳, 严新军, 毛海涛, 等. 防-截-排系统对平原水库坝后地下水位的影响[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 49-56. (WANG Lin, YAN Xinjun, MAO Haitao, et al. Effect of anti-seepage-water interception-drainage system on groundwater level behind dam of plain reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 49-56. (in Chinese))

[20] 周建芬, 王玉强, 何晓锋. 大屯水库区域渗流场的三维动态分析[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2007, 19(4): 12-15. (ZHOU Jianfen, WANG Yuqiang, HE Xiaofeng. 3D dynamic analysis on seepage of Datun reservoir[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2007, 19(4): 12-15. (in Chinese))

[21] 陈崇希, 胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质, 2008(3): 70-75. (CHEN Chongxi, HU Litang. A review of the seepage-pipe coupling model and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(3): 70-75. (in Chinese))

Analysis of sub-membrane drainage and pressure reduction in full-reservoir geomembrane systems in plain river network areas

LU Bin[1, 2], TAN Haijin[3], ZHANG Baosen[1], HE Miaomiao[4], ZHANG Yu[2], XIE Xinghua[2]

(1. *Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention*, *Ministry of Water Resources*, *Zhengzhou* 450003, *China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*; 3. *Guangdong Hydropower Planning and Design Institute*, *Guangzhou* 510635, *China*; 4. *Water Conservancy Bureau of Wuzhong District*, *Suzhou* 215200, *China*)

Abstract: In plain river network areas, there is a close connection between groundwater and river channels. When constructing reservoirs in areas with poor geological conditions or where pollution isolation is required, a full-reservoir geomembrane anti-seepage scheme is often used. To ensure the geomembrane's buoyancy stability and prevent air inflation issues, a drainage network is installed under the membrane for drainage and pressure reduction. Relying on a full-reservoir geomembrane anti-seepage plain reservoir in a water diversion project, a groundwater flow simulation method that couples porous media seepage and pipeline flow was adopted to simulate the composite seepage field involving the interaction between the complex drainage network and the reservoir's geotechnical body. By comparing the seepage pressure distribution under different drainage schemes and soil permeability conditions, it is shown that within the closed areas of the orthogonal drainage network, the sub-membrane seepage pressure gradually decreases from the center of the area to the surrounding drainage pipes, indicating significant pressure reduction within the closed areas. The sub-membrane seepage pressure at the dam foot is significantly higher than within the reservoir area, necessitating the addition of drainage pipes at the dam foot. The permeability of the silty fine sand layer greatly affects the sub-membrane seepage pressure, and the sub-membrane seepage pressure should be closely monitored during low water level operations. The study results can provide a reference for the seepage control design and safe operation of full-reservoir geomembrane anti-seepage reservoirs in plain river network areas.

Key words: plain reservoir; geomembrane; full-reservoir anti-seepage; seepage pressure; drainage pressure reduction