

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2022.04.008

土工膜防渗低水头平原水库渗流场及膜体稳定性

甘磊¹, 刘静楠^{1,2}, 谭海劲³, 谢兴华², 卢斌²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029;
3. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 针对平原水库土工膜稳定及渗漏等问题, 结合珠江三角洲某土工膜防渗平原水库实际工程, 建立渗流有限元模型, 模拟施工和运行过程中土工膜破损和缺陷情况, 分析土工膜缺陷对库底土工膜膜体稳定性和渗漏量的影响。结果表明: 平原水库库内未储水时, 土工膜缺陷对平原水库渗流场和库底土工膜稳定性的影响甚微; 当库内及外江水位均处于高水位时, 缺陷处膜下压力水头最大, 但土工膜仍可维持稳定; 当土工膜缺陷距离排水盲管 30 m, 且缺陷孔径为 0.5 ~ 3.0 cm 时, 孔径变化对缺陷处渗漏量的影响较小, 但缺陷数量和位置对缺陷处总渗漏量影响显著。

关键词: 平原水库; 土工膜; 缺陷; 渗流场

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2022)04-0045-06

Seepage field and membrane stability of a low-head plain reservoir with geomembrane anti-seepage measures// GAN Lei¹, LIU Jingnan^{1,2}, TAN Haijin³, XIE Xinghua², LU Bin² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

Abstract: Aiming at the prominent problems of stability and leakage of geomembrane in plain reservoirs, a seepage finite element model was established in combination with a practical project of a plain reservoir with geomembrane in the Pearl River Delta. The damage and defects of geomembrane during construction and operation were simulated to analyze the influence of geomembrane defects on the seepage stability and leakage at the bottom of the reservoir. The results show that when there is no water in the plain reservoir, the geomembrane defects have little influence on the seepage field and the stability of the geomembrane at the bottom of the plain reservoir. When the water level inside the reservoir or in the outside river is in a high level, the pressure head under the defect membrane is the highest, but the geomembrane can still be stable. When the geomembrane defect is 30 m away from the blind drainage pipe and the diameter of the defect hole is 0.5 to 3.0 cm, the diameter variation of the defect hole has little effect on the leakage. However, the number and location of defects have a significant influence on the total leakage.

Key words: plain reservoir; geomembrane; defects; seepage field

土工膜是一种厚度薄、拉伸性能好、防渗性能优的土工合成材料, 在平原水库工程中被广泛采用^[1], 因此其膜体稳定性判别和渗漏量计算被众多学者所关注^[2]。研究表明土工膜理论服役年限可达 100 a 以上^[3], 但土工膜在施工和运行过程中不可避免会存在破损和缺陷。岑威钧等^[4]指出引起土工膜出现缺陷的主要因素包括膜上荷载、垫层颗粒形状和凸起程度。Nosko 等^[5]用损伤检测系统对 325 万 m² 土工膜防水层进行缺陷检测, 表明土工膜缺陷尺寸基本在 0.2 ~ 13.0 cm² 之间, 其中 0.5 ~

10.0 cm² 大小的缺陷占总缺陷的 85.8%。Giroud 等^[6-8]建议按照每 4000 m² 出现 1 个缺陷的分布概率进行土工膜渗漏量估算。Barroso 等^[9]发现缺陷渗漏量随水头增大而增大, 且小尺度试验得到的渗漏量大于大、中型尺度试验结果。Giroud^[10]研究了缺陷形态对渗漏量的影响, 并给出形式简单的经验公式。Touze-Foltz 等^[11-13]和 Giroud 等^[14]结合不同形态缺陷的经验公式, 分别推导出有限长度下的缺陷渗漏量计算公式。刘健等^[15]结合大屯水库工程, 指出缺陷数量和水头高度是土工膜缺陷渗漏量的主要

基金项目: 国家自然科学基金(51609073); 江苏省自然科学基金(BK20201312); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心项目(DFZX2020003); 广东省水利科技创新项目(2020-04)

作者信息: 甘磊(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程渗流分析研究。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

影响因素。刘英杰等^[6]对不同类型的土工膜进行研究,指出单层土工膜受缺陷尺寸的影响比复合土工膜显著,复合土工膜的防渗效果更好。

本文依托珠江三角洲某土工膜防渗平原水库,建立施工和运行过程水库渗流有限元模型,研究土工膜缺陷尺寸、数量和位置对膜体稳定性和渗漏量的影响,研究成果对类似工程具有参考意义。

1 计算原理

1.1 渗流理论

本文渗流分析基本微分方程^[17]如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] - f = [C(h_c) + \beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中: x_i 为*i*方向的坐标($i=1,2,3$); k_{ij}^s 为饱和渗透系数; $k_r(h_c)$ 为压力水头 h_c 时的相对透水率; k_{i3}^s 为 $j=3$ 时的饱和渗透系数; f 为源汇项; C 为容水度; β 为饱和-非饱和选择常数; S_s 为单位贮存量; t 为时间。

渗流微分控制方程的初始条件和边界条件如下:

$$h_c(x_i, 0) = h_{c1}(x_i, t_0) \quad (2)$$

$$h_c(x_i, t) |_{\Gamma_1} = h_{c1}(x_i, t) \quad (3)$$

$$- [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c)] n_i |_{\Gamma_2} = q_n \quad (4)$$

$$- [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c)] n_i |_{\Gamma_3} \geq 0$$

且 $h_c |_{\Gamma_3} = 0 \quad (5)$

$$- [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c)] n_i |_{\Gamma_4} = q_\theta$$

且 $h_c |_{\Gamma_4} < 0 \quad (6)$

式中: $h_{c1}(x_i, t_0)$ 为 x_i 点处初始时刻 t_0 时的已知压力水头; $h_{c1}(x_i, t)$ 为 x_i 点处 t 时刻的已知压力水头; Γ_1 为已知水头边界; Γ_2 为已知流量边界; Γ_3 为饱和逸出面边界; Γ_4 为非饱和逸出面边界; n_i 为边界面外法线方向余弦; q_n 为已知流量; q_θ 为降雨入渗流量。

1.2 库底膜体稳定分析

对库底土工膜防渗结构进行力学平衡分析时,要确保土工膜处于稳定状态,应使其膜体作用力合力为零。一般平原水库库盆土工膜受到的外力包括库区储水施加的膜上库水压力、土工膜上混凝土铺盖或保护层的压重、膜下地下水的顶托力、膜下气体的顶托力和膜下土壤的支持力。若土工膜的受力处于平衡状态,则有

$$F_1 + F_2 = F_3 + F_4 + F_5 \quad (7)$$

式中: F_1 为膜上库水压力; F_2 为膜上混凝土铺盖或

保护层的压重; F_3 为膜下地下水的顶托力; F_4 为膜下气体的顶托力; F_5 为膜下土壤的支持力。

当库内水位较高,膜上库水压力远大于膜下地下水顶托力及气体顶托力时,土工膜下地层的支持力可以平衡多余压力,维持土工膜的稳定。而当库内水位较低时,库水压力也较小,膜上压力可能小于膜下地下水及土层中气体对膜的顶托力,从而使式(7)不成立,导致库底土工膜不稳定。由于地层土壤承担的支持力大于或等于零,且能适应其他力的变化而变化,故等式(7)可转化为以下不等式:

$$F_1 + F_2 \geq F_3 + F_4 \quad (8)$$

由于该工程坝基土多为黏性土,含气量较少,且难以运移、聚集;此外,库底土壤没有能够自主产生气体的条件,在渗流作用下纵使气体集结于膜下,但因总量较少,难以形成较大的膜下压力,此时可忽略膜下气体的顶托力。为了便于测量,将上述力等效为压力水头,则有下式:

$$H_1 + H_2 \geq H_3 \quad (9)$$

式中: H_1 为膜上库水压力水头; H_2 为膜上混凝土铺盖或保护层压重对应的压力水头; H_3 为膜下地下水的压力水头。当满足式(9)时,可认为库底土工膜稳定性满足要求。

2 工程实例

2.1 工程概况

某新建水库为平原水库,位于广东省珠江三角洲地区,呈三角地块,水库东、西两侧均为河道。工程等别为I等,水库设计、校核洪水标准分别为100 a和300 a一遇,建筑物级别为1级。水库为注入式水库,正常蓄水位为4.20 m,设计水位为4.30 m,死水位为-1.00 m。水库采用悬挂式垂直防渗墙和全库底铺设土工膜联合防渗形式。水库库底从下至上依次布置碎石(厚300 mm)、长丝土工布(规格200 g/m²)、土工膜(厚0.5 mm的PE膜)、长丝土工布(规格200 g/m²)、中粗砂(厚100 mm)及C25混凝土(厚200 mm)。本文重点研究不同土工膜缺陷工况下库底土工膜的稳定性和缺陷处的渗漏量。

2.2 计算模型

截取该平原水库典型断面(图1),以坝脚为原点, X 轴以库内方向为负,以外江方向为正, Y 轴以垂直向上为正,建立渗流计算模型。模型范围选取如下:库区内截取200 m,库区外截取至外江河道中心线处(距离库内坝脚120 m),模型底边界截取至相对不透水层(高程-20 m)。库内边坡在平台之上坡比为1:3,在平台之下坡比为1:4;背水坡坡比为1:3。在库底和围坝库内边坡铺设复合土工膜,

表1 各分区材料渗透系数

分类	材料名称	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
坝体材料	坝体填筑黏土	1.53×10^{-6}
	回填渣料	1.62×10^{-4}
	碎石垫层	1.0×10^{-2}
	连体搅拌桩	5.0×10^{-6}
	中粗砂垫层	4.0×10^{-3}
	混凝土结构	1.0×10^{-8}
坝基材料	①人工填土	1.0×10^{-6}
	②-2 淤泥、淤泥质黏土	1.0×10^{-6}
	②-3 含淤泥质粉细砂、细砂	3.2×10^{-5}
	②-4 淤泥、淤泥质黏土	2.0×10^{-7}
	③-1 黏土、粉质黏土	9.0×10^{-8}

土工膜采用实体单元,厚度放大 100 倍,即按 0.05 m 厚度建模,渗透系数根据等效变换理论按 10^{-9} cm/s 进行计算。将土工膜缺陷作为强透水介质单元进行模拟,厚度扩大 100 倍,缺陷处单元等效渗透系数参考李昱莹^[18]室内试验结果,取 0.5 cm/s 。计算模型网格如图 2 所示,模型节点和单元总数分别为 53 079 和 52 336。计算模型中已知水位以下库内底坡、边坡和库外江边坡为已知水头边界,各计算工况水位以上的部分为出渗边界,模型左右截断和底部边界为不透水边界。

2.3 计算工况

库底土工膜下从坝脚处开始每隔 60 m 铺设排水盲管,在距离坝脚 30 m 库盆土工膜上设置 1 处缺陷点,缺陷孔径设定为 0.5 cm,作为基准计算工况。为分析缺陷孔径变化的影响,设计第 1 组工况,即在基准方案上补充假定土工膜缺陷孔径分别为 1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm 和 3.0 cm。为研究缺陷数量对缺陷渗漏量的影响,设计第 2 组工况,假定缺陷孔径均为 0.5 cm,分别在研究区域布置 1 个、2 个、3 个和 4 个缺陷,缺陷距坝脚距离分别为 30 m、20 m、40 m、15 m、30 m、45 m 和 12 m、24 m、36 m、48 m。考虑缺陷位置的影响,设计第 3 组工况,假定缺陷孔径为 0.5 cm,将缺陷位置分别设置为距离坝脚 1 m、2 m、3 m、5 m、10 m、20 m、30 m、40 m、50 m、55 m、57 m、58 m 和 59 m。

该水库坝体及坝基材料计算参数由地质勘查单位提供^[17],见表 1。

3 土工膜缺陷对膜体稳定性影响分析

3.1 缺陷对水平防渗体稳定性的总体影响

完建期库区内未储水情况下,坝体垂直防渗体成功地阻隔了外江水的侵入,即使土工膜存在缺陷,库底土壤中水分仍不会透过缺陷进入库内,土工膜

缺陷不会引起库内外水体流通,库底土壤中重金属污染物不会随地下水通过库底防渗膜缺陷渗入库内。当库内坝脚 30 m 处存在 1 处孔径为 0.5 cm 的土工膜缺陷时,其断面总水头分布情况与库底土工膜完好时变化不大。

运行期库底土工膜下压力水头分布如图 3 所示。由图 3 可知,运行期库内储水时,距离库内坝脚 30 m 处孔径为 0.5 cm 的土工膜缺陷对膜下土层中总水头分布影响较大,相比土工膜完好情况,缺陷处膜下压力水头值陡增,从 0.1 m 左右增至 6.2 m。此时库内水位为 4.2 m,库内水作用在土工膜上的压力水头为 5.9 m,加上厚度 0.5 m 的混凝土层提供的压力水头,作用在土工膜上总压力水头为 6.4 m,大于膜下最大压力水头,故土工膜不会因下部土层中孔隙水顶托作用失稳。运行期由于膜上库内压力水头大于膜下土层中孔隙水提供的压力水头,库水通过土工膜缺陷渗漏到库底土层中,单个缺陷处渗漏量为 $0.26 \text{ m}^3/\text{d}$,不会致使库底土层中重金属物质流入库区水源中。

3.2 缺陷孔径的影响

运行期正常蓄水位时不同缺陷孔径工况下库底

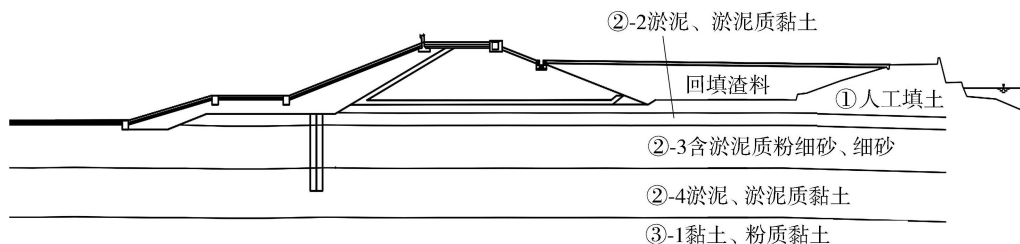


图1 典型横断面 0+000.00 剖面

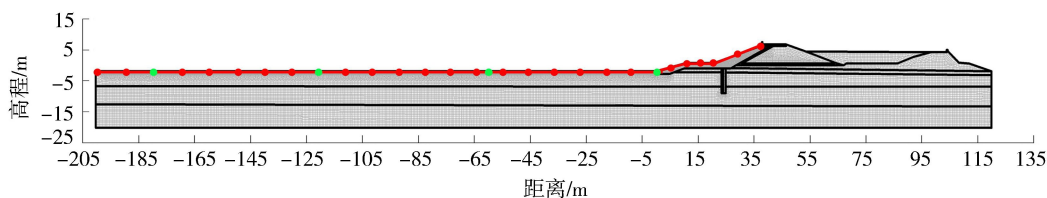


图2 典型横断面计算模型网格

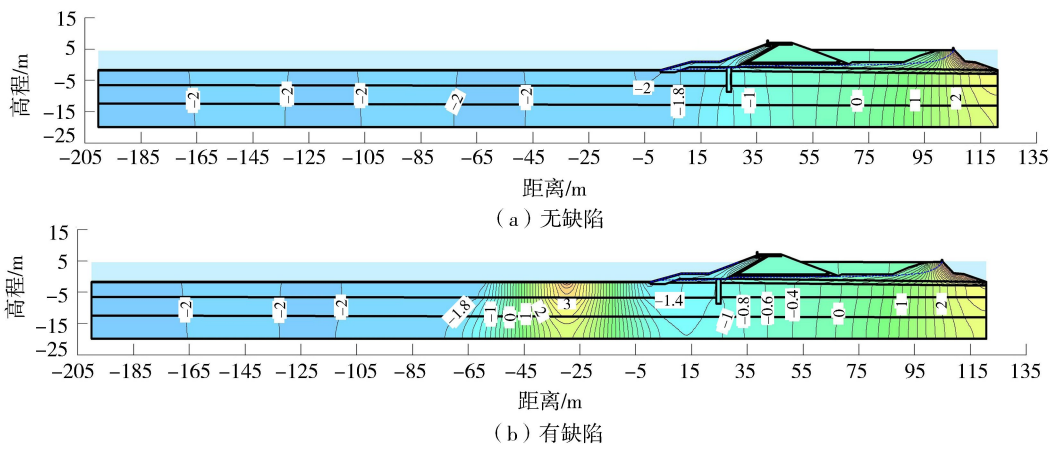


图3 运行期典型工况土工膜下压力水头分布

土工膜下表面压力水头如图4所示。由图4可知,缺陷孔径对膜下压力水头分布几乎没有影响,各种缺陷孔径下土工膜膜下压力水头分布相同,膜体能够满足稳定要求。图5为运行期不同土工膜缺陷孔径工况下缺陷处的渗流量。由图5可知,当土工膜缺陷孔径为0.5~3.0 cm时,缺陷孔径越大,缺陷处的渗流量越大。当缺陷孔径增至3.0 cm时,其缺陷处渗流量为0.260 m³/d,比缺陷孔径0.5 cm时增大了1.5%,增幅较小,这说明土工膜缺陷孔径为0.5~3.0 cm时,缺陷孔径变化对缺陷处的渗流量影响较小。

3.3 缺陷数量的影响

图6为运行期不同缺陷数量时库底土工膜总水头

头分布。由图6可知,土工膜缺陷数量越多,对库底土层中总水头分布影响越大。当距坝脚60 m范围内仅有1个缺陷时,膜下总水头大于4 m的范围有20 m;当有4个缺陷时,膜下总水头大于4 m的范围有44 m。随着缺陷数量的增加,除了排水盲管影响区域,其他区域土层的膜下总水头增大,且膜下总水头大于4 m的范围增大。总体来看,缺陷数量对膜下最大压力水头的影响很小,最大值为6.25 m,此时土工膜膜体稳定性满足要求。

运行期不同缺陷数量时库底土工膜缺陷处的渗流量如表2所示。从表2可知,缺陷数量小于或等于2时,单个缺陷处的渗流量相差不大,缺陷数量大于2时,处于中间位置的缺陷处渗流量明显较小,而

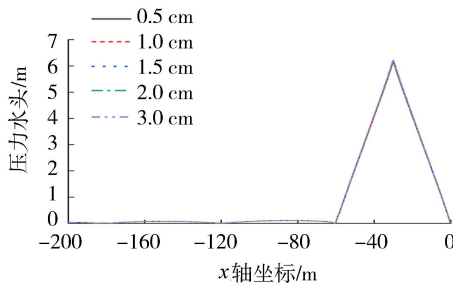


图4 不同缺陷孔径工况下库底土工膜下表面压力水头

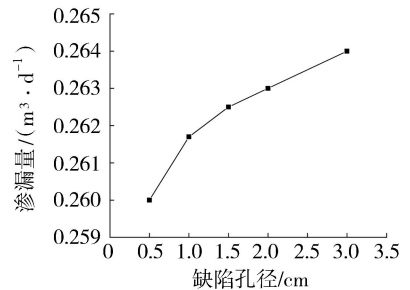


图5 不同缺陷孔径工况下缺陷处渗流量

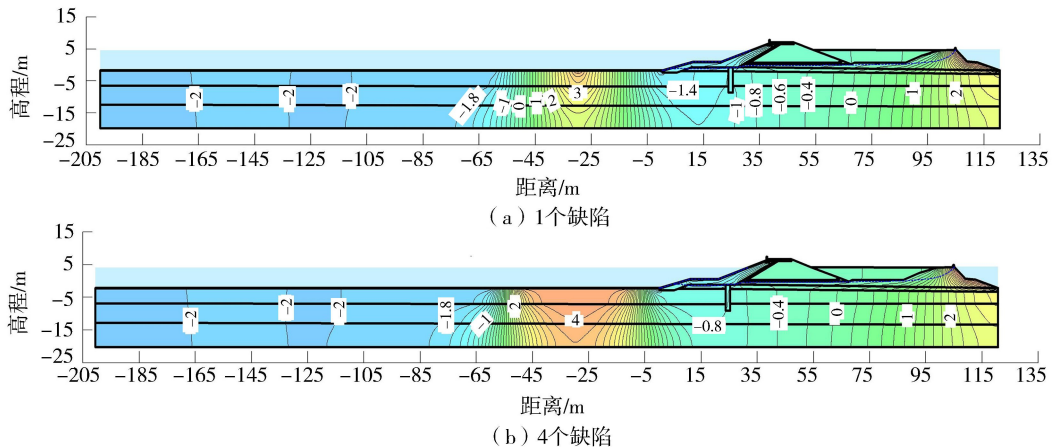


图6 运行期不同缺陷数量时库底土工膜总水头分布

两侧缺陷处渗漏量相对较大。因此,当发生多处渗漏时,应重点关注靠近排水盲管边缘处的缺陷。此外,缺陷数量越多,缺陷处引起的渗漏量越大,两者几乎呈线性关系。4个缺陷工况下缺陷总渗漏量为 $0.64\text{ m}^3/\text{d}$,较单个缺陷工况增大1.46倍,说明缺陷数量对缺陷处总渗漏量影响较大。

表2 不同缺陷数量时库底土工膜缺陷处的渗漏量

缺陷数量/个	单个缺陷渗漏量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	总渗漏量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	0.26	0.26
2	0.20, 0.20	0.40
3	0.25, 0.01, 0.25	0.51
4	0.31, 0.01, 0.01, 0.31	0.64

3.4 缺陷位置的影响

图7为运行期不同缺陷位置时库底土工膜总水头分布,图中 L 为缺陷与坝脚的距离。由图7可知,假定土工膜缺陷发生在距离坝脚60m范围内的不同位置,在距坝脚0~60m范围内压力水头值较大。库底土层中总水头分布存在一定规律,该规律与缺陷和坝脚距离的相关性不明显,但与缺陷和排水盲管的距离相关性较大。缺陷与排水盲管的距离越近,库底总水头较高的区域越小。当缺陷距离坝脚超过50m之后,会对距离坝脚120m处的排水盲管附近总水头分布产生影响,总水头小于 -2 m 的区域范围变小,总水头整体有升高的趋势。当缺陷距离排水盲管大于10m时,膜下压力水头最大值无明显变化;当缺陷距离排水盲管小于10m时,距离排水盲管越近,膜下压力水头最大值越小。总体来看,土工膜膜体稳定性满足要求。

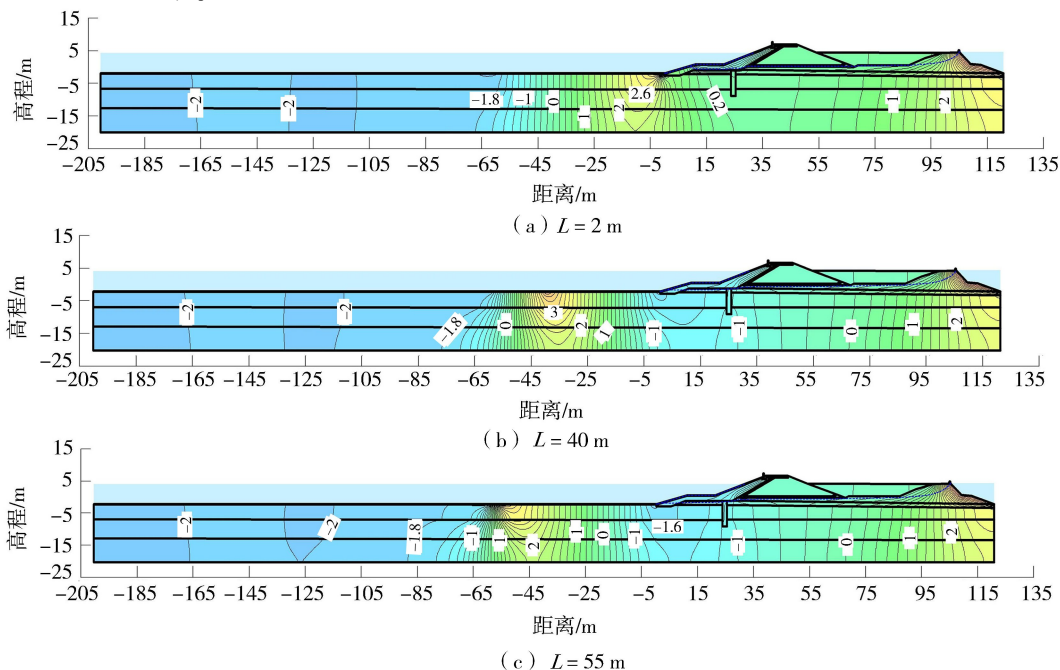


图7 运行期不同缺陷位置时库底土工膜总水头分布

图8为运行期不同缺陷位置工况下库底土工膜各缺陷处渗漏量。由图8可知,缺陷距离排水盲管越远,缺陷处渗漏量越小。缺陷在距离库内坝脚30m时渗漏量为 $0.26\text{ m}^3/\text{d}$,距离库内坝脚40m处渗漏量为 $0.29\text{ m}^3/\text{d}$,即向排水盲管靠近10m,渗漏量增加 $0.03\text{ m}^3/\text{d}$;缺陷在 -50 m 处时渗漏量为 $0.45\text{ m}^3/\text{d}$,缺陷在 -59 m 处渗漏量为 $3.10\text{ m}^3/\text{d}$,即向排水盲管靠近9m,渗漏量增加 $2.65\text{ m}^3/\text{d}$ 。说明随着缺陷与排水盲管距离的减小,缺陷处渗漏量显著增大,缺陷位置对渗漏量影响较大。

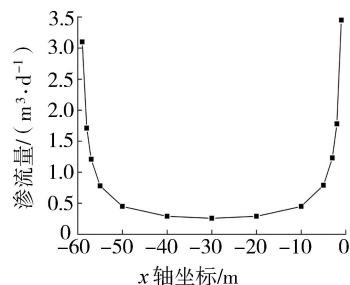


图8 运行期不同缺陷位置工况下库底土工膜缺陷处渗漏量

4 结论

- 平原水库完建期库内无储水时,由于垂直防渗体能截挡外江水位入渗以及膜下排水盲管能降低地下水压力,因此无论是否有缺陷,均不会影响库底土工膜稳定性,且缺陷尺寸、数量及位置对土工膜下表面压力水头的影响均较小;完建期土工膜缺陷处不发生流量交换,地下水不会从缺陷处渗出。
- 运行期库内及外江水位均处高水位时,缺陷

处膜地下水压力最高,但土工膜稳定性仍满足要求,土工膜不会被顶托浮起。缺陷处会发生渗漏,膜上库区水源通过土工膜缺陷渗漏到库底土层中。

c. 当土工膜缺陷距离排水盲管 30 m,且缺陷孔径为 0.5 ~ 3.0 cm 时,孔径变化对缺陷处渗漏量的影响较小;缺陷数量越多,缺陷处总渗漏量越大,缺陷数量和总渗漏量近似呈线性关系;随着缺陷与排水盲管距离的减小,缺陷处渗漏量显著增大,缺陷位置对渗漏量影响较大。

参考文献:

[1] 岑威钧,王蒙,杨志祥. (复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3): 6-9. (CEN Weijun, WANG Meng, YANG Zhixiang. Partial saturated seepage properties of (composite) geomembrane earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3): 6-9. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1): 36-44. (CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng. Research progress on defect property and defect-induced leakage of impermeable geomembrane[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(1): 36-44. (in Chinese))

[4] 岑威钧,和浩楠,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3): 61-65,71. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(3): 61-65,71. (in Chinese))

[5] NOSKO V,TOUZE-FOLTZ N. Geomembrane liner failure: modeling of its influence on contaminant transfer [C]// Proceedings of the 2nd Eurogeo Geosynthetics Conference. Bologna: [s. n.],2000: 557-560.

[6] GIROUD J P,BADU-TWENEBOAH K,BONAPARTE R. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects[J]. Geotextiles and Geomembranes,1992,11(1): 1-28.

[7] 岑威钧,都旭煌,耿利彦,等. 随机多缺陷条件下土工膜防渗土石坝渗漏特性[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3): 60-65. (CEN Weijun, DU Xuhuang, GENG Liyan, et al. Seepage properties of geomembrane faced earth-rock dams under random multiple defects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38

(3): 60-65. (in Chinese))

[8] 岑威钧,耿利彦,和浩楠. 防渗土工膜缺陷探测方法述评[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1): 43-51. (CEN Weijun, GENG Liyan, HE Haonan. Review of the defect detecting method of geomembrane for the seepage control [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1): 43-51. (in Chinese))

[9] BARROSO M,TOUZE-FOLTZ N,MAUBEUGE K, et al. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner [J]. Geotextiles and Geomembranes,2006,24(3): 139-155.

[10] GIROUD J P. Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects [J]. Geosynthetics International,1997,4(3/4): 335-348.

[11] TOUZE-FOLTZ N,GIROUD J P. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane [J]. Geosynthetics International,2005,12(4): 205-207.

[12] TOUZE-FOLTZ N,GIROUD J P. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects [J]. Geosynthetics International,2003,10(6): 215-233.

[13] TOUZE-FOLTZ N,BARROSO M. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through GCL geomembrane composite liners [J]. Geosynthetics International,2006,13(2): 73-82.

[14] GIROUD J P, KHIRE M V, MCKELVEY J A. Rate of leachate migration through a defect in a geomembrane underlain by a saturated permeable medium [J]. Geosynthetics International,1997,4(3/4): 323-334.

[15] 刘健,邵燕妮,李昱莹,等. 平原水库复合土工膜缺陷渗漏影响因素数值分析[J]. 水力发电,2019,45(10): 49-52. (LIU Jian, SHAO Yanni, LI Yuying, et al. Numerical analysis of factors affecting the leakage of composite geomembrane defects in plain reservoir [J]. Water Power,2019,45(10): 49-52. (in Chinese))

[16] 刘英杰,韩秀娟,匡永慧,等. 大红泉水库坝体土工膜防渗层方案比选与渗漏计算[J]. 水利规划与设计,2019(2): 116-118. (LIU Yingjie, HAN Xiujuan, SHE Yonghui, et al. Scheme comparison and leakage calculation of geomembrane impervious layer of Dahongquan reservoir dam [J]. Water Resources Planning and Design,2019(2): 116-118. (in Chinese))

[17] GAN L, CHEN G Y, SHEN Z Z. A new approach to permeability inversion of fractured rock masses and its engineering application [J]. Water,2020,12(3): 734.

[18] 李昱莹. 复合土工膜缺陷条件下平原水库渗流安全室内试验和数值模拟研究[D]. 济南:山东大学,2018.

(收稿日期:2021-06-23 编辑:骆超)