DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2024.05.16

土工膜防渗水库的缺陷渗漏量估算方法研究

廖志彬[1], 胡婉婷[1], 安彦平[1], 吴 琦[1], 袁俊平[2,3], 曹雪山[2], 丁国权[2,3]
(1. 银川中铁水务集团有限公司, 宁夏 银川 750004; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘　要: 土工膜缺陷是导致土工膜防渗水库渗漏的重要因素,目前对土工膜缺陷渗漏量的评估尚处于试验阶段,未见有土工膜防渗水库缺陷渗漏估算的相关报道。基于土工膜宏观缺陷的局部性以及土工膜防渗水库的监测资料,建立了水库缺陷土工膜防渗层的渗透系数反演数值模型,提出了一种土工膜防渗水库的缺陷渗漏量估算方法。结合现场监测资料,数值反演结果表明:当缺陷土工膜防渗层面积为4 m^2 时,其渗透系数为5.0×10^{-5} m/s;土工膜防渗层缺陷的总体渗漏流量、各断面的单位宽度流量均与库水位相关;在库水最大深度为 14.4 m 时,水库的缺陷渗漏量约为 857 m^3/d;同时,缺陷渗漏量影响范围有限,随着与缺陷中心距离的增大,断面的单位宽度渗漏量逐渐减小。研究成果为土工膜防渗水库的渗漏状态评估和安全运营提供了技术支持。

关键词: 土工膜防渗水库; 缺陷土工膜防渗层渗透系数; 反演渗透系数; 渗漏量估算方法; 等流量原则; 数值模拟
中图分类号:TV697.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2024)05-0130-07

Estimation method of defective leakage in geomembrane impermeable reservoirs

LIAO Zhibin[1], HU Wanting[1], AN Yanping[1], WU Qi[1], YUAN Junping[2,3], CAO Xueshan[2], DING Guoquan[2,3]
(1. *Yinchuan China Railway Water Group Co., Ltd., Yinchuan* 750004, *China*; 2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 3. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Defects in geomembranes significantly contribute to leakage in impermeable reservoirs, the assessment of reservoir leakage related to geomembrane defects remains experimental, with no reported research on methods for estimating defective leakage in impermeable reservoirs. A numerical simulation inversion model for determining the permeability coefficient of defective geomembrane layers in impermeable reservoirs was developed based on the localization of macroscopic defects and monitoring data. Subsequently, a numerical simulation method was proposed to estimate defective leakage in geomembrane impermeable reservoirs. Based on on-site monitoring data, the numerical simulation inversion results show that the permeability coefficient of the defective geomembrane impermeable layer was 5.0×10^{-5} m/s, corresponding to the area of 4 m^2. The total seepage flow and the flow of per unit width section due to geomembrane defects were both influenced by the reservoir water level. At a maximum reservoir water depth of 14.4 meters, the reservoir leakage reached about 857 m^3/d. Furthermore, there was a discernible influence range, with the leakage of per unit width section decreasing as the distance from the center of the defect center increased. The research provides an approach for leakage evaluation and safe operation of geomembrane reservoirs in practical applications.

Key words: geomembrane impermeable reservoir; permeability coefficient of impermeable layer of defective geomembrane; inversion permeability coefficient; leakage estimation method; equal flow principle;

收稿日期:2023-08-12;　**修回日期**:2024-05-26
基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFC0404801、2017YFC0404804)
作者简介:廖志彬(1987—),男,广西武鸣人,大学本科,工程师,主要从事水利工程和市政工程的项目管理工作。
通讯作者:曹雪山(1970—),男,江苏海门人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事非饱和土固结、土石坝数值计算、泥质岩崩解特性及地基与基础工程、地基处理等方面的研究。

numerical simulation

1　研究背景

土工膜是一种高分子聚合物薄膜材料,具有防水性强、施工方便和造价低廉等特点,已在水库除险工程[1]、抽水蓄能电站上水库[2]及相关土石坝[3]、新建平原水库工程[4]中得到广泛应用。然而,土工膜防渗结构若有工程质量缺陷[5]时,就会出现水库渗漏问题。廖志彬等[6]将土工膜在生产、运输、铺设施工及水库运营等方面作为土工膜缺陷产生的随机条件,进而提出土工膜缺陷出现概率 $p_w = 30\%$ 的是等效孔径 d 为 1、2、3 mm 的孔洞,出现概率 $p_w = 5\%$ 的是等效孔径 d 为 5、10 mm 的孔洞,并由此求出设计方案的设计渗漏量。水库渗漏不仅反映了水库土工膜防渗结构的设计和施工质量,还影响着水库的经济效益、坝体安全及周边环境[7]。因此,开展土工膜防渗水库缺陷渗漏量的研究具有重要的工程意义与经济价值[8]。

目前对水库渗漏的研究主要集中在土工膜缺陷渗漏上。洒永芳等[9]在聚乙烯膜上钻孔,通过室内试验发现,土工膜的缺陷尺寸和承受水头压力对缺陷渗漏量的影响较为显著;不同影响因素与缺陷渗漏量的相关系数差异明显,且 Giroud 经验公式仅适用于缺陷孔径为 5 mm 的情况,所以实际的渗流量应通过试验确定。Rowe 等[10]认为土工膜渗漏量与缺陷形状的关系决定于膜下接触层和应力水平。Fan 等[11]通过试验明确了缝隙缺陷和缺陷接缝的渗漏量与基层粗细和基层不平度的关系。岑威钧等[12]研究发现聚乙烯土工膜试样的缺陷形式与刻痕损伤均对土工膜拉伸力学特性有削减,其中横缝最显著,圆孔最小;损伤深度比越大,消减效应越显著。为了明确土工膜缺陷对水库渗漏的影响,王圆圆[13]以某水库为例,在构建 Flac3d 有限差分计算模型时,以流量等效原则人为地将土工膜原缺陷孔径和土工膜原厚度均同时放大 2 ~ 3 个数量,再进行定性分析。岑威钧等[14]通过在土工膜上设置缺陷孔洞,并以孔洞实际尺寸通过精细化网格划分方法,研究土工膜缺陷的数量、类型、位置、大小及其分布对土石坝的防渗结构渗漏量及膜后浸润面的影响。刘健等[15]通过室内模型试验与数值模拟结果互为验证,并尝试用于水库工程的土工膜缺陷渗漏研究中。因此,虽然关于土工膜缺陷渗漏量的试验研究结果与数值模拟成果的数量较多,但是仍存在较大差异,并不适合推广到土工膜防渗水库[16]。

本文根据土工膜防渗水库缺陷渗漏的研究难点,提出三维渗流模拟研究的改进方法,以西夏土工膜防渗水库为例,建立三维渗流模型,并结合现场孔隙水压监测资料,验证数值模型与参数,从而揭示土工膜缺陷渗流场的变化规律,求出水库渗漏量。研究方法与成果可为库盘土工膜防渗水库渗漏、安全运营评价从室内试验迈向实践应用提供参考。

2　土工膜防渗水库缺陷渗漏问题分析

用作水库工程防渗的土工膜材料厚度一般小于 2.5 mm[17],在土工膜的生产制造、交通运输、铺设施工等过程中极易导致孔洞缺陷的产生,具有一定的随机性[6]。实际工程中的土工膜缺陷还可能由膜下气体聚集排泄不畅所引发[18],也可能是库底防渗土工膜与结构连接出现问题[2]。因此在室内试验研究中,人为设定的土工膜缺陷不同于实际工程,现有研究成果中,也未见有根据实际工程推测水库渗漏量的估算方法。

评价土工膜防渗水库缺陷渗漏的难点与缺陷土工膜的特点有关。

土工膜超薄,与一般地基土层米级厚度相差 3 个数量级,严重影响数值模拟中有限元网格剖分难度和计算过程的收敛性。图 1 为缺陷土工膜防渗结构中的渗流状态变化示意图。

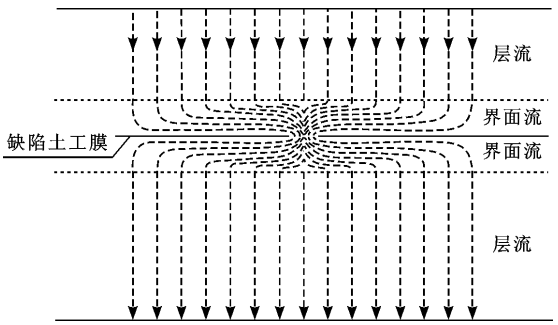


图 1　缺陷土工膜防渗结构中的渗流状态变化示意图

如图 1 所示,在构建模型时,将土工膜与一定厚度的接触层看作一层防渗层。在防渗层内,虽然土工膜与上垫层间存在界面流,但总体上近似为层流,满足达西定律。在保持防渗层流量不变时,可以推导出公式(1)。

$$k_2 = k_g \frac{h_2}{T_g} \tag{1}$$

式中：k_2、k_g 分别为土工膜防渗层、土工膜的渗透系数，m/s；h_2、T_g 分别为土工膜防渗层、土工膜的厚度，mm。

土工膜的缺陷分布具有局部性和微小性，包含缺陷的土工膜（即缺陷土工膜）渗流量决定于土工膜缺陷，并与接触层的渗透性相关[10-11]。

本文提出将土工膜分为完好区与缺陷区，分别对应完好土工膜防渗层与缺陷土工膜防渗层。考虑到完好土工膜的渗透系数较低，一般不大于 10^{-15} ~ 10^{-13} m/s，因此，完好土工膜防渗层的渗透系数取决于土工膜的渗透系数，可由公式（1）换算得到。而缺陷土工膜的渗透系数不仅与通过缺陷土工膜的渗漏量有关，还受到缺陷土工膜渗透面积的影响，其可根据渗流监测情况通过反演确定，从而有针对性地提高计算结果。

3 缺陷土工膜水库渗流模型的建立

3.1 工程概况

西夏水库工程位于银川市西夏区，库区场地呈西高东低，水库设计总面积约为 2.09 km^2，设计库容为 0.319×10^8 m^3，设计库水深度为 15.55 ~ 17.55 m。水库场地（图 2）主要分布有中密的角砾层和细砂层。角砾层主要出露于库底，厚度为 4.40 ~ 11.20 m，西部较厚东部较薄，中部局部有细砂出露，厚为 7.00 ~ 20.50 m，细砂层下方为粉质黏土。角砾层富含 20 ~ 50 mm 粒径的粗砾，其中粒径大于 2 mm 的颗粒占总重量的 60% ~ 80%，渗透系数为 3.0×10^{-4} m/s；细砂层含少量角砾，渗透系数为 4.0×10^{-5} m/s。

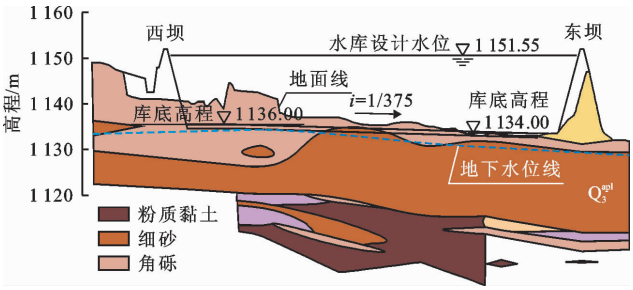


图 2 水库场地地质剖面图

水库采用 300 g 长丝土工布、0.8 mm PE（polyethylene）膜和 300 g 长丝土工布分离式土工膜防渗结构。防渗结构上面覆盖开挖料防护层，厚度约为 1.0 m；下布设棋盘式盲沟排气排水通道，相邻盲沟的中心间距为 75 m，矩形横截面，尺寸为 0.3 m × 0.3 m，如图 3 所示[19]。

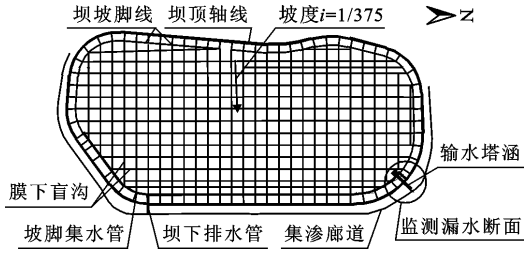


图 3 水库膜下排水系统布置及漏水位置

3.2 水库工程监测与运营情况

渗流监测包含渗透压力和渗流量 2 个重要测项。前者可探知渗流场特征，包含浸润线情况，并由此确定防渗体及下游侧渗流状态，可在早期发现防渗结构因裂缝等出现的集中渗漏，以及岩土构筑物的渗透破坏。渗透压力与渗流量关系密切，共同影响着工程渗流安全[20]。渗透压力通过钻孔埋设的渗压计监测，图 4 为在图 3 中水库东北角漏水断面的渗流监测点布置图。

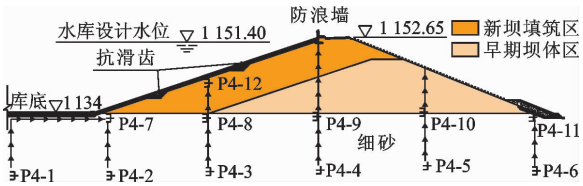


图 4 渗漏断面监测点布置图

根据监测报告，从 2019 年 10 月 6 日至 2021 年 11 月 30 日，该断面上的测点 P4-7 的渗流压力随水库水位变化出现了明显的波动，与水库水位变化过程基本一致。同时，当库水深度达 12.44 m 时，测点 P4-8 也出现了渗流压力增大的现象。该现象类似于郑兆江[21]所研究的未铺设复合土工膜防渗的渗流压力与库水位的关系，说明该监测区域的土工膜因缺陷而局部失效，形成了库水渗漏点。除此断面外，其余渗流监测断面无明显的渗漏点。

3.3 水库渗流模型建立

以水库渗漏断面为中心建立三维渗流模型，如图 5 所示。

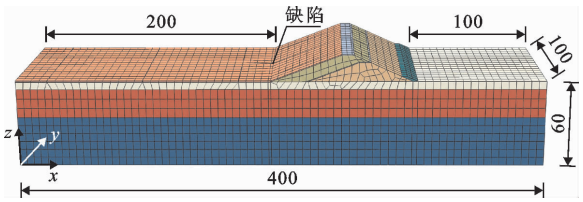


图 5 三维渗流模型及网格剖分（单位：m）

围堤轴线 y 方向宽度为 100 m；坝基厚度为 60

m,大坝高度为 18 m,库区内边线到坡脚的距离约为 200 m,大坝下游坡脚处向外延伸 100 m。由于土工膜超薄,厚度只有 0.8 mm,模型中将土工膜与上、下土工布垫层及部分细砂层视为防渗层,厚度为 0.2 m,完好土工膜的渗透系数为 1.0×10^{-13} m/s,按流量等效原则确定完好土工膜防渗层的渗透系数为 2.5×10^{-11} m/s。

根据工程设计、施工及监测资料,初步估算土工膜防渗结构缺陷部分的面积,剩余部分土工膜防渗结构完好。由于 P4-7 测点的渗流压力随库水位变化而变化的幅度最大,相应地土工膜缺陷离该测点最近,因此将 P4-7 测点附近(即上游坡面与库底交接处的 4 m^2 面积土工膜防渗层区域)拟定为缺陷土工膜防渗层单元,数量为 2,长×宽为 2 m×1 m,该单元的渗透系数由 P4-7 测点的渗透压力监测值拟合确定。将缺陷土工膜防渗层单元与各地层、围堤结构层、土工膜下盲沟等结构体一起,选择三维 8 节点孔压单元(C3D8P),并在模型中将角边线在 x 方向分为 72 段,y 方向分为 15 段,z 方向分为 10 段,以进行自动网格剖分。三维渗流模型结点数为 18 093,单元数为 15 746(图 5)。

表 1 为渗流模型计算的各土体渗透系数。地下水位以上均为排水边界,库区表面和坝坡上游坡面的水头由库水位决定,模型底面区域边界为不排水边界。模型的初始孔压由地下水位位置计算确定。

表 1　渗流模型计算的各土体渗透系数　　m/s

名称	渗透系数 k	名称	渗透系数 k
围堤面板及保护层	1.00×10^{-6}	早期坝体区	2.19×10^{-5}
土工膜防渗结构	2.50×10^{-11}	坝后加培土	5.00×10^{-5}
细砂土回填料	4.00×10^{-5}	角砾地层土	3.00×10^{-4}
角砾土回填料	5.00×10^{-5}	细砂地层土	4.00×10^{-5}
新坝体填筑区	5.00×10^{-5}	粉质黏土	8.33×10^{-7}

4　结果与分析

4.1　缺陷土工膜防渗层的渗透系数反演

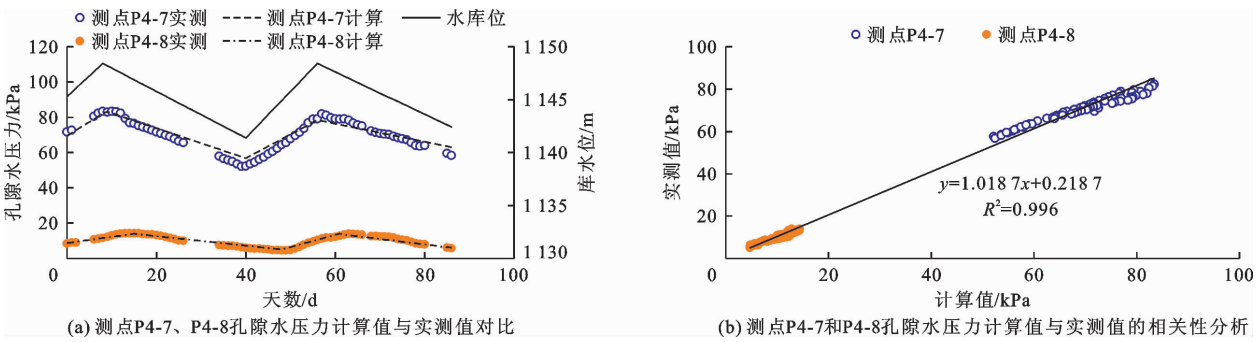
根据水库工程监测资料,在库水位从 2021 年 7 月 5 日—9 月 30 日的 87 d 中,分别有 2 个水位上升和下降的变化,如表 2 所示。

表 2　7 月 5 日—9 月 30 日库水位变化过程

日期	天数/d	库水深度/m	变化速率/($m\cdot d^{-1}$)	持续时间/d
07-05	0	11.3		
07-13	8	14.4	0.39	8
08-14	40	7.4	−0.22	32
08-30	56	14.4	0.44	16
09-30	87	8.3	−0.20	31

为了获得缺陷土工膜防渗层的渗透系数,可先设定缺陷土工膜防渗层单元的渗透系数 k_{d0},即 $k_d=k_{d0}$,并结合表 1 中的相关参数及库水位,代入渗流模型试算,求出测点 P4-7 孔隙水压力计算值 u_{wc0};将该计算值与测点 P4-7 孔隙水压力实测值 u_{wm} 进行对比,确定差值;如果差值不满足误差的要求,则调整缺陷土工膜防渗层单元的渗透系数,令 $k_d=k_{d1}$,重新计算;否则迭代结束,缺陷土工膜防渗层单元的渗透系数 $k_d=k_{d1}$。

根据调试结果,缺陷土工膜防渗层单元渗透系数为 5.0×10^{-5} m/s,小于土工膜下角砾地层的渗透系数 3.0×10^{-4} m/s,说明土工膜实际缺陷尺寸明显小于原拟定的缺陷土工膜防渗层单元尺寸,因此本模型单元网格剖分是合理的。将该模型与参数应用于表 2 中的库水位变化过程,并用测点 P4-7、P4-8 处孔隙水压的计算值与实测值完成模型与参数的验证,验证结果如图 6 所示。



(a) 测点P4-7、P4-8孔隙水压力计算值与实测值对比　　(b) 测点P4-7和P4-8孔隙水压力计算值与实测值的相关性分析

图 6　缺陷土工膜防渗层渗透系数的验证

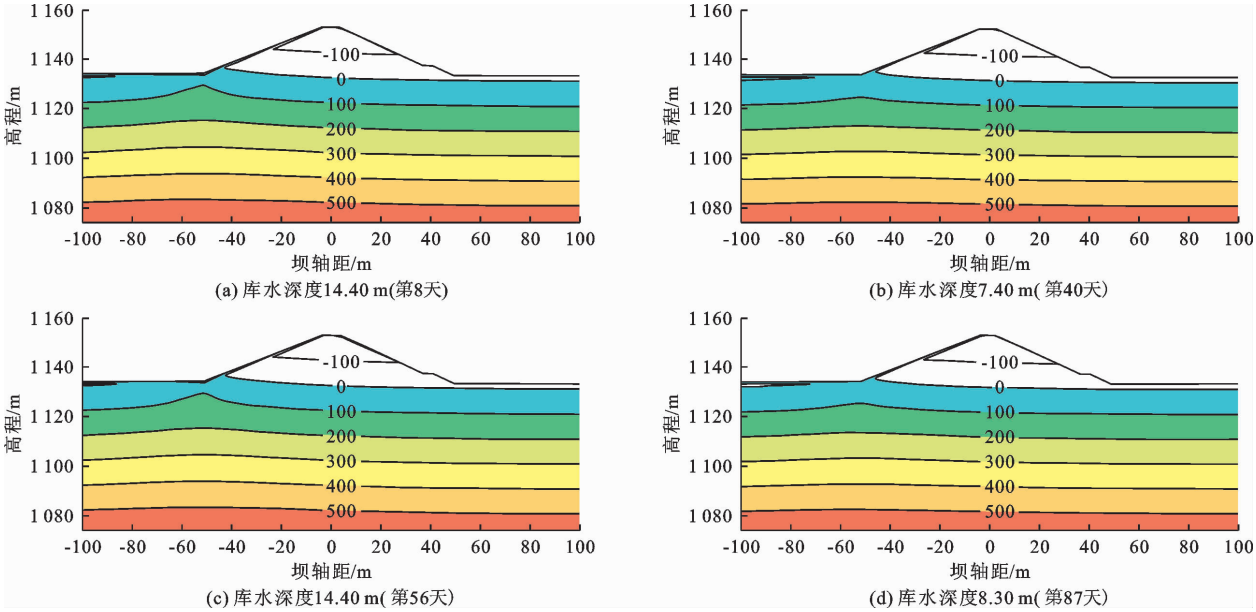
由图 6 可以看出,计算值与实测值趋势一致,相对误差小于 5%;计算值与实测值相关度大于 99%。因此本文所采用的渗流模型及其计算参数能够较好地反映水库的实际状况。

4.2 缺陷土工膜下渗透压力与库水位的关系

水库渗漏是由土工膜防渗结构缺陷所引发的。图 7 为不同库水深度时的渗透压力云图。

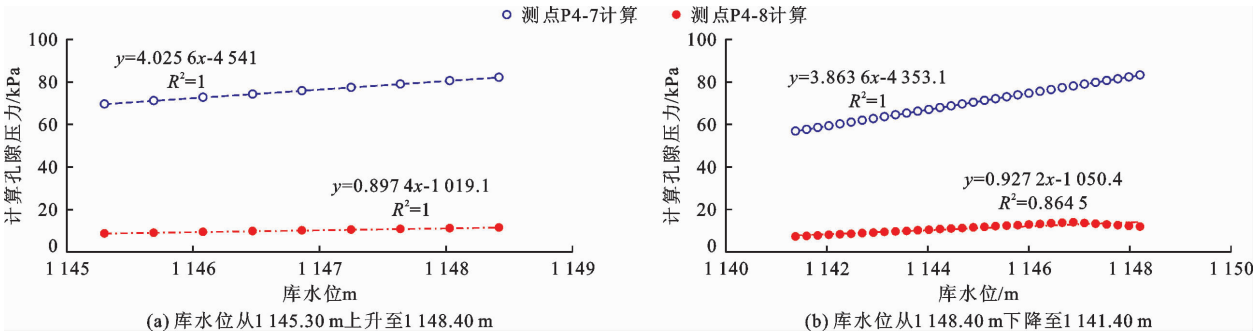
由图 7 可以看出,受坝坡坡脚处土工膜防渗层缺陷渗漏的影响,坡脚处的土工膜下水压线出现局部增高现象,而浸润线则随着库水深度的变化而相应调整。库水深度为 14.4 m 时(第 8 天),浸润线较高,影响范围较大;库水深度下降至 7.4 m 时(第 40 天),浸润线相继降低,影响范围也缩小;至第 56 天时,库水深度再次上升至 14.4 m,浸润线再次回升,影响范围也相应扩大。因此,土工膜处于完好状态时,渗透压力监测值与库水位无关[22],而因土工膜缺陷发生渗漏时,渗透压力监测值、浸润线、影响范围均与库水位相关[21]。

图 8 为库水位上升、下降时计算孔隙压力与库水位的关系。



(a) 库水深度14.40 m(第8天)
(b) 库水深度7.40 m(第40天)
(c) 库水深度14.40 m(第56天)
(d) 库水深度8.30 m(第87天)

图 7 不同库水深度时的渗透压力云图(单位:kPa)



(a) 库水位从1 145.30 m上升至1 148.40 m
(b) 库水位从1 148.40 m下降至1 141.40 m

图 8 库水位上升、下降时测点 P4-7、P4-8 计算孔隙压力与库水位的关系

由图 8 可以看出,无论在库水位上升还是下降过程中,膜下渗漏点附近的孔隙压力计算值均与库水位呈线性高度相关[21],这充分说明本文计算方法的合理性。

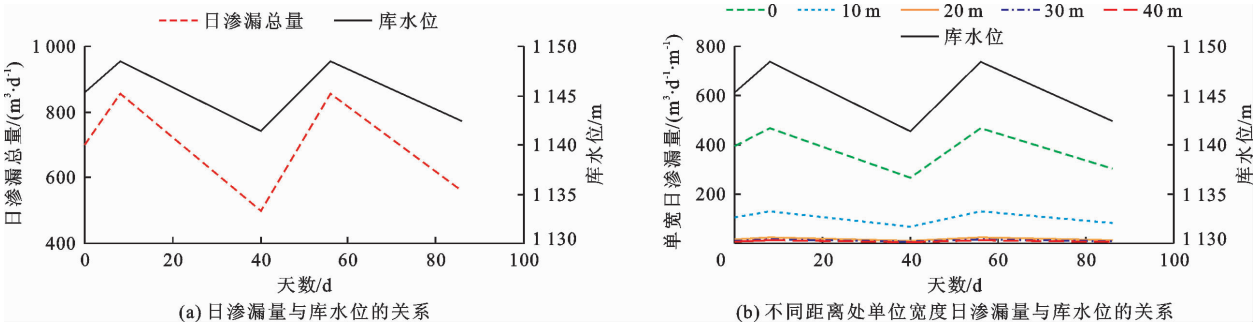
4.3 缺陷土工膜区域渗漏量与库水位的关系

在水库安全运营过程中,渗漏量作为评价水库运营的特征性指标,与水库经济效益有直接关系。因此渗漏量是工程管理人员关心的重要指标,对水库运维措施的决策具有重要影响。为了计算缺陷土工膜区域的渗漏量,可以通过汇总与缺陷单元相接所有单元结点的流量求得总渗流量。根据描述土体渗流的达西定律,由公式(2)计算汇总通过土工膜防渗层缺陷单元结点的渗漏量[23]。

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \sum_{i=1}^{n} \left(k_i A_i \frac{\Delta H_i}{L_i} \right) \tag{2}$$

式中: Q 为某一缺陷渗漏量,m^3/d; Q_i 为缺陷土工膜防渗层单元结点相邻土层单元的渗漏量,m^3/d; A_i 为缺陷土工膜防渗单元结点相邻土层单元渗透面积,m^2; ΔH_i 为缺陷土工膜防渗单元结点相邻土层单元渗压差,m; L_i 为缺陷土工膜防渗单元结点相邻土层单元的渗透路径长度,m; k_i 为缺陷土工膜防渗单元结点相邻土层单元的垂向渗透系数,m/d; n 为缺陷土工膜防渗单元结点相邻土层单元个数。

图 9 为缺陷土工膜水库的日渗漏量及距缺陷中心不同距离处的单宽日渗漏量与库水位的关系。



(a) 日渗漏量与库水位的关系　　(b) 不同距离处单位宽度日渗漏量与库水位的关系

图 9　缺陷土工膜水库的日渗漏量及距缺陷中心不同距离处的单宽日渗漏量与库水位的关系

由图 9(a)可以看出,尽管在库水深度为 14.4 m 时日渗漏总量最大值为 857 m^3/d,仅为设计日渗漏量4 004 m^3/d 的 21.4%,但渗漏通常情况并非由单一的缺陷所致[2],因此也应重视土工膜缺陷渗漏问题。图 9(b)表明,土工膜缺陷的渗漏是具有一定的影响范围。缺陷中心断面的单位宽度渗漏量最大,随着与缺陷中心的距离由 0 增大到 40 m,断面的单位宽度渗漏量逐渐减小。这与现场监测数据相吻合,现场监测数据显示渗漏点附近膜下渗流量为 17 ~ 112 m^3/d,且渗漏量随库水位变化而变化。无论是缺陷区域的总渗漏量还是不同断面位置的单位宽度渗漏量,均与库水位相关。因为单位宽度日渗漏量明显小于日渗漏总量,所以水库工程渗漏量监测数据与渗压一样,只能反映水库出现渗漏,而难以确定总渗漏量,土工膜缺陷的总渗漏量尚需要通过数值反演计算获得。

5　讨　论

土工膜的渗透系数非常低,为 10^{-15} ~ 10^{-13} m/s,同时具有较大的延伸率,是良好的防渗材料,因此能起到不透水地层的作用。研究过程中,将土工膜及其接触地层视作防渗层,渗透系数决定于土工膜,由等效流量原则换算获得;如长期使用,土工膜的老化衰变形成微观缺陷时仍可认为是均匀的,用数值法反演出新的渗透系数[22,24],相应的由水库渗流场估算渗漏量方法与常规水库[22]渗漏量计算无异。

与常规水库不同的是土工膜防渗水库的渗漏问题主要是由宏观缺陷因素造成的。由于土工膜具有超薄性,极易出现缺陷,致使局部防渗失效,从而大大消弱了土工膜的防渗功能,因此研究土工膜缺陷渗漏量是工程界的热点[16]。常用的研究方法是在土工膜上人为设置缺陷,通过室内试验测定渗流量开展研究[9-12],或者将假定缺陷按固定形式分布[13,15]或随机分布[14,25]进行定性研究。但对于实际工程所使用的防渗土工膜的缺陷数量、大小及引发概率是不明确的[16],而室内试验研究表明土工膜缺陷的位置、形状、尺寸对渗流量的影响显著[10-11],所以在对实际工程进行数值建模时,精细化网格法面临挑战。这不仅因为土工膜缺陷尺寸微小而影响网格剖分与计算的收敛性,还因缺陷处流态常处于紊流状态,与达西定律描述的层流状态不符,从而影响计算方法的合理性。更为重要的是,由于实际土工膜缺陷的形状和尺寸未知,无法通过网格精细化划分来计算缺陷渗漏量。因此,尽管目前的室内试验[26]研究取得了一些成果,但难以应用在实际工程中,至今尚未见关于土工膜防渗水库工程缺陷渗漏估算的相关报道。

本文根据土工膜防渗水库的工程特点,结合工程监测资料,考虑到土工膜缺陷的局部性和微小性,提出了将土工膜分为完好区与缺陷区的方案。完好区的土工膜防渗层单元渗透系数通过将土工膜渗透系数(10^{-13} m/s)按厚度换算得到;缺陷区的渗透系数则通过渗压监测数据反演获得。这种方法不仅充分利用了现场工程监测数据,提高了模型的可靠性、针对性和参数的合理性,还展示了土工膜防渗水库的特殊性,解决了缺陷局部分布性问题。

6　结　论

(1)土工膜防渗水库缺陷渗漏问题的特殊性在

于土工膜的超薄性和缺陷的局部性。本文采用等流量原则进行局部变换,建立了水库缺陷土工膜防渗层的渗透系数反演模型。

(2)通过对土工膜防渗水库渗流场的模拟,结合现场监测数据,确定了缺陷防渗层单元面积为 4 m^2 时的渗透系数为 5.0×10^{-5} m/s。

(3)土工膜防渗结构缺陷的渗漏总量和各断面的单位宽度流量均与库水位有关。在实例工程中,库水最大深度为 14.4 m 时,水库渗漏量达到最大,约为 857 m^3/d。同时,缺陷渗漏量影响范围有限,随着与缺陷中心距离的增大,断面的单位宽度渗漏量逐渐减小。

参考文献:

[1] 张 勇,郭 嘉. 复合土工膜在水库除险加固中的应用[J]. 内蒙古水利,2022(6):63-64.

[2] 王樱畯,雷显阳,姜晓桢,等. 基于子模型法的某抽水蓄能电站库盆土工膜锚固处局部适应性研究[J]. 水电能源科学,2021,39(10):131-134.

[3] 岑威钧,王 辉,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性及坝坡稳定的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(7):589-595.

[4] CAO Xueshan, YUAN Junping, YIN Zongze, et al. Investigation of air bulging beneath geomembranes used as a liner for the Datun Reservoir[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2016, 22(1): 53-66.

[5] 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.

[6] 廖志彬,袁俊平,曹雪山,等. 平原水库的土工膜防渗结构方案及其影响因素研究:以西夏水库为例[J]. 河南科学,2022,40(11):1768-1775.

[7] 杨汉锡,上官宗盼. 土工膜防渗在水库大坝除险加固中的应用[J]. 河南水利与南水北调,2020,49(6):52-53.

[8] 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.

[9] 洒永芳,刘 建,骆成杰,等. 填埋场高密度聚乙烯膜缺陷渗漏试验及计算模型研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):213-217.

[10] ROWE R K, FAN Jiying. A general solution for leakage through geomembrane defects overlain by saturated tailings and underlain by highly permeable subgrade[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(4): 694-707.

[11] FAN Jiying, ROWE R K. Effect of subgrade on leakage through a defective geomembrane seam below saturated tailings[J]. Geotextiles and Geomembranes. 2023, 51(2): 360-369.

[12] 岑威钧,波兰汗·开肯,刘凤茹,等. 缺陷和损伤土工膜的拉伸特性试验[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):69-73.

[13] 王圆圆. 基于 Flac3d 的复合土工膜缺陷渗漏影响因素研究[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(5):94-96.

[14] 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.

[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+69.

[16] 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.

[17] 曹雪山,袁俊平,丁国权. 抽气现场试验的土工膜下盲沟气阻数值模拟研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(10):1780-1788.

[18] 薛 霞,李旺林,李 辰,等. 分离式复合土工膜环向约束鼓胀变形试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(6):1145-1150.

[19] 袁俊平,曹雪山,吴 琦,等. 西夏水库扩容工程土工膜防渗系统设计方案研究[J]. 大坝与安全,2023(3):16-21.

[20] 国家能源局. 土石坝安全监测技术规范:DL/T 5259—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.

[21] 郑兆江. 复合土工膜对水库防渗效果应用研究[J]. 水利科技与经济,2020,26(7):85-88.

[22] 黄耀英,谢 同,费大伟,等. 基于测压管实测水位的王甫洲水利工程复合土工膜工作性态反馈[J]. 岩土工程学报,2021,43(3):564-571.

[23] 李文溢,杨阿敏,周维博. 平原水库渗流场模拟及渗漏量计算:以斗门水库试验段为例[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):66-72.

[24] 何一洋,黄耀英,费大伟,等. 王甫洲水利工程复合土工膜渗透系数时变特性反演分析[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(8):112-120.

[25] 岑威钧,陈司宁,李邓军,等. 考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):413-418.

[26] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):16-22.