

DOI: 10.11779/CJGE20240444

土工膜防渗水库渗漏的数值模拟方法研究

曹雪山¹, 施钦译¹, 薛 猛¹, 廖志彬², 袁俊平^{*1,3}, 丁国权^{1,3}

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 银川中铁水务集团有限公司, 宁夏 银川 750004; 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 210024)

摘 要: 渗漏是水库运维安全的关键性影响因素, 而关于土工膜缺陷渗漏的研究水平尚处于试验阶段, 未见有报道土工膜防渗水库缺陷渗漏数值模拟方法方面的研究成果。首先, 阐述土工膜缺陷渗漏的研究难点, 并根据土工膜缺陷渗流特征, 提出将缺陷土工膜及其接触层作为防渗层(简称缺陷土工膜防渗层)的反分析模拟方法; 然后, 基于 1360 d 的西夏水库渗漏监测数据, 建立水库三维土工膜缺陷渗流模型, 对西夏水库的 10 个运行过程反演缺陷土工膜防渗层等效渗透系数。结果验证表明, 研究方法合理, 并且揭示了随着西夏水库向动态高库水位运行, 缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数有降低、升高及稳定 3 个阶段, 符合土工膜下粗粒土的渗透变形规律, 与土工膜下监测点的渗压及渗压降的 3 个阶段对应。研究成果为土工膜防渗水库安全运营评价提供技术支撑。

关键词: 土工膜; 水库; 缺陷土工膜防渗层; 等效渗透系数; 三维反演模型; 渗漏特性; 监测数据

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2145-09

作者简介: 曹雪山(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土数值模拟与现场试验方面的研究工作。E-mail: x.s.cao@163.com。

Numerical simulation methods for leakage in reservoirs with geomembrane seepage control

CAO Xueshan¹, SHI Qingyi¹, XUE Meng¹, LIAO Zhibin², YUAN Junping^{*1,3}, DING Guoquan^{1,3}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Yinchuan China Railway Water Affair Co., Ltd., Yinchuan 750004, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Leakage significantly impacts the operational and maintenance safety of reservoirs. The existing researches on the leakage due to defective geomembranes remain at experimental stage, with limited exploration of numerical simulation methods specifically focused on impermeable reservoirs with defective geomembranes. Many challenges associated with geomembrane defective seepage were elaborated upon. Based on the characteristics of seepage through defective geomembranes, an inverse simulation method was proposed, which uses the defective geomembrane and its contact layer as the seepage control layer, termed the impermeable layer with defective geomembranes. Based on the monitoring data of leakage in the Xixia Reservoir over a period of 1360 days, a three-dimensional seepage model of the impermeable reservoir with defective geomembranes was developed. The equivalent permeability coefficients of impermeable layer with defective geomembranes were back-calculated and validated using data from ten operational periods of the Xixia Reservoir. The validation showed that the research method was reasonable and revealed that with the operation of the reservoir to the dynamic high reservoir level, the equivalent permeability coefficient of the impermeable layer with the defective geomembrane consists of three phases of decreasing, increasing and stabilizing, which was in line with the law of infiltration and deformation of coarse-grained soil under the geomembrane and corresponded to the three phases of the seepage pressure and the seepage pressure drop in the monitoring points under the geomembrane. Research resulted provide technical support for the evaluation of safe operation of geomembrane impermeable reservoirs.

基金项目: 国家重点研发计划重点“水电工程”重点专项项目(2024YFF1700700); 西夏水库扩容工程运维安全评价的关键技术项目(823152016) This work was supported by National Key R&D Program of China under the "Hydropower Engineering" Key Special Project (Grant No. 2024YFF1700700) and Key Technology Research Project for Operational Safety Assessment of the Xixia Reservoir Expansion Project (Grant No. 823152016).

收稿日期(Received): 2024-05-08 修回日期(Revised): 2025-01-09 接受日期(Accepted): 2025-01-21 网络出版日期(Online): 2025-01-22

*通信作者(E-mail: yuan_junph@163.com)

Key words: geomembrane; reservoirs; impermeable layer with defective geomembranes; equivalent permeability coefficient; three-dimensional inverse model; seepage characteristics; monitoring data

0 引言

土工膜是一种经济实用、施工方便的高分子聚合物防水工程材料,具有超低渗透性和大延展性,可解决因缺乏有效隔水层所导致的水库渗漏问题^[1],成为了水库新建和改建工程首选的防渗层材料^[2-3],在平原水库^[1-2]、拦河坝^[3-4]、抽水蓄能电站水库^[5]以及水库渗漏修复等工程中得到广泛应用。然而,由于土工膜厚度过薄,容易在制造、运输、储存和铺设过程中损坏,甚至在水库运营期间发生撕裂^[6],造成局部渗漏问题。虽然昆明市金殿水库采用了复合土工膜全库盘防渗系统,但是在运行过程中,库盘防渗体仍出现了局部渗漏、破裂和塌陷现象^[7]。山东泰安抽水蓄能电站上水库采用库盘土工膜防渗系统,但根据 6 a 的监测数据显示,库底渗漏量 173~346 m³/d^[8]。水库局部渗漏是威胁库区堤坝安全的重要因素。由于土工膜局部破损导致渗漏,进而引发土工膜下砂性土体的渗透变形,导致堤防局部沉陷^[9],加剧渗漏和大坝材料的侵蚀,进而土工膜破裂面加大,形成与混凝土结构接触处的细粒材料受到集中渗漏侵蚀,从而导致堤坝垮塌、溃决^[10]。此外,对于土工膜防渗土石坝,当库水位下降时,坝面土工膜的缺陷渗漏会在坝面形成瞬态渗流场,影响着坝体的局部抗滑稳定性^[11]。因此,为了进一步提高全库盘土工膜防渗水库的设计、施工技术水平,保障水库安全运维,开展土工膜防渗水库渗漏问题的研究具有重要的工程意义。

然而影响土工膜渗漏的因素很复杂^[12]。土工膜缺陷渗漏量不仅决定于土工膜缺陷数量、形状^[13-14],还与土工膜下接触层渗透性、所处应力水平^[2]及水头等因素相关。Fan 等^[15]通过土工膜缺陷渗漏试验,发现基层粗细和基层不平度对土工膜的缝隙缺陷渗漏量影响显著。虽然目前国内外已有不少土工膜缺陷渗漏量估算的研究成果,但要推广到实际水库工程中并不合适^[16],其主要原因是室内试验与实际水库工程的条件存在较大差异。

综上所述,本文以西夏水库为例,首先分析水库缺陷渗漏的研究难点,提出缺陷土工膜防渗层的模拟方法,继而基于西夏水库建成后蓄水 1360 d 的渗流监测数据分析,建立土工膜防渗水库的三维渗漏反演模型。通过水库运维过程反演,进一步揭示土工膜缺陷渗漏发展规律,为土工膜防渗水库安全运维提供技术支持。

1 土工膜防渗水库的渗漏模拟方法

1.1 土工膜缺陷渗漏的研究难点

土工膜作为工程防水材料,虽然具有超低渗透性的优点,但其超薄性是一个显著的缺点,严重威胁着工程运行安全。由于土工膜厚度一般为 0.5~2 mm,与常规岩土地层尺寸相差 2~3 个数量级,在土工膜的生产、运输、施工及运行过程中极易产生缺陷^[8],进而给数值模拟带来困难,具体如下:

(1) 土工膜及其缺陷的尺寸问题显著。土工膜厚度超薄,引发的局部缺陷通常也为毫米级的^[8],无论是平面还是三维数值建模,均与常规单元尺寸相差 2~3 个数量级,如用于实际工程,不仅造成网格剖分困难,还会影响计算过程的收敛性^[14]。

(2) 缺陷附近流态变化复杂多变。如图 1 所示,土工膜缺陷渗漏属于缝、孔隙流,在渗流过程中,缺陷处渗流面积小、坡降大,流线扩散现象显著,还存在明显的界面流^[16];但在缺陷附近区域随着渗流路径增大,坡降快速减小,流线转入平直,紊流状态逐渐转变为层流状态。

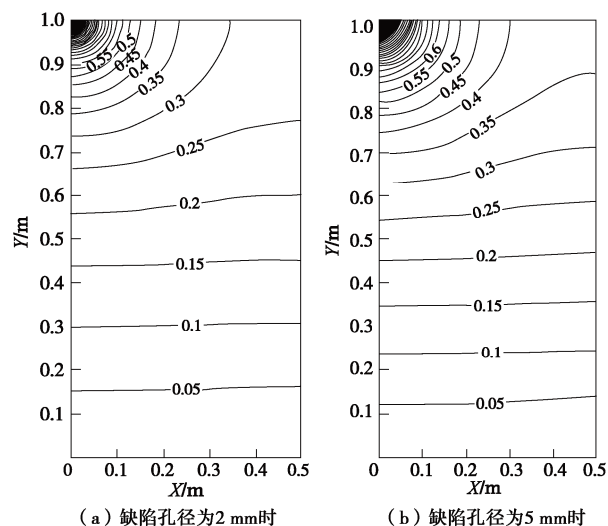


图 1 缺陷土工膜防渗层的等势线分布图

Fig. 1 Isopotential distribution of impermeable layer with defective geomembranes

(3) 缺陷土工膜的渗流量难以确定。以通过土工膜缺陷的流量为主,其余部位几乎可忽略不计。由于土工膜厚度超薄,不仅其缺陷形状多样,数量不定,而且还受水头、应力状态、土工膜接触地层渗透性的影响而变化^[2, 14],进而使通过缺陷的流量变化规律相当复杂,导致试验研究成果难以推广至工程实践^[16]。

(4) 土工膜上下接触层的渗透变形不可忽视。土工膜缺陷处水力梯度大, 土工膜上、下接触层为粗粒土, 渗流过程中细颗粒流失, 反过来影响通过土工膜缺陷的渗流量, 造就了土工膜缺陷的渗流量与其上下接触层渗透性相关^[8]。

(5) 缺陷渗漏的研究方法局限。现有研究多是以土工膜为研究对象, 缺陷渗流量为研究目标, 试验研究时由测定揭示渗流量的变化规律^[14-15]; 数值研究时, 以等流量原则变换土工膜厚度^[1, 7], 水库全库盘具有相同渗透性。显然, 相对于缺陷土工膜的渗流特点及实际工程应用工况, 目前研究方法针对性不强。

1.2 土工膜缺陷的模拟方法

完好土工膜的渗透性极低, 即使有微观缺陷, 因为其均匀、微小, 所以渗流量亦均匀且很小, 土工膜渗流仍符合达西定律, 渗透系数为 $10^{-13} \sim 10^{-15} \text{ m/s}$ ^[17]。于是可将土工膜及上、下附近接触层看作一防渗层, 此时土工膜渗透系数比其上、下各层低 8~10 个数量级, 所以通过防渗层的流量只取决于土工膜。根据达西定律, 流量不变时土工膜厚度和渗透系数进行同步放大, 土工膜防渗层的等效渗透系数为

$$k_2 = k_g \frac{h_2}{T_g} \quad (1)$$

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

土工膜缺陷渗流通常是指宏观缺陷引起的, 其渗流特征复杂, 与土工膜含微观缺陷渗流有很大的不同。对土工膜缺陷渗流通常采用精细化网格进行近似计算^[18], 结果如图 1 所示。然而该方法应用于室内模型试验, 因其规模尺寸较小而网格问题尚且不大^[16]。图 2 为图 1 的流线分析示意图, 图 1 反映了图 2 中 1/4 部分的等压线图。渗流量以通过土工膜缺陷的流量为主, 其他部位的很小, 相比而言可不计。当通过缺陷土工膜的渗流量不大时, 在缺陷区四周仍可近似认为层流状态, 而缺陷附近因横向流动而出现界面流, 水力梯度变化显著, 范围仅限于缺陷主要影响区, 而外围流线平顺, 于是当缺陷土工膜防渗层厚度 h_2 大于 h_1 、面积范围 R 大于 R_1 , 包含了缺陷渗流主要影响区。于是将缺陷土工膜防渗层看作一整体, 通过该层近似满足层流条件, 适用达西渗流定律。考察通过缺陷的流量 Q , 设其他面积的通过流量近于零而不计, 根据达西定律, 可得到

$$k_{dg} = \frac{Qh_2}{A_{dg}\Delta H} \quad (2)$$

式中: k_{dg} , A_{dg} 分别为缺陷土工膜防渗层的等效渗透

系数 (m/s)、渗透面积 (m^2); ΔH 为防渗层顶面、底面的水头差 (m); Q 为通过缺陷的流量 (m^3/s)。

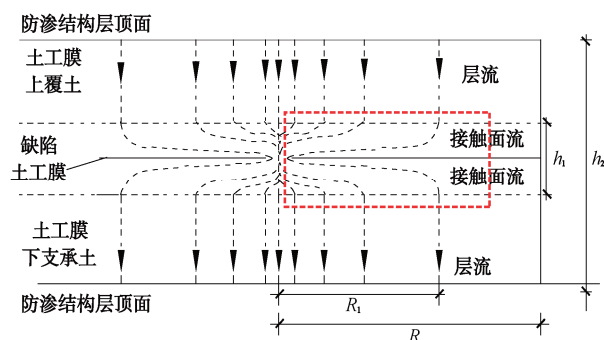


图 2 缺陷土工膜防渗层的渗流特征示意图

Fig. 2 Schematic diagram of leakage characteristics of impermeable layer with defective geomembranes

将水库的土工膜划分为完好区与缺陷区, 分别对应着完好土工膜防渗层与缺陷土工膜防渗层^[19]。完好土工膜防渗层等效渗透系数可用式 (1) 换算确定, 原因是在平面上分布均匀, 与面积无关; 在厚度方向上, 起决定作用的是土工膜材料, 其他层材料的渗透性作用很小, 可忽略不计。缺陷土工膜防渗层等效渗透系数在理论上可由式 (2) 确定, 但实施时并不可行, 原因有两点: ①虽然当土工膜缺陷及其上下接触层等因素固定时, 但在实际工程中, 通过土工膜缺陷的流量仍然未知, 且不可测量的; ②虽然缺陷土工膜防渗层的渗透面积 A_{dg} 、厚度 h_2 可以取设定值, 但渗透面积 A_{dg} 与等效渗透系数成反比, 厚度 h_2 与等效渗透系数成正比。由此缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数应根据渗流实测数据反演确定。

2 全库盘土工膜防渗水库的监测分析

2.1 西夏水库工程背景

西夏水库具有调蓄、沉淀黄河水的功能, 为中型平原水库, 是银川都市圈城乡西线供水工程中的重要蓄水工程。水库蓄水总面积约 2.09 km^2 , 深度 $15.55 \sim 17.55 \text{ m}$, 库容 $3.19 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。该水库位于贺兰山东麓山前, 场地工程地质情况如图 3 所示, 分布有高渗透性的角砾土和中渗透性的细砂土。角砾层以粗砾为主, 粒径多为 $20 \sim 50 \text{ mm}$, 其中粒径大于 2 mm 以上的占全重 $60\% \sim 80\%$, 中密。细砂地层, 含少量角砾, 中密。水库全库盘采用土工膜防渗, 即土工布 300 g 、土工膜 0.8 mm 厚、土工布 300 g 三层分离结构, 膜上覆盖厚度约 1.0 m 开挖料防护层, 膜下布设盲沟, 中心间距为 75 m , 横截面尺寸为 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$, 盲沟周边土工布包裹, 中心为直径 10 cm 土工盲管, 盲管与土

工布间充填卵石。

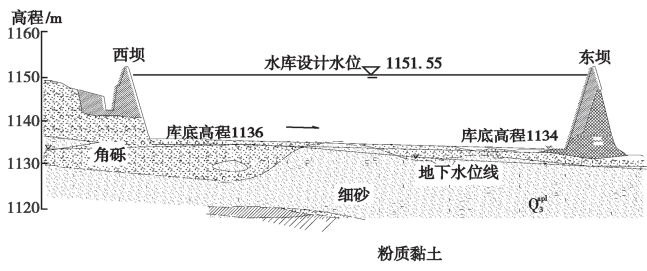


图3 水库场地地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of reservoir site

水库沿围坝设置 14 个渗流监测断面，平均间距 389 m，如图 4 所示。各渗流监测断面布点基本相同，其中#2 监测断面 0+587 的监测点剖面布置如图 5 所示，监测点编号括弧内数字为埋设高程。

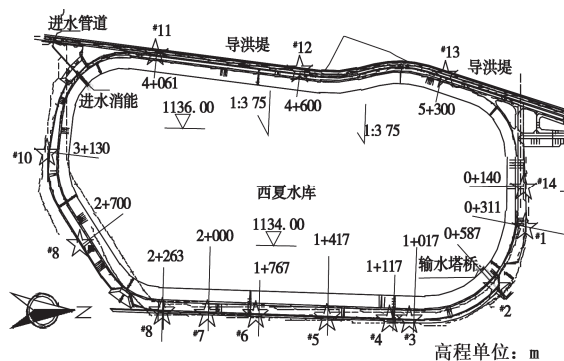


图4 水库渗流监测断面平面布置图

Fig. 4 Layout of seepage monitoring sections for reservoir

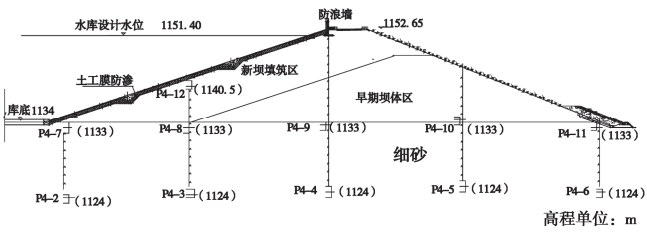


图5 监测点剖面布置图

Fig. 5 Profile layout of monitoring points

2.2 水库工程监测与运营情况

西夏水库完成后从 2019 年 9 月 30 日开始蓄水，监测数据从 2019 年 10 月 06 日开始采集，至 2023 年 6 月 26 日共持续监测 1360 d。根据监测数据，库区渗流监测断面的测点数据与库水位变化无显著的对应关系，仅有#2 监测断面 0+587 的点 P4-7 渗压数据与库水位升降相协调变化。因此本文以库水位与测点 P4-7 的渗压数据进行分析。

地下水位和测点埋设高程决定着土工膜下测点渗压值。根据图 5 的土工膜下埋设于高程 1124 m 的测点渗压监测数据与高程确定地下水位，结果如图 6 所示。无论库水位变化如何，渗漏断面 0+587 的地下水位较

为稳定，高程为 1129.4~1130.5 m，与土工膜面高程（1134 m）相比约低 4 m；于是高程 1133 m 及以上的测点均处于非饱和状态。

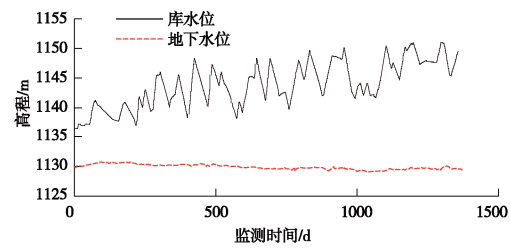
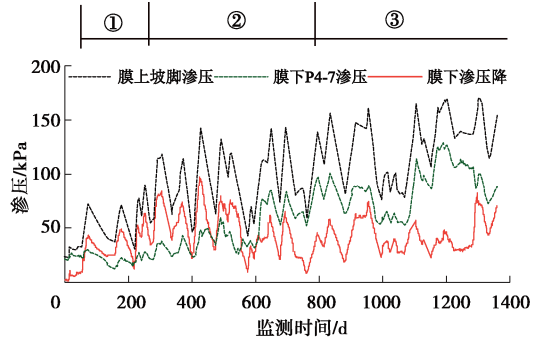


图6 地下水位及库水位高程随时间变化情况

Fig. 6 Variation of groundwater level and reservoir level elevation with time

水库渗漏时，库水位对膜下测点渗压测试值有重要影响。本工程中，#2 断面 0+587 的测点 P4-7 埋设于坡脚位置，高程 1133 m，与坡脚土工膜面高程 1134 m 相差 1 m，比地下水位高程 3 m，因此该处渗压测试值由坡脚处土工膜渗漏引发，而与地下水位无关。为了反映该点 P4-7 的渗压与库水位的关系，引入由库水深度 z 决定的膜上坡脚渗压 $\gamma_w z$ 和膜下渗压降，即由膜上坡脚渗压与测点 P4-7 渗压的差值推测确定，是由土工膜下渗流阻力所致。结果如图 7 所示。



注：①动态上升初期；②动态上升中期阶段；③动态稳定阶段

图7 渗漏断面的渗压及渗压降随时间变化情况

Fig. 7 Variation of seepage pressure and seepage pressure decrease of seepage section with time

根据图 7，从水库建成后蓄水开始以来，测点 P4-7 的渗压测试值与库水位协调变化，说明该测点附近存在渗漏。根据测点 P4-7 的膜下渗压与库水位变化引发的坡脚渗压相对变化趋势，可分 3 个阶段：①库水位动态上升初期，约为第 55~280 d，膜下渗压呈动态上升不明显，而膜下渗压降有明显的动态上升趋势；②库水位动态上升中期，约为第 280~800 d，测点 P4-7 的渗压有明显的动态上升趋势，但渗压降却呈动态下降趋势；③库水位动态稳定期，即第 800 d 后，测点 P4-7 的渗压仍有动态上升的趋势，而渗压降动态稳定趋势。

综上，土工膜防渗水库的渗漏问题比较复杂，土工膜下渗压及渗压降变化幅度剧烈，不同于稳定渗流

情况, 为典型的非稳定渗流问题, 对应的土工膜下渗压及渗压降的变化规律迥异, 不仅与库水位变化相关, 还反映了土工膜防渗的内部结构变化, 为此需要通过数值反演方法进行深入研究。

3 土工膜防渗水库的渗流场模拟分析

根据监测资料, 西夏水库绝大部分的渗流监测断面的数据与库水深度的变化无明显协调性, 进而推测水库库区大部区域的土工膜完好。而根据#2 断面 0+587 的测点 P4-7 的渗压测试值与库水位变化的对应关系, 确定该测点库区内坡脚为土工膜缺陷区域。于是以断面 0+587 库区内坡脚为参考点, 沿 X 方向, 即垂直于围堤轴向在库区内延伸 200 m, 包含围堤及其外坡脚向外延伸 100 m; Y 方向, 即沿围堤轴向延伸 100 m, Z 方向地基深度 60 m, 建立水库三维渗流场模型, 如图 8 所示。完好土工膜的渗透系数为 1.0×10^{-13} m/s, 厚度为 0.8 mm, 将土工膜与保护层、部分支承层一起看作防渗层, 取防渗层厚度 $h_2=0.60$ m, 于是式 (1) 求得完好土工膜防渗层的等效渗透系数为 7.5×10^{-11} m/s。设坡脚缺陷土工膜防渗层的面积为 4 m^2 , 平面尺寸 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 两个、竖向两层共 4 个单元, 该等效渗透系数可由库水位与 P4-7 点的渗透压力监测值的相关关系反演确定。模型取三维八节点孔压单元 (C3D8P) 类型, 并在模型角边线 X 方向分 62 段、 Y 方向分 10 段、 Z 方向 16 段进行自动网格剖分。结果如图 8 所示, 共计单元数 10012 个。渗流模型计算参数为渗透系数, 如表 1 所示。模型底面为不排水边界, 库区表面和坝坡上游坡面的水头由库水位决定, 其他地下水位以上侧面与表面单元为排水边界。模型初始孔压值根据地下水位位置计算获得。

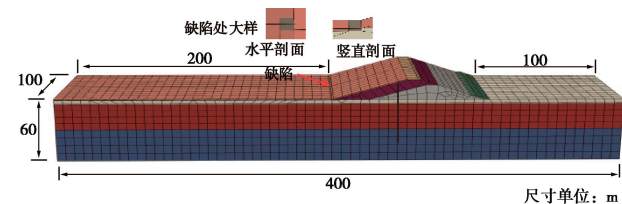


图 8 三维渗流模型及网格剖分

Fig. 8 Three-dimensional seepage model and meshes

表 1 渗流模型计算的渗透系数

Table 1 Permeability coefficients calculated by seepage model			
土层	渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	土层	渗透系数 $k/$ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
围堤面板及保护层	1.00×10^{-6}	早期坝体区	2.19×10^{-5}
完好土工膜防渗层	7.50×10^{-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}

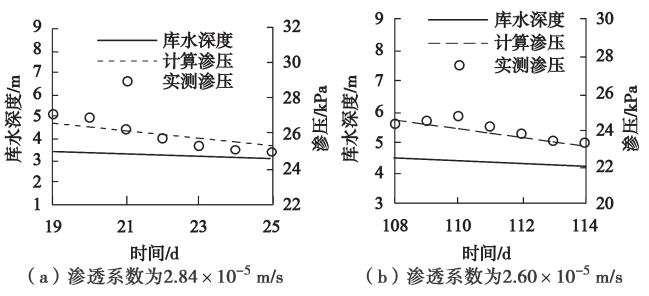
4 缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数反演分析

西夏水库因向居民供水而致使库水位持续下降, 然后再引黄河水入库而使库水位上升, 由此库水位具有峰值和低值之分, 处于呈动态变化, 相应水库防渗层渗流处于非稳定状态。然而考虑数值模拟计算的可行性需求, 可将库水位和土工膜防渗层等效渗透系数近似看作短期稳定不变, 即将水库动态运行过程看作由多个局部稳定渗流过程构成^[20], 进行非稳定渗流计算。

从本工程监测渗流数据中选取 10 个持续 7 d 的水库运行过程来反映缺陷土工膜防渗层在水库运行过程中演化规律, 如表 2 所示, 库水深度与实测渗压呈现高度相关性, 大多数达到 0.90 以上。缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数反演时, 设初始值 k_{dg0} , 与表 1 的相关参数及库水位高度一起代入模型中进行非稳定渗流试算, 求出测点 P4-7 渗压计算值 u_{wc0} , 并与该点渗压实测值 u_{wm} 对比, 计算差值, 以确定过程值 k_{dg1} , 再重新计算; 如此迭代计算, 直至相邻两次的缺陷土工膜防渗层等效渗透系数的相对差值小于 5%。模拟结果如图 9 所示, 各个过程计算值与实测值趋势均较为一致, 说明本文的渗流模型与计算参数合理, 结果较好地反映了水库运行过程中的土工膜下渗压变化状态。

表 2 反映水库运行过程的监测渗流数据统计

Table 2 Statistics on monitored seepage data reflecting reservoir operational processes				
序号	时间/d	库水深度/m	实测渗压/kPa	相关系数 R^2
1	19~25	3.290~3.090	27.07~24.93	0.9135
2	108~114	4.434~4.146	24.31~23.29	0.7898
3	200~206	5.248~4.702	19.48~17.45	0.9120
4	307~315	11.708~10.430	36.89~34.73	0.9502
5	474~480	6.370~9.335	29.17~41.49	0.9712
6	589~595	6.501~5.383	36.22~31.63	0.8846
7	807~813	12.001~10.906	82.46~76.17	0.9732
8	972~978	11.895~10.185	77.35~67.11	0.9942
9	1109~1115	15.725~14.512	108.87~102.03	0.9698
10	1215~1221	15.192~14.138	101.17~95.52	0.9888



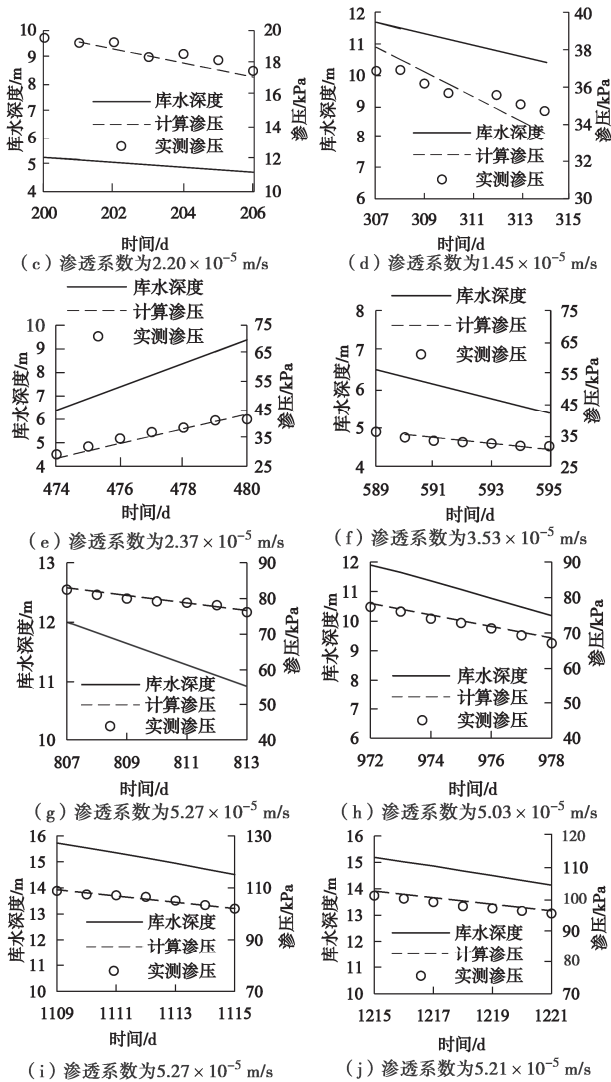


图9 缺陷土工膜防渗层等效渗透系数的反演

Fig. 9 Inversion of equivalent permeability coefficients of impermeable layer with defective geomembranes

缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数反演结果如图10所示。随着水库缺陷渗漏的持续发展,缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数变化分为降低、增长和稳定的3个阶段,正好与图7中动态上升初期、动态上升中期、动态稳定3阶段对应,这说明渗压降愈大,渗流阻力愈大,则等效渗透系数愈小,两者存在相互对应性。

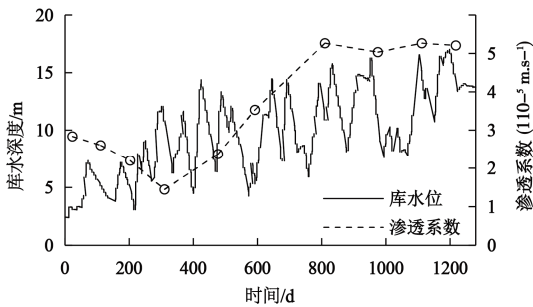


图10 缺陷土工膜防渗层等效渗透系数与库水深度的演化

Fig. 10 Evolution of equivalent permeability coefficient of impermeable layer with defective geomembranes with respect to reservoir depth

缺陷土工膜防渗层等效渗透系数的变化规律可用粗粒土渗透变形^[21]来解释,如图11所示。初始状态是土工膜作为防渗材料,其上接触层为回填细砂开挖料,下接触层为角砾土地基,属于粗粒土,具有孔隙较大、渗透性较大的特点。水库蓄水后,水压增大,发生缺陷渗漏。首先是土工膜上的水力坡降大于细颗粒的临界值 J_1 时,引发细颗粒流动,随水流通过土工膜缺陷,并在土工膜下接触层的孔隙中沉积,说明此处水力坡降小于细颗粒的临界值 J_2 ,所以土工膜上接触层发生局部潜蚀^[20],膜下接触层出现填充密实,这是与蒋中明等报道的粗粒土在渗透变形过程中的细观数值试验所显示的结果相同^[22],如图11(b)所示。随着库水位持续动态升高,当土工膜下的水力坡降大于临界值 J_2 时,土工膜下角砾土的细颗粒土发生了流失现象,并逐渐贯通,渗透性增大,如图11(c)所示;土工膜下角砾层渗透性增大,反过来增大土工膜缺陷的渗流量^[2, 14-15]。图11(d)表示在较高库水位动态作用下,土工膜下角砾土层中的细颗粒不断流失,使水流影响区内更多的孔隙通道贯通,最终达到相对稳定状态,这与袁涛对粗粒土渗透变形试验的结果相同^[23]。图11表明土工膜缺陷渗漏本身为缝、孔隙流,具有显著的管涌特征,其发展规律与土工膜上下砂垫层、角砾土等粗粒土渗透变形特性相对应,并与土工膜下渗压及渗压降的变化规律相对应。

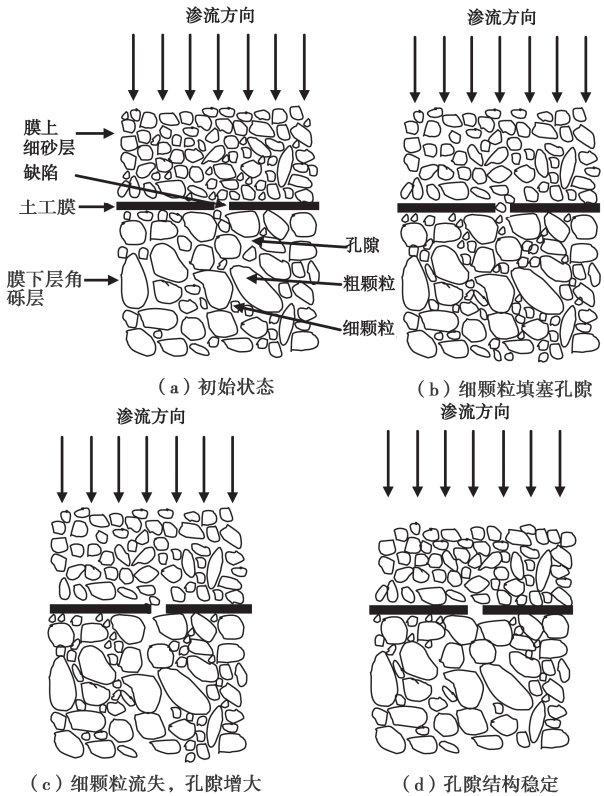


图11 缺陷土工膜防渗层等效渗透系数变化过程的解释示意图
Fig. 11 Interpretation of change process of equivalent permeability coefficient of impermeable layer with defective geomembranes

5 分析与讨论

5.1 关于缺陷土工膜防渗层的模拟方法

水库渗漏是关乎库区围堤道路安全、边坡稳定及周边居民生活的重要课题。关于土工膜防渗水库渗漏问题, 虽然是工程界的研究热点, 但是研究成果却停留于试验阶段^[16], 原因是土工膜缺陷渗漏影响因素众多, 机理复杂多变, 与土工膜缺陷特点密切相关。为此, 本文针对土工膜厚度超薄、缺陷孔径微小的特点, 结合土工膜缺陷渗流特征, 提出以缺陷为参考点将一定平面区域和厚度的土工膜及接触层整体看作缺陷土工膜防渗层的模拟方法。该方法优点突出, 表现有以下 4 点:

(1) 缺陷土工膜防渗层包含了土工膜缺陷, 并且在平面和厚度的尺寸上基本达到了一般地层单元尺寸的量级, 进而解决了土工膜超薄、缺陷孔径微小的问题, 消除了网格剖分问题。

(2) 缺陷土工膜防渗层虽然包含土工膜缺陷的复杂流态, 但从四周来看, 仍近似满足达西定律的层流条件, 进而解决缺陷处渗流机理复杂、水流态复杂等难题。

(3) 当土工膜的缺陷确定, 土工膜的接触层渗透性基本稳定, 则可由达西定律建立通过缺陷土工膜防渗层的渗流量与等效渗透系数的关系, 进而使影响通过土工膜缺陷渗流量的众多外在的接触层因素成为土工膜防渗层的内在因素。

(4) 基于土工膜接触层渗透性的相对稳定特点, 通过反演方法可获取不同水库状态下缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数, 据此分析土工膜缺陷渗流对接触层的渗透变形影响。因此本文方法是以宏观视角将细观层次的土工膜厚度、缺陷类型、接触层渗透性等问题均包裹于缺陷土工膜防渗层内, 将影响缺陷渗流的多个未知因素之间外在作用变为内部机制, 进而较为完美地解决了土工膜缺陷渗流难题, 大大提高了土工膜防渗水库工程建设、安全运营的实用性。

5.2 关于土工膜防渗水库的渗漏分析方法

基于西夏水库蓄水监测 1360 d 的渗漏数据, 并考虑土工膜缺陷的微小性、个别性, 将水库的土工膜防渗层划分为完好区与缺陷区两类。对土工膜下渗压或渗流量的监测数据随库水深度升降而协调变化的, 且具有较高正值相关系数的监测点, 可判断该测点附近存在明显渗漏, 进而划分出土工膜缺陷区; 而水库其他大部分区域则划分为土工膜完好区。由土工膜缺陷微小性、局部性可知, 完好区面积远远大于缺陷区。

现有研究成果从渗透系数角度将全库盘化为同一渗透区, 如黄耀英等^[24]基于实测水位反演获得的复合土工膜渗透系数为 1.11×10^{-12} m/s, 大于完好土工膜约 10^{-13} m/s, 可解释为土工膜老化衰变, 属于微观缺陷渗漏, 而非宏观缺陷渗漏。而本文提出的缺陷土工膜防渗层分析方法是针对土工膜宏观缺陷渗漏的, 反映了膜下渗压与库水深度升降而有协调变化的工况。由此本文的方法更适合于发现了局部渗流点的水库渗漏分析, 而对于无明显渗漏区, 即本文所划分的土工膜完好区, 其等效渗透系数是相同的, 属于同一渗透区, 也是本文分析方法的一部分。因此本文的研究方法通过划分完好区与缺陷区, 不仅考虑土工膜缺陷局部性分布特点, 避免了局部问题的过度扩大化, 还充分利用现场工程监测资料, 提高了模型的可靠性、针对性和计算参数的合理性。

5.3 土工膜防渗水库的运维情况分析

粗粒土渗透变形规律可解释缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数随着水库运行的变化规律。首先是基本条件符合, 即库址场分布的高渗透性的角砾和细砂可作为粗粒土渗透变形的土质条件, 且在土工膜缺陷口具有较高水力坡降构成动力条件。其次是分析结果相似。根据本文数值模拟反演结果, 在库水位运行过程中, 缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数变化呈现降低、增长与稳定的 3 个阶段, 正好与粗粒土渗透变形发展阶段对应, 这与土工膜下粗粒土地基渗流变形特性相符合。最后是机理解释合理。采用粗粒土接触层中的细颗粒流失, 解释接触层的渗透系数发生变化^[2, 14-15], 以及反向引发缺陷渗流量的变化。由此增强了本文研究成果的可信度。

6 结 论

(1) 阐述了缺陷土工膜渗漏的研究难点, 并根据土工膜缺陷渗流特征, 以宏观视角将细观层次的土工膜厚度、缺陷孔径尺寸问题包裹于缺陷土工膜防渗层内, 将影响缺陷渗流的多个未知因素之间外在作用变为内部机制, 进而提出了缺陷土工膜防渗层的模拟方法。

(2) 通过 1360 d 的水库渗漏监测数据分析, 揭示了随着库水位峰值上升变化, 土工膜下监测点的渗压及渗压降发展有 3 个阶段: 动态上升初期、动态上升中期阶段、动态稳定阶段。

(3) 根据监测资料, 明确了土工膜防渗层的缺陷区位置, 建立水库三维土工膜缺陷渗流模型, 结合水库渗漏区在运营过程中的渗流监测数据, 通过非稳定渗流计算, 反演并验证了缺陷土工膜防渗层的渗透系

数。

(4) 通过反演水库 10 个运行过程的缺陷土工膜防渗层等效渗透系数, 研究表明缺陷土工膜防渗层的等效渗透系数随着水库运行而呈现的变化规律与粗粒土渗透变形相似, 并与土工膜下监测点的渗压及渗压降的 3 个阶段对应, 进而反映了水库缺陷渗漏发展趋势。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 曹雪山、施钦译和薛猛直接参与了数值模拟的方法构思与实施、成果分析与凝练工作; 廖志彬、袁俊平为本文获取经费支持、为现场数值收集提供帮助; 袁俊平、曹雪山、廖志彬、丁国权共同完成了论文起草、修改工作。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。CAO Xueshan, SHI Qinyi, and XUE Meng directly participated in the conceptualization, implementation of numerical simulation methodology, as well as analysis and refinement of research findings. CAO Xueshan, SHI Qinyi, and XUE Meng secured funding support for this study and assisted in field data collection. YUAN Junping, CAO Xueshan, and LIAO Zhibin conducted the field data collection. YUAN Junping, CAO Xueshan, LIAO Zhibin, and DING Guoquan collectively contributed to manuscript drafting and revision. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献:

- [1] 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. (CAO Xueshan, YUAN Junping, DING Guoquan. Numerical simulation of air resistance of French drains beneath geomembrane in field vacuuming tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(10): 1780-1788. (in Chinese))
- [2] ROWE R K, FAN J Y. 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.
- [3] 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. (LIAO Zhibin, YUAN Junping, CAO Xueshan, et al. Study on geomembrane impermeable structure scheme of plain reservoir and its influencing factors: an example of Xixia Reservoir[J]. Henan Science, 2022, **40**(11): 1768-1775. (in Chinese))
- [4] 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. (CEN Weijun, CHEN Sining, LI Dengjun, et al. Characteristic analysis of 3D seepage field of a geomembrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, **49**(5): 413-418. (in Chinese))
- [5] VORLET S L, DE CESARE G. A comprehensive review on geomembrane systems application in hydropower[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, **189**: 113951.
- [6] CAO X S, YUAN J P, YIN Z Z, 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.
- [7] CAO X S, YUAN J P, HE G L, et al. In situ test and analysis method of air bulging under geomembranes in a shallow-lined reservoir[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, **43**(1): 24-34.
- [8] 水电工程土工膜防渗技术规范: NB/T35027—2014[S]. 2014. (Technical Code for Geomembrane-Based Anti-Seepage of Hydropower Projects: NB/T35027 — 2014[S]. 2014. (in Chinese))
- [9] 张 鹏, 王 建, 彭泽豹. 基于有限元模拟的溃修段堤防局部沉陷成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 160-163, 169. (ZHANG Peng, WANG Jian, PENG Zebao. Analysis of the causes of local subsidence of embankment in routed section based on finite element simulation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(12): 160-163, 169. (in Chinese))
- [10] MESSERKLINGER S. Failure of a geomembrane lined embankment dam-case study[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(3): 256-266.
- [11] 岑威钧, 耿利彦, 和浩楠. 库水降落时坝面缺陷土工膜的局部抗滑稳定性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(5): 965-972. (CEN Weijun, GENG Liyan, HE Haonan. Local anti-sliding stability of geomembrane with defect on upstream dam surface under drawdown of reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, **26**(5): 965-972. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] WALTON J, RAHMAN M, CASEY D, et al. Leakage through flaws in geomembrane liners[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(6): 534-539.
- [14] FAN J Y, ROWE R K. Piping of silty sand tailings through a circular geomembrane hole[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, **50**(1): 183-196.
- [15] FAN J Y, 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.
- [16] 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. (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of(composite) geomembrane in earth-rock dams[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, **36**(1): 16-22. (in Chinese))
- [17] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: part I. geomembrane liners[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1989, **8**(1): 27-67.
- [18] 沈振中, 江 沅, 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))
- [19] 廖志彬, 胡婉婷, 安彦平, 等. 土工膜防渗水库的缺陷渗漏量估算方法研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, **35**(5): 130-136. (LIAO Zhibin, HU Wanting, AN Yanping, et al. Estimation method of defective leakage in geomembrane impermeable reservoirs[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2024, **35**(5): 130-136. (in Chinese))
- [20] 陈 亮, 雷 文, 张红宇, 等. 非稳定流作用下管涌发生发展的室内试验及理论分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(4): 655-662. (CHEN Liang, LEI Wen, ZHANG Hongyu, et al. Laboratory simulation and theoretical analysis of piping mechanism under unsteady flows[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(4): 655-662. (in Chinese))
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [22] 蒋中明, 袁 涛, 刘德谦, 等. 粗粒土渗透变形特性的细观数值试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(4): 752-758, 706. (JIANG Zhongming, YUAN Tao, LIU Deqian, et al. Mesoscopic numerical tests on seepage failure characteristics of coarse grained soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(4): 752-758, 706. (in Chinese))
- [23] 袁 涛, 蒋中明, 刘德谦, 等. 粗粒土渗透损伤特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(4): 1311-1316, 1336. (YUAN Tao, JIANG Zhongming, LIU Deqian, et al. Experiment on the seepage damage coarse grain soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(4): 1311-1316, 1336. (in Chinese))
- [24] 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. (HUANG Yaoying, XIE Tong, FEI Dawei, et al. Feedback on work behavior of composite geomembrane in Wangfuzhou hydraulic project based on measured piezometric level[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(3): 564-571. (in Chinese))