

DOI: 10.11779/CJGE202103020

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

黄耀英¹, 谢同¹, 费大伟¹, 包腾飞², 颜剑³

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024; 3. 湖北汉江王甫洲水力发电有限责任公司, 湖北 襄阳 430048)

摘要: 基于王甫洲水利工程近 20 a 的渗流监测资料, 对复合土工膜的防渗工作性态进行反馈分析。首先对围堤土石坝整体渗流性态进行定性分析; 然后选取典型断面建立测压管水位统计模型进行定量分析; 接着采用正交设计-神经网络-数值计算相结合的方法, 反演复合土工膜的渗透系数; 最后对复合土工膜工作性态进行综合分析。研究表明, 测压管实测水位仅在蓄水运行初期出现较大变幅, 目前变化较平稳; 典型 GY5 断面中 3 支测压管的实测水位和分离出的时效分量均呈逐渐减小的趋势; 基于实测水位反演获得的复合土工膜渗透系数为 1.11×10^{-10} cm/s; 综合分析认为王甫洲水利工程复合土工膜经过约 20 a 的服役, 防渗效果依然良好且没有明显的老化趋势。

关键词: 复合土工膜; 渗流性态; 测压管水位; 统计模型; 参数反演

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)03-0564-08

作者简介: 黄耀英(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事水工程长效服役实验、数值计算及调控等方面的研究工作。

E-mail: huangyaoying@sohu.com。

Feedback on work behavior of composite geomembrane in Wangfuzhou hydraulic project based on measured piezometric level

HUANG Yao-ying¹, XIE Tong¹, FEI Da-wei¹, BAO Teng-fei², YAN Jian³

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Hubei Hanjiang Wangfuzhou Hydropower Co., Ltd., Xiangyang 430048, China)

Abstract: The feedback analysis of anti-seepage behavior of composite geomembrane is performed based on nearly 20 years of seepage monitoring data from Wangfuzhou hydraulic project. Firstly, the qualitative analysis of the overall seepage behavior of the embankment earth-rock dam is carried out. Then a typical section is selected to establish the statistical model of piezometric level for quantitative analysis. Subsequently, the orthogonal design, neural network and numerical method are combined to invert the permeability coefficient of the composite geomembrane. Finally, the work behavior of the composite geomembrane is analyzed comprehensively. The results show that the piezometric level only changes greatly at the initial stage of water storage and operation, and the change is relatively stable at present. Additionally, it is found that the piezometric level and separated time-dependent components of three piezometers in the typical GY5 section decrease gradually. At the same time, the permeability coefficient of the composite geomembrane inverted by the piezometric level is 1.11×10^{-10} cm/s. The comprehensive analysis shows that the composite geomembrane of Wangfuzhou hydraulic project still has good anti-seepage behavior after nearly 20 years of service, and there is no obvious aging trend.

Key words: composite geomembrane; seepage behavior; piezometric level; statistical model; parameter inversion

0 引言

与传统的土石坝防渗材料相比, 由高分子聚合物制成的土工膜具有更为优越的防渗性能, 其渗透系数一般小于 10^{-11} cm/s。目前常用的复合土工膜是在其两

面或一面热压土工织物而成, 这样既加大了抗拉强度又保护了土工膜不易被尖锐碎石刺破, 并且具有顺坡

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0407103)

收稿日期: 2020-04-20

排水的能力,更适用于筑坝^[1-3]。自 20 世纪 80 年代将土工膜作为水库大坝防渗主体在国内兴起以来,对土工膜的物理力学性能^[4-7]、防渗模拟计算方法^[8-12]以及施工工艺^[13-14]等各方面的研究一直在向前发展,并取得了丰富的成果。虽然土工膜目前已经得到了较为广泛地应用,但对于土工膜作为防渗主体的土石坝工程长期服役后工作性态的认识仍然不足,这在很大程度上制约了土工膜在土石坝中的应用。

国内外学者针对土工膜的耐久性和渗透性进行了一系列的试验研究^[3, 15-18]。结果表明,当土工膜处于坝体内或水中,甚至处于裸露环境中时,其老化过程较慢,且其防渗性能依然能够保持良好。此外,也有少量文献^[19]介绍了复合土工膜作为防渗主体时,大坝的渗流性态以及复合土工膜的防渗效果。总体来看,现有文献多从室内或现场试验以及数值模拟等角度对复合土工膜的防渗工作性态开展研究,少有基于长时间序列实测渗流资料对复合土工膜的防渗工作性态进行综合分析评价的文献。

王甫洲水利工程大量使用了复合土工膜防渗,设置了较多的观测仪器,并获得了相对完备的水库蓄水运行监测资料,在国内尚属首例^[20-21]。为了更加深入且准确地分析复合土工膜长期运行以后的防渗工作性态,本文充分利用王甫洲水利工程左、右岸围堤近 20 a 相对完备的渗流监测资料,首先从整体上定性分析全断面的渗流性态以及复合土工膜的防渗效果。然后选取典型断面建立测压管水位统计模型,并据此来定量分析典型断面的渗流性态以及复合土工膜的工作性态。接着建立典型断面的三维有限元模型,优化反演出合理的复合土工膜渗透系数。最后对长期运行后复合土工膜的防渗工作性态进行综合评价。

1 基于测压管实测水位的复合土工膜工作性态定性分析

1.1 工程概况

王甫洲水利枢纽工程位于湖北省老河口市近郊的汉江干流上。枢纽由位于主河道的泄水闸、主河床土石坝、谷城段土石坝以及位于老河道的电站厂房、船闸、混凝土重力坝和两岸围堤土石坝组成,整体布置如图 1 所示。水库正常蓄水位为 86.23 m,相应库容 1.495 亿 m³,校核洪水位 89.30 m,总库容 3.095 亿 m³。

老河道两岸围堤土石坝全长 12.6 km,分左、右岸两部分,最大坝高 13 m,迎水坡比 1:2.75,背水坡比 1:2.5,典型围堤断面 GY5 如图 2 所示。围堤土

石坝采用砂砾石填筑,聚乙烯(PE)复合土工膜防渗,其中迎水坡采用二布一膜(规格为 200/0.5/200),水平铺盖采用一布一膜(规格为 200/0.5),其控制性指标如表 1 所示。斜墙最大铺设长度为 30 m,最短为 17 m,水平铺盖的最大铺设长度达 105 m,最短为 25 m。围堤防渗及混凝土护坡工程中共计铺设了斜墙二布一膜 32.4 万 m²,水平铺盖一布一膜 75.4 万 m²,另外在混凝土护坡骑缝处铺设了土工布 7.22 万 m²,共计 115 万 m²。



图 1 王甫洲水利枢纽总平面布置图

Fig. 1 General layout of Wangfuzhou hydraulic project

1.2 围堤土石坝整体渗流性态定性分析

左、右岸围堤土石坝的坝轴线长,监测断面多,渗流监测布置的测压管数量大,运行时间长,这是王甫洲水利工程的突出特点,同时也是监测资料分析的难点。通过对围堤土石坝 13 个监测断面共计 56 支测压管进行整体分析,目前共有 13 支测压管为干孔,其中 10 支位于坝体内,3 支位于坝基。对剩余的 43 支测压管测值进行比选后,选取具有代表性且相对完整的 11 支测压管监测资料进行分析,测值序列从 2000 年 3 月 2 日至 2018 年 12 月 14 日。这 11 支测压管水位的特征值见表 2,水位过程线见图 3。其中,编号 GZ 代表左岸围堤,GY 代表右岸围堤。

表 1 复合土工膜与土工布的主要控制指标

Table 1 Main control indexes of composite geomembrane and geotextile

项目		一布 一膜	两布 一膜	土工布
单位面积质量(布)/(g·m ⁻²)		200	200	200
厚度*(膜)/mm		0.5	0.5	
抗拉 强度**	径向/(kN·m ⁻¹)	≥10	≥16	垂直渗透 系数
	纬向/(kN·m ⁻¹)	≥8.0	≥12.8	≥2×10 ⁻² cm/s
极限 延伸度	径向/%	≥60	≥60	有效孔径
	纬向/%	≥60	≥60	≤0.14 mm
撕裂强度/kN		≥0.3	≥0.5	
CBR 顶破强度/kN		≥2.0	≥3.0	≥0.5

注: *在 2 kPa 压力条件下的厚度; **按 5 cm 宽试样折算。

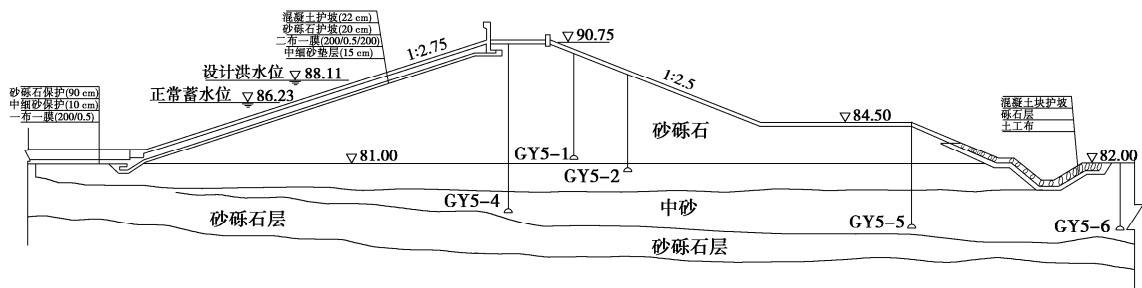


图 2 典型断面 GY5 及测压管布置

Fig. 2 Typical section GY5 and layout of its piezometric pipes

表 2 左、右岸围堤土石坝测压管水位特征值统计

Table 2 Characteristic values of piezometric level of earth-rock dam							
编号	最大值及库水位			最小值及库水位			最大年变幅/m
	测压管/m	库水位/m	年份	测压管/m	库水位/m	年份	
GZ2-2	82.66	86.56	2003	80.02	83.19	2000	2.35
GZ3-1	84.12	86.22	2000	81.73	83.19	2000	2.39
GZ4-1	83.98	85.97	2000	79.92	83.19	2000	4.06
GZ5-1	86.54	86.53	2007	82.03	83.19	2000	4.44
GZ6-2	86.23	86.35	2017	84.20	86.02	2018	1.85
GY2-1	82.44	86.32	2011	80.10	83.19	2000	1.88
GY3-1	82.47	86.32	2011	80.28	83.19	2000	1.81
GY4-2	82.46	86.35	2003	80.82	83.19	2000	1.50
GY5-2	83.12	86.35	2003	80.85	83.19	2000	2.14
GY6-2	84.71	86.23	2000	80.27	83.19	2000	4.44
GY7-2	85.50	86.47	2006	81.48	83.19	2000	3.46

降雨、上游来水及下泄影响而呈周期性变化，且目前测值基本趋于稳定。这说明围堤土石坝整体渗流性态良好，经长期运行以后复合土工膜的防渗效果依然良好。② 位于上游侧的 GZ5-1、GZ6-2、GY6-2、GY7-2 测压管水位较高，且基本随库水位变化而变化。从左、右岸围堤的坝轴线来看，测压管水位从上游到下游递减，位于中部监测断面的 GZ3-1、GZ4-1、GY5-2 测值最为平稳，且右岸围堤土石坝测压管水位相对来说规律性更强。

1.3 典型监测断面渗流性态定性分析

由于左岸围堤紧邻老河口市市区，而位于右岸围堤土石坝中间断面的测压管测值规律性更强，故选择右岸围堤 3+455.00 断面即右 5（GY5）断面进行后续统计模型建立以及复合土工膜渗透系数优化反演分析。GY5 断面及渗流观测设施布置如图 2 所示，其中 GY5-7 距离坝轴线太远，故未在图 2 中画出。围堤迎水坡采用两布一膜的复合土工膜防渗，水平铺盖则铺设长约 50 m 的一布一膜进行防渗。根据 2000 年 3 月 2 日至 2018 年 12 月 14 日 GY5 断面测压管水位观测资料（GY5-3 为废孔），各测压管水位特征值见表 3，坝体测压管水位过程线如图 4。

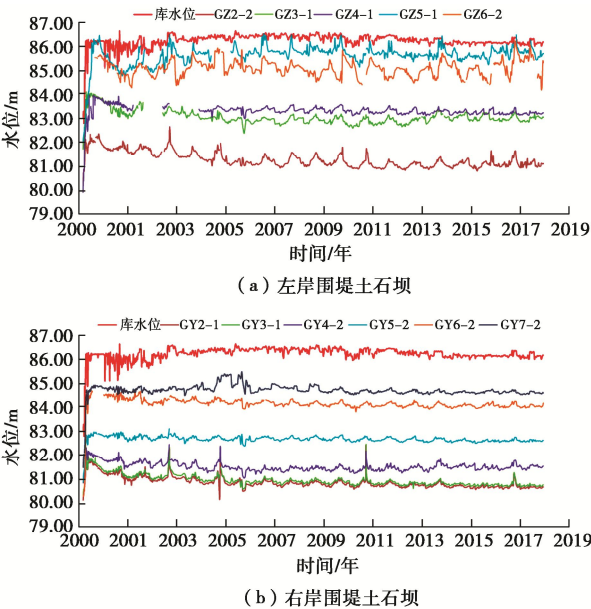


图 3 左、右岸围堤土石坝测压管水位测值过程线

Fig. 3 Hydrograph of piezometric level of earth-rock dam

由图 3，表 2 可见：① 测压管水位的特征值一般出现在 2000 年，即蓄水运行初期，少量测压管水位的特征值出现在其他年份的汛期。除在蓄水运行初期出现了较大变幅外，在运行期内测压管水位测值主要受

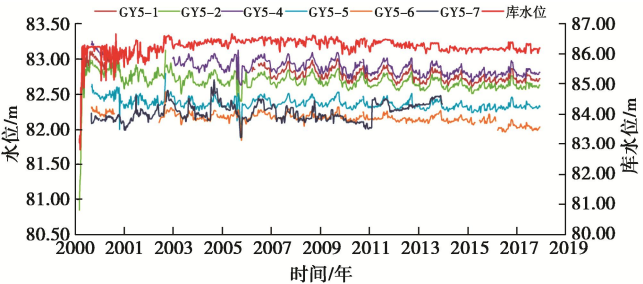


图 4 GY5 断面测压管水位测值过程线

Fig. 4 Hydrograph of piezometric level of GY5 section

由图 4，表 3 可见：除 GY5-7 在 2015 年以后为干孔外，其余 5 支测压管的测值在运行期内规律基本一致，均在蓄水运行初期出现较大变幅，而在运行期内较为平稳，且各测压管水位变化主要受库水位变化的影响。从监测断面看，各测压管水位从迎水面到背水面基本呈递减趋势，位于背水侧的 GY5-5、GY5-6

测压管水位明显低于位于坝中的 GY5-1、GY5-2、GY5-4, 这同样表明复合土工膜的防渗效果良好。为进一步定量分析库水位及其他因素对测压管水位的影响, 有必要选择规律性较好且较为完整的测压管水位测值建立统计模型进行定量分析。

表 3 GY5 断面测压管水位特征值统计

编号	最大值及库水位			最小值及库水位/m			最大年变幅/m
	测压管/m	库水位/m	年份	测压管/m	库水位/m	年份	
GY5-1	83.12	86.02	2001	82.23	84.79	2000	0.88
GY5-2	83.12	86.35	2003	80.85	83.19	2000	2.14
GY5-4	83.25	86.24	2000	82.63	86.39	2006	0.49
GY5-5	82.80	86.35	2003	82.00	85.81	2001	0.60
GY5-6	82.54	86.35	2003	81.85	86.36	2006	0.44
GY5-7	82.70	86.48	2005	81.89	86.39	2006	0.57

2 复合土工膜工作性态定量分析

2.1 测压管水位统计模型建立

现有文献[22, 23]中的测压管水位统计模型多是针对采用传统防渗材料的土石坝渗流特性所建立的。对于实际工程, 不同土石坝的结构和材料特性差异较大, 且渗流性态会受到多种外界因素的影响。结合 1.2 和 1.3 节对测压管水位的定性分析可知, 在运行期内测压管水位测值较为平稳且呈周期性变化。库水位作为测压管水位的主要影响因素, 虽然在运行期也存在一定的周期性变化, 但变化幅值相对较小, 故对测压管水位呈周期性变化的影响有限。考虑到 GY5 监测断面围堤最大高度仅为 9 m 左右, 当库水位长期处在正常蓄水位附近时, 围堤上游坡面大部分在水面以上, 而围堤筑坝主体材料为砂砾石, 一定程度受环境气温等外界因素的影响。为此, 参考相关文献[24]并进行试算后, 通过增加周期项函数来描述周期性变化的环境因素对测压管水位的影响。同时基于本工程库水位和降雨的特点以及参考相关文献[25]并进行试算后, 确定了本次统计模型中库水位均值和降雨量均值的前溯时间。由此建立 GY5 断面测压管水位的统计模型为

$$H(t) = H_h + H_R + H_\theta + H_E = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \bar{H}_i + \sum_{j=1}^4 b_j \bar{R}_j + c_1 \theta + c_2 \ln \theta + \sum_{i=1}^2 \left[d_{1i} \sin \frac{2\pi i t}{365} + d_{2i} \cos \frac{2\pi i t}{365} \right] \quad (1)$$

式中 $H(t)$ 为测压管水位; H_h 为库水位分量; H_R 为降雨分量; H_θ 为时效分量; H_E 为周期性环境分量; a_0 为常数项; a_i 为库水位分量的回归系数; \bar{H}_i 为观测日当天、前 1~2 d、前 3~5 d、前 6~15 d、前 16~30 d 的 (平均) 上游库水位 ($i=1\sim5$); b_j 为降雨分量的回

归系数, \bar{R}_j 为观测日当天、前 1~2 d、前 3~5 d、前 6~15 d 的 (平均) 降雨量 ($j=1\sim4$); c_1, c_2 为时效因子的回归系数, θ 为观测当日至蓄水观测起始日的累计天数除以 100; d_{1i}, d_{2i} 为周期项因子的回归系数 ($i=1\sim2$)。

2.2 统计模型计算结果及分析

由于 GY5-1、GY5-2、GY5-4 的测值相对来说规律性更强, 故选择这 3 支测压管的测值序列建立统计模型。采用逐步回归分析法获得了统计模型中各个因子的回归系数, 同时根据测压管水位实测值和拟合值可计算出复相关系数 R 分别为 0.892, 0.962, 0.834。各测压管水位实测值、拟合值和分离出来的时效分量过程线如图 5 所示。

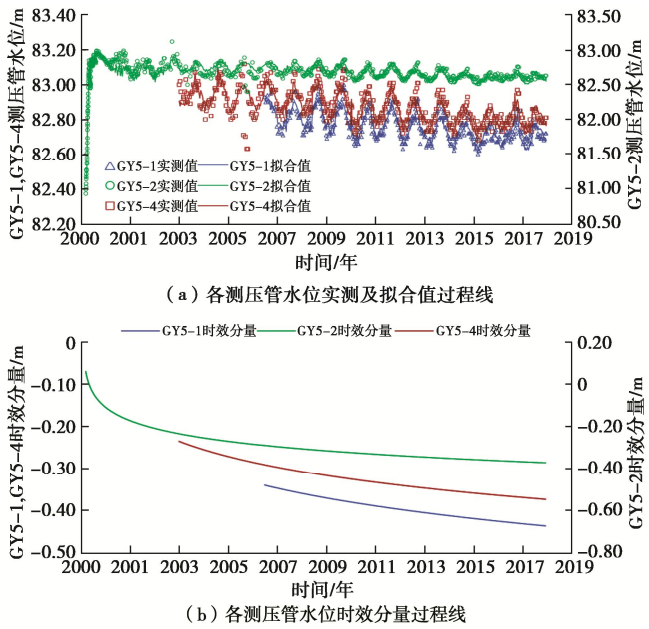


图 5 GY5-1~GY5-4 测压管水位的实测值、拟合值及时效分量过程线

Fig. 5 Measured and fitting values and time-dependent component hydrograph of piezometric levels of GY5-1~GY5-4

计算结果表明, 根据本工程实际特点所建立的测压管水位统计模型拟合效果良好, 能够定量反映出 GY5 断面的渗流特性。这 3 支测压管的时效分量与实测值的变化规律一致, 在运行期保持稳定的同时呈一定程度减小的趋势, 这表明 GY5 断面整体渗流性态的变化趋势是稳定且有利的。究其原因, 随着服役时间的增长, 水库泥沙和地基可能出现了淤积和固结, 而复合土工膜经过近 20 a 服役后其防渗效果依然保持良好, 没有出现明显的劣化现象, 从而使得围堤整体渗透系数逐渐减小并导致测压管水位实测值缓慢降低。

3 复合土工膜渗透系数优化反演

由于统计模型本质上是一种经验模型，主要依靠数理统计对测压管水位进行分析，而对大坝的工作性态不能从力学本质上加以解释。为此，以下建立 GY5 典型监测断面的有限元数值模型，采用正交设计-神经网络-数值计算的方法进行复合土工膜渗透系数的优化反演分析。

3.1 优化反演原理

根据 GY5 断面实际运行情况以及参考已有的检测报告，对断面的材料参数进行概化处理：围堤上游侧复合土工膜概化为材料 1，坝体砂砾石概化为材料 2，坝基砂壤土概化为材料 3，坝基中细砂层概化为材料 4，坝基砂砾石层概化为材料 5，基岩概化为材料 6。由于复合土工膜和坝体砂砾石是影响围堤渗流性态的主要材料，为此重点进行材料 1（复合土工膜）和材料 2（坝体砂砾石）渗透系数的优化反演，其它材料参数采用设计值或现场检测值。主要优化反演流程如图 6 所示。

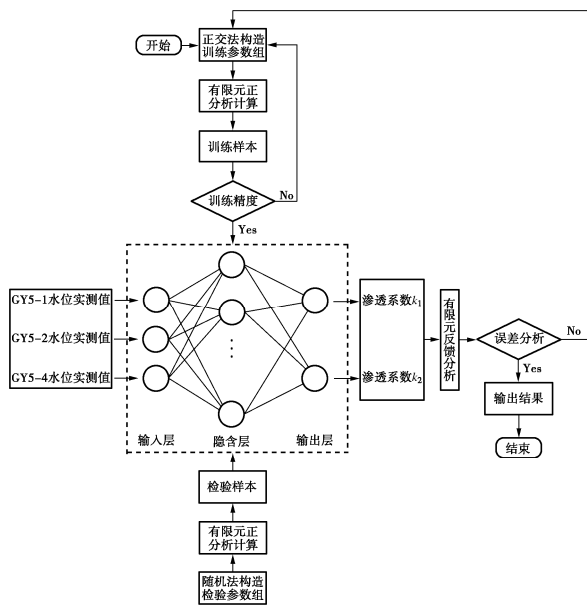


图 6 渗透系数反演流程

Fig. 6 Inversion process of permeability coefficient

3.2 模型的建立及工况选取

采用六面体八节点等参单元及少量退化的三棱柱和四面体单元进行 GY5 断面三维有限元模型的网格剖分。模型采用右手坐标系， x 轴的正向为顺河向， y 轴沿右岸围堤轴线方向从左到右为正向， z 轴正向竖直向上。模型底面及上、下游两端侧面为不透水边界，围堤上、下游分别施加上游水头和下游水头。

由于（复合）土工膜的厚度为毫米级，参考文献 [26, 27]，当土工膜的厚度增大 n 倍时，土工膜依然

可以简化为各向同性渗透介质，此时在（复合）土工膜厚度方向上和平面上的渗透系数增大 n 倍。故在本文的计算中，将厚度 0.5 mm 的复合土工膜放大 600 倍后等效为 30 cm 厚的多孔介质防渗层。

根据土工膜生产厂家提供的报告以及工程地质勘察报告确定 GY5 断面各分区渗透系数的初始值，如表 4 所示。参考相关文献[26, 27]及辅助试算后，确定复合土工膜 (k_1) 和坝体砂砾石 (k_2) 渗透系数的取值范围分别为初始值的 8~14 倍和 0.8~1.4 倍。结合 GY5 断面渗流监测资料分析成果，以及降雨实测资料，选取 2018 年 9 月—10 月的平均上、下游库水位 H_1 和 H_2 作为计算工况，分别为 86.15 m 和 81.00 m。由于这段时间内降雨较少，测压管实测水位主要受库水位影响，故不考虑降雨分量。

表 4 渗流场各分区渗透系数初始值

Table 4 Initial values of permeability coefficient of each zone in seepage field

符号	渗透系数分区	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	
		k_y	k_x
k_1	复合土工膜	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}
k_2	坝体砂砾石	3.40×10^{-2}	3.40×10^{-2}
k_3	坝基砂壤土	2.20×10^{-3}	2.20×10^{-3}
k_4	坝基中细砂层	2.40×10^{-2}	2.40×10^{-2}
k_5	坝基砂砾石层	3.40×10^{-2}	3.40×10^{-2}
k_6	基岩	5.00×10^{-5}	5.00×10^{-5}

3.3 训练样本及神经网络检验

结合正交设计表 $L_{16}(4^2)$ 拟定了 16 种不同参数组合，经有限元模型计算后可以得到 16 组训练样本，如表 5 所示。

表 5 反演训练样本

Table 5 Inversion training samples

样本数	渗透系数/(cm·s ⁻¹)		测压管水位计算值/m		
	$k_1/10^{-11}$	$k_2/10^{-2}$	GY5-1	GY5-2	GY5-4
1	8.00	2.72	82.793	82.672	82.916
2	8.00	3.40	82.736	82.622	82.854
3	8.00	4.08	82.689	82.573	82.801
4	8.00	4.76	82.380	82.542	82.781
...
13	14.00	2.72	82.800	82.675	82.919
14	14.00	3.40	82.741	82.623	82.855
15	14.00	4.08	82.693	82.572	82.801
16	14.00	4.76	82.380	82.539	82.778

运用 MATLAB 中的神经网络工具箱，将训练样本归一化处理后输入到神经网络模型中进行训练，经 5488 次学习训练后神经网络模型的精度达到预期，迭代后所得的均方误差降至 0.05 以下，由此建立了测压管水位-渗透系数之间的非线性映射关系。同时为了检验训练好的神经网络模型的准确性，基于随机法增加了 4 组参数组合，经有限元模型计算后得到 4 组检验样本。将检验样本中的测压管水位计算值归一化处理后输入到训练好的神经网络模型中，可以反演得到

相对应的渗透系数, 计算结果如表 6 所示。由此可见训练得到的神经网络模型是可靠的, 能够很好的反映测压管水位 - 渗透系数之间的非线性映射关系。

表 6 检验样本计算成果

Table 6 Calculated results of test samples					
检验样本渗透系数 /(cm·s ⁻¹)		反演渗透系数 /(cm·s ⁻¹)		相对 误差/%	
$k_1/10^{-11}$	$k_2/10^{-2}$	$k_1/10^{-11}$	$k_2/10^{-2}$		
10.00	3.06	9.72	3.05	2.78	0.48
10.00	4.25	9.63	4.20	3.69	1.20
10.00	4.42	9.70	4.33	3.04	2.09
10.00	4.59	10.20	4.59	1.90	0.05

3.4 参数反演结果

将 2018 年 9—10 月各支测压管水位实测值的平均值, 分别为 82.70, 82.62, 82.80 m 作为反演输入值, 经归一化处理后输入到训练好的神经网络模型中即可得到待反演参数。经计算, 复合土工膜渗透系数 k_1 为 1.11×10^{-10} cm/s, 坝体砂砾石渗透系数 k_2 为 3.81×10^{-2} cm/s, 其中 k_1 相对于初始值劣化程度为 1106.07%, k_2 劣化程度为 112.00%。为了验证反演结果的合理性, 将反演获得的复合土工膜和坝体砂砾石渗透系数输入到有限元模型中进行计算, 得到 3 支测压管水位计算值分别为 82.71, 82.59, 82.82 m, 其与实测均值相差都很小, 相对误差分别为 0.01%, 0.02%, 0.03%, 这说明此次反演的结果是可靠的。由于反演获得的复合土工膜渗透系数为等效渗透系数, 综合反映了现场施工工艺和施工铺设质量等因素, 一般高于厂家给出的渗透系数检测值。此外, 文献[2, 7]也表明, 复合土工膜的渗透系数一般在 10^{-10} cm/s~ 10^{-13} cm/s, 这表明王甫洲水利工程复合土工膜的防渗性能依然良好, 未出现明显劣化。

4 结 论

(1) 对王甫洲水利工程左、右岸围堤土石坝渗流监测资料的整体定性分析表明, 在运行了近 20 a 以后, 坝体和坝基的 13 支测压管出现了干孔的情况, 而其余的测压管除了在蓄水运行初期会出现水位变幅较大的情况外, 在运行期内测值较为平稳, 且多年的变化规律一致。而对典型监测断面 GY5 的渗流监测资料进行定性分析后发现, 除了测值较为平稳以外, 各测压管水位变化主要受库水位变化的影响, 且测压管水位从迎水侧到背水侧呈递减趋势。这表明左、右岸围堤土石坝整体渗流性态良好, 复合土工膜的防渗效果依然良好。

(2) 通过对典型监测断面 GY5 的 3 支测压管建立统计模型定量分析, 发现测压管的时效分量与实测

值均呈逐渐减小的趋势。这也表明 GY5 断面渗流性态良好, 复合土工膜的防渗效果并没有随着运行时间的增长而明显的劣化, 且水库泥沙和地基随着运行时间的增长出现了淤积和固结等情况, 使得围堤整体渗透系数逐渐减小, 从而导致测压管水位实测值逐渐降低。

(3) 基于 GY5 断面渗流监测资料, 优化反演出复合土工膜和坝体砂砾石的渗透系数, 分别为 1.11×10^{-10} cm/s 和 3.81×10^{-2} cm/s。复合土工膜的渗透系数相较于初始值变化较大, 但结合渗流监测资料的分析成果以及参考相关文献后可认为, 王甫洲水利工程复合土工膜的防渗工作性态依然良好, 未出现明显劣化。

参考文献:

[1] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 118 - 127. (Editing Committee of the Application Manual of Geosynthetics. The Application Manual of Geosynthetics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 118 - 127. (in Chinese))

[2] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 1 - 9. (SHU Yi-ming, WU Hai-min, JIANG Xiao-zhen. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 1 - 9. (in Chinese))

[3] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例评述[J]. 水利水电技术, 2002, 33(12): 26 - 32. (GU Gan-chen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(12): 26 - 32. (in Chinese))

[4] 任大春, 张 伟, 吴昌瑜, 等. 复合土工膜的试验技术和作用机理[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 10 - 13. (REN Da-chun, ZHANG Wei, WU Chang-yu, BAO Cheng-gang. Testing techniques and functional mechanism of composite geomembranes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 10 - 13. (in Chinese))

[5] 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. (XUE Xia, LI Wang-lin, LI Chen, WEI Ru-chun, et al. Experimental study on expansion deformation of non-thermal-bonding composite geomembrane under ring restraint[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1145 - 1150. (in Chinese))

[6] 张宪雷, 刘云锋, 顾 克, 等. 高面膜土石坝防渗结构中土

- 工膜弯折(褶皱)试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(8): 1555 - 1561. (ZHANG Xian-lei, LIU Yun-feng, GU Ke, et al. Experimental study on geomembrane bending (folding) in anti-seepage structure of membrane-faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(8): 1555 - 1561. (in Chinese))
- [7] 张光伟, 张虎元, 杨 博. 高密度聚乙烯复合土工膜性能的室内测试与评价[J]. 水利学报, 2012, **43**(8): 967 - 973. (ZHANG Guang-wei, ZHANG Hu-yuan, YANG Bo. Laboratory determination and evaluation on the characteristics of composite geomembrane[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(8): 967 - 973. (in Chinese))
- [8] 陶同康. 复合土工薄膜及其防渗设计[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(2): 31 - 39. (TAO Tong-kang. Design of impervious layer for embankment dam with geotextile-geomembrane composites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(2): 31 - 39. (in Chinese))
- [9] 王党在, 李章浩, 王瑞骏. 复合土工膜防渗体土石坝渗流有限元分析[J]. 人民黄河, 2004, **26**(12): 37 - 38. (WANG Dang-zai, LI Hao-zhang, WANG Rui-jun. Finite element analysis of seepage of earth-rock dam with composite geomembrane impervious core[J]. Yellow River, 2004, **26**(12): 37 - 38. (in Chinese))
- [10] 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 Zhen-zhong, JIANG Hang, SHEN Chang-song. 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))
- [11] 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 Chuan-qi, LI Chao-chao, 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))
- [12] 姜海波. 高土石坝黏土心墙和复合土工膜防渗性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, **24**(4): 90 - 93, 97. (JIANG Hai-bo. Study on impermeability clay core wall and composite geo-membrane for high earth-rock dam[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, **24**(4): 90 - 93, 97. (in Chinese))
- [13] 李 波, 程永辉, 程展林. 围堰防渗墙与复合土工膜联接型式离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 2081 - 2086. (LI Bo, CHENG Yong-hui, CHENG Zhan-lin. Centrifugal model tests on connecting form between cutoff wall and composite geomembrane of cofferdam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 2081 - 2086. (in Chinese))
- [14] 梁伦法, 李华艳, 石含鑫, 等. 复合土工膜应用于堆渣坝防渗设计[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 1): 37 - 41. (LIANG Lun-fa, LI Hua-yan, SHI Han-xin, et al. Application of composite geomembrane in seepage control of slag dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S1): 37 - 41. (in Chinese))
- [15] SCHMIDT R K, YOUNG C, HELWITT J. Long term field performance of geomembranes-15 years experience[C]// Proceeding of the International Conference on Geomembranes, 1984, Denver.
- [16] CAZZUFFI D, GIOFFRE D. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, **48**(2): 130 - 136.
- [17] 余 玲, 赵文昌, 闵令民. PVC 复合土工膜老化性能初探[J]. 水利水电技术, 1996(11): 59 - 62. (YU Ling, ZHAO Wen-chang, MIN Ling-min. Studies on ageing characteristics of PVC geocomposite membrane[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1996(11): 59 - 62. (in Chinese))
- [18] 王殿武, 曹广祝, 仵彦卿. 土工合成材料力学耐久性规律研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 398 - 402. (WANG Dian-wu, CAO Guang-zhu, WU Yan-qing. Research on the durability law of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 398 - 402. (in Chinese))
- [19] 魏光辉. 复合土工膜防渗体系下的希尼尔水库大坝渗流分析[J]. 水电站设计, 2016, **32**(1): 20 - 27. (WEI Guang-hui. Seepage analysis of Hinir reservoir dam under composite geomembrane seepage control system[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2016, **32**(1): 20 - 27. (in Chinese))
- [20] 冯 琨. 复合土工膜在王甫洲水利枢纽中的应用[J]. 人民长江, 1999, **30**(7): 12 - 13, 17. (FENG Li. Application of composite geomembrane in Wangfuzhou water control project[J]. Yangtze River, 1999, **30**(7): 12 - 13, 17. (in Chinese))
- [21] 冯 琨. 汉江王甫洲坝堤复合土工膜防渗工程原型观测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, **27**(6): 59 - 62. (FENG

- Li. The prototype observation of hanjiang wangfuzhou dam with composite geomembrane antiseepage project[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(6): 59 - 62. (in Chinese))
- [22] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (WU Zhong-ru. Safety Monitoring Theory & Its Application of Hydraulic Structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese))
- [23] 梁国钱, 郑敏生, 孙伯永, 等. 土石坝渗流观测资料分析模型及方法[J]. 水利学报, 2003(2): 83 - 87. (LIANG Guo-qian, ZHENG Min-sheng, SUN Bo-yong, et al. Analysis model and method of seepage observation data for earth rock-fill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(2): 83 - 87. (in Chinese))
- [24] 刘应龙, 傅蜀燕, 盛韬桢, 等. 考虑滞后效应的复合土工膜土石坝渗流安全性态分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 46 - 49. (LIU Ying-long, FU Shu-yan, SHENG Tao-zhen, et al. Seepage safety status analysis of composite geomembrane earth-rock dam considering lag effect[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(10): 46 - 49. (in Chinese))
- [25] 倪化勇, 巴仁基, 刘宇杰. 四川省石棉县地质灾害发生的雨量条件与气象预警(报)[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 112 - 118. (NI Hua-yong, BA Ren-ji, LIU Yu-jie. Rainfall condition and meteorological warning on geological hazards in Shimian County, Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6): 112 - 118. (in Chinese))
- [26] 孙丹, 沈振中, 崔健健. 土工膜缺陷引起的土工膜防渗砂砾石坝渗漏数值模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 69 - 73. (SUN Dan, SHEN Zheng-zhong, CUI Jian-jian. Seepage numerical simulation of geomembrane gravel dam caused by geomembrane defect[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 69 - 73. (in Chinese))
- [27] 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 Wei-jun, HE Hao-nan, LI Deng-jun. 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))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中位于前列;本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录;本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录;本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录;本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部