

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20250235

王甫洲水利工程围堤排水沟大渗流量比测分析

吴晓亚¹, 黄耀英¹, 颜剑², 熊斌², 高磊², 潘刘明昊²

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北汉江王甫洲水力发电有限责任公司, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 土石坝渗流量测量值受到多种复杂因素的影响而存在一定离散性, 这导致基于少量几次渗流量测量值进行比对时, 难以获得稳定可靠的比对结果。分别采用浮标法、常规流速仪法和多普勒流速仪法测量王甫洲水利工程围堤排水沟大渗流量, 进而统计分析多次渗流量测量值, 获得不同渗流量测量方法测量值的概率密度函数, 然后类比混凝土抗压强度标准值的定义, 基于80%保证率下的测量值进行比对。研究表明, 相对三测线三测点法测量渗流量来说, 一测点一测线法测量的渗流量相对误差最小, 修正后的浮标法测量的渗流量相对误差次之, 多普勒流速仪法测量的渗流量相对误差最大。基于80%保证率下的流速上限值测量的渗流量同时反映了流速的均值与离散型, 得到的不同渗流量测量方法的比对结果更加可靠。

关键词: 比测分析; 围堤土石坝; 多普勒流速仪法; 浮标法; 80%保证率

中图分类号: TV641

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)12-0128-05

1 引言

渗流量是土石坝的重要监测项目, 对判断渗流稳定性和防渗排水措施的正常运行具有重要工程意义^[1-2]。渗流量的监测方法主要有容积法、量水堰法和测流速法^[3]。容积法适用于渗流量小于1 L/s的情况; 量水堰法适用于渗流量为1~300 L/s的情况; 而当渗流量大于300 L/s时, 常采用测流速法。测流速法包括浮标法、常规流速仪法和多普勒流速仪法。浮标法易受外界干扰, 测值精度较低; 常规流速仪法虽然测量精度较高, 但费时耗力; 多普勒流速仪法自动化程度较高, 但费用贵且测值波动较大。因此, 在实际土石坝工程中, 常采用不同的渗流量监测方法进行比测。近年来, 已开展很多相关测流试验, 如朱蕾等^[4]开展视频测流, 发现在断面形状复杂、流量变化大时, 测流偏差较大; 张永宏等^[5]开展时空影像测流, 发现无人机采集时空图像的灰度数据受阳光照射波动影响较大; 张利茹等^[6]提出并构建的双层虚拟垂线时差法优于传统时差法, 而断面流速、水深等环境因素对监测设备影响显著。由于渗流量测量

值受到多种因素的影响而存在一定离散性, 基于少量几次测量值的比对结果可能不稳定。为此, 本文提出对多次测量值进行统计分析, 获得不同监测方法下的概率密度函数, 进而类比混凝土抗压强度标准值的定义, 基于80%保证率下的测量值进行比对, 并在王甫洲水利工程围堤排水沟大渗流量进行应用, 验证了所提方法的有效性。

2 排水沟大渗流量监测原理

当排水沟渗流量大于300 L/s时, 常采用流速法测量监测断面的流速, 进而计算获得监测断面的渗流量。如图1所示, 在排水沟水面宽度小于5 m, 根据流速测量方式的不同, 可以区分为浮标法、常规流速法和多普勒流速法等。

2.1 浮标法

如图1所示, 当排水沟水面宽度小于5 m时, 通过浮标监测排水沟水面表面流速 V_s , 进而结合监测断面面积 A 和表面流速系数 K_s , 计算获得监测断面的渗流量 Q_1 :

$$Q_1 = K_s V_s A \quad (1)$$

2.2 常规流速法

将过水监测断面分为若干部分, 计算获得各

收稿日期: 2025-01-12, 修回日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52239009)

作者简介: 吴晓亚(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水工程安全监测, E-mail: 3410419249@qq.com

通讯作者: 黄耀英(1977-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水工程数值计算与安全评价, E-mail: huangyaoying@

ctgu.edu.cn

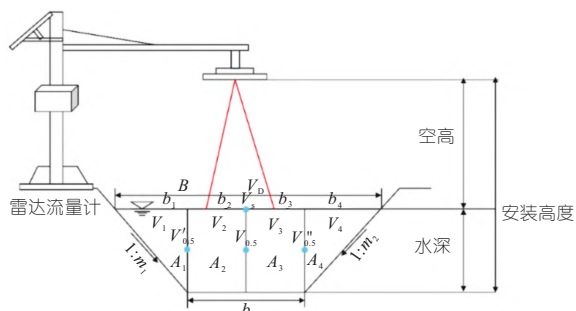


图 1 不同渗流量监测方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different seepage flow monitoring methods

部分面积,通过流速仪测量各部分断面一定水深处的流速 V ,进而结合各部分断面面积 A ,累加计算获得监测断面的渗流量。根据排水沟断面尺寸,可以采用不同测线数和测点数进行测量和计算。

(1)一测线一测点法。如图 1 所示,当排水沟水面宽度小于 5 m 且水深小于 1.5 m 时,在监测断面中间布置一条测线,通过流速仪测量获得 0.5 倍水深处的流速 $V_{0.5}$,进而计算获得监测断面的渗流量 Q_2 :

$$Q_2 = AV = [\alpha_1(b + B)hV_{0.5}]/2 \quad (2)$$

式中, α_1 为系数,取 0.83^[7]; b 为沟底宽, m; B 为水面宽度, m; h 为水深, m; $V_{0.5}$ 为 0.5 倍水深处的流速, m/s。

(2)三测线三测点法。如图 1 所示,当排水沟水面宽度小于 5 m 且水深小于 1.5 m 时,在监测断面布置 3 条测线,通过流速仪测量获得 3 条测线 0.5 倍水深处的流速,分别为 $V_{0.5}, V_{0.5}, V_{0.5}'$,进而计算获得监测断面的渗流量 Q_3 :

$$Q_3 = A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3 = \frac{\alpha_2 m_1 h^2 V_{0.5}}{2} + \frac{bh(V_{0.5} + V_{0.5})}{4} + \frac{bh(V_{0.5} + V_{0.5}')}{4} + \frac{\alpha_2 m_2 h^2 V_{0.5}'}{2} \quad (3)$$

式中, m_1, m_2 分别为左右岸的坡率; α_2 为岸边系数,取 0.7。

2.3 多普勒流速仪法

如图 1 所示,多普勒流速仪根据发射的声波、光波、无线电波等频率的变化及多普勒效应的数学关系,计算出流体中粒子的速度,从而实时监测断面的渗流量 Q_4 :

$$Q_4 = K_D AV_D \quad (4)$$

式中, V_D 为流速仪测得的流速; K_D 为系数,取 0.7。

3 排水沟不同渗流量监测方法比测

由于现场情况较复杂,排水沟不同渗流量监

测方式受降雨、刮风、水位波动等因素影响,如图 2 所示,采用如下步骤进行排水沟不同渗流量监测方法比测。

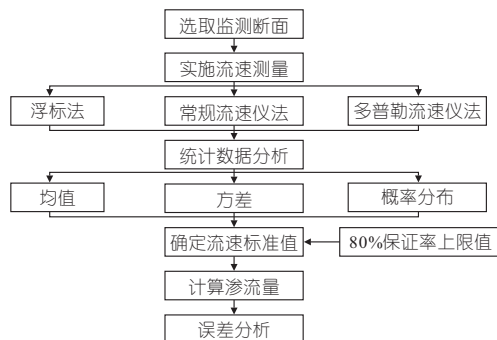


图 2 排水沟不同渗流量监测方法流程图

Fig. 2 Flow chart of different seepage monitoring methods for drainage ditches

步骤 1 选取排水沟的 n 个渗流量监测断面,采用浮标法、常规流速仪法及多普勒流速仪法分别开展 N 次($N \geq 8$)现场施测并记录。

步骤 2 分别计算排水沟不同渗流量监测方式测量流速的均值 \bar{v} 、方差 σ_v^2 ,进而基于 K-S 法对流速统计检验获得概率密度函数 $f(v)$ 。

步骤 3 类比混凝土抗压强度标准值的取值方式,选取 80% 保证率对应的流速上限值作为该监测断面的流速标准值,进而计算不同渗流量监测方式下的渗流量,并计算误差的均值、方差进行对比。

4 实例分析

王甫洲水利枢纽是一个以发电为主,结合航运,兼有灌溉、养殖、旅游等综合效益的大(2)型水利工程。主要建筑物包括土石坝(含围堤)、泄水闸、电站厂房、重力坝及船闸。其中,土石坝(含围堤)总长 18.6 km,包括谷城土石坝(4 759 m)、主河床土石坝(1 251 m)、老河道左岸围堤(6 184 m)和老河道右岸围堤(6 440 m)。在土石坝和围堤背水面的坡址处设置排水沟汇集库水通过堤身和地基的渗透水。排水沟渗流量的大小和规律反映了土石坝(含围堤)的渗流工作性态,为此在左右岸排水沟共设置 14 个渗流量监测断面进行渗流量比测。经断面尺寸复核可知,左右岸排水沟沟底宽均为 1 m,坡比分别为 1.41~1.73、1.45~1.60,排水沟水深分别为 0.21~0.44、0.16~0.69 m,对应的水面宽度分别为 1.60~2.25、1.67~2.81 m。自该工程下闸蓄水即采用浮标法对排水沟渗流量进行定期监测,2022~2023 年

进行自动化更新改造,于2024年1月开始采用多普勒流速仪进行排水沟渗流量自动监测。排水沟渗流量监测数据表明,左岸排水沟出水口处平均渗流量为381 L/s,右岸排水沟出水口处平均渗流量为796 L/s,渗流量均大于300 L/s。

4.1 排水沟不同渗流量监测方法测量数据统计分析

(1)现场测量与统计分析。为了比测不同渗流量监测方法测量效果,于2024年10月分别采用浮标法、常规流速仪法和多普勒流速仪法对右岸围堤排水沟监测断面典型位置的流速进行现场施测。参考《河流流量测验规范》^[3],由于排水沟水面宽度小于3 m且沟内水深小于1 m,采用常规流速仪对比了一测线一测点法和三测线三测点法。为消减外界因素对流速的影响,分别采用3种不同流速监测方法对每个渗流量监测断面进行了8次流速测量。右岸围堤排水沟典型监测断面桩号右1+625、右2+300流速测量结果见图3。由于采用三测线三测点法进行流速测量时, $V_{0.5}$ 、 $V_{0.5}^*$ 近似相等,在图3中仅给出 $V_{0.5}$ 的测量结果。

由图3可知,①受测量时的风力、环境温度、测量仪器、流水波动等影响,流速存在明显离散性。监测断面桩号右1+625测得 V_s 、 $V_{0.5}$ 、 $V_{0.5}^*$ 、 V_D 分别在0.57~0.66、0.47~0.51、0.48~0.51、

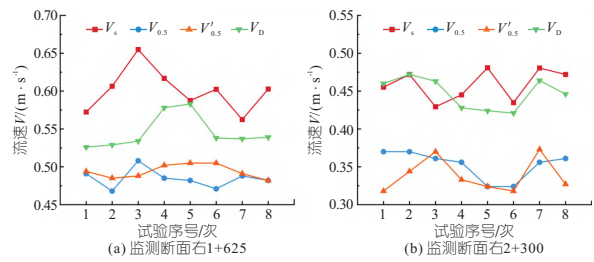


图3 右岸围堤排水沟典型渗流量监测断面实测流速对比
Fig.3 Comparison of measured flow velocity of typical seepage monitoring section of right bank dike drainage ditch

0.53~0.58 m/s 之间变化;监测断面桩号右2+300测得 V_s 、 $V_{0.5}$ 、 $V_{0.5}^*$ 、 V_D 分别在0.43~0.48、0.32~0.37、0.32~0.37、0.42~0.47 m/s 之间变化。②根据实测数据,浮标法表面流速 V_s 最大,多普勒流速仪流速 V_D 其次,岸边测线0.5倍水深处流速 $V_{0.5}$ 与中间测线0.5倍水深处流速 $V_{0.5}^*$ 接近, $V_{0.5}^*$ 稍大于 $V_{0.5}$ 。

(2)统计检验。由于不同排水沟渗流量监测方法的测量结果存在一定离散性,为此分别计算浮标法、常规流速仪法和多普勒流速仪法测量流速的均值 \bar{v} 、方差 σ_v^2 ,进而采用K-S统计检验方法^[8]对其进行分布检验,确定其概率密度函数 $f(v)$,右岸围堤排水沟典型监测断面桩号右1+625、右2+300流速统计检验结果见表1。

表1 不同排水沟渗流量监测方法测量流速统计检验结果

监测断面桩号	监测方式	流速 /($m \cdot s^{-1}$)	均值 \bar{v} /($m \cdot s^{-1}$)	方差 σ_v^2 /($m^2 \cdot s^{-2}$)	概率分布函数	说明
右1+625	浮标法	V_s	0.601	0.029 ²	正态分布	$f(x) = \frac{1}{0.029 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.601)^2}{(2 \times 0.029^2)}}$
	常规流速仪	$V_{0.5}$	0.484	0.012 ²	正态分布	$f(x) = \frac{1}{0.012 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.484)^2}{(2 \times 0.012^2)}}$
		$V_{0.5}^*$	0.494	0.009 ²	正态分布	$f(x) = \frac{1}{0.009 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.494)^2}{(2 \times 0.009^2)}}$
	多普勒流速仪	V_D	0.546	0.022 ²	极值I型分布	$f(x) = e^{-e^{-58.041(x+0.535)}}$
右2+300	浮标法	V_s	0.459	0.021 ²	正态分布	$f(x) = \frac{1}{0.021 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.459)^2}{(2 \times 0.021^2)}}$
	常规流速仪	$V_{0.5}$	0.353	0.019 ²	极值I型分布	$f(x) = e^{-e^{-69.186(x-0.361)}}$
		$V_{0.5}^*$	0.338	0.022 ²	极值I型分布	$f(x) = e^{-e^{-57.975(x+0.328)}}$
	多普勒流速仪	V_D	0.447	0.020 ²	正态分布	$f(x) = \frac{1}{0.020 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.447)^2}{(2 \times 0.020^2)}}$

(3)流速标准值确定。类比混凝土抗压强度标准值的取值,为了充分反映流速的均值和离散性,选取80%保证率下的流速上限值作为对应位置流速的标准值,右岸围堤排水沟各监测断面流速标准值计算结果见表2。表2中,桩号右0+625监测断面因多普勒流速仪故障,未采集到相应的流速。

4.2 排水沟不同渗流量监测方法比测分析

4.2.1 一测线一测点法与三测线三测点法比测分析

表2 不同排水沟渗流量监测方法测量的流速标准值
Tab.2 Standard values of flow velocity measured by different drainage ditch seepage monitoring methods

序号	监测断面桩号	V_s	$V_{0.5}$	$V_{0.5}^*$	V_D
1	右0+250	0.727	0.595	0.553	0.612
2	右0+625	0.620	0.538	0.522	
3	右1+625	0.625	0.495	0.502	0.561
4	右2+300	0.476	0.367	0.354	0.464
5	右2+800	0.371	0.329	0.272	0.363
6	右3+450	0.974	0.906	0.900	0.844
7	右4+680	0.662	0.463	0.408	0.639

注: V_s 、 $V_{0.5}$ 、 $V_{0.5}^*$ 、 V_D 单位均为 m/s。

由计算的排水沟典型位置的流速标准值,分别采用式(2)、(3)计算一测线一测点法和三测线三测点法的监测断面渗流量,结果见表 3。

表 3 一测线一测点法和三测线三测点法
实测断面渗流量对比

Tab. 3 Comparison of seepage flow measured by one measurement line and one weasurement point method and three measurement lines and three measurement points method

序 号	监测断 面桩号	一测线一测 点流量 Q_2	三测线三测 点流量 Q_3	流量相对误差 $[(Q_2 - Q_3)/Q_3]/\%$
1	右 0+250	0.565	0.555	1.80
2	右 0+625	0.466	0.473	-1.48
3	右 1+625	0.425	0.446	-4.71
4	右 2+300	0.341	0.344	-0.87
5	右 2+800	0.283	0.259	9.27
6	右 3+450	0.231	0.256	-9.77
7	右 4+680	0.186	0.186	0

注:流量单位为 m^3/s 。

由表 3 可知:①在监测断面桩号右 0+250、右 2+800 一测线一测点法测量的渗流量大于三测线三测点法测量的渗流量,在监测断面桩号右 4+680 两种监测方式测量的渗流量相等,在其他监测断面一测线一测点法测量的渗流量小于三测线三测点法测量的渗流量。②一测线一测点法与三测线三测点法测量的流量相对误差在-9.77%~9.27%之间,最大误差发生在监测断面桩号右 2+800,最小误差发生在监测断面桩号右 3+450,误差绝对值的平均值为 3.99%,误差绝对值的方差为 14.08%。

4.2.2 浮标法与三测线三测点法比测分析

由计算的排水沟典型位置的流速标准值,分别采用式(1)、(2)计算浮标法和三测线三测点法的监测断面渗流量,在采用浮标法计算时,式(1)中系数 K_s 取 0.85,计算结果见表 4。

表 4 三测线三测点法和浮标法实测断面渗流量对比

Tab. 4 Comparison of seepage flow measured by three-lines three-points and buoy method

序 号	监测断 面桩号	浮标法 流量 Q_1	三测线三测 点流量 Q_2	流量相对误差 $[(Q_1 - Q_2)/Q_2]/\%$
1	右 0+250	0.707	0.555	27.39
2	右 0+625	0.550	0.473	16.28
3	右 1+625	0.549	0.446	23.09
4	右 2+300	0.453	0.344	31.69
5	右 2+800	0.327	0.259	26.25
6	右 3+450	0.254	0.256	-0.78
7	右 4+680	0.272	0.186	46.24

注:流量单位为 m^3/s 。

由表 4 可知:①根据浮标法和三测线三测点法渗流量测量结果,除监测断面桩号右 3+450 外,右岸围堤排水沟各监测断面浮标法测量的渗流量均大于三测线三测点法测量的渗流量。②浮标法与三测线三测点法测量的流量相对误差在-0.78%~46.24%之间,最大误差发生在监测

断面桩号右 4+680,最小误差发生在监测断面桩号右 3+450,误差绝对值的平均值为 24.309%,误差绝对值的方差为 166.85%。

根据对比结果可知,当浮标法计算式(式(1))的系数 K_s 取 0.85 时,差异较大。为此,以三测线三测点法测量结果为基准,对式(1)的系数 K_s 进行回归分析,结果见图 4。由图 4 可知,对于王甫洲水利枢纽工程排水沟大渗流量的监测,式(1)的系数 K_s 取 $0.85 \times 0.806 = 0.685$,能更准确地反映实际渗流量。

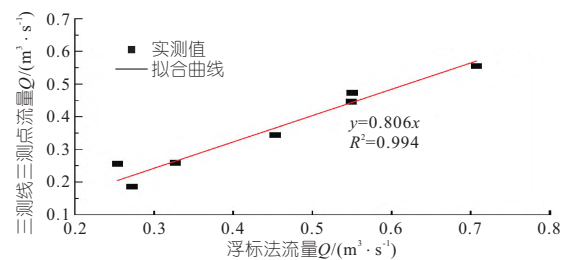


图 4 三测线三测点流量与浮标法流量相关图

Fig. 4 Correlation diagram of three measurement lines and three measurement points method flow and buoy method flow

4.2.3 不同渗流量监测方法比测分析

由计算的排水沟典型位置的流速标准值,分别计算浮标法、常规流速仪法和多普勒流速仪法,实测渗流量对比见图 5。浮标法的系数 K_s 取 0.685,多普勒流速仪法的系数 K_D 取 0.7。以三测线三测点法实测渗流量为基准,计算其他 3 种渗流量监测方法的误差见表 5。

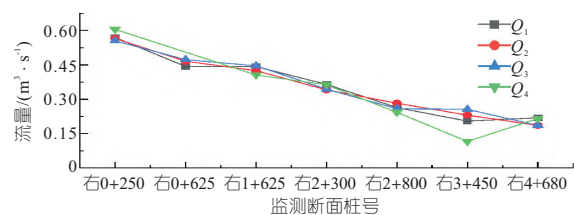


图 5 3 种渗流量监测方法实测渗流量对比

Fig. 5 Comparison of measured seepage flow by three seepage flow monitoring methods

表 5 3 种渗流量监测方法相对误差

Tab. 5 Relative error of three seepage flow monitoring methods

序 号	监测断 面桩号	浮标法流量相 对误差 $\mu_1/\%$	一测线一测点法 流量相对误差 $\mu_2/\%$	多普勒流速仪流量 相对误差 $\mu_3/\%$
1	右 0+250	2.67	1.80	9.01
2	右 0+625	-6.28	-1.48	
3	右 1+625	-0.79	-4.71	-8.97
4	右 2+300	6.14	-0.87	5.52
5	右 2+800	1.76	9.27	-6.18
6	右 3+450	-20.03	-9.77	-54.69
7	右 4+680	17.87	0.00	16.13

由图 5、表 5 可知:①从整体来看,4 种渗流量监测方法测量的渗流量越靠近排水沟出口,渗流量越大。除在监测断面桩号右 3+450 处,多普勒流速仪法测量的渗流量 Q_4 明显小于另外 3 种方

式,在其他断面 4 种渗流量监测方法测量的渗流量较为接近。②浮标法、一测线一测点法及多普勒流速仪法 3 种渗流量监测方式测量的流量相对误差分别在 $-20.03\% \sim 17.87\%$ 、 $-9.77\% \sim 9.27\%$ 、 $-54.69\% \sim 16.13\%$ 之间。浮标法最大误差发生在监测断面桩号右 4+680,最小误差发生在监测断面桩号右 3+450,误差绝对值的平均值为 7.93% ,误差绝对值的方差为 52.55% ;一测线一测点法最大误差发生在监测断面桩号右 2+800、最小误差发生在监测断面桩号右 3+450,误差绝对值的平均值为 3.99% ,误差绝对值的方差为 14.08% ;多普勒流速仪最大误差发生在监测断面桩号右 4+680、最小误差发生在监测断面桩号右 3+450,误差绝对值的平均值为 16.75% ,误差绝对值的方差为 299.68% 。③一测点一测线法计算的渗流量在各监测断面相对误差均在 $\pm 10\%$ 以内,在监测断面桩号右 0+250 至右 2+800 之间,浮标法与多普勒流速仪法计算的渗流量相对误差都在 $\pm 10\%$ 以内,而在监测断面桩号右 3+450、右 4+680,2 种渗流量监测方式计算的渗流量相对误差超过 $\pm 15\%$ 。

5 结论

a. 土石坝渗流量测量值由于受到多种复杂因素的影响而存在一定离散性,类比混凝土抗压强度标准值定义,提出基于 80% 保证率的上限值确定流速标准值进行比测,流速比测结果表明,浮标法测得的表面流速 V_s 最大,多普勒流速仪测得的流速 V_D 其次,岸边测线 0.5 倍水深处流速 $V_{0.5}$ 与中间测线 0.5 倍水深处流速 $V_{0.5}$ 接近, $V_{0.5}$ 略大于 $V_{0.5}$ 。

b. 通过对比浮标法和三测线三测点法测量的

Comparative Analysis of Large Seepage Flow Measurement in Embankment Drainage Ditch of Wangfuzhou Hydraulic Project

WU Xiao-ya¹, HUANG Yao-ying¹, YAN Jian², XIONG Bin², GAO Lei², PAN Liu-ming-hao²

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Hanjiang Wangfuzhou Hydropower Co., Ltd., Xiangyang 441000, China)

Abstract: The measured seepage flow of earth and rockfill dam is subject to a certain degree of variability due to the impact of various complex factors. This makes it difficult to obtain stable and reliable comparison results when comparing based on only a few measurements of seepage flow. The float method, conventional current meter method, and Doppler current meter method were used to measure the large seepage discharge in the drainage ditches of the levees of the Wangfuzhou Water Conservancy Project. Furthermore, statistical analysis was conducted on multiple measured seepage discharge values to obtain the probability density functions of the measured values from different seepage discharge measurement methods. Then, by analogy with the definition of the standard value of concrete compressive strength, comparisons were made based on the measured values at the 80% guarantee rate. The results show that compared to the seepage flow measured by the three measurement lines and three measurement points method, the relative error of the seepage flow measured by the one measurement line and one measurement point method is the smallest, followed by the relative error of the seepage flow measured by the corrected float method, and the Doppler current meter method has the largest relative error. The seepage flow measured based on the upper limit of flow velocity at an 80% guarantee rate reflects both the mean and variability of the flow velocity, making the comparison results of different seepage flow measurement methods more reliable.

Key words: comparative analysis; levee earth-rock dam; Doppler flow meter method; buoy method; 80% guarantee rate

渗流量发现,当浮标法测量渗流量的折减系数取 0.85 时,其测量结果大于三测线三测点的结果;对于王甫洲水利枢纽右岸围堤排水沟的渗流量监测中,当浮标法测量渗流量的折减系数取 0.685 时,其测量结果与三测线三测点法的结果接近。

c. 以三测线三测点法测量监测断面渗流量为基准,对比了浮标法、一测线一测点法、多普勒流速仪法测量的渗流量,分析表明,一测点一测线法测量的渗流量相对误差最小,均在 $\pm 10\%$ 以内,修正后的浮标法测量的渗流量相对误差其次,多普勒流速仪法测量的渗流量相对误差最大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄杰, 王俊杰, 黄诗渊, 等. 土工膜缺陷对土工膜心墙堆石坝工作性能的影响分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 142-146.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流流量测验规范: GB 50179-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [4] 朱蕾, 徐凌, 王冬梅, 等. 视频测流技术在都江堰灌区的应用研究[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 235-242.
- [5] 张永宏, 李飞翔, 董天天, 等. 基于无人机平台的时空影像法视频测流技术应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(10): 1-6.
- [6] 张利茹, 王刚, 贺永会, 等. 双层虚拟垂线时差法流量计算模型实证研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(11): 69-72, 78.
- [7] 刘鸿涛, 赵宇博, 李晓军, 等. 宽浅式梯形渠道流速分布规律及流量计算方法研究[J]. 节水灌溉, 2023(5): 56-61.
- [8] 殷晓慧, 费大伟, 黄耀英, 等. 王甫洲水利枢纽泄水闸闸墩安全监控指标拟定[J]. 人民长江, 2021, 52(6): 179-182, 194.