

水下抛石电阻率特性试验研究

梁越, 张宏杰, 许彬, 马士谦, 夏日风, 代磊

Experimental study of electrical resistivity traits in underwater riprap

LIANG Yue, ZHANG Hongjie, XU Bin, MA Shiqian, XIA Rifeng, DAI Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230217002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江上游透水丁坝水面线分布试验研究

Experimental studies on flow profile of permeable spur dikes in upper reaches of Yangtze River
水利水电工程学报. 2019(5): 62 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.008>

岛礁地形抛石护岸稳定性试验研究

Experimental studies on stability of riprap revetment on fringing reefs
水利水电工程学报. 2019(5): 69 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.009>

块石形状尺寸对水平拖曳力系数影响的数值模拟

Numerical simulation of influences of underwater riprap blocks' hape and size on horizontal drag force coefficients
水利水电工程学报. 2019(3): 41 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.006>

相变材料水下自吸式堵漏状态试验研究

Experimental studies on underwater self-inhaled sealing state of phase change materials
水利水电工程学报. 2019(5): 54 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.007>

钢筋混凝土电渗除氯防腐性能研究

Investigation on chlorine removal and corrosion resistance of reinforced concrete
水利水电工程学报. 2021(4): 138 <https://doi.org/10.12170/20201014001>

CCTV视觉图像处理方法在土石坝涵管病害诊断中的应用

Application of CCTV visual image processing method in culvert disease diagnosis of earth-rock fill dam
水利水电工程学报. 2019(2): 99 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.014>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230217002

梁越, 张宏杰, 许彬, 等. 水下抛石电阻率特性试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 100-107. (LIANG Yue, ZHANG Hongjie, XU Bin, et al. Experimental study of electrical resistivity traits in underwater riprap[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2): 100-107. (in Chinese))

水下抛石电阻率特性试验研究

梁越^{1,2}, 张宏杰^{1,2}, 许彬^{1,2}, 马士谦^{3,4}, 夏日风^{1,2}, 代磊^{1,2}

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430040; 4. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 研究旨在利用电阻率技术解决水下抛石坝(隐蔽性工程)隐患探测和质量评价等关键问题。采用四电极法分析了水下抛石在不同供电电压和空隙率条件下的电阻率特性, 并建立了电阻率与水下抛石空隙率的经验公式。结果表明: 水下抛石电阻率随供电电压(10~60 V)升高呈先衰减后逐渐趋于稳定的变化特征, 且供电电压高于30 V时电阻率衰减程度显著降低; 水下抛石电阻率随空隙率的增加逐渐减小并趋于稳定(两者间的关系可用递减型幂函数表征), 且不同供电电压下电阻率随空隙率的变化规律与此类似; 分别选用幂函数、指数函数及对数函数拟合电阻率与空隙率关系, 发现幂函数拟合误差最小, 考虑供电电压影响最终建立了水下抛石电阻率与空隙率的经验公式; 进一步通过水下抛石坝模型试验验证了经验公式的可靠性。该经验公式可有效描述水下抛石分布的密实程度, 从而快速识别水下抛石坝内部隐患。

关键词: 水下抛石; 隐患探测; 电阻率; 空隙率; 供电电压

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)02-0100-08

长江干线是目前世界上运量最大、运输最繁忙的通航河流, 长江航道作为长江经济带综合立体交通走廊的主骨架, 在航运方面具有独特的地理优势和巨大的发展潜力^[1-2]。为保持长江黄金航道的畅通、高效和安全, 通过疏浚航道、整治护岸、设置防护结构等措施开展了大量的航道整治工作^[3-5], 改善了长江的通航条件。抛石坝是国内外广泛使用的一种航道整治建筑物, 由抛石块体在河流中抛筑而成, 长江上游已建整治建筑物中90%以上都为抛石结构^[6]。水下抛石坝属于隐蔽性工程, 具有水下环境复杂、离散性较大等特点, 抛石体在水流长时间冲刷后逐渐被冲移, 不可避免地会发生水毁现象, 可能危及岸坡和船舶安全。因此, 对抛石坝体隐患探测尤为重要。已有不少学者针对水下抛石体内的异常识别进行了探讨^[7-11], 主要有探地雷达法、声学探测法, 地震波法及电阻率法。朱瑞虎等^[7]突破钻孔法和沉降观测法的局限, 提出了基于地质雷达的抛石计算方法; 马国栋^[8]通过对声呐法采集的数据进行降噪处理, 提高了声呐法对水下抛石体的识别能力; 余金煌等^[9]运用地震弹性波法对水下抛石体的赋存状态进行精确检测和识别; 周黎明等^[10]采用高密度电阻率法, 根据抛石体与周围岩土层的电阻率差异, 确定了抛石体的范围和厚度; Wang等^[11]采用连续时间随机行走(CTRW)模型, 根据河床高程变化数据, 有效预测了水下抛石的一维运动过程及空间分布。

目前对坝体表面变形探测已有大量研究, 而坝体内部侵蚀探测尚需深入。电阻率法通过识别电阻率异常分布区, 实现隐患探测。该方法在堤坝渗漏诊断、地层精细勘探及降雨入渗监测等水利工程领域得到了

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379097); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2022TIAD-GPX0045); 重庆市博士后研究项目特别资助项目(2022CQBSHTB1010); 重庆交通大学研究生科研创新项目(2022B0006)

作者简介: 梁越(1985—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士, 主要从事水利工程灾变机理及防治技术等方面的研究。

E-mail: liangyue2560@163.com 通信作者: 张宏杰(E-mail: zhanghongjie0111@163.com)

广泛应用^[12-14]。为了运用电阻率技术解决水下抛石坝隐患探测和质量评价问题,建立电阻率与水下抛石赋存状态之间的关系至关重要。鉴于此,本文基于四电极法对不同空隙率及供电电压的水下抛石电阻率进行测量,研究水下抛石电阻率特性,提出考虑供电电压影响的电阻率与空隙率经验公式,并通过模型试验验证该经验公式的可靠性。研究结果可为水下抛石坝的隐患检测和质量评价提供理论依据和应用参考。

1 电阻率测量试验设计

1.1 试验原理及装置

四电极法(等距温纳法)是在试验槽两端及内部均匀插入四电极(A、B、M、N),试验选用的电极为铜片,电阻为0.1 Ω,其电阻相对水下抛石电阻可忽略不计。在两端A、B两电极间施加恒定电流*I*,通过测量M、N两电极间的电压降Δ*U*,根据欧姆定律计算出材料的电阻*R*,根据式(1)则可以计算出M、N两电极间的水下抛石电阻率。

$$\rho = R \frac{S}{L} = \frac{\Delta U S}{I L} \quad (1)$$

式中:ρ为M、N两电极间的水下抛石电阻率(Ω·m);*S*为铜片电极与材料的接触面积(m²);*L*为M、N两电极间隔距离(m)。

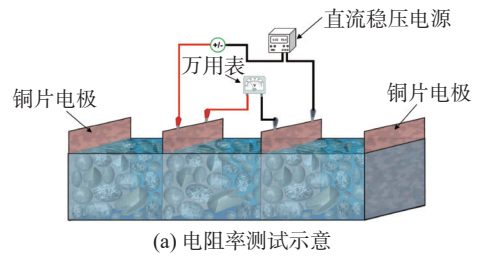
试验装置主要由试验槽、铜片电极、直流电源、万用表及量筒等组成。其中试验槽由透明亚克力板制成,长60 cm,宽20 cm,高20 cm。在试验槽上每隔5 cm将试验槽分成4层,尽可能保证抛石装填均匀。方形铜片电极(30 cm×20 cm)固定在试验槽两端与中心,电极间相隔20 cm。铜片电极与直流电源相连,作为电流注入点,如图1所示。

本次试验所用抛石体取自长江上游重庆段,为保证与常规抛石坝具有相似的抛石组成,参考相关文献^[15-16]中抛石块体的级配组成,通过机械振动筛选取待测抛石材料的粒径为1.0~4.5 cm,颗粒级配曲线如图2所示。

1.2 试验工况与流程

试验共设计6组工况,空隙率分别为100%、69.91%、63.96%、56.32%、48.80%和39.08%,每组工况下又考虑6组不同供电电压(10~60 V)的影响,试验过程共收集到36次电阻率测量数据。围绕水下抛石电阻率测试,试验流程包括抛石填筑、空隙率计算、压降测量和电阻率的计算。

(1)首先将1.0~4.5 cm粒径组的天然抛石浸泡在水中静置24 h,使其表面充分湿润,然后将浸泡的抛石分层在试验槽内填满,并将试验槽装满水,同时用量筒计量水量,记录初始水的体积*V_w*。空隙率指抛石间的空隙体积与抛石坝总体积之比,假设试验槽为抛石坝体,试验槽体积即为抛石坝总体积,由于试验抛石



(a) 电阻率测试示意



(b) 试验装置

图1 水下抛石电阻率测试装置

Fig. 1 Device for measuring electrical resistivity of underwater riprap

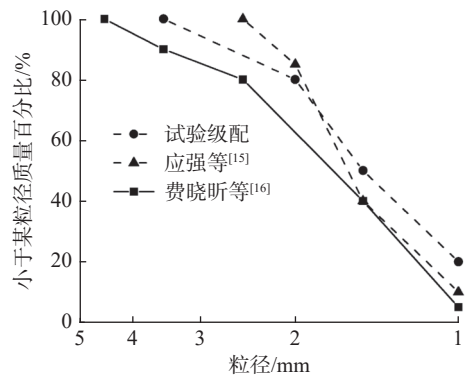


图2 水下抛石块体级配曲线

Fig. 2 Grain gradation curve for underwater riprap

由于试验抛石

间无其余介质,抛石间的空隙完全被水充满,单元体内空隙体积 V_v 即为加入的水体积,因此空隙率 V_c 即水体积占总体积的百分比,计算式如下:

$$V_c = V_v/V \times 100\% = V_w/V \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_c 为空隙率(%); V 为抛石坝总体积(cm^3); V_v 为空隙体积(cm^3); V_w 为水的体积(cm^3)。

(2)抛石坝填筑完成后,立即对水下抛石进行电阻率测量。测量时将交流电转换为直流电,首先调整供电电压为 10 V,将直流稳压电源连接 A、B 两电极作为电流注入点,并记录电流 I ,随后使用万用表测量 M、N 两电极之间的电压降 ΔU ,调整供电电压为 20、30、40、50、60 V,重复上述步骤。为减小连续测量带来的电极极化等现象,借鉴土体电阻率测量经验,根据文献 [17] 中电阻率直流试验的时间特性研究结论,在放电 30 s 后进行下一轮测量。

(3)除测量填筑完成后的水下抛石电阻率外,为了模拟抛石坝体在水流作用下逐渐被掏空,空隙率逐渐增加的情况,将试验槽中的水排净后,槽内所有抛石进行重新填筑,并取出第 4 层中间方格内的抛石,再次将试验槽装满水,并用量筒计量水量,记录第 2 次水的体积 V_w ,采用式(2)计算得到空隙率 V_c ,并根据步骤(2)进行电阻率测量。

(4)随后重复步骤(3)依次取出第 3 层至第 1 层中间方格内的抛石及全部抛石,得到不同损毁状态下的水下抛石电阻率。

2 水下抛石电阻率测试结果及分析

2.1 供电电压对电阻率的影响

图 3 为不同供电电压的水下抛石电阻率变化曲线。可见,空隙率较低时,供电电压对水下抛石电阻率的影响更大。当 $V_c=39.08\%$ 时,供电电压为 10 和 30 V 时的电阻率相差 25.8%,30 和 50 V 时的电阻率只相差 13.3%。这说明在 10~30 V 的供电电压时,较低空隙率的水下抛石电阻率随电压升高下降趋势明显;在 30~60 V 的供电电压时,电压对电阻率的影响降低,电阻率逐渐趋于稳定,水下抛石电阻率随供电电压(10~60 V)升高呈现先衰减后逐渐趋于稳定的变化特征。

分析原因可能在于:电阻率可以理解为电子所受束缚力大小,随着供电电压升高,水中电子具有更高的电势能,电子所受束缚力降低而易于跃迁移动,电子流动速率增加,水下抛石电阻率表现为下降趋势;此外直流电存在单向性和极化现象,部分电子会累积在电极一端而产生极化效应,在强电场的作用下,电阻率表现为较稳定状态。因此,在利用直流电测量水下抛石电阻率时,为减小供电电压带来的误差,建议供电电压采用 30 V 以上。

2.2 空隙率对电阻率的影响

图 4 为水下抛石电阻率与空隙率变化曲线。试验结果表明,水下抛石电阻率随着空隙率的增加而减小,且变化趋势逐渐变缓,两者呈负相关,不同供电电压下电阻率随空隙

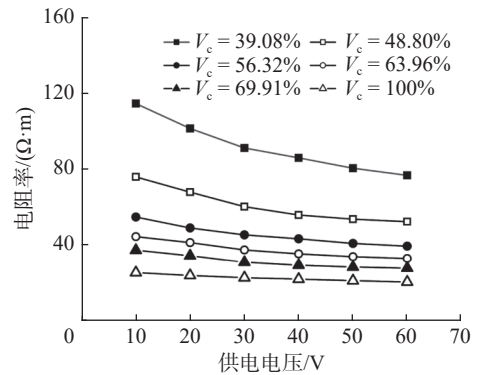


图 3 电阻率-供电电压曲线

Fig. 3 Electrical resistivity-supply voltage curves

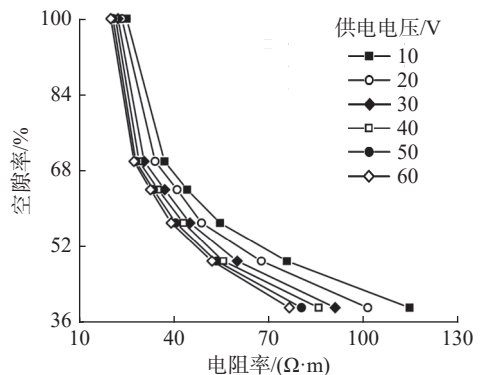


图 4 电阻率-空隙率关系曲线

Fig. 4 Electrical resistivity-void fraction curves

率的变化趋势类似。

当空隙率较低时, 大部分电流流动路径被导电性较差的抛石所阻碍, 表现为高电阻率值(图 5(a)); 随着空隙率的增加, 高阻抛石逐渐被空隙里的低阻水所替代, 电流流动路径增多, 水下抛石电阻率呈下降趋势(图 5(b)); 当空隙率继续增加, 导电以空隙里的水为主导, 形成了较为稳定的低阻通道, 电流路径增加不明显, 因此表现出随着空隙率的继续增加, 电阻率缓慢下降处于较为稳定的状态(图 5(c))。当水下抛石冲散后空隙内完全充满水($V_c=100\%$), 此时冲散区域的电阻率基本接近水的电阻率。

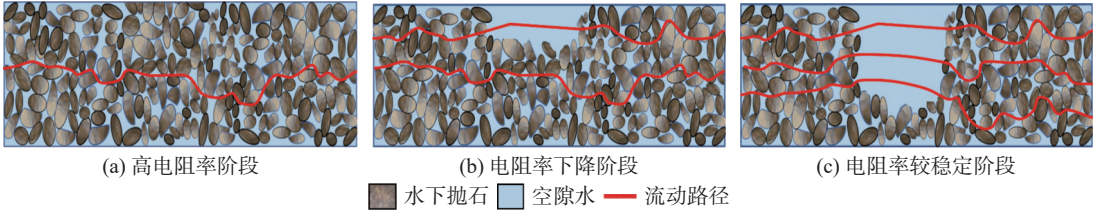


图 5 各阶段水下抛石电流路径变化

Fig. 5 The variation of underwater riprap current path

在实际水下抛石工程中, 当抛石被冲散后导致内部空隙变大, 空隙内完全充满水, 电流流动路径增多, 从而使得电阻率快速下降, 表现出低阻异常区, 此区域即为水下抛石体隐患区域。这表明电阻率差异可以很好地反映水下抛石空隙分布, 水下抛石体低阻异常区的识别可作为水下抛石工程内部隐患探测的依据。

3 水下抛石空隙率-电阻率经验公式

3.1 经验公式构建

已有研究^[18-20]表明幂函数、指数函数和对数函数等非线性函数是拟合土壤电阻率关系的常用经验式。鉴于此, 借鉴土壤电阻率经验公式, 利用上述 3 种拟合公式对水下抛石电阻率随空隙率变化的试验结果进行拟合, 使用 Pearson 相关指数得出的决定系数(R^2)对拟合结果进行检验。同时为了量化空隙率与水下抛石电阻率之间的校准精度, 将均方根误差(e_{RMSE})作为评估拟合结果的指标, 拟合结果见表 1。

表 1 不同供电电压下水下抛石空隙率与电阻率的拟合结果

Tab. 1 Results of curve fitting for voids and electrical resistivity of underwater riprap at various power supply voltages

供电电压/V	幂函数 $y=ax^b$				对数函数 $y=a\ln x-b$				指数函数 $y=a\exp(bx)$			
	a	b	R^2	$e_{RMSE}/\%$	a	b	R^2	$e_{RMSE}/\%$	a	b	R^2	$e_{RMSE}/\%$
10	5.861	-0.616	0.97	4.62	-0.341	1.973	0.89	8.21	1.087	-0.010	0.82	10.61
20	7.196	-0.644	0.96	4.74	-0.355	1.992	0.89	8.37	1.114	-0.012	0.82	10.56
30	7.302	-0.664	0.95	5.54	-0.362	1.985	0.87	8.89	1.127	-0.013	0.81	10.81
40	7.367	-0.676	0.95	5.82	-0.366	1.980	0.87	9.14	1.135	-0.014	0.81	10.97
50	7.479	-0.689	0.95	5.70	-0.373	1.991	0.87	9.04	1.151	-0.015	0.81	10.79
60	7.525	-0.697	0.95	5.32	-0.381	2.006	0.88	8.73	1.168	-0.016	0.82	10.46

从拟合效果可以发现幂函数拟合的决定系数大于 0.95, 拟合效果总体良好。同时通过比较 e_{RMSE} 值发现, 在幂函数拟合下(式(3)), 计算值和测量值之间的精度更高, 因此选择幂函数对水下抛石电阻率和空隙率进行拟合, 构建水下抛石空隙率-电阻率经验公式, 拟合结果如图 6 所示。

$$V_c = a\rho^b \tag{3}$$

式中: ρ 为水下抛石电阻率($\Omega\cdot m$); a 、 b 为拟合参数。

同时发现拟合参数 a 、 b 均随供电电压呈规律性变化, 如图 7 所示。经拟合后得到式(4)和(5)。联立式(3)~(5)得到本试验所用的水下抛石空隙率-电阻率经验式, 如式(6)所示。

$$a = 6.150U^{0.050}, R^2 = 0.98 \tag{4}$$

$$b = -0.524U^{0.070}, R^2 = 0.99 \tag{5}$$

$$V_c = 6.150U^{0.050}\rho^{-0.524U^{0.070}} \tag{6}$$

式中： U 为供电电压(V)。

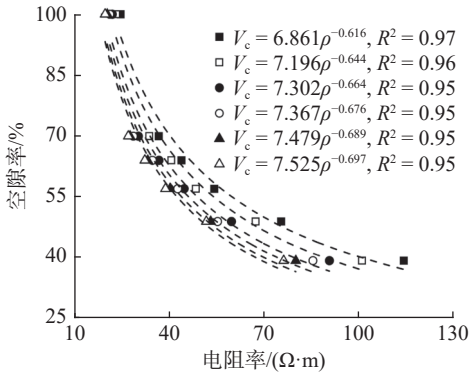


图 6 电阻率-空隙率拟合曲线

Fig. 6 The fitted curves of electrical resistivity and void fraction

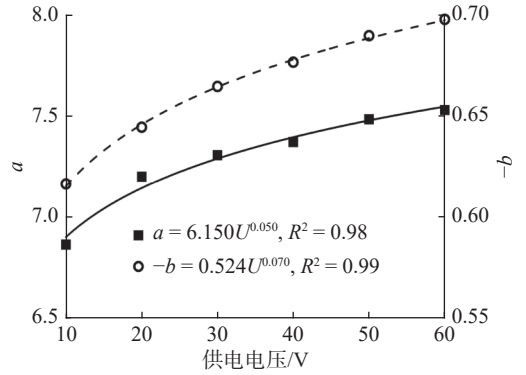


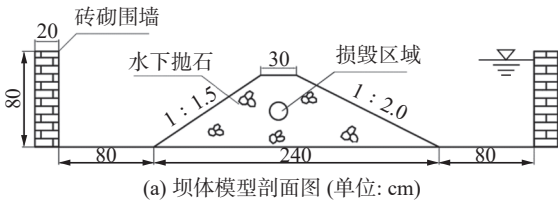
图 7 参数 a 、 b 与供电电压关系曲线

Fig. 7 Parameters a and b -supply voltage relation curves

3.2 经验公式应用

为验证该经验公式的合理性,通过水下抛石坝模型试验对本文提出的水下抛石空隙率-电阻率经验公式进行初步应用。抛石坝模型以长江上游神背嘴滩段小罐口堵坝为原型,根据 1:50 的几何比尺设计,缩尺模型坝高 60 cm,坝底宽 240 cm,坝顶宽 30 cm,迎水坡 1:1.5,背水坡 1:2.0。坝顶如果严格按照几何相似比进行缩尺设计会导致宽度极小而难以填筑,所以将坝顶宽度设定为 30 cm,使其更具合理性。

坝体采用粒径 1.0~4.5 cm 的抛石填筑,以镂空的钢管建立含有空洞的水下抛石体模型(图 8),来模拟抛石体内部的不密实情况。镂空钢管长 40 cm,直径 15 cm,置于抛石体中心处。采用在水力层析扫描^[21]基础上发展而来的基于电刺激层析扫描^[22-23]及联合式(6),通过联合反演得到剖面位置电阻率与空隙率分布特征(见图 9)。为降低供电电压对测量水下抛石电阻率的影响,根据前期试验研究供电电压选择 50 V。



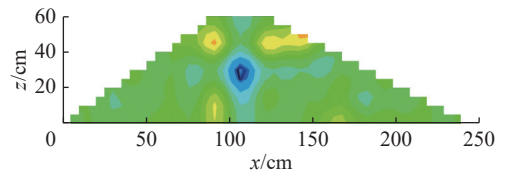
(a) 坝体模型剖面图(单位:cm)



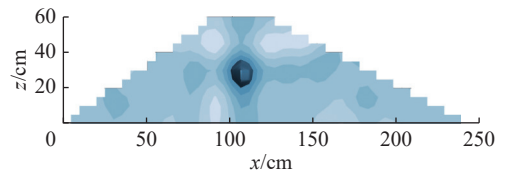
(b) 坝体内部侵蚀通道

图 8 水下抛石模型示意

Fig. 8 The schematic of underwater riprap model



(a) 电阻率剖面



(b) 空隙率剖面

图 9 水下抛石体的剖面电阻率与空隙率分布

Fig. 9 Electrical resistivity and void fraction distribution

对比图9中的水下抛石电阻率与空隙率分布特征发现,高、低电阻率范围边界与低、高空隙率范围边界基本吻合,在坝体中心位置电阻率为 $25\sim 30\ \Omega\cdot\text{m}$,呈现低电阻率,说明空隙较大,抛石堆积疏松,与预埋的空洞位置相符,判断为抛石体不密实区域,此区域容易发生损毁现象;而坝体中心位置以外电阻率多数为 $60\sim 70\ \Omega\cdot\text{m}$,呈现高电阻率,这意味着抛石堆放较为密集,空隙较小,不易发生损毁。因此通过联合电阻率分布及由水下抛石空隙率-电阻率经验公式得到的空隙率分布,可以较好地体现水下抛石体的空隙分布特征,进而较为准确地判断抛石体的损毁区域。

4 结 语

利用电阻率技术开展了不同供电电压及空隙率的水下抛石电阻率室内试验,结果表明:水下抛石电阻率受供电电压的影响,随供电电压($10\sim 60\ \text{V}$)升高水下抛石电阻率呈先衰减后趋于稳定的变化特征,供电电压高于 $30\ \text{V}$ 时电阻率衰减程度显著降低。因此,在采用直流电测量水下抛石电阻率时,建议采用 $30\ \text{V}$ 以上供电电压;水下抛石电阻率随着空隙率的增加而减小,且变化趋势逐渐变缓,可采用递减型幂函数形式表征,不同供电电压下电阻率随空隙率的变化趋势类似。

参考土壤电阻率模型对水下抛石的空隙率与电阻率进行拟合,发现空隙率与电阻率呈幂函数关系,拟合曲线总体效果良好;在此基础上考虑供电电压的影响,进一步修正了水下抛石空隙率与电阻率的经验公式。通过水下抛石坝模型试验验证了该经验公式的可靠性,为通过电阻率法快速识别抛石坝坝体的材料因水毁形成的渗漏通道奠定了基础。

尽管提出的水下抛石空隙率与电阻率的经验公式在本文试验条件范围内可行,但由于水下抛石的粒径大小及个体之间的排列分布具有非均质性,在填筑时较难保证均匀,对空隙率与电阻率经验公式参数标定的影响仍需进一步研究。同时,本试验条件为静水条件,水流流速对电阻率的影响还需深入探讨。

参 考 文 献:

- [1] 刘怀汉,杨胜发,曹民雄.长江黄金航道整治技术研究构想与展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):17-27. (LIU Huaihan, YANG Shengfa, CAO Minxiong. Advances in 'golden waterway' regulation technologies of the Yangtze River[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 17-27. (in Chinese))
- [2] WANG Y C, CHEN X B, BORTHWICK A G L, et al. Sustainability of global golden inland waterways[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1553.
- [3] 曹民雄,马爱兴,胡颖,等.航道整治建筑物及防护结构模拟技术研究[J].水利水运工程学报,2016(5):115-123. (CAO Minxiong, MA Aixing, HU Ying, et al. Simulation technology of waterway regulation structures and protective structures[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(5): 115-123. (in Chinese))
- [4] 宗梓煦,郑鹏,邓泽田,等.仿生牙根桩承载性能透明土模型试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2023,45(4):19-28. (ZONG Zixu, ZHENG Peng, DENG Zetian, et al. Bearing capacity characteristics of bionic teeth root pile based on transparent soil model testing technique[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(4): 19-28. (in Chinese))
- [5] 赵志舟,周华君.长江神背嘴滩险成因分析与整治技术[J].水利水运工程学报,2008(3):58-63. (ZHAO Zhizhou, ZHOU Huajun. Regulation measures and effect analysis for the Shenbeizui shoal in the Yangtze River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2008(3): 58-63. (in Chinese))
- [6] 许百强,喻涛,王平义,等.长江上游透水丁坝水面线分布试验研究[J].水利水运工程学报,2019(5):62-68. (XU Baiqiang, YU Tao, WANG Pingyi, et al. Experimental studies on flow profile of permeable spur dikes in upper reaches of Yangtze River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 62-68. (in Chinese))
- [7] 朱瑞虎,郑金海,傅月波.基于地质雷达探测的抛石量计算方法[J].水运工程,2016(11):25-28. (ZHU Ruihu, ZHENG

- Jinhai, FU Yuebo. Calculation method of riprap quantity based on GPR detection[J]. *Port and Waterway Engineering*, 2016(11): 25-28. (in Chinese))
- [8] 马国栋. 基于改进侧扫声呐法的水下抛石精准识别研究[J]. *人民长江*, 2022, 53(4): 210-214. (MA Guodong. Study on accurate identification of underwater riprap based on improved side scan sonar method[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(4): 210-214. (in Chinese))
- [9] 余金煌, 付强, 谢磊磊, 等. 基于地震映像的河湖水下抛石精准识别方法[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(5): 124-127. (YU Jinhuang, FU Qiang, XIE Leilei, et al. Method of seismic imaging-based accurate recognition of underwater riprap of rivers and lakes[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(5): 124-127. (in Chinese))
- [10] 周黎明, 肖国强, 王法刚, 等. 高密度电法在抛石体与土层分界面探测中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2004, 21(6): 91-92. (ZHOU Liming, XIAO Guoqiang, WANG Fagang, et al. Application of high density resistivity method in detecting interface between stone and earth[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2004, 21(6): 91-92. (in Chinese))
- [11] WANG M M, SHU L C, ZHAO G, et al. Simulation of the riprap movement using the continuous-time random walking method[J]. *Water*, 2021, 13(19): 2669.
- [12] 夏玉立, 江晓益, 谭磊. 并行电法探测水库坝肩渗漏[J]. *水利水运工程学报*, 2022(1): 131-136. (XIA Yuli, JIANG Xiaoyi, TAN Lei. Reservoir abutment leakage diagnosis based on parallel electrical method[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 131-136. (in Chinese))
- [13] LIU B, PANG Y H, MAO D Q, et al. A rapid four-dimensional resistivity data inversion method using temporal segmentation[J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 221(1): 586-602.
- [14] 刘庭发, 聂艳侠, 胡黎明, 等. 基于高密度电阻率法的水分迁移模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 761-768. (LIU Tingfa, NIE Yanxia, HU Liming, et al. Model tests on moisture migration based on high-density electrical resistivity tomography method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 761-768. (in Chinese))
- [15] 应强, 张幸农, 张思和, 等. 不同粒径块石及其组合的护岸效果[J]. *水利水运工程学报*, 2009(2): 44-49. (YING Qiang, ZHANG Xingnong, ZHANG Sihe, et al. Rubble stone of different particle sizes and its combined shore protection effect[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009(2): 44-49. (in Chinese))
- [16] 费晓昕, 张幸农. 平顺抛石护岸水毁速率试验研究[J]. *人民长江*, 2021, 52(11): 207-211. (FEI Xiaoxin, ZHANG Xingnong. Experimental study on water damage rate of smooth riprap revetment[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(11): 207-211. (in Chinese))
- [17] 孙彬, 谷天峰, 孔嘉旭, 等. 非饱和黄土电阻率和含水率间关系试验研究[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 216-222. (SUN Bin, GU Tianfeng, KONG Jiayu, et al. Experimental research on relationship between resistivity and moisture content of unsaturated loess[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 216-222. (in Chinese))
- [18] 徐兴倩, 蔡波, 屈新, 等. 土体电阻率模型研究现状综述[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(5): 2205-2217. (XU Xingqian, CAI Bo, QU Xin, et al. Review of soil resistivity model[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(5): 2205-2217. (in Chinese))
- [19] YUAN G, CHE A, FENG S. Evaluation method for the physical parameter evolutions of highway subgrade soil using electrical measurements[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231: 117162.
- [20] FERREIRA Q C G, BACELLAR L A P, VIANA J H M. Evaluation of soil moisture by electrical resistivity in Oxisols of the central Brazilian savanna[J]. *Geoderma Regional*, 2021, 26: e00408.
- [21] YEH T C J, LIU S Y. Hydraulic tomography: development of a new aquifer test method[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(8): 2095-2105.
- [22] XU D, SUN R, YEH T C J, et al. Mapping soil layers using electrical resistivity tomography and validation: Sandbox experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 523-536.
- [23] 张海发, 马士谦, 梁越, 等. 基于电阻率层析扫描的水下抛石体内部空洞探测[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(4): 123-128. (ZHANG Haifa, MA Shiqian, LIANG Yue, et al. Cavitation detection in underwater riprap based on resistivity tomography[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(4): 123-128. (in Chinese))

Experimental study of electrical resistivity traits in underwater riprap

LIANG Yue^{1,2}, ZHANG Hongjie^{1,2}, XU Bin^{1,2}, MA Shiqian^{3,4}, XIA Rifeng^{1,2}, DAI Lei^{1,2}

(1. *National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 3. *Hubei Key Laboratory of Advanced Materials & Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, Wuhan 430040, China*; 4. *CCCC Wuhan Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430040, China*)

Abstract: The objective of this research is to employ electrical resistivity technology to address key issues in underwater riprap dams, such as defect detection and quality evaluation. The study investigates the electrical resistivity characteristics of underwater riprap under varying supply voltage and void fraction conditions using the four-electrode method. An empirical formula is established to correlate electrical resistivity with the occurrence state of underwater riprap. The research reveals that the electrical resistivity of underwater riprap rapidly decreases with increasing supply voltage (10-60 V), stabilizing at higher voltages (>30 V). The electrical resistivity also decreases with increasing void fraction until it stabilizes. The relationship between electrical resistivity and void fraction shows similar patterns for different supply voltages. The power, exponential, and logarithmic functions are used to fit the relationship between electrical resistivity and void fraction, with the power function providing the smallest error. The empirical formula for void fraction and electrical resistivity of underwater riprap is then established, taking into account the influence of supply voltage. The empirical formula's reliability is verified through an underwater riprap dam model test, enabling effective description of the occurrence state of underwater riprap and quick identification of internal defects in underwater riprap dams.

Key words: underwater riprap; defect detection; electrical resistivity; void fraction; power supply voltage