

水泥改良土电阻率随压载变化特性试验研究

高涛¹, 孙建军¹, 李帅², 张永壮^{3*}, 吴鸿芮^{3*}, 刘冰冰³

1. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东港口渤海湾港集团有限公司, 山东 潍坊 261000;
3. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为研究不同含水率下水泥改良土的抗剪强度及电阻率特性,制备含水率分别为7.7%、9.7%、11.7%、13.7%、15.7%、17.7%、19.7%的水泥改良土试件,水泥在水泥改良土中的质量分数为8%,对试件进行剪切试验,分别施加垂直压力100、200、300、400 kPa,研究有压和无压条件下水泥改良土抗剪强度变化规律及电阻率响应特性。结果表明:1)无压条件下不同含水率试件的黏聚力和内摩擦角均与初始电阻率存在二次函数关系,拟合曲线决定系数较大,表明采用电阻率法评估抗剪强度特性可行;试件的抗剪强度与破坏电阻率间均近似呈线性关系,抗剪强度随电阻率的增大而减小;随垂直压力的增大,试件的峰值剪应力整体呈增大趋势,随含水率的增大,峰值剪应力先增大后减小。2)有压条件下试件的含水率与初始电阻率、破坏电阻率均呈负相关指数函数关系;随垂直应力的增大,不同含水率下试件的破坏电阻率降幅减小;试件的破坏电阻率随含水率的增大而减小;不同含水率下,试件的破坏电阻率随垂直压力的增大整体呈减小趋势。

关键词:水泥改良土;电阻率;抗剪性能;试验研究

中图分类号:U654

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)06-0106-08

引用格式:高涛,孙建军,李帅,等.水泥改良土电阻率随压载变化特性试验研究[J].山东交通学院学报,2025,33(6):106-113.

GAO Tao, SUN Jianjun, LI Shuai, et al. Experimental research on the variation characteristics of resistivity of cement-improved soil with changes in load[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(6): 106-113.

0 引言

随着港口码头、堤坝等关键水工结构在复杂地质环境中的建设规模持续扩大,传统勘察与监测技术在数据连续性、响应实时性及现场适应性方面逐渐显露局限性,尤其在隐患识别与无损评估方面亟需突破^[1-2]。近年来,电阻率法因其可建立结构物性能指标间的定量映射关系而应用广泛。Qin等^[3]、Zhao等^[4]、Naseem等^[5]通过大量试验研究揭示结构物的各参数与电阻率间的良好回归关系,明确电阻率法在土体结构识别及工程性能评估中的应用潜力。

研究人员从水泥土和改良土的电阻率特性方面系统揭示不同改良土试样受含水率、孔隙率、温度及离子浓度等因素影响的变化规律:袁淑卿等^[6]通过室内试验发现砂土电阻率对含水率和盐质量浓度变化高度敏感;刘松玉等^[7]通过试验发现水泥土试样随养护龄期和水泥与土的质量比的增大而增大,随含水

收稿日期:2025-09-25

基金项目:山东省住房城乡建设科技计划项目(2024KYKFJZGYH100)

第一作者简介:高涛(1987—),男,山东枣庄人,高级工程师,工学硕士,主要研究方向为港航工程材料应用,E-mail:zyz1783591412@yeah.net。

* 第一通信作者简介:张永壮(1999—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为混凝土耐久性强化与长效服役机制研究,E-mail:18369249197@163.com。

* 第二通信作者简介:吴鸿芮(2000—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为绿色混凝土与功能化创新应用研究,E-mail:hongruiw0925@163.com。

率、饱和度、似水灰比的增大而减小,水泥土电阻率与抗压强度和标贯击数相关性较好;缪林昌等^[8]研究发现水泥土的电阻率与水泥在水泥土中的质量分数及无侧限抗压强度呈线性关系,可应用于检测水泥粉喷桩的施工质量。这些研究多集中于单一影响因素或理想试验环境,对复杂耦合环境下的电阻率演变规律关注较少。Liu等^[9]对土石混合物进行润湿试验测量其电阻率和变形,发现在固结过程中土石混合物的电阻率减小,电阻率的变化幅度受岩石在土石混合物中的质量分数和固结围压的影响,通过指数函数模型计算电阻率,测量评估土石混合物的润湿变形。Fu等^[10]测量压实度分别为90%、93%、96%的现场基层砂壤土以及石灰改良土的电阻率,采用阿基模型、指数模型和对数模型较好地拟合土壤电阻率和含水率的关系,阿基模型的预测准确性更好;压实改良土的指数与自然土的指数基本一致。上述这些成果为定量描述电阻率与土体物理状态间关系提供理论基础,但模型的普适性与复杂环境适应性仍有待进一步完善。

除改良土材料组成等影响因素外,研究人员从不同母体土材料方面进行研究:常方强等^[11]采用淤泥、粉质黏土和砂土分别与一定量的水泥砂浆混合制备水泥土试样,通过水泥土电阻率公式计算不同养护龄期、水泥与土的质量比的水泥土电阻率,发现水泥土电阻率随养护龄期、水泥与土的质量比和抗压强度的增大而增大,按水泥土电阻率从小到大排列为淤泥、粉质黏土和粉砂;董晓强等^[12]通过无侧限抗压强度和渗透试验等发现水泥土芯样的无侧限抗压强度与电阻率、渗透系数与电阻率、变形模量与无侧限抗压强度间均呈线性关系;白丁^[13]研究水泥土在生活污水与氯盐冻融循环双重作用下的劣化机理,指出电阻率衰减可作为水泥土无侧限抗压强度退化的敏感表征;Vincent等^[14]测量发现未固化和已固化土水泥材料的电阻率和无侧限抗压强度随水泥在水泥土中的质量分数和固化时间的增大而增大,构建模型并采用电阻率预测试件养护7d的抗压强度。Liu等^[15]通过试验发现重构土水泥的电阻率随水泥在土水泥中的质量分数和固化时间的增大而增大,随含水率、饱和度、水与水泥质量比的增大而减小,建立方程预测在特定固化时间及水与水泥质量比条件下土水泥的电阻率。这些模型多基于特定地区母体土与试验条件,其参数普适性和对复杂环境下长期演化行为的适应性仍有待进一步研究。当前采用电阻率法测定水泥改良土综合性能应用广泛,已有研究成果多集中于静态参数电阻率与改良土力学性能间的定量分析,缺乏其在材料力学性能演化过程中的动态响应规律研究^[16]。

本文对不同含水率的水泥改良土进行有压与无压条件下的抗剪试验与电阻率同步监测,分析不同加载条件下抗剪强度与电阻率响应特征的定量关系,探讨电阻率法在抗剪性能预测中的可行性,以期为后续改良土深度应用及性能预测提供理论支撑与技术基础。

1 水泥改良土抗剪强度试验

1.1 试验材料

选择小清河高青港的黏土作为试验用土,其物理性质指标如表1所示。选用国标普通硅酸盐水泥P·O 42.5且干燥密封保存,水泥各项物理性质指标如表2所示,符合文献[17]要求。试验所用清水为普通自来水,符合文献[18]要求。

表1 试验用土的物理性质指标

密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%
2.58	31.2	12.0	19.2	1.77	12.6

表2 普通硅酸盐水泥的物理性质指标

标准稠度/%	安定性	烧失量/%	初凝时间/min	终凝时间/min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					养护3d	养护28d	养护3d	养护28d
28.4	合格	1.04	256	382	22.4	44.2	4.6	8.9

1.2 试验准备及试件制备

将水泥与土体混合制备水泥改良土,水泥在水泥改良土中的质量分数 $w=8\%$,最优含水率为 11.7% ,最大干密度为 2 g/cm^3 ,压实度为 96% ,养护 7 d ,此类水泥改良土作为重力式码头墙后回填土性能最优^[19]。后续均基于此最优配比条件制备试件进行试验研究。

根据文献[20]的要求,试验所用设备主要包括烘箱、电子天平(量程为 200 g 、最小刻度为 0.01 g)、称量盒(2个)、干燥器。测量含水率试验前将黏土放置在阴凉处自然风干后过筛。采用对照试验,选用几组风干的黏土同时进行。黏土含水率

$$w = 100\% \times (m - m_s) / m_s,$$

式中: m 为湿土质量, g ; m_s 为干土质量, g 。

经试验测得黏土的风干含水率为 2.27% 。

制备直径为 100 mm ,高 100 mm 的普通圆柱体试件,水灰比为 0.5 ,试件含水率分别为 7.7% 、 9.7% 、 11.7% 、 13.7% 、 15.7% 、 17.7% 、 19.7% ^[21-22],每个含水率下制备 4 个试件,共 28 个试件。

1.3 试验步骤

采用应变控制式直剪仪进行直剪试验,确定水泥改良土黏聚力与内摩擦角。试验前,在环刀内壁均匀涂抹一层薄薄的凡士林,减少取样摩擦。采用环刀从圆柱体试件上取出不同含水率的试件。试验过程中,设定剪切速度为 0.8 mm/min ,并施加垂直压力 p 分别为 100 、 200 、 300 、 400 kPa 。通过向试件施加水平剪应力,使其产生剪切位移,当应力环的读数不再增大或开始回退时,停止试验,认为试件已被破坏。记录破坏瞬间的测力计读数及对应手柄圈数,并根据库仑定律对数据进行计算与回归分析,获得不同含水率下的黏聚力与内摩擦角。试件的剪应力

$$\{\tau\} = 10\{C\}\{R\}/\{A_0\},$$

式中: $\{\tau\}$ 为以 kPa 为单位的剪应力 τ 的数值; $\{C\}$ 为以 $\text{N}/(0.01\text{ mm})$ 为单位的测力计率定系数 C 的数值; $\{R\}$ 为以 0.01 mm 为单位的测力计读数 R 的数值; $\{A_0\}$ 为以 cm^2 为单位的试件初始面积 A_0 的数值。

采用数字万用表检测剪切过程中试件的电阻率。将万用表固定在剪切盒的两侧,为防止电流干扰,在滚珠、剪力盒两侧、量力环与推进装置间的接触面处均涂抹液体绝缘防水胶。试验开始时记录初始读数,每旋转一次手柄,记录一次读数,在试件破坏时记录最终读数。剪切过程电阻率测量试验装置如图 1 所示。



图 1 剪切过程电阻率测量试验装置

2 水泥改良土抗剪强度变化规律及电阻率响应特性分析

剪切试验过程中,将试件装入剪力盒,初始阶段测得的电阻率为初始电阻率。共测定 3 次初始电阻率,取其平均值作为代表值,且每次测定间隔时间不小于 2 min ,确保数据的稳定性与可重复性。剪切过程中试件的剪应力不再增大时,出现抗剪强度峰值,对应的电阻率为破坏电阻率。

2.1 无压条件下水泥改良土抗剪强度指标随电阻率变化特性分析

对不同条件下的水泥改良土进行剪切试验,根据库仑破坏准则,假设试件破坏时的剪应力与法向应力呈线性关系,其函数形式可表示为:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi,$$

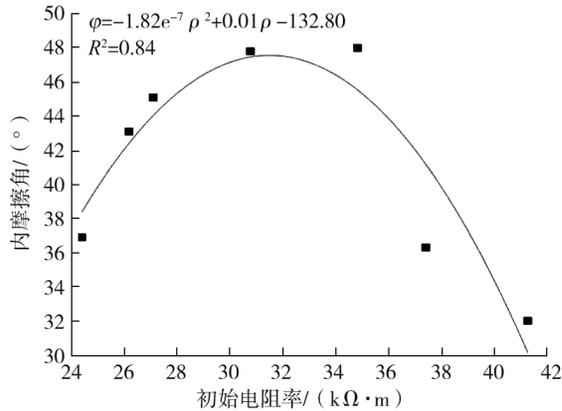
式中: τ_{\max} 为峰值剪应力, kPa ; c 为黏聚力, kPa ; σ 为法向应力, kPa ; φ 为内摩擦角, $^\circ$ 。

为确定抗剪参数,分别选取不同含水率条件下的试件,垂直压力分别为 100 、 200 、 300 、 400 kPa ,测得峰值剪应力。采用最小二乘法对剪应力-垂直压力数据进行线性回归计算,拟合直线的截距即为黏聚力,斜率的反正切值为内摩擦角 φ ,如表 3 所示。为减小偶然误差,每组试验取 3 组平行数据的平均值,最终

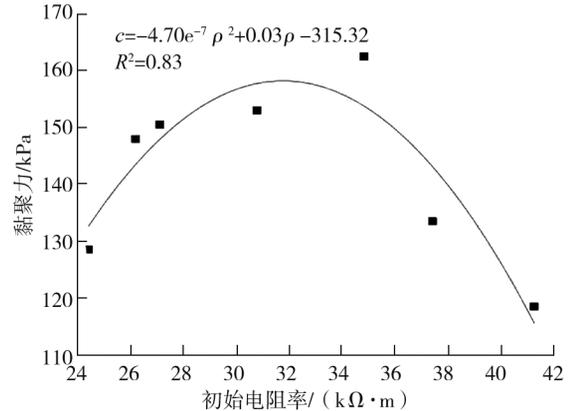
获得不同含水率试件的黏聚力、内摩擦角及其在未加载状态下测得的初始电阻率 ρ , 并对数据进行拟合分析, 如图 2 所示。

表 3 水泥改良土的抗剪参数

含水率/%	7.7	9.7	11.7	13.7	15.7	17.7	19.7
黏聚力/kPa	118.5	133.5	162.5	153.0	150.5	148.0	128.5
内摩擦角/(°)	32.0	36.3	48.0	47.8	45.1	43.1	36.9



a) 内摩擦角-初始电阻率拟合曲线



b) 黏聚力-初始电阻率拟合曲线

图 2 水泥改良土抗剪强度指标与初始电阻率拟合曲线

由图 2 可知: 不同含水率下改良水泥土试件的初始电阻率与黏聚力、内摩擦角均呈二次函数关系, 决定系数均大于 0.80, 表明采用电阻率法评估水泥改良土抗剪强度特性可行。在实际测试中, 可通过拟合方程, 结合已获得的抗剪强度参数与未加载状态下测得的初始电阻率间的定量关系, 分析不同含水率状态下水泥改良土抗剪强度参数的变化情况, 实现对水泥改良土工程性质变化的快速精准评价。

探讨水泥改良土剪切破坏过程中的电阻率变化规律, 不同含水率条件下试件未加载状态下破坏电阻率与抗剪强度关系如图 3 所示。

由图 3 可知: 不同含水率下, 水泥改良土试件的抗剪强度与未加载状态下破坏电阻率间均近似呈线性关系, 抗剪强度随破坏电阻率的增大而减小。原因是在相同含水率条件下, 随着剪切进行, 水泥改良土内部出现越来越多的微孔隙, 孔隙逐渐增大, 空气进入后导致土体结构的导电性减弱, 破坏电阻率增大。

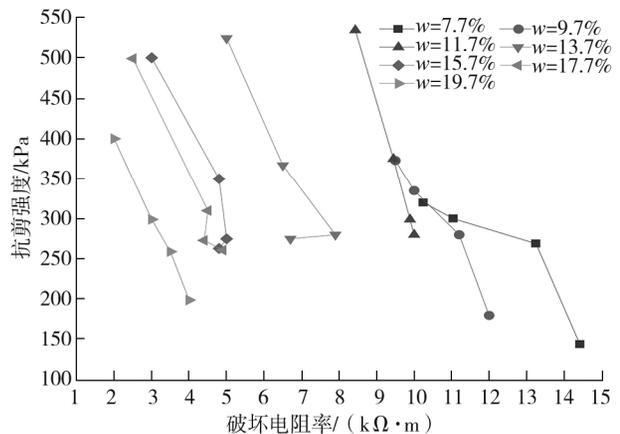


图 3 不同含水率试件抗剪强度与破坏电阻率关系曲线

2.2 有压条件下水泥改良土抗剪强度及电阻率变化特性分析

为获得有压条件下水泥改良土抗剪强度随电阻率变化规律, 选取不同含水率试件在垂直压力 p 分别为 100、200、300、400 kPa 作用下进行剪切破坏, 记录在不同垂直压力下随剪切过程试件剪切位移的变化情况, 一旦测力计指针后退即停止记录, 认为此时试件被剪坏, 获得剪切应力-位移曲线如图 4 所示。

由图 4 可知: 随垂直压力的增大, 试件的峰值剪应力整体呈增大趋势, 表明垂直压力对水泥改良土的抗剪强度具有显著的增强效应。主要原因是高垂直压力作用下试件孔隙体积显著压缩, 颗粒骨架趋于致密化, 颗粒间接触点增多并形成更强的嵌锁作用, 抗剪阻力增大。加载过程中孔隙水向上迁移, 使剪切面局部含水率略降, 孔隙水压力随之减小, 有效应力增大, 进一步促进抗剪强度提高。

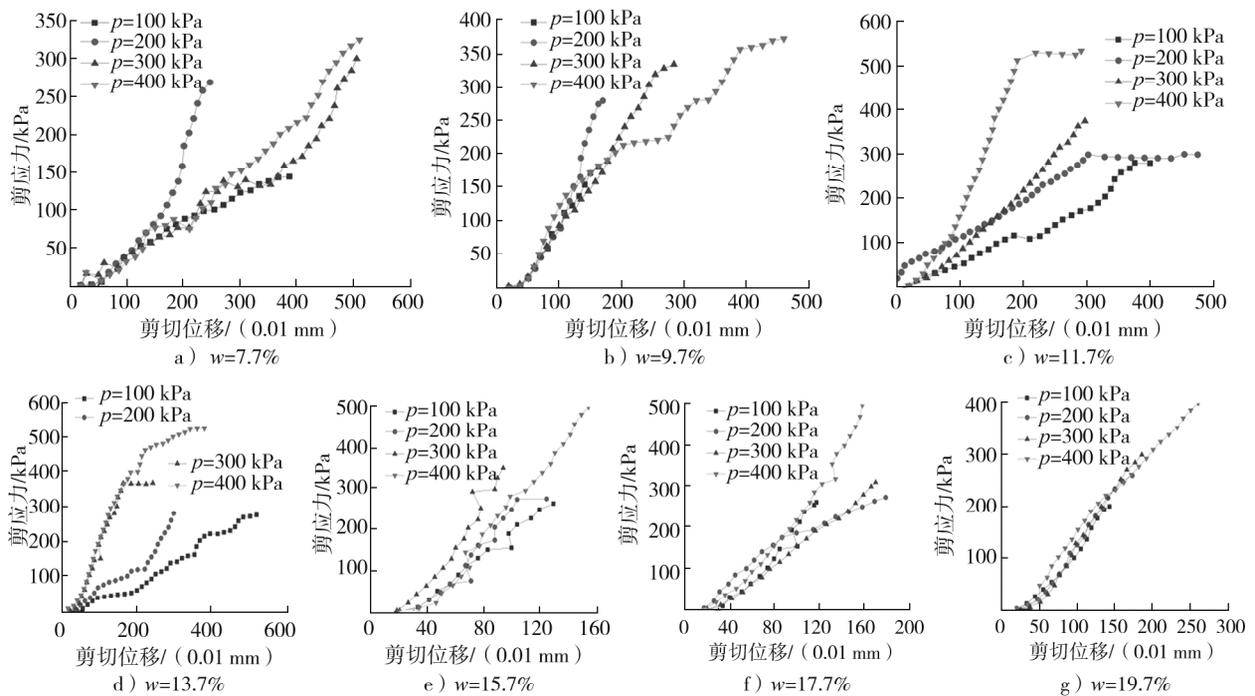


图4 不同垂直压力条件下试件剪应力-剪切位移曲线

随含水率的增大,试件的峰值剪应力先增大后减小。当含水率增至 19.7%时,即使法向应力增至 400 kPa,其峰值剪应力仍显著小于含水率为 11.7%的试件。过高的含水率削弱了未饱和土体的毛细吸力,并在高压条件下引起孔隙水压力积聚。孔隙水的润滑效应削弱了颗粒间摩擦阻力与胶结力,导致应力传递路径中断,结构强度下降。含水率为 11.7%的试件处于未饱和状态的最佳区间,既能保持足够毛细吸力提高表观黏聚力,又具有良好的致密结构,因此在高法向应力下的抗剪强度最大。

水泥改良土的抗剪性能对含水率有明显的非线性响应特征:在低含水率阶段,孔隙结构松散,微裂隙发育,抗剪强度受限;在中等含水率阶段,毛细吸力与致密化作用共同提高强度;在高含水率阶段,饱和趋势与孔压效应主导,抗剪强度显著减小。

2.3 压力作用对初始电阻率及破坏电阻率的影响分析

为明确压力对试件不同阶段电阻率变化的影响规律,测定不同含水率试件在不同条件下的电阻率。试件的初始电阻率与含水率间的关系及拟合曲线如图 5 所示。

由图 5 可知:拟合曲线的决定系数为 0.98,表明拟合曲线与数据的一致性较好;试件的初始电阻率与含水率呈负相关指数函数关系。当试件含水率由 9.7%增至 19.7%,初始电阻率比含水率为 7.7%的试件分别减小 9.34%、15.62%、25.47%、34.38%、36.61%、40.95%。

不同垂直压力 p 下,试件的破坏电阻率与含水率的关系曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:拟合曲线的决定系数均大于 0.90,表明拟合曲线与数据的一致性较好;试件的破坏电阻率与含水率呈负相关的指数函数关系;随垂直压力的增大,试件的破坏电阻率均随含水率的增大而显著减小,但降幅减小,呈明显的阶段性特征。当含水率由 7.7%增至 19.7%时,破坏电阻率的总体降幅分别约为 72%、76%、73%和 80%。在垂直压力分别为 100、200 kPa 条件下,电阻率随含水率的增大呈指数型衰减,说明水分增加对导电性的增强作用更敏感;垂直压力分别为 300、400 kPa 条件下,破坏电阻率降幅趋缓,表明约束压力的增大在一定程度上抑制了含水率对破坏电阻率变化的影响。

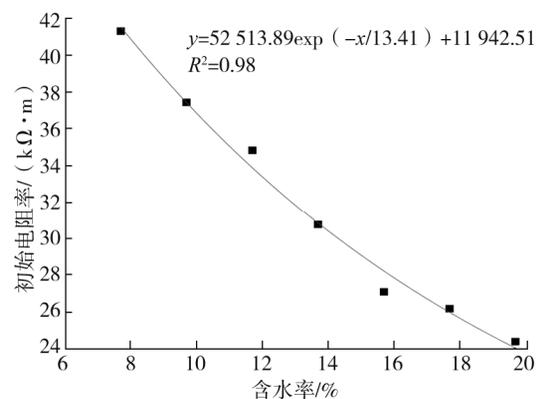


图5 不同含水率试件初始电阻率关系曲线

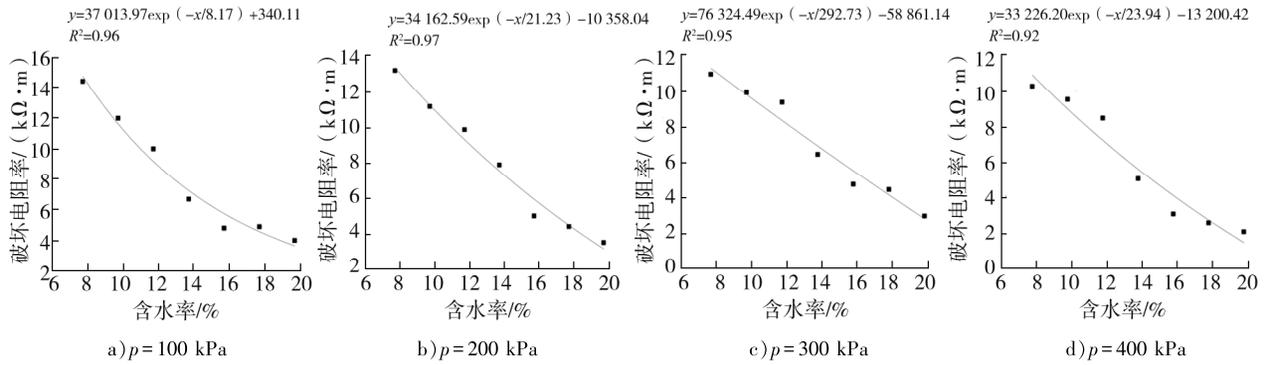


图 6 不同垂直压力下试件的破坏电阻率与含水率的关系曲线

不同含水率下,试件的破坏电阻率与垂直压力的关系曲线如图 7 所示。

由图 7 可知:试件的破坏电阻率随含水率的增大总体呈下降趋势,表明水分在导电过程中起主导作用。在相同含水率条件下,破坏电阻率随垂直压力的增大整体呈减小趋势,仅在个别含水率条件下略增。随垂直压力的增大,试件孔隙率减小,颗粒间接触更紧密,固体相导电通道增多,导电性能增强,电阻率减小。当垂直压力继续增大至一定程度时,局部应力集中可能诱发微裂隙,使气相参与导电体系,破坏了原有的连续导电路径,导致电阻率在个别情况下略增。

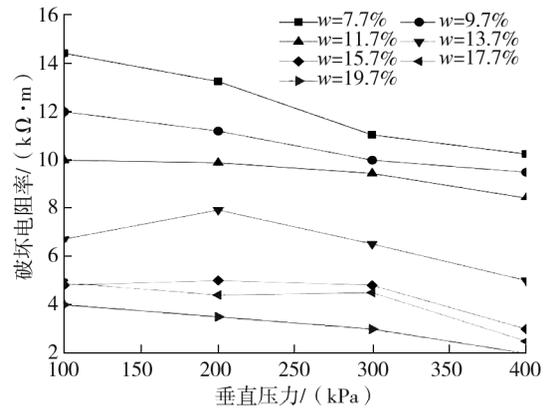


图 7 不同含水率下试件的破坏电阻率与垂直压力的关系曲线

3 结论

1)水泥在水泥改良土中的质量分数为 8%时,制备含水率分别为 7.7%、9.7%、11.7%、13.7%、15.7%、17.7%、19.7%的水泥改良土试件,试验研究在有压和无压条件下试件的抗剪强度变化规律,明确了不同条件下抗剪强度指标初始电阻率响应特征及破坏过程中电阻率响应特征。

2)无压条件下不同含水率试件的黏聚力和内摩擦角抗剪强度指标均与初始电阻率存在良好的二次函数关系,与破坏电阻率间均呈近似线性关系,为后续电阻率法评估水泥改良土抗剪指标及水泥改良土剪切破坏性能提供依据。

3)有压条件下不同含水率试件的含水率与初始电阻率、破坏电阻率均呈负相关指数函数关系。试件含水率由 9.7% 增至 19.7%,初始电阻率比含水率 7.7% 的试件分别减小 9.34%、15.62%、25.47%、34.38%、36.61%、40.95%,破坏电阻率随垂直压力的增大整体上呈减小趋势。

参考文献:

- [1] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):1-10.
- [2] MERIOUA A, BEZZAR A, GHOMARI F. Non-destructive electrical methods for measuring the physical characteristics of porous materials[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015,34(2):1-12.
- [3] QIN P J, LIU Y B, SONG Z W, et al. An electrical resistivity method of characterizing hydromechanical and structural properties of compacted loess during constant rate of strain compression[J]. Sensors,2020,20(17):4783.
- [4] ZHAO M J, CHEN S L, WANG K, et al. Analysis of electrical resistivity characteristics and damage evolution of soil-rock mixture under triaxial shear[J]. Materials (Basel, Switzerland),2023,16(10):16103698.
- [5] NASEEM A, JALAL F-e, NASEEM A. Predicting sandy-clayey soil properties using electrical resistivity testing[J].

- Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2019, 173(1):1-21.
- [6] 袁淑卿, 孙蓉琳, 邢锦兵, 等. 不同测试条件下砂样电阻率特性试验研究[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5):257-263.
- [7] 刘松玉, 韩立华, 杜延军. 水泥土的电阻率特性与应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11):1921-1926.
- [8] 缪林昌, 刘松玉, 严明良. 水泥土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1):126-130.
- [9] LIU G, WANG K, ZHAO M J. Experimental analysis of resistivity changes and wetting deformation of soil-rock mixture [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(4):4024047.
- [10] FU W, WANG Y, YOU Y H, et al. The influence of varying subgrade soil compaction on the relationship between soil water content and resistivity[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2025, 39(1):1-9.
- [11] 常方强, 涂帆. 闽南水泥土电阻率特性的试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(1):93-96.
- [12] 董晓强, 宋志伟, 张少华, 等. 水泥土搅拌桩芯样电阻率特性的应用研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10):88-94.
- [13] 白丁. 双重环境作用下水泥土的力学及电阻率试验研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2019(8):66-68.
- [14] VINCENT N A, SHIVASHANKAR R, LOKESH K N, et al. Laboratory electrical resistivity studies on cement stabilized soil[J]. International Scholarly Research Notices, 2017, 2017:8970153.
- [15] LIU S Y, DU Y J, HAN L H, et al. Experimental study on the electrical resistivity of soil-cement admixtures [J]. Environmental Geology, 2008, 54(6):1227-1233.
- [16] 王亚洵. 基于水上连续高密度电法的平原水库渗漏检测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 通用硅酸盐水泥:GB 175—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [18] 中华人民共和国建设部. 混凝土用水标准:JGJ 63—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [19] 陈其帆. 耦合场中改良土弱化规律及预警体系研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2023.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [21] 中华人民共和国交通部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程:JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Experimental research on the variation characteristics of resistivity of cement-improved soil with changes in load

GAO Tao¹, SUN Jianjun¹, LI Shuai², ZHANG Yongzhuang^{3*},
WU Hongrui^{3*}, LIU Bingbing³

1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. Shandong Port Bohai Bay Port Group Co., Ltd., Weifang 261000, China;

3. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To investigate the shear strength and electrical resistivity characteristics of cement-stabilized soil under varying moisture contents, specimens were prepared with moisture contents of 7.7%, 9.7%, 11.7%, 13.7%, 15.7%, 17.7%, and 19.7%, and a fixed cement content of 8%. Direct shear tests were conducted under vertical pressures of 100, 200, 300, and 400 kPa to examine the variation patterns of shear strength and resistivity responses under both unconfined and confined conditions. The results indicate that under unconfined conditions, both cohesion and internal friction angle at different moisture contents exhibit quadratic relationships with the initial resistivity. The fitted curves show high coefficients of determination, confirming the feasibility of assessing shear strength based on resistivity measurements. A nearly linear correlation is observed between shear strength and failure resistivity, where shear strength decreases as failure resistivity increases. With increasing vertical pressure, the peak shear stress of the specimens generally increased. As the moisture content increased, the peak

shear stress first increased and then decreased. Under confined conditions, both initial and failure resistivity values exhibited negative exponential relationships with moisture content. As the vertical stress increased, the degree of reduction in failure resistivity decreased across different moisture contents. Under different moisture contents, the failure resistivity of the specimen generally decreases with increasing vertical pressure.

Keywords: cement-improved soil; electrical resistivity; shear strength; experimental study (责任编辑:王惠)

(上接第 44 页)

visualized. The results indicate that the vessel types in the Pearl River Estuary are diverse, with large sizes and high speeds; the main outbound navigation route from Guangzhou Port, the secondary outbound route from Guangzhou Port to the Dagang outbound route (passing through Lujing Bay), and the Shunde waterway to the Liansha Rong waterway are the three major routes, while the others are general routes. During different time periods, Route 3 has the highest number of routes, while Route 5 has the least. Route 3 is bimodal, with a higher number of vessels navigating during the noon and nighttime. Routes 2, 4, 6, and 7 are unimodal, and Routes 1, 5, 8, and 9 are stable regions with no significant peaks or troughs and little variation. In Route 3, the distribution of collision risk among vessels varies significantly, with higher collision risks present at the intersections of public channels and in the turning areas of the public channel.

Keywords: multi-source data; waterborne traffic safety; risk of collision; data mining; accident prevention (责任编辑:王惠)

(上接第 69 页)

and radial fracturing tests, the impact of different moisture capacity on the shear strength, residual strength, and tensile strength of the soil is analyzed. Combined with scanning electron microscope tests, the microscopic morphology of the soil samples after ring shear failure is observed. The research results indicate that: 1) Under the same moisture capacity, the shear strength of the soil samples significantly increases with the increase of confining pressure; under the same confining pressure, the shear strength of the soil samples significantly decreases with the increase of moisture capacity; when the confining pressure is not greater than 200 kPa, the stress-strain curve of the soil samples shows that after reaching peak strength, the shear strength decreases with the increase of axial strain, eventually approaching the residual strength; when the confining pressure is greater than 200 kPa, the stress-strain curve of the soil samples has no obvious peak point, and the shear strength gradually increases with the increase of axial strain. After the moisture capacity reaches 20%, the stress-strain curve changes from strain hardening to strain softening; when the moisture capacity increases from 14% to 17%, the reduction of the shear strength of the soil samples is the greatest. 2) When the normal stress changes from 100 kPa to 400 kPa, both peak strength and residual strength increase with the increase of normal stress, and the curves are similar under the same moisture capacity conditions; under different moisture capacity, the shear strength increases rapidly to the peak strength and then slowly decreases with the increase of shear displacement; when the moisture capacity is not greater than 17%, the curves exhibit strain softening characteristics, while the moisture capacity is not less than 20%, the curves only include two stages; strain hardening and residual strength, without strain softening phenomena. 3) The residual strength of the soil samples is linearly positively correlated with normal stress, and the tensile strength decreases with the increase of moisture capacity. The tensile strength of undisturbed soil samples and remolded sample tends to be consistent when the moisture capacity is not less than 17%, and slowly decreases; the tensile strength of the soil samples is close to the residual cohesion, indicating that cohesion is the main source of tensile strength.

Keywords: slope engineering; Ili loess; shear strength; residual strength; tensile strength (责任编辑:王惠)