

DOI: 10.11779/CJGE20221281

微生物加固钙质砂地基电阻率特性试验研究

史金权^{1,2,3}, 王磊^{1,4}, 张轩铭¹, 赵航¹, 吴秉阳¹, 赵航行¹, 刘汉龙^{1,2,3}, 肖杨^{*1,2,3}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045; 4. 泉州市审计局, 福建 泉州 362000)

摘要: 微生物加固砂土地基存在加固不均匀的问题, 采用自主研发的多通道电阻率测量技术对微生物加固钙质砂地基的电阻率分布规律开展了试验研究, 研究了菌液和反应液在注入土体后对电阻率幅值及变化规律的影响, 最后根据电阻率分布情况, 探讨了微生物加固钙质砂地基空间上加固程度的差异性, 以及利用电阻率法监测微生物加固过程和加固效果的可行性。试验结果表明: 微生物加固钙质砂地基的电阻率受土体密度, 菌液与反应液影响较大, 其中, 反应液对电阻率的影响程度最高。整体上电阻率随着加固次数的增加呈现先增大后减小的规律, 深部土体电阻率显著低于上部土体, 第七至第八次加固后, 土体电阻率开始增加, 这一现象的原因可能为土体中的孔隙在多次加固后逐渐被生成的碳酸钙填充, 土体中的离子交换通道减少导致电阻率增加, 此时碳酸钙填充孔隙对电阻率的影响占主导地位。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 电阻率; 钙质砂; 菌液; 反应液

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)02-0244-10

作者简介: 史金权(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事微生物加固及钙质砂本构关系方面研究。E-mail: jinquan_shi@163.com。

Experimental study on electricity resistivity of MICP-treated calcareous sand foundation

SHI Jinquan^{1,2,3}, WANG Lei^{1,4}, ZHANG Xuanming¹, ZHAO Hang¹, WU Bingyang¹, ZHAO Hanghang¹, LIU Hanlong^{1,2,3}, XIAO Yang^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas (Chongqing), Chongqing 400045, China; 4. Audit Office of Quanzhou, Quanzhou 362000, China)

Abstract: The heterogeneity is a technical problem for MICP-reinforced foundation. The electricity resistivity of a MICP-treated calcareous sand foundation is experimentally studied using the self-developed multichannel measurement equipments. The effects of bacterial solution and cementation solution on the amplitude and variation law of electricity resistivity are investigated. The spatial differences of the MICP treatment effects in the calcareous foundation and the feasibility of using the electricity resistivity to monitor the MICP reaction process are discussed. The test results show that the electricity resistivity of the calcareous foundation is affected by the density, bacterial solution and cementation solution, among which the effects of cementation solution are the most significant. The electricity resistivity firstly increases, then decreases with the increase of MICP treatment times. The deeper soil has lower electricity resistivity than the upper soil. The electricity resistivity increases after the seventh or the eighth treatment. The reason for this phenomenon may be that the pores in the soil are gradually filled by the generated calcium carbonate after the repeated reinforcement, and the ion exchange channels in the soil are reduced, leading to an increase in the resistivity. The influences of calcium carbonate-filled pores on the resistivity are dominant at this time.

Key words: MICP; electricity resistivity; calcareous sand; bacterial solution; cementation solution

0 引言

目前, 国内外学者围绕微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)在岩土工程中的应用开展了大量的研究。这项技术通过脲酶菌产生的代谢产物脲酶分解尿素, 分

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52108301); 国家自然科学基金重点项目(41831282); 国家自然科学基金优秀青年项目(51922024)

收稿日期: 2022-10-17

*通信作者(E-mail: hhuxyanson@163.com)

解的产物与钙离子发生反应, 生成碳酸钙。碳酸钙产生的过程中能够填充土体孔隙, 胶结土体颗粒, 进而实现加固土体, 改善土体工程性质的作用。脲酶菌广泛存在于自然界中, 且对土体本身无毒害作用。因此 MICP 被认为是一种绿色环保的土体加固技术。此外, 相较于传统的水泥基加固材料, MICP 技术在降低碳排放, 促进“碳中和”目标的实现中具有广阔的发展潜力^[1]。

已有文献表明, MICP 技术在地基加固、液化防治、防渗、抗侵蚀等方面效果显著。经过加固后的砂土, 无侧限抗压强度能够达到 10 MPa^[2]。Feng 等^[3]通过三轴排水试验发现, MICP 加固后的砂土, 其峰值强度、残余强度、残余摩擦角和初始弹性模量都得到显著提高。Van Paassen 等^[4]开展了 100 m³ 的大规模地基试验, 发现微生物加固后增强了地基土壤的强度和硬度。Xiao 等^[5]也将 MICP 技术应用于路基加固, 发现砂质路基的强度得到了大幅提升。液化防治方面, 肖鹏等^[6]通过动三轴试验发现, 加固后钙质砂的抗液化表现从“松砂”转变为“中密砂”。防渗方面, Chu 等^[7]通过 MICP 加固砂土建造了一个小型蓄水池, 加固后砂土的渗透性降低了几个数量级。Xiao 等^[8]利用人工降雨试验检测 MICP 加固黏土边坡的抗雨水侵蝕能力, 发现中等加固程度的边坡具有最优的抗侵蝕能力, 坡面土体强度得到提高, 水土流失量显著降低。

使用 MICP 加固技术时, 需要将菌液与反应液注入土体, 根据注入方式的不同可分为一相法和两相法等。不同的注入方式会产生不同的加固效果。如 Xiao 等^[9]发现, 相较于两相法, 一相法对砂土的加固均匀性有提升。土体性质对加固方法的选择产生影响。黏土孔隙较小, 菌液与反应液难以渗入土体, 有学者使用拌合方式对黏土进行 MICP 加固^[10]。此外, 一些辅助的技术手段如温度控制法^[11]、pH 控制法^[12]、微粒固载成核法^[13]等被应用于砂土加固, 加固均匀性得到一定提升。室内试验中, 检测土体加固不均匀性的方法可对土体进行切分检测碳酸钙含量的分布, 或使用无损方法如剪切波速法对土体刚度分布进行测量^[14]。在模型试验和现场试验中, 静力触探试验也是检测微生物加固土体加固效果的最常用的技术手段之一^[15]。然而以上方法只能检测加固后土体的状态, 对加固过程中菌液与反应液在土体内部的分布状态无法实时监控。

高密度电法是地质勘察中一种常用的无损检测方法。原理是利用岩土体电阻率受土体密度、含水率及矿物成分的影响, 通过电阻率空间上的分布状态对岩土体的地质结构进行分析^[16-21]。有学者对电阻率与土体的孔隙率、含水率及强度的关联性展开研究。马德

良等^[22]利用电阻率法对三轴试样的空间含水率分布进行测量, 得到了干湿循环过程中试样中分层含水率的演化规律。王炳辉等^[23]发现, 饱和砂土中电阻率与砂土的孔隙率存在显著的幂函数关系。张少华等^[24]探究了固化土的强度与电阻率的相关性, 发现固化土无侧限抗压强度与电阻率呈现正线性关系, 且随着固化剂参量的增加, 电阻率增大。孙潇昊等^[25]对微生物加固砂土的电阻率特性开展了研究, 发现电阻率随着碳酸钙含量的增加而减小, 砂柱无侧限抗压强度与电阻率呈负线性相关。此外, An 等^[26]将电阻率法应用到土壤裂隙监测, 发现高密度电阻率法能够有效地反映黏土裂隙产生和发育情况, 在现场土壤裂隙监测中具有很高的应用潜力。柯瀚等^[27]利用高密度电法对竖井抽水过程中垃圾填埋场渗滤液的运移规律进行了研究, 在竖井抽水和回灌过程中, 土体电阻率变化反馈呈现较好的规律性, 电阻率法能够作为垃圾填埋场土体内水气动态分布的有效监测手段。

目前, 已有学者对微生物加固大尺寸砂土地基开展了相关研究。van Paassen 等^[4]通过波速测量, 并对加固后地基拆解发现, 虽然局部土体的无侧限抗压强度能达到 12 MPa, 但存在显著的加固不均匀现象, 注浆管周围的土体强度显著高于模型地基的其他区域。其使用的分析方法也仅限于对加固后的土体进行拆解, 并未对加固过程中菌液和反应液的分布状态进行研究。基于此, 本文利用土体电阻率变化原理, 对微生物加固砂土模型地基开展研究, 探究菌液和反应液的运移和分布规律, 以及土体电阻率随反应进程的变化情况, 进而为场地微生物加固实时监测提供技术参考。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用材料为南海钙质砂, 经测定, 碳酸钙含量大于 95%。经筛分获得粒径小于 1 mm 的试验用砂, 其级配曲线如图 1 所示, 依据《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》^[28]测得物理性质为: 平均粒径 0.43 mm, 不均匀系数为 1.96, 最大和最小干密度分别为 1588, 1279.2 kg/m³, 相对质量密度为 2.81, 初始孔隙率为 51.53%, 孔隙比为 1.063。

1.2 试验设备与电阻率测量方法

试验所用设备由两部分组成, 分别为模型箱试验系统和电阻率测量系统。模型箱尺寸长×宽×高为 1.0 m×0.8 m×0.8 m, 模型地基高度为 0.7 m, 沿高度从下至上分 3 层铺设电阻探针, 布置深度分别为距底部 15, 35, 60 cm 的位置, 每层平面内铺设 7 个, 共 21

个。电阻探针由两根黄铜电极组成，间距为 1 cm，分别连接至正负极电源，每根铜电极与土体的接触长度为 1 mm。模型箱和电阻针的布置如图 2、3 所示。

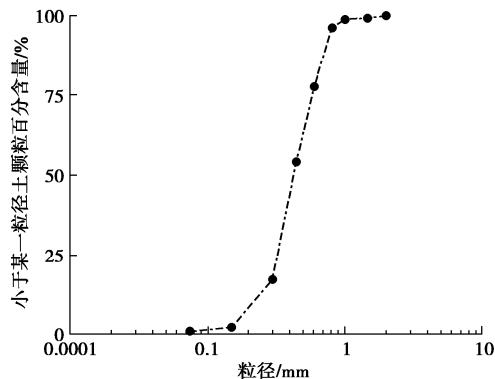


图 1 颗粒级配

Fig. 1 Grain-size distribution curve

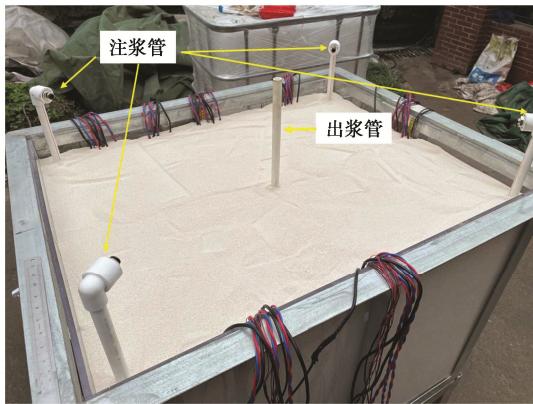


图 2 地基模型

Fig. 2 Foundation model

本文使用 LCR 电桥（同惠电子 TH2830）采集电阻。为了能够实现电阻不间断自动采集，LCR 与电阻针之间需设置可编程式程序控制器 PLC（三菱 FX2N16MR+16EYR）进行采集时间和通道的控制。经过编程，间隔 2 s PLC 能够自动切换通道，LCR 在 PLC 切换频道后完成一次采集并等待 2 s 进行下一组测量。电阻率采集系统的布置如图 4 所示。测试电压为 2 V，频率为 1 kHz。电阻率采集时需要将电极预埋至指定测点，通反应液之前开始测量直至所有加固完成。采集电压为采集到的电阻经过下式转换为电阻率：

$$\rho = 2\pi a R \quad (1)$$

式中： ρ 为电阻率； a 为电阻针间距，本文中 a 为 1 cm； R 为测得的电阻。

1.3 微生物加固方案

钙质砂地基采用砂雨法制样，分 16 次装样，干密度控制为 1362.5 kg/m^3 ，孔隙比为 1.063，相对密度为 0.314，为松砂。制样过程中在模型箱 4 个边角分别埋设 4 个注浆管，在模型箱中心位置埋设一个出浆管，

如图 2 所示。

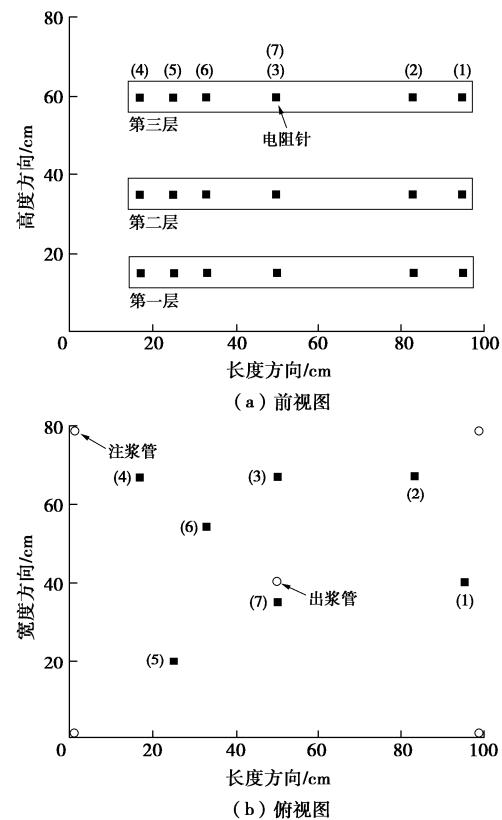


图 3 电阻针布置图

Fig. 3 Distribution of electrical resistivity needles

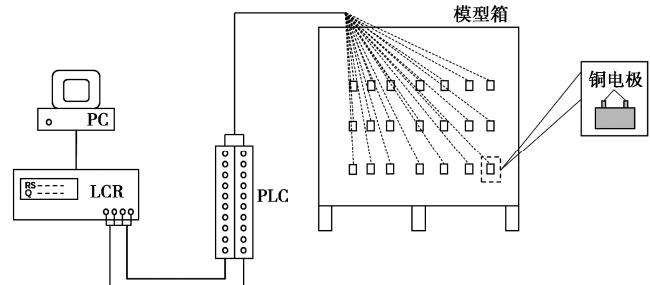


图 4 电阻率采集系统布置图

Fig. 4 System diagram of electrical resistivity measurement

本文加固用菌种为巴氏芽孢杆菌 *Sporosarcina pasteurii*，培养得到用于加固的菌液电阻率为 $1382.76 \Omega \cdot \text{cm}$ ，OD600 为 1.2 左右，脲酶活性为 0.05 左右，反应液由工业级尿素和氯化钙配制而成，浓度均为 1 mol/L，电阻率为 $275.69 \Omega \cdot \text{cm}$ 。本次试验采用两相法进行微生物注浆加固，具体操作步骤为：①钙质砂地基清水饱和 24 h，待注入菌液时将清水排空；②排空地基中的液体，注入菌液 100 L 没过地基静止 4~5 h；③排空菌液注入反应液 100 L，反应 18~20 h。此时为 1 次加固，后续加固重复②③步骤，整个地基共加固 12 次，为了减少注浆压力对地基的扰动，每次注浆压力设定为 20 kPa。注浆过程通过漩涡式自吸泵完

成, 浆液由注浆泵加压后经转换头进入4根注水分管, 最终进入注浆管内。本试验注浆与抽浆同时进行, 以达到排空地基内前一阶段液体的目的, 抽浆通过单向自吸清水泵完成, 加固过程中进行电阻的不间断采集。

2 试验结果与分析

本文中钙质砂地基的电阻率存在两个影响因素, 一是土体本身的密度, 二是流场液体的导电性。周明园等^[29]发现饱和砂土中孔隙率和电阻率的相关关系, 指出孔隙率越低电阻率越高。孙潇昊等^[25]发现随着碳酸钙含量的增加, 土体电阻率下降, 这是由于其测得

的电阻率为非饱和状态下的电阻率, 随着碳酸钙填充孔隙, 非饱和土体的孔隙率下降, 增加了土体内部的导电路路径, 导致电阻率下降。另外, 菌液和反应液含有大量离子, 注入土体后, 会导致电阻率显著下降。图5为第一层土电阻率随加固时间和加固次数的变化情况, 可以看出, 第一层土的电阻率分布情况存在显著的空间差异性, 反映出在土体内部菌液与反应液流场的不均质性。第一次加固时, 如图5(a)所示, 注入菌液后, #2与#4电阻率的初始值显著低于其他电阻针, 结合图3(b)的电阻针分布图, 可以发现, 这两处距离注浆管最近, 表明注浆管周围区域是菌液浓度

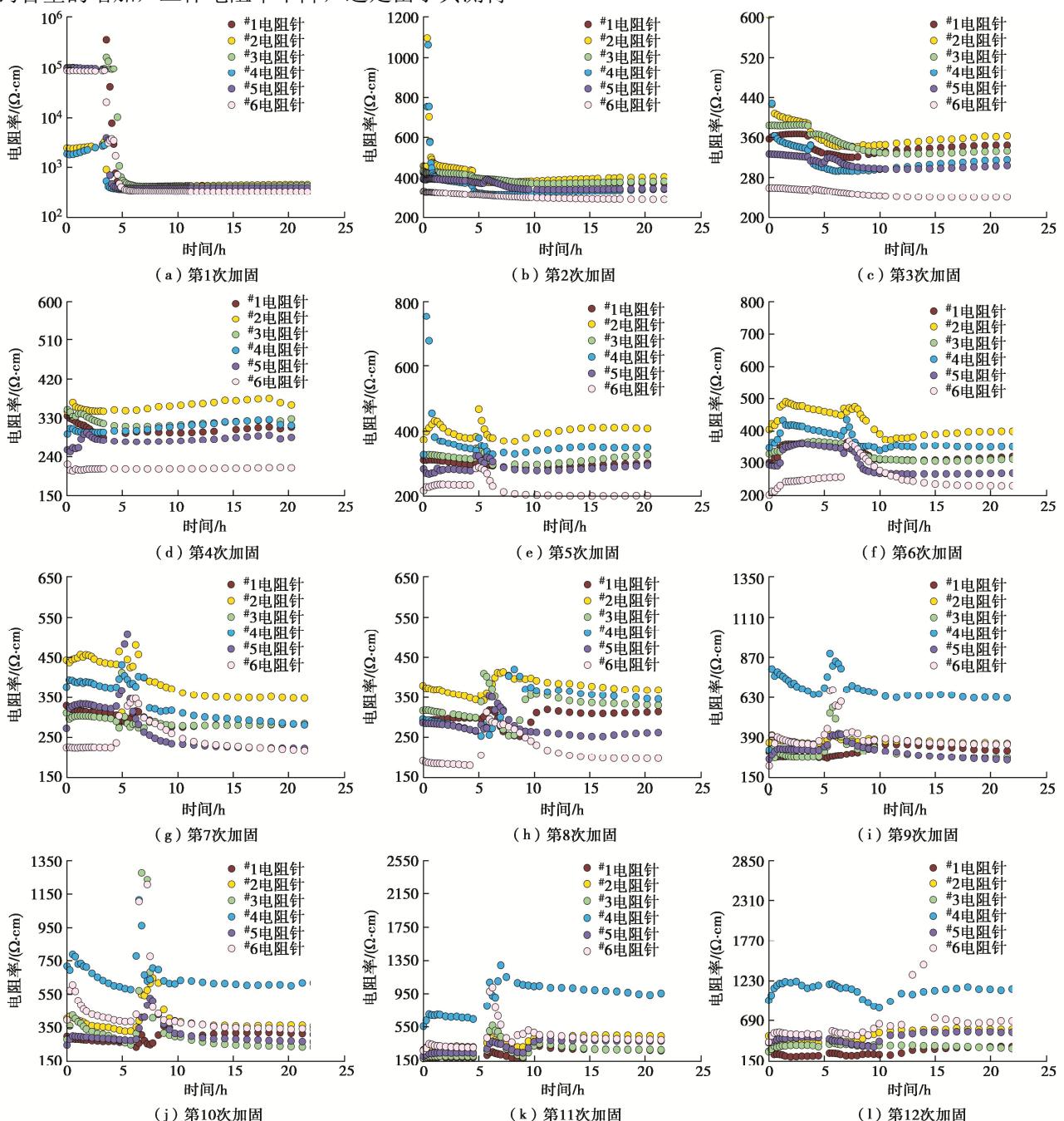


图5 不同加固次数下第一层土电阻率随加固时间变化

Fig. 5 Electrical resistivity versus biotreatment duration under different biotreatment times for first layer of foundation

最高的位置，具有合理性。^{#1} 和^{#3} 虽然介于两个注浆管之间，但电阻率最高，说明菌液浓度较低。以上结果表明，初始注入菌液阶段，整体菌液场分布是以注浆管向出浆管位置逐渐降低的，侧面验证了电阻率监测微生物加固浆液扩散的可行性与合理性。经过 4 h 左右的微生物附着，开始注入反应液，此时观测到电阻率出现断崖式下降，表明反应液在改变土体导电性方面要远高于菌液。注入反应液 2 h 左右，各个位置处的电阻率趋于一致，表明反应缓和稳定，加固后期对土体电阻率影响较小。此外，在注入反应液初始阶段，电阻率会出现短暂的陡升，这是由于试验中为避

免注水管内残留的菌液与反应液在管内生成碳酸钙沉淀堵塞水管，在注浆完毕后将少量清水注入水管与水泵中，进行清洗，清水中离子浓度低，电阻率大，导致电阻率短暂上升，这种现象在 12 次加固中都可以观察到。由图 5 还可以看出，对于第一层土的前 8 次加固，^{#2} 电阻针测得的电阻率最高，^{#6} 最小，第 8 次加固后这种规律性消失，可以认为第 8 次加固后土体内流场受碳酸钙沉积的影响发生显著改变，也可猜测基本达到加固极限。

图 6,7 为第二层和第三层土体的电阻率随加固时间和加固次数的变化情况。可以观察到，第二层和第

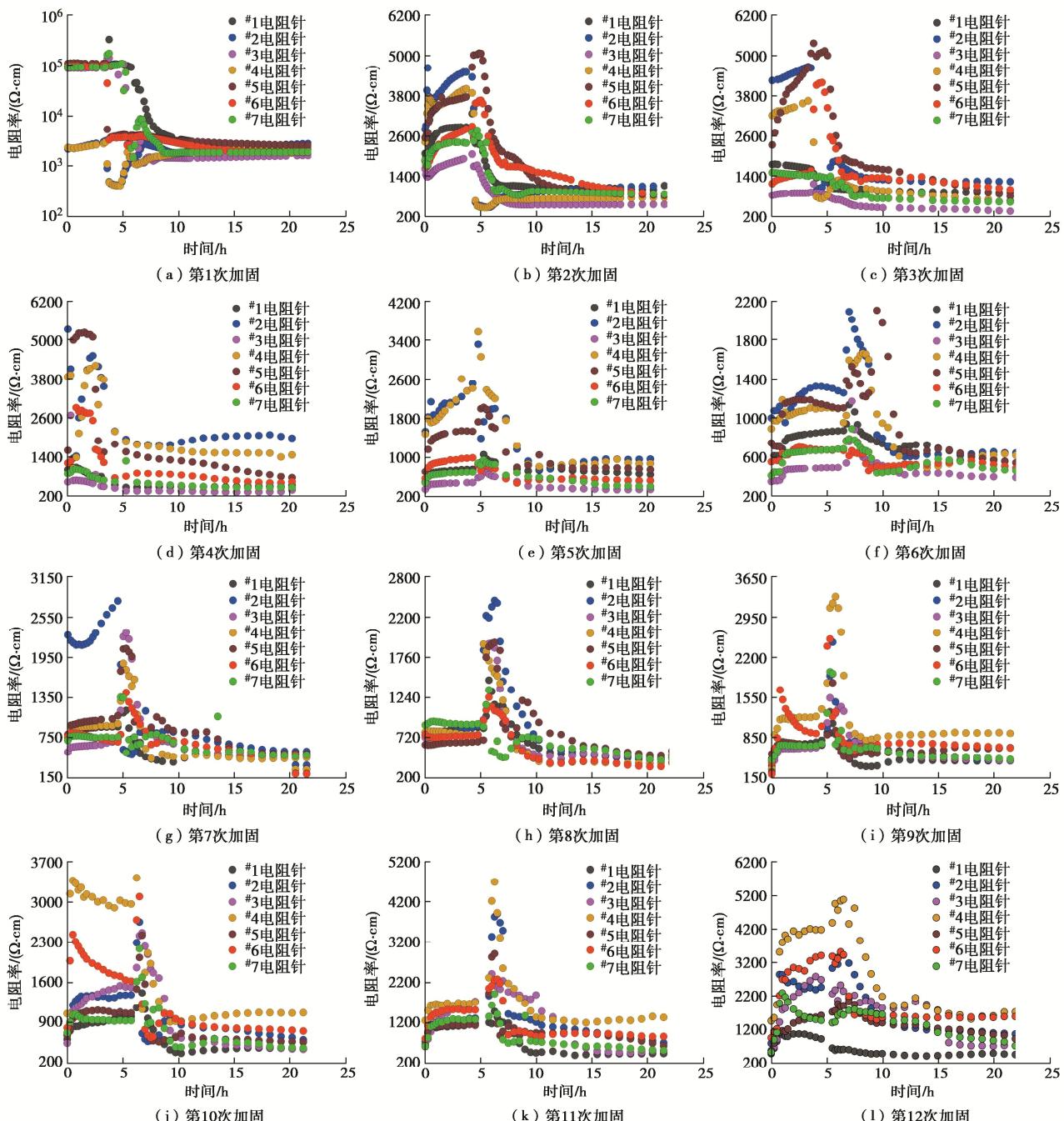


图 6 不同加固次数下第二层土电阻率随加固时间变化

Fig. 6 Electrical resistivity versus biotreatment duration under different biotreatment times for second layer of foundation

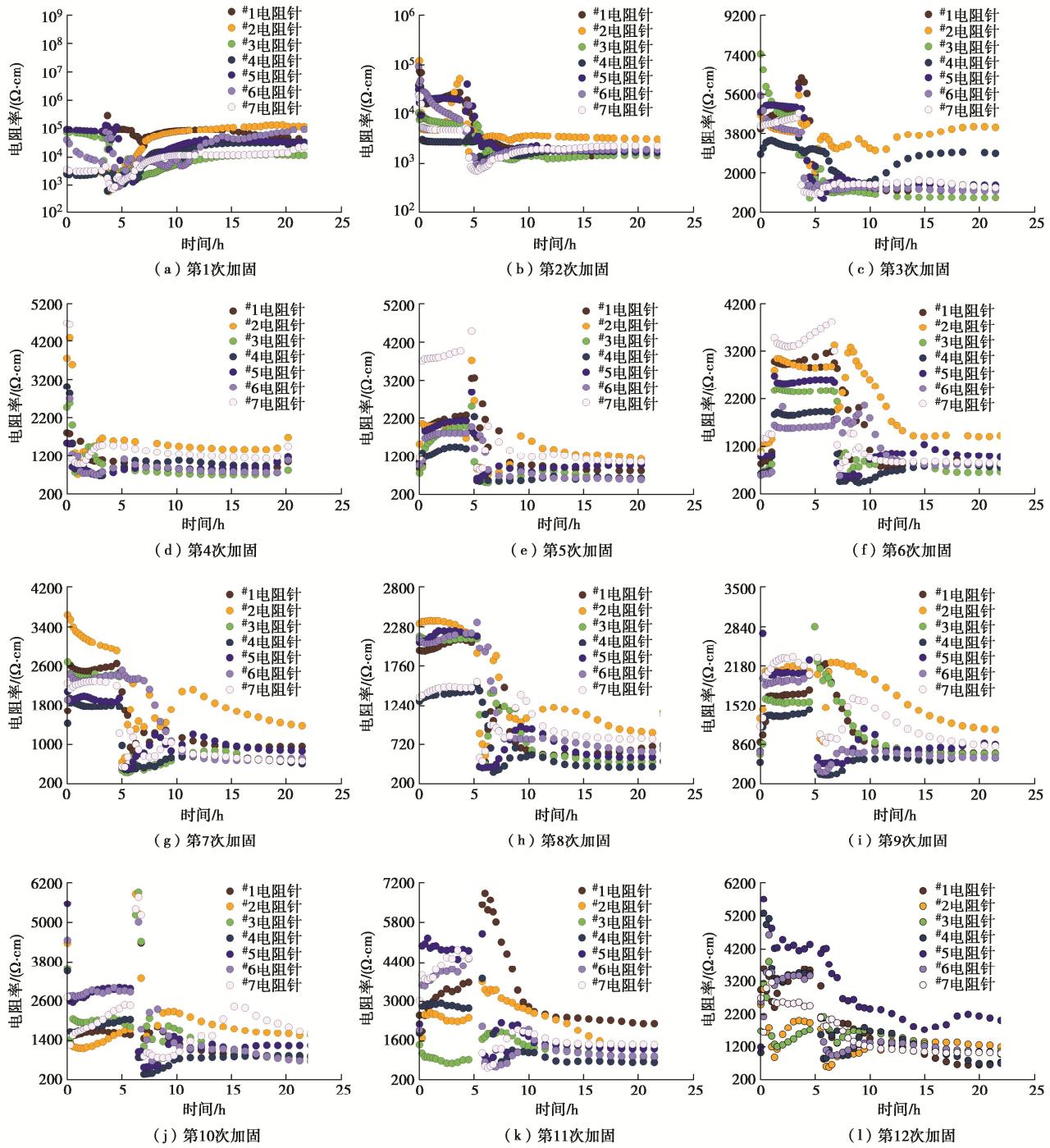


图 7 不同加固次数下第三层土电阻率随加固时间变化

Fig. 7 Electrical resistivity versus biotreatment duration for third layer of foundation

三层土体的电阻率变化与第一层基本一致。更为显著的是在未注入反应液的前 4 h, 土体电阻率有轻微抬升, 如图 6 (f) 所示, 这种抬升在加固次数较多情况下更为显著, 并且第二层和第三层较第一层更为明显。这种现象可能是由于菌液的扩散作用导致的。注入菌液早期存在部分区域菌液浓度较低, 经过扩散, 浓度高区域的离子向浓度低区域转移, 导致流场整体平均电阻率下降。加固初期, 土体内部孔隙畅通, 这种现

象并不显著, 如图 7 (a) 所示, 随着加固次数的增加, 由于土体孔隙率下降, 液体扩散效率减弱, 这种现象愈发显著, 如图 7 (h) 所示。另外对于第一层土, 由于菌液密度大于水的密度, 重力作用下下层土体的菌液分布更加均匀, 这种电阻率抬升现象也并不显著, 如图 5 所示。另外, 以上结果也说明目前电阻针的数量尚不能全面反映土体内部电阻率的分布情况, 证明了增加电阻针分布密度的必要性。

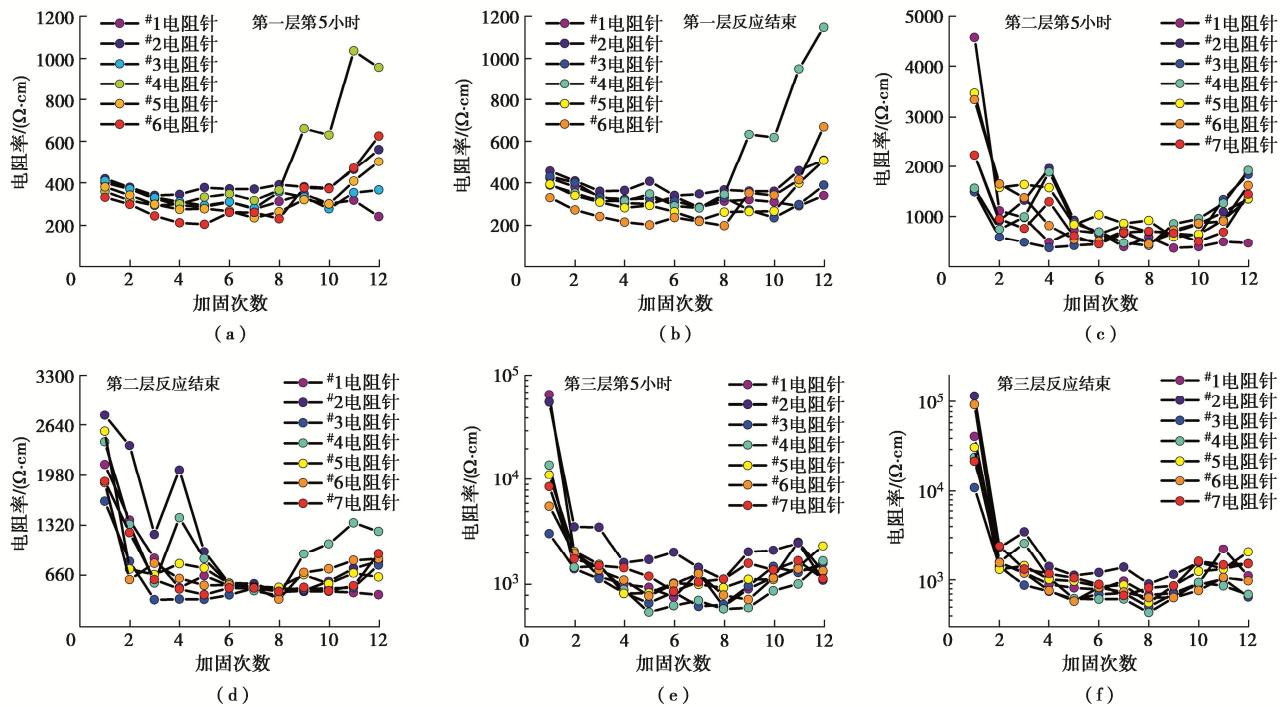


图 8 注入反应液后 5 h 和反应完成时电阻率随加固次数的变化情况

Fig. 8 Electrical resistivity versus biotreatment time at fifth hour and end of reaction

图 4 中第一层土前 8 次加固出现了固定的最大和最小电阻率位置，第二层和第三层土中同样存在这种现象。对于第二层土，电阻率最小值和最大值同样出现在#6 电阻针和#2 电阻针位置处，但限于前 6 次加固。第三层土电阻率最小值在#3 电阻针位置处，最大值在#2 电阻针位置处。可以看出，加固前期#2 电阻针位置处电阻率始终维持在较高值，这并不能从菌液扩散机理角度解释因为其位置处距离注浆管位置较近且处于注浆管和出浆管之间，因此，此处较高的电阻率可能是由于土体密度分布不均导致的，随着微生物加固程度的提高，碳酸钙的不断沉淀使得土体原生密度差异性的影响逐渐降低，加固后期土体电阻率由孔隙水导电率和碳酸钙沉积主导。

孙潇昊等^[25]指出，微生物加固砂土的无侧限抗压强度与电阻率存在相关性。周明园等^[29]也在饱和砂土中发现孔隙率和电阻率的相关关系，指出孔隙率越低电阻率越高，即加固效果越好。基于此，通过本文中加固后期不同位置处电阻率的大小，能够大致推断出模型地基的强度分布规律。van Paassen 等^[4]通过拆解加固后的模型地基发现，靠近注浆和出浆管位置处的土体加固程度较其他区域较高。本文中，#4 电阻针较为靠近注浆管，从图 8 中可以发现，随着加固程度的提高，第一层#4 电阻针电阻率先缓慢降低后逐渐增大且显著大于其余电阻针，此处加固效果较好。但在第二、三层中，#4 电阻针没有出现如第一层的显著变化，相对于其余电阻针处无明显加固优势。以上表明，尽

管水平面的位置一致，不同深度处土体的加固程度仍存在较大差异性，这也反映出微生物加固土体的不均匀性仍旧是这项技术大规模应用所面临的难题。

由图 5~7 可知，电阻率在注入反应液之后的 5 h 左右逐渐稳定至加固结束。为了比较不同加固次数下电阻率的变化情况，图 8 中绘制了注入反应液 5 h 和反应结束时刻电阻率随加固次数的变化情况。可以看出，不同土体深度处电阻率随加固次数的变化存在区别。第一层土电阻率随着加固次数的增加呈现先降低后增加的规律，电阻率终值高于初始值，其中#4 电阻针表现的最为显著。而第二层和第三层土，早期电阻率最高，随着加固程度的增加，电阻率逐渐降低，在最后阶段略微升高，但仍低于早期电阻率。为了比较不同深度处土体电阻率的分布情况，取每次加固后不同土层所有电阻针的平均值绘制于图 9 (a)，9 (b)。可以看出，模型地基整体的电阻率分布随着埋深的增加而不断降低，表明深部土体的加固效果要优于上部土体。上部土体的电阻率随加固次数的变化幅度最大，但在第 4 次加固后，不同土层的电阻率变化幅度趋于一致。土体电阻率在加固第 7~8 次时达到最小值，可能为土体中的孔隙在多次加固后逐渐被生成的碳酸钙填充，土体中的离子交换通道减少导致电阻率增加，此时碳酸钙填充孔隙对电阻率的影响占主导地位。并且在后续加固中电阻率波动不大，可认为已加固到极限，此时第三层土的电阻率为 2150 Ω·cm。

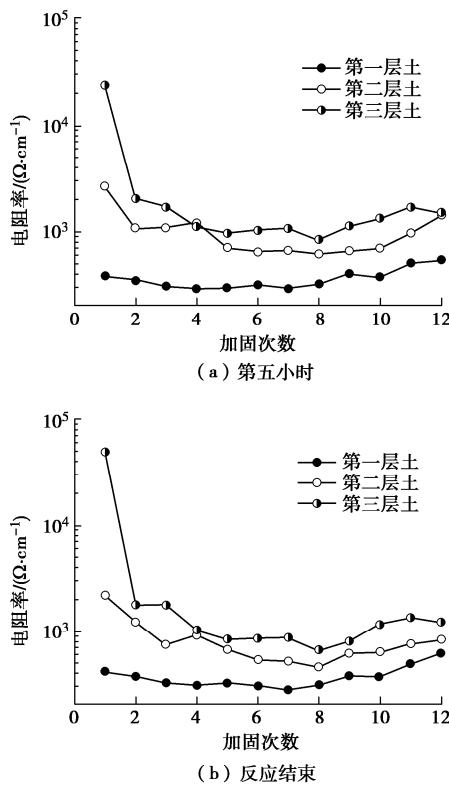


图9 不同土体深度处的电阻率随加固次数变化

Fig. 9 Electrical resistivity versus biotreatment time at different soil depths

3 结 论

本文对微生物加固的钙质砂模型地基电阻率特性开展了试验研究。利用可编程式程序控制器开发了多通道的电阻率采集系统。通过监测钙质砂模型地基在12次加固过程中的电阻率变化特性, 探究了影响微生物加固土体电阻率的因素及不同深度土体的电阻率分布特点, 得到以下4点结论。

(1) 微生物加固钙质砂地基的电阻率受土体密度, 菌液与反应液离子浓度影响较大, 其中, 反应液对电阻率的影响程度最高。初始注入菌液阶段, 整体菌液场分布是以注浆管向出浆管位置逐渐降低的, 验证了使用电阻率监测微生物加固注浆浆液扩散的可行性与合理性。

(2) 注入反应液前, 由于土体内部菌液分布的不均匀性, 部分区域土体电阻率会随着时间略微上升, 并且随着加固程度的提高愈发显著, 表明增加电阻针分布密度的必要性。

(3) 前人研究微生物加固地基中存在不均匀的特点大多是从强度、试验现象等方面验证, 而本文中不同土体深度处的电阻率变化规律并不一致且差异性十分显著, 验证了微生物加固在大型模型地基中存在不均匀性的特点。

(4) 整体上电阻率随着加固次数的增加呈现先增大后减小的规律, 深部土体电阻率显著低于上部土体, 上部土体随着加固次数的增加呈现出较大的衰减幅度, 第七至第八次加固后, 土体电阻率开始增加, 这一现象的原因可能为土体中的孔隙在多次加固后逐渐被生成的碳酸钙填充, 土体中的离子交换通道减少导致电阻率增加, 此时碳酸钙填充孔隙对电阻率的影响占主导地位。

参考文献:

- [1] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Géotechnique, 2013, **63**(4): 287-301.
- [2] AMARAKOON G G N N, KAWASAKI S. Factors affecting sand solidification using MICP with Pararhodobacter sp[J]. Materials Transactions, 2018, **59**(1): 72-81.
- [3] FENG K, MONTOYA B M. Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(1): 04015057.
- [4] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(12): 1721-1728.
- [5] XIAO Y, ZHANG Z C, STUEDLEIN A W, et al. Liquefaction modeling for biocemented calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(12): 04021149.
- [6] 肖鹏, 刘汉龙, 史金权, 等. 微生物加固钙质砂地基动力响应特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(6): 1303-1313. (XIAO Peng, LIU Hanlong, SHI Jinquan, et al. Dynamic response of calcareous foundation reinforced by microbially induced calcite precipitation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(6):1303-1313. (in Chinese))
- [7] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand[J]. Géotechnique, 2013, **63**(10): 871-875.
- [8] XIAO Y, ZHOU W, SHI J Q, et al. Erosion of biotreated field-scale slopes under rainfalls[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2022, **36**(3): 871-875.
- [9] XIAO Y, WANG Y, WANG S, et al. Homogeneity and

- mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, **16**(5): 1417-1427.
- [10] ARPAJIRAKUL S, PUNGRASMI W, LIKITLERSUANG S. Efficiency of microbially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, **282**: 122722.
- [11] 彭 勘, 冯清鹏, 孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(6): 1048-1055. (PENG Jie, FENG Qingpeng, SUN Yicheng. Influences of temperatures on MICP-treated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(6): 1048-1055. (in Chinese))
- [12] 尹黎阳, 唐朝生, 谢约翰, 等. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素 [J]. *岩土力学*, 2019, **40**(7): 2525-2546. (YIN Liyang, TANG Chaosheng, XIE Yuehan, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(7): 2525-2546. (in Chinese))
- [13] 马国梁, 何 想, 路桦铭, 等. 高岭土微粒固载成核微生物固化粗砂强度[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(2): 290-299. (MA Guoliang, HE Xiang, LU Huaming, et al. Strength of biocemented coarse sand with Kaolin micro-particle improved nucleation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(2): 290-299. (in Chinese))
- [14]. XIAO Y, XIAO W T, MA G L, et al. Mechanical performance of biotreated sandy road bases[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, **36**(1): 04021111.
- [15] GOMEZ M G, DEJONG J T, ANDERSON C M. Effect of bio-cementation on geophysical and cone penetration measurements in sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, **55**(11): 1632-1646.
- [16] 郑志龙, 陈 洋, 王丽君, 等. 高密度电法在某高速公路岩溶隧道探测中的应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, **17**(增刊 2): 912-917, 924. (ZHENG Zhilong, CHEN Yang, WANG Lijun, et al. Application of high density electrical method in Karst tunnel detection of a highway[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, **17**(S2): 912-917, 924. (in Chinese))
- [17] 缪林昌, 严明良, 崔 翎. 重塑膨胀土的电阻率特性测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(9): 1413-1417. (MIAO Linchang, YAN Mingliang, CUI Ying. Studies on electrical resistivity of remold expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(9): 1413-1417. (in Chinese))
- [18] 蔡国军, 张 涛, 刘松玉, 等. 江苏海相黏土电阻率与岩土特性参数间相关性研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(8): 1470-1477. (CAI Guojun, ZHANG Tao, LIU Songyu, et al. Relationship between electrical resistivity and geotechnical characteristic parameters for Jiangsu marine clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(8): 1470-1477. (in Chinese))
- [19] 章定文, 曹智国, 刘松玉, 等. 水泥固化铅污染土的电阻率特性与经验公式[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(9): 1685-1691. (ZHANG Dingwen, CAO Zhiguo, LIU Songyu, et al. Characteristics and empirical formula of electrical resistivity of cement-solidified lead-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(9): 1685-1691. (in Chinese))
- [20] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率法的膨胀土吸水膨胀过程中结构变化定量研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(12): 1832-1839. (ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, et al. Quantitative research on microstructures of expansive soils during swelling using electrical resistivity measurements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(12): 1832-1839. (in Chinese))
- [21] 刘松玉, 边汉亮, 蔡国军, 等. 油水二相体对油污染土电阻率特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(1): 170-177. (LIU Songyu, BIAN Hanliang, CAI Guojun, et al. Influences of water and oil two-phase on electrical resistivity of oil-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(1): 170-177. (in Chinese))
- [22] 马德良, 谢一飞, 冯怀平, 等. 排水过程三轴试样含水率分布演化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(8): 1425-1433. (MA Deliang, XIE Yifei, FENG Huiping, et al. Development of moisture content distribution of triaxial samples during drying process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(8): 1425-1433. (in Chinese))
- [23] 王炳辉, 王志华, 姜朋明, 等. 饱和砂土不同孔隙率的电阻率特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(9): 1739-1745. (WANG Binghui, WANG Zhihua, QIANG Pengming, et al. Electrical resistivity characteristics of saturated sand with varied porosities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(9): 1739-1745. (in Chinese))
- [24] 张少华, 李 熙, 寇晓辉, 等. 水泥固化锌污染土电阻率

- 与强度特性研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2899-2906. (ZHANG Shaohua, LI Yi, KOU Xiaohui, et al. Study of electrical resistivity and strength characteristics of zinc contaminated soil solidified by cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(10): 2899-2906. (in Chinese))
- [25] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物固化砂柱效果电阻率评价研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(3): 579-585. (SUN Xiaohao, MIAO Linchang, TONG Tianzhi, et al. Cementation effect evaluation of MICP sand solidification via electrical resistivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(3): 579-585. (in Chinese))
- [26] AN N, TANG C S, CHENG Q, et al. Application of electrical resistivity method in the characterization of 2D desiccation cracking process of clayey soil[J]. Engineering Geology, 2020, **265**: 105416.
- [27] 柯瀚, 胡杰, 吴小雯, 等. 竖井抽水下垃圾填埋场渗滤液运移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(5): 786-793. (KE Han, HU Jie, WU Xiaowen, et al. Investigation into leachate transport in MSW landfills under pumping of vertical wells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(5): 786-793. (in Chinese))
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese))
- [29] 周明园, 王炳辉, 吴迪, 等. 砂土电阻率特性的室内试验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, **32**(1): 134-138. (ZHOU Mingyuan, WANG Binghui, WU Di, et al. Experimental study on sand resistivity characteristics of sand soil[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, **32**(1): 134-138. (in Chinese))

第四届全国软土工程学术会议第一号通知征文 2024年11月1—3日（中国·武汉）

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位: 湖北工业大学; 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室

会议介绍: 第一届全国软土工程学术会议针对“软土工程的理论创新与工程实践”主题,于2013年11月在同济大学顺利召开。第二届全国软土工程学术会议围绕“软土工程的性能与安全”主题,于2017年11月在天津大学成功举办。第三届全国软土工程学术会议针对“软土工程智能建造”主题,于2023年3月在东南大学圆满举行。第四届全国软土工程学术会议将于2024年11月在湖北武汉召开。本次会议以“固碳减排、智能数字化软土工程发展机遇与挑战”为主题,针对重大软土工程问题、软土工程新理论与新技术、软土工程学科发展等进行研讨,全方位展示我国软土工程领域的发展动态与前沿趋势,促进深度交流与合作,为国家“双碳”战略目标和土木工程智能建造转型升级稳步实现贡献力量。

本次会议将为学者和同行面对面深入广泛的学术交流研讨提供平台,通过大会特邀报告、主题报告、分组报告、研究生专场报告等形式,共同探讨软土工程学科的发展新趋势,展现最新研究进展和成果。欢迎全国各地软土工程专家学者欢聚一堂,大家共享新思想,激发新思维,拓宽新视野,进一步推动我国在软土工程理论和工程实践等方面的发展进程,促进我国软土工程领域的可持续发展。

热烈欢迎从事相关领域研究、勘察、设计、施工的科技工作者和研究生踊跃撰稿,积极参加会议!

征文内容: 会议主要研讨软土工程的基本理论、实践探索、新技术和新方法等。征文内容包括以下12个方面: ①软土的基

本特性与本构关系; ②软土勘察、测试与评价技术; ③绿色低碳软土工程; ④软土地基处理与加固; ⑤软土基础工程; ⑥软土地下工程; ⑦软土动力学与地震工程; ⑧软土工程碳捕捉与碳封存; ⑨软土工程数值仿真与信息化技术; ⑩软土工程新材料、新装备与智能建造; ⑪软土地区重大工程实践; ⑫软土生态加固或其他问题。

投稿要求: 应征论文须符合上述征文内容要求,且未公开发表过,作者文责自负。

学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查,录用论文将推荐至《岩土工程学报》(增刊)、《地下空间与工程学报》等国内高水平期刊上发表。论文格式详见《岩土工程学报》征稿简则,录用论文的版面费按照各期刊要求收取。

论文请通过电子邮件发到大会秘书处会务邮箱(softsoilhbut@163.com),并注明通讯作者的详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。

重要日期: 2024年1月1日接收论文投稿; 2024年4月30日提交论文全文截止; 2024年5月15日,通知论文是否录用; 2024年6月30日提交修改后论文; 2024年11月1日会议报到。

联系方式: 联系人: 李丽华(13545054802, researchmailbox@163.com), 陶高梁(13307139112, tgl1979@126.com), 何俊(15527128946, hjunas@163.com), 李文涛(18171336329, wli20201027@hbut.edu.cn), 白玉霞(18162747601, byxhhu@163.com), 地址: 湖北省武汉市洪山区南李路28号湖北工业大学, 会务邮箱: softsoilhbut@163.com。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 供稿)