

小型加筋土试件电阻率响应特征

赵亚文¹, 刘勇^{1*}, 刘长青²

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 临沂恒佳物业管理有限公司, 山东 临沂 276000

摘要:为研究加筋土试件电阻率随加载时间、荷载及筋带应变变化的耦合关系,采用万能压力机和模具配合压制加筋土试件,在设计位置埋设 CPE3020 型钢塑复合拉筋带,采用万用表测量加筋土试件电阻率变化,研究其电阻率响应特性。试验结果表明:加筋土试件电阻率随加载时间、荷载和筋带应变的增大而减小;相同压实度下,含水率越高,加筋土试件电阻率越小;相同含水率下,压实度越大,加筋土试件电阻率越小;压实度越小,加筋土试件电阻率突变越早,试件承载能力越弱;压实度越大,加筋土试件电阻率突变越晚,试件承载能力越强;加筋土试件破坏时,电阻率突变对预测加筋土试件破坏程度问题有较好的响应特征。

关键词:加筋土;压实度;含水率;电阻率;响应特征;土体稳定性

中图分类号:U213.1⁺52.3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)02-0071-06

引用格式:赵亚文,刘勇,刘长青.小型加筋土试件电阻率响应特征[J].山东交通学院学报,2025,33(2):71-76.

ZHAO Yawen, LIU Yong, LIU Changqing. Response characteristics of resistivity in small reinforced soil specimens[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(2): 71-76.

0 引言

近年来,国家对公路边坡施工的稳定性要求日趋严格。对公路边坡土体破坏机理形成科学认识,制定实施有效的边坡处理措施,才能从源头上遏制山体滑坡事故的发生。电阻率勘探是目前应用较广泛的研究土体稳定性的方法之一。

国外学者在 19 世纪将电阻率法应用于勘探过程中,在 19 世纪末采用人工场源的电阻率方法,探测地下介质的电性结构(如电阻率分布等),推断地质构造、资源分布及工程地质条件。在 20 世纪 30 年代,因电测法具有准确度和可靠性高等优点,世界范围内广泛应用于水文及工程地质勘探。随着电科学技术的不断发展演进,在 20 世纪 70 年代末,应用于地质勘探中的电阻率测量法改进为类似阵列点法勘探的方法,其最初模式为电测深偏置系统^[1]。20 世纪 80 年代中期,日本学者采用高密度电阻率法,通过电极转换板采集野外勘探数据,但数据采集结果因整体设计缺陷未充分发挥电极转换板用于高密度电阻率法的优势^[2]。

国内学者在电测法勘探技术领域取得较多研究成果。储亚等^[3]通过室内四电极法电阻率测试,实现现场快速、准确地评价膨胀土膨胀特性,采用电阻率静力触探作为原位评价技术,获得膨胀土自由膨胀率随电阻率的变化规律。赵贵章等^[4]采用高密度电阻率法和土壤含水率监测系统,在浸水试验中分析含水率和电阻率的变化,试验结果表明:土壤含水率随距地表距离的增大先增大后减小,在距地表 30 cm 处达到最大含水率;距地表 1.5 m 内,土壤电阻率随入渗水量的增大而减小,距地表距离大于 3.5 m 后,土体

收稿日期:2024-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51978034);国家重点研发计划项目(2022YFB2601900)

第一作者简介:赵亚文(1997—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为高大边坡破坏及稳定性分析,E-mail:909933188@qq.com。

***通信作者简介:**刘勇(1974—),男,山东青岛人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为高大边坡、挡墙变形破坏及稳定性分析,E-mail:307102589@qq.com。

电阻率变化不大。索奎等^[5]通过三维电阻率法探测小型滑坡,并对采集数据进行处理和三维反演,针对反演结果确定主滑方向,指出重点预警位置。段明杰^[6]采用高密度电阻率法探查云南某高速拟建金沙江大跨径悬索桥建设场地的工程地质条件,基本确定大桥两岸的主塔区、隧道锚区、边坡的基本地质概况,为桥梁方案的设计提供必要的地质依据。但现有研究成果中对常用加筋土试件(以下简称试件)的电阻率变化规律研究较少。

电阻率法测试成本相对较低,操作简便,效率较高。本文在不同含水率、压实度情况下分析室内小型加筋土试件电阻率的变化规律。采用万能压力机和模具配合压制试件,研究试件随时间、应力条件及筋带应变与电阻率变化的耦合关系,设计位置埋设 CPE3020 型钢塑复合拉筋带,结合万用表测量试件的电阻率变化,研究试件的电阻率响应特性,以为边坡的实时监督提供可靠依据。

1 试验方案

1.1 试验装置介绍

模型测试装置如图 1 所示。选用边长 150 mm 的正方形模具,四周可拆卸。分 2 层填筑土体,中间放置 CPE3020 型钢塑复合拉筋带,筋带长 100 mm,宽 30 mm,厚 1 mm,将应变片粘贴在筋带表面上方,采用型号为 BFH120-5AA-R-D150 的环氧树脂胶固定应变片,应变片电阻为 $(120 \pm 1) \Omega$,灵敏度系数为 2.00 ± 0.01 ,防止加载过程中损坏应变片。填筑最后 1 层土体后,采用振动击实仪击实土体。采用万能试验机加载,底座为导体,拆卸易导致土体损坏。试验开始前在模具底座放置高压绝缘橡胶板,采用万用表测量加筋土试件的电阻 R 。将铜片粘贴于试件两端便于引出铜丝,通过绝缘黑胶带固定铜片,铜片长 150 mm,宽 100 mm,厚 0.1 mm。

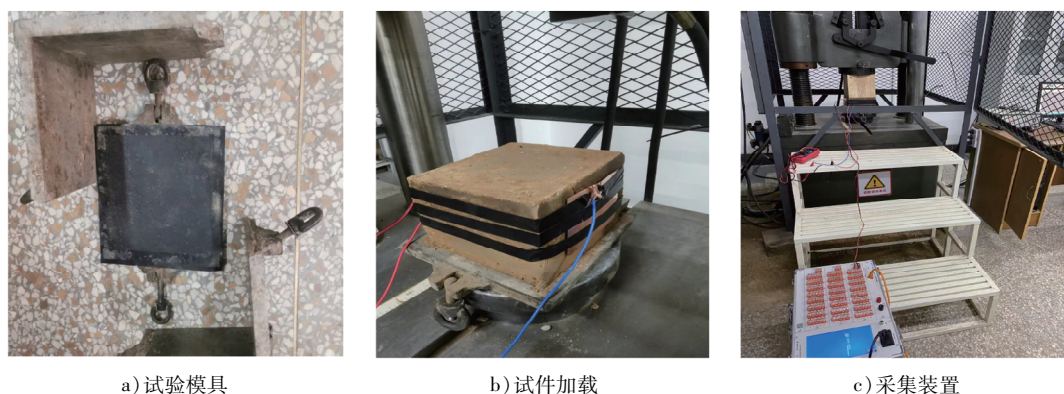


图 1 模型测试装置

1.2 电阻率测试原理

测试加筋土试件电阻示意图如图 2 所示。试件受外部荷载作用而压缩,电极高度 L 随荷载可变,把万用表调至电阻测量模式,将铜线接在试件两端,读取试件的相应电压。试件的电阻率

$$\rho = RS / (L - \Delta H),$$

式中: R 为试件电阻, Ω ; S 为电流通过试件的横截面面积, m^2 ; ΔH 为试件高度压缩量, m 。

1.3 抗干扰处理

压实度与含水率对试件的影响较明显,为保证所需压实度的准确性,在试验前期进行环刀法测试,直至达到试验所需 3 种压实度,分别为 94%、96%、98%。根据文献^[7]要求严格控制拌和水量,确定含水率。在塑料袋里密封试件 12 h,保证试件水分分布均匀。铜片尺寸影响电阻率测试数据的准确性。读数时以荷载为中间变量,将位移与

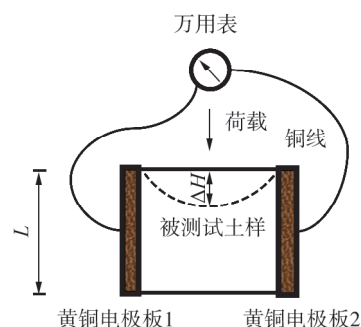


图 2 测试加筋土试件电阻示意图

荷载、电阻率与荷载建立联系,获得位移与电阻率的关系。外界环境因素也会对电阻率造成一定影响,在温度为 25 ℃ 的试验室内进行试验,通过温度计观察温度变化。

2 试验结果与分析

2.1 电阻率随时间响应规律

不同压实度、含水率下,试件电阻率随加载时间的变化曲线如图 3 所示。在破坏过程中,试件经历弹性变形、塑性变形和破坏 3 个阶段。

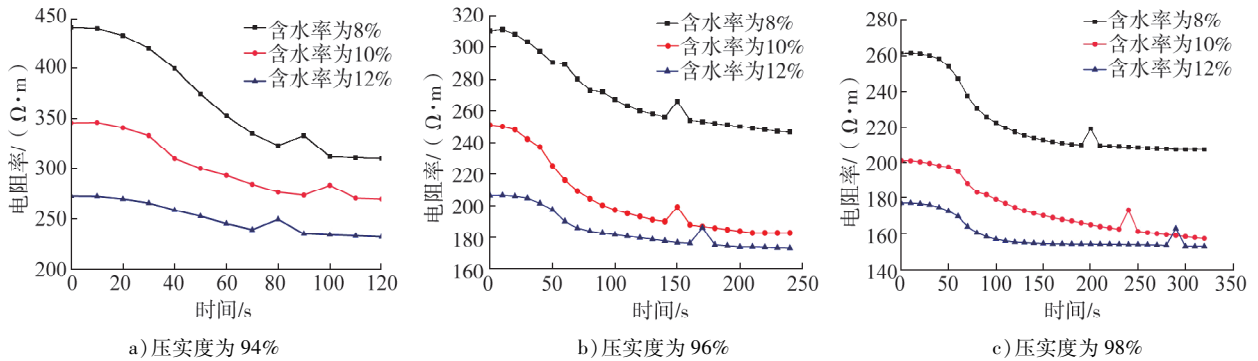


图3 不同压实度、含水率下试件电阻率随加载时间的变化曲线

由图 3 可知:不同压实度、含水率下,试件的电阻率均随时间延长而减小;试件的电阻率变化同时受含水率和压实度影响;压实度相同时,试件的电阻率随含水率增大而减小,主要原因是水分布满试件孔隙,电阻率较小,加载时试件电阻率变化不明显;含水率相同时,试件电阻率随压实度增大而减小,如压实度由 94% 增至 98%,含水率为 8% 的试件电阻率由 $450 \Omega \cdot m$ 降至约 $260 \Omega \cdot m$,原因是压实度越大,土颗粒间黏结力越大,试件越密实,土壤颗粒的紧密堆积提高电子的传输效率,试件电阻率减小^[8-10]。

试件出现压密阶段和弹性变形阶段。在压密阶段,试件内部的孔隙和裂隙在外力作用下逐渐闭合,筋带与试件接触程度提高,水分分布改善,试件整体导电性能提高,电阻率减小。经压密阶段后,筋带在试件中起支撑稳固作用,电阻率稳步减小。裂缝持续增大直至试件完全破坏,电阻率变化量为 $(0 \pm 0.5) \Omega \cdot m$ 。

试件四周产生细小裂缝时,电阻率瞬时增大并立即减小,与突变前相差约 $10 \Omega \cdot m$,直至试件破坏后,电阻率未再明显变化。相同含水率下,电阻率突变时间不同,随压实度的增大,各试件电阻率突变延后,如压实度为 94%、含水率为 12% 的试件的电阻率突变发生在加载 80 s,而压实度为 96%、含水率为 12% 下试件的电阻率突变约发生在加载 160 s,提高压实度有利于增强试件和筋带的黏结力,增强试件的抗压强度,试件破坏的时间滞后。压实度为 98%、含水率为 12% 的试件电阻率突变延后现象更明显,原因是随含水率的增大,试件弹性更好,变形延缓,裂缝出现较晚^[11-13]。

2.2 电阻率随荷载响应规律

不同压实度、含水率下,试件电阻率随施加荷载的变化曲线如图 4 所示。

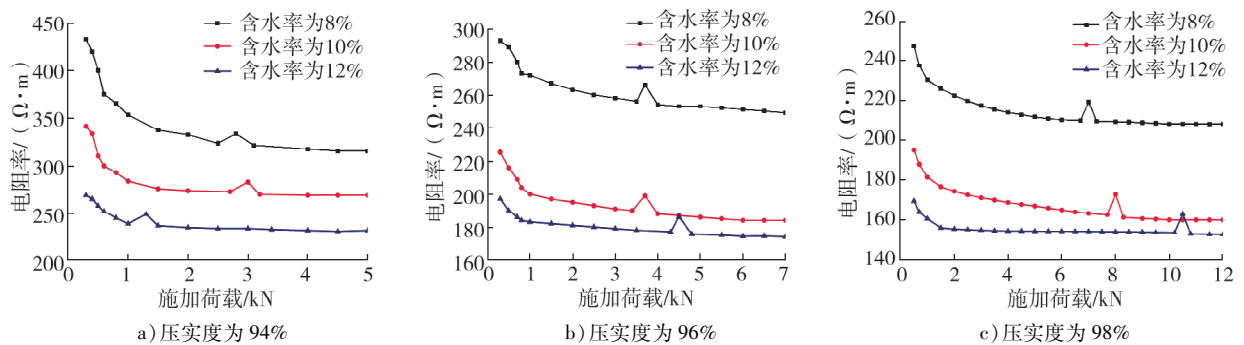


图4 不同压实度、含水率下试件电阻率随施加荷载的变化曲线

由图4可知:不同压实度、含水率下,试件的电阻率均随施加荷载的增大而减小;含水率相同,电阻率随压实度增大而减小;压实度相同,同一荷载下,试件初始电阻率随含水率增大而减小。原因是空气的电阻率比水的电阻率大,含水率小的试件内颗粒黏结不足,内部气体较多,电阻率较大。加载过程中排出孔隙内空气,空气在试件中的质量分数减小,试件的电阻率减小。压实度为96%、98%时,含水率较大的试件电阻率突变现象延后,压实度为94%、含水率为12%的试件电阻率突变产生较早。原因可能是试件筋带-土体界面压实不足,在持续加载过程中试件承载力不足,裂纹提前产生,说明压实度与含水率的搭配组合较重要^[14-16]。

加载过程中含水率相同时,压实度越大,电阻率的变化量越小,如含水率为8%、压实度为94%的试件破坏前后电阻率减小 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,含水率为8%、压实度为98%的试件电阻率减小约 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 。含水率相同、压实度不同的试件承载能力不同:含水率为8%、压实度为94%的试件电阻率突变时荷载为2 kN,含水率为8%、压实度为98%的试件电阻率突变时荷载为6 kN。压实度越小,试件出现裂缝的可能性越大,承载能力越弱;反之,压实度越大,裂缝出现的时间越晚,承载能力越强。合理提高试件的压实度,有利于提高工程整体稳定性^[17-21]。

2.3 电阻率随筋带应变响应规律

不同压实度、含水率下,试件电阻率随筋带应变的变化曲线如图5所示。

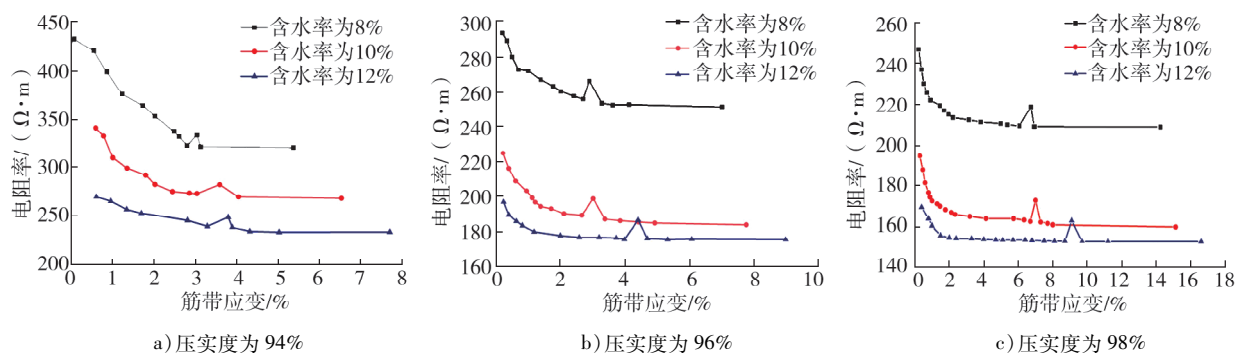


图5 不同压实度、含水率下试件电阻率随筋带应变的变化曲线

由图5可知:不同压实度下,试件电阻率均随筋带应变的增大而减小;压实度相同时,随筋带应变增大,试件电阻率随含水率增大而减小,电阻率突变延后;含水率相同,试件的电阻率随压实度增大而减小。主要原因是不同工况下,在荷载作用下筋土间接接触紧密,筋带应变产生变化,土体形态从轻微变化发展到明显变化再到急剧变化阶段,筋带应变持续变化,直至土体破坏,筋带应变达到最大^[21-23]。

试件破坏前后电阻率变化可分为3个阶段。第一阶段为电阻率快速下降阶段,试件无裂纹产生,电阻率随筋带应变增大而急速下降;第二阶段为电阻率变化集中阶段,试件内产生多条细小裂缝,电阻率随筋带应变减小而减小的趋势变缓,试件破坏初期,筋带还未发挥作用,筋带的应变变化不明显;第三阶段为电阻率稳定阶段,试件裂缝变宽,发生剥落,电阻率变化趋稳,试件已发生完全破坏,如图6所示,出现最大筋带应变,且与完全破坏阶段前的筋带应变差距较大,原因是在试件破坏过程中筋带给予试件抵抗外力的作用。试件电阻率突变产生于试件产生裂缝阶段,出现筋带最大应变前,说明试件加载至破坏的过程中,筋带应变与电阻率能较好表征试件的破坏特征^[25-28]。



图6 试件土体破坏

3 结论

1) 加筋土试件的电阻率随试件加载过程变化幅度显著。加载过程中试件经过压密、弹性变形、破坏

3个变化阶段,电阻率随加载时间延长、荷载增大和筋带应变增大而减小。

2) 压实度和含水率对试件的承载能力影响显著。相同压实度下,试件电阻率随含水率增大而减小;含水率相同时,试件电阻率随压实度增大而减小。相同压实度下,含水率越高,电阻率突变产生越早,试件承载能力越弱;相同含水率下,压实度越高,电阻率突变产生越晚,试件承载能力越强。因此,在实际工程中,优化压实度与含水率的组合对于提高试件的稳定性具有重要意义。

3) 试件破坏前后电阻率与筋带应变变化情况可分为电阻率快速减小阶段、电阻率变化集中阶段和电阻率稳定阶段3个阶段。

本试验只探讨1种筋带形式,后续可分析不同筋带间距、埋置形式及筋带种类等情况;只考虑单向压缩作用形式,未考虑动载情况下试件电阻率的变化情况,后续可研究等幅动载、等频动载载形式,分析电阻率突变的响应情况。

参考文献:

- [1] 李金铭,罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [2] 孙忠辉. 高密度电法在复杂岩溶区公路勘察中的应用效果研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [3] 储亚,刘松玉,蔡国军,等. 基于电阻率静力触探的膨胀土膨胀性原位评价应用研究[J]. 地基处理,2023,5(2): 91-96.
- [4] 赵贵章,孔令莹,徐远志,等. 基于高密度电阻率法的灌溉过程田间水分入渗特征研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(2):24-29.
- [5] 索奎,刘文辉,倪云鹏,等. 三维电阻率成像在小型滑坡探测中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(6):71-78.
- [6] 段明杰. 高密度电阻率法在金沙江大跨径悬索桥地质勘察中的应用[J]. 福建建材,2023(3):31-34.
- [7] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [8] 申纪伟,毛海涛,王正成,等. 电极接触与间距对土壤电阻率测量的影响[J]. 土壤学报,2019,56(5):1247-1258.
- [9] 刚绪广,李庆轩,陈逸飞. 高密度电法在地下水渗流通道探测中的技术应用[J]. 山西建筑,2024,50(5):86-88.
- [10] 卢向星,陈慈河,孙旭,等. 高密度电阻率法联合自然电场法在滑坡探测中的应用研究[J]. 中国水运,2023(9):150-152.
- [11] 刘国兴. 电法勘探原理与方法[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [12] 孙举孔,陈闽昆,马韬,等. 高密度电阻率法在废渣堆滑坡地质勘察中的应用[J]. 世界有色金属,2022(24):205-207.
- [13] YANG S Q, JING H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. International Journal of Fracture,2011,168(2):227-250.
- [14] WANG Y H, LIU Y F, MA H T. Changing regularity of rock damage variable and resistivity under loading condition[J]. Safety Science,2012,50(4):718-722.
- [15] KAHRAMAN S, YEKEN T. Electrical resistivity measurement to predict uniaxial compressive and tensile strength of igneous rocks[J]. Bulletin of Materials Science,2010,33(6):731-735.
- [16] 刘坤,王恒. 高密度电阻率法在昆山某场地土壤污染调查中的应用[J]. 能源技术与管理,2022,47(3):177-180.
- [17] 刘书瑶,张耀平,刘波,等. 高密度电法在隐伏采空区识别分析中的应用[J]. 化工矿物与加工,2022,51(5):28-32.
- [18] 赵虎,张泉,谭建秋,等. 基于综合物探方法的公路不稳定边坡潜在滑面探测[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):117-122.
- [19] 时义龙,江博君. 高密度电阻率法在堤防渗漏探测中的应用[J]. 治淮,2021(9):42-43.
- [20] 杨杰,李玥. 高密度电阻率法探测某基岩滑坡应用及其特征分析[J]. 工程与建设,2020,34(4):686-688.
- [21] 董永福,朱欢. 基于高密度电阻率法土石坝防渗墙检测技术初探[J]. 中国水运,2020,20(4):129-130.
- [22] 王俊璇. 受载条件下岩石电阻率特性的理论与试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
- [23] 吴维义,李法滨. 综合物探技术在某公路采空区探测工作中的应用[J]. 中国水运,2019,19(12):201-203.
- [24] 王鹏云. 硫酸镁环境下偏高岭土对水泥土强度及电阻率的影响研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.

- [25] 匡野,魏柯佳,肖瑞卿,等. 基于高密度电法及工程勘察对苏码头断裂综合探测[J]. 大地测量与地球动力学,2024,44(3):316-320.
- [26] 杨林,陈波,于洪军,等. 基于连续高密度电阻率测量判断海水入侵影响范围的实验研究[J]. 海洋环境科学,2025,44(2):266-275.
- [27] 林才德,唐孟雄,刘祥泰,等. 高密度电阻率法在城市岩溶探测中的应用研究[J]. 广州建筑,2025,53(3):50-54.
- [28] 刘欣怡. 高密度电阻率法在水库坝址勘查中的应用[J]. 陕西水利,2025(2):93-95.

Response characteristics of resistivity in small reinforced soil specimens

ZHAO Yawen¹, LIU Yong^{1}, LIU Changqing²*

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

2. Linyi Hengjia Property Management Co., Ltd., Linyi 276000, China

Abstract: To study the coupling relationship between the resistivity of reinforced soil and the loading time, load magnitude, and strain of the reinforcement, a universal testing machine and mold are used to compress reinforced soil specimens. CPE3020 type steel-plastic composite reinforcement strips are embedded at designated positions, and a multimeter is used to measure the changes in resistivity of the soil specimens, investigating the resistivity response characteristics of small reinforced soil specimens. The experimental results indicate: The resistivity of the soil specimens decreases with the increase of loading time, load, and strain of the reinforcement; under the same degree of compaction, higher moisture capacity results in lower soil specimens resistivity; under the same moisture capacity, greater compaction leads to lower soil specimens resistivity; the smaller the degree of compaction, the earlier the sudden change in soil specimens resistivity occurs, and the weaker the bearing capacity of the specimen; the greater the degree of compaction, the later the sudden change in soil specimens resistivity occurs, and the stronger the bearing capacity of the specimen; when the reinforced soil specimens fails, the sudden change in resistivity has a good response characteristic for predicting the damage degree of the reinforced soil body.

Keywords: reinforced soil; degree of compaction; moisture capacity; resistivity; response characteristics; soil stability

(责任编辑:王惠)