

文章编号: 1008-2786-(2019)6-848-10
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000475

干湿循环作用下加砂对红土抗剪强度 及微结构特性的影响

梁谏杰, 张祖莲*, 黄英, 袁强

(昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500)

摘 要: 本文通过直剪试验、干湿循环试验和数理统计分析相结合的方法, 研究干湿循环条件下, 加砂比例变化对云南红土抗剪强度及微结构特性的影响, 为云南红土在实际工程中的应用提供参考。结果表明: (1) 当干湿循环次数一定时, 随加砂比例的增大, 红土内摩擦角非线性增加, 黏聚力非线性减小; 抗剪强度呈减小-增大-减小的波动变化趋势, 且在加砂比例约 10% 左右存在极大值。 (2) 当加砂比例分别为 0、5%、10% 和 15% 时, 随干湿循环次数的增加, 红土内摩擦角降幅依次为 22.8%、30.9%、19.9%、32.6%; 黏聚力降幅依次为 26.6%、29.2%、17.3%、37.7%; 抗剪强度降幅依次为 23.6%、25.6%、18.7%、28.2%。红土颗粒数量降幅依次为 35.7%、28.1%、22.7%、20%; 孔隙率增幅依次为 40.4%、36.5%、28.9%、23.6%; 孔隙面积增幅依次为 50.8%、42.9%、35.5%、30.7%。 (3) 干湿循环与加砂会改变红土微结构, 其中定向度与定向分维数两个微结构参数与红土黏聚力的变化关系较为紧密; 平均圆形度、孔隙面积、孔隙率等微结构参数对内摩擦角的影响较为显著。这些微结构参数与红土黏聚力和内摩擦角均为负相关, 相关系数最高为 -0.972, 最低为 -0.928。干湿循环、加砂比例对红土微结构及抗剪强度有显著影响。

关键词: 红土; 干湿循环; 黏聚力; 内摩擦角; 加砂比例; 微结构

中图分类号: P642.2; X43

文献标志码: A

云南红土作为一种区域性土体, 其工程性质具有特殊性。从物理性质来看, 红土的天然含水率高、液塑限大、孔隙比大、比重大、干密度小; 而从力学性质来看, 红土的压缩性小、击实性差、渗透性小 (渗透系数小)、强度高 (抗剪强度指标大)、承载力高, 这一较好的力学特性使云南红土被广泛应用于水利水电工程中。然而, 红土自身特性不够完善, 再加上降雨、水库蓄水浸泡、水位升降变化等引起库岸红土干湿循环, 促使库岸红土性质劣化, 因此在一定条件下会导致库岸失稳。对红土进行人工改良, 以提高

其物理力学指标, 是增强红土型库岸稳定的可行途径之一。

大量研究和工程实践证明: 在土料中加入一定数量的石灰、水泥、沥青、粉煤灰、风化砂以及生物酶等添加剂可改善土料性能, 达到和提高工程所需土料的物理力学指标。就土料改良而言, 有关膨胀土和粉土的研究成果相对较多, 但各添加剂对土料特性的影响各不相同。膨胀土的黏聚力和内摩擦角随石灰掺量的增加而逐渐增大, 但随风化砂掺量的增加, 其黏聚力先增大后减小, 内摩擦角却表现为线性

收稿日期 (Received date): 2019-04-16; 改回日期 (Accepted date): 2019-11-16

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金地区基金项目 (51269006)。[Region Program of National Natural Science Foundation of China (51269006)]

作者简介 (Biography): 梁谏杰 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程及水工结构工程。[LIANG Jianjie (1992-), male, M. Sc. candidate, research on geotechnical engineering and hydraulic structure engineering] E-mail: 1825282538@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 张祖莲 (1964-), 女, 副教授, 主要研究方向: 岩土工程及水工结构工程。[ZHANG Zulian (1964-), female, associate professor, research on geotechnical engineering and hydraulic structure engineering] E-mail: zhangzulian@2008.sina.com

增加^[1];水泥、粉煤灰能有效提高膨胀土的无侧限抗压强度^[2],生物酶对提高膨胀土抗剪强度也有显著作用,且作用优于石灰^[3]。水泥、石灰对粉土也有改良效果^[4]。为满足工程实际需要,已有学者对云南红土做了相关的改良研究工作。结果表明:红土掺砂量与抗剪强度参数之间具有相关关系^[5]。在干湿循环条件下,不同加砂比例红土的抗剪强度及抗剪强度指标总体呈下降趋势,并最终都在干湿循环 10 次左右趋于稳定^[6]。石灰、粉煤灰能增强红土颗粒之间的连接力和摩擦力,使红土整体稳定性和承载能力提高,工程性能得到改善^[7]。仿瓷粉、砂和原铁粉会使红土抗剪强度发生不同程度的变化^[8]。综上所述,干湿循环和添加材料能改变土体物理力学性能,究其原因在于其对土体微结构的改变。基于扫描电镜(SEM)和计算机图像处理技术,可对土体微结构进行定量化研究,进而建立土体微结构与宏观力学性质之间的定量关系^[9-13]。通过概率论及数理统计方法,学者们建立了南沙地区软土压缩系数、压缩模量、黏聚力、内摩擦角与微结构参数之间的多元回归方程式^[14],得出了随水泥掺量的增加,改良土等效直径较大的结构单元体含量增多、而孔隙度和土颗粒分形维数减小的微结构参数变化规律^[15]以及离子土壤强化剂可有效降低膨胀土的比表面积和孔隙体积^[16]等结论。由此可见,添加材料可有效改变土体微结构,从而改变土体宏观力学性质。土体改良具有重要的理论和现实意义,但现有成果大多只定性研究添加材料特性、含量对改良土体宏观特性的影响,而结合干湿循环和土体微结构的研究成果相对有限。因此,本文以云南红土为对象,研究干湿循环、加砂、红土抗剪强度与其微结构之间的内在联系,为红土工程设计提供参考。

1 试验土样与试验方法

1.1 试验制样

试验掺砂采用山砂,粒径在 0.075 ~ 0.25 mm 之间。试验土样加砂比例分别为 0(不加砂)、5%、10%、15%。野外采集的红土经晾晒、除去杂质后,掺入相应的砂量和水量,采用环刀和分层击实的方法,制作成不同加沙比例的试验土样,以研究干湿循环、加砂比例、红土抗剪强度与微结构之间的关系。土样初始状态(干湿循环试验前)的含水率和干密

度均为各加砂比例红土对应的最优含水率及最大干密度。所需土样统一制作完成,以便比较各工况的试验结果。按照《土工试验规程》^[17]对试验土样进行土工试验,测得相应试验土样的基本特性如表 1 所示。

表 1 试验红土基本特性^[6]

Tab. 1 Properties of test laterite

加砂比例/%	最优含水率/%	最大干密度/(g · cm ⁻³)
0	26.5	1.40
5	24.8	1.43
10	22.9	1.49
15	20.5	1.53

1.2 试验方法

对试验土样进行反复浸泡加湿—脱水风干来模拟库岸红土的干湿循环,一次干湿循环包括加湿和风干两个过程。每个试样在浸泡加湿前都称其质量,加湿完成后的试样在空气中脱湿风干。以加湿—风干前后试验土样质量差来控制一次干湿循环过程,加湿—风干前后试验土样质量差控制在 0.1% 范围内。

试验红土加砂比例分别采用 0、5%、10% 和 15%,干湿循环次数分别为 1、2、3、4、5、6、8、10、12、15 次共 10 种。对试验土样进行直剪,获得不同加砂比例、不同干湿循环次数下的抗剪强度指标及抗剪强度。

对加砂比例分别为 0、5%、10% 和 15% 且分别经 0、5、10 次干湿循环的红土试样,通过电镜扫描获得相应微结构图像后,对微结构图像进行相关处理获得相应微结构参数,进而研究加砂比例、干湿循环、微结构参数与红土抗剪强度指标之间的关系。

2 结果与分析

试验土样的干湿循环包括浸泡吸水和风干脱水两个过程。在浸泡过程中土体因水分侵入而膨胀,且水分还会在土体中发生迁移;风干时水分蒸发导致土体收缩。这两方面的共同作用使红土颗粒特性、颗粒间接触关系和孔隙特性发生改变。在红土中加入一定比例砂料也会改变红土原有结构,从而对红土特性产生影响。因此干湿循环和加砂,都会引起红土

颗粒特性、孔隙特性和粒间相互接触特性的变化,进而引起红土抗剪强度发生相应变化^[19]。

2.1 干湿循环次数、加砂比例对红土内摩擦角、黏聚力及抗剪强度的影响

试验分析得出干湿循环次数、加砂比例与红土试样内摩擦角、黏聚力的关系如图1、图2所示。

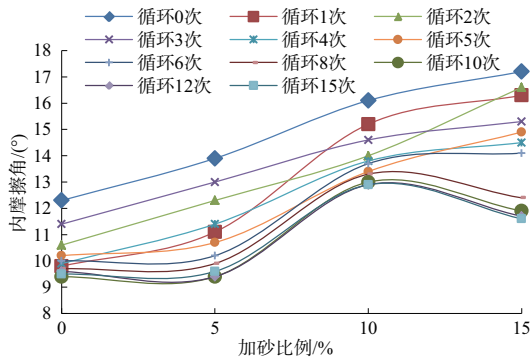


图1 红土内摩擦角与加砂比例的关系

Fig. 1 Relationship between internal friction angle and sand adding proportion

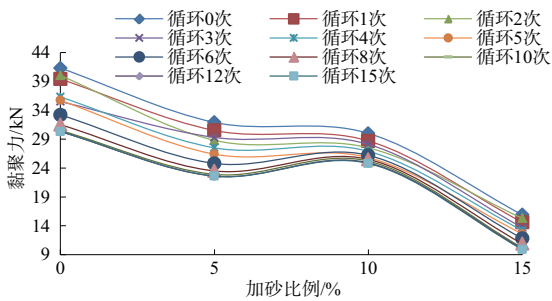


图2 红土黏聚力与加砂比例的关系

Fig. 2 Relationship between cohesion force and sand adding proportion

图1显示:在0~8次干湿循环范围内,红土内摩擦角随加砂比例的增大而非线性增加;当干湿循环次数超过8次且加砂比例大于10%后,红土内摩擦角随加砂比例的增加而减小。这是因为红土加砂后,砂粒与红土颗粒相互掺杂,从而改变了红土颗粒大小、形状和颗粒之间的接触关系。在一定加砂比例范围内,砂粒含量越大,红土颗粒间相互咬合效果越强,颗粒间摩擦阻力增大而导致颗粒之间相互错动越困难,其结果就是内摩擦角随加砂比例的增大而增加。当干湿循环次数超过8次且加砂比例大于10%后,由于裂缝的增加和细小颗粒的流失,导致随加砂比例的增加,颗粒间接触能力变小,因此内摩擦

角也随之减小。一定加砂比例的红土试样随着干湿循环次数的增加,其内摩擦角总体呈下降趋势,但在下降过程中略有波动。在试验的干湿循环范围内,加砂比例分别为0.5%、10%、15%时,对应的红土内摩擦角降幅依次为22.8%、30.9%、19.9%、32.6%,且加砂15%的红土内摩擦角降幅最大,加砂10%的红土内摩擦角降幅最小。干湿循环之所以引起加砂红土内摩擦角减小,其原因是:内摩擦角与土颗粒接触面间的摩擦力和颗粒间的相互咬合力密切相关,且土的颗粒特性及孔隙特性等对内摩擦角也有影响。干湿循环和加砂导致红土微结构发生了以下变化:(1)颗粒特性的变化。体现在颗粒大小、形状和排列、定向的改变。(2)颗粒间接触关系的变化。体现在颗粒间距和颗粒间接触连接形式的改变。(3)孔隙特性的变化。体现在孔隙大小、形状以及分布的改变。这些微结构特征的改变都会引起红土内摩擦角的变化。随着干湿循环次数的增加,红土结构不断遭到破坏,且反复的加湿浸泡和脱水风干导致土体反复膨胀和收缩,这些作用都将增大红土颗粒间距,导致孔隙率和孔隙面积随之加大,进而削弱颗粒间的接触面积和相互咬合力,红土内摩擦角也就随之降低。

图2表明:在一定干湿循环条件下,加砂红土黏聚力随加砂比例的增大而非线性减小。造成这一现象的原因在于:砂粒自身缺乏黏性,因此红土中砂粒所占比例越高,红土颗粒间黏性越小,胶结作用也相应降低,因此黏聚力也减小。当加砂比例一定时,红土试样黏聚力随干湿循环次数的增加而下降。在试验的干湿循环范围内,加砂比例分别为0.5%、10%、15%时,对应的红土试样黏聚力降幅依次为26.6%、29.2%、17.3%、37.7%,且加砂15%的红土黏聚力降幅最大,加砂10%的红土黏聚力降幅最小。之所以呈现这样的变化,是因为干湿循环的浸泡过程使得试验土样含水率增加,引起红土中氧化物胶体的流失和转化,从而改变了土颗粒之间的胶结作用;水分的浸入也削弱了土颗粒的基质吸力并破坏土颗粒表面双电层结构。干湿循环的脱湿风干过程使水分蒸发,土体收缩,土颗粒间孔隙率增大、孔隙形状发生较大变化。因此加湿—风干过程都会损伤削弱红土结构,使其变得越来越疏松。此外,反复的干湿循环使得试样土体表面产生裂缝,裂缝的数量、宽度和深度均随干湿循环次数的增加而增大,

这些裂缝既损伤红土土体结构,导致其破碎松散,也为细小土颗粒的迁移提供了通道。土体结构的破碎以及细小土颗粒的迁移都将增大土体颗粒间距,从而减弱土粒间的连接作用。因此,加砂和干湿循环的联合作用将导致红土黏聚力的下降。

图3显示了干湿循环、加砂比例与红土试样抗剪强度之间的关系:一定加砂比例红土的抗剪强度随干湿循环次数的增加总体上呈波动下降趋势,且在干湿循环约10次后趋于稳定。这是因为浸泡加湿时水分的侵入使土样体积膨胀,脱湿时水分的蒸发使土样体积收缩。土体的反复膨胀和收缩,导致试验土样中氧化物胶体的流失、细小颗粒的迁移以及裂隙的发生、发展,从而损伤、削弱土体结构,减小粒间连接力,增大颗粒间距和孔隙率,其结果就是抗剪强度随之降低。但当干湿循环次数超过一定范围后,水分的损伤作用受到限制,也即红土结构及其抗剪强度将达到新的稳定状态。

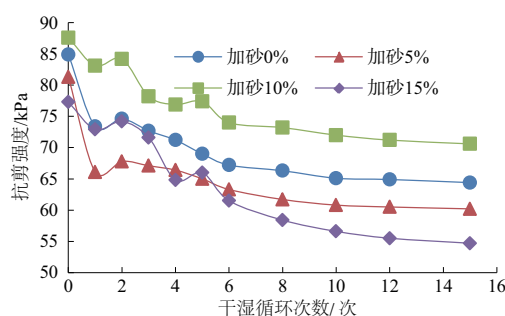


图3 红土抗剪强度与干湿循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between shear strength and number of wet-dry cycle

图4呈现了一定干湿循环条件下,加砂比例与红土抗剪强度之间的关系。在0~5%加砂比例范围内,抗剪强度随加砂比例的增加而减小;在5%~10%加砂比例范围内,抗剪强度随加砂比例的增加而增加,并在约10%左右存在极大值;当加砂比例超过10%后,抗剪强度又逐渐减小。其原因在于:当加砂比例较小时,砂粒与红土颗粒相互掺杂,同时,因胶结作用使红土单颗粒成了部分粒径更大的团粒,且粒径较小的充填在粒径较大的颗粒之间,这有利于土体结构的稳定,从而提高土体抗剪强度。当红土加砂比例超过一定范围时,由于砂粒自身缺乏黏性,因此砂粒的阻隔将破坏团粒、颗粒之间的联结作用,使土体结构稳定性和抵抗剪切破坏的

能力降低,红土抗剪强度也随加砂比例的增大而减小。所以,可适当加砂来提高红土抗剪强度,以改变其力学性能。试验结果表明:在干湿循环作用下,加砂比例分别为0、5%、10%、15%时,对应的红土抗剪强度降幅依次为23.6%、25.6%、18.7%、28.2%。因此,在试验加砂比例范围内,加砂比例15%时红土抗剪强度降幅最大,加砂10%时红土抗剪强度降幅最小,这一结论可为红土工程运用提供参考。

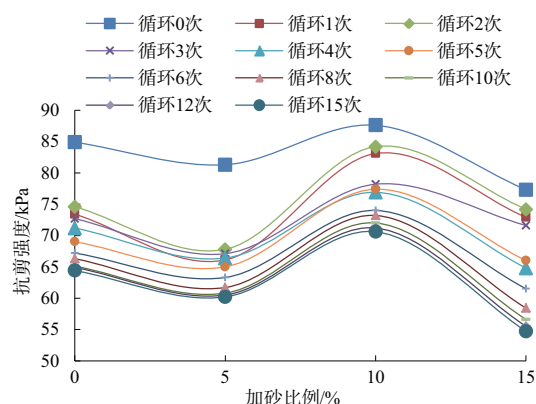


图4 红土抗剪强度随加砂比例的变化关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and sand adding proportion

2.2 干湿循环作用下不同加砂比例红土的微结构特性

对加砂比例分别为0、5%、10%、15%的红土试样,经0、5、10次干湿循环后,对脱湿风干的红土试样进行电镜扫描,在放大倍数为1000X时,获得如图5、图6、图7所示的红土微结构图像。

2.2.1 不同条件下微结构图像分析

图5、图6表明:加砂和干湿循环将导致红土微结构的改变。这些改变体现在:土样孔隙加大、土体结构变得疏松、颗粒表面越来越粗糙且排列越来越无序。究其原因,在于反复的加湿浸泡-脱

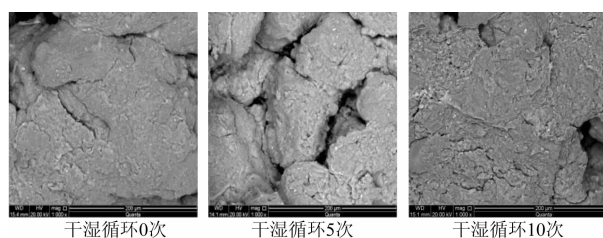


图5 不加砂红土微结构图像

Fig. 5 Microstructure image of laterite without sand

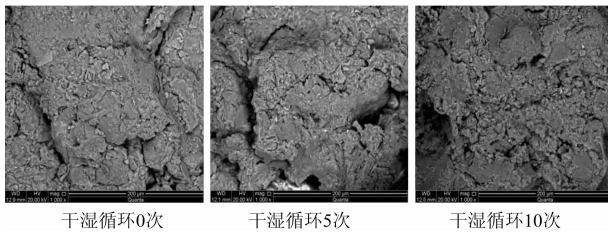


图 6 加砂比例 10% 的红土微结构图像

Fig. 6 Microstructure image laterite under sand adding proportion of 10%

湿风干都存在水分的侵入和蒸发,由此引起了土体复杂的物理化学反应、氧化物胶体的溶解和流失、颗粒间联结作用的削弱以及土体自身反复膨胀和收缩而形成的裂缝。裂缝数量随干湿循环次数的增加而增加,其宽度和深度也在发展。其结果是土样在浸泡时形成渗流,使得细小颗粒发生迁移,再加上脱湿风干时水分的蒸发,都将改变土体的颗粒大小、形状、排列方式和接触方式、颗粒间联结作用以及孔隙形态。这些共同作用将重建土体微结构,使土体结构体系发生较大变化。因此

无论是加湿过程还是风干过程,其结果都是导致土体越来越疏松,结构性变差。加砂和干湿循环导致土体结构损伤的结果也印证了红土抗剪强度随干湿循环次数增加而下降的结论。

在一定干湿循环条件下,加砂比例对红土试样微结构的影响如图 7 所示。图 7 表明:红土加砂后,红土颗粒与砂粒相互掺杂。比较加砂比例分别为 0、5%、10% 和 15% 的微结构图像可以看出:当干湿循环一定时,加砂比例越大,试样土样的大颗粒数量明显增多。这表明加砂比例越大,砂粒对红土结构的影响越强,砂粒和红土颗粒结合形成的团粒也越多^[20]。对比不同加砂比例红土试样的微结构图像可看出:加砂比例为 10% 的试样颗粒间孔隙相对于其他 3 个来说是最少的,因此适当加砂,会增强红土结构稳定性,从而提高红土密实程度。图 7 还表明:一方面,适当加砂红土颗粒的粗糙度要大于不加砂红土颗粒的粗糙度,且颗粒间相互咬合作用也更强,因而在外力作用下,适加砂红土颗粒间相互错动更困难,红土颗粒之间的摩擦力有所

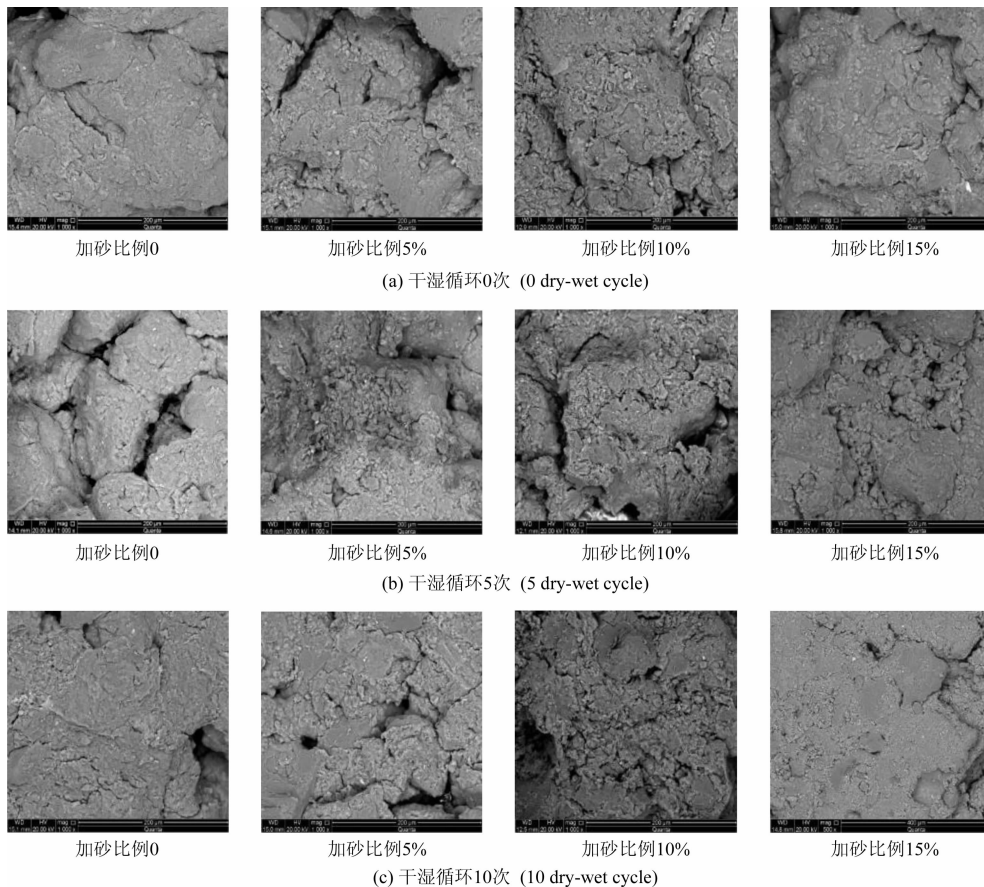


图 7 红土微结构随加砂比例的变化

Fig. 7 Change of laterite microstructure with sand adding proportion

提高,内摩擦角也有所增大;另一方面,相对于加砂红土而言,不加砂红土试样中粒径较小的颗粒数量和颗粒间的胶结物质也相对较多,而加砂红土因颗粒间无黏性砂粒的充填而损伤了颗粒间的联结作用^[20]。这就导致随着加砂比例的增大,红土试样黏聚力逐渐减小。

2.2.2 干湿循环作用下加砂红土微结构特性定量分析

考虑干湿循环,针对一定加砂比例、初始干密度为最大干密度以及初始含水率为最优含水率的加砂红土试样,通过电镜扫描以及计算机图像处理技术,对各种干湿循环、各种加砂比例的红土试样微结构图像进行数字化处理,提取相应微结构特征参数,得出不同干湿循环、不同加砂比例的红土微结构特征参数变化^[18]如图8、图9和图10所示。

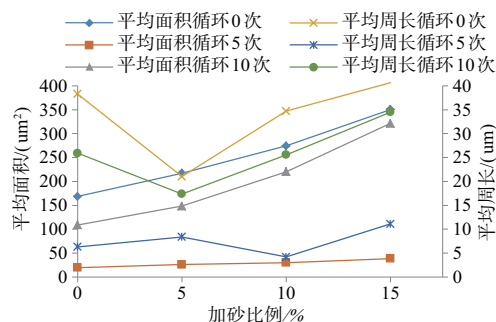


图8 红土颗粒平均面积和平均周长与加砂比例的关系

Fig. 8 Change of average area and circumference of laterite particle with sand adding proportion

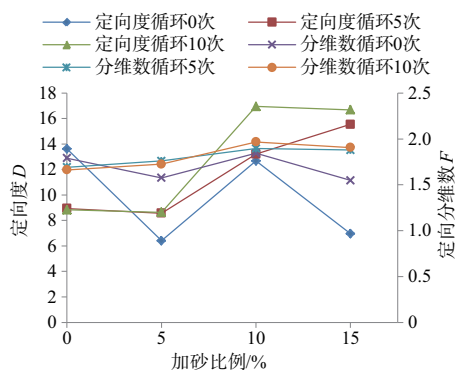


图9 红土颗粒定向度、定向分维数与加砂比例的关系

Fig. 9 Change of orientation degree and directional fractal dimension of laterite particle with sand adding proportion

图8是干湿循环条件下,加砂红土颗粒平均面积和平均周长随加砂比例的变化情况:当干湿循环一定时,加砂红土颗粒平均面积均随加砂比例的增加

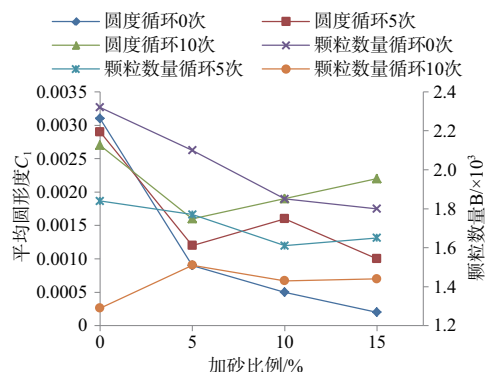


图10 红土颗粒平均圆形度和颗粒数量与加砂比例的关系

Fig. 10 Change of mean circular degree and particle number with sand adding proportion

加而逐渐增加,而颗粒平均周长则呈波动变化趋势。红土颗粒平均面积之所以随加砂比例的增加而增加,是因为加砂比例越大,砂粒与红土相互掺杂形成粒径较大的团粒越多,使得颗粒平均面积增大。颗粒平均周长之所以呈波动变化趋势,是因为砂粒与红土相互掺杂形成的团粒无规律存在于红土颗粒间,试样土体是非均质体,且微结构试样取样具有随机性,因此导致了不同部位的土颗粒平均周长差异很大。随着干湿循环次数增加,一定加砂比例红土颗粒平均面积与平均周长均呈下降趋势。其原因在于:干湿循环作用下,水分破坏了一定加砂比例红土的结构,粒径较大的团粒被分解,而细小颗粒又发生迁移,因此颗粒平均面积和平均周长呈现减小趋势。

图9是一定干湿循环次数下,加砂红土颗粒定向分维数与定向度随加砂比例的变化情况。图9表明:在干湿循环作用下,不同加砂比例红土无论是定向度还是定向分维数大小随加砂比例的变化均无明显趋势可言,也即干湿循环作用使不同加砂比例的红土定向性处于动态变化过程中,但其改变又无规律可循。特别是当加砂比例越大时,这种无序变化越明显。这也表明了加砂和干湿循环对红土物理力学特性影响的复杂性。

图10显示了加砂比例、干湿循环次数与加砂红土颗粒平均圆形度和颗粒数量之间的关系。当干湿循环次数为0次时,红土颗粒数量随加砂比例的增加呈减小的变化趋势,当干湿循环次数为5次和10次时,红土颗粒数量随加砂比例的增加呈波动变化趋势。这是因为:当红土试样没有进行

干湿循环时,砂粒、红土相互掺杂包裹,加砂比例越大,土样中砂粒含量越多,这种包裹作用越强,生成大团粒的数量也就越多,所以土颗粒数量相对减少。当干湿循环 5~10 次后,浸泡—风干引起土样反复收缩、膨胀,导致试样中细小红土颗粒既可能流失,又可能填充,因此造成红土颗粒数量的波动。在干湿循环一定的条件下,加砂红土颗粒平均圆形度随加砂比例的增加呈波动变化趋势。这也是因为砂粒与红土颗粒相互包裹,且加砂比例越大,这种作用越强,而且这种包裹作用是随机的,因此加砂红土颗粒平均圆形度随加砂比例的增加呈波动变化。在一定加砂比例条件下,随干湿循环次数的增加,红土颗粒平均圆形度均有所增加,而颗粒数量则有所下降^[20],当加砂比例分别为 0、5%、10%、15% 时,对应的红土颗粒数量降幅依次为 35.7%、28.1%、22.7%、20%。其原因在于:在一定加砂比例条件下,水分溶蚀了土颗粒中的易溶盐和部分氧化物胶体,使土颗粒表面较为圆润,随着干湿循环次数的增加,加砂红土颗粒平均圆形度也随之增加。一定加砂比例的红土颗粒数量则随干湿循环次数增加呈下降状态,是因为反复的干湿循环,对土体产生损伤破坏,且在土样中形成裂隙,粒径较小的黏粒和粉粒容易被带出土体,因此一定加砂比例时,红土试样颗粒数量随干湿循环作用而相对减少。

图 11 显示了加砂比例、干湿循环次数、红土孔隙率与孔隙面积之间相互影响的变化情况。当干湿循环次数一定时,加砂红土孔隙率与孔隙面积均随加砂比例的增加而减小。造成这一现象的原因在于:当砂粒与红土混合时,加砂红土的颗粒级配与素

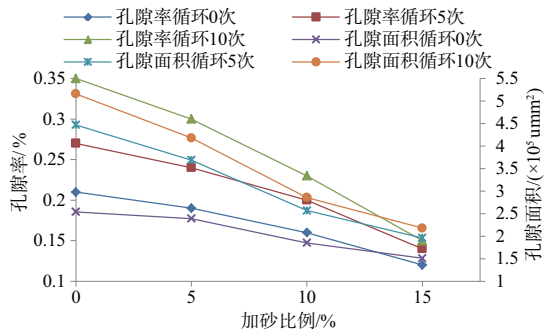


图 11 红土孔隙率和孔隙面积与加砂比例的关系

Fig. 11 Change of pore area and pore rate with sand adding proportion

红土相比有所改变,且加砂比例越大,加砂红土的颗粒级配越不均匀,导致在干湿循环作用下,加砂红土相对密实,因而其孔隙率与孔隙面积也就相对越小。随着干湿循环次数增加,一定加砂比例红土的孔隙率与孔隙面积均随之增加。在试验干湿循环次数范围内,当加砂比例依次为 0、5%、10%、15% 时,相应加砂红土孔隙率增幅依次为 40.4%、36.5%、28.9%、23.6%;相应孔隙面积增幅依次为:50.8%、42.9%、35.5%、30.7%^[20]。这是因为:在一定加砂比例条件下,干湿循环作用导致了土体结构的松散破坏,且渗流带走了部分细小颗粒,导致土体孔隙率和孔隙面积的增大。当干湿循环次数一定时,加砂比例越大,红土的初始干密度越大,其结构稳定性相对越好,干湿循环引起的结构损伤相对越小,因而土体孔隙的扩张和细小颗粒的迁移流失相对较小,因而干湿循环过程导致的孔隙率与孔隙面积的变化也相对越小。

2.2.3 加砂红土抗剪强度指标与微结构特征参数相关性分析

土体性质与其微结构特性密切相关。土体微结构特性很多,可以由相应的微结构特征参数来体现。各微结构特征参数并非相对独立,而是相互交叉影响,且不同微结构特征参数对土体性质的影响程度也有所不同。抗剪强度是土体主要力学参数,决定于黏聚力和内摩擦角两个抗剪强度指标。本文采用 Spass 软件以及统计回归分析方法,研究不同加砂比例红土抗剪强度指标与微结构特征参数之间的关系,甄别显著影响红土抗剪强度指标的微结构特征参数。表征土体微结构特征的参数很多,除较为常用的面积、周长、孔隙率外,还有分维数和定向度等。所谓分维数是指对于一个研究对象,使用非整数数值的维数尺度去度量,以准确反映其所具有的不规则性和复杂程度,则这个非整数的维度就是分维数;而定向度是用来反映红土颗粒在空间排列的有序程度。

通过计算机图像处理技术对加砂比例分别为 0、5%、10%、15% 的红土试样,分别干湿循环 0、5、10 次的微结构图像进行处理,提取微结构特征参数,分析不同加砂比例红土在干湿循环条件下黏聚力、内摩擦角与微结构参数之间的相关性,得出如表 2 所示结果。

表 2 不同加砂比例红土在干湿循环作用下黏聚力、内摩擦角与微结构特征参数之间的关系^[18]

Table. 2 Relationship between cohesion force and internal friction angle and microstructure characteristic parameters of laterite with different sand proportion under dry-wet cycle

参数	相关系数							
	颗粒数量	颗粒平均周长	颗粒平均面积	孔隙率	孔隙面积	定向度	平均圆形体	定向分维数
黏聚力 c/kPa	-0.369	-0.163	0.201	0.511	0.533	-0.972	0.473	-0.958
摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	0.373	0.147	0.125	-0.956	-0.940	-0.329	-0.928	-0.292

表 2 表明:针对干湿循环和不同加砂比例的红土,对黏聚力影响最大的是定向度和定向分维数,其相关系数可达到 -0.972 和 -0.958。对内摩擦角影响最大的是平均圆形体、孔隙率和孔隙面积,相关系数为 -0.928、-0.956、-0.940。黏聚力、内摩擦角与这些微结构参数均呈反相关关系^[20]。相关性分析结果如式(1)、式(2)所示:

$$C = 92.8 - [4.93D + 2.687e^{-0.05}F] \quad (1)$$

式中, C 为红土黏聚力(kpa); D 为定向度; F 为定向分维数。

$$\varphi = 42.77 - [2.36e^{-0.05}n + 0.00011A + 1852e^{-0.05}C_1] \quad (2)$$

式中, φ 为红土内摩擦角(°); n 为红土孔隙率; A 为红土孔隙面积(μm^2); C_1 为红土平均圆形体。

式(1)表明:在干湿循环过程中,定向度和定向分维数与不同加砂比例红土黏聚力相关性最大,而且是反向相关。即随着加砂红土定向度与定向分维数的增加,其黏聚力总体上呈下降趋势。这种对应关系说明,加砂红土定向度增加使得颗粒排列方式越来越混乱,粒间联结作用变小。加砂还增大了红土的定向分维数,导致孔隙分布、孔隙数量、孔隙连通性以及颗粒间接触关系均发生变化,其结果导致了加砂后红土黏聚力的下降。

式(2)表明:与不同加砂比例红土内摩擦角相关性最大的是平均圆形体、孔隙率、孔隙面积,且呈反相关。在干湿循环过程中,针对一定加砂比例的红土,内摩擦角总体上随平均圆形体、孔隙率和孔隙面积的增加而减小。这是因为干湿循环作用不仅会溶蚀土体中的氧化物胶体,同时渗流带走了部分细小颗粒,使得土体孔隙数目和孔隙面积不断增加,颗粒间的接触面积减小,从而削弱了颗粒间相互咬合力和摩擦力,由此减小了加砂红土内摩擦角。

综上所述,土工试验、微结构图像及特征参数、微结构特征参数与云南红土内摩擦角及黏聚

力的相关统计分析,所得出的干湿循环和加砂比例对云南红土内摩擦角和黏聚力的影响关系基本上是一致的。

3 结论和讨论

通过不同加砂比例红土的干湿循环试验,本文分析了干湿循环、加砂比例、红土抗剪强度与其微结构特性之间的内在联系,研究了不同加砂比例红土抗剪强度指标与微结构参数之间的关系,得出如下结论:

(1)针对一定加砂比例的红土,随着干湿循环次数的增加,其黏聚力、内摩擦角及抗剪强度均呈逐渐减小的变化趋势。干湿循环次数一定时,加砂红土内摩擦角随加砂比例的增加呈非线性增加的变化趋势;黏聚力随加砂比例的增大呈非线性减小的变化趋势;抗剪强度随加砂比例的增加呈先逐渐减小然后增加到一个极值,再逐渐减小的波动变化趋势。抗剪强度极值对应的加砂比例约为 10% 左右,说明红土中适当加砂可提高其抗剪强度。

(2)就微结构特征而言,加砂比例一定的红土,干湿循环作用使其颗粒平均面积与平均周长均呈下降趋势,而孔隙率与孔隙面积均呈增加的变化趋势;红土颗粒平均圆形体有所增加,颗粒数量有所下降。干湿循环次数一定时,加砂红土颗粒平均面积随加砂比例的增加而增加,颗粒平均圆形体和颗粒数量随加砂比例的增加而减小;颗粒平均周长、定向度和定向分维数则无明确的变化趋势;孔隙率与孔隙面积均与加砂比例呈反相关关系。

(3)干湿循环作用下,加砂红土黏聚力与定向度和定向分维数相关性较大;内摩擦角与平均圆形体、孔隙率、孔隙面积相关性较大。黏聚力、内摩擦角均与这些微结构参数呈反相关关系。

由于干湿循环试验、土工试验和微结构试验都

是通过制备的试验土样完成的,干湿循环次数也很有限,且用于电镜扫描的土样随机取自试样内部,不可避免地会产生扰动,再加上土样本身并非均质体,这些因素都可能导致所得结果与实际情况存在差异。所以,本文所得出的干湿循环、加砂比例、红土抗剪强度以及微结构参数之间的关系,仅是以云南红土作为研究土体宏微观特性之间关系的尝试。只有采用新理论、新方法进行更加深入、完善和符合客观实际的研究,并结合相关工程实际,才能可靠地解释干湿循环、加砂比例、红土抗剪强度以及微结构特性之间的内在联系。

参考文献 (References)

- [1] 黄震,陈斌. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(3): 87-93. [HUANG Zhen, CHEN Cheng. A study of the swelling shrinkage soil and its relationship cracks of the modified expansive with the shear strength [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, **43**(3): 87-93]
- [2] 杨俊,刘子豪,张国栋,等. 复合方法改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, **12**(4): 1069-1076. [YANG Jun, LIU Zihao, ZHANG Guodong, et al. Experimental research on unconfined compressive strength of expansive soil improve by composite method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, **12**(4): 1069-1076]
- [3] 曾娟娟,文畅平,苏伟,等. 基于生物酶改良膨胀土的试验研究[J]. 建筑科学, 2017, **33**(5): 69-73. [ZENG Juanjuan, WEN Changping, SU Wei, et al. Experiment research of bio-enzyme expansive soil modified [J]. Building Science, 2017, **33**(5): 69-73]
- [4] 武庆祥,彭丽云,龙佩恒. 石灰、水泥对粉土的改良研究[J]. 公路, 2015, (9): 14-19. [WU Qingxiang, PENG Liyun, LONG Peiheng. Study of modifying silt by lime and cement [J]. Highway, 2015, (9): 14-19]
- [5] 高美奔,薛德敏,陈国庆. 砂-红黏土抗剪强度室内试验与分析[J]. 土工基础, 2013, **27**(5): 65-66. [GAO Meiben, XUE Demin, CHEN Guoqing. Laboratory test and analysis on shear strength of sand-red clay [J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, **27**(5): 65-66]
- [6] 梁谏杰,张祖莲,邱观贵,等. 云南加砂红土物理力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, **44**(5): 100-106. [LIANG Jianjie, ZHANG Zulian, QIU Guangui, et al. A study of physical and mechanical properties of sandy laterite under drying-wetting cycles in Yunnan [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, **44**(5): 100-106]
- [7] 黄英,何发祥,金克盛,等. 胶结材料对云南红土胶结特性的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, **4**(5): 51-56. [HUANG Ying, HE Faxiang, JIN Kesheng, et al. Effects of cementary materials on Yunnan laterite [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, **4**(5): 51-56]
- [8] 刘鹏,黄英,王盼,等. 云南红土室内滑坡模型相似材料的特性研究[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(1): 3151-3157, 3161. [LIU Peng, HUANG Ying, WANG Pang, et al. Research on the characteristics of the similar material about the Yunnan laterite indoor landslide model [J]. Science Technology and Engineering, 2013, **13**(1): 3151-3157, 3161]
- [9] 王清,王凤艳,肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, **28**(2): 148-153. [WANG Qing, WANG Fengyan, XIAO Shufang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its application to the engineering [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, **28**(2): 148-153]
- [10] 宋晶,王清,陈慧娥,等. 高粘性高盐量吹填土固结过程孔隙分维特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, **40**(2): 361-366. [SONG Jing, WANG Qing, CHEN Huie, et al. Fractal dimension of porous of heavy clay and saliniferous dredger fill during the process of consolidation [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, **40**(2): 361-366]
- [11] 熊承仁,唐辉明,刘宝琛,等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2007, **32**(3): 415-419. [XIONG Chengren, TANG Huiming, LIU Baochen, et al. Using SEM photos to gain the pore structural parameters of soil samples [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2007, **32**(3): 415-419]
- [12] 李平,张廷安,汪秉宏,等. 灰度阈值对图像分形特征参数提取的分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, **27**(1): 57-60. [LI Ping, ZHANG Tingan, WANG Binghong, et al. Grey level threshold used to extract fractal characteristic parameter of surface topography image [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, **27**(1): 57-60]
- [13] 高凌霞,李顺群. 灰度阈值对粘土合成微结构参数的影响[J]. 水文地质工程地质, 2011, **38**(5): 70-75. [GAO Lingxia, LI Shunqun. Influence of grey threshold on synthetical microstructure parameters [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, **38**(5): 70-75]
- [14] 刘勇健,李彭明,伍四明,等. 南沙地区软土物理力学性质指标与微结构参数的统计分析[J]. 广东工业大学学报, 2010, **27**(2): 21-26. [LIU Yongjian, LI Zhangming, WU Siming, et al. Statistic analysis of physical-mechanical indexes and microstructure parameters of soft soil in Nan sha area [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2010, **27**(2): 21-26]
- [15] 张齐齐,王家鼎,刘博榕,等. 水泥改良土微观结构定量研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(3): 92-96. [ZHANG Qiqi, WANG Jiading, LIU Borong, et al. Quantitative research on microstructure of modified soil with cement [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, **42**(3): 92-96]
- [16] 王顺,李涛涛,王林. 离子土壤强化剂改性膨胀土的微结构试验研究[J]. 安全与环境工程, 2011, **18**(4): 26-30. [WANG Shun, LI Taotao, WANG Lin. Experimental study on the

- microstructure of ISS-improved expansive Soil [J]. Safety and Environ ental Engineering, 2011, **18**(4):26-30]
- [17] 南京水利科学研究院. 土工试验规程:SL237-1999[S]. 沈阳: 辽宁民族出版社, 1999:19-49. [Nanjing hydraulic research institute. Specification of soil test:SL237-1999[S]. Shenyang: Liaoning nationalities press, 1999:19-49]
- [18] 张祖莲, 梁谏杰, 黄英, 等. 干湿循环作用下红土抗剪强度与微结构关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, **45**(3):92-99. [ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, et al. Study on relationship between shear strength and microstructure of the laterite under wetting drying cycle [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, **45**(3):92-99]
- [19] 张祖莲, 梁谏杰, 黄英, 等. 干湿循环作用下云南红土特性与库岸边坡稳定性关系研究[J]. 山地学报, 2018, **36**(2):280-288. [ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, et al. On the relationship between characteristics of Yunnan laterite and stability of the bank slope under wetting-drying cycles [J]. Mountain Research, 2018, **36**(2):280-288]
- [20] 梁谏杰. 云南红土型库岸稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017:24-58. [LIANG Jianjie. Study on Stability of Yunnan Laterite Bank[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017:24-58]

Effect of Sand Adding on Shear Strength and Microstructure Characteristics of Laterite under Dry-Wet Cycling Condition

LIANG Jianjie, ZHANG Zulian*, HUANG Ying, YUAN Qiang

(College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Under the dry-wet cycle condition, the effect of sand addition proportion on shear strength and microstructure of Yunnan laterite was studied by the test of direct shear and wet-dry cycle and mathematical statistics analysis in this paper. The results can offer some reference for the engineering application of Yunnan laterite. The results showed: (1) When the number of the dry-wet cycle was constant, increasing of the sand proportion in the laterite led to a nonlinear increasing of the internal friction angle and a nonlinear decreasing of the cohesive force of laterite. The shear strength showed the change of down-up-down fluctuation with increasing of the sand proportion and the shear strength reached its maximum value when the sand proportion was approximately 10%. (2) Under the condition of increasing the number of dry-wet cycle, corresponding to the sand proportion in the laterite of 0, 5%, 10% and 15% respectively, the change range for the correlated variables was: the reduction of the internal friction angle 22.8%, 30.9%, 19.9% and 32.6%, the decreasing amount of the cohesion force 26.6%, 29.2%, 17.3% and 37.7%, the reducing amount of the shear strength 23.6%, 25.6%, 18.7% and 28.2%, the reduction of the laterite particle number 35.7%, 28.1%, 22.7% and 20%, the increasing amount of the pore rate 40.4%, 36.5%, 28.9% and 23.6% and the increase of the pore area 50.8%, 42.9%, 35.5% and 30.7%, respectively. (3) Under the effect of both the dry-wet cycle and the sand adding, the laterite microstructure can be changed. The test results indicated that the microstructure parameters both the orientation degree and the directional fractal dimensions had a closely relationship with the cohesion force, the internal friction angle was effected by the microstructure parameters like the mean circular degree, the pore area and the pore rate, etc. These microstructure parameters were all negatively related to the cohesion force and the internal friction angle, with the maximum correlation coefficient of -0.972 and the minimum correlation coefficient of -0.928 . In a word, the dry-wet cycle and the sand adding proportion all significantly affected the laterite microstructure and the shear strength.

Key words: laterite; dry-wet cycle; cohesion force; internal friction angle; sand adding proportion; microstructure