

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.008

团粒粒径对复合改良膨胀土强度特性的影响研究

储诚富, 王雨航

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为揭示团粒尺寸效应对膨胀土改良效果的影响,文章选用铁尾矿砂和电石渣作为改良剂来处理膨胀土,研究不同团粒粒径((0,2) mm、[2,5) mm和[5,10) mm)改良土的无侧限抗压强度、水稳性以及应力-应变特征,并结合微观试验分析其结构变化。试验结果表明:团粒粒径越大,改良土的无侧限抗压强度和水稳性越低,刚度越小,脆性破坏特征越明显;相对于铁尾矿砂改良,复合改良效果更佳;掺入铁尾矿砂能削弱团粒尺寸效应对改良效果的负面影响,最佳掺加质量分数为30%~40%;电石渣富集在团粒表面,使得土样结构变得松散,同时内部土改性效果较差,对试样稳定性有不利影响;而掺入的铁尾矿砂能填充于团粒间的孔隙,改善土体孔隙结构,增大土样强度。试验结果可为铁尾矿砂和电石渣应用于膨胀土改良工程提供参考。

关键词:膨胀土改良;团粒尺寸效应;工业废渣;无侧限抗压强度

中图分类号:TU443

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)08-1060-07

Effect of aggregate size on strength characteristics of composite improved expansive soil

CHU Chengfu, WANG Yuhang

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to reveal the influence of aggregate size effect on the improvement effect of expansive soil, iron tailings sand and calcium carbide slag were selected as amendments to treat expansive soil. The unconfined compression strength, water stability and stress-strain characteristics of the improved soil with different aggregate sizes((0,2) mm, [2,5) mm and [5,10) mm) were studied, and its structural changes were analyzed in combination with microscopic experiments. The experimental results show that the larger the aggregate size of the improved soil, the lower its unconfined compression strength and water stability, the smaller its stiffness, and the more obvious its brittle failure characteristics. Compared to the improvement by using iron tailings sand, the composite improvement effect is better. The addition of iron tailings sand can weaken the negative impact of aggregate size effect on the improvement effect, and the optimal dosage is 30%-40%. Calcium carbide slag is enriched on the surface of the aggregates, causing the soil sample structure to become loose. At the same time, the internal soil modification effect is poor, which has a negative impact on the stability of the sample. Adding iron tailings sand can fill the pores between the aggregates, improve the pore structure of the soil, and increase the strength of the soil sample. The experimental results can provide reference for the application of iron tailings sand and calcium carbide slag in expansive soil improvement engineering.

Key words: expansive soil improvement; aggregate size effect; industrial waste residue; unconfined compression strength

收稿日期:2023-06-06;修回日期:2023-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42172307);安徽省自然科学基金资助项目(2008085MD118)

作者简介:储诚富(1975—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:chuchengfu@hfut.edu.cn.

膨胀土在重塑时会成为大大小小的团块,这些团块就是构成土体的基本结构单元——团聚体,又称团粒^[1]。土团粒对土体结构的形成起着重要作用的同时又影响着土壤的行为^[2-3]。一般地,土体的宏观强度除了与土的矿物成分有关外,还与土中团粒的粒径级配、排列和接触方式等因素有关^[4]。因此,团粒粒径也是影响黏性土改性效果的重要因素之一。文献^[5]研究发现,石灰土的膨胀量随黏土团粒粒径的增大先减小后增大,而加州承载比(California Bearing Ratio, CBR)则呈现相反的趋势。文献^[6-7]在对红黏土进行改性时发现,随着土团粒粒径的增大,改良土的无侧限抗压强度逐渐降低,而膨胀率先减小后增大。文献^[8-11]通过大量试验研究了团粒最大粒径 D_{max} 对石灰处理细粒土的影响,发现用较小团粒制备的土样孔隙模态尺寸越小,石灰分布越好,能产生更多的胶凝化合物。文献^[12]研究了稳定剂处理土团粒的微观结构,发现石灰主要集中在孔隙或团粒表面,而对粒径为5~10 mm的团粒内部影响较小。在黏性土室内改良试验过程中,研究人员通常会将试验土破碎到2 mm以下,而施工现场的团粒粒径在经过二次拌和后仍分布在0.5~30.0 mm之间,因此团粒粒径的巨大差异造成了施工现场改良土和室内改良土的承载比^[13]、强度^[14]和导水性^[15]存在显著差异。大量团粒尺寸对改良效果的影响研究表明,大粒径团粒对改良土的改良效果具有负面影响。考虑到工程实际,膨胀土团粒粒径很难达到室内试验中的理想粒径,因此需要选择合适的材料来削弱团粒尺寸效应的不利影响。文献^[16]研究表明,掺入偏高岭土后,试样内石灰分布得更均匀,同时偏高岭土填充于团粒间的孔隙中,从而增强试样的水力性能,但需要较长的养护时间来提升其增强效果。

铁尾矿砂是铁矿石经过破碎、湿磨和磁选等工序提取有效组分后剩余的固体废料^[17]。电石渣是工业上生产聚乙烯醇、聚氯乙烯和乙炔的副产品,具有强碱性,并且含有少量硫化氢等有害组分^[18]。铁尾矿砂和电石渣如果处理不当,会造成土地和水资源的污染,进而影响附近居民的健康。因此,本文尝试利用铁尾矿砂协同电石渣处理膨胀土,开展不同团粒粒径改良土的强度和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)微观试验,以期通过复合改良的方式来削弱团粒尺寸的负面影响,为铁尾矿砂和电石渣应用于膨胀土改良工程提供技术支撑。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自安徽省合肥市某建筑工地,取土深度为3~4 m,颜色呈黄褐色,其基本物理性质见表1所列,根据表1参数可判断该膨胀土为弱膨胀土。铁尾矿砂取自安徽省庐江县某尾矿库,颜色呈灰黑色,质地坚硬,矿物成分复杂,以脉石矿物为主,其主要成分为石英,并含少量角闪石、方解石和辉石等。该铁尾矿砂在天然状态下不具有活性和水硬性,粒径分布见表2所列,为细砂。电石渣取自河南郑州市某材料厂,粒度小,钙质量分数高。铁尾矿砂和电石渣的主要化学成分及其质量分数见表3所列。

试验前将取回的素土过筛,筛分出(0, 2) mm、[2, 5) mm和[5, 10) mm的素土团粒,测量其初始含水率,结果分别为17.14%、17.26%、17.31%,整个试验过程中对土样进行保湿处理。铁尾矿砂和电石渣烘干后过2 mm筛备用。

表1 膨胀土基本物理性质

天然含水率/%	相对体积分质量	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%	最优含水率/%
2.73	41.0	21.0	20.0	50.0	13.8	1.89

表2 铁尾矿砂颗粒粒径分布

粒径/mm	[2, 3)	[1, 2)	[0.5, 1)	[0.25, 0.5)	[0.075, 0.25)	(0, 0.075)
质量分数/%	0.54	3.50	13.54	24.38	50.25	7.79

表3 电石渣和铁尾矿砂的化学成分及其质量分数 %

材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
铁尾矿砂	65.52	3.18	9.32	11.72	5.74	0.71
电石渣	1.57	68.98	1.98	0.47	0	0.32

1.2 试验方法

1.2.1 无侧限抗压强度

称取一定质量粒径为(0, 2) mm、[2, 5) mm和[5, 10) mm 3个范围的素土。根据3种粒径范围土样的初始含水率计算土样的干质量,随后按砂土干质量比(α_{TS})分别掺入0、10%、20%、30%、40%、50%的铁尾矿砂(下文中称为“铁尾矿砂掺量”),此为铁尾矿砂改良土,而复合改良土是在铁尾矿砂改良土的基础上,掺入与砂土混合料干质量比为10%的电石渣。改良土的最优含水率与最大干密度如图1所示。

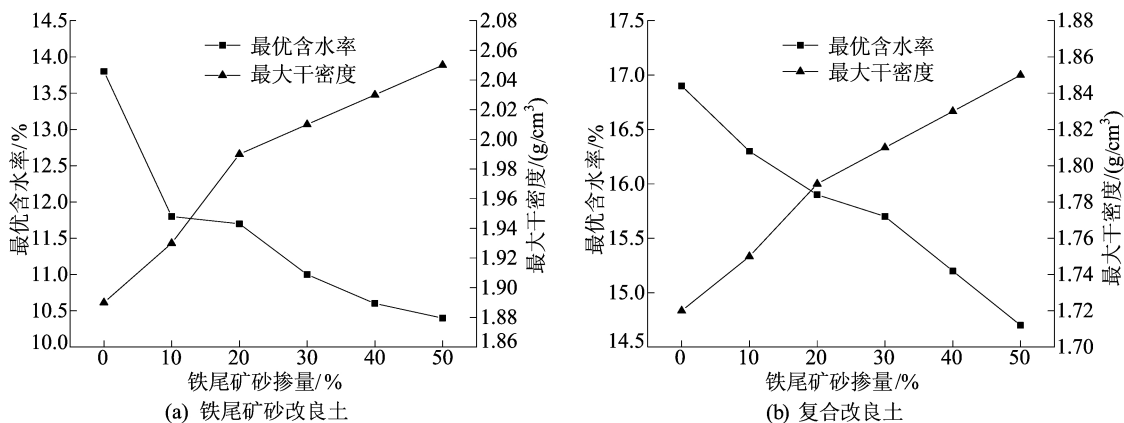


图 1 改良土的最优含水率与最大干密度

根据击实试验结果(图 1),控制试样压实度为 95%,利用千斤顶将各配比的混合土料在最优含水率下采用静压法制成 $\phi 50 \times 50$ mm 的圆柱试样,最后放入养护箱中标准养护(养护温度为 (20 ± 2) °C,湿度大于 95%) 7 d;用于水稳性试验的土样制样方法同前,养护的最后一天吸水饱和。标准养护或饱和后根据文献[19]测其无侧限抗压强度。

1.2.2 SEM 表征

用于 SEM 试验的试样为饱和复合改良土试样,其铁尾矿砂掺量分别为 0、30%、50%,团粒粒

径范围为(0,2) mm。无侧限抗压强度试验结束后,从试样中掰出 1 个大小为 5 mm^3 的扁方块,经过冻干、喷碳处理后进行微观试验,显微设备为 Tescan MIRA3 热场发射扫描电子显微镜。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

铁尾矿砂改良土及复合改良土在最优含水率下的无侧限抗压强度随铁尾矿砂掺量的变化如图 2 所示。由图 2 可知,粒径越大,改良土的无侧限抗压强度越小。

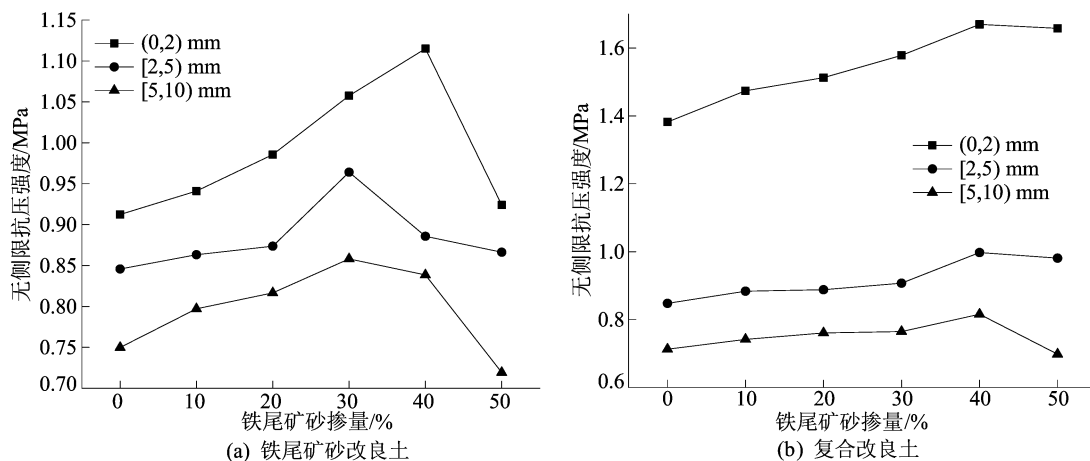


图 2 非饱和改良土的无侧限抗压强度

随着铁尾矿砂掺量增加,2 种改良土的无侧限抗压强度均先增大后减小,最佳掺量为 30%~40%。素土的强度由土中黏土矿物的黏结作用决定。当向膨胀土中掺入铁尾矿砂后,铁尾矿砂会充填在土团粒之间的孔隙中,和土团粒形成土颗粒-砂颗粒-土颗粒骨架结构,静压实后使土体更加密实,此时土体的强度由黏土颗粒的黏结作用和土颗粒与砂颗粒的咬合、摩擦作用共同决定,因

此土体强度上升。当铁尾矿砂掺量超过最佳掺量后,砂颗粒含量过高,颗粒间的骨架孔隙增大,颗粒间接触不紧密,砂颗粒开始处于悬浮状态,因此,强度开始降低。(0,2) mm 团粒的粒径与铁尾矿砂的粒径更接近,砂颗粒与土颗粒间接触更紧密,而[2,5) mm 和[5,10) mm 团粒相对更粗糙,棱角明显,因此更难压实,压实后土样中孔隙较大,强度多由团粒与团粒之间的摩擦力决定,铁

尾矿砂在大孔隙中多处于松散状态,因此对强度的提升并没有(0,2) mm 改良土的明显。对于复合改良土,掺入电石渣之后,电石渣与黏土颗粒发生离子交换、絮凝和火山灰反应,降低膨胀土的黏性,提高其强度。但这个过程主要发生在团粒表面,团粒粒径越大,比表面积越小,电石渣与土颗粒间的反应面积就越小,改良效果越差,因此强度也就越低。同时,富集在团粒表层的电石渣很难渗入到团粒内部参与火山灰反应,因此成为游离态,使得土体结构变得松散,而铁尾矿砂能填充于

团粒间的孔隙中从而使土体变得密实。

铁尾矿砂改良土及复合改良土吸水饱和后的无侧限抗压强度如图 3 所示。从图 3 可以看出,铁尾矿砂改良土和复合改良土的无侧限抗压强度在吸水饱和后均有不同程度的下降,并且随铁尾矿砂掺量的增加,其变化趋势与吸水前的相似,表现为先增大后减小,最佳掺量为 30%。

2 种改良土的水稳系数(k)(水稳系数是指改良土浸水饱和后与标准养护下的无侧限抗压强度的比值)的变化如图 4 所示。

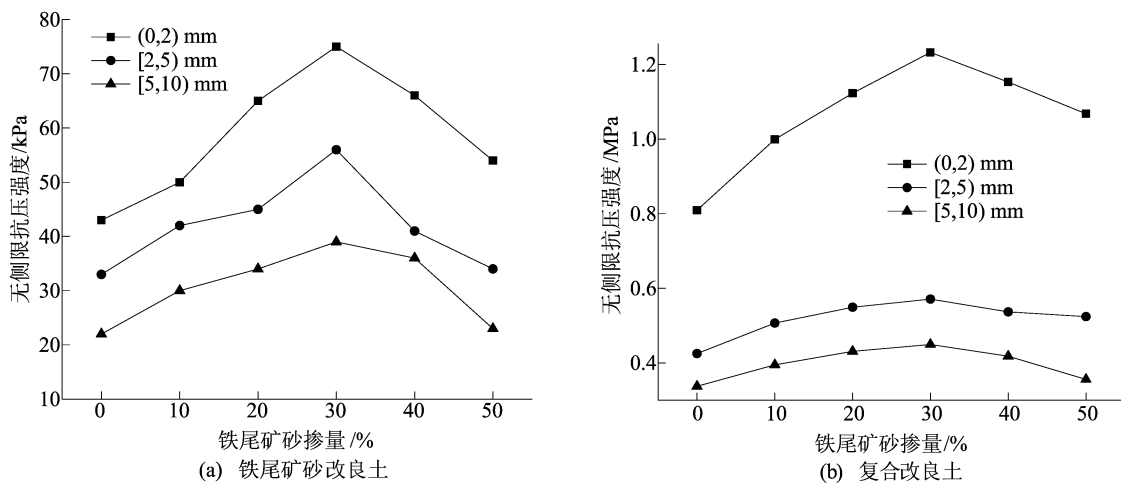


图 3 饱和改良土的无侧限抗压强度

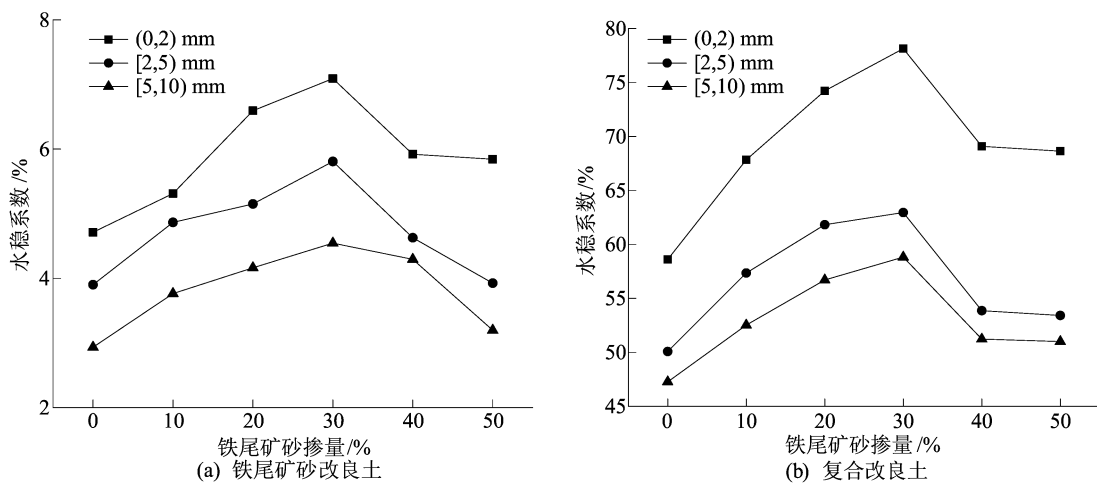


图 4 改良土的水稳系数

由图 4 可知,铁尾矿砂改良土的水稳性很低,相对于素土,3 种粒径铁尾矿砂改良土的水稳性最大分别只提高 2.38%、1.91%、1.61%。铁尾矿砂改良土在吸水过程中,土团粒膨胀软化,边界模糊,因此土团粒粒径对土样吸水后的强度影响并不明显。掺入铁尾矿砂相当于以惰性材料置换出部分膨胀性黏土,可以适当限制土体的膨胀变

形。而复合改良土的水稳性很高,相对于不掺铁尾矿砂的复合改良土,掺 30% 的铁尾矿砂后,3 种粒径复合改良土的水稳性分别增加 29.91%、15.14%、13.73%。由此可知,团粒粒径越大,改良土水稳性越低。电石渣富集在团粒表面通过火山灰反应会形成一个具有一定强度和厚度的“固化层”,而团粒内部膨胀土无法直接接触电石渣,

只有少量 Ca^{2+} 迁移至内部,改性效果较差。因此,团粒表层和内部膨胀土的胀缩性具有显著差异,在吸水膨胀的过程中,表面“固化层”的强度如果不能抵消内部土的膨胀力,那么就会发生破坏。团粒粒径越大,内部膨胀力就越大,团粒越容易破坏,试样水稳性就越低。适量掺入铁尾矿砂对提高改良土的无侧限抗压强度和水稳性有利,最佳掺量为 30%。当铁尾矿砂掺量较高时,一方面,土体中出现砂颗粒-砂颗粒骨架结构,这种松散结

构稳定性较弱,因此强度变低;另一方面,土体的渗透性也较高,试样更容易受到水的侵蚀,孔隙中的电石渣随着水分流失,如此又增大了土体内部的孔隙,削弱了土团粒间的胶结力。而在铁尾矿砂掺量为 30% 时,其既能提供一定的胶结力来提高强度,又能满足渗透性要求。

2.2 应力-应变特征

复合改良土在不同铁尾矿砂掺量下的应力-应变曲线如图 5 所示。

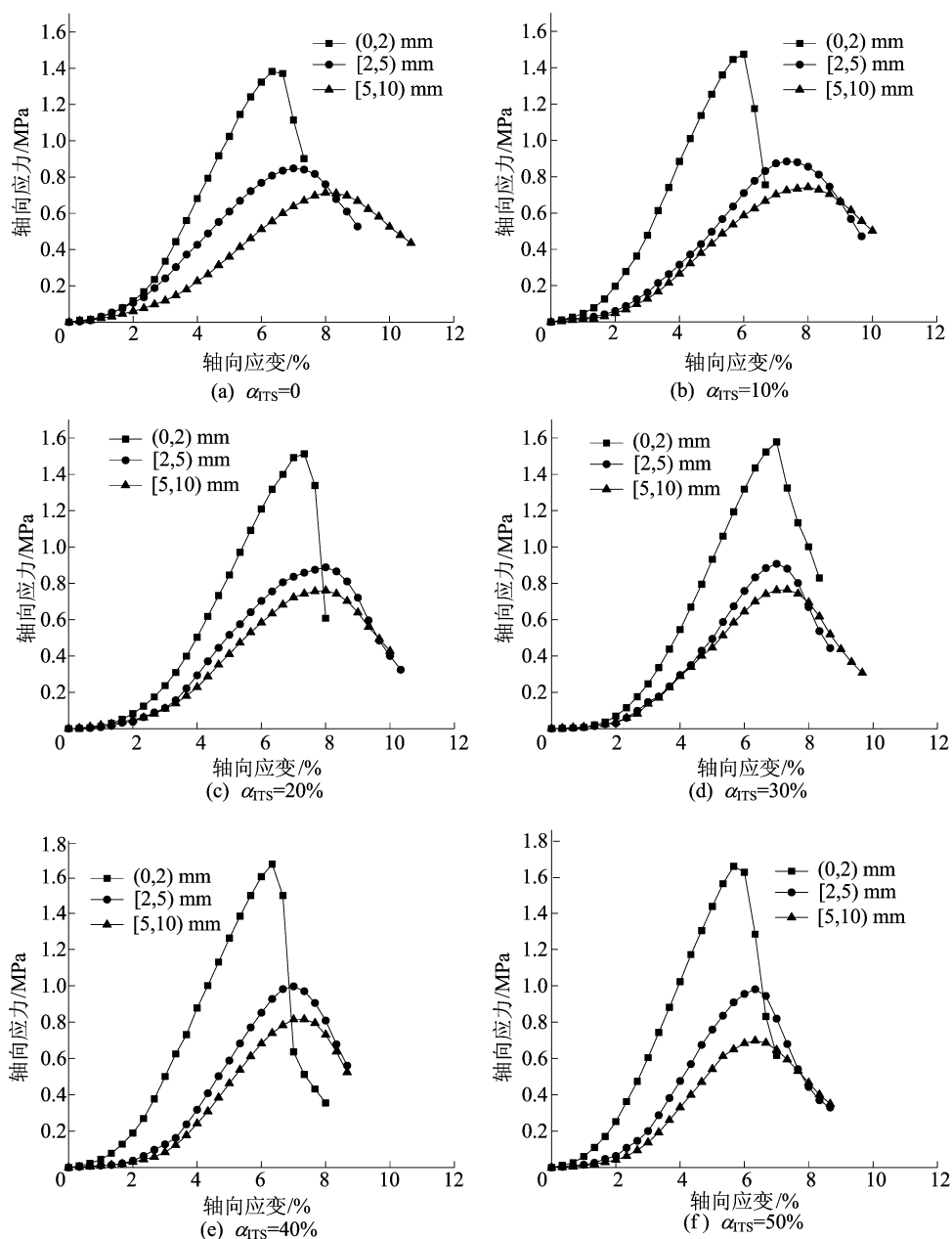


图 5 复合改良土应力-应变曲线

由图 5 可知,复合改良土的应力-应变曲线在最优含水率下为应变软化型,表现为脆性破坏。曲线上升段为线弹性阶段,该段曲线的斜率可以

表征土体的刚度^[20]。(0,2) mm 复合改良土应力-应变曲线弹性变形阶段的斜率大于[2,5) mm 和[5,10) mm 的,这说明粒径越小,复合改良土

的刚度就越大。(0,2) mm 复合改良土的破坏应变为 5.7%~7.3%, [2,5) mm 和 [5,10) mm 复合改良土的破坏应变为 6.3%~8.0%。各粒径改良土的破坏应变随铁尾矿砂掺量的增加先增大后减小,在掺量为 30%~40% 时达到最大值。团粒粒径越大,改良效果越差,土样表现出一定的韧性,而小粒径土样则表现出更高的脆性。掺入铁尾矿砂会增强 [2,5) mm 和 [5,10) mm 改良土的脆性破坏特征,而对 (0,2) mm 改良土的脆性破坏特征影响不大。

土样的刚度和脆性与其结构密切相关,因此从应力-应变曲线可以得出,掺入的铁尾矿砂可以填充于团粒间的孔隙,增大改良土的刚度,提高其脆性,并且大团粒粒径改良土的改良效果较差,这是由于其本身刚度和脆性就较小,因此掺入铁尾矿砂对大团粒粒径改良土的增强效果更优。因此掺入铁尾矿砂对于削弱团粒粒径尺寸效应的负面

影响有积极作用。

2.3 微观分析

铁尾矿砂掺量分别为 0、30%、50% 时 (0,2) mm 复合改良土的内部微观 SEM 图像如图 6 所示。由图 6a 可知,改良土呈现颗粒堆积结构以及火山灰反应形成的絮凝结构。在不掺铁尾矿砂时,土样小孔隙较多,电石渣富集在团粒表面,结构较松散。由图 6b 可知,掺入 30% 的铁尾矿砂后,土体结构密实,孔隙较少。由于铁尾矿砂颗粒表面形状不规则,磨圆度差,砂颗粒填充于团粒间的孔隙中,增强了团粒间的咬合力,使试样结构变得致密,强度增大。由图 6c 可知,当铁尾矿砂掺量为 50% 时,土体孔隙增大,颗粒分布松散。当铁尾矿砂掺量过高时,砂颗粒处于悬浮状态,多余的铁尾矿砂会阻碍团粒间的接触,减小团粒间的黏结作用,压实性变低,从而增大土体孔隙,结构变得松散,强度降低。

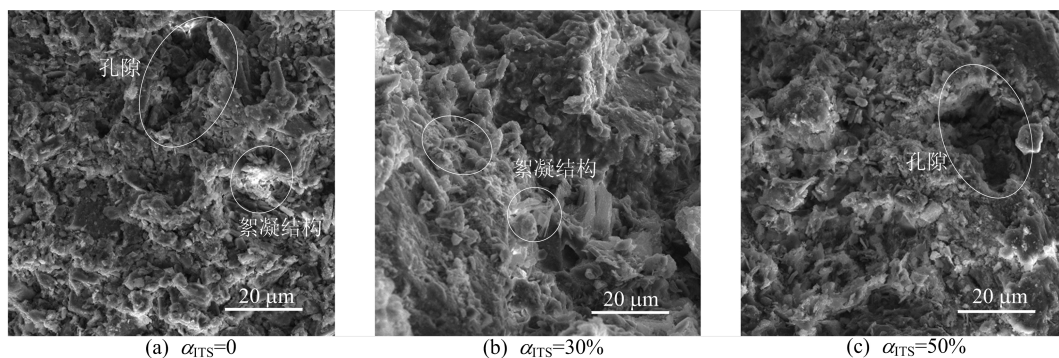


图 6 复合改良土的 SEM 图像

3 结 论

本研究不同团粒粒径工业废渣改良土强度特性,着重分析铁尾矿砂掺量的影响,并从微观角度解释其影响机理,主要结论如下:

1) 团粒粒径越大,铁尾矿砂改良土与复合改良土的无侧限抗压强度和水稳性越低,刚度越小,改良效果越差。

2) 掺入铁尾矿砂能增大各粒径改良土的无侧限抗压强度、水稳性及刚度,最佳掺量为 30%~40%。适量掺入铁尾矿砂能削弱团粒粒径尺寸效应对改良效果的负面影响。

3) 电石渣富集在团粒表面,在改性膨胀土的同时,也会影响团粒间的胶结程度,使得团粒间孔隙增大。适量掺入铁尾矿砂则会填充于这些孔隙中,使土样更密实,有利于强度的提升。

[参 考 文 献]

- [1] SHI B, LIU Z B, CAI Y, et al. Micropore structure of aggregates in treated soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(1): 99-104.
- [2] HAYDU-HOUDESHELL C A, GRAHAM R C, HENDRIX P F, et al. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California[J]. Geoderma, 2018, 310: 201-208.
- [3] DE OLIVEIRA KÜHN V, DE CARVALHO FARIA LIMA LOPES B, CAICEDO B, et al. Micro-structural and volumetric behaviour of bimodal artificial soils with aggregates[J]. Engineering Geology, 2021, 288: 106139.
- [4] 孙银磊, 汤连生, 刘洁. 非饱和土微观结构与粒间吸力的研究进展[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1095-1122.
- [5] 郑军, 阎长虹, 夏文俊, 等. 盱眙黏土团粒大小对填料水稳性影响试验[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(4): 412-415, 437.

(下转第 1131 页)

4 结 论

本文以深厚软土地区的狭窄基坑施工为背景,根据极限平衡思想,考虑了坑内土体的抗剪强度,对基于 Prandtl 计算式的抗隆起稳定系数 K_b 进行了修正推导,并结合强度折减法对 K_b 的影响因素进行分析,可得出:

1) 本文在考虑坑内土体抗剪强度后,依据狭窄基坑尺寸和地层土性划分了具有不同滑裂面破坏形式的基坑类型,并推导了坑内土体抗力 t 和修正系数 N_t ,提出了改进的 K_b 的计算方法。

2) 本文推导的 K_b 可以反映当基坑宽度 B 减小时,抗隆起稳定性增加的宽度效应,当 B 增大时与现行规范趋同,有较好的工程使用价值。

3) 本文基于狭窄基坑施工推导的 K_b 公式可应用于抗隆起稳定性的计算分析中,但本文推导过程中存在假定,还需进一步验证和完善。

[参 考 文 献]

- [1] 黄茂松,王卫东,郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报,2012,45(6):146-161.
- [2] 郑刚,程雪松. 考虑弧长和法向应力修正的基坑抗隆起稳定计算方法[J]. 岩土工程学报,2012,34(5):781-789.
- [3] 黄茂松,宋晓宇,秦会来. K_0 固结黏土基坑抗隆起稳定性

上限分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(2):250-255.

- [4] 岳云鹏,黄亚宁,刘晓玉,等. 基于强度折减法的深厚淤泥区基坑抗隆起稳定性研究[J]. 建筑结构,2019,49(增刊 2):933-937.
- [5] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley,1943:265.
- [6] 汪炳鉴,夏明耀. 地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J]. 岩土工程学报,1983,5(3):103-114.
- [7] 阳吉宝. 窄基坑抗隆起稳定性安全系数计算新方法[J]. 建筑结构,2021,5(增刊 2):1504-1508.
- [8] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程:JGJ120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:1-81.
- [9] 华东建筑设计研究院有限公司. 基坑工程技术标准:DG/TJ 08-61—2018[S]. 上海:同济大学出版社,2018:1-161.
- [10] 王洪新. 对基坑抗隆起稳定安全系数的改进[J]. 岩土力学,2014,35(增刊 2):30-36.
- [11] 童磊,刘兴旺,袁静,等. 深厚软弱土基坑墙底抗隆起稳定性验算的探讨[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊 2):707-711.
- [12] 阳吉宝,黄星. 软土地区基坑墙底抗隆起稳定性 Prandtl 计算式的改进[J]. 工程地质学报,2023,31(1):341-349.
- [13] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2020:293-307.
- [14] 侯晓亮,谭晓慧. 基于强度折减法的软土基坑抗隆起稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(2):524-529.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1065 页)

- [6] 谈云志,占少虎,沈克军,等. 处治红黏土团粒的表层硬化与粒间胶结效应[J]. 岩土力学,2021,42(2):361-368.
- [7] 谈云志,郑爱,吴翩,等. 红黏土承载比的土团尺寸效应研究[J]. 岩土力学,2013,34(5):1242-1246.
- [8] WANG Y J, CUI Y J, TANG A M, et al. Effects of aggregate size on the compressibility and air permeability of lime-treated fine-grained soil[J]. Engineering Geology, 2017, 228: 167-172.
- [9] WANG Y J, CUI Y J, TANG A M, et al. Effects of aggregate size on water retention capacity and microstructure of lime-treated silty soil[J]. Geotechnique Letters, 2015, 5(4): 269-274.
- [10] WANG Y J, DU C M, CUI Y J, et al. Aggregate size effect on the development of cementitious compounds in a lime-treated soil during curing[J]. Applied Clay Science, 2017, 136: 58-66.
- [11] YING Z, CUI Y J, BENAHMED N, et al. Changes in microstructure and water retention property of a lime-treated saline soil during curing [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(1): 319-326.
- [12] SHI B, LIU Z B, CAI Y, et al. Micropore structure of aggregates in treated soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(1): 99-104.
- [13] KAVAK A, AKYARLI A. A field application for lime stabili-

zation[J]. Environmental Geology, 2007, 51(6): 987-997.

- [14] HORPIBULSUK S, RACHAN R, CHINKULKIJNIWAT A, et al. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10): 2011-2021.
- [15] BOZBEY I, GARAISAYEV S. Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay[J]. Environmental Geology, 2010, 60(6): 1137-1151.
- [16] 谈云志,胡焱,占少虎,等. 处治红黏土水-力性能的团粒尺寸效应[J]. 岩土工程学报,2021,43(12):2323-2329.
- [17] 方中明,张瑞坤,石名磊. 石灰铁尾矿砂稳定土工程特性研究[J]. 公路工程,2021,46(3):142-148.
- [18] JIANG N J, DU Y J, LIU S Y, et al. Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical, and microstructural properties of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3): 373-383.
- [19] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007:271-275.
- [20] 周葆春,孔令伟,郭爱国. 石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J]. 岩土力学,2012,33(4):999-1005.

(责任编辑 张淑艳)