

文章编号:1007-9629(2024)03-0237-08

团聚体级配对固废改良膨胀土耐久性的影响

储诚富*, 王雨航, 宗文强

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:通过工业固废改良膨胀土团聚体的搅拌破碎试验以及破碎土的耐久性试验,揭示了团聚体尺寸效应对改良效果的影响,并分析了其影响机理.结果表明:掺入铁尾矿砂和电石渣能加速土团聚体在搅拌过程中的破碎;大粒径团聚体内部膨胀土的改良效果较差,容易产生裂隙;粒径大于 15 mm 的团聚体含量越高,试样的耐久性越差;相对于电石渣改良土,复合改良土的耐久性更好;对于应用于底基层的电石渣改良土和复合改良土,建议控制粒径大于 15 mm 土团聚体的含量分别小于 2.5% 和 21.8%.

关键词:膨胀土改良;团聚体;尺寸效应;工业固废;干湿循环

中图分类号:TU443

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.007

Effect of Aggregate Grading on Durability of Expansive Soil Modified by Solid Waste

CHU Chengfu*, WANG Yuhang, ZONG Wenqiang

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

Abstract: The influence of aggregate size effect on the improvement effect was revealed through the stirring and crushing test of expansive soil aggregates improved by industrial waste slag and the durability test of crushed soil, and the influence mechanism was analyzed. The results show that adding iron tailings sand and calcium carbide slag can accelerate the crushing of aggregates in the agitation process. The improvement effect of soil inside large particle size aggregates is poor, and cracks are prone to occur. The higher the content of aggregates larger than 15 mm, the poorer the durability of the samples. Compared with soil modified by calcium carbide slag, composite modified soil has better durability. For soil improved by calcium carbide slag and composite improved soil applied to the subbase layer, it is recommended to control the content of soil aggregates larger than 15 mm to be less than 2.5% and 21.8% respectively.

Key words: expansive soil modification; aggregate; size effect; industrial solid waste; drying-wetting cycle

黏性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^[1].团聚体粒径是影响黏性土改性效果的重要因素.谈云志等^[2-3]在对红黏土进行改良时发现,随着团聚体粒径的增大,改良土的无侧限抗压强度降低,膨胀率先减小后增大.Wang等^[4-6]研究了团聚体最大粒径(D_{max})对石灰改良土的影响,发现用较小团聚

体制备试样中石灰的分布更好,能产生更多的胶结产物,从而具有较高的保水性. Shi等^[7]研究发现,石灰主要集中在孔隙或团聚体表面,对粒径为 5~10 mm 的团聚体内部的影响较小. JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中规定,对于石灰工业固废类改良土,土颗粒的最大粒径应不大于 15 mm,而在工程实际当中,即使是采用厂拌法搅拌,

收稿日期:2023-04-30; 修订日期:2023-06-27

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)

第一作者(通讯作者):储诚富(1975—),男,安徽潜山人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: chuchengfu@hfut.edu.cn

也无法保证膨胀土团聚体的粒径全部小于15 mm. 研究发现,在同等条件下,现场改良土和实验室内改良土的承载比^[8]、强度^[9]和导水性^[10]存在显著的差异.导致这种差异的原因可能是,室内试验通常会将膨胀土团聚体破碎到5 mm以下,忽略了团聚体的尺寸效应对改良效果的影响.正如Tang等^[11]所说,根据实验室试验确定的参数来设计土方工程可能会产生误导.

改良膨胀土(后文均称改良土)的耐久性试验通常包括干湿循环、冻融循环和侵蚀试验等.膨胀土由于富含大量亲水性黏土矿物,极易因水分的变化而发生反复的胀缩变形,特别是江淮地区的膨胀土,其膨胀土路基、边坡等受干燥和湿润气候的交替影响巨大.因此,本文耐久性试验考虑为干湿循环试验.铁尾矿砂通常被用作细骨料来制备地聚物砂浆或其他低强度材料,具有良好的应用前景^[12-13].大宗工业固废电石渣具有较高的碱性,用其制备的凝胶材料也具有较高强度^[14].

本文利用铁尾矿砂和电石渣来改良膨胀土,通

过室内搅拌试验来模拟现场改良土的搅拌,对不同搅拌时间下的改良土进行耐久性测试,揭示团聚体尺寸效应对改良效果的影响,以期工业固废类材料应用于膨胀土基础工程提供一定的参考.

1 试验

1.1 试验材料

膨胀土取自安徽省合肥市某建筑工地,颜色呈黄褐色,其物理性能见表1.铁尾矿砂和电石渣的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、含量、含水率等除特别说明外均为质量分数)见表2.铁尾矿砂取自安徽省庐江县某尾矿库,是经过铁矿石磨细、提取有效组分后排放的固体废弃物,颜色呈灰黑色,质地坚硬,其主要成分为结构稳定的脉石矿物,如石英、角闪石、方解石和辉石等.该铁尾矿砂属于高硅型尾矿,在天然状态下不具有活性和水硬性,其颗粒粒径(d)分布见表3.电石渣购自河南郑州市某材料厂,呈灰白色粉末状,粒度较小,比表面积大,Ca含量高,易溶于水,具有强碱性.

表1 膨胀土的物理性能

Table 1 Physical properties of expansive soil

Relative density	Liquid limit(by mass)/%	Plastic limit(by mass)/%	Plasticity index	Free swelling rate/%	Optimum moisture content(by mass)/%	Maximum dry density/(g·cm ⁻³)
2.72	41.3	21.2	20.1	50.0	13.8	1.89

表2 铁尾矿砂和电石渣的化学组成

Table 2 Chemical compositions (by mass) of iron tailings sand and calcium carbide slag

Unit: %

Material	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
Iron tailings sand	65.62	3.08	5.32	15.72	5.74	0.71
Calcium carbide slag	1.07	68.98	1.98	0.46	0.54	0.32

表3 铁尾矿砂和电石渣的粒径分布

Table 3 Particle size distributions (by mass) of iron tailings sand and calcium carbide slag

Unit: %

Particle size range	$d > 2$ mm	$1 < d \leq 2$ mm	$0.5 < d \leq 1$ mm	$0.25 < d \leq 0.5$ mm	$0.075 \leq d \leq 0.25$ mm	< 0.075 mm
Iron tailings sand	0.56	3.48	13.54	24.38	50.26	7.78
Calcium carbide slag			0.15	0.31	36.32	63.22

1.2 试验内容

1.2.1 破碎试验

由于受到搅拌机规格的限制,本试验只进行粒径为30~40 mm团块的破碎试验.试验前测定土团块的初始含水率为18.2%.称取450 g素土团块,掺入砂土干质量比(α_{ITS})为0%、10%、20%、30%、40%和50%的铁尾矿砂进行铁尾矿砂改良土的破碎,复合改良土的破碎是在铁尾矿砂改良土的基础上加掺10%(电石渣与砂土混合料干质量比)的电石渣.以

高于各配比下最优含水率(见图1)3%的含水率来补充水量.配料结束后,密封闷料24 h,随后倒入FY-681型水泥胶砂搅拌机中搅拌.该搅拌机的规格符合规范JC/T 681—2005《行星式水泥胶砂搅拌机》的规定,公转速率为(62±5) r/min,自转速率为(140±5) r/min.经过不同搅拌时间后筛分,得到颗粒的粒径分布.

1.2.2 干湿循环试验

用于干湿循环试验的土料为破碎试验中单掺

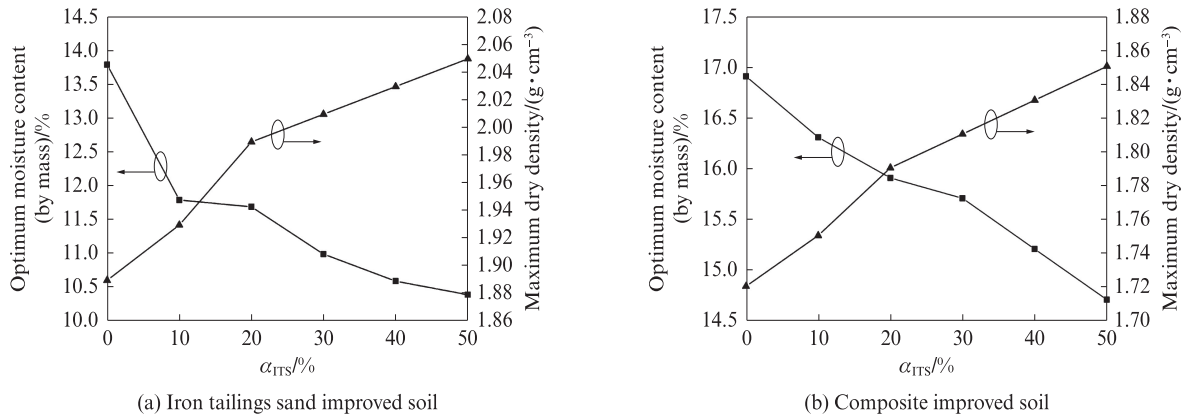


图1 改良土的最优含水率与最大干密度

Fig. 1 Optimum moisture content and maximum dry density of improved soil

10%的电石渣(电石渣改良土)以及掺30%的铁尾矿砂和10%的电石渣(复合改良土)分别在搅拌10、20、50、90 s后的破碎土料.采用静压法制成压实度为95%的圆柱试样($\phi 100 \times 100$ mm),养护龄期为7、14 d,养护的最后1 d浸水饱和.干湿循环过程按照规范 ASTM D4843-88 *Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes* 进行:在60 °C烘箱内干燥23 h,取出后室温(25 °C)静置1 h,随后在水箱内浸水23 h,取出后室温静置1 h.每次干燥/湿化后用精度为0.02 mm的游标卡尺测量试样的直径与高度(将3个不同方向3次测量值的平均值作为实际测量值),计算其体积,并称重.经过0、1、3、5、7次循环后测定试样的无侧限抗压强度(f_{UCS}).

1.2.3 微观试验

无侧限抗压强度试验结束后,从14 d养护龄期、搅拌10 s的复合改良土试样中分别筛出1个粒径为30~40、10~15 mm的改良土团聚体,将其分为表层、过渡区和中心3个层位(如图2所示,层厚不固定,且与土团聚体粒径有关).随后,将改良土团聚体放在

冻干机中冻干,使其内部的水分升华.最后,在3个层位中分别取出1个边长约为5 mm的扁平块状土样,经过喷碳处理后使用Tescan MIRA3型热场发射扫描电镜(SEM)观察其微观形貌.

2 结果与分析

2.1 破碎试验

图3为改良土团聚体破碎过程中粒径小于2 mm的颗粒含量($W_{0-2\text{mm}}$)的变化.由图3可见:对于铁尾矿砂改良土,在不同 α_{IRS} 下, $W_{0-2\text{mm}}$ 随搅拌时间的变化差别不大;对于复合改良土,复掺电石渣时, $W_{0-2\text{mm}}$ 的增加要更快一点.这说明只掺入铁尾矿砂对土团聚体在搅拌过程中 $W_{0-2\text{mm}}$ 的增加影响不大,而同时掺入铁尾矿砂和电石渣有利于 $W_{0-2\text{mm}}$ 的增加.铁尾矿砂的粒径范围为0~2 mm,可以认为,在相同搅拌时间下, $W_{0-2\text{mm}}$ 主要由铁尾矿砂的掺量决定(即人为砂化).因此,为了最大程度减小由于掺入铁尾矿砂对土进行的人为砂化的影响,可以去除0~2 mm的颗粒,再对其他粒径的颗粒进行整体分析,处理结果如图4所示.

从图4可见:掺入铁尾矿砂后,粒径大于15 mm的颗粒含量($W_{>15\text{mm}}$)均在减少;当 α_{IRS} 为40%和50%时,搅拌120 s后团聚体的粒径均小于15 mm;当 α_{IRS} 为10%、20%和30%时,需搅拌150 s后团聚体的粒径才小于15 mm;在不掺铁尾矿砂的情况下,在搅拌150 s后 $W_{>15\text{mm}}$ 仍有3.2%.因此,掺入铁尾矿砂对土团聚体的搅拌破碎程度有一定的增强作用,能缩短破碎时间.相对于只掺铁尾矿砂的情况,同时掺入电石渣和铁尾矿砂能显著降低 $W_{>15\text{mm}}$,并且破碎程度随着 α_{IRS} 的增加而增大.铁尾矿砂为团聚体提供较大的摩擦阻力,加速团聚体表面颗粒的脱落,因此团聚体的粒径减小.向膨胀土中添加电石渣会降低土的含水率,同时形成的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 与黏土颗粒中的 Na^{+} 、

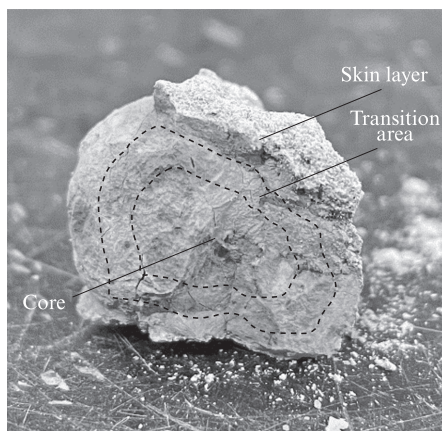
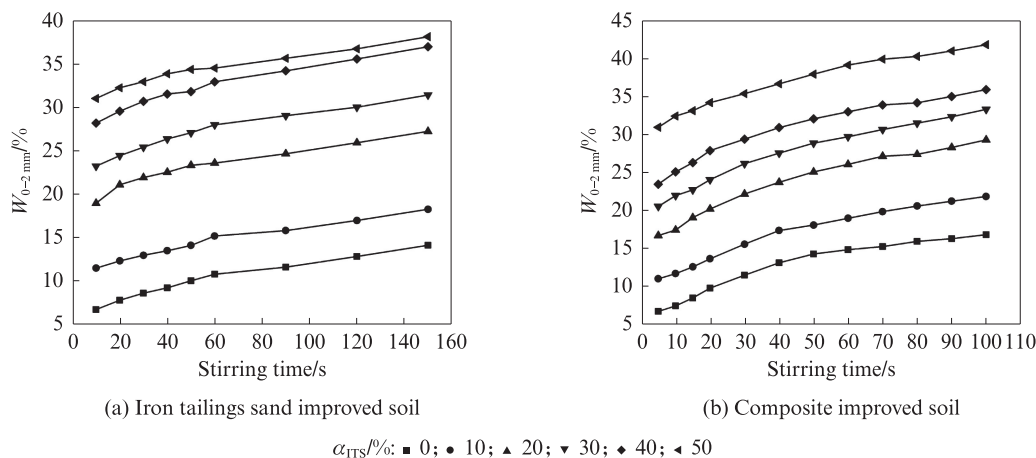
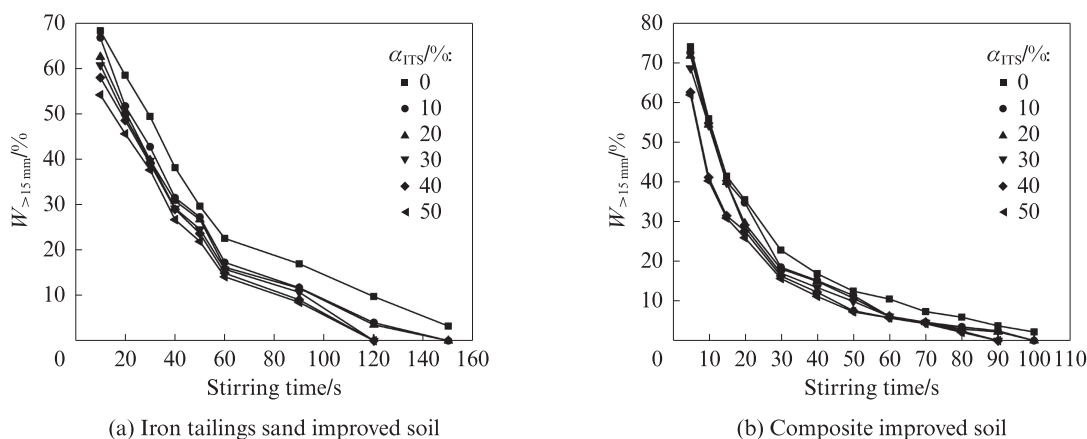


图2 改良土团聚体的3个观察层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three observation layers of the improved soil aggregate

图3 破碎试验过程中粒径小于2 mm的颗粒含量($W_{0-2\text{mm}}$)的变化Fig. 3 Changes of $W_{0-2\text{mm}}$ in the crushing test图4 破碎试验过程中粒径大于15 mm的颗粒含量($W_{>15\text{mm}}$)的变化(去除小于2 mm的颗粒)Fig. 4 Changes of $W_{>15\text{mm}}$ in the crushing test (remove particles smaller than 2 mm)

K^+ 发生离子交换反应,从而改变了黏土颗粒表面的双电子层结构,使其亲水性降低,黏性下降^[15-16],在与铁尾矿砂和其他土团聚体搅拌摩擦的过程中脱离,形成小粒径团聚体。

2.2 吸水率

不同搅拌时间下改良土颗粒的粒径分布如表3所示.表中“D”表示电石渣改良土,“F”表示复合改良土,下标表示搅拌时间,例如“D_{10s}”表示搅拌时间为10 s的电石渣改良土。

引入吸水率(w)来描述改良土的吸水性:

$$w = \frac{M_i - m_i}{m_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: i 为干湿循环次数,次; M_i 为第 i 次湿化后的试样质量,g; m_i 为第 i 次干燥后的试样质量,g。

图5为不同搅拌时间下改良土的吸水率随干湿循环次数的变化.由图5可见:土样中大粒径团聚体的含量越低,改良土的吸水率就越低,并且复合改良土的吸水率要小于电石渣改良土的;试样中大粒径团聚体的含量越高,火山灰反应就越弱,改良效果就

表3 改良土颗粒的粒径分布

Table 3 Particle size distributions (by mass) of improved soils

Unit: %

Sample	Partical size/mm						
	2	5	10	15	20	30	40
D _{10s}	5.99	18.55	33.68	48.07	64.64	95.10	100.00
D _{20s}	8.83	26.16	48.52	69.84	88.39	96.00	100.00
D _{50s}	14.12	38.67	70.51	89.34	100.00		
D _{90s}	17.03	44.68	82.02	97.50	100.00		
F _{10s}	21.99	30.18	42.05	57.70	69.92	90.34	100.00
F _{20s}	24.68	38.46	57.37	78.20	89.66	97.41	100.00
F _{50s}	28.86	47.14	74.35	93.13	100.00		
F _{90s}	32.48	53.39	84.52	98.62	100.00		

越差,因此土样的吸水性更高.试样吸水率的增大是因为土体内部产生了较多的裂隙,为水分提供了空间.因此,吸水率的变化也能从侧面反应出试样在干湿循环过程中内部孔隙的变化.大粒径团聚体的含量越高,首先试样内部的孔隙越大,其次试样也越容易受到干湿循环的作用而产生裂隙,这些都为水分

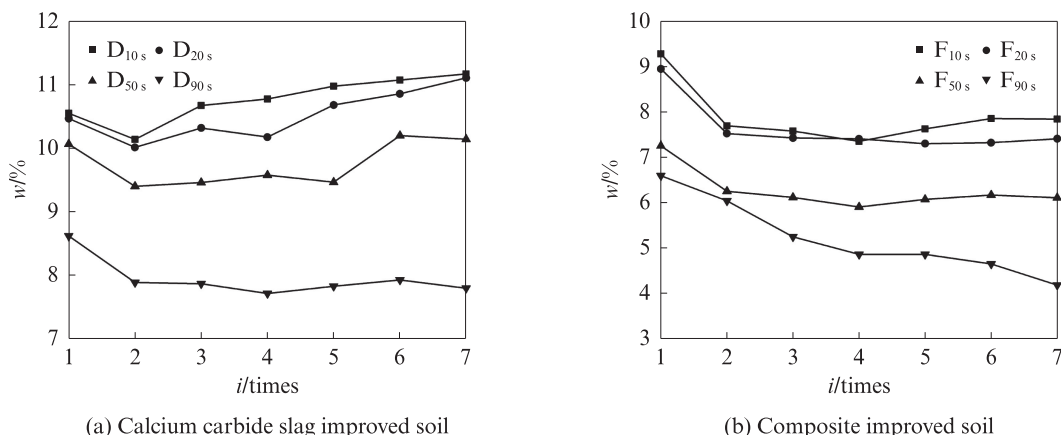


图5 不同搅拌时间下的改良土的吸水率随干湿循环次数的变化

Fig. 5 Change of water absorption of improved soil under different stirring time during drying-wetting cycles

的存储提供了空间,因此表现为吸水率增大.而掺入铁尾矿砂相当于以吸水性较差的砂颗粒置换部分吸水性较好的黏土颗粒,并且填充于团聚体之间的孔隙,同时复合改良土的团聚体粒径相对较小,改良效果更好,因此相同搅拌时间下的复合改良土的吸水率要小于电石渣改良土.

2.3 胀缩性

引用相对体积变化率(δ_v)来描述改良土在干湿循环过程中的胀缩性:

$$\delta_v = \frac{v_{a_i} - v_{b_i}}{v_{b_i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: v_{a_i} 为第*i*次干燥/湿化后的试样体积, cm^3 ; v_{b_i} 为第*i*次干燥/湿化前试样的体积, cm^3 .

以试样浸水饱和后的体积为初始体积,第1次干燥产生的体积收缩率为第1次干燥后的试样体积与初始体积之比.图6为不同搅拌时间电石渣改良土在干湿循环作用下的相对体积变化率.其中,实线表示试样湿化后的相对体积变化率,虚线表示试样干燥后的相对

体积变化率.由图6可见:电石渣改良土的相对体积变化率随着干湿循环次数的增加总体上呈现显著减小并逐渐趋于稳定的趋势;搅拌时间越长,试样的相对体积变化率越低,并且随着干湿循环次数的增加逐渐趋于缓和;大粒径团聚体的含量越高,土体内部的孔隙越大,结构越松散.同时,电石渣富集在团聚体表面,内部膨胀土的膨胀性未得到改善,在干湿循环过程中,试样内部更容易发生不均匀变形,产生收缩裂缝,从而出现体积膨胀率显著增大的现象.

图7为不同搅拌时间下的复合改良土在干湿循环作用下的体积变化率.从图7可以看出,复合改良土的相对体积变化率在干湿循环作用下的变化趋势与电石渣改良土的变化趋势相似.对比图6、7可知,在相同搅拌时间下,复合改良土的体积变化率要小于电石渣改良土,并且结构发生明显破坏时的体积膨胀率增幅要小于电石渣改良土.由此可知,相对于电石渣改良,复合改良方法能更有效地抑制膨胀土的胀缩性,显著提高改良土的耐久性.

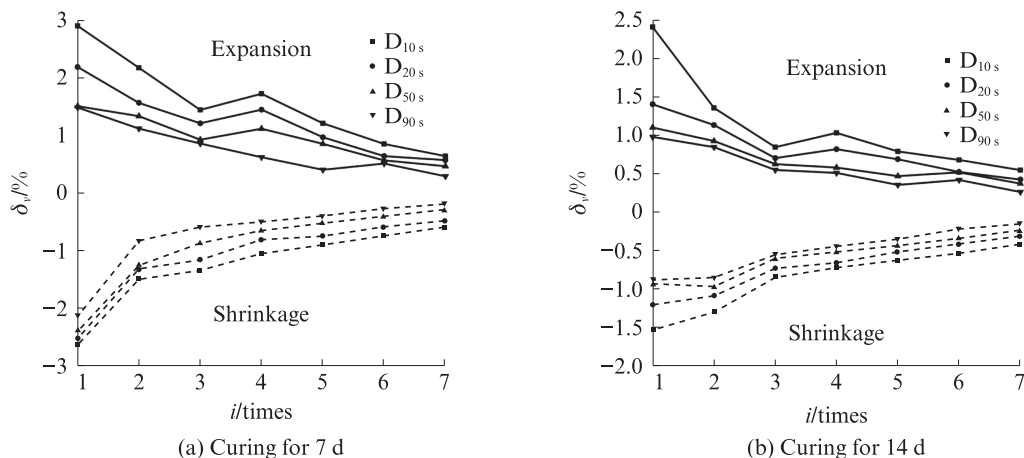


图6 不同搅拌时间电石渣改良土在干湿循环作用下的相对体积变化率

Fig. 6 Relative volume change rate of calcium carbide slag improved soil with different stirring time under drying-wetting cycles

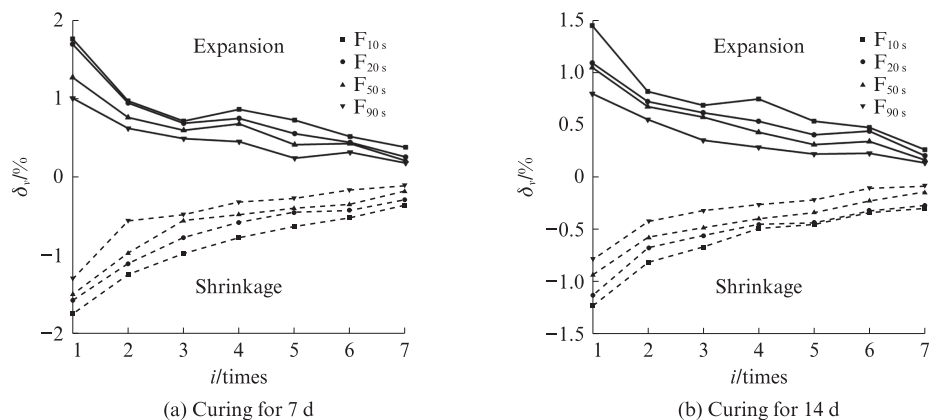


图7 不同搅拌时间下的复合改良土在干湿循环作用下的体积变化率

Fig. 7 Volume change rate of composite improved soil with different stirring time under drying-wetting cycles

2.4 无侧限抗压强度

工程上,石灰工业固废类改良土通常应用于底基层.图8为干湿循环作用下不同搅拌时间电石渣改良土无侧限抗压强度的变化.根据图8和JTG/T F20—2015中石灰工业固废类改良土的标准可知,除了试样 D_{90s} 的7 d饱和无侧限抗压强度大于0.8 MPa之外,试样 D_{10s} 、 D_{20s} 和 D_{50s} 的无侧限抗压强度均小于0.8 MPa,因此只有试样 D_{90s} 的强度满足极重、特重交

通高速公路和一级公路底基层的强度标准.

图9为干湿循环作用下不同搅拌时间复合改良土无侧限抗压强度的变化.由图9可知,除了试样 F_{10s} 的7 d无侧限抗压强度为0.75 MPa之外,其他试样的无侧限抗压强度均在0.8~1.1 MPa之间,满足极重、特重交通高速公路和一级公路底基层的强度标准.因此,在相同搅拌时间下,复合改良土的无侧限抗压强度要高于电石渣改良土.

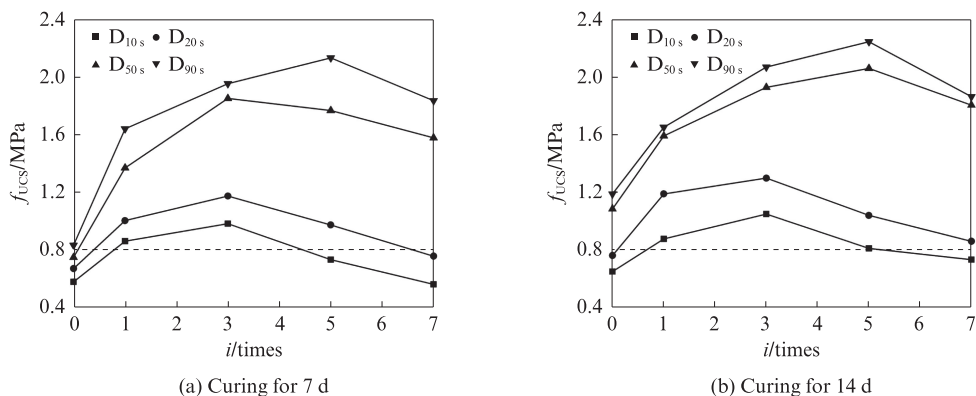


图8 干湿循环作用下不同搅拌时间电石渣改良土的无侧限抗压强度变化

Fig. 8 Change of unconfined compressive strength of calcium carbide slag improved soil with different stirring time under drying-wetting cycles

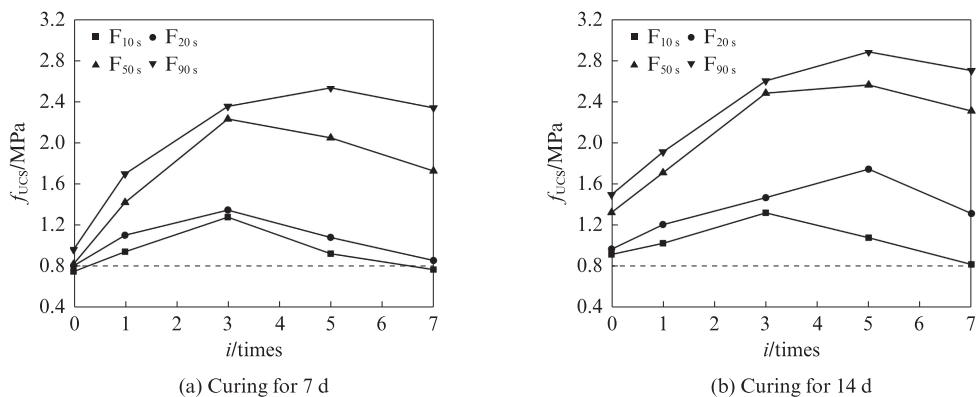


图9 干湿循环作用下不同搅拌时间复合改良土的无侧限抗压强度变化

Fig. 9 Change of unconfined compressive strength of composite improved soil with different stirring time under drying-wetting cycles

当土体中大粒径团聚体的含量较高时,试样内部的孔隙较大,土体的结构性较差,因此整体强度就低.随着干湿循环次数的增加,各改良土的无侧限抗压强度均呈现先增大后减小的趋势.试样的粒径大于15 mm的团聚体的含量越高,其强度峰值对应的干湿循环次数越小,破坏时的强度损失越高.干湿循环过程不仅增加了火山灰反应的时间,干燥时的升温又加快了反应速率,此时团聚体内部微裂隙发育造成的强度减小值要小于火山灰反应带来的强度增加值,因此土体强度会增加.经过多次干湿循环后,土体中产生了较多的裂隙,土体结构发生破坏,火山灰反应提供的强度增加值要小于土体结构破坏造成的强度减小值,强度不断减小,并且大粒径团聚体的含量越高,强度减小得更为明显.因此可以认为,大粒径团聚体含量越高的试样,其抵抗干湿循环作用的能力越弱.相对于电石渣改良土,复合改良土由于铁尾矿砂的掺入使试样的耐久性得到了明显的提升.

综上可得,为满足工程强度的要求,需要严格控制大粒径团聚体的含量.由表3的颗粒粒径分布数据可得,试样 D_{90s} 和 F_{20s} 中粒径大于15 mm的团聚体含量分别为2.5%和21.8%.因此,为达到高速公路和

一级公路底基层的最高强度标准0.8 MPa,对于电石渣改良土,建议控制粒径大于15 mm的团聚体含量小于2.5%,而掺入铁尾矿砂后,可以适当提高此含量,当铁尾矿砂掺量为30%时,粒径大于15 mm的团聚体含量可以控制在21.8%以下.

2.5 微观分析

图10为30~40 mm改良土团聚体3个区域经过1次干湿循环后的SEM图像.从图10中可以看出,30~40 mm改良土团聚体内部3个部位的微观结构存在显著的差异.电石渣水化后的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 在碱性环境下与黏土矿物中 Na^{+} 、 K^{+} 发生离子交换反应,使得黏土颗粒表面的双电层厚度变薄,土颗粒间距缩小^[17],因此在表层能看到大量电石渣与黏土矿物絮凝而成的粗粒结构,并且产生了少量呈放射状的胶结产物水化硅酸钙(C-S-H)^[18].过渡区呈现出膨胀土典型的片状和扁平状颗粒的组合结构,小孔隙发育.团聚体中心则呈现紊流结构,并发育少量的小孔隙及裂隙.

图11为10~15 mm改良土团聚体3个区域经过1次干湿循环后的SEM图像.从图11中可以看出,10~15 mm改良土团聚体内部3个区域的结构差异不大,表层电石渣分布更均匀,过渡区出现了大量

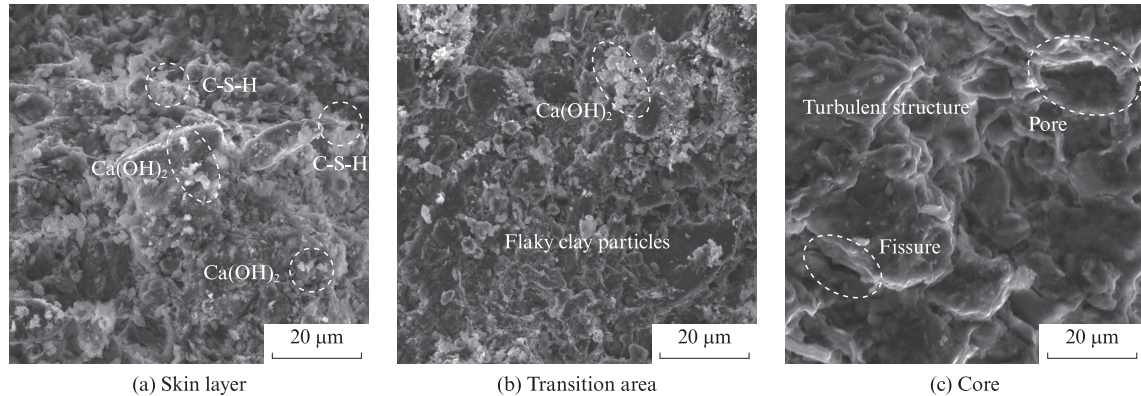


图10 30~40 mm改良土团聚体3个区域经过1次干湿循环后的SEM图像

Fig. 10 SEM images of three regions of 30~40 mm improved soil aggregate after 1 drying-wetting cycle

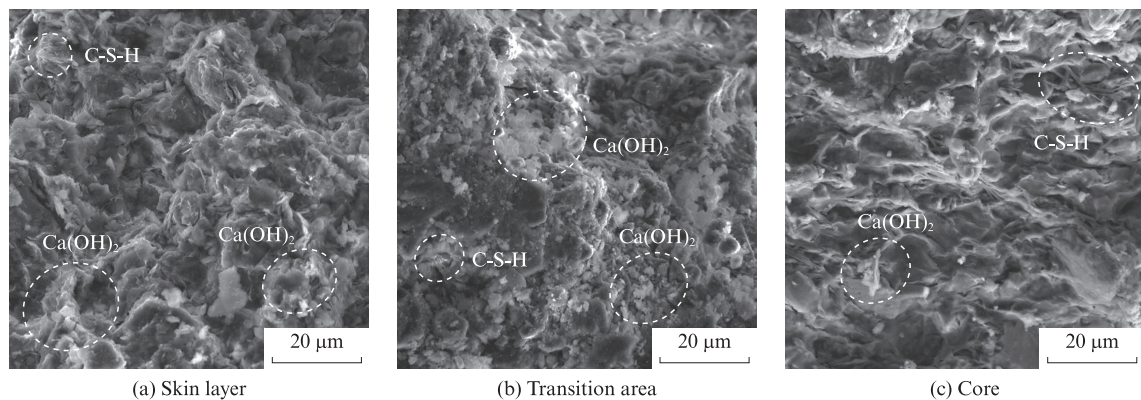


图11 10~15 mm改良土团聚体3个区域经过1次干湿循环后的SEM图像

Fig. 11 SEM images of three regions of 10~15 mm improved soil aggregate after 1 drying-wetting cycle

Ca(OH)₂晶体和少量胶结产物C-S-H,中心也有少量Ca(OH)₂晶体和呈针状的早期胶结产物C-S-H.因此,在相同条件下,大粒径团聚体内部的膨胀土改良效果较差,在干湿循环过程中易产生裂隙而对改良土耐久性的提高具有负面影响.

3 结论

(1)掺入铁尾矿砂和电石渣可以有效提高膨胀土团聚体的搅拌破碎效率,缩短破碎时间.

(2)搅拌时间越长,大粒径团聚体的含量越低,改良土的耐久性就越好.复合改良土的耐久性要优于电石渣改良土.建议电石渣改良土和复合改良土应用于工程中时,粒径大于15 mm的土团聚体含量分别控制在2.5%和21.8%以下.

(3)团聚体的粒径越大,改良效果越差,其内部不同位置的微观结构有明显差异.表层呈现颗粒絮凝的团聚结构;过渡区和中心则呈现膨胀土典型的片状和紊流结构,容易产生裂隙,从而对试样的耐久性造成负面影响.

参考文献:

- [1] 吴芝兰, 曲永新. 微团聚体分析在工程地质研究中的应用[J]. 工程地质学报, 1997, 5(3):282-288.
WU Zhilan, QU Yongxin. Application of microaggregate composition analysis to engineering geological research [J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(3): 282-288. (in Chinese)
- [2] 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.
TAN Yunzhi, HU Yan, ZHAN Shaohu, et al. Aggregate size effect on hydro-mechanical performances of treated laterite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2323-2329. (in Chinese)
- [3] 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.
TAN Yunzhi, ZHENG Ai, WU Pian, et al. Effect of aggregate soil size on California bearing ratio values of laterite soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5):1242-1246. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] WANG Y J, DUC 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.
- [7] 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.
- [8] KAVAK A, AKYARLI A. A field application for lime stabilization [J]. Environmental Geology, 2007, 51(6):987-997.
- [9] HORPIBULSUK S, RACHAN R, CHINKULKIWIWAT 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.
- [10] BOZBEY I, GARAIYAYEV S. Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(6):1137-1151.
- [11] TANG A M, VU M N, CUI Y J. Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil [J]. Géotechnique, 2011, 61(5):421-429.
- [12] 卢佳涛, 孔丽娟, 樊子瑞, 等. 铁尾矿砂-地聚物复合材料的界面与性能 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6):585-590.
LU Jiatao, KONG Lijuan, FAN Zirui, et al. Interface and performance of iron tailings-geopolymer composites [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):585-590. (in Chinese)
- [13] 刘云霄, 李晓光, 张春苗, 等. 铁尾矿砂水泥基灌浆料性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4):538-544.
LIU Yunxiao, LI Xiaoguang, ZHANG Chunmiao, et al. Properties of iron tailing sand and cement based grouting material [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 538-544. (in Chinese)
- [14] 安强, 潘慧敏, 赵庆新, 等. 碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):14-20.
AN Qiang, PAN Huimin, ZHAO Qingxin, et al. Properties of alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composites [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):14-20. (in Chinese)
- [15] 王保田, 武良金, 向文俊, 等. 改良膨胀土筑堤技术研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26(1):87-90.
WANG Baotian, WU Liangjin, XIANG Wenjun, et al. A study of construction of expressway embankment with modified soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1):87-90. (in Chinese)
- [16] JHA A K, SIVAPULLAIAH P V. Lime stabilization of soil: A physico-chemical and micro-mechanistic perspective [J]. Indian Geotechnical Journal, 2020, 50(3):339-347.
- [17] LIU Y Y, CHANG C W, NAMDAR A, et al. Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue [J]. Construction and Building Materials, 2019, 221:1-11.
- [18] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. Engineering Geology, 1996, 42(4):223-237.