

团聚体粒径对改良填料土路用性能的影响

罗安祁^{1,2}, 陈庚^{1,2}, 陈永辉^{1,2}, 孔纲强¹, 陈龙¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210024;

2. 河海大学 苏州高等研究院, 江苏 苏州 215100)

摘要: 高含水率废弃软土在改良过程中, 易出现大量直径远大于10 mm且难以过筛的团聚体, 严重制约了其作为填料资源的规模化、高效化利用。本文系统研究了在改良填料土中扩大团聚体粒径的可行性, 通过室内试验重点考察了团聚体粒径和固化剂掺量对改良填料土路用性能的影响, 并在此基础上推导出制备目标粒径团聚体的改良填料土所需固化剂的理论掺量计算公式, 为工程实践中改良填料土的配合比设计与优化提供了理论参考值。同时, 通过中试试验评估了废弃土填料化中试系统在实际工况下处理大批量废弃土料的运行效果与应用潜力。室内试验结果表明: 团聚体最大粒径的增大会对改良填料土的路用性能产生负面影响, 可通过控制固化剂掺量合理扩大团聚体最大粒径, 若将团聚体最大粒径扩大至25~30 mm, 固化剂掺量建议控制在4%左右, 更高固化剂掺量下, 团聚体最大粒径需控制在20 mm及以下; 根据所推导的公式计算得出, 在固化剂完全包裹土体的情况下, 团聚体最大粒径扩大至15、20、25、30 mm时所需固化剂的理论掺量分别为6.63%、5.87%、5.10%、4.13%, 与室内试验结果具有较高的一致性。中试试验结果表明: 填料化中试系统可以有效提升生产效率, 适用于处理现场大批量的废弃土料, 且其对较大粒径团聚体表现出更好的适用性; 虽然采用填料化中试系统对高含水率废弃软土进行二次掺灰拌合处理所得试样的CBR与回弹模量均低于通过人工拌合处理所得的试样, 但均满足规范要求。总之, 研究认为, 在满足路基填料指标的前提下, 对高含水率废弃软土进行二次掺灰拌合改良时, 适当放宽团聚体筛分粒径, 并结合理论计算优化固化剂掺量, 可以显著提高废弃软土的处治效率和土料的产能, 可为改良填料土在工程实际中的应用提供参考。

关键词: 改良填料土; 团聚体粒径; 高含水率废弃软土; 固化剂掺量; 路用性能

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0126-10

Effects of Aggregate Particle Size on the Pavement Performance of Improved Filler Soil

LUO Anqi^{1,2}, CHEN Geng^{1,2}, CHEN Yonghui^{1,2}, KONG Gangqiang¹, CHEN Long¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Suzhou Institute for Advanced Research of Hohai University, Suzhou 215100, Jiangsu China)

Abstract: In the context of sustainable civil infrastructure development, the reuse of waste soft soil with high moisture content as engineered fillers presents both environmental and economic advantages. However, critical technical challenges exist during the stabilization and modification processes of waste soft soil, i.e., a large number of soil aggregates with diameters much larger than 10 mm and difficult to sieve are prone to occur, thereby which

收稿日期: 2025-08-14

修回日期: 2025-11-12

接受日期: 2025-11-28

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3211000); 江苏省社科应用研究精品工程习近平生态文明思想研究专项课题(STA-19); 连云港水利局科技项目(HDJS-QJYJ)

作者简介: 罗安祁(2001-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废弃土资源化利用

通信作者: 陈庚(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为废弃土资源化利用, E-mail: yushan007@126.com

引用格式: 罗安祁, 陈庚, 陈永辉, 等. 团聚体粒径对改良填料土路用性能的影响[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 126-135.

Luo A Q, Chen G, Chen Y H, et al. Effects of aggregate particle size on the pavement performance of improved filler soil[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 126-135.

seriously hinders its large-scale and efficient application as a filling material resource. To overcome this limitation, this study investigated the feasibility of expanding the particle size of aggregates in improved filler soil during the modification process. A series of laboratory tests were carried out, including the unconfined compressive strength test, water stability test, California bearing ratio test, and resilient modulus test, to investigate the influence of soil aggregate particle size and curing agent dosage on the road performance of modified filler soil. Based on the experimental results, a calculation formula for the theoretical dosage of curing agent required for the preparation of improved filler soil with the target particle size aggregates was derived, which provided theoretical reference values for the mix proportion design and optimization of modified filler soil in engineering applications. At the same time, pilot tests were conducted to simulate the on-site conversion of a large amount of waste soft soil into modified filler soil under actual working conditions, and the operation effect and application potential for the filler pilot system were evaluated. The laboratory test results indicate that the increase in the maximum particle size of the aggregate will have a negative impact on the road performance of the improved filler soil. To ensure the road performance of improved filler soil, the maximum particle size of aggregate can be appropriately expanded by controlling the dosage of curing agent. If the maximum particle size of the aggregate is expanded to 25–30 mm, the dosage of curing agent is recommended to be controlled at about 4%. Under higher dosage of curing agent, the maximum particle size of aggregate should be controlled at 20 mm below. According to the derived formula, it is calculated that when the soil was completely wrapped by the curing agent, the theoretical dosage of the curing agent required when the maximum particle size of the aggregate is expanded to 15, 20, 25, and 30 mm is 6.63%, 5.87%, 5.10%, and 4.13% respectively. These values exhibit a high degree of consistency with the results obtained from laboratory test. The pilot test results demonstrate that the filler pilot system can effectively improve the production efficiency and is suitable for handling large quantities of waste soil materials on site, exhibiting better adaptability for larger particle size aggregates. Although samples produced via secondary lime mixing treatment of waste soft soil with high moisture content using the filler pilot system show lower CBR and rebound modulus values than those produced by manual mixing treatment, they can all satisfy the specification requirements. In conclusion, the study suggests that when improving waste soft soil with high moisture content through secondary lime mixing under the premise of meeting the specifications of subgrade fill materials, appropriately relaxing the particle size of aggregates sieving and optimizing the dosage of curing agent in combination with theoretical calculation can significantly enhance the treatment efficiency of waste soft soil and the production capacity of soil materials, which can provide a reference for the application of improved fill soil in engineering practice.

Key words: improved filler soil; particle size of aggregate; waste soft soil with high moisture content; dosage of curing agent; pavement performance

0 引言

高含水率软土在我国广泛分布,其具有压缩性大、工程性质差等特点,若施工时直接采用高含水率软土作为路基填料,会导致路基稳定性不良、后期沉降大等问题^[1-2]。工程建设中多采用换填处理方式解决此问题,但是会产生大量废弃软土,若不能妥善处置这些废弃软土,不仅会占用土地资源,还会污染环境^[3]。废弃软土填料化改良不仅有助于消纳大量废弃软土,还可以解决工程建设中路基填料日益短缺的困境,同时还能降低生产成本,具有良好的社会效益^[4-5]。

目前,国内外众多学者对于改良填料土路用性能的研究已取得丰富的成果。Lu等^[6]通过击实、压缩等试验得出,随着水泥或石灰掺量的增加,改良粉土的最优含水率上升,最大干密度下降,压缩性呈线性降低趋势。张华^[7]采用掺砂法改良富水地层盾构渣土,降低了其界限含水率,且研究指出改良后的盾构渣土的加州承载比(California Bearing Ratio, CBR)值虽小但仍满足规范要求,现场试验证实改良后路床顶面回弹模量达64 MPa,符合规范要求。孙浩等^[8]的研究表明,分别采用水泥(掺量为4%)、石灰(掺量为4%)、砂(掺量为5%)改良的建筑渣土的路用性能可显著提升。金茂祥和黄志坚^[9]在废弃淤泥中添加

适量水泥和石灰后发现,废弃泥浆固化土的压实度可达96%以上,CBR值为9%~10%,且其在干湿循环效应下的强度逐渐稳定,回弹模量满足设计要求,适用于一级公路路基。另有研究表明,改良填料土团聚体粒径对其各项性能有显著影响。储诚富等^[10]利用铁尾矿砂和电石渣对膨胀土进行改良,并分析了团聚体尺寸效应对改良土性能的影响,结果发现复合改良土比单一电石渣改良土表现出更好的耐久性和更低的吸水率,且严格控制大粒径团聚体的含量有助于进一步提高膨胀土的性能。谈云志等^[11]通过室内试验发现,掺入偏高岭土能增强石灰处治红黏土的水-力性能,且团粒尺寸对其水-力性能有显著影响。Tang等^[12]分析了团聚体粒径对石灰改良黏土刚度的影响,结果发现石灰改良黏土的刚度随团聚体粒径的增大而降低。Wang等^[13-14]又在此基础上发现石灰改良细粒土的压缩性以及石灰改良密实粉土的保水性均随着团聚体最大粒径的减小而增大。蔡奕等^[15]探讨团聚体大小对填筑土强度的影响时发现,当团聚体的平均粒径<3.5 mm时,随团聚体直径的增大,素土、纤维土和石灰土的黏聚力降低、内摩擦角增大,当团聚体的平均粒径>3.5 mm时,随团聚体直径的增大,素土和石灰土的黏聚力增大、内摩擦角减小,而纤维土的黏聚力和内摩擦角未发生明显变化。王雨航^[16]探究了团聚体粒径对工业废渣改良膨胀土的强度与水稳性的影响,研究结果显示,改良土的强度和水稳性均随团聚体粒径的增大而降低,工程建设中需严格控制大粒径团聚体含量以保障工程性能。总结以上研究成果可知,现有研究大多是在室内进行的,且试验时设置的团聚体粒径集中在0.5~10 mm范围内,而高含水率软土填料化改良时,其团聚体粒径远大于10 mm,且施工现场改良土经搅拌破碎后的团聚体粒径一般在0.5~30 mm。因此,根据室内试验确定的参数来指导工程实际可能会产生较大误差,如何在保证改良土路用性能的前提下,优选合适的团聚体最大控制粒径,以提高改良填料土的路用性能和生产效率,是当前亟需开展的一项研究。

鉴于此,本文采用二次掺灰法对高含水率废弃软土进行改良,通过室内试验和中试试验研究了团聚体粒径和固化剂掺量对改良填料土路用性能的影响,并推导出固化剂理论掺量计算公式,以期为实际工程应用提供参考。

1 室内试验材料及方案

1.1 试验材料

1.1.1 试验土样

试验用土为浙江省绍兴市的废弃软土,为低液限黏土,其基本物理性质见表1。

表1 试验用土的物理性质	
Tab.1 Physical properties of the soil used for test	
物理指标	数值
初始含水率/%	44
液限/%	42.9
塑限/%	20.0
塑性指数	23
最优含水率/%	16.0
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.65
土粒相对密度	2.67

1.1.2 固化材料

试验所用石灰为南京远令化工有限公司生产的Ⅱ级石灰,水泥为诸城市杨春水泥公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥。

1.2 试验方案

1.2.1 改良填料土试样的制备

模拟二次掺灰工艺^[17-18],制备不同团聚体最大粒径及不同水泥掺量的改良填料土试样(包括室内试验试样和中试试验试样),具体操作如下:首先在废弃软土内掺加2%的石灰(石灰掺量为石灰质量与石灰土土样质量的比值),混合均匀置于20℃阴凉处,待其含水率降至最优含水率(16%)后,利用废弃土填料化试验系统对所得土料进行统一破碎,控制破碎时团聚体最大粒径分别为15、20、25、30 mm,即可得到石灰土土样;然后向每种粒径尺寸石灰土土样中分别掺加2%、4%、6%、8%的水泥(水泥掺量为水泥质量与二次掺灰后土样质量的比值),人工拌合均匀后,使用静压法制得直径为50 mm、高为50 mm的圆柱体改良填料土试样,将这种由人工拌合方法制得的试样按照一定条件进行养护,并用于后续室内试验;同时,利用废弃土填料化中试试验系统向石灰土土样中掺加4%水泥进行二次掺灰拌合,使用静压法制得直径为50 mm、高为50 mm的圆柱体改良填料土试样,将这种由废弃土填料化中试试验系统拌合制得的试样按照一定条件进行养护,并用于后续中试试验。

1.2.2 具体试验

无侧限抗压强度试验:将制备的圆柱体改良填料土试样置于标准养护箱(20℃,95%湿度)内养护7 d,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),采用YSH-2型无侧限压力仪测定试样的无侧限抗压强度,剪切速率为1 mm/min,当应力表达达到峰值后或剪切至试样轴向应变的15%时结束试验。应变每变化0.5%,记录对应应力。

水稳定性试验:参照《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)规定,先将制备的圆柱体改良填料土试样在标准养护箱(20℃,95%湿度)内养护6 d,并在养护结束后浸水1 d,然后再进行无侧限抗压强度试验。

加州承载比试验:先将制备的圆柱体改良填料土试样在标准养护箱(20℃,95%湿度)内养护3 d,浸水4 d后采用承载比测定仪进行贯入试验,以1 mm/min的速率加载,当贯入量达到10~12.5 mm时即可终止试验。

回弹模量试验:先将制备的圆柱体改良填料土试样在标准养护箱(20℃,95%湿度)内养护7 d,然后使用杠杆压力仪进行回弹模量试验,依次施加5级荷载(20%、40%、60%、80%、100%最大压力),加卸载1 min后读数并记录。

2 室内试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

图1为不同工况下各试样的7 d无侧限抗压强度。整体可以看出,各试样的无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增大,随团聚体最大粒径的增大而减小。相同水泥掺量下,试样的团聚体最大粒径较大时,较大粒径颗粒会被水泥干粉完全包裹,甚至会存在水泥干粉多余的情况,而对于团聚体最大粒径较小的试样而言,由于其比表面积更大,可以保证更多的水泥干粉与土团颗粒均匀拌合,水化反应得到充分发挥,因此相比之下,团聚体最大粒径较小的试

样的强度更高。此外,大粒径团聚体内部难以被固化剂充分渗透,导致胶结反应仅限于表面,内部结构松散,团聚体在受压时易形成局部应力集中点,引发裂隙扩展;而小粒径团聚体会通过更均匀的力链网络分散应力。

为量化分析因团聚体尺寸带来的强度差别,提出式(1)对强度降幅进行归一化处理。

$$D_{U_i}^n = \frac{U_{15}^n - U_i^n}{U_{15}^n} \times 100\%, \tag{1}$$

式中: $D_{U_i}^n$ 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 i mm试样相对于团聚体最大粒径为15 mm试样的无侧限抗压强度降幅($i=20,25,30$); U_{15}^n 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为15 mm试样的无侧限抗压强度; U_i^n 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 i mm试样的无侧限抗压强度($i=20,25,30$)。

结合图1和式(1)计算各试样归一化处理后的强度降幅,计算结果如表2所示。对比发现, $D_{U_i}^n$ 越大,则强度降幅越大,即随着水泥掺量的增大,不同团聚体最大粒径试样的无侧限抗压强度降幅也随之增大;相同水泥掺量下,团聚体最大粒径越大,试样的强度降幅也越大。此外,在2%和4%低水泥掺量下,相较于团聚体最大粒径为15 mm的试样,团聚体

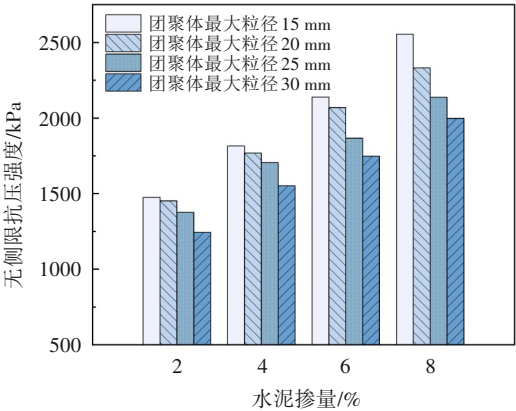


图1 不同工况下各试样的7 d无侧限抗压强度
Fig.1 7 d unconfined compressive strength of each sample under different operating conditions

表2 归一化处理后各试样的无侧限抗压强度降幅

团聚体最大粒径/mm	无侧限抗压强度降幅/%			
	2% 水泥掺量	4% 水泥掺量	6% 水泥掺量	8% 水泥掺量
15	—	—	—	—
20	1.63	2.59	3.27	8.73
25	6.78	6.01	12.72	16.36
30	15.72	14.49	18.28	21.80

最大粒径为20 mm和25 mm的试样无侧限抗压强度降幅均保持在10%以内;在6%和8%高水泥掺量下,团聚体最大粒径为25 mm的试样的可用性开始减弱。

2.2 水稳定性

图2展示了不同工况下各试样的浸水抗压强度。水泥掺量为4%及以下时,不同团聚体最大粒径试样的浸水抗压强度差距很小,水泥掺量提升至6%及以上时,各试样的浸水抗压强度随团聚体最大粒径的增大而明显降低,且团聚体最大粒径为20~25 mm时,各试样的浸水抗压强度降幅最大。这可能是因为水泥难以渗入大粒径团聚体内部,仅在外层形成加固,浸水后水分沿裂隙侵入导致胶结层剥离,且大粒径团聚体内部存在未改良的软土核心,遇水后膨胀收缩不均,易产生微裂隙。

水稳定性系数为试样浸水抗压强度与正常无侧限抗压强度的比值,常用来表征水稳定性,其值越大说明试样水稳定性越优。如图3所示,在6%与8%较高水泥掺量条件下,各试样的水稳定性系数随团聚体最大粒径的减小而逐渐增大;而在2%与4%较低水泥掺量条件下,各试样的水稳定性系数随团聚体最大粒径的增大呈现出先降低后升高的非线性变化规律,并在团聚体最大粒径为20 mm时达到最低值。该现象可归因于不同粒径团聚体中水泥水化反应程度的差异:在6 d龄期内,尽管所有试样中均已生成钙矾石与水化硅酸盐胶体等早期产物,但水泥水化过程尚未完全结束。粒径较小的团聚体因破碎更充分,比表面积更大,故其与水泥接触更为充分,反应速率与程度更高;而在相同水泥掺量下,粒径较

大的团聚体中水泥分布相对稀疏,部分水泥在前期未能充分反应,浸水1 d期间,水分进一步促进了这部分未反应水泥的继续水化,使得其浸水后的抗压强度相较于正常养护7 d的试样抗压强度下降幅度较小,水稳定性系数因而升高,甚至接近团聚体最大粒径为15 mm试样的水平。因此,在2%与4%较低水泥掺量条件下,团聚体最大粒径为25 mm和30 mm的试样在一定程度上也能够较好地抵抗雨水冲刷、水流冲刷。

2.3 加州承载比(CBR)

《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)中规定,以水泥土作为路基填料的工程对于CBR的要求为不低于8%。从图4可以看出,所有试样均满足规范要求,且相同水泥掺量(水泥掺量范围为2%~8%)下,试样的团聚体最大粒径越大,其CBR值越小。2%水泥掺量下,不同团聚体最大粒径试样的

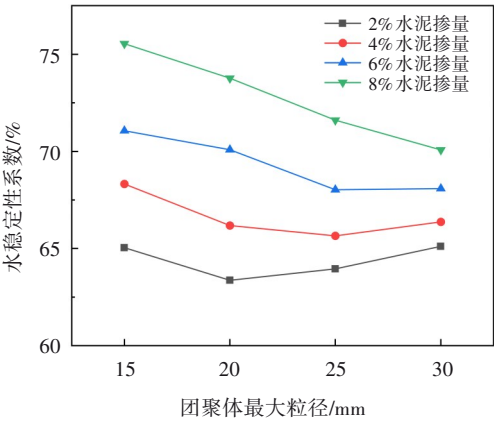


图3 不同工况下各试样的水稳定性系数
Fig.3 Water stability coefficient of each sample under different operating conditions

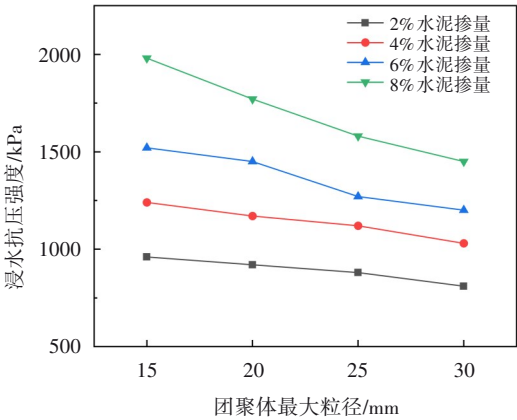


图2 不同工况下各试样的浸水抗压强度
Fig.2 Compressive strength after immersion of each sample under different operating conditions

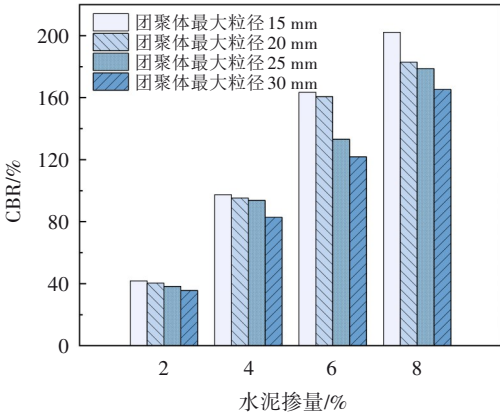


图4 不同工况下各试样的CBR
Fig.4 CBR of each sample under different operating conditions

CBR 差异不大,分析原因可能是,水泥掺量较低的工况下,水泥主要起填充与初步胶结作用,未能显著改变土体的原生结构,故团聚体粒径对试样 CBR 的影响微弱。随着水泥掺量的增加,同一水泥掺量下试样 CBR 最大差值所处的团聚体最大粒径区间在逐渐减小,即在 4%、6%、8% 水泥掺量下,试样的 CBR 变化最显著的团聚体最大粒径区间分别出现在 25~30 mm、20~25 mm、15~20 mm。这主要是由于水泥掺量的提升使得水泥浆体足以在团聚体界面形成有效胶结但尚不充分,此时大粒径团聚体因界面胶结薄弱成为强度差异性的主导因素;而当水泥掺量进一步提高,大粒径团聚体被充分包裹,具有更大比表面积的小粒径团聚体的单位面积胶结量的不足凸显,成为制约试样强度均质性与承载力的关键,致使试样 CBR 对粒径变化的敏感区间向小粒径方向迁移。

定义 CBR 降幅 $D_{C_i}^n$ 作为量化团聚体最大粒径影响的指标。

$$D_{C_i}^n = \frac{C_{15}^n - C_i^n}{C_{15}^n} \times 100\%, \tag{2}$$

式中: $D_{C_i}^n$ 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 i mm 试样相对于团聚体最大粒径为 15 mm 试样的 CBR 降幅($i=20, 25, 30$); C_{15}^n 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 15 mm 试样的 CBR; C_i^n 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 i mm 试样的 CBR($i=20, 25, 30$)。

结合图 4 和式(2)计算各试样的 CBR 降幅,计算结果如表 3 所示。可以看出,相同水泥掺量下,团聚体最大粒径越大,试样的 CBR 降幅也越大;不同水泥掺量下,只有团聚体最大粒径为 20 mm 试样的 CBR 降幅均保持在 10% 以内;当水泥掺量达到 6% 及以上时,团聚体最大粒径为 25 mm 试样的 CBR 降幅已经超过 10%;而当水泥掺量达到 4% 及以上时,团聚体最大粒径为 30 mm 试样的 CBR 降幅也已超过 10%。也就是说,对于较大粒径团聚体试样,越少的水泥掺量对试样 CBR 的影响越小。

2.4 回弹模量

回弹模量是在进行路基路面工程设计时主要使用的表征材料性质的参数,主要用来反映基层材料对于上部荷载所产生变形的敏感程度,可以有效表征路面基层的刚度。图 5 展示的是不同工况下各试样 7 d 的回弹模量。团聚体最大粒径相同时,水泥掺量越大,试样对于上部荷载的承受能力越发显著,抵抗荷载变形的能力更强;相同的水泥掺量条件下,试样的回弹模量随团聚体最大粒径的增大而降低,这是因为小粒径团聚体试样因胶结均匀性高,卸载后变形恢复能力强,而大粒径团聚体试样裂隙发展不可逆,残余变形累积,卸载后变形恢复能力较弱。

使用回弹模量降幅 $D_{E_i}^n$ 来量化团聚体最大粒径的影响。

$$D_{E_i}^n = \frac{E_{15}^n - E_i^n}{E_{15}^n} \times 100\%, \tag{3}$$

式中: $D_{E_i}^n$ 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 i mm 试样相对于团聚体最大粒径为 15 mm 试样的回弹模量降幅($i=20, 25, 30$); E_{15}^n 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 15 mm 试样的回弹模量; E_i^n 为水泥掺量 $n\%$ 时,团聚体最大粒径为 i mm 试样的回弹模量($i=20, 25, 30$)。

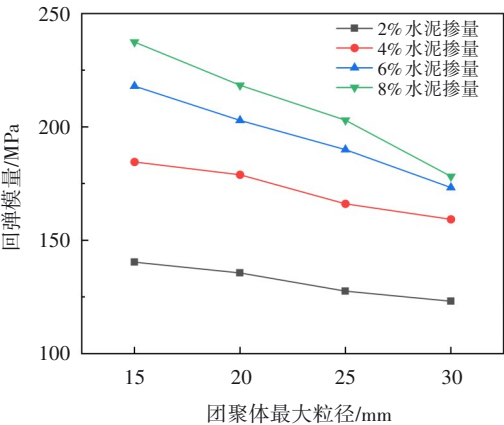


图5 不同工况下各试样的 7 d 回弹模量

Fig.5 7 d rebound modulus of each sample under different operating conditions

表 3 各试样的 CBR 降幅

Tab.3 The decreasing amplitude in CBR of each sample

团聚体最大粒径/mm	CBR 降幅/%			
	2% 水泥掺量	4% 水泥掺量	6% 水泥掺量	8% 水泥掺量
15	—	—	—	—
20	3.49	2.26	1.74	9.52
25	3.67	3.89	18.56	11.58
30	3.80	15.06	25.48	18.20

结合图5和式(3)计算各试样的回弹模量降幅,计算结果如表4所示。对比可知,随着水泥掺量的增大,不同团聚体最大粒径试样的回弹模量降幅也随之增大;相同水泥掺量下,团聚体最大粒径越大,试样的回弹模量降幅也越大,即 $D_{E_i}^a$ 越大,则回弹模量降幅越大。整体来看,团聚体最大粒径20 mm试样相较于15 mm试样的回弹模量降幅均保持在10%以内;水泥掺量越小,团聚体最大粒径对试样回弹模量的影响越小。

3 固化剂理论掺量计算

3.1 公式推导

固化剂通过水化反应在土团表面形成固化胶凝物质,当胶凝物质完全覆盖土团聚体时,可以得到完全包裹土团聚体的水泥掺量^[19-20]。对于本研究,假设在经过一次掺灰、降水、破碎处理之后得到的团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样由*k*个粒组组成,按照级配从小到大排序,假设土团为球体,根据球体表面积以及体积公式可知,团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样的总表面积可按照公式(4)进行计算。

$$A_i = \sum_{j=1}^k \left(\frac{M_j s_j}{100m_j} \right) = \sum_{j=1}^k \left(\frac{10M_j s_j}{\rho v_j} \right) = \sum_{j=1}^k \left(\frac{60M_j}{\rho d_j} \right), \quad (4)$$

式中: A_i 为团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样的总表面积,cm²; M_j 为第*j*个粒组土团总质量($j=1, 2, \cdots, k$),g; m_j 为第*j*个粒组中单个土团质量,g; s_j 为第*j*个粒组中单个土团的表面积,mm²; v_j 为第*j*个粒组中单个土团的体积,mm³; ρ 为试验所用废弃软土的密度,g·cm⁻³; d_j 为第*j*个粒组中土团粒径范围上下界限的平均值,mm。

在土团被二次掺加水泥固化剂(水泥干粉)并被完全包裹的情况下,若忽略土团表面固化剂浆膜厚度变化,则被固化剂完全包裹的团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样单位面积内所需水泥固化剂质量可由式(5)计算得出。

$$M_{e_i} = \frac{M_{e_i}}{A_i} = \frac{\left(M_i - \sum_{j=1}^k M_j \right)}{A_i} = \frac{\left(M_i - \sum_{j=1}^k M_j \right)}{\sum_{j=1}^k \left(\frac{60M_j}{\rho d_j} \right)}, \quad (5)$$

式中: M_{e_i} 为被固化剂完全包裹的团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样单位面积内所需水泥固化剂质量,g·cm⁻²; M_{e_i} 为被固化剂完全包裹的团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样所需水泥固化剂总质量,g; M_i 为被固化剂完全包裹的团聚体最大粒径为*i* mm的土团总质量,g。

最终可推导出水泥固化剂理论掺量 a_{e_i} 的计算公式。

$$a_{e_i} = \frac{A_i (M_{e_{15}} + M_{e_{20}} + M_{e_{25}} + M_{e_{30}})}{4} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: a_{e_i} 为被固化剂完全包裹的团聚体最大粒径为*i* mm的石灰土土样所需水泥固化剂的理论掺量,%; $M_{e_{15}}$ 、 $M_{e_{20}}$ 、 $M_{e_{25}}$ 、 $M_{e_{30}}$ 分别为被固化剂完全包裹的团聚体最大粒径为15、20、25、30 mm的石灰土土样单位面积内所需水泥固化剂的质量。

3.2 公式验证

表5为将废弃软土掺加2%石灰经过降水、破碎后所得石灰土土样中各粒组土团的占比情况。

分别开展4组不同团聚体最大粒径水泥干粉试验,为减少试验误差,每组干粉包裹试验制作6个平行试样,包裹前和被固化剂完全包裹后试样的质量差即为被固化剂完全包裹的石灰土土样所需水泥干粉质量,取平均值作为试验数值 M_{e_i} 。

已知试验所用废弃软土的密度为1.65 g·cm⁻³,采用固化剂理论掺量计算公式(式(4)~(6))计算的结果如表6所示,将团聚体最大粒径分别扩大至15、20、25、30 mm时所需的水泥理论掺量为6.63%、5.87%、5.10%、4.13%,基本符合前面室内试验所得水泥掺量的范围,说明所推导出的固化剂理论掺量计算公式具有较好的适用性。综上认为,实际工程应用中可以此结果为基准,进行配合比设计与优化。

表4 各试样的回弹模量降幅

Tab.4 The decreasing amplitude in rebound modulus of each sample

团聚体最大粒径/mm	回弹模量降幅/%			
	2% 水泥掺量	4% 水泥掺量	6% 水泥掺量	8% 水泥掺量
15	—	—	—	—
20	3.39	3.04	6.93	8.02
25	9.11	10.00	12.85	14.52
30	12.28	13.70	20.52	24.95

表5 不同团聚体最大粒径条件下各粒组土团的占比情况

Tab.5 The proportion of soil aggregate in each particle group under the condition of different maximum particle sizes of aggregates

j	土团粒径范围/mm	各粒组土团占比/%			
		团聚体最大粒径 15 mm	团聚体最大粒径 20 mm	团聚体最大粒径 25 mm	团聚体最大粒径 30 mm
7	(25,30]	0	0	0	7.14
6	(20,25]	0	0	14.41	7.19
5	(15,20]	0	11.78	10.08	7.27
4	(10,15]	11.27	9.95	8.51	9.28
3	(5,10]	20.65	18.22	15.59	15.58
2	(2,5]	16.75	14.78	12.65	27.71
1	≤2	51.33	45.27	38.76	25.83

表6 不同团聚体最大粒径试样所需水泥掺量的理论计算值

Tab.6 Theoretical calculated values of cement dosages required for samples with different maximum particle sizes of aggregates

i/mm	A_i /cm ²	M_{ci} /g	M_e /g	a_{ci} /%
15	2 190.38	6.83	3.12×10^{-3}	6.63
20	1 939.26	5.94	3.06×10^{-3}	5.87
25	1 687.27	5.11	3.03×10^{-3}	5.10
30	1 364.86	3.94	2.89×10^{-3}	4.13

4 中试试验

废弃土填料化中试系统可以模拟实际工程现场的破碎、筛分、二次掺灰拌合等工序,改良土壤性能使其更适合于工程建设中的填土和路基等应用,且能有效提高处理大批量土料的效率。

表7记录了利用填料化中试系统分别处理10 t 掺加4%水泥的不同团聚体最大粒径废弃软土土料所需的时间,明显看出,团聚体最大粒径越大,处理时间越短。相比于团聚体最大粒径15 mm的土料,

使用填料化中试系统处理团聚体最大粒径20、25、30 mm 废弃土料的时间分别缩短了7.69%、19.63%、27.85%,处理效率明显提升。因此,在满足规范要求的情况下,综合考虑工程实际及时间成本控制,可以使用填料化中试系统处理废弃软土并合理扩大团聚体最大粒径。

如图6所示,中试试验中试样的CBR与回弹模量变化趋势与室内试验中试样的CBR与回弹模量变化趋势具有较高一致性,即改良填料土试样的CBR与回弹模量均随团聚体最大粒径的增大而略有

表7 填料化中试系统处理10 t不同团聚体最大粒径废弃软土土料所需时间

Tab.7 Time required for the filler pilot system to process 10 t of waste soft soil with different maximum particle sizes of aggregates

团聚体最大粒径/mm	系统处理时间/s	效率提升幅度/%
15	377	—
20	348	7.69
25	303	19.63
30	272	27.85

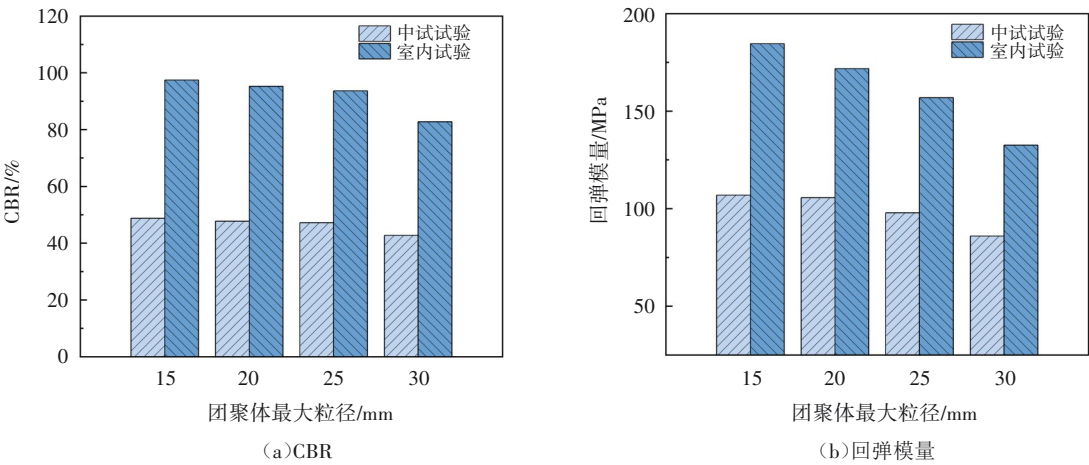


图6 中试试验与室内试验结果对比

Fig.6 Comparison of pilot test and laboratory test results

下降。同时可以看出,中试试验中试样的CBR、回弹模量分别约为室内试验的50%、60%。分析认为,该差异可能源于中试系统在运行过程中机械对固化剂的损耗较大,且存在拌合不均匀及提前出料的现象,导致部分土体未能被水泥完全包裹,影响了水泥与土体的充分反应。尽管中试系统处理废弃软土所得改良填料土试样的CBR与回弹模量不及经人工拌合处理所得改良填料土试样的水平,但其数值仍满足实际工程规范要求。此外,随着团聚体最大粒径的增大,经中试系统与人工拌合处理所得改良填料土试样的CBR与回弹模量的差距在逐渐缩小,说明中试系统在处理较大粒径团聚体废弃软土时具有相对更好的适用性。推测原因在于机械快速拌合过程中,具有一定含水率的小粒径团聚体易发生黏结,而大粒径团聚体更易于被有效分散与处理,从而体现出中试系统在实际工程中推广的潜力。

5 结论

1)室内试验结果表明,随团聚体最大粒径的增大,改良填料土的路用性能表现出下降趋势,且固化剂掺量对改良填料土性能的影响大于团聚体最大粒径。在满足规范要求的前提下,用掺量为4%左右的水泥对高含水率废弃软土进行二次掺灰改良时,所得改良填料土的团聚体最大粒径可以扩大至25~30 mm;在更高水泥掺量下处理高含水率废弃软土时,考虑到安全稳定性,建议将改良填料土的团聚体最大粒径控制在20 mm及以下。室内试验结果可以为工程实际提供初步的、经验性参考。

2)为满足精细化设计与施工的需求,在室内试验结果的基础上,提出固化剂理论掺量计算公式,采用该公式计算得出:团聚体最大粒径为15、20、25、30 mm的土样被固化剂完全包裹时所需的水泥理论掺量分别为6.63%、5.87%、5.10%、4.13%,与室内试验所得的范围在趋势上一致,证明了所提公式的合理性及室内试验结果的可靠性。所得固化剂理论掺量提供了更为明确和直接的依据,实际工程应用推荐以此为基准,进行配合比设计与优化。

3)使用填料化中试系统对废弃软土进行二次掺灰拌合的生产效率明显优于人工拌合,且随团聚体最大粒径的增大而显著提升,生产出的改良填料土性能也均满足规范要求,说明填料化中试系统适用于现场大批量废弃土料处理,且对处理较大粒径团聚体废弃土料的适用性更强,具有应用推广价值。

参考文献:

- [1] Zhou S H, Wang B L, Shan Y. Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area [J]. Railway Engineering Science, 2020, 28(2): 129-145.
- [2] 沈才华,董玉翔,胡昱业,等.杭州软土力学特性和扰动损伤特性研究[J].河南科学,2023,41(7):1046-1054.
Shen C H, Dong Y X, Hu Y Y, et al. Study on the mechanical properties and disturbance damage characteristics of soft soil in Hangzhou [J]. Henan Science, 2023, 41(7): 1046-1054.
- [3] 胡海涛,徐洁,景啸,等.干湿循环及固化工艺对固化土水稳特性和强度特性的影响[J].河南科学,2021,39(9): 1453-1460.
Hu H T, Xu J, Jing X, et al. Effect of wetting-drying cycle and solidification process on water stability and strength characteristic of solidified soil [J]. Henan Science, 2021, 39(9): 1453-1460.
- [4] 张军辉,陈莎莎,顾凡,等.工业废弃料在路基改良中的应用综述[J].中国公路学报,2023,36(10):1-16.
Zhang J H, Chen S S, Gu F, et al. Industrial waste materials utilized in subgrade modification: A review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 1-16.
- [5] 王春阳.石灰改良软土填料路用性能试件研究[J].粉煤灰综合利用,2020,34(4):118-123.
Wang C Y. Specimen research on road performance of lime-modified soft soil filler [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(4): 118-123.
- [6] Lu X M, Fan L J, He N, et al. Experimental study on engineering characteristics of cement-lime-improving silt in eastern Henan Province [J]. Coatings, 2022, 12(4): 501-509.
- [7] 张华.富水地层盾构渣土用作路基填料的试验研究[J].粉煤灰综合利用,2021,35(1):75-78,128.
Zhang H. Experimental study for shield residue soil in water-rich round layer use as filling material of roadbed [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2021, 35(1): 75-78, 128.
- [8] 孙浩,王小东,邵景松,等.改良建筑渣土作为路基填料的性能研究[J].粉煤灰综合利用,2024,38(6):131-137.
Sun H, Wang X D, Shao J S, et al. Research on the performance of improved construction waste as subgrade filler [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2024, 38(6): 131-137.
- [9] 金茂祥,黄志坚.工程废弃泥浆固化土路用性能研究[J].地基处理,2025,7(1):83-89.
Jin M X, Huang Z J. Study on road performance of solidified soil with engineering waste sludge [J]. Journal of

Ground Improvement, 2025, 7(1): 83–89.

[10] 储诚富,王雨航,宗文强. 团聚体级配对固废改良膨胀土耐久性的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(3): 237–244.

Chu C F, Wang Y H, Zong W Q. Effect of aggregate grading on durability of expansive soil modified by solid waste [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(3): 237–244.

[11] 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 Y Z, Hu Y, Zhan S H, et al. Effects of aggregate sizes on hydro-mechanical performances of treated laterite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2323–2329.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Wang Y J, Cui Y J, Tang A M, et al. Aggregate size effect on the water retention properties of a lime-treated compacted silt during curing [J]. E3S Web of Conferences, 2016, 9: 11013.

[15] 蔡奕,施斌,刘志彬,等. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005(12): 1482–1486.

Cai Y, Shi B, Liu Z B, et al. Experimental study on effect of aggregate size on strength of filled soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(12): 1482–1486.

[16] 王雨航. 团聚体粒径对工业废渣改良膨胀土工程特性的影响研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2023.

Wang Y H. Study on influence of aggregate size on engineering properties of expansive soil improved by industrial waste residue [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.

[17] 汪志伟,邵吉成,张旺兴,等. 淤泥固化技术在路基工程应用中的要点浅析[J]. 科技与创新, 2024(18): 74–77.

Wang Z W, Shao J C, Zhang W X, et al. A brief analysis of key points in the application of sludge solidification technology in subgrade engineering [J]. Science and Technology & Innovation, 2024(18): 74–77.

[18] 季节,梁犇,韩秉烨,等. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 47–66.

Ji J, Liang B, Han B Y, et al. Review on soil solidified technologies in road engineering in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 47–66.

[19] 黄新,宁建国,许晟,等. 软土固化剂优化设计方法探讨[J]. 工业建筑, 2006, 36(7): 7–12, 18.

Huang X, Ning J G, Xu S, et al. Optimization design of soft soil stabilizer [J]. Industrial Construction, 2006, 36(7): 7–12, 18.

[20] 黄新,宁建国,郭晔,等. 水泥含量对固化土结构形成的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 436–441.

Huang X, Ning J G, Guo Y, et al. Effect of cement content on the structural formation of stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 436–441.

(编辑 杨晓燕)