

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.181



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



南京长江漫滩废弃粉土改良用作路基填料的 室内试验研究

张赛¹, 章剑青², 尚石磊³, 丁建文¹, 李耀宇³, 邱近哲¹

(1. 东南大学交通学院, 南京 210096; 2. 江苏华宁工程咨询有限公司, 南京 210002; 3. 中铁十五局集团城市建设工程有限公司, 河南 洛阳 471002)

摘要:为实现基坑开挖废弃粉土的资源化利用,研究了水泥、石灰改良长江漫滩粉土路基的工程力学特征及稳定性。通过击实试验、无侧限抗压强度试验、水稳性试验和微观试验,分析改良粉土的强度特性及耐久性变化规律,论证长江漫滩粉土作为路基填料的可行性。结果表明:掺加水泥、石灰后,土体力学性能得到大幅改善;不同掺量下浸水 5 d,改良土的水稳系数均大于 0.6,水稳系数随水泥掺量的增加而增加,随石灰掺量的增加先增大后减小。微观试验表明,水泥、石灰在土体中生成的胶凝物质对土颗粒具有包裹和联结作用。综合考虑改良土的强度和水稳性,经过改良后,长江漫滩粉土可以作为路基填料,建议水泥、石灰改良土的最佳组合配比为 6% 水泥+6% 石灰,在此掺量下,改良土体的 28 d 无侧限抗压强度为 2.05 MPa,浸水 5 d 后的水稳系数为 0.76,具有较好的路用力学性能。

关键词:长江漫滩;粉土改良;路基填料;力学性能;水稳性;微观机理

中图分类号: TU447 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)03-0033-08

Laboratory investigation on solidified waste silt from Nanjing Yangtze river floodplain as subgrade filling

ZHANG Sai¹, ZHANG Jianqing², SHANG Shilei³, DING Jianwen¹, LI Yaoyu³,
QIU Jinzhe¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Jiangsu Huaning Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210002, P. R. China; 3. China Railway 15th Bureau Group Urban Construction Co., Ltd., Luoyang 471002, Henan, P. R. China)

Abstract: To realize the utilization of silt waste from foundation pit excavation, the characteristics of engineering mechanics and stability of the Yangtze river floodplain silt subgrade solidified by cement and lime were investigated. A series of laboratory tests including compaction test, unconfined compressive strength test, water stability test and microscopic test were conducted to analyze the variation of strength and durability of

收稿日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(51978159); “十二五”国家科技支撑计划(2015BAB07B06)

作者简介: 张赛(1996-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: 220193038@seu.edu.cn。

丁建文(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jwding@seu.edu.cn。

Received: 2021-07-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978159); National Science and Technology Support Project in “Twelfth Five-Year” (No. 2015BAB07B06)

Author brief: ZHANG Sai (1996-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 220193038@seu.edu.cn.

DING Jianwen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jwding@seu.edu.cn.

lime-cement solidified silt. Feasibility of using soft soil of Yangtze River floodplain as subgrade filling is demonstrated. The results show that the mechanical properties of silt are greatly improved after addition of cement and lime; after soaking in water for 5 days with different content, the water stability coefficient of the solidified soil is greater than 0.6. The water stability coefficient increases with the increase of cement content, and increases first and then decreases with the lime content. Microscopic tests show that the cementitious substances generated by cement and lime in the soil can encapsulate and bond the soil particle. Considering the strength and water stability of the solidified soil, the Yangtze River floodplain silt can be used as subgrade filling after solidification and the optimum percentage of cement and lime was both 6%. Under this content, the unconfined compressive strength of the improved soil for 28d is 2.05 MPa, and the water stability coefficient after soaking in water for 5 days is 0.76, which shows that the improved soil has good mechanical performance.

Keywords: Yangtze River floodplain; silt improvement; subgrade filling; mechanics characteristics; water stability; microscopic mechanism

粉土用作路基填料具有难压实、强度低、易冲刷等特点^[1-3],且毛细现象明显,导致土体结构松散,引起路基不均匀沉降,并伴随道路开裂、车辙、水毁等灾害^[4-6]。因此,在使用粉土作为路基填料时,需探究其可行性,并探讨经济合理的改性方法。南京横江大道快速化改造项目位于南京市浦口区,沿线隶属长江漫滩地貌单元,地层主要由粉土、粉细砂及部分黏土组成,具有软弱性和富水性等特征^[7-8],土体性质较差。横江大道明挖隧道基坑开挖产生了大量废弃土方,工程中一般采用外运或堆弃的方式进行处理,导致大量土地资源被占用,同时大大增加了施工成本。如果能将弃置粉土应用于路基填筑中,可以实现填挖平衡及弃方资源化利用,具有很高的环境和经济效益。

目前,工程上主要通过掺加无机结合料来稳定粉土,提高其强度和水稳性,保障其路用性能。最常用的无机结合料主要是水泥、石灰、粉煤灰等^[9-12]。另一方面,针对粉土固化,许多学者和生产厂家也对一系列新型固化剂展开了研究及开发,如无机化合物类、离子交换类、生物酶类、有机类固化剂等^[13]。无机化合物类固化剂主要通过自身水解水化生成胶结物质提高土体强度;离子交换类固化剂主要通过促进土壤水分与土颗粒间的电荷交换破坏土颗粒表面结合水膜,从而使土体具有更好的压实性;生物酶类固化剂能够实现对土体中有机和无机物质的强力固化,形成致密结构;有机类固化剂加入土壤后,可以发生聚合反应生成大的有机分子链,起到胶结土体的作用^[14-15]。新型固化剂具有优良的土体改性效果,但存在固化性能保持时间短等特点,如生物酶类固化剂保持时间仅为 8 a,远低于水泥石灰 30~50 a 的保持时间^[16],限制了其大规模工程应用。而水泥和石灰获取方便、施工快捷,有利于大规模的工程运用推广。

为实现废弃粉土大规模资源化利用,选取传统的无机结合料水泥及石灰对废弃粉土进行改良处理,并探讨改良后粉土的力学性质与路用性能。选用 6 组不同配比的水泥、石灰展开对比研究,基于室内击实试验确定了最大干密度和最佳含水量,分析了不同固化剂配比下改良粉土的无侧限抗压强度和水稳性,并通过微观试验,探讨了水泥、石灰改良粉土的机理。基于试验结果提出了水泥、石灰的最佳配比。

1 试验材料与内容

1.1 试验材料

试验用粉土取自南京市浦口区横江大道项目现场,主要为基坑开挖废弃土方,图 1 是粉土的颗粒分布曲线,其物理性能指标如表 1 所示。可以看出试验用土为低液限粉土,土颗粒细小且均匀,级配较差。同时,土体含水率较高,粉土中可溶盐溶解,宏观表现为土颗粒间的黏聚力降低,土体力学性能较差^[17]。

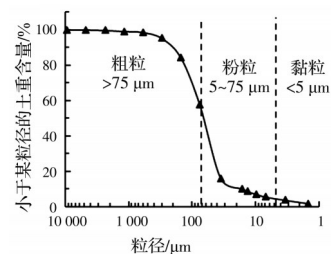


图 1 粉土颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of tested silt

选用 P. O 32.5 普通硅酸盐水泥和生石灰,取自横江大道施工现场,采用 X 射线荧光光谱分析得到其主要氧化物成分,如表 2 所示。

1.2 试验内容

首先进行素土与单掺水泥条件下的击实试验,

表1 试验粉土的基本物理指标

天然含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	液限/ $\%$	塑限/ $\%$
23.0	18.4	27.8	18.8
塑性指数	渗透系数 $K/(\text{cm}/\text{s})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
9.0	8×10^{-3}	2	32

表2 水泥和石灰主要化学成分

原材料	成分	含量/ $\%$
普通硅酸盐水泥	CaO	55.11
普通硅酸盐水泥	SiO ₂	25.59
普通硅酸盐水泥	Al ₂ O ₃	7.24
普通硅酸盐水泥	MgO	3.74
普通硅酸盐水泥	Fe ₂ O ₃	3.34
普通硅酸盐水泥	SO ₃	3.27
普通硅酸盐水泥	TiO ₂	0.35
生石灰	CaO	65.34
生石灰	SiO ₂	2.51
生石灰	Al ₂ O ₃	1.14
生石灰	MgO	0.43
生石灰	Fe ₂ O ₃	0.76
生石灰	K ₂ O	0.21
生石灰	Na ₂ O	0.18
生石灰	SO ₃	0.15

记为击实试验 I。将素土风干并过 2 mm 筛,分别掺水 11%、13%、15%、17%、19%,闷料后,根据设计配比加入 0%、3%、6%、9% 水泥拌和均匀,进行击实,试验配比如表 3 所示;基于单掺水泥条件下的试验结果,分析并确定最佳水泥掺量(最佳水泥掺量为 6%)。在此基础上,进行水泥-石灰双掺条件下的击实试验,记为击实试验 II。在土中分别掺加 3%、6%、9% 的石灰,形成 3 种石灰土,分别掺水 11%、13%、15%、17%、19%,闷料后再掺加 6% 水泥均匀拌合,进行击实试验,试验配比如表 4 所示。

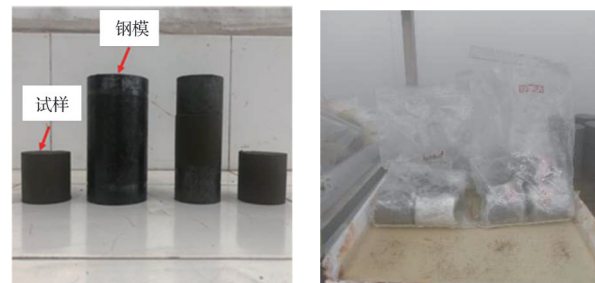
表3 击实试验 I 配比

石灰	水泥	水
0	0	11、13、15、17、19
0	3	11、13、15、17、19
0	6	11、13、15、17、19
0	9	11、13、15、17、19

表4 击实试验 II 配比

水泥	石灰	水
6	3	11、13、15、17、19
6	6	11、13、15、17、19
6	9	11、13、15、17、19

图 2 为试样的制备和养护。基于击实试验确定的最佳含水率和最大干密度,按照上述 6 个配比和方法备料,将计算好质量的混合料倒入钢模中,控制 96% 压实度,利用千斤顶静压成型后脱模,制备直径 5 cm、高 5 cm 的圆柱体试样,同一龄期每个配比制备 6 个平行样。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)分别养护 7、14、21、28 d 并进行无侧限抗压强度(UCS)试验,剔除误差较大的结果(大于 20%),取平均无侧限抗压强度作为试验结果进行分析。同时,在标准养护 28 d 的试样进行无侧限抗压强度试验后,取 1 cm³ 大小的正方体土样进行电镜扫描试验,研究不同配比下改良土的微观结构。



(a) 试样制备

(b) 试样养护

图2 试样制备及养护

Fig. 2 Sample preparation and curing

将标准养护 28 d 后的试样取出分别浸水 1、3、5 d,进行无侧限抗压强度试验,比较不同配比改良土在不同浸水时间下的强度折损,评价改良粉土的水稳性。

2 试验结果与分析

2.1 击实试验

不同水泥掺量下改良土的最大干密度和最佳含水率如表 5 所示。由表 5 可以看出,掺加水泥后,改良土的最大干密度较素土均有所提高,最佳含水率有所降低,当水泥掺量从 0% 增加到 6% 时,最大干密度随之增大,最佳含水率随之减小,随着水泥掺量进一步增加,改良土的最大干密度呈下降趋势,最佳含水率有所上升。这是由于在拌和时过量水泥外层颗粒吸水膨胀成团粒,包裹内层水泥颗粒,阻止水分进入内部,从而形成较大团粒,无法更好地填充孔隙,土体密实度降低、含水率增加。同时,团粒的形成抑制水泥固化作用,导致生成物的胶结作用无法充分发挥^[18]。基于此,选择 6% 水泥掺量作为最佳水泥掺量,在 6% 水泥掺量的基础上,继续研究石灰掺量对改良土的最大干密度和最佳含水率的影响。

表5 不同水泥掺量下击实试验结果

Table 5 Compaction test results with different cement content

土样	最大干密度/(g/cm ³)	最佳含水率/%
素土	1.76	17.15
3%水泥	1.78	16.52
6%水泥	1.82	15.64
9%水泥	1.81	16.02

不同石灰掺量下改良土的最大干密度和最佳含水率如表6所示。可以看出,土中掺入石灰并充分搅拌后,石灰颗粒吸收水分发生反应,其与水的生成物Ca(OH)₂具有一定膨胀性,使得土体的最大干密度和最佳含水率随石灰掺量的增加略有降低,但最佳含水量的变化范围在0.6%以内,说明石灰的掺量对最佳含水率影响较小。

表6 不同石灰掺量下击实试验结果

Table 6 Compaction test results with different lime content

土样	最大干密度/(g/cm ³)	最佳含水率/%
6%水泥+0%石灰	1.82	15.64
6%水泥+3%石灰	1.81	15.60
6%水泥+6%石灰	1.80	15.42
6%水泥+9%石灰	1.77	15.05

2.2 无侧限抗压强度试验

图3、图4分别反映了不同水泥掺量和不同养护龄期下改良粉土强度的变化规律。由图3可知,同一龄期下改良土的无侧限抗压强度 q_u 随着水泥掺量的增加线性增大。天然废弃粉土的抗压强度 q_u 为92 kPa,力学性质较差,但掺加水泥改性后,其抗压强度得到大幅提升。

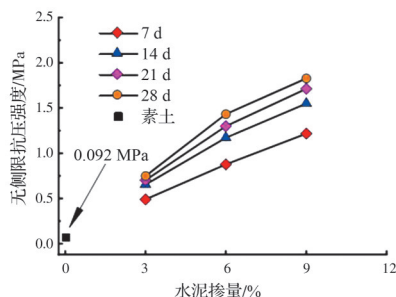


图3 不同水泥掺量下水泥改良土无侧限抗压强度

Fig. 3 Unconfined compressive strength of cement-treated soil with different cement content

根据图4结果可知,同一水泥掺量下改良土 q_u 随养护龄期的增加而增大,其中改良土 q_u 强度在7 d到14 d增长迅速,说明水泥早期强度较高,可有效保证改良粉土填筑路基快速达到工程的预期效果。同时由于前期部分水泥与水反应形成团粒,延滞了水化反应的进行,导致前期强度未能完全发挥,随着养护龄期的增长,水化反应持续发生,生成更多

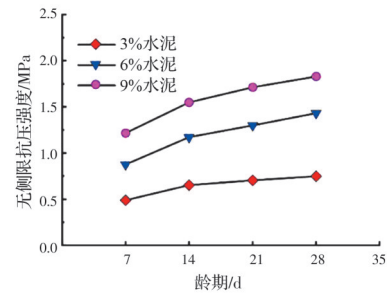


图4 不同养护龄期水泥改良土无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength of cement-treated soil at different curing time

凝胶物质,填充了土体间的孔隙,结构变得更加密实,无侧限抗压强度增长并逐步趋于稳定。

图5、图6分别反映了不同石灰掺量下(水泥掺量均为6%)改良粉土的强度变化规律和不同养护龄期下的强度的变化规律。图5表明,掺加石灰可以提高水泥改良土的强度,同一养护龄期下,当石灰掺量不超过6%时,改良土无侧限抗压强度 q_u 随石灰掺量的增加而增大,但掺量超过6%以后,改良土无侧限抗压强度 q_u 却呈下降趋势。主要原因有两点:一方面,结合击实试验结果可以看出,石灰具有一定的膨胀性,当掺量大于一定比例后,会导致土体密实程度降低;另一方面,石灰的膨胀作用破坏已有的胶结体,导致改良土强度降低。基于上述两点,过量的石灰掺量对改良土的力学性质具有负面

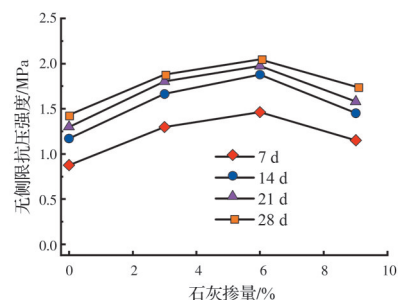


图5 不同石灰掺量下水泥-石灰改良土无侧限抗压强度

Fig. 5 Unconfined compressive strength of cement-lime-treated soil with different cement content

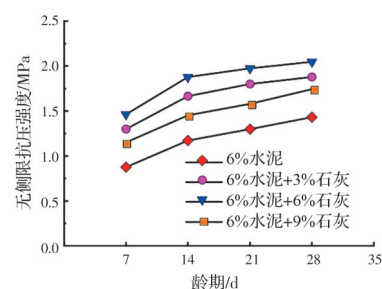


图6 不同养护龄期水泥-石灰改良土无侧限抗压强度

Fig. 6 Unconfined compressive strength of cement-lime-treated soil at different curing time

作用。从图 6 中可以看出,同一石灰掺量的改良土, q_u 随养护龄期的增加而增大,其增长规律与单掺水泥时一致。

2.3 水稳性试验

水稳性表示土样在浸水条件下保持自身原有性能的能力,常采用水稳系数 K 来衡量。其中,水稳系数 K 代表浸水试样的无侧限抗压强度与标准养护条件下试样无侧限抗压强度的比值。笔者主要探讨试样养护 28 d 后浸水 1、3、5 d 的水稳性。图 7 为素土与改良粉土试样浸水后的状态,素土试样浸水 10~20 min 后开始从边缘向中间出现裂纹,土样上方有少许气泡不断冒出,随后土样持续崩解堆积在容器底部;而改良土试样的外观则非常完整,表明天然粉土的抗崩解能力较差,加入水泥、石灰进行改良处理后,其抗崩解能力得到了显著提升,

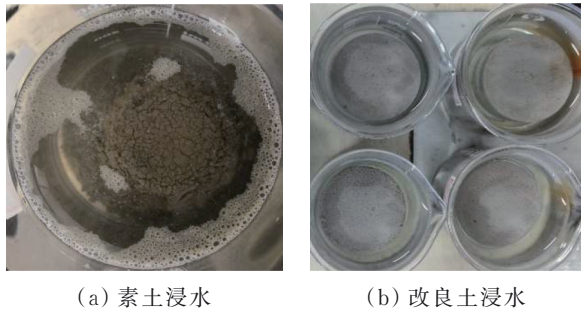


图 7 浸水试验
Fig. 7 Water treatment test

水稳性明显增强。

各配比条件下改良土的水稳性试验结果如图 8 和表 7 所示。图 8 表明,改良土在浸水后均发生强度损失,随着浸水时长的增加,试样无侧限抗压强度 q_u 显著降低,结合表 7 中水稳系数和强度损失试验结果可以发现,浸水 5 d 后,改良土的水稳系数均大于 0.6。单掺水泥时水稳系数随水泥掺量的增加而增大;而水泥和石灰共同掺入时,改良土试样的水稳性随石灰掺量的增加先增大后减小,且变化较为显著,说明水泥的掺入可以有效提高土体的水稳性,而石灰掺量对土体水稳性的影响较大,存在最佳掺量。对比强度损失可知,9% 水泥掺量和 6% 水泥+6% 石灰掺量的试样强度损失在 25% 以下,水稳性较好,其中 6% 水泥+6% 石灰掺量下试样无侧限抗压强度 q_u 更高,达到了 2.05 MPa,具有更好的工程特性。

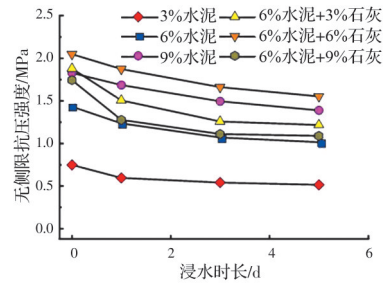


图 8 不同浸水时间下改良土无侧限抗压强度变化趋势
Fig. 8 Change trend of unconfined compressive strength of treated soil under different soaking time

表 7 水稳系数和强度损失

Table 7 Water stability coefficient and strength loss

浸水时间/d	水稳系数						强度损失/%					
	3%水泥	6%水泥	9%水泥	6%水泥+3%石灰	6%水泥+6%石灰	6%水泥+9%石灰	3%水泥	6%水泥	9%水泥	6%水泥+3%石灰	6%水泥+6%石灰	6%水泥+9%石灰
1	0.80	0.87	0.92	0.80	0.92	0.73	20.41	13.52	7.73	19.83	8.55	26.68
3	0.72	0.75	0.82	0.67	0.81	0.64	27.74	25.16	18.18	33.06	18.82	36.32
5	0.69	0.71	0.76	0.65	0.76	0.63	31.29	28.99	24.11	35.24	24.24	37.47

3 石灰-水泥改良机理

为进一步阐述水泥、石灰改良粉土的微观机理,对 28 d 标准养护下的改良土进行 SEM 分析。图 9 为素土和改良土的微观结构图片。由图 9(a) 可以看出,素土颗粒具有较为明显的棱角和边界,土颗粒之间存在较大孔隙,导致颗粒间相互联结较差,贯通裂隙发育,水分渗透快,宏观上表现为素土低抗压强度、低水稳性的工程特性。当掺入少量水泥后(图 9(b)),土体孔隙得到一定的填充,土颗粒被一层胶凝物质包裹,棱角和边界变得模糊,颗粒间存在一定的联结。6% 水泥掺量下(图 9(c))改良

土的微观结构致密程度较素土有了明显变化,孔隙得到了充分的填充,颗粒被更多的胶凝物质包裹并相互联结,小颗粒间聚集成较大的团聚体,土体结构更加稳定^[19]。加入石灰后,土体进一步密实,对比图 9(g)、(h),胶凝物质主要为板状 C-S-H 和针状 C-S-H(C-S-H 为水化硅酸钙)^[20-21],且掺入石灰后胶凝物质增多,土颗粒被更好地包裹。但是,对比图 9(e)、(f),石灰掺量从 6% 增加至 9% 时,土体孔隙增多,说明过量石灰在拌和时出现团聚现象,形成大颗粒,无法对孔隙进行很好的填充,导致土体密实度降低,这也解释了石灰掺量从 6% 增加至 9% 后土体强度降低的现象。总体而言,水泥、石灰改

良土的微观结构变化与其宏观物理力学性质变化相对应。

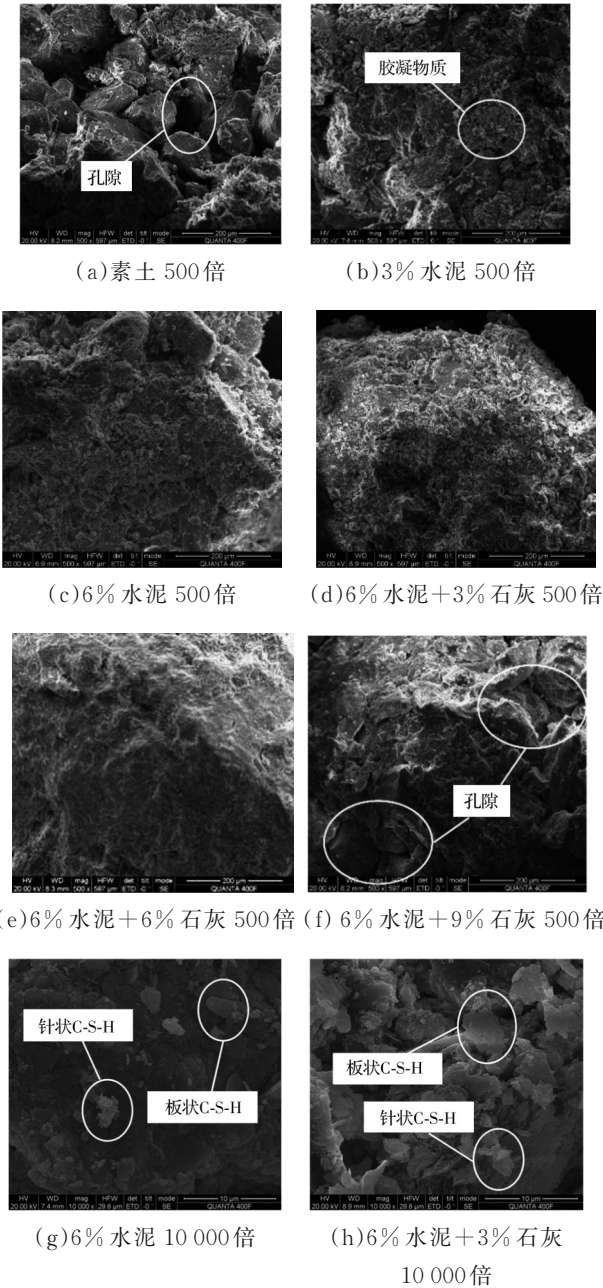


图 9 水泥、石灰改良土扫描电镜图

Fig. 9 Scanning electron microscope images of cement-lime-treated soil

根据水泥、石灰具有的化学性质和微观结果分析,其在土体中主要发生水解水化反应、凝硬反应、结晶作用,其微观机理示意图如图 10 所示。图中,素土由土、水、空气三相组成,颗粒间孔隙较大。水泥、石灰掺入后与水反应,吸收水分并电离产生 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 置换出土颗粒吸附的 Na^+ 、 K^+ 并产生絮凝,使得土体双电层水膜减薄,土颗粒相互嵌挤密实^[22-23];石灰与水发生反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, 为水泥水解水化提供了碱性条件^[24], 水泥在碱性环

境下发生反应形成 C-S-H 胶凝体,在氢键和离子键的作用下包裹粉土颗粒并提升粉土颗粒之间的联结,最终逐步凝结硬化形成致密、稳定的土体结构。同时,胶凝物质具有憎水作用,可以填充粉土间的孔隙,减少贯通孔,阻碍水对土体的进一步浸润,有效地保证了土体的水稳性。

反应后期,石灰在消化后与空气中的 CO_2 反应生成 CaCO_3 和 MgCO_3 ^[25-26], 生成物具有微结晶性,可以进一步提高土体强度和水稳性。但是由于空气中的 CO_2 含量较低,加之改良后土体致密,孔隙较少,与外部的 CaCO_3 和 MgCO_3 晶体共同阻止空气、水分进入内部土体,导致碳化过程较漫长,结晶大多在表面^[27]。

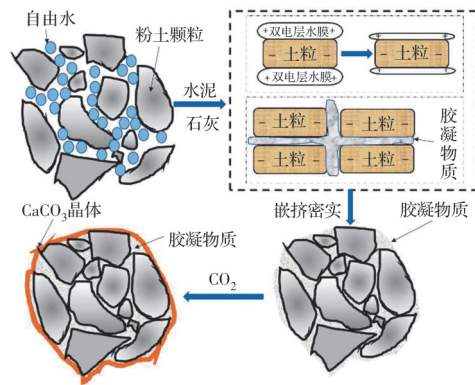


图 10 水泥-石灰改良粉土微观机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of micro-mechanism of cement-lime-treated silt

4 结论

以南京横江大道明挖隧道基坑开挖产生的废弃粉土为研究对象,开展了室内试验,论证水泥、石灰改良粉土用作路基的可行性。主要结论如下:

1) 同一养护龄期,固化土的无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加而增大;随石灰掺量的增加先增大后减小并在 6% 石灰掺量时达到最大值。

2) 标准养护 28 d 并浸水 5 d 后,改良土的水稳系数均大于 0.6。单掺水泥条件下水稳系数随水泥掺量的增加而增大;水泥-石灰双掺时,改良土试样的水稳性随石灰掺量的增加先增大后减小且变化明显,最佳石灰掺量为 6%。

3) 水泥、石灰在土中与水反应,双电层水膜减薄、产生具有较强胶结能力的胶凝物质,起到胶结土体、填充孔隙的作用,形成致密、稳定的土体结构,并与外部碳化形成的结晶层共同作用,阻止水分进入土体,增强了改良土的水稳性。

4) 改良长江漫滩粉土最佳掺量为 6% 水泥+6% 石灰,其 28 d 无侧限抗压强度为 2.05 MPa,浸水 5 d 后的水稳系数为 0.76,建议实际施工中可按此配比

并严格控制含水率和压实度,以实现长江漫滩废弃粉土的资源化利用。

参考文献

- [1] 谭敏,朱志铎. 固化粉土抗拉特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(Sup2): 1811-1816.
TAN M, ZHU Z D. Research on tensile characteristics of stabilized silt [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Sup2): 1811-1816. (in Chinese)
- [2] IADOVINA K, MASHCHENKO A. On importance of determining thermophysical properties of seasonal freezing soils [J]. PNRPU Construction and Architecture Bulletin, 2017, 8(1): 81-89.
- [3] 姚占勇,蒋红光,孙梦林,等. 细粒土路基平衡密度状态分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 94-103.
YAO Z Y, JIANG H G, SUN M L, et al. Analysis of equilibrium density state of highway subgrade with fine soils [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 94-103. (in Chinese)
- [4] 杨志浩,岳祖润,冯怀平. 非饱和粉土路基内水分迁移规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2241-2251.
YANG Z H, YUE Z R, FENG H P. Experimental study on moisture migration properties in unsaturated silty subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2241-2251. (in Chinese)
- [5] YUAN Y Q, ZHAO L M, LI W, et al. Research on silty soil capillary water rising in Yellow River flooded area of eastern Henan [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2016, 10(4): 40-46.
- [6] 管延华,庄培芝,李红超,等. 浸水粉土路基竖向稳定性模型试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 12-17.
GUAN Y H, ZHUANG P Z, LI H C, et al. Model test of vertical stability of silt subgrade after soaking [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(3): 12-17. (in Chinese)
- [7] 董金梅,徐洪钟,朱定华,等. 不同水环境下高分子材料改性粉土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1316-1322.
DONG J M, XU H Z, ZHU D H, et al. Experimental study on silty soil modified by polymer materials under varying water environments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1316-1322. (in Chinese)
- [8] 王明岳,孔祥辉,冉晋. 木质素改良低液限粉土相关性试验研究[J]. 路基工程, 2019(6): 51-55.
WANG M Y, KONG X H, RAN J. Experimental study on properties of lignin improved low liquid limit silt [J]. Subgrade Engineering, 2019(6): 51-55. (in Chinese)
- [9] 姜冲,黄珂,杜伟,等. 水玻璃改良低液限粉土的室内试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(4): 42-46.
JIANG C, HUANG K, DU W, et al. Experimental study on improvement of low liquid limit silt with water glass [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, 33(4): 42-46. (in Chinese)
- [10] LO S R, WARDANI S P R. Strength and dilatancy of a silt stabilized by a cement and fly ash mixture [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 77-89.
- [11] NGUYEN T T H, CUI Y J, HERRIER G, et al. Effect of lime treatment on the hydraulic conductivity of a silty soil [J]. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, 2015, 23(15): 3261-3266
- [12] CONSOLI N C, PRIETTO P D M, DA SILVA LOPES L Jr, et al. Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil [J]. Transportation Geotechnics, 2014, 1(3): 129-136.
- [13] 李沛,杨武,邓永锋,等. 土壤固化剂发展现状和趋势[J]. 路基工程, 2014(3): 1-8.
LI P, YANG W, DENG Y F, et al. Status quo and trend of soil stabilizer development [J]. Subgrade Engineering, 2014(3): 1-8. (in Chinese)
- [14] ZHU Z D, LIU S Y. Utilization of a new soil stabilizer for silt subgrade [J]. Engineering Geology, 2008, 97(3/4): 192-198.
- [15] 张建伟,王小锯,李贝贝,等. EICP-木质素联合固化粉土的试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 201-202.
ZHANG J W, WANG X J, LI B B, et al. Experimental study on silt reinforced by EICP-lignin technology [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 201-202. (in Chinese)
- [16] 刘松玉,张涛,蔡国军. 工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 1-11.
LIU S Y, ZHANG T, CAI G J. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3): 1-11. (in Chinese)
- [17] 宋修广,张宏博,王松根,等. 黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1594-1602.
SONG X G, ZHANG H B, WANG S G, et al. Hydrophilic characteristics and strength decay of silt roadbed in Yellow River alluvial plain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10):

- 1594-1602. (in Chinese)
- [18] 周天宝, 张福海, 周炳生, 等. 生物聚合物固化粉土室内试验与机理研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 107-110, 116.
ZHOU T B, ZHANG F H, ZHOU B S, et al. Laboratory experiment and mechanism of solidified soil of biopolymer [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 107-110, 116. (in Chinese)
- [19] 朱剑锋, 徐日庆, 罗战友, 等. 考虑固化剂掺量影响的镁质水泥固化土非线性本构模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2224-2232.
ZHU J F, XU R Q, LUO Z Y, et al. A nonlinear constitutive model for soft clay stabilized by magnesia cement considering the effect of solidified agent content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2224-2232. (in Chinese)
- [20] RAJASEKARAN G. Physico-chemical behaviour of lime treated marine clay [D]. Madras: Indian Institute of Technology, 1994: 452-453.
- [21] 孙海超, 王文军, 凌道盛. 低掺量水泥固化土的力学特性及微观结构[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(3): 530-538.
SUN H C, WANG W J, LING D S. Mechanical properties and microstructure of solidified soil with low cement content [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(3): 530-538. (in Chinese)
- [22] LEMAIRE K, DENELEE D, BONNET S, et al. Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt [J]. Engineering Geology, 2013, 166: 255-261.
- [23] 李晨, 张正甫, 刘松玉, 等. 水泥石灰固化软土中的钙矾石形成研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup2): 662-665.
LI C, ZHANG Z F, LIU S Y, et al. Ettringite formation in lime and cement-stabilized clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 662-665. (in Chinese)
- [24] 赵振亚, 申向东, 贾尚华. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对低掺量水泥土的强度影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(Sup1): 170-173.
ZHAO Z Y, SHEN X D, JIA S H. Influence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on strength of low proportional cemented soil [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(Sup 1): 170-173. (in Chinese)
- [25] 蔡光华, 刘松玉, 杜延军, 等. 不同活性氧化镁碳化粉土对比试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(5): 958-963.
CAI G H, LIU S Y, DU Y J, et al. Comparative experiments on carbonated silts treated by magnesia with different activity [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(5): 958-963. (in Chinese)
- [26] CAI G H, DU Y J, LIU S Y, et al. Physical properties, electrical resistivity, and strength characteristics of carbonated silty soil admixed with reactive magnesia [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1699-1713.
- [27] 陈敏, 王楠, 于景坤, 等. 氧化钙砂的致密性对其碳酸化效果及抗水化性能的影响[J]. 东北大学学报, 2005, 26(5): 470-473.
CHEN M, WANG N, YU J K, et al. Effect of compactness of CaO clinker on its carbonation and hydration resistance [J]. Journal of Northeastern University, 2005, 26(5): 470-473. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)