



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309670

引用格式:李超,顾琳琳,肖天驰,等. 固化盾构渣土路用性能及固化机理[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1667-1675.

Li Chao, Gu Linlin, Xiao Tianchi, et al. Road performance and solidified mechanism of solidified shield muck[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1667-1675.

固化盾构渣土路用性能及固化机理

李超¹, 顾琳琳^{1*}, 肖天驰¹, 吴汨², 王振³, 薛丹璇⁴

(1. 南京理工大学安全科学与工程学院, 南京 210094; 2. 南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 南京 210012;
3. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 4. 中国市政华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要 为了探究固化盾构渣土应用于道路工程建设的可行性,以南京地铁盾构渣土为研究对象,利用自主研发的绿色高分子复合固化剂固化盾构渣土。开展无侧限抗压强度、直剪试验、加州承载比(California bearing ratio, CBR)、回弹模量以及冻融循环试验探究了固化剂掺量和养护龄期对盾构渣土路用性能指标的影响,并对固化土试样进行电镜扫描和 X 射线衍射试验来探究其微观特征和固化机理。试验结果表明:复合固化剂能有效提升固化土强度,且随着固化剂掺量和养护龄期的增加,固化土强度也随之提高;固化土的 CBR 值和回弹模量也随固化剂掺量提高而显著提升,能够很好地满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)和《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中有关路用性能指标的要求;盾构渣土的抗冻融稳定性经固化处理后可有效地改善,固化土冻融前后强度和损失质量损失分别在 20% 和 1% 以下,抗冻性能指标均达到了规范要求;固化剂加入盾构渣土后其中的高分子组分会吸水溶解并与土体中的矿物离子发生静电螯合作用,在初步降低土体含水率的同时也促进了土颗粒之间的胶结团聚,与此同时,固化剂的其他组分会发生水化反应形成水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和钙矾石(Aft)等物质,这些物质填充在土体孔隙,使土体结构变得更加致密,土体的强度得到显著提升。

关键词 盾构渣土; 复合固化剂; 路用性能; 抗冻性能; 固化机理

中图分类号 U416;

文献标志码 A

Road Performance and Solidified Mechanism of Solidified Shield Muck

LI Chao¹, GU Lin-lin^{1*}, XIAO Tian-chi¹, WU Gu², WANG Zhen³, XUE Dan-xuan⁴

(1. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Nanjing Fiberglass Research & Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China;
3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
4. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

[Abstract] In order to investigate the feasibility of applying solidified shield muck in road construction, the shield muck from Nanjing Metro was taken as the research object, and the green polymer composite curing agent developed independently was used to solidify the shield muck. The impact of the curing agent dosage and maintenance age on the road performance indicators of the shield muck was analysed using various tests-unconfined compressive strength, direct shear test, California bearing ratio (CBR), resilient modulus, and freeze-thaw cycle test. In addition, the micro-characteristics and solidification mechanism of the solidified soil were investigated by scanning electron microscope and X-ray diffraction. The results indicate that the composite curing agent can effectively improve the strength of solidified muck, and with the increase of curing agent dosage and maintenance age, the strength of solidified muck also increases. The CBR and resilient modulus of solidified shield muck substantially improve as the dosage of the curing agent elevates, and the solidified soil can well meet the requirements of the *Specifications for Design of Highway Subgrades* (JTG D30—2015) and *Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement* (JTG D50—2017). The freeze-thaw resistance of shield muck is poor, while it can be effectively improved after curing treatment. The strength loss and mass loss of solidified soil are less than 20% and 1% respectively. The anti-freezing performance indicators meet the requirements of the specification. After the curing agent has been added to the soil body, the polymer components will absorb water and dissolve, creating a static chelating effect with the mineral ions in the soil, initially reducing the water content of soil and promoting the agglomeration between the soil particles. Meanwhile, the other components of the curing agent generate hydration reaction to form hydrated calcium silicate gel, ettringite and other substances to fill the internal pores of soil, making the soil structure denser and greatly improving the strength.

[Keywords] shield muck; composite curing agent; road performance; anti-freezing performance; solidification mechanism

收稿日期: 2023-12-07; 修订日期: 2024-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(42002266); 国家重点研发计划(2021YFC3002004)

第一作者: 李超(2000—), 男, 汉族, 安徽马鞍山人, 硕士研究生。研究方向: 盾构渣土固化。E-mail: 122113223513@njust.edu.cn。

* 通信作者: 顾琳琳(1987—), 女, 汉族, 河南驻马店人, 博士, 副教授。研究方向: 岩土动力学及地下工程防灾减灾。E-mail: linlin_gu@njust.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

随着中国城市轨道交通建设的蓬勃发展,每年产生大量的盾构渣土。盾构渣土具有高含水率、高孔隙率、高压缩性、低渗透性和低强度等特点^[1],无法直接应用于工程建设。目前盾构渣土的处理方法以堆放和填埋为主,资源化利用程度不高,不可避免地会产生环境污染和土地资源浪费等问题。近年来,人们多次尝试探索盾构渣土的应用方向,如生产免烧砖、复合陶粒等建筑材料^[2-3]。然而,由于工艺复杂,经济和环境效益有限,只有较少的渣土得到利用。在此背景下,对盾构渣土进行固化处理使其成为路基填料,具有良好的经济与生态效应,拥有广泛的应用前景。

中外目前对于固化处理盾构渣土方面研究较少,主要参照淤泥的固化处理。淤泥固化剂种类繁多,主要分为传统和新型淤泥固化剂。传统淤泥固化剂是以水泥基材料为主,掺入粉煤灰等工业废渣^[4-5]或碱激发材料^[6-7]减少水泥用量,提升固化土部分力学特性;新型淤泥固化剂以聚丙烯纤维^[8-9]、泡沫塑料^[10]、高分子材料^[11-12]、纳米材料^[13-15]、微生物^[16-17]或各种专用土壤固化剂构成。盾构渣土中掺入固化剂可有效地改善盾构渣土的物理力学性能,提高土体的强度及稳定盾构渣土中的污染物质。

诸多学者开展了固化剂改良淤泥的试验研究,并取得了一定的成果。在无机材料固化剂领域,Wang等^[18]采用电石渣和粉煤灰协同改良盾构渣土,土体强度显著提高,水稳性和耐久性也得到增强,改良盾构渣土可用于路基填筑,其最优混合比例为80%盾构渣土+12%粉煤灰+8%电石渣。何俊等^[19]选用矿渣和碱渣作为固化剂,水玻璃作为碱性激发剂,固化高含水率的疏浚淤泥,研究发现水玻璃的掺量对固化土中后期强度影响比较显著,碱渣相较矿渣的固化效果更好。邵吉成等^[20]研究生石灰对温州淤泥的固化效果,发现固化淤泥的工程、力学性质得到改善,提出了生石灰固化温州淤泥承载力特征值的预测方程。张启等^[21]对不同水泥掺量下固化淤泥的力学特性进行研究,得出水泥掺量越高,基质吸力越大,无侧限抗压强度和抗剪强度越大的结论。Gupta等^[22]基于无侧限抗压强度试验、劈裂抗拉试验和加州承载比试验,发现塘灰、水泥和纤维混合料使固化土强度有明显的提高,并通过试验结果建立了预测方程,研究结果可为工程应用提供参考。

近年来,利用高分子材料或有机材料与传统固化剂结合的复合固化剂日益引起人们的关注。王朝辉等^[23]将有机复合吸水材料与水泥相结合对

淤泥进行固化处理,发现DK粉吸水材料掺入淤泥后并没有发生化学反应产生新的物质,而是均匀地插入淤泥土的层间,与淤泥形成稳定整体,淤泥的力学、耐水和抗冻融性能得到提升。董辉等^[24]将两种不同生物酶与水泥混合,通过三轴剪切试验探究了生物酶在水泥固化淤泥中的固化作用,并通过微观试验探究了生物酶联合水泥固化淤泥的固化机理。李丽华等^[25]利用稻壳灰和石灰研制新型固化剂替代水泥,在降低成本的同时,固化土结构更加密实,土体的抗压强度、抗剪强度、抗变形能力和耐久性均有所增加。Cao等^[26]研究发现,有机质可以快速提升固化淤泥早期的抗压强度,但固化土中后期抗压强度增长放缓,而提高养护温度会加剧此效应。陈锐等^[27]和孙仁娟等^[28]研究了不同固化剂掺量下固化低液限粉质黏土的路用性能及固化机理,为不良路基填料的改性提供了参考。

目前对于盾构渣土的固化研究主要参考淤泥固化相关理论,而淤泥与盾构渣土物理力学特性有所差异,不能简单套用淤泥固化土研究成果。此外,中外学者对固化盾构渣土的研究主要集中在力学特性方面,缺乏对固化盾构渣土路用性能的综合分析。固化盾构渣土有作为路基填料的潜力,其路用性能直接关系到道路的长期稳定,有必要进一步研究。鉴于此,以南京地铁盾构渣土为研究对象,通过无侧限抗压强度试验、直剪试验、加州承载比与回弹模量试验以及冻融试验来研究固化盾构渣土的路用性能,并采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)试验与X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)试验研究固化土的微观特征,以揭示变化规律,进而为固化盾构渣土做路基填料的工程应用提供技术积累。

1 试验材料和方案设计

1.1 盾构渣土及其物理力学性质

本次试验使用南京市地铁5号线D5-XK04标新亭路站隧道土压平衡盾构排出渣土,地层主要有人工填土,粉质黏土,细砂等。试验采取了粉质黏土段的施工渣土,其基本物理性质指标如表1所示。图1为盾构渣土颗粒级配曲线,曲率系数 C_c 为1.02,不均匀系数 C_u 为20.05,从工程观点看,该土 $C_u \geq 5$,且 $1 \leq C_c \leq 3$,所用盾构渣土颗粒级配良好。

盾构渣土的主要力学特性与主要化学成分如表2所示。可以看出,盾构渣土在100~200 kPa压应力作用下的侧限压缩模量 $E_s = 2.25$ MPa,压缩系数 $a_{1-2} = 0.82$ MPa⁻¹,属于高压缩性土,且其黏聚力与内摩擦角远小于常规黏性土。

表1 盾构渣土物理性质指标
Table 1 Physical property index of shield muck

湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	天然含水率 $\omega/\%$	自由膨胀率 $\sigma_{ef}/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	颗粒组成/%			
								细砾 > 2 mm	砂粒 0.075 ~ 2 mm	粉粒 0.005 ~ 0.075 mm	黏粒 < 0.005 mm
1.82	1.22	48.61	19.28	33.76	18.22	15.54	1.95	1.39	43.75	36.44	18.42

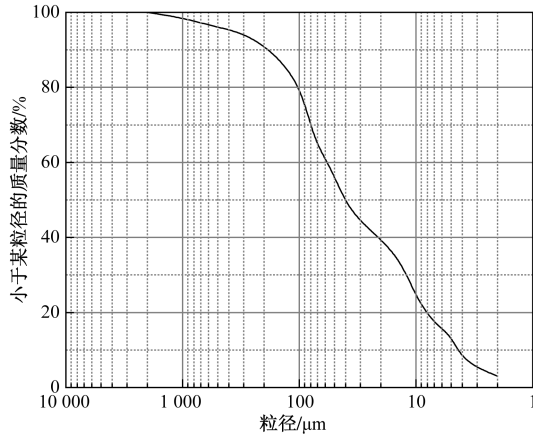


图1 盾构渣土颗粒级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of particle of shield muck

表2 盾构渣土的主要力学性质

Table 2 Main mechanical properties of shield muck

黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$
3.99	2.54	0.82	2.55	3.78×10^{-7}

1.2 路用性能试验方案

为了便于施工,盾构机在掘进过程中,会加入泡沫剂和膨润土等材料,这导致盾构渣土具有吸水性强、自由膨胀率高、内摩擦角和黏聚力小、土颗粒间联结微弱强度低等缺点。采用自主研发的绿色高分子复合固化剂(专利号:ZL202110007263.5)对盾构渣土进行固化处理,改善其力学性能使其可以成为良好的路基填筑材料。试验操作按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)进行,将复合固化剂掺入比和养护龄期作为试验变量分别开展了无侧限抗压强度试验、直剪试验、加州承载比 CBR 试验、回弹模量试验和冻融试验,表3为具体实验方案。

表3 路用性能试验方案

Table 3 Road performance test program

试验项目	固化剂掺入比/%	龄期/d
无侧限抗压强度	0,4,8,12,16	7,14,28,90,180
直剪	0,4,8,12,16	7
加州承载比 CBR	0,4,8,12,16	7
回弹模量	0,4,8,12,16	90
冻融循环	8,12,16	28

2 路用性能试验结果与分析

2.1 击实特性

对路基土进行必要的碾压,达到最优含水率和最大干密度对保证路基施工质量具有重要的指导意义。图2为不同固化剂掺量的固化土击实曲线,可以看出,随着固化剂掺量的增加,固化土的轻型击实最大干密度由 $1.79 g/cm^3$ 减小至 $1.64 g/cm^3$,最优含水率由 16.6% 增大至 19.1%。这是因为复合固化剂与盾构渣土发生水化反应消耗了部分水分,且消耗的水分随着固化剂掺量的增加增多,最优含水率增大。同时,土颗粒表面的水膜由于水化反应变薄,摩擦力增大,更难压实,因此最大干密度减小。

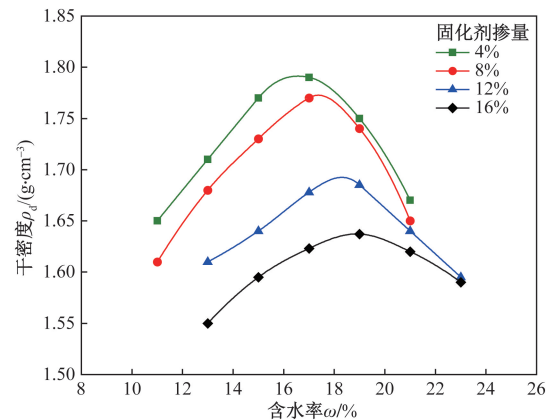


图2 固化盾构渣土击实试验曲线

Fig. 2 Compacting test curve of solidified shield muck

2.2 固化土的强度特性

2.2.1 抗压强度特性

图3为不同固化剂掺量与养护龄期下固化土的无侧限抗压强度变化曲线。可以看出,素土的无侧限抗压强度很低,7 d 仅为 653 kPa,且随着龄期增加,强度变化不大。而固化剂的加入,使得固化土的抗压强度显著增强,7 d 时,4%、8%、12% 和 16% 固化剂掺量固化土强度分别是盾构渣土的 2.1、2.4、3.4、2 倍,随着龄期增加,强度仍在提升。这表明相同龄期固化土的抗压强度随着固化剂掺量的增加逐步提高,固化剂与土体反应生成的水化产物越多,固化土强度越高。在相同固化剂掺量下,养护龄期的增加也会使土体的抗压强度有所提高,养

护前期强度增长速度较快,后期强度仍有一定提升但增长速度减小。以 12% 固化土为例,养护 7 ~ 28 d 的抗压强度增长了 51.50%,养护 28 d 到 180 d 的抗压强度仅增长了 10%。因为随着养护龄期增长,固化土中水化产物逐渐增多,水化产物和分子胶体的胶结和填充使固化土强度增加,后续固化土中水化反应结束,固化剂中的废物物粉煤灰仍可发生“火山灰反应”,强度仍可提升。

图 4 为养护 7 d 固化土的应力-应变曲线,各个掺量的固化土在受压时都会经历以下 5 个阶段:压实阶段、弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段和残余强度阶段。但应力-应变曲线弹性阶段的斜率随着固化剂掺量的增加逐渐提升,峰值强度显著提高。固化剂水化产物不仅能起胶结作用,固化土的弹性模量也得到了提高。

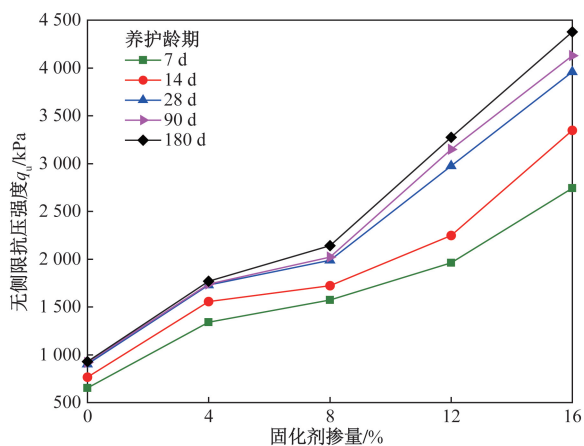


图 3 固化土无侧限抗压强度变化曲线

Fig. 3 Curve of unconfined compressive strength of solidified muck

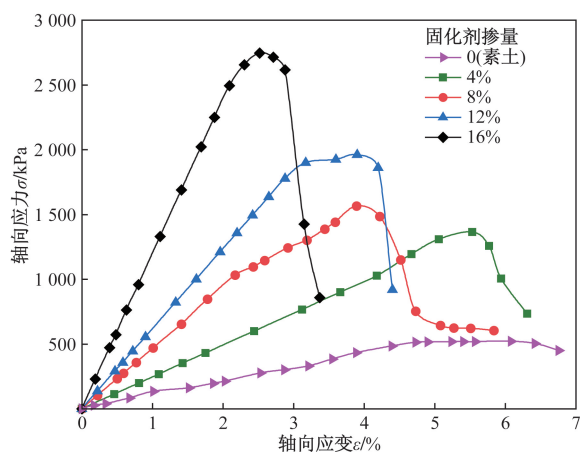


图 4 固化土应力-应变曲线(7 d)

Fig. 4 Stress-strain curve of solidified muck(7 d)

2.2.2 抗剪强度特性

图 5、图 6 为不同固化剂掺量下固化土的直剪试验结果。4% 固化剂掺量的固化土的黏聚力和内

摩擦角是素土的 4.7 倍和 5.7 倍。当固化剂掺量为 16% 时,固化土的黏聚力和内摩擦角仅为 4% 掺量的 1.5 倍和 1.4 倍,同时结合图像可知增长幅度逐步放缓。抗剪强度也随着固化剂掺量的加入逐步增强,增强幅度放缓。结合图像可知固化剂掺量与固化土的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度与固化剂掺量呈正相关,随着固化剂掺量的增加,土体的抗剪指标增强。复合固化剂反应生成的胶凝物质将土颗粒之间的空隙填充,土体之间的咬合力随之增强,固化土的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度均显著提高。

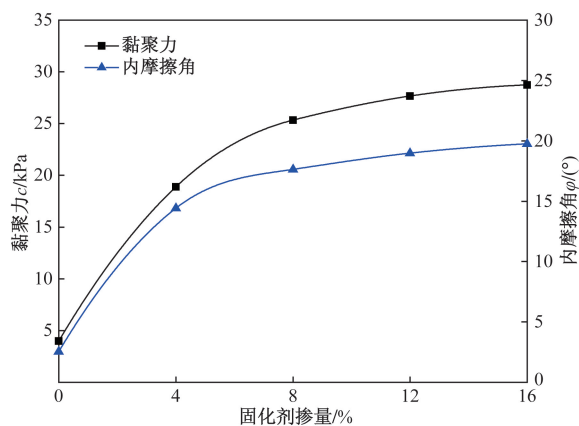


图 5 固化土的黏聚力与内摩擦角

Fig. 5 Cohesion and internal friction angle of solidified muck

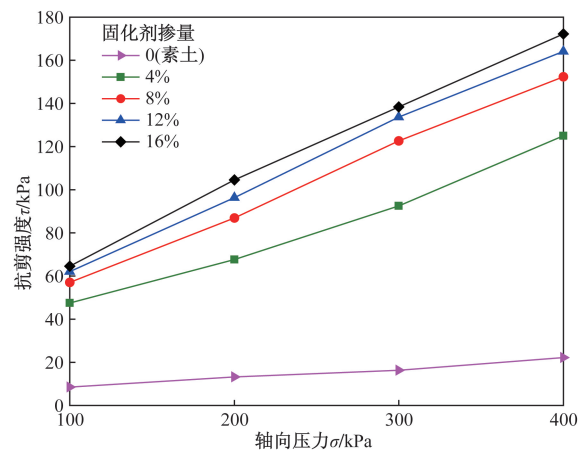


图 6 轴向压力与抗剪强度关系

Fig. 6 Relationship between axial pressure and shear strength

2.3 承载比和回弹模量试验

承载比 (CBR) 能反映基层材料的承载能力,一直作为公路路基性能评价指标。由图 7 可知,盾构渣土的 CBR = 3.05%, 固化土 CBR 随着固化剂掺入明显提高。4% 掺量的固化土 CBR = 17.06%, 与盾构渣土相比提高了 4.6 倍。当复合固化剂掺量从 4% 分别提高到 8%、12% 和 16% 时,固化土的承载比较素土分别提高了 15.1、21.1、26.3 倍,CBR 增长

速率逐渐减小,此时再增大固化剂掺量改良效果有限。《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)中要求:对于路床填料最小承载比,高速公路或一级公路上路床和下路床承载比分别不得小于8%和5%。可知未改良盾构渣土不满足规范要求,而4%以上掺量固化土的 CBR 远高于规范对路基土承载比的最低要求。

回弹模量是路面结构设计的重要参数,能反映路基的承载能力。固化土的变形-荷载及回弹模量与固化剂掺量关系如图8、图9所示。随着固化剂掺量的增加,单位压力-回弹变形($p-l$)曲线斜率均出现下降趋势,表明固化土的回弹模量随着固化剂掺量的增加而提升。由图9可知,盾构渣土的抗压回弹模量为18 MPa,4%、8%、12%、16%的固化剂掺量土的抗压回弹模量分别为347、501、638、712 MPa。复合固化剂大大改善了盾构渣土的整体刚度,主要是因为随着固化剂的掺入,反应生成的水化产物附着填充于土颗粒的孔隙和裂缝之间,使得土体的结构性得到增强,因此回弹模量得到显著提高。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)和《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中对极重等级交通荷载路基顶面的回弹模量规定略有不同,取较大者80 MPa为回弹模量要求,可知固化土能满足规范对交通荷载为极重的公路设计要求。

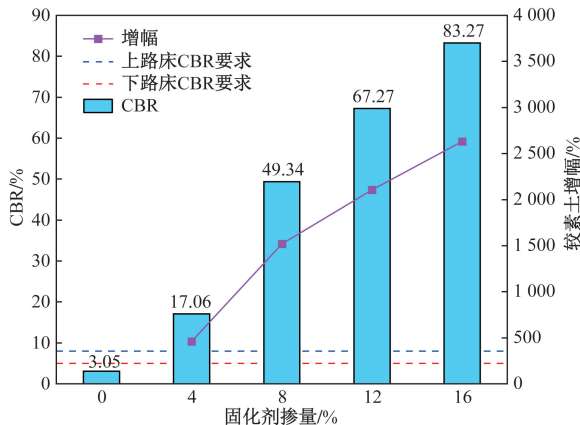


图7 不同固化剂掺量与 CBR 值的关系
Fig. 7 Relationship between content of soil stabilizer and CBR value

2.4 冻融循环试验

为研究固化土的抗冻性能,利用万能试验机按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)开展冻融循环试验。选取直径与高均为150 mm的圆柱体试模进行试件制作,成型后应将试件置于标准养护室养护28 d。试件加载前首先将试件浸水一昼夜,取出后用湿布擦除表面的水分,测量试件的高度和称重确定其质量基准值,冻

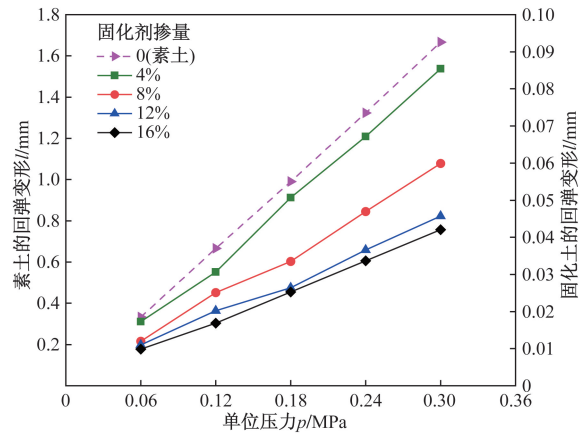


图8 不同固化剂掺量固化土的变形与荷载关系图
Fig. 8 Diagram of deformation and load relationship between pain and solidified soil with mixing ratio

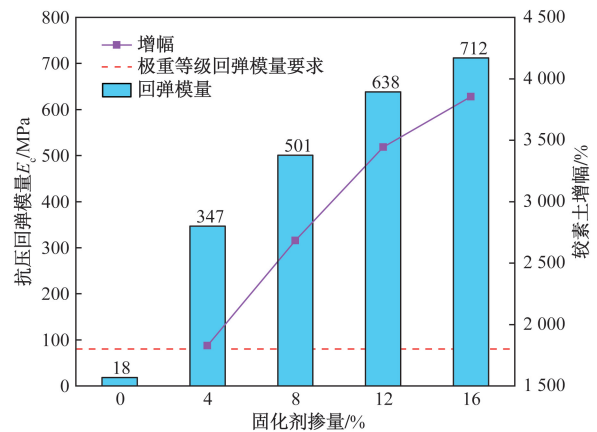


图9 不同固化剂掺量固化土的回弹模量
Fig. 9 Measured resilient modulus for the plain and solidified soil with mixing ratio

融前先测量非冻融循环条件下试件的抗压强度。进行一次冻融循环过程的步骤如下:①将冻融组试件置入温度为-18℃的低温箱中冻结16 h,为了保证空气流通,应保证试件周围至少有20 mm空隙。冻结试验结束后,取出试件,量高并称重;②立即将试件放入20℃恒温水槽中融化8 h,槽中水面应至少高出试件表面20 mm,融化结束后,擦干试件,称其质量;重复以上步骤即可实现冻融循环。本次试验中,需要进行5次冻融循环,冻融循环结束后测量其冻融组抗压强度,最后计算冻融循环后的强度损失和质量损失。

从图10可以看出,不同掺量对照组与冻融组曲线走势大体相同,塑性屈服阶段不明显。土体的应力-应变曲线在初始加载阶段,应力随变形快速增长,但应力到达峰值后迅速降低。

土体的破坏形态如图11所示,冻融前试样裂纹的发展方向与荷载方向平行或呈现较小的夹角,且试样的抗压强度越大则其主裂纹与主轴夹角越小。

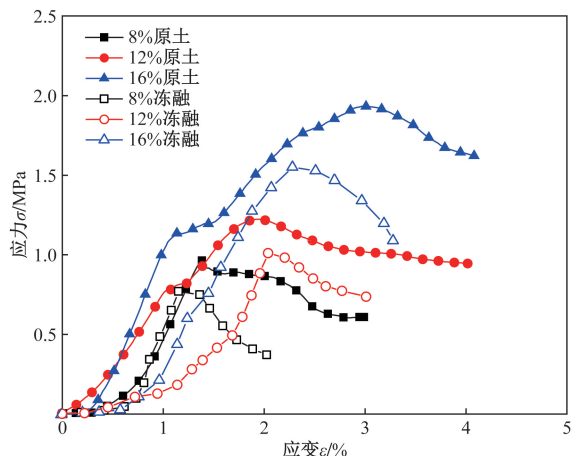


图 10 固化土冻融前后应力-应变曲线
Fig. 10 Stress-strain curve of solidified soil before and after freeze-thaw cycles

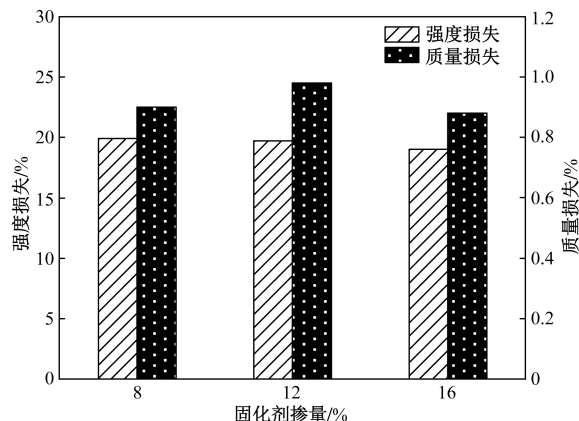


图 12 不同掺量固化土强度损失和质量损失
Fig. 12 Strength loss and mass loss of solidified muck with mixing ratio

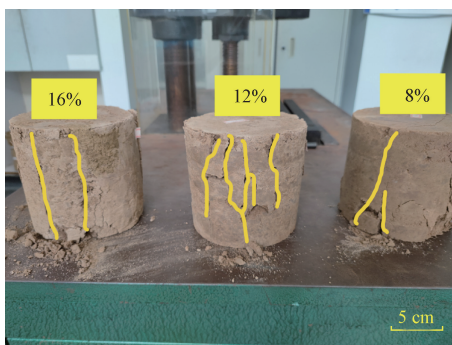
各土体质量损失均在 1% 以下且固化剂含量越高, 冻融后强度损失越小。由此可见, 掺入复合固化剂后, 固化土的抗冻性符合要求。

3 复合固化剂固化机理

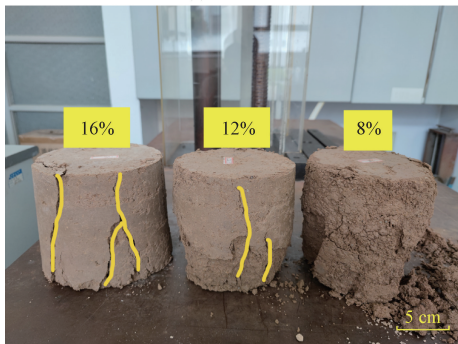
图 13 为盾构渣土固化前后的 XRD 图谱。盾构渣土主要由石英、高岭石、伊利石和云母等矿物成分组成。对比分析 XRD 图中固化前后盾构渣土的各组分衍射峰值可知, 固化剂加入后, 会在土体中发生水化反应, 生成钙矾石晶体 (AFt) 以及水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 等产物, 进而提升了盾构渣土的强度。

盾构渣土固化前后的 SEM 图像如图 14 所示。可以看出, 固化前的盾构渣土中土颗粒之间的连接方式主要为面-面接触, 还有少部分点、线接触, 土颗粒之间的接触较为松散, 孔隙数量多, 这种疏松的结构使得盾构渣土的整体性较差, 强度较低。图 13(b) 可以看出固化土的微观结构中存在大量钙矾石晶体 (AFt) 以及水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 等水化产物。可知固化剂加入后, 由于水化反应的发生, 生成的凝胶产物附着填充于土颗粒的孔隙和裂缝之间, 使得盾构渣土中土颗粒易于胶结成团状结构, 从而显著降低土体的孔隙率, 土体的结构性和强度得到增强。

结合 XRD (图 13) 和 SEM (图 14) 试验结果, 分析固化剂的主要作用机理。分析可知: 固化剂加入土体后, 首先, 由于高分子添加剂的侧链上同时存在亲水和疏水基团, 其与高含水率的流动态盾构渣土拌合、吸水后将发生静电螯合作用与疏水缔合作用, 形成具有极强黏性的分子级链状微单元, 其上高电荷的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 会与土颗粒表面吸附的 Na^+ 、 K^+ 等离子发生离子交换反应, 使得黏土颗粒间的距



(a) 冻融前



(b) 冻融后

图 11 固化土的试件破坏形态
Fig. 11 Failure mode of solidified soil specimen

这是由于随着抗压强度的增加, 其“套箍作用”愈发明显, 垫块与土样接触面上的摩擦力越能约束土样的横向变形作用。《道路固化土应用技术规程》(T/CECS737—2020) 中规定: 固化土应用于寒冷或严寒地区时, 按照标准实验流程进行抗冻性试验, 强度损失和质量损失应分别小于 20% 和 5%。

由图 12 可知, 冻融前后虽然每种固化剂掺量的土强度和质都存在损失, 但损失幅度有所不同, 8%、12%、16% 的固化土强度损失分别为 19.9%、19.7%、19%, 质量损失分别为 0.9%、0.98%、0.88%。

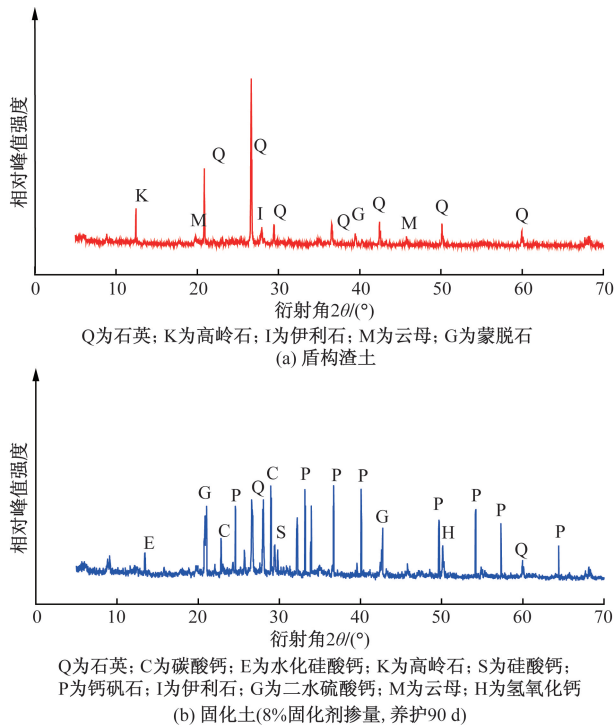


图 13 土体试样 XRD 图谱
Fig. 13 XRD pattern of soil sample

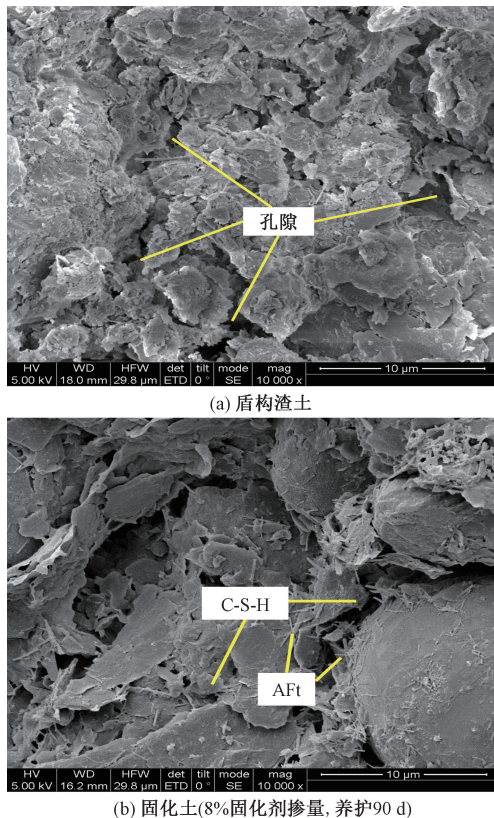


图 14 土体试样 SEM 图
Fig. 14 SEM image of soil sample

离缩短,土颗粒之间的联结性得到增强,并组成三维网状结构,同时锁住自由水,初步提高盾构渣土

的液塑限,将流塑状态的盾构渣土固化为可塑状态,作用机理如图 15 示。固化剂中的氧化钙会与水反应产生的 OH^- , OH^- 溶解在游离水中,使得盾构渣土整体处于碱性状态,可以为胶凝材料的水化反应提供碱性环境并增强高分子材料的黏性。与此同时,硅酸盐水泥发生水化反应生成大量 C-S-H 凝胶与水化铝酸钙等产物,水化铝酸钙与掺入的硫酸钙进一步反应生成钙矾石 (AFt)。钙矾石开始依附土颗粒表面生长,在表面生长空间不足时以穿刺形式出现,形成稳定的搭接结构,为土体的早期强度提供支撑;水化产物 C-S-H 凝胶和高分子胶体共同填充土体内部的孔隙,在它们的搭接作用下,土体内部形成均匀的空间结构网络,土体的整体性和强度均得到显著提高。此外,固化剂中的粉煤灰可以进一步填充土体孔隙,并在 OH^- 及硫酸钙的作用下发生“火山灰作用”增加水化产物产出,持续加强土体的结构性,提高后期强度。

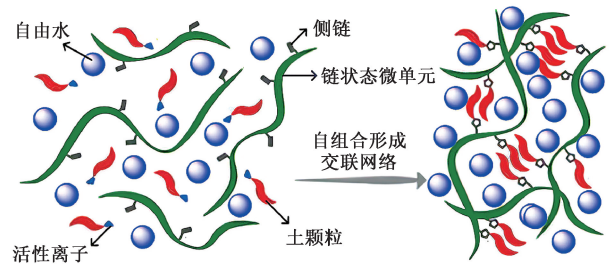


图 15 高分子材料固化机理
Fig. 15 Curing mechanism of polymer materials

4 结论

通过无侧限抗压强度试验、直剪试验、加州承载比试验、回弹模量试验和冻融试验探究了不同固化剂的掺量和龄期对固化土路用性能的影响。并通过扫描电镜和 X 射线衍射试验对盾构渣土固化前后进行微观特征分析,探究了高分子复合固化剂的固化机理。得出如下主要结论。

(1) 高分子复合固化剂的加入,不仅提升了盾构渣土的无侧限抗压强度,还增强了土颗粒之间的摩擦力和机械咬合力,使得固化土的黏聚力和内摩擦角得到明显提高,抗剪强度显著改善,且固化剂的掺量越大,改良效果就越明显。

(2) 作为路基填料,盾构渣土的路用性能指标不满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) 和《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 的要求,在盾构渣土中掺入复合固化剂可有效改善盾构渣土的力学性能。固化土的加州承载比和回弹模量随着复合固化剂掺量的增加均大幅提高,固化盾构渣土的路用性能满足规范要求。

(3)盾构渣土的抗冻性能较差,不可直接作为路基填料。在盾构渣土中掺入复合固化剂可有效改善盾构渣土的抗冻性能。随着复合固化剂的掺入,固化土冻融前后强度损失和质量损失都分别20%和1%以下,且固化剂掺量越高,冻融后强度损失越小,均达到 T/CECS737—2020 所规定的要求。

(4)通过对 SEM 图像和 XRD 图谱分析可知,固化土的主要物质为水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和钙矾石(Aft),生成的这些水化产物填充于土体的孔隙中并胶结土颗粒从而形成空间骨架结构,对土体起到支撑作用,使得固化土的整体性增强,强度显著提高。其中,固化剂中水泥组分的水化反应,使得土体在固化剂加入的早期有着明显的强度增长,而随着养护时间的增加,固化剂中的粉煤灰将逐渐发挥作用,使得固化土的无侧限抗压强度持续稳定的增长。

参 考 文 献

- [1] 张书经, 阳栋, 谭立新, 等. 盾构渣土的含水率特征及脱水技术研究[J]. 中国水土保持, 2019(8): 37-42.
Zhang Shujing, Yang Dong, Tan Lixin, et al. Study on moisture content characteristics and dehydration technology of shield dregs [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(8): 37-42.
- [2] 王树英, 占永杰, 杨秀竹, 等. 淤泥质粉质黏土地层盾构渣土免烧空心砖固化机理与质量评价[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7): 710-718.
Wang Shuying, Zhan Yongjie, Yang Xiuzhu, et al. Curing mechanism and quality evaluation of unfired hollow brick with shield muck in muddy silty clay stratum [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7): 710-718.
- [3] 李杰, 陈儀涛, 董毅萌, 等. 盾构渣土免烧陶粒的制备及其性能[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 250-254.
Li Jie, Chen Yitao, Dong Yimeng, et al. Preparation of non-fired haydite from shield muck and its properties [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2021, 38(3): 250-254.
- [4] 王东星, 王宏伟, 王瑞红. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3717-3725.
Wang Dongxing, Wang Hongwei, Wang Ruihong. Micro-mechanisms of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3717-3725.
- [5] 王旭影, 乔京生, 赵建业, 等. 电石渣激发钢渣-矿渣固化淤泥质土的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 733-739.
Wang Xuying, Qiao Jingsheng, Zhao Jianye, et al. Solidification of muddy soil with steel slag and ground granulated blast-furnace slag activated by calcium carbide slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 733-739.
- [6] 吴燕开, 胡晓士, 胡锐, 等. 烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 8-14.
Wu Yankai, Hu Xiaoshi, Hu Rui, et al. Experimental study on caustic soda-activated steel slag powder in muddy soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 8-14.
- [7] 张伟, 刘晓强, 李顺群, 等. 天津临港疏浚土固化特性及强度预测分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 20-26.
Zhang Wei, Liu Xiaoqiang, Li Shunqun, et al. Analysis on prediction of solidifying characteristics and strength of dredged soil in port vicinity area of Tianjin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4): 20-26.
- [8] Tang C S, Cheng Q, Wang P, et al. Hydro-mechanical behavior of fiber reinforced dredged sludge [J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105779.
- [9] Wang H S, Tang C S, Gu K, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced, chemically stabilized dredged sludge [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(2): 629-643.
- [10] 蔡光华, 刘松玉, 张正甫, 等. 二氧化碳泡沫法碳化加固软弱土的初探研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 34-38.
Cai Guanghua, Liu Songyu, Zhang Zhengfu, et al. Preliminary investigation on reinforcement of soft soil based on the method of carbonation by carbon dioxide foams [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 34-38.
- [11] Luan Y C, Ma X J, Ma Y, et al. Research on strength improvement and stabilization mechanism of organic polymer stabilizer for clay soil of subgrade [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02397.
- [12] 梅警方, 曾庆强, 王臻华, 等. 水泥复合固化剂加固淤泥的工程性质及机理研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(6): 215-224.
Mei Jingfang, Zeng Qingqiang, Wang Zhenhua, et al. Engineering properties and mechanism of cement composite curing agent for sludge reinforcement [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 215-224.
- [13] 王臻华, 项伟, 吴雪婷, 等. 复合固化剂固化淤泥的耐久性和稳定性研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(4): 74-78, 86.
Wang Zhenhua, Xiang Wei, Wu Xueting, et al. Durability and stability of sludge solidified by composite stabilizer [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(4): 74-78, 86.
- [14] 王立鹏, 王金昌. 纳米固化剂配比设计及固土力学性能研究[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(7): 64-67, 79.
Wang Lipeng, Wang Jinchang. The ratio of nano-curing agent and the mechanical properties of soil consolidation [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, 44(7): 64-67, 79.
- [15] 王文军, 刘志明, 汪鹏飞, 等. 侵蚀性环境下纳米矿粉—水泥固化滩涂淤泥的强度特性研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(5): 1-5, 21.
Wang Wenjun, Liu Zhiming, Wang Pengfei, et al. Study on strength characteristics of cemented beach clay mixed with nanometer mineral powder under corrosive environment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(5): 1-5, 21.
- [16] Osinubi K J, Eberemu A O, Asce M, et al. Interaction of landfill leachate with compacted lateritic soil treated with bacillus coagulans using microbial-induced calcite precipitation approach [J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2020, 24(1): 04019024.
- [17] 李赛, 雷学文, 刘磊. 玉米须加筋微生物固化淤泥的抗剪强

- 度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13837-13844.
- Li Sai, Lei Xuewen, Liu Lei. Experimental study on shear strength of silt solidified by microorganism with cornsilk fiber reinforcement[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13837-13844.
- [18] Wang J Z, Fan Y, Xiong X X, et al. Stabilization of shield muck treated with calcium carbide slag-fly ash[J]. Buildings, 2023, 13(7): 1707.
- [19] 何俊, 石小康, 栗志翔. 水玻璃-碱渣-矿渣固化高含水率淤泥的强度性质[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 729-736.
- He Jun, Shi Xiaokang, Li Zhixiang. Strength properties of dredged silt at high water content treated with sodium silicate, soda residue and ground granulated blast furnace slag[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 729-736.
- [20] 邵吉成, 袁波, 骆嘉成, 等. 生石灰固化温州淤泥的物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 421-431.
- Shao Jicheng, Yuan Bo, Luo Jiacheng, et al. Physical and mechanical properties of sludge in Wenzhou solidified by quicklime[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 421-431.
- [21] 张启, 孙秀丽, 刘文化, 等. 不同水泥掺量下非饱和固化淤泥力学特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(2): 184-191.
- Zhang Qi, Sun Xiuli, Liu Wenhua, et al. Experimental study of mechanical properties of unsaturated solidified silt with different cement contents[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2020, 60(2): 184-191.
- [22] Gupta D, Kumar A. Strength characterization of cement stabilized and fiber reinforced clay-pond ash mixes[J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2016, 2(4): 32-45.
- [23] 王朝辉, 郭滕滕, 孙晓龙, 等. 新型固化剂 CDK 固化淤泥微观结构及性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 14-19.
- Wang Chaohui, Guo Tengting, Sun Xiaolong, et al. Investigation of microstructure and performance of silt solidified by new stabilizer CDK[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 14-19.
- [24] 董辉, 程子华, 刘禹岐, 等. 生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 84-94.
- Dong Hui, Cheng Zihua, Liu Yuqi, et al. Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 84-94.
- [25] 李丽华, 韩琦培, 杨星, 等. 稻壳灰-水泥固化淤泥土力学特性及微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(12): 166-176.
- Li Lihua, Han Qiwei, Yang Xing, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of RHA-cement solidified sludge[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(12): 166-176.
- [26] Cao Y P, Zhang J, Zhao Z F, et al. Strength properties of cement-solidified dredged sludge affected by curing temperature [J]. Buildings, 2022, 12(11): 1889.
- [27] 陈锐, 郝若愚, 李笛, 等. 碱激发材料固化低液限粉黏土路用性能及抗冻融特性研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 327-337.
- Chen Rui, Hao Ruoyu, Li Di, et al. Study on road performance and freeze-thaw resistance of alkali activated material stabilized low-liquid-limit silty clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(2): 327-337.
- [28] 孙仁娟, 方晨, 高发亮, 等. 基于固化物的固化土路用性能及固化机理研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 216-223.
- Sun Renjuan, Fang Chen, Gao Faliang, et al. Study on pavement performance and solidified mechanism of solidified soil based on solid waste[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 216-223.