

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.143



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究

郭沁颖¹, 李白云², 丁建文¹, 陈剑刚², 孙帅¹, 马云龙²

(1. 东南大学 交通学院, 南京 210096; 2. 佛山市交通科技有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要:为实现泥水盾构废弃渣土的资源化利用,在石灰这一传统改良材料的基础上,通过掺入碱渣、脱硫石膏等工业废渣,以期将盾构渣土改良为路基填料。通过室内击实试验、CBR 试验、无侧限抗压强度试验、干湿循环试验以及微观试验,研究石灰-碱渣、石灰-脱硫石膏改良盾构渣土的力学性能及其浸水稳定性与耐久性,并分析其改良机理。结果表明:掺入改良材料后,渣土的力学性能得到很大改善,水稳定性与耐久性也大幅提高,具有较好的路用力学性能,其中石灰-脱硫石膏组的整体水稳定性与耐久性优于石灰-碱渣组。干湿循环过程中,掺入 3% 脱硫石膏的试样耐久性相对较好,在循环期间仅出现细小裂缝并未贯穿试样。经过石灰与脱硫石膏等复合改良后,盾构渣土具有良好的路用力学性能,可以作为路基填筑材料使用。

关键词:盾构渣土;工业废渣;力学性能;干湿循环;微观机理

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)02-0066-10

Road performance investigation of slurry shield tunnel residue improved by industrial waste residues

GUO Qinying¹, LI Baiyun², DING Jianwen¹, CHEN Jiangang², SUN Shuai¹,
MA Yunlong²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Foshan Transportat Sci & Technol Co. Ltd., Foshan 528000, Guangdong, P. R. China)

Abstract: This study is carried out to investigate the resource utilization of mud water shield residue. Industrial waste residues such as alkali slag and desulfurization gypsum are reasonably used to be combined with the traditional lime, in order to convert waste mud into qualified roadbed filling materials. Through the laboratory compaction tests, CBR tests, unconfined compressive strength tests, wetting-drying cycle tests and microscopic tests, the mechanical properties, immersion stability and durability of shield tunnel residue improved by lime-alkali slag and lime-desulfurization gypsum were studied, and the improvement mechanism was analyzed. The test results show that the mechanical properties of the soil were improved significantly after compound improvement. The water stability and durability were also greatly improved, with better mechanical

收稿日期:2022-09-27

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:郭沁颖(1998-),女,主要从事工业固废资源化利用研究,E-mail:220203407@seu.edu.cn。

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

Received: 2022-09-27

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

Author brief: GUO Qinying (1998-), main research interest: resource utilization of industrial solid waste, E-mail: 220203407@seu.edu.cn.

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

properties for road use. Among them, the overall water stability performance and durability of the lime-desulfurization gypsum groups were better than the lime-alkali slag groups. During the wetting-drying cycles, the durability of the specimens mixed with 3% desulfurization gypsum was better, with only small cracks not penetrating the specimens during the cycles. The study shows that the shield tunnel residue has good mechanical properties after compound improvement of lime and desulfurization gypsum, and can be used as roadbed filling materials.

Keywords: shield tunnel residue; industrial waste residues; mechanical properties; wetting-drying cycle; microscopic mechanism

近年来,随着城轨交通的迅猛发展,泥水平衡盾构法凭借其安全高效的优点被广泛运用于隧道工程建设中^[1]。但盾构施工过程中会产生大量废弃余泥渣土,由于存在工程性能差、外运成本高等问题,这些工程渣土大多未得到有效利用就直接消纳弃置处理,造成了渣土资源浪费和生态环保问题,因此,工程渣土减量化处理及资源化利用迫在眉睫^[2]。同时,伴随着公路建设的蓬勃发展,路基填筑材料需求量巨大^[3],如能将工程废弃渣土改良用作路基填筑材料,对于有效降低建设成本,实现盾构渣土的资源化利用具有重要意义。

目前,渣土的资源化利用途径主要包括:用作掘进泥浆或壁后注浆材料,制备烧结砖、高强陶粒及新型墙体材料,道路基础铺垫等^[4-5]。在盾构开挖过程中,为了保证掘进顺利,一般会向土体中掺入泡沫、膨润土、高分子聚合物等改性剂来提高流塑性,故相较于直接开挖土,盾构渣土具有较高的液限,需要经过改良处理才能用于道路基础铺筑。其中,一般处理方法以物理改良为主,通过掺砂、脱水干化等方式降低盾构渣土的液限^[6-7],使其满足路用性能要求;但由于缺乏晾晒场地和砂石等原料成本较高,不利于其大规模工程应用。此外,对于初始含水率较高的不良路基填料,工程上也常进行掺灰处理^[8-10],通过掺入石灰降低路基填料的含水率,减小膨胀变形,使其路用性能满足规范要求,但单掺石灰成本高且对改良土的水稳定性提升作用不佳^[11]。针对盾构渣土处理方式单一且难以大规模应用的现状,参考现有的关于土体化学改良方法,将工业废渣,如电石渣^[12]、稻壳灰^[13]、矿渣^[14]等运用到渣土改良中,开展石灰与工业废渣复合改良盾构渣土的试验研究,实现固废的再生利用,同时为改良盾构渣土在路基填筑中的大规模运用提供参考。

基于此,依托佛山市季华路西延线成套工程关键技术,根据佛山地铁中山公园站盾构渣土性质以及当地工业固废堆存情况,在石灰这一传统改良材料的基础上,利用碱渣、脱硫石膏等工业废渣进行复合改良。选用6组不同配比,开展室内击实试验、

CBR试验、无侧限抗压强度试验、干湿循环试验以及微观试验,验证改良配比的可行性,为后续现场路基铺筑提供室内研究基础和工程指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土为佛山地铁中山公园段隧道开挖产生的渣土,渣土原貌如图1所示。渣土的颗粒分布曲线如图2所示,渣土的基本物理性质指标如表1所示,土样的粗粒含量为57.1%,粉粒含量为27.8%,黏粒含量为15.1%。



图1 盾构渣土原貌

Fig. 1 Original appearance of the shield residue

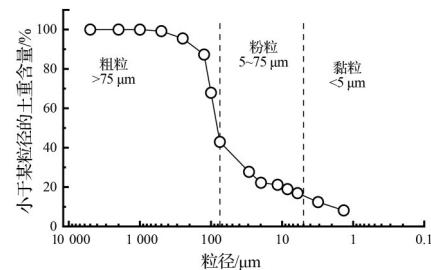


图2 渣土颗粒分布曲线

Fig. 2 Particle distribution curve of residual soil

表1 盾构渣土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of shield residue

天然含水率/%	密度/(g/cm ³)	干密度/(g/cm ³)
59.1	1.79	1.12
液限/%	塑限/%	塑性指数
44.8	21.4	23.4

盾构渣土中含有以膨润土为主的改性剂,在实际施工过程中,膨润土泥浆浓度为10%,注入比控制在15%左右。膨润土是以蒙脱石为主要成分的黏土矿物,层与层之间通过分子间力联结,层间结构松散,极易与水分子结合,吸水能力强^[15]。因此,渣土的液限较高,无法直接利用,需要经过改良处理之后才能用作路基填筑材料。

生石灰、碱渣及脱硫石膏取自施工现场,通过X射线荧光光谱分析(XRF),得出盾构渣土及改良材料的主要氧化物成分,如表2所示。X射线衍射图谱如图3所示,可以看出,渣土的主要物相成分为 SiO_2 及少量的 CaCO_3 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ;碱渣中含大量的 CaCO_3 以及少量的 CaSO_4 ,为渣土改良提供了碱性条件;脱硫石膏则为后续的反应提供大量的 SO_4^{2-} 。

表2 试验原材料主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of test raw materials

原材料	原材料各成分含量/%							
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	TiO_2	MgO
渣土	49.26	15.81	13.07	12.02	7.20		1.34	
生石灰	3.26	93.15	0.46			0.81		
碱渣	2.12	83.87		0.96		6.78	1.62	3.63
脱硫石膏		54.86		0.29		44.78		

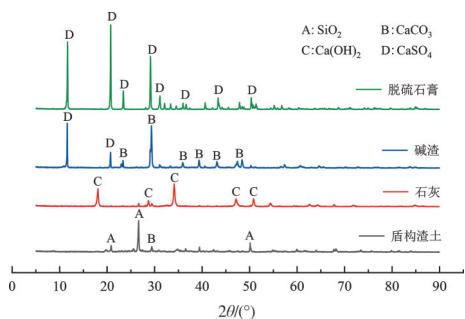


图3 试验原材料XRD衍射图

Fig. 3 XRD diffraction pattern of experimental raw material

1.2 试验方法

现有研究表明,当塑性指数较大时,石灰掺量可控制在3%~9%之间^[16-17],在此基础上,综合考虑广东佛山地区周边工业固废堆存情况,利用碱渣、脱硫石膏进行复合改良,设计试验配比如表3所示。

含水率的试样,按2%含水率递增,根据击实曲线得出素土及各配比试样的最佳含水率与最大干密度。按照96%的压实度及最佳含水率计算CBR试验用料,试验前一天备料并闷料一昼夜后,按重Ⅱ-2型击实试验流程进行击实制样,每组制备3个平行样,浸水4 d后测量其膨胀量变化并进行贯入试验。

无侧限抗压强度试验选定试样尺寸为Φ50 mm×50 mm的圆柱体,按照击实试验所得最大干密度、最佳含水率并控制96%压实度计算试样用量。试样采用静压成型法,每组试样每个龄期制备6个平行样,设定标准养护龄期为7、14、28、60 d。达到对应养护龄期的前一天,取出3个平行试样,浸水24 h后与标准养护试样一同进行无侧限抗压强度试验。将同一龄期浸水试样的无侧限抗压强度均值与标准养护试样无侧限抗压强度均值的比值K作为衡量改良材料水稳性的参考依据。

为了进一步探究改良土体的耐久性能,参考已知同类研究进行干湿循环试验^[19-20]。标准养护28 d后,对试样进行称重、编号,测量其初始直径与高度,将试样放入烘箱中烘16 h,取出拍照并测量其尺寸与质量的变化,待试样冷却后,放入水箱中,缓慢注水直至没过试样顶面,浸泡8 h,此为一次干湿循环,重复5次,完成5级干湿循环。

最后,在标准养护28 d后的试样中取1 cm³土样进行电镜扫描试验(SEM)以及X射线衍射试验(XRD),观察其微观结构,分析其改良机理。

2 试验结果分析

2.1 击实特性

不同配比下改良土的击实试验结果如表4所示,可以看出,在盾构渣土中加入改良材料后,最佳

表3 试验配比

Table 3 Experimental mix proportion

组号	石灰/%	碱渣/%	脱硫石膏/%
C1	3	3	
C2	3	4	
C3	3	6	
D1	3		1
D2	3		3
D3	3		5

将现场取回的渣土风干并过2 mm的土工筛,按照预设配比采用干土法进行试验。重型Ⅱ-2击实试验、无侧限抗压强度试验、CBR试验均根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[18]中的试验方法开展。

重型Ⅱ-2击实试验中,每组配比制备5个不同

含水率显著升高,最大干密度显著降低。这是因为石灰、碱渣、脱硫石膏均为电解质材料,在反应初期,迅速电离出高价阳离子,并与土颗粒周围的低价阳离子发生离子交换作用,增加了土颗粒间的结合能力,形成稳定的团粒结构,阻止水分进入内部,使得改良土的最佳含水率显著增加;改良材料的相对密度小于盾构渣土,从而导致最大干密度下降^[21]。

表4 击实试验结果

Table 4 Compaction test results

组号	配比	最佳含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)
	盾构渣土	16.9	1.72
C1	3%石灰+3%碱渣	21.8	1.57
C2	3%石灰+4%碱渣	22.2	1.55
C3	3%石灰+6%碱渣	22.3	1.55
D1	3%石灰+1%脱硫石膏	20.6	1.57
D2	3%石灰+3%脱硫石膏	20.8	1.55
D3	3%石灰+5%脱硫石膏	22.1	1.54

2.2 CBR值

加州承载比CBR值是评定路基承载能力的主要指标,反映了路基抵抗局部剪切破坏的能力。各组配比的膨胀量与CBR值如图4所示,其中,素土试样的CBR值和膨胀量分别为8.1%、3.0%;石灰-碱渣组对应的CBR值为135.3%、137.4%、147.7%;石灰-脱硫石膏组的CBR值分别为137.4%、141.4%、125.8%。对比素土8.1%的CBR值可以看出,改良土的CBR值分别是素土的16.7、17.0、18.2、17.0、17.5、15.5倍,有了明显提升。CBR强度的提升主要来自于火山灰反应产物水化硅酸钙(C-S-H)与水化铝酸钙(C-A-H)^[22],反应方程式如式(1)~式(3)所示,这些胶凝物质填充了土体空隙,提高了颗粒间的联结能力,形成了致密的土体结构,使各组改良土的局部抗剪切破坏能力得到了极大改善。

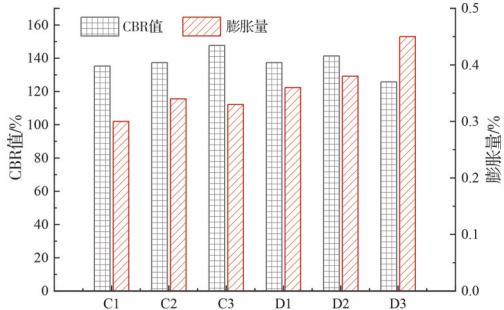
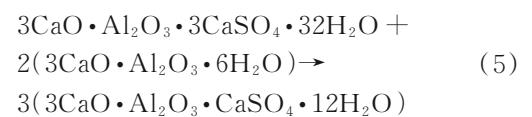
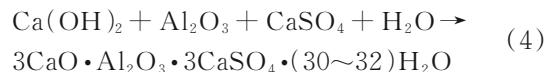
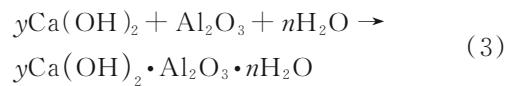
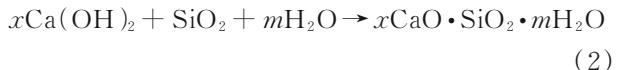
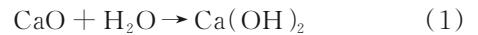


图4 CBR试验结果

Fig. 4 CBR test results

当石灰掺量一定时,随着碱渣掺量的增加,改良土的CBR值持续增加,而膨胀量则维持在0.30%~0.35%之间,总体而言变化不大。说明适

当提高碱渣掺量有助于提高土体的CBR强度,同时对于膨胀量的影响较小。而随着脱硫石膏掺量的增加,改良土的CBR值略有降低,膨胀量则持续增加。这是因为生石灰熟化产生大量的Ca(OH)₂胶体,Ca(OH)₂与土体中的活性Al₂O₃以及脱硫石膏中的SO₄²⁻反应,生成水化硫铝酸钙(即钙矾石AFt),反应方程式如式(4)所示。钙矾石填充了颗粒间的空隙,使得CBR强度有所提高,且钙矾石的生成量随着脱硫石膏掺量的增加而不断增加。由于钙矾石具有一定的膨胀性,能够吸收大量的水分子,增大颗粒间的排斥作用^[23],从而导致石灰-脱硫石膏改良土的膨胀量不断增大。随着膨胀量的持续增加,改良土中已有胶结被破坏,微观结构劣化,并最终导致强度降低。总体而言,各组配比的膨胀量均在0.5%以内,可见改良土的膨胀趋势不强^[24]。



2.3 无侧限抗压强度

图5表示各组配比无侧限抗压强度 q_u 随龄期变化的关系。可以看出,掺入改良材料后土体的力学性能得到较大改善,其7 d无侧限抗压强度可由初始的0.44 MPa提升至1.7 MPa以上。同一龄期下,改良土的 q_u 随着碱渣、脱硫石膏掺量的增加而增大;同一配比下,改良土的 q_u 随养护龄期的增加而增大;7 d养护龄期时,各个配比的 q_u 排序为D3>D2>C3>D1=C2>C1,结合各配比的总掺量可知,在相同掺量甚至更低掺量条件下,脱硫石膏就可达到与碱渣相同甚至优于碱渣的改良效果;7~28 d龄期间,石灰-碱渣组的 q_u 大幅增加,石灰-脱硫石膏组的增长则较为缓慢,28 d龄期后,两组增速均逐步减缓。这是由于与碱渣相比,脱硫石膏中含有大量的硫酸钙,在反应初期,大量的硫酸钙迅速与火山灰反应产物结合,生成钙矾石,填充土颗粒间的空隙,提高土体强度;随着硫酸根离子的消耗与体系pH值的降低,且一部分AFt(高硫型水化硫铝酸钙)转化为亚稳平衡水化物AFm(单硫型水化硫铝酸钙),导致强度增长速率明显降低。相比之下,石灰与碱渣的组合则提供了强碱性环境,可以不断促进渣土

中活性硅离子与铝离子的溶出,火山灰反应持续进行,土体聚合形成骨架,同时吸附软土小颗粒,形成较大的凝胶团,使得土体强度进一步提高。

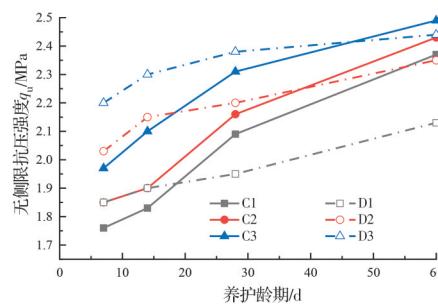
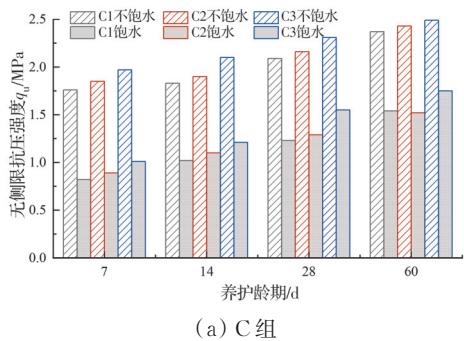


图 5 无侧限抗压强度与龄期的关系

Fig. 5 Relationship between unconfined compressive strength and curing age

图 6 为浸水前后 q_u 对比图,可以看出,浸水后各组试样的 q_u 明显下降,且随着龄期的增长,强度损失逐渐减小。各组配比的水稳系数 K 随龄期变化的关系如图 7 所示。由图 7 可知,28 d 龄期内,各组试样的水稳系数随着龄期的增加迅速增长,之后趋于平缓。对比各配比水稳系数可知,在石灰掺量一定的情况下,改良土的水稳定性随着碱渣、脱硫石膏掺量的增加而增大。当碱渣掺量由 3% 增至 4% 时,改良土的水稳系数增长缓慢,而当碱渣掺量增至 6% 时,试样的水稳定性显著提高,养护 27 d、浸水 1 d 后的水稳系数达到 0.67。同时,当脱硫石膏掺量由



(a) C 组

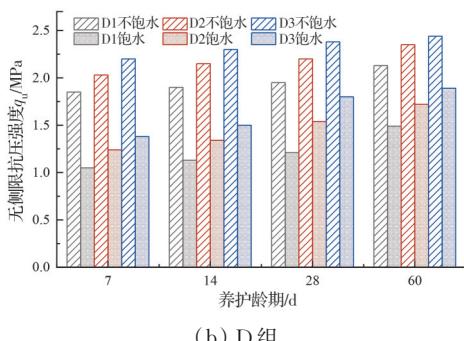


图 6 浸水前后无侧限抗压强度对比图

Fig. 6 Comparison of unconfined compressive strength before and after water immersion

1% 增至 3% 时,28 d 龄期内试样的水稳系数显著提高,养护 27 d, 浸水 1 d 后的水稳系数从 0.62 提高至 0.70, 增幅达到 12.9%, 当脱硫石膏掺量从 3% 增至 5% 时, 水稳系数增幅为 8.6%, 改良土的水稳定性进一步提高。此外,D1 组的水稳系数曲线位于 C1、C2 组上方,D2、D3 组的水稳系数均位于 C3 组上方,说明在各个对应龄期内 D1 组的水稳定性均优于 C1、C2 组,D2、D3 组的水稳定性均优于 C3 组,进一步说明在同等掺量甚至更少掺量的情况下石灰-脱硫石膏组便能达到更优的水稳定性。各组配比均可满足规范规定的高速、一级公路的底基层无侧限抗压强度要求(石灰稳定材料的 7 d 无侧限抗压强度 ≥ 0.8 MPa),说明上述改良材料与土体之间的离子交换以及火山灰反应能够有效促进试样内部形成较为稳定的骨架结构,同时进一步提升改良土抵抗侵蚀破坏的能力。

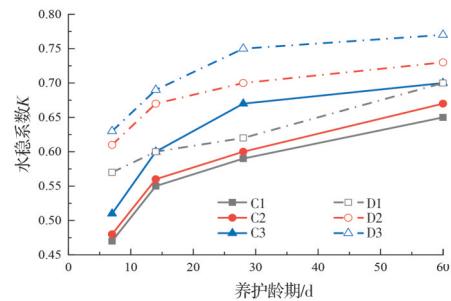


图 7 水稳系数与龄期的关系

Fig. 7 Relationship between water stability coefficient and curing age

2.4 干湿循环

佛山市地处东南沿海,夏季气温高,且时常遭受台风暴雨侵袭,在降水与蒸发的季节性作用下,道路路基长期处于饱和与非饱和交替的环境中^[25],因此,需要考虑多次干湿交替对路基填料强度的影响。结合 CBR 试验结果及无侧限抗压强度试验结果,选取 C3(3% 石灰+6% 碱渣)和 D2(3% 石灰+3% 脱硫石膏)两个配比进行干湿循环测试。

图 8 为 28 d 龄期时两个配比 5 级循环后的表现状态,由图 8 可见,在循环过程中,试样底面均出现剥落;在第 1 次干湿循环后,掺 6% 碱渣的试样整体出现明显裂缝,随着循环级数不断增加,表面裂缝扩大并逐渐延伸贯穿至整体,而掺 3% 脱硫石膏的试样则表现出良好的稳定性,循环期间仅出现细小裂缝且未贯穿试样表面。

图 9 为每级循环结束后试样高度与质量损失率的变化,第 1~3 级循环时,质量损失率增加幅度较大,随后缓慢增加,5 级干湿循环后 C3 组、D2 组的质

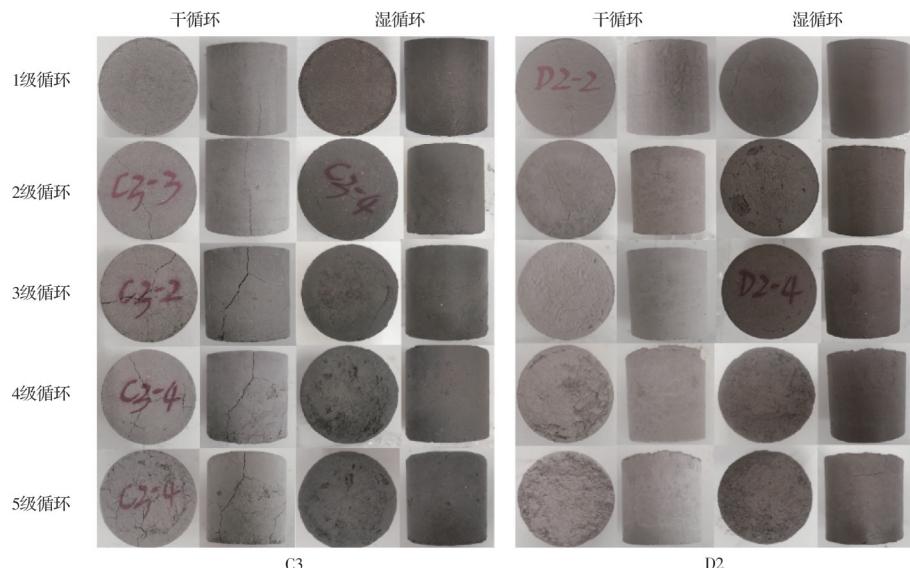


图8 干湿循环作用下试样表现状态

Fig. 8 Apparent state of specimens under the action of wet and dry cycles

量损失率分别为3.76%、2.63%;在进行循环的过程中,试样高度变化量持续增大,结合试样表观形态可知,随着循环不断进行,试样劣化,浸水后剥落颗粒变多并最终导致高度降低。

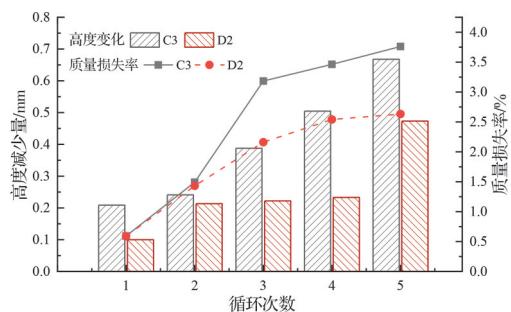


图9 干湿循环作用下试样质量损失率与浸水高度变化曲线

Fig. 9 Variation curves of specimen mass loss rate and immersion height under the action of wet and dry cycles

在干湿循环作用下,试样的无侧限抗压强度变化规律如图10所示,从图10中可以看出,28 d龄期时试样的 q_u 随着干湿循环级数的增加而降低。1级干湿循环作用下,改良土强度大幅度下降,相较于同标准养护条件下的试样(Control Group,图中以CG表示),C组和D组强度分别降低了46.27%和31.95%;3级干湿循环后, q_u 进一步下降,降幅达到65.32%、59.16%,5级循环结束后,降幅则达到73.30%、69.31%。总体来说,3%石灰+3%脱硫石膏组的耐久性能优于3%石灰+6%碱渣组。分析其原因,干湿循环作用使得水分在试样内反复浸入和蒸出,虽然在干燥的过程中烘干温度的变化能够促进水化反应,增加水化产物,提高胶结能力,但与此同时,试样内外含水率的差异也会使试样表面产生拉应力,此时,颗粒间的胶结作用不足以抵抗

拉应力,进而产生裂隙^[25]。随着循环级数的增加,微裂隙进一步扩大,从而导致土体结构遭到破坏,土体的强度降低。相较于C3组,D2组水化产物生成量更高,填充了孔隙,密实了土体,因此,D2组产生裂缝较少,耐久性能优于C3组。

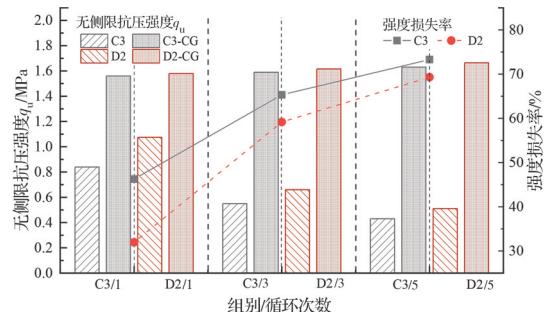


图10 干湿循环作用下无侧限抗压强度变化曲线

Fig. 10 Variation curves of unconfined compressive strength under the action of wet and dry cycles

3 微观试验结果与改良机理

3.1 微观试验分析

为了进一步研究石灰、碱渣、脱硫石膏改良盾构渣土的微观机理,取C3与D2配比的28 d标准养护试样进行扫描电镜试验(SEM)以及X射线衍射试验(XRD)。

图11为不同放大倍数下素土与改良土的扫描电镜图,对比图11(a)~(c)可以看出,素土颗粒间存在较大空隙,颗粒间的联结较弱,宏观表现为素土试样强度较低,且浸泡后水分渗透迅速,土颗粒易崩解散落。当掺入改良材料后,改良土的微观形貌更为致密,颗粒间的空隙被填充,联结能力提高,宏观表现为土体的抗压强度与水稳定性大幅提高。

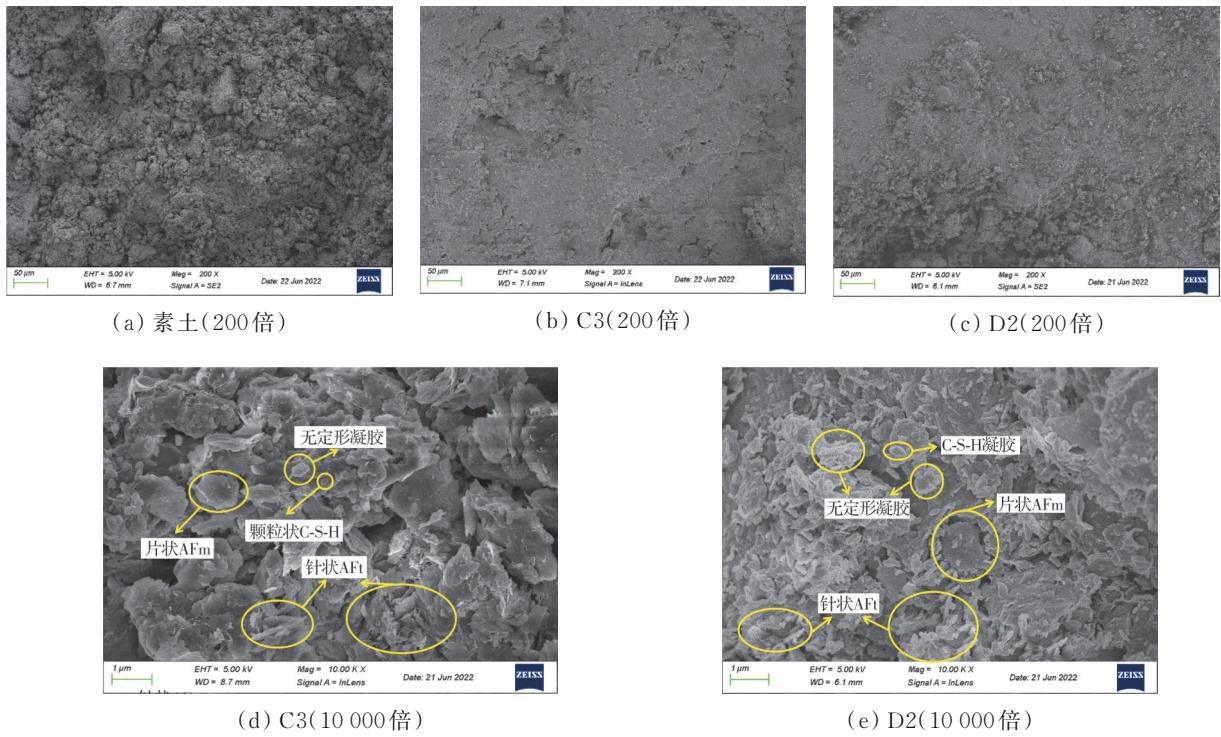


图 11 SEM 扫描电镜图

Fig. 11 SEM scanning electron microscope image

从图 11(d)~(e)可以看出, 经过一系列反应后, 生成的水化产物主要有圆形粒子状 C-S-H 凝胶, 片状的 AFm 以及针棒状的 AFt^[26], 这些胶凝物质堆积形成一些大块的无定形凝胶, 包裹住黏粒及大直径晶体, 从而形成致密的结晶网状结构。其中, 石灰-脱硫石膏组中存在大量的无定形凝胶, 相较于石灰-碱渣组, 空隙较小, 整体更为密实。

图 12 为两组改良材料 28 d 标准养护试样的 XRD 衍射图, 在衍射图谱中, 钙矾石在低衍射角度

有尖锐的衍射峰, 因此, 为了更好识别钙矾石等水化产物, 探究钙矾石生成量对两组改良材料稳定性的影响, 图 12 中截取了低衍射角度(5°~25°)的 XRD 衍射图进行进一步分析。可以看出, 在低衍射角度中, 试样的主要物相有石英(SiO₂)、钙矾石(AFt)、氧化铝(Al₂O₃)、石膏(Gyp)、碳酸钙(CaCO₃), 且较 C3 组而言, D2 组的 AFt 衍射峰更高更窄, 说明 D2 组生成了更多的 AFt 填充空隙, 使得其耐久性及水稳定性优于 C3 组。

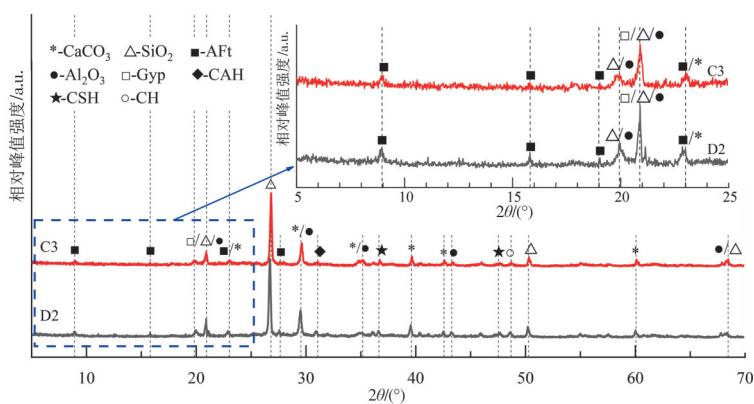


图 12 XRD 衍射对比图

Fig. 12 XRD diffraction comparison chart

3.2 改良机理分析

根据 SEM 扫描电镜的结果可以看出, C3 组与 D2 组改良土经 28 d 标准养护后生成的物质大致相同, 主要为 C-S-H、C-A-H、AFt 和 AFm 等, 其与盾

构渣土的反应主要包括以下几个方面, 微观机理如图 13 所示。

1) 生石灰消化反应。CaO 与水反应生成 Ca(OH)₂, 见式(1), 为后续反应的发生提供了碱性环境, 激发

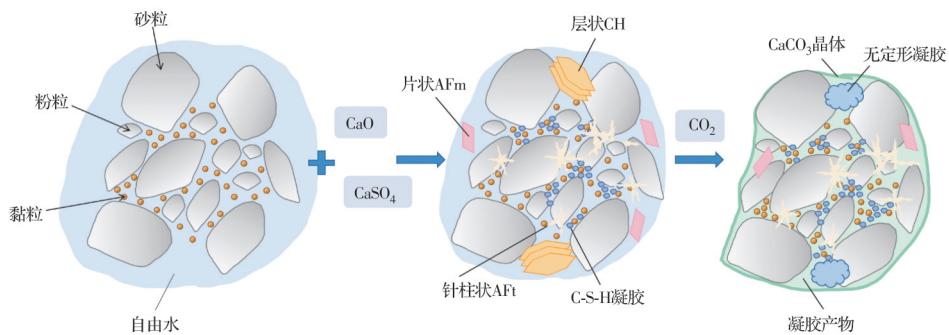


图 13 微观机理示意图

Fig. 13 Schematic diagram of micromechanism

黏土颗粒不断溶解出活性氧化铝与氧化硅,同时释放大量水化热,促进反应朝正向进行。

2) 离子交换与絮凝作用。石灰、碱渣、脱硫石膏均为电解质材料,电离出的二价阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})容易置换出蒙脱石等黏土矿物颗粒表面吸附的一价阳离子(K^+ 、 Na^+)^[27],使得黏土颗粒表面的双电层结构被破坏,外电层中的弱结合水被释放,参与到水化反应中,使得外电层水膜变薄,如图 14 所示^[28]。同时,离子交换使阳离子价位提高,颗粒间的排斥作用减小,双电层水膜进一步减薄,产生絮凝作用^[28],从而增加土颗粒间的结合力,形成稳定的团粒结构,达到良好的改良效果。

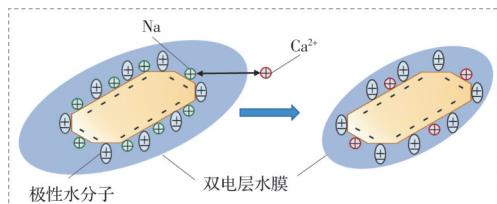


图 14 离子交换作用

Fig. 14 Ion exchange interaction

3) 胶结作用。改良材料中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaSO_4 与黏性土中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 等发生火山灰反应,生成 C-S-H、C-A-H 和 AFt 等胶凝物质,见式(2)~式(4),当 CaSO_4 不足时,一部分 AFt 将转化为 AFm,见式(5),这些胶凝物质具有水硬性,能在水环境下发生硬化,降低改良土的渗透性,形成致密的网状结构,将土颗粒更好地联结在一起,增加改良土体的强度及稳定性。

4) 碳化作用。土体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的二氧化碳发生碳化作用,形成具有微结晶性的钙-碳黏结物质,进一步提高土体的密实度,但碳化作用比较漫长且大多发生在试样表面。

3.3 讨论

两组改良土的强度增长主要来源于离子交换反应和胶结作用,但在不同的养护龄期,反应的侧重点却略有不同。在反应初期,改良材料电离出大

量的 Ca^{2+} 与黏土颗粒周围的低价阳离子发生离子交换与絮凝作用,形成早期强度;随着龄期的增长,火山灰反应不断进行,生成大量胶凝产物,形成致密的网状结构,保证了强度的增长及稳定,在这个过程中,与碱渣相比,脱硫石膏中 SO_4^{2-} 含量更高,生成更多的 AFt 填充空隙,因此,D2 组(石灰-脱硫石膏组)前期的 q_u 大于 C3 组(石灰-碱渣组);反应后期,火山灰反应持续进行,C 组 q_u 不断增长,而脱硫石膏难以为火山灰反应提供必要的碱性环境,导致 D 组后期 q_u 增长缓慢,两组改良土的长期强度接近并趋于稳定。

4 结论

以广东佛山某泥水盾构渣土为研究对象,开展利用工业废渣改良渣土的室内试验,研究石灰-碱渣、石灰-脱硫石膏复合改良盾构渣土用作路基填料的可行性。主要结论如下:

1) 掺入改良材料后,土体的力学性能得到了较大改善,各配比的 CBR 强度与无侧限抗压强度均大幅提高;在相同甚至更低的掺量下,脱硫石膏便可达到与碱渣相同甚至优于碱渣的改良效果。

2) 改良材料大幅提高了土体的水稳性能,水稳系数随着龄期及改良材料掺量的增加而逐步增长;28 d 龄期内水稳系数迅速增长,后趋于平缓;当碱渣掺量由 4% 增至 6%、脱硫石膏掺量由 1% 增至 3% 时,水稳系数明显增加;石灰-脱硫石膏组的整体水稳性优于石灰-碱渣组。

3) 干湿循环过程中,试样底面出现剥落现象,在第 1 次干湿循环后,掺 6% 碱渣的试样就出现明显裂缝,随后裂缝扩大并贯穿至整体,而掺 3% 脱硫石膏的试样耐久性相对较好,在循环期间仅出现细小裂缝且并未贯穿试样表面。

4) 室内击实试验、CBR 试验、无侧限抗压强度试验、干湿循环试验以及微观试验表明,经过石灰与脱硫石膏等复合改良后,盾构渣土具有良好的路用力学性能,可以作为良质路基填筑材料。

参考文献

- [1] HUANG W M, WANG J C, YANG Z X, et al. Analytical method for structural analysis of segmental lining interaction with nonlinear surrounding soil and its application in physical test interpretation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127: 104601.
- [2] 陈蕊, 杨凯, 肖为, 等. 工程渣土的资源化处理处置分析[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 22-26.
CHEN R, YANG K, XIAO W, et al. Analysis on recycling treatment and disposal of engineering slag [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 22-26. (in Chinese)
- [3] PATEL S, SHAHU J T. Comparative study of slags stabilized with fly ash and dolime for utilization in base course [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(10): 04017168.
- [4] 朱瑜星, 卞怡, 闵凡路, 等. 地铁盾构渣土改良为流动化土进行应用试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53 (Sup1): 245-251.
ZHU Y X, BIAN Y, MIN F L, et al. Improvement of metro shield muck to controlled low-strength material [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup1): 245-251. (in Chinese)
- [5] 高瑞晓, 荣辉, 王海良, 等. 800密度等级的渣土陶粒制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1646-1650.
GAO R X, RONG H, WANG H L, et al. Preparation and performance of 800 density grades muck-ceramsite [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36 (5): 1646-1650. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's subgrade engineering research·2021 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(3): 1-49. (in Chinese)
- [8] SHINAWI A E. Instability improvement of the subgrade soils by lime addition at Borg El-Arab, Alexandria, Egypt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 130: 195-201.
- [9] VIET-DUC N. Experimental water quality analysis from the use of high sulfuric fly ash as base course material for road building [J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2019, 9(5): 4627-4630.
- [10] 赵天宇, 曹志伟, 张宗伟, 等. 石灰与水泥对甘肃省黄土路基填料改良效果研究[J]. 公路, 2021, 66(10): 51-57.
ZHAO T Y, CAO Z W, ZHANG Z W, et al. Research on improvement effect of lime and cement on loess subgrade filler in Gansu Province [J]. Highway, 2021, 66(10): 51-57. (in Chinese)
- [11] 张赛, 章剑青, 尚石磊, 等. 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[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 33-44.
ZHANG S, ZHANG J Q, SHANG S L, et al. Laboratory investigation on the solidified waste silt from Nanjing Yangtze river floodplain as subgrade filling [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46 (3): 33-44. (in Chinese)
- [12] 杜延军, 刘松玉, 覃小纲, 等. 电石渣稳定过湿黏土路基填料路用性能现场试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 375-380.
DU Y J, LIU S Y, QIN X G, et al. Field investigations on performance of calcium carbide residues stabilized over-wet clayey soils used as highway subgrade materials [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(2): 375-380. (in Chinese)
- [13] NUGROHO SA, FATNANTA F, ONGKO A, et al. Behavior of high-plasticity clay stabilized with lime and rice husk ash [J]. Makara Journal of Technology, 2021, 25(3): 105-110.
- [14] 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 J, SHI X K, LI Z X. Strength properties of dredged silt at high water content treated with sodium silicate, soda residue and ground granulated blastfurnace slag [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 729-736. (in Chinese)
- [15] 李彩霞, 李俊, 徐猛, 等. 氯盐溶液对钠基膨润土垫层的膨胀性能影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(1): 97-104.
LI C X, LI J, XU M, et al. Influence of chlorine salt solution on the swelling properties of sodium bentonite cushion [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(1): 97-104. (in Chinese)
- [16] 姜起斌. 深茂铁路阳西至马踏段高液限土改良研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
JIANG Q B. Study on improvement of high liquid limit soil in Yangxi-Mata section of Shenzhen-Maoming Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [17] 章为民, 戴济群, 王芳. 高液限路基土改良设计方法研究[J]. 路基工程, 2006(5): 76-77.
ZHANG W M, DAI J Q, WANG F. Research for de-

- sign method of the HLL clay subgrade soil stabilization [J]. Subgrade Engineering, 2006(5): 76-77. (in Chinese)
- [18] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [19] KAMON M, SUPAKIJ N, TAKESHI K. Utilization of stainless-steel slag by cement hardening [J]. Soils and Foundations, 1993, 33(3): 118-129.
- [20] 潘浩. 赤泥磷石膏固化重金属污染土的特性和机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- PAN H. Study on characteristic and mechanism of red mud and phosphogypsum solidifying heavy metal contaminated soil [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [21] 孙树林, 郑青海, 唐俊, 等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1608-1612.
- SUN S L, ZHENG Q H, TANG J, et al. Experimental research on expansive soil improved by soda residue [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1608-1612. (in Chinese)
- [22] ZIMAR Z, ROBERT D, ZHOU A, et al. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114926.
- [23] JAMES J, PANDIAN P K. Plasticity, swell-shrink, and microstructure of phosphogypsum admixed lime stabilized expansive soil [J]. Advances in Civil Engineering, 2016, 2016: 9798456.
- [24] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851-855.
- TAN Y Z, KONG L W, GUO A G, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 851-855. (in Chinese)
- [25] 李芳菲, 华渊, 刘文化, 等. 干湿循环条件下水泥固化疏浚淤泥的物理力学特性[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 344-350.
- LI F F, HUA Y, LIU W H, et al. Physico-mechanical characteristics of cement-solidified dredged sludge under drying and wetting cycle [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(2): 344-350. (in Chinese)
- [26] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 2版. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1996.
- YUAN R Z. Cementitious material science [M]. 2nd edition. Wuhan: Wuhan Industrial University Press, 1996. (in Chinese)
- [27] WIREKO C, ABICHOU T, TIAN K, et al. Effect of incineration ash leachates on the hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners [J]. Waste Management, 2022, 139: 25-38.
- [28] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. Soil mechanics [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)