

工程废弃泥浆固化土路用性能研究

金茂祥¹, 黄志坚²

(1. 绍兴市交通工程管理中心, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江大学 滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为研究废弃泥浆固化土在填筑路基时的路用性能, 本文通过室内试验和现场测试对其强度、压实度和回弹模量等特性进行了评估。以杭州某高速公路路基填筑工程为依托, 通过现场测试, 在不同含水率和压实次数下对废弃泥浆固化土路基的填料压实度和 CBR 值等进行了测试分析。随后, 通过室内静动力试验, 对固化土路基在环境干湿循环效应下的强度进行了分析, 并研究了循环荷载下固化土路基的回弹模量变化, 综合评估其路用性能。研究表明: 当泥浆固化土添加 4% 水泥和 4% 石灰时, 其压实度可以控制在 96% 以上, CBR 为 9%~10%; 在环境干湿循环效应下, 固化土的无侧限抗压强度先迅速下降后趋于稳定, 在 10 次干湿循环后强度为 0.60 MPa, 满足一级公路指标要求; 在 96% 压实度下, 固化土路基回弹模量能达到 156 MPa 以上, 且路基干湿循环效应对回弹模量影响较小, 其回弹模量满足路基设计要求。

关键词: 固化土; 路用性能; 循环荷载; 回弹模量; 干湿循环; CBR

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0083-07

Study on road performance of solidified soil with engineering waste sludge

JIN Maoxiang¹, HUANG Zhijian²

(1. Shaoxing Traffic Engineering Management Center, Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: To investigate the road performance of solidified sludge as a subgrade fill material, this study conducted laboratory experiments and field tests to assess its strength, compaction characteristics, and resilient modulus. By focusing on a highway subgrade filling project in Hangzhou, on-site tests were employed to analyze the compaction degree and CBR value of the solidified sludge subgrade under various water contents and vibration times. Subsequently, laboratory static-dynamic tests were conducted to analyze the strength of the solidified soil subgrade under dry-wet cyclic effects. Additionally, the changes in resilient modulus of the solidified soil subgrade under cyclic loading were investigated to provide a comprehensive evaluation of its road performance. The findings reveal that the addition of 4% cement and 4% lime achieves a compaction degree exceeding 96% and a CBR of 9%~10% in solidified sludge. Moreover, under environmental dry-wet cycles, the unconfined compressive strength of the solidified soil initially experiences rapid decline before stabilizing. After ten dry-wet cycles, its strength reaches 0.60 MPa, meeting the requirements of first-grade highway specifications. Furthermore, at 96% compaction degree, the resilient modulus of the solidified soil subgrade exceeds 156 MPa, with minimal impact from dry-wet cycles. Consequently, the resilient modulus satisfies the design criteria for the subgrade.

Key words: solidified soil; road performance; cyclic loads; resilient modulus; dry-wet cycles; CBR

0 引言

随着大量交通设施的建设与环境保护要求的日益提高, 道路填筑所需的优质路基填料日益紧缺。

另一方面, 工程废弃淤泥具有含水率高、承载力低、渗透性差的特点, 难以直接利用, 使其成为难以解决的环境问题。通过固化方式改善淤泥质土力学特性, 使其满足路基填料使用要求, 从而实现资

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-06-20

作者简介: 金茂祥 (1964—), 男, 浙江绍兴人, 本科, 高级工程师, 从事公路、水运工程质量安全监管工作。E-mail: 57424896@qq.com。

源化再利用,具有重要意义。

关于废弃泥浆固化及其固化特性,国内外学者做了大量的研究。邓永忠^[1]、高敏杰等^[2]通过改变压实度、石灰剂量、养护条件、含水率等,对石灰土中有效钙镁含量的衰减进行了试验研究。罗伟^[3]采用石灰与粉煤灰对钻井废弃泥浆进行固化,发现石灰与粉煤灰配比为1:3且掺配比为60%时其固化强度最高。杨爱武等^[4]利用GU型粉末固化剂分析了吹填泥浆固化土无侧限抗压强度与水灰比和龄期的关系。杨爱武等^[5]用水泥对城市污泥进行了固化,发现固化土线缩率随着养护龄期的增长而增大,且均在养护龄期为28d后趋于稳定。方春林^[6]在钻孔废弃泥浆固化试验中,发现以水泥、生石灰等固化剂成分进行固化的土样,其压实度与24d CBR(加州承载比)值可以达到路基设计的规范要求。朱超鹏等^[7]通过无侧限抗压强度试验发现9%的粒化高炉矿渣改性软土比未处理的软土强度高约28%,但进一步增加粒化高炉矿渣的用量对土体强度的提升作用有限。孙仁娟等^[8]基于粉煤灰、矿渣、脱硫石膏、普通硅酸盐水泥和固废基硫酸铝酸盐水泥制备了粉土固化剂,固化剂掺量不低于8%时,固化土强度满足规范要求,固化土CBR值高于75%,满足路基填料承载比要求。赵晓婉等^[9]对加入高分子吸水树脂(SAP)的水泥固化土的强度、压实度、耐久性等相关路用性能进行分析研究,试验结果表明:掺入SAP可明显提高水泥固化土无侧限抗压强度,最高可达185%;掺入SAP可改善水泥固化土压实特性,最优含水率约提高2%;随着干湿循环次数的增加,SAP、水泥固化土试样的质量损失量会随之减小,而无侧限抗压强度可增加至121%,表明SAP可改善水泥固化土的耐久性。徐日庆等^[10]通过高炉矿渣、粉煤灰和电石渣研制了ZX20固化材料,发现该材料固化土水稳性明显优于二灰土,而且强度大大提高,但是干湿循环作用对该固化路基土的强度影响较大。汪焯^[11]对高质量粉质黏土添加减水剂,发现其无侧限抗压强度相对于原土提高45.93%,压缩系数比原土减小62.5%。张立群等^[12]对水泥固化土的收缩特征进行了研究,结果表明,前15d内水泥土干缩变形达到稳定状态的90%,并针对现有水泥固化土抗裂性能评价指标的不足,提出了一种考虑干缩变形影响的评价指标。但上述研究存在一定的局限性,未有系统研究自然环境下固化土干湿循环效应对其强度与压实度的影响,且未有涉及交通循

环荷载下固化土路基回弹模量的劣化规律,进而难以对固化土的长期路用性能进行有效评价。

针对上述问题,本文依托杭州某公路路基填筑工程,采用室内试验与现场测试,对废弃泥浆固化土路基的路用性能进行系统研究,从干湿循环效应下路基压实度、CBR、回弹模量等方面对路基的路用性能进行评价。

1 工程背景

1.1 工程概况

杭州某公路原路基宽度为35.0m,本次增设互通主线两侧双拓宽为标准八车道,拓宽后主线路基宽度为41m。项目设计填方量约40万m³,固化土填料采用厂内集中拌合、全封闭运输和摊铺机摊铺工艺(其中第一、二层推土机摊铺)。固化土采用双掺的方式生产,即在单掺固化剂的基础上进行复掺其他固化剂。本次采用的是4%的生石灰和4%的水泥。

1.2 土源情况

(1) 干化土

一般由建筑泥浆处理厂对集中处置的工程泥浆经分离、沉淀、絮凝、压滤等工艺得到初步脱水的泥饼。

含水率宜为30%~40%,不应超过40%,有机质含量不应超过5%,液限含水率不应超过50%。

(2) 其他废弃土

由各类建(构)筑物、桩基础、基坑围护结构以及盾构开挖、管网暗挖、河道拓宽等施工产生的废弃土,粗粒土含量不超过10%,且最大粒径不超过40mm;对直接使用的废弃土,含水率、有机质含量及液限含水率要求同干化土,对天然含水率超过50%的废弃土应先进行脱水处理。

1.3 固化土施工

桩基泥浆经收集、运输到统一的堆积池后,用泥浆泵泵送入脱水处理装置,待泥浆的水分被挤排后掺生石灰块,经挖掘机初步拌合后集中焖料,最后经粉碎加工,加入固化剂生石灰(II级灰标准)和水泥(上虞海螺P.O42.5)充分拌合(见图1),全封闭运输到现场做为路基填料。通过固化土试验段填筑,项目取得了固化土掺灰量、最优含水量、松铺系数、采用设备组合及压实遍数等技术参数,参照试验段成果进行后续规模化施工(见图2)。

泥浆干化土物理力学性能、生石灰化学成分及水泥的基本性能指标见表1~表3。



图 1 固化土拌合
Fig. 1 Solidified soil mixing



图 2 摊铺施工
Fig. 2 Paving construction

表 1 泥浆干化土物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of sludge dried soil

最优含水率 ω /%	最大干密度 ρ /(g/cm ³)	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p	颗粒分析试验/%		
					<0.005 mm	0.005~0.075 mm	>0.075 mm
16.1	1.61	38.1	27.1	11.0	17.6	56.8	25.6

表 2 生石灰化学成分

Table 2 Chemical composition of quicklime

化学成分	CO ₂	CaO	MgO	SO ₃
含量/%	3	78	3	1

表 3 水泥的基本性能指标

Table 3 Basic performance indexes of cement

细度(80 μ m)/%	密度/(g/cm ³)	比表面积/(m ² /kg)	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
2.5	3.13	375	5.4	9.1	23.5	48.6

2 路基标准

目前尚无固化土路基的填筑标准, 只能参考

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[13] 和《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)^[14] 的压实度、CBR 等指标, 具体指标如表 4、表 5 和表 6 所示。

表 4 不同等级公路压实度标准^[13]

Table 4 Compaction standards for different grades of highways^[13]

挖填类型	路床顶面以下深度/m	压实度/%			
		高速公路、一级公路	二级公路	三、四级公路	
路堤	上路床	0~0.3	≥96	≥95	≥94
	下路床	0.3~1.2	≥96	≥95	≥94
	上路堤	1.2~1.5	≥94	≥94	≥93
	下路堤	>1.5	≥93	≥92	≥90
零填及挖方路堤	0~0.3	≥96	≥95	≥94	
	0.3~0.8	≥96	≥95	—	

表5 不同部位填料 CBR 标准^[14]
Table 5 CBR standards for different parts of fill materials^[14]

填料应用部位	路面底以下深度/m	填料最小承载比CBR/%				
		高速、一级公路	二级公路	三、四级公路		
路基	上路床	0~0.30	8	6	5	
	下路床	轻、中及重交通	0.30~0.80	5	4	3
		特重、极重交通	0.30~1.20			
	上路堤	轻、中及重交通	0.80~1.50	4	3	3
		特重、极重交通	1.20~1.90			
	下路堤	轻、中及重交通	≥1.50	3	2	2
特重、极重交通		≥1.90				
零填及挖方路基	上路床	0~0.30	8	6	5	
	下路床	轻、中及重交通	0.30~0.80	5	4	3
		特重、极重交通	0.30~1.20			

表6 无侧限抗压强度标准^[15]
Table 6 Unconfined compressive strength standards^[15]

路基部位	无侧限抗压强度/MPa	
	高速公路、一级公路	二级及二级以下公路
路床	轻、中等及重交通	≥0.8
	特重、极重交通	≥1.0
上路基、下路基	≥0.6	≥0.6
地基土置换	>0.4	

采用路基设计规范的压实度与 CBR 指标控制固化土路基质量, 仅能体现填筑时质量。表 6 的无侧限抗压强度标准是重要补充指标, 该指标反映固化土无侧向限制下的抗轴向压力能力, 可评估其在交通荷载与自然环境作用下的强度稳定性。不同公路等级与交通荷载状况有对应要求, 其与压实度、CBR 指标共同构成完善的固化土路基质量标准体系。

3 泥浆固化土路用性能

3.1 压实度

因路基填筑较厚、取土深度较浅, 会导致所测得压实结果不能准确反映该层底面的压实度, 故采用环刀进行测试土样取土时需要贯穿整个测试土层, 根据位置分上、中、下 3 层, 以获得该测试段准确的压实度。测试结果如图 3 所示。

图 4 为不同振压遍数下 3 层土含水率, 由图 3 和图 4 可知, 随着振压遍数的增加, 3 层土的压实度都逐渐上升。第 1 层土(表层土)和第 3 层土(底层土)的压实度随着振压遍数的增加先上升后趋于平缓, 而第 2 层土在其趋于平缓后迅速上升,

中间土体压实度上升速度慢于两侧土体, 故在表层土振压合格后应再额外振压 2 次, 使得下层土压实度达到规范要求。土体含水率都随着振压遍数的增加而减少, 在第 9 次后, 趋于平稳。

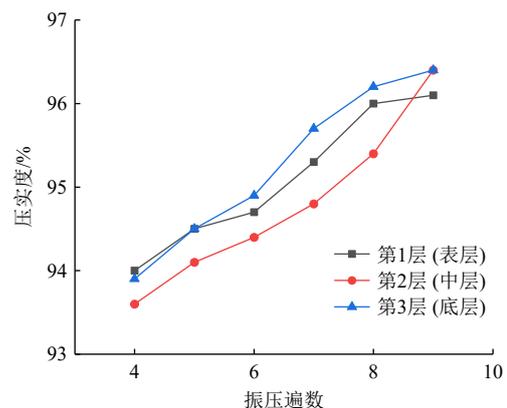


图3 不同振压遍数下压实度

Fig. 3 Compaction degree under different vibration times

3.2 CBR

加州承载比(CBR)可以表征填料抵抗局部荷载压入变形的能力, 是评价路基填料强度的重要指标。对试样进行 CBR 试验, 具体结果如图 5 所示。

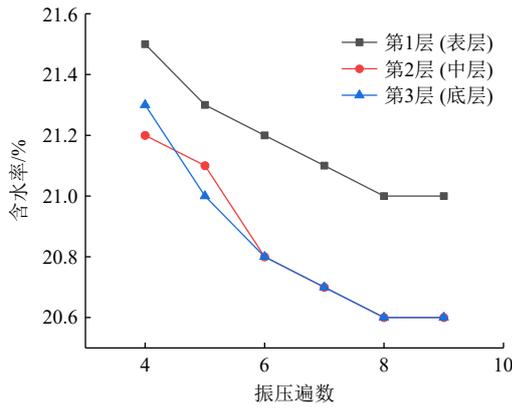


图 4 不同振压遍数下 3 层土含水率

Fig. 4 Water content of three layers of soil under different vibration times

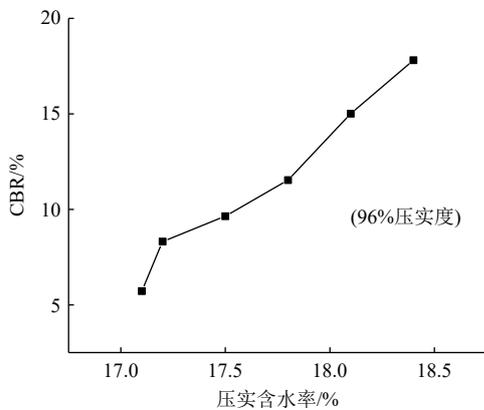


图 5 96% 压实度下 CBR 与试样压实含水率关系图

Fig. 5 Relationship between CBR and the compacted water content of samples at 96% compaction degree

图 5 为压实度为 96% 情况下试样 CBR 值与压实含水率的关系图, 这表明试样的 CBR 值与压实含水率呈线性相关。随着试样压实含水率的增加, 试样的 CBR 增加。故在水网密集地区或者降水量丰富地区, 其路基 CBR 值要高于干旱地区。

3.3 干湿循环效应

由于固化土性质不如传统填料稳定, 故还需要考虑长期交通荷载以及雨水干湿循环下的路用性能。

干湿循环是固化土吸水与失水的过程, 在该过程中固化土容易产生扩张与收缩现象, 期间会导致土体孔隙率增加, 使得固化土因为结构性破坏, 强度降低。不同干湿循环次数下固化土无侧限抗压强度见图 6。

固化土的无侧限抗压强度随着干湿循环次数的变化曲线分 3 个阶段, 第 1 次干湿循环时, 固化土强度急剧下降, 第 2 次和第 3 次时其处于缓慢下降阶段, 第 4 次开始慢慢趋于稳定。这说明第 1 次进行干湿循环时, 其固化土内部土体结构变化大, 导致强度降低较快, 后面随着火山灰反应不断地填充薄弱部位, 其强度逐渐趋于稳定。第 3 次之后, 其

无侧限抗压强度趋于稳定。第 10 次干湿循环后, 其无侧限抗压强度为 0.60 MPa。

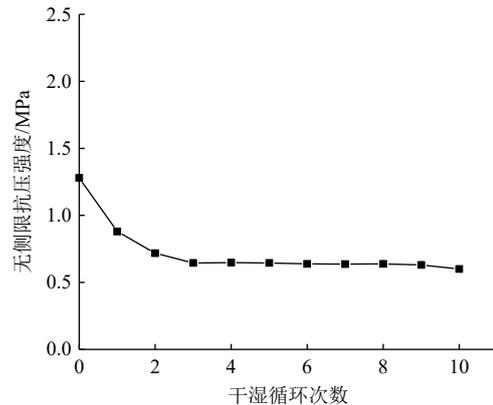


图 6 不同干湿循环次数下固化土无侧限抗压强度

Fig. 6 Unconfined compressive strength of solidified soil under different dry-wet cycles

图 7 为固化土的回弹模量在不同干湿循环次数下的变化关系。由图 7 可知, 固化土的回弹模量受干湿循环影响较小, 其值基本稳定在 157 MPa。

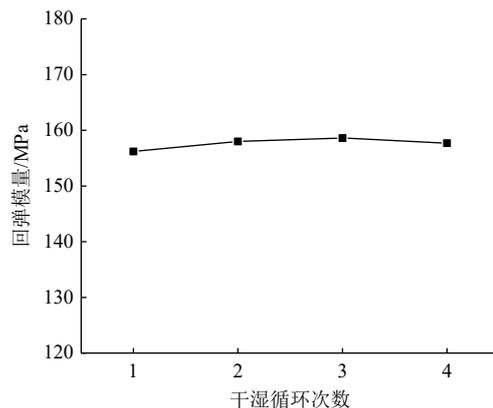


图 7 不同干湿循环次数下固化土回弹模量

Fig. 7 Resilient modulus of solidified soil under different dry-wet cycles

3.4 循环动力荷载试验

循环荷载作用下路基回弹模量是路基设计的关键参数, 路基由于内部孔压的累积和刚度的软化极易产生较大的弹性变形。为考虑固化土在循环动力下的性能, 对试样土体考虑了 3 种低围压 ($\sigma_3 = 20、40、60 \text{ kPa}$) 情况, 在循环应力比 $\zeta = 1 \sim 4$ 范围内进行逐级循环加载试验。

$$\zeta = q^{\text{ampl}} / \sigma_3 \quad (1)$$

式中: q^{ampl} 为循环偏应力; σ_3 为试验中施加于土体的侧向压力。

$$q^{\text{ampl}} = \sigma_1^{\text{max}} - \sigma_1^{\text{min}} \quad (2)$$

式中: σ_1^{max} 为最大主应力; σ_1^{min} 为最小主应力。

试验采用的循环三轴试验系统如图8所示, 试样土样如图9所示, 试验结果如图10所示。

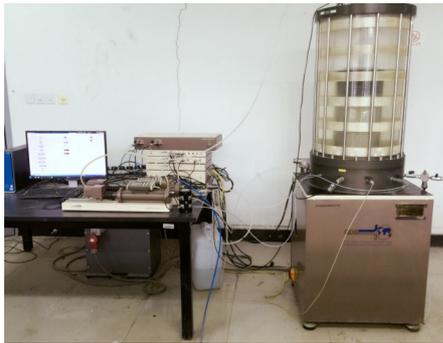


图8 循环三轴试验系统

Fig. 8 Cyclic triaxial testing system



图9 试样土样

Fig. 9 Soil sample specimen

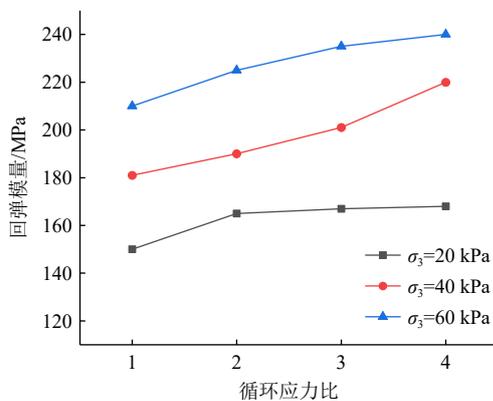


图10 不同围压下固化土回弹模量

Fig. 10 Resilient modulus of solidified soil under different confining pressures

图10为不同围压下石灰固化土回弹模量随加载周期的变化曲线, 从图中可知, 在相同循环应力比条件下, 石灰固化土的回弹模量呈现出随围压增大而显著提升的趋势。在不同围压下, 回弹模量均随循环应力比的增大而增大。其中, 围压 $\sigma_3 = 20$ kPa时, 因土体初始松散、颗粒约束弱, 在循环应力比1~2区间, 颗粒大幅调整致回弹模量增长幅度相对较大, 此后结构趋于稳定, 增长趋势变缓; 围压 $\sigma_3 = 60$ kPa时, 由于土体初始密实、颗粒约束

强, 在1~2区间内结构优化使回弹模量增长幅度相对较大, 之后因结构调整困难, 增长趋势变缓; 而围压 $\sigma_3 = 40$ kPa时, 土体初始状态居中, 在循环应力比1~3区间, 结构调整相对平稳, 回弹模量增长幅度相对较小, 超过3后土体达到临界状态, 结构显著变化, 增长趋势变大。

4 结论

本文依托固化土路基工程, 对固化泥浆土进行压实度、CBR、干湿循环以及循环动力加载特性4方面的研究, 并对照既有规范, 可得出以下结论:

(1) 固化泥浆土的压实度和CBR都能满足工程需求, 但在水系丰富地区, 建议其压实度 $\geq 96\%$, CBR为9%~10%。

(2) 干湿循环对于固化泥浆土的无侧限抗压强度影响较大, 对其回弹模量影响较小。其无侧限抗压强度随着干湿循环次数先急剧减少, 从1.28 MPa减少为0.60 MPa, 在第10次干湿循环后趋于稳定。虽然仍满足路基设计要求, 但减少量较大, 在低洼积水路段要注意路基的养护。

(3) 固化泥浆土的回弹模量会随着循环应力比的增大而增大, 尤其是上方荷载较大时, 增加较多。故固化泥浆土路基在路基加固较好的情况下, 对于重载道路有较好的适用性。

(4) 泥浆固化土在4%石灰和4%水泥双掺配比和施工下, 满足该路段路用要求。

参考文献

- [1] 邓永忠. 石灰土有效钙镁含量与强度关系的试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
DENG Yongzhong. The experimental research on relationship between effective calcium and magnesium content in lime-soil and strength[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [2] 高敏杰, 邓永忠, 李国芬, 等. 石灰土有效钙镁含量衰减规律的试验分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008(7): 49-51.
GAO Minjie, DENG Yongzhong, LI Guofen, et al. Experimental analysis of attenuation law of effective calcium and magnesium content in limesoil[J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2008(7): 49-51.
- [3] 罗伟. 钻井废弃泥浆固化路基材料性能研究[D]. 成都:

- 西南石油大学, 2015.
- LUO Wei. Study on material properties of solidified subgrade of drilling waste mud[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [4] 杨爱武, 钟晓凯, 梁超, 等. 吹填泥浆固化及长期力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2589–2596.
- YANG Aiwu, ZHONG Xiaokai, LIANG Chao, et al. Experiment study of solidification performance and long-term mechanical properties of dredger filled mud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2589–2596.
- [5] 杨爱武, 胡垚. 新型城市污泥固化土工程特性及微观机理[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 69–78.
- YANG Aiwu, HU Yao. Study of engineering properties and micromechanism of new municipal sludge solidified soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 69–78.
- [6] 方春林. 工程建设废弃泥浆资源化利用试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- FANG Chunlin. Experimental study on resource utilization of abandoned mud in engineering construction[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [7] 朱超鹏, 潘林有, 余闯, 等. 水泥固化温州污染土的力学性质和微观结构特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 117–123.
- ZHU Chaopeng, PAN Linyou, YU Chuang, et al. Mechanical properties and microstructure characteristics of cement solidification pollution soil from Wenzhou[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 117–123.
- [8] 孙仁娟, 方晨, 高发亮, 等. 基于固弃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): 216–224.
- 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): 216–224.
- [9] 赵晓婉, 许益东, 戴迪, 等. 高分子吸水树脂加固水泥固化土的路用性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(11): 154–158.
- ZHAO Xiaowan, XU Yidong, DAI Di, et al. Experimental study on pavement performances of cement-stabilized soil reinforced with super absorbent polymers[J]. Industrial Construction, 2021, 51(11): 154–158.
- [10] 徐日庆, 朱坤垆, 黄伟, 等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 167–174.
- XU Riqing, ZHU Kunlong, HUANG Wei, et al. Experimental study on solidification and road performance of mucky soil[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(3): 167–174.
- [11] 汪焯. 基于固化技术的高含水量粉质粘土填方路基压实特性分析[D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2022.
- WANG Ye. Characteristic analysis of high water content silty clay filling subgrade compactor based on Solidification Technology[D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [12] 张立群, 张学峰, 崔宏环, 等. 水泥固化土抗裂性能评价研究[J]. 公路, 2022, 67(6): 325–331.
- ZHANG Liqun, ZHANG Xuefeng, CUI Honghuan, et al. Research on the evaluation of anti-cracking performance of the cement stabilized soil[J]. Highway, 2022, 67(6): 325–331.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specifications for Construction of Highway Subgrades: JTG/T 3610—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇道路路面设计规范: CJJ 169—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Pavement Design of Urban Road: CJJ 169—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.