

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.015

粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基填料水稳性与 耐久性研究

郭乔明¹, 陈峰¹, 李春志², 张育铨², 杨璐¹, 陈慧¹, 关博文³, 赵华²

(1. 江西省交通投资集团有限责任公司; 2. 南昌大学工程建设学院; 3. 长安大学材料科学与工程学院)

摘要: 为探究粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉作为路基填料的水稳性和耐久性,采用试验结合数值模拟的方法,在分析粉煤灰和矿渣的质量比以及激发剂模数对粉煤灰-矿渣地聚物砂浆、粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料无侧限抗压强度影响规律的基础上,采用优化的配合比制备粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料,开展了软化系数和干湿循环试验,并通过有限元模型分析了在车辆荷载作用下不同干湿循环次数对粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基沉降的影响。结果表明:地聚物掺量显著影响粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料的水稳性与耐久性,软化系数随着地聚物掺量的提升呈增大趋势,由 0.77 提高到 0.81;粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料在 30 次干湿循环后强度损失率为 3.8%;路基最大沉降量随干湿循环次数增加呈现非线性增长特征,且沉降量随深度增加逐步衰减;由于黏土矿物吸水膨胀而破坏颗粒间的胶结作用,红壤土掺量对粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料的胶结性能有显著影响。

关键词: 地聚物; 长石粉; 路基填料; 水稳性; 耐久性; 数值模拟

Research on water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler

Guo Qiaoming¹, Chen Feng¹, Li Chunzhi², Zhang Yucheng², Yang Lu¹, Chen Hui¹, Guan Bowen³, Zhao Hua²

(1. Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd.; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University;
3. School of Material Science and Engineering, Chang'an University)

Abstract: To explore the water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler, a method combining experiments and numerical simulation was adopted. Based on the analysis of the influence of the mass ratio of fly ash and slag and the modulus of activator on the unconfined compressive strength of fly ash and slag geopolymer mortar and fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture, the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture was prepared with the optimized mix ratio. The softening coefficient and dry-wet cycle tests were carried out, and the finite element model was used to analyze the influence of different dry-wet cycle times on the settlement of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed under vehicle load. The results show that the dosage of geopolymer significantly affects the water stability and durability of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture. The softening coefficient increases from 0.77 to 0.81 with the increase in the dosage of geopolymer. The loss rate of strength of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture after 30 dry-wet cycles is 3.8%. The maximum settlement of the roadbed shows a nonlinear growth trend with the increase of dry-wet cycle times, and the settlement gradually decreases with the increase in depth. Due to the water absorption and expansion of clay minerals, which destroy the cementation between particles, the dosage of red soil has a significant impact on the cementation performance of the fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder mixture.

Key words: geopolymer; feldspar powder; roadbed filler; water stability; durability; numerical simulation

长石粉作为含锂瓷土矿提锂后的副产品^[1],其消纳问题一直未能有效解决。随着新能源锂电产业的规模发展,矿产资源开发的规模持续扩张,长石粉、尾渣等工业固体废弃物的存量迅速上升^[2]。据统计,全国重要的锂资源供应地江西宜春每年平均可产出长石粉 3 000 万 t,未来随着碳酸锂产能的提升,长石粉的

基金项目: 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2023C0014)

作者简介: 郭乔明(1976—),男,高级工程师,主要从事道路桥梁工程研究。E-mail:1617242511@qq.com

通信作者: 赵华(1982—),女,副教授,博士,主要从事道路工程材料研究。E-mail:zhaohua@ncu.edu.cn

产出量将急剧增长,远超传统玻璃、陶瓷产业对于长石粉的消纳能力^[3]。长石粉长时间堆放,不仅会占用大量的土地资源,而且由于其颗粒较小,很容易形成浮尘和扬沙而影响环境^[4],长石粉的处置与资源化利用难题正逐步凸显为锂电产业可持续发展的关键制约瓶颈。与此同时,公路工程每年仅路基工程就消耗水泥和石灰等凝胶材料超 10 亿 t。由于长石粉物理化学性质稳定,洁净度较高^[5],属于一般固体废弃物,可以大规模回收利用,所以将长石粉作为路基填料用于公路路基填筑中,可以推动长石粉的资源化利用^[6]。

长石在地壳中含量丰富,广泛存在于火山岩、变质岩和沉积岩中^[7],主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 等^[8],基本结构单元为 Si-O 四面体,具有较好的稳定性和高硬度等特点,但不具备黏结性能^[9-10]。化学方法是对土体固化稳定提高其工程特性常用的手段之一,使用的化学材料通常有水泥、石灰和粉煤灰等无机材料^[11],以及高分子聚合物等有机材料^[12-13]。在无机材料中,常用的固化稳定材料是水泥,但水泥是一种钙基材料,其抗碳化能力及耐久性能在硫酸盐侵蚀或频繁干湿循环等环境下存在不足^[14],并且水泥生产过程中会排放大量的 CO_2 造成环境污染,不符合绿色低碳的发展理念^[15]。地聚物是采用以硅铝质工业固体废弃物粉煤灰、矿渣等为前驱材料制备的一种新型绿色固化胶凝材料,具有显著的经济效益和优异的综合性能,其力学性能优于传统硅酸盐水泥,表现出快硬早强、耐酸碱性、低渗透率、抗侵蚀以及良好的耐久性等特点^[16-17],有望替代传统硅酸盐水泥黏结剂用于固化水泥基材料来生产道路基层填料。

目前,对地聚物稳定固体废弃物材料的研究已取得了丰硕的成果。例如:李永翔等^[18]使用粉煤灰、矿渣配合湿电石渣作为前驱材料制备地聚物并固化煤矸石,研究结果表明,混合料满足基层强度要求,可以作为道路基层填料用于公路工程,且收缩性能表现更优;杨振甲等^[19]采用矿渣-粉煤灰二元地聚物来固化淤泥,其力学性能及路用性能均满足工程要求,且地聚物掺量为 20% 时固化土的抗干缩性能最优, Na_2O 与 Al_2O_3 摩尔比为 1.0、 SiO_2 与 Al_2O_3 摩尔比为 2.5 时混合料的强度最大;吴伟军等^[20]利用工业废弃物赤泥为前驱材料制备地聚物并对低液限粉土进行固化,发现 16% 掺量的赤泥固化土 7 d 无侧限抗压强度和劈裂强度分别是粉土的 6.2 倍和 5.1 倍,赤泥地聚物掺入粉土中,水化反应生成的 C-S-H 与 C-A-H 凝胶物质包裹着土颗粒,且生成的钙矾石晶体穿插在土颗粒之间使其成为一个整体,提高了固化土的强度;Raza 等^[21]使用粉煤灰和高炉矿渣替代聚乙烯纤维轻质地聚物复合材料中的硅酸盐水泥,发现在 5% 浓度 Na_2SO_4 溶液中放置 90 d 和 180 d 的地聚物试样质量损失率最低和最高分别为 5.50% 和 8.92%,表现出更好的耐久性能;Rahman 等^[22]利用石灰石工业废粉与矿渣和粉煤灰来制备混合料试块,在浸泡 28~90 d 后,试块吸水率在 2.6%~3.8% 之间变化,并且在矿渣、粉煤灰、石灰石粉掺量分别为 50%、10%、40% 时制备的混合料试块透水深度最小,表现出较好的水稳性;Zhang 等^[23]使用粉煤灰-矿渣地聚物固化废弃钻井泥浆来制备道路基层填料,研究发现随着矿渣粉掺量由 60% 增加到 100%,混合料的力学性能均明显提高,水稳性和抗干湿循环性能小幅度下降,但各组试件均满足路面设计规范对耐久性的要求,用作道路基层填料的稳定性是有保证的。

此外,也有一些学者通过数值模拟方法研究了固体废弃物填料路基的受力和变形规律。例如:乔瑞军等^[24]利用 MIDAS GTS 软件研究了隧道爆破洞渣高填方路基沉降影响因素以及分层填筑施工下路基位移场和应力场特征,提出了利用隧道洞渣填筑路基的方案和路基沉降的控制技术;李涵等^[25-26]数值模拟了考虑吸湿膨胀变形的泥岩填料路基沉降变形规律,构建了基于泥岩湿化变形的路基沉降变形计算数学模型,发现泥岩填料遇水膨胀不仅速度快而且膨胀变形较大,并给出了工程解决措施;李永靖等^[27]利用数值模拟方法对煤矸石填料路基进行了地震荷载作用下的响应分析;邹敏等^[28]使用有限元软件建立镍铁渣-黏土路基模型,分析了镍铁渣-黏土填料、车辆速度和交通荷载对镍铁渣-黏土路基动态应力与变形的影响;Gao 等^[29]利用数值模拟软件建立了填方路基全生命周期的应力与变形计算模型,对不同阶段填方路基模拟计算结果表明,填土自身的压缩固结是导致路基长期沉降的主要原因,路基中心沉降最大且对全生命周期变形最敏感。

尽管对各种固体废弃物路基填料已进行了大量研究,但关于长石粉作为路基填料的相关研究仍较少。为了评价长石粉路基填料的水稳性与耐久性,本文通过制备粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料开展了长石粉路基填料软化系数和干湿循环试验,并通过 ABAQUS 有限元软件建立地聚物固化长石粉路基结构模型分析了不同干湿循环次数下长石粉路基的沉降规律。

1 材料与试验

1.1 试验材料

试验所用的材料包括 F 类 II 级粉煤灰、S95 矿渣粉、长石粉、红壤土、复合液态碱性激发剂。长石粉由宜

春时代新能源科技有限公司提供,为钼铈矿提锂后的副产品,呈淡黄色颗粒状,通过液塑限联合测定法得到长石粉的液限为 25.9%,塑限为 19.0%,塑性指数为 6.9,属于砂性土。红壤土取自江西省新余市某高速改扩建施工现场附近,红壤土样的液限为 40.0%,塑限为 20.3%,塑性指数为 19.7,属于高塑性土。地聚物的制备方式为将粉煤灰和矿粉充分混合后,加入由 NaOH 溶于水玻璃混合搅拌制成的复合液态碱性激发剂拌和而成。原材料经 X 射线荧光光谱(XRF)分析测试的化学成分见表 1,图 1 为原材料的 X 射线衍射(XRD)图谱。由图 1 可知,粉煤灰的主要矿物成分为石英和莫来石;矿渣粉未发现明显的特征峰,表明其主要成分是玻璃质的非晶态物质;长石粉的主要矿物成分为石英和长石等;红壤土的主要矿物成分为石英和蒙脱石,其中石英的含量远高于蒙脱石。

表 1 原材料的化学成分
Table 1 Chemical composition of raw materials

材料	各化学成分的质量分数/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
粉煤灰	49.26	30.14	5.16	6.53	2.16	2.62	0.76	1.51
矿渣粉	34.50	17.70	1.03	34.00	1.64	6.01	1.72	1.14
长石粉	80.10	11.30	0.11	0.51	0.08	0.04	3.77	3.51
红壤土	66.72	21.08	7.42	0.07	0.07	0.68	0.11	1.93

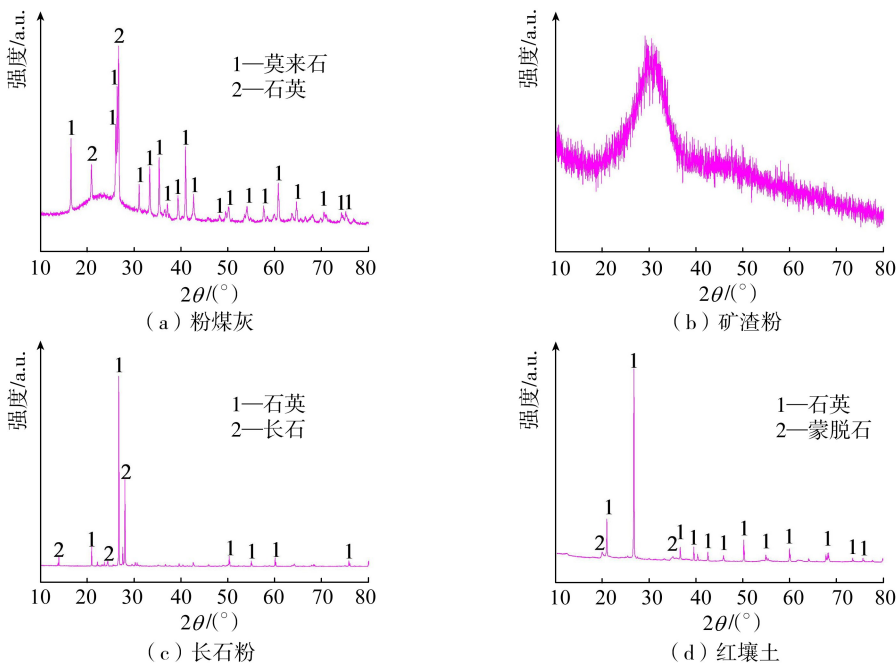


图 1 原材料的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD pattern of raw materials

1.2 粉煤灰-矿渣地聚物砂浆配合比设计

为了验证地聚物凝胶材料的力学性能,结合相关地聚物的研究成果^[17-19,23],以粉煤灰与矿渣粉质量比为 7 : 3 制备粉料,并且以 Na₂O 质量占粉料质量的百分比为第二变量制备地聚物,本文设计的 3 种不同激发剂模数的粉煤灰-矿渣地聚物砂浆配合比见表 2。

根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》的规定,将地聚物替代水泥,采用标准砂制备 40 mm×40 mm×40 mm 立方体粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试样,标准养护 7 d 和 28 d 后进行无侧限抗压强度试验,每组配合比均制备 3 个平行试样,取平均值作为测试结果,如图 2 所示。

表 2 粉煤灰-矿渣地聚物砂浆配合比
Table 2 Mix proportion of fly ash and slag geopolymer mortar

试样编号	激发剂模数	各组成成分的掺量/%		
		粉煤灰	矿渣粉	Na ₂ O
A1	1.0	70	30	5
A2	1.0	70	30	10
B1	1.5	70	30	5
B2	1.5	70	30	10
C1	2.0	70	30	5
C2	2.0	70	30	10

由图 2 可知,A 组(A1 和 A2)试样无侧限抗压强度表现最好,7 d 的无侧限抗压强度可达到 28 d 的 76%以上,同时 B 组(B1 和 B2)试样初期强度略低,但 28 d 的无侧限抗压强度与 A 组的相差无几,后期强度发展潜力较大。在 C2 试样中,过多的水玻璃会因为结合水较多导致试块的水化反应减弱,从而降低粉煤灰-矿渣地聚物砂浆的无侧限抗压强度。除此之外还可以看到激发剂模数越大,粉煤灰-矿渣地聚物砂浆的早期强度越低,原因是随着激发剂模数的增大,Na₂O 含量减少,溶液的碱性降低,低碱性环境下会减弱对铝硅酸盐原料粉煤灰的溶解作用,导致原料中的活性组分(Si 和 Al)溶出变慢,地质聚合反应的初始阶段受阻。

基于上述粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验结果,开展粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉组成设计,每组设置 10%、20%两种不同掺量的地聚物,制备粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉混合料(以下简称“混合料”)。通过击实试验确定混合料各配合比的最佳含水率和最大干密度,混合料的配合比及击实试验结果如表 3 所示。

表 3 混合料配合比及击实试验结果

Table 3 Mix proportion and compaction test results of mixture

试样编号	激发剂模数	各组成成分的掺量/%			最佳 含水率/%	最大干密度/ (g/cm ³)
		长石粉	地聚物	红壤土		
A10	1.0	90	10	0	20.00	1.61
A11	1.0	80	10	10	20.53	1.58
A12	1.0	70	10	20	19.88	1.55
A20	1.0	80	20	0	20.92	1.60
A21	1.0	70	20	10	20.73	1.55
A22	1.0	60	20	20	21.52	1.52
B10	1.5	90	10	0	20.60	1.60
B11	1.5	80	10	10	20.23	1.58
B12	1.5	70	10	20	20.78	1.55
B20	1.5	80	20	0	22.64	1.59
B21	1.5	70	20	10	21.42	1.57
B22	1.5	60	20	20	21.90	1.55
C10	2.0	90	10	0	19.62	1.62
C11	2.0	80	10	10	19.78	1.58
C12	2.0	70	10	20	19.70	1.56
C20	2.0	80	20	0	20.53	1.58
C21	2.0	70	20	10	21.85	1.55
C22	2.0	60	20	20	20.72	1.53

依据 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,将粉煤灰、矿渣粉、长石粉、红壤土烘干后混合干拌均匀,然后添加激发剂。激发剂按照最佳含水率配置,但为方便工程应用,后续试验分别以 20%、21%作为地聚物掺量 10%、20%配合比下的含水率,将混合料闷料 2 h 后装入直径为 50 mm、高 50 mm 的圆柱体模具中,使用压力机静压成型,加载速率为 1 mm/min,加载完成后维持压力 2 min,静置 4 h 后使用电动脱模器脱模,将脱模后的试样放入标准养护箱中养护,养护完成后进行无侧限抗压强度试验,结果如图 3 所示。

随着激发剂模数的增大,混合料的 7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度差距逐渐增大,此发展趋势与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验相同。在 3 组配合比中,B 组整体强度最高,峰值为 3.24 MPa;A 组次之,峰值为 2.31 MPa;C 组的强度远低于 A、B 两组,峰值仅有 1.48 MPa,该结果与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验结果存在明显不同,原因是混合料配合比与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验的配合比存在显著区别,在两者试样制备过程中也发现干湿度和流动性存在显著区别,同时在养护过程中混合料水化反应程度降低,水化产物减少,导致强度降低,这造成了与粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试验不同的结果。据此,选用 B 组 6 个强度良好的配合比进行后续水稳性能和耐久性能试验。

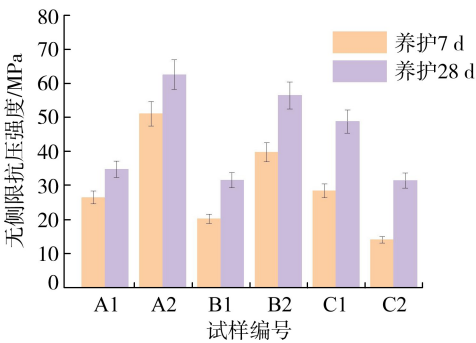


图 2 粉煤灰-矿渣地聚物砂浆试块无侧限抗压强度

Fig. 2 Unconfined compressive strength of fly ash and slag geopolymer mortar test block

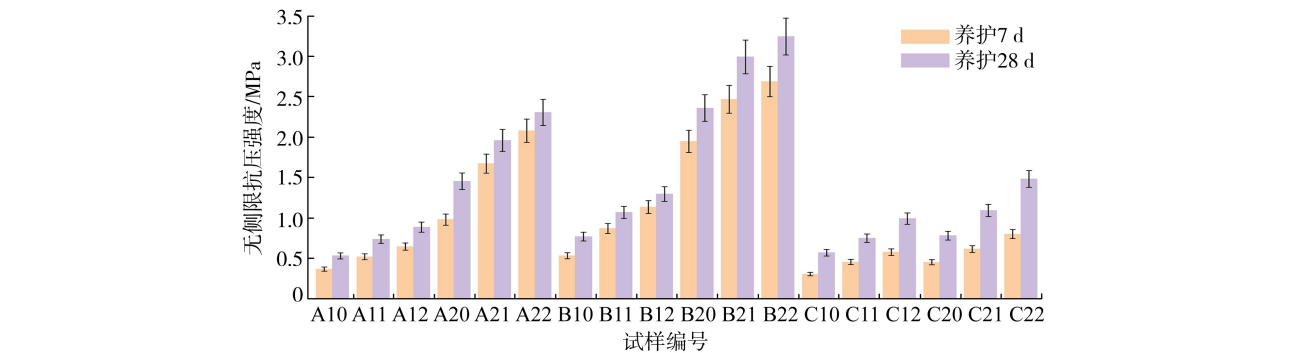


图 3 混合料试样无侧限抗压强度试验结果

Fig. 3 Unconfined compressive strength test results of mixture specimens

1.3 试验方法

选择筛选出的 B 组 6 种配合比,采用静力成型法制备直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱形试样。每种配合比分别制作 6 个平行试样,取其试验平均值作为测试值。为充分验证混合料的水稳性与耐久性,本文试验主要包括软化系数试验、干湿循环试验、抗剪强度试验和无侧限抗压强度试验,具体流程如图 4 所示。

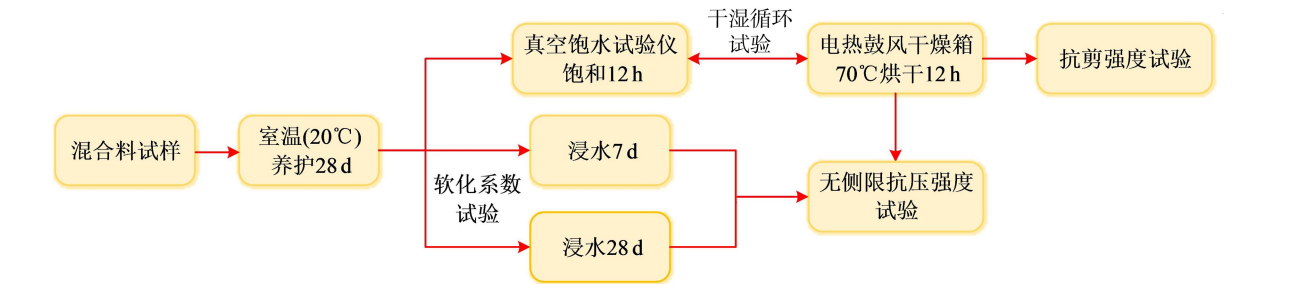


图 4 试验流程

Fig. 4 Test process

- a. 软化系数试验采用养护 28 d 的试样,然后分别浸水 7 d 和 28 d 后测量其无侧限抗压强度,通过软化系数 K_f 来评价固化长石粉的耐水性。软化系数 K_f 的计算公式为:
- $$K_f = f_1 / f_0 \tag{1}$$
- 式中: f_1 为试样浸泡 7 d 或 28 d 后的无侧限抗压强度,MPa; f_0 为试样养护规定龄期的无侧限抗压强度,MPa。
- b. 干湿循环试验同样采用养护 28 d 的试样,将养护完成的试样分别进行 0、10、20、30 次干湿循环试验,浸泡 12 h,烘干 12 h 为一次干湿循环,然后通过干湿循环前后的强度损失来评价混合料的抗干湿循环能力。
- c. 取干湿循环后的试样使用应变控制式直剪仪测量其黏聚力和内摩擦角,得到抗剪强度指标的变化规律,为后续数值模拟分析提供数据。
- d. 使用路面强度试验仪分别对软化系数试验和干湿循环试验后的混合料试样进行无侧限抗压强度测试,测试时加载速率为 1 mm/min。

2 试验结果与分析

在试验过程中,由于 B12 试样在无约束条件下浸水后发生崩解,表现出较差的水稳性,因此无法进行软化系数和干湿循环的相关试验,试验中将其剔除。

2.1 软化系数试验

图 5 为混合料试样的无侧限抗压强度随浸水时间的变化,可以看出各组试样的无侧限抗压强度整体上随浸水时间的增加呈下降趋势,其中浸水 28 d 的强度下降幅度最大。B10、B11、B20、B21、B22 试样在浸水 28 d 后的软化系数分别为 0.77、0.65、0.81、0.79、0.73,B20 试样表现出相对较好的耐水性,而 B21、B22 试样(分别掺红壤土 10%和 20%)的耐水性较差,与干湿循环试验有着相似的结果,主要原因是高塑性土中的蒙脱石等黏土矿物颗粒细小,比表面积大,对水分子具有极强的吸附能力,并且这些黏土矿物多为层状结构,层间可以容纳大量水分子,使得矿物颗粒吸水膨胀,体积显著增大,而矿物层间结合力较弱,遇水易分散,破坏

了颗粒间的胶结作用,使试块软化,强度和水稳性下降。另外,浸水时充足的水分使试样内部未完全水化的产物可能会继续进行水化反应,因此浸水初期无侧限抗压强度会比浸水前略微提高。

2.2 干湿循环试验

图 6 为混合料试样干湿循环后无侧限抗压强度随循环次数的变化,图 7 为混合料试样抗剪强度指标随干湿循环次数的变化。由图 6 可以看出,试样的无侧限抗压强度整体随干湿循环次数的增加呈下降趋势,但下降幅度较小,强度损失较低。另外干湿循环试验中由于烘干会为试样提供短时间的高温养护环境,所以干湿循环 10 次时试样的无侧限抗压强度会略微提升。

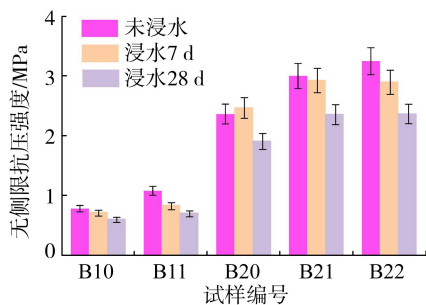


图 5 混合料试样无侧限抗压强度随浸水时间的变化

Fig. 5 Change of unconfined compressive strength of mixture specimens with immersion time

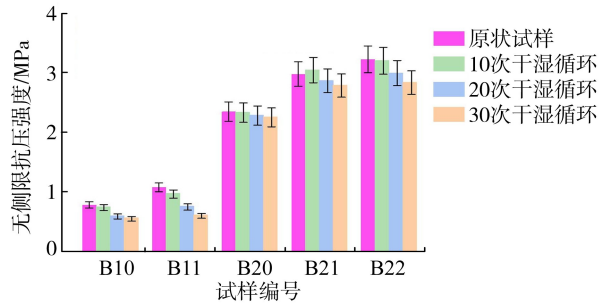


图 6 混合料试样无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化

Fig. 6 Change of unconfined compressive strength of mixture specimens with dry-wet cycle times

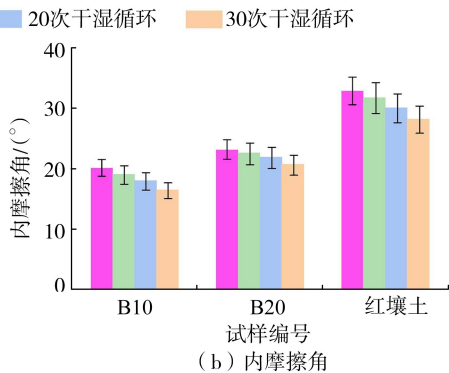
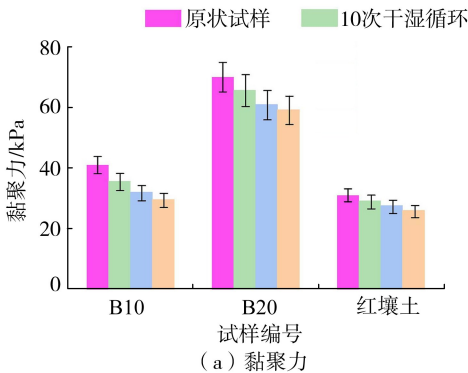


图 7 混合料试样抗剪强度指标随干湿循环次数的变化

Fig. 7 Change of shear strength index of mixture specimens with dry-wet cycle times

B20 试样相较于其他试样的强度损失最小,30 次干湿循环的强度损失率只有 3.8%,抗干湿循环能力最好。红壤土掺量分别为 10%和 20%的 B21 和 B22 试样虽然整体上无侧限抗压强度比不掺红壤土的 B20 试样高,但是在经过 10、20、30 次的干湿循环后强度损失比 B20 试样大。B21 试样在干湿循环前的无侧限抗压强度为 3.00 MPa,经过 30 次干湿循环后下降了 0.19 MPa,强度损失率达 6.3%。B22 试样在干湿循环前的无侧限抗压强度为 3.25 MPa,经过 10、20、30 次的干湿循环后分别下降到了 3.23、3.02、2.86 MPa,强度损失率分别为 0.62%、7.08%、12.00%。由此可以得出掺入红壤土的试样比不掺入红壤土的试样强度损失大,且红壤土掺量越高,强度损失越大,抗干湿循环能力越弱,主要是因为掺入的红壤土为高塑性土,具有吸水膨胀和失水收缩的特性。在干湿循环过程中,黏土矿物不断吸水膨胀和失水收缩,这种反复的体积变化会在材料内部产生应力和微裂纹,破坏试样的结构完整性;随着红壤土掺量的增加,黏土矿物在试样中的占比提高,干湿循环导致体积变化引起的破坏效应更为显著,使得土体的孔隙率增大、密实度降低,试样表面在水中更易脱落,从而使试样的强度在干湿循环过程中逐渐下降,抗干湿循环能力逐渐减弱^[30]。

另外,由图 6 还可以看出,B20 试样(地聚物掺量 20%、未掺红壤土)的无侧限抗压强度比 B10 试样(地聚物掺量 10%、未掺红壤土)高、强度损失小,B10 试样经过 10、20、30 次干湿循环后的强度损失率分别为 3.90%、23.38%、28.57%。这主要是由于长石粉作为低塑性砂土,不易吸水膨胀,水稳性较好,同时在激发剂作用下,地聚物发生解聚-缩聚反应,使得地聚物与长石粉颗粒之间有良好的界面结合,也促进地聚物中活性硅氧烷键的重新排列,形成更加致密和稳定的网络结构,从而提高长石粉的力学性能和耐久性。因此地聚

物掺量的增加能够增强长石粉颗粒之间的黏结能力,形成更加紧密的内部结构,减小了孔隙率,提高了材料的密实度。B20 试样中,20%的地聚物掺量使得材料具有更高的初始抗压强度,同时在干湿循环过程中,由于内部结构更稳固,抵抗体积变化和微裂纹形成的能力更强,从而强度损失率低于 B10 试样。

从图 7 可知,抗剪强度指标随着干湿循环次数的增加也呈现规律性变化,B20 试样由于地聚物掺量较高,所以其黏聚力整体上比 B10 试样高;而红壤土的黏聚力偏低,内摩擦角偏高,这与土壤结构密切相关,主要归因于其组构特征中粗粒优势形成的多级孔隙网络与胶结物含量较低的结构性特点。另外,经过干湿循环作用后,试样的黏聚力呈现先急速下降后逐渐趋缓的变化特征,最终达到稳定状态;而内摩擦角虽随干湿循环次数增加呈递减趋势,但其衰减幅度相对较小,经历 30 次干湿循环后不同试样的变化范围在 3°~5°。试验结果表明,试样强度减小主要源于黏聚力的显著衰减,干湿循环作用引发的试样内部结构损伤导致黏聚力劣化,宏观上表现为试样强度的衰减。

3 数值模拟

3.1 模型构建

数值模拟的路段采用高速公路标准,设计速度 100 km/h,双向 6 车道,根据 JTG B01—2014《公路工程技术标准》,车道宽度为 3.75 m,整体式断面,设置中央分隔带 1 m,左侧路缘带宽度为 0.75 m,右侧硬路肩宽度为 2.5 m,路堤边坡为 1:1.5,车辆轮胎宽度为 0.3 m,轮轴净距为 1.5 m,路基总宽度为 30 m。考虑车辆荷载在路基深度中的扩散衰减特性及作用范围的三维尺寸效应,地基深度设为 30 m,计算宽度为 100 m,道路纵向总长度取 15 m。路基结构模型每层使用的材料不同,路基结构模型设计厚度及力学计算参数见表 4,不同干湿循环次数下混合料和压实土层(红壤土)的黏聚力与内摩擦角见表 5。

表 4 路基结构模型计算参数

Table 4 Calculation parameters of roadbed structure model

结构层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	阻尼系数	渗透系数/(10 ⁻⁷ cm/s)
沥青混凝土面层	0.20	1 200	0.25	2 360	0.9	600.0
水泥稳定碎石基层	0.35	1 500	0.35	2 050	0.4	300.0
水泥稳定碎石底基层	0.15	1 400	0.35	2 000	0.4	300.0
B10 组混合料	0.90	44	0.20	1 850	0.4	250.0
B20 组混合料	0.90	98	0.30	1 908	0.4	250.0
压实土层	5.00	60	0.30	1 856	0.4	5.4
天然地基土	30.00	30	0.35	1 460		5.4

注: B10 组混合料、B20 组混合料分别表示采用 B10、B20 试样配合比的混合料。

表 5 混合料和压实土层的黏聚力与内摩擦角

Table 5 Cohesion and internal friction angle of mixture and compacted soil layer

干湿循环次数	B10 组混合料		B20 组混合料		压实土层	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	40.57	19.92	69.71	22.96	30.58	32.70
10	35.24	18.87	65.42	22.38	28.67	31.59
20	31.58	17.84	60.59	21.71	27.06	29.89
30	29.16	16.28	58.94	20.52	25.48	28.04

根据表 4 和表 5 中的参数建立粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基结构模型,半幅路基结构模型尺寸如图 8 所示。沥青混凝土面层和水泥稳定碎石基层及底基层采用弹性本构模型,混合料、压实土层、天然地基土采用莫尔-库仑弹塑性本构模型^[31]。 x 轴方向为道路横截面方向, y 轴方向为道路深度方向, z 轴方向为道路纵截面方向。为使模拟有效进行,边界条件设置为左、右面需限制 x 轴方向的移动,前后限制 y 轴方向的移动,模型底部采用固定约束,限制 3 个方向移动,顶部为自由边界面,不限制约束。

依据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,荷载采用公路-I 级的汽车荷载,使用轴重为 100 kN 的单轴双轮组轴载,轮胎接地压强为 0.7 MPa,单轮接地当量圆直径为 213 mm,双轮接地面积为 0.071 4 m²,由于现实中车辆荷载是一种随时间等因素变化的随机荷载,为使车辆荷载模拟更接近实际情况,可以使用半正弦动荷载模拟交通荷载^[32]:

$$F = p + q$$

(2)

其中 $q = q_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{T}\right)$ $T = 12L/v$

式中: F 为模拟交通荷载; p 为静荷载,可取轮胎胎压; q 为动荷载; $q_{\max}$ 为车辆附加动载的幅值,一般不超过汽车静载的 0.3 倍; L 为轮胎接触面的半径,取 15 cm; T 为车辆荷载作用周期; v 为车辆行驶速度。取 $q_{\max} = 0.3p$,可得模拟加载半正弦动荷载的解析式为:

$$F = 0.7 \left[1 + 0.3 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + 15.43\pi t\right) \right] \tag{3}$$

在模型顶面沿道路纵向设定荷载移动带,然后将荷载移动带细分成若干小矩形,每个小矩形的分布面积为 0.30 m×0.24 m,也即为一个双轮组车轮的接地面积,汽车荷载以均布荷载形式施加在矩形内^[33],如图 9 所示。使用 ABAQUS 有限元软件中的用户子程序 VLoad 来实现荷载的移动,该子程序根据车辆行驶的时间和速度来确定荷载的坐标,然后根据时间按式(3)计算,将汽车荷载施加在相应的面积范围内,利用车辆行驶的时间和速度来控制荷载的移动,从而达到模拟车辆动荷载的目的。

路基结构模型网格划分如图 10 所示,模型的单元类型为六面体单元 C3D8R,共 229 068 个单元。为便于数值模拟分析,对路基结构模型作出以下假设:①假定路基和路面为一种连续、弹塑性且均质的复合材料;②路基和路面各结构层之间在变形时不会产生相对移动,且变形连续;③路基和路面的材料参数在荷载施加和变形的过程中保持不变。

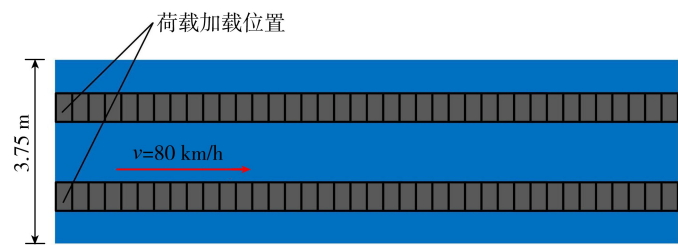


图 9 荷载移动带划分

Fig. 9 Division of load moving zone

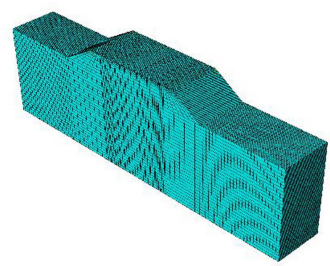


图 10 路基结构模型网格划分

Fig. 10 Mesh subdivision of roadbed structure model

3.2 结果分析

采用构建的路基结构模型进行数值模拟,得到的沉降-位移云图如图 11 所示。由图 11 可知,在经过 30 次干湿循环后,B10、B20 组混合料最大沉降量分别为 11.3、9.98 mm,沉降量均小于 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》规定的 15 mm,因此,此次模拟结果符合要求。不同干湿循环次数下路基沉降量随路基深度的变化如图 12 所示,随着干湿循环次数的增加,路基最大沉降量呈现持续增长趋势。路基沉降量随着路基深度的增加而逐渐减小,深度在 5 m 以内时,沉降量变化速度较快;当深度超过 5 m 后,变化速度较慢。

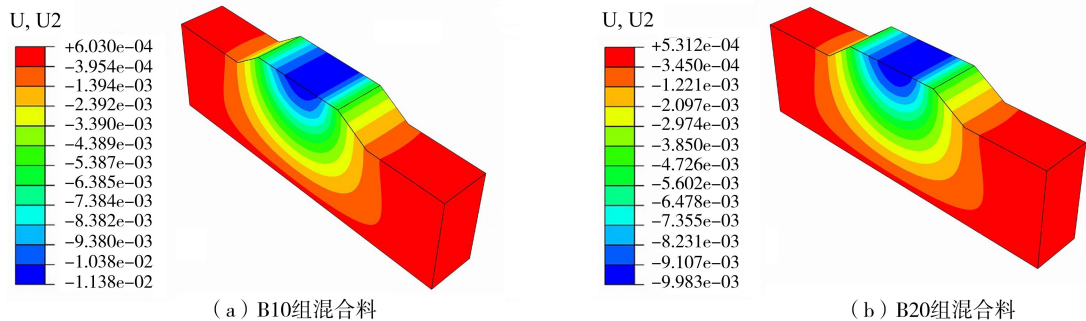


图 11 路基结构模型沉降-位移云图(单位:m)

Fig. 11 Settlement and displacement cloud diagram of roadbed structure model (unit: m)

在相同深度处,沉降量随着干湿循环次数的增加而增大。

在图 12 中,蓝色区域为 B10 或 B20 组混合料路基结构层,紫色区域为压实土层。蓝色区域中在相同深度处,B20 组混合料的沉降量随着干湿循环次数的增加变化较小,说明 B20 组混合料的抗干湿循环能力较好,这与干湿循环试验结果一致。另外,由于 B10 组混合料的地聚物含量较低,弹性模量较小,在 30 次干湿循环后的沉降量较 B20 组混合料有较大增长,抵抗变形的效果变差。为了更加充分利用长石粉,在实际工程中若采用 B10 组混合料,可以在长石粉路基结构层上设置防水层。

4 结 论

- a. 随着激发剂模数的增大,粉煤灰-矿渣地聚物砂浆和混合料在 7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度差异逐渐扩大。激发剂模数为 1.5 时,粉煤灰-矿渣地聚物砂浆 28 d 的无侧限抗压强度与模数 1.0 时基本持平,后期强度发展潜力较大;同时,混合料的无侧限抗压强度性能最优,峰值达到 3.24 MPa。综合考虑材料的力学性能与经济性,试验选用激发剂模数为 1.5 的粉煤灰-矿渣地聚物作为长石粉的主要固化剂。
- b. 软化系数试验表明,混合料具有良好的水稳性。增加地聚物掺量可提升长石粉抗水侵蚀能力;当地聚物掺量为 20%、长石粉掺量为 80%时,混合料的水稳性最佳。掺入红壤土会降低混合料的水稳性,这主要源于黏土矿物颗粒极易吸水膨胀,破坏颗粒间的胶结作用。
- c. 干湿循环试验表明,混合料在 30 次干湿循环后的无侧限抗压强度损失较小,表现出较好的耐久性。当地聚物掺量为 20%时,混合料的强度损失率为 3.8%。抗剪强度指标随干湿循环次数的增加而逐渐减小,混合料强度减小主要源于黏聚力的显著衰减,干湿循环作用使得试样内部结构损伤从而导致黏聚力劣化,宏观上表现为试样强度的衰减。
- d. 数值模拟结果表明,随着干湿循环次数的增加,路基的最大沉降量不断增大,并随深度增加沉降量不断减小,在路基相同深度处,沉降量随着干湿循环次数的增加而增大。

参考文献:

[1] Guan Bowen, Wu Qilin, Li Jun, et al. Sustainable utilization of feldspar powder from lithium extraction byproducts as road construction material[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e04039.

[2] 李飞跃,张立欣,于国娇. 工业固废地质聚合物在环境领域的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(2): 254-258. (Li Feiyue, Zhang Lixin, Yu Guojiao. Research progress on the application of industrial solid waste-based geopolymer in environmental protection[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(2): 254-258. (in Chinese))

[3] Zhong Mingyang, Meng Jin, Ning Baokuan, et al. Preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue-iron ore tailings non-sintering ceramics[J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136209.

[4] Kim J S, Lee J Y, Kim Y H, et al. Evaluating the eco-compatibility of mortars with feldspar-based fine aggregate[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00781.

[5] Wang Haoyu, Xiong Rui, Zong Youjie, et al. Effect of raw material ratio and sintering temperature on properties of coal gangue-feldspar powder artificial aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131400.

[6] An Liang, Chen Wenwu, Zhao Tianyu, et al. Utilization of solid waste materials as roadbed fillers in road construction; a review [J]. Materials Reports 2024, 38(S2): 257-263.

[7] Fuertes V, Reinoso J J, Fernández J F, et al. Engineered feldspar-based ceramics; a review of their potential in ceramic industry [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2022, 42(2): 307-326.

[8] 赖纪全. 粗长石粉中回收锂云母的试验研究[J]. 中国金属通报, 2019(7): 144-145. (Lai Jiquan. Experimental research on recovery of lithium mica from coarse feldspar powder[J]. China Metal Bulletin, 2019(7): 144-145. (in Chinese))

[9] Xia Fan, Cui Shicai, Pu Xipeng. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste[J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 5197-5203.

[10] Enríquez E, Fuertes V, Cabrera M J, et al. Study of the crystallization in fast sintered Na-rich plagioclase glass-ceramic [J].

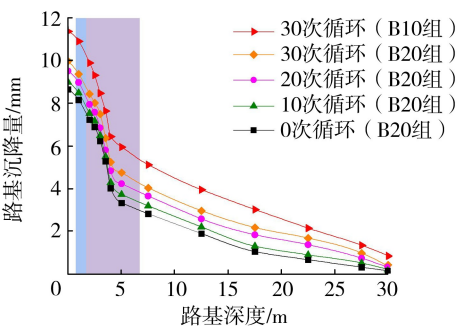


图 12 路基沉降量与路基深度的关系
Fig. 12 Relationship between roadbed settlement and depth

Ceramics International, 2019, 45(7): 8899-8907.

- [11] 吴鹏,刘瑾,史兴萍,等.刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质研究[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):76-86. (Wu Peng, Liu Jin, Shi Xingping, et al. Investigation on mechanical properties of red clay improved by locust bean gum and sisal fiber[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 76-86. (in Chinese))
- [12] 朱旭芬,黄庭伟,刘瑾,等.有机聚合物复合纤维改良砂土无侧限抗压强度研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):90-98. (Zhu Xufen, Huang Tingwei, Liu Jin, et al. Study on unconfined compressive strength of sand improved by organic polymer composite fiber[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 90-98. (in Chinese))
- [13] 彭劼,商志阳,曹天赐,等.高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):99-104. (Peng Jie, Shang Zhiyang, Cao Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 99-104. (in Chinese))
- [14] 闫启耀,吕恒林,韩启航,等.复合工业废料-混合砂混凝土耐久性试验研究[J].建筑材料学报,2025,28(7):655-661. (Yan Qiyao, Lyu Henglin, Han Qihang, et al. Experimental study on durability of composite industrial waste-mixed sand concrete [J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(7): 655-661. (in Chinese))
- [15] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,等.中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):347-355. (He Jinyu, He Jie, Wang Yutao, et al. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 347-355. (in Chinese))
- [16] 赵人达,杨世玉,贾文涛,等.粉煤灰基地聚物混凝土的耐久性研究新进展[J].西南交通大学学报,2021,56(5):1065-1074. (Zhao Renda, Yang Shiyu, Jia Wentao, et al. Review of recent progress in durability of fly ash based geopolymer concrete [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(5): 1065-1074. (in Chinese))
- [17] Nath P, Sarker P K. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 163-171.
- [18] 李永翔,季奎良,党彦.地聚物稳定煤矸石混合料路用性能及机理探究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,45(5):28-36. (Li Yongxiang, Ji Kuiliang, Dang Yan. Road performance and mechanism of geopolymer stabilized gangue mixtures [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 45(5): 28-36. (in Chinese))
- [19] 杨振甲,何猛,吴杨,等.矿渣-粉煤灰地聚物固化淤泥力学性能和路用性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(2):693-703. (Yang Zhenjia, He Meng, Wu Yang, et al. Mechanical properties and road performance of slag-fly ash geopolymer stabilized sludge[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 693-703. (in Chinese))
- [20] 吴伟军,张鲲鹏,张宁,等.赤泥复合固化剂固化粉土路用性能及其机理[J].建筑材料学报,2025,28(3):227-235. (Wu Weijun, Zhang Kunpeng, Zhang Ning, et al. Road performance of red mud composite solidification agent for solidified silt and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(3): 227-235. (in Chinese))
- [21] Raza A, Salmi A, El Ouni M H, et al. Material characterization and thermal performance of polyethylene fiber-reinforced lightweight engineered geopolymer composites subjected to sulfate attacks[J]. Construction and Building Materials, 2024, 455: 139156.
- [22] Rahman M K, Kailani H Y, Bahra Q A A, et al. Development of water-cured alkali-activated concrete with a high volume of silica-rich waste limestone powder and GGBS and fly ash materials: strength, durability, and life cycle assessment[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(1): 04024448.
- [23] Zhang Peng, Mao Yifan, Gao Zhen, et al. Efficient utilization of waste drilling mud to prepare material stabilized with fly ash/slag based geopolymer for subgrade engineering[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123600.
- [24] 乔瑞军,栾治军,黄明利,等.洞渣高填方路基沉降影响因素及其控制技术研究[J].公路,2024,69(3):49-55. (Qiao Ruijun, Luan Zhijun, Huang Mingli, et al. Research on influencing factors of settlement and construction technology of high filling subgrade with muck[J]. Highway, 2024, 69(3): 49-55. (in Chinese))
- [25] 李涵,曾亚武,汤禧龙,等.泥岩碎屑作为路基填料的吸湿膨胀变形特性[J].长江科学院院报,2025,42(2):129-137. (Li Han, Zeng Yawu, Tang Xilong, et al. Water-induced expansion deformation characteristics of mudstone clast as roadbed filler[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2025, 42(2): 129-137. (in Chinese))
- [26] 云海浪,韩文喜,王波,等.砂泥岩混合填料湿化变形与沉降计算方法[J].科学技术与工程,2021,21(22):9487-9495. (Yun Hailang, Han Wenxi, Wang Bo, et al. Calculation method of wetting deformation and settlement of sand and mudstone mixed filling[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9487-9495. (in Chinese))
- [27] 李永靖,邢洋,韩俊俊,等.煤矸石路基填料震陷变形特性分析[J].公路交通科技,2014,31(12):43-49. (Li Yongjing, Xing Yang, Han Junjun, et al. Analysis on subsidence deformation characteristics of coal gangue subgrade fill[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(12): 43-49. (in Chinese))

[25] Berman D,Levy D,Avidan S,et al. Underwater single image color restoration using haze-lines and a new quantitative dataset[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2021,43(8):2822-2837.

[26] Randall Y. FLSea:underwater visual-inertial and stereo-vision forward-looking datasets[D]. Haifa:University of Haifa,2023.

[27] Balntas V,Lenc K,Vedaldi A,et al. HPatches:a benchmark and evaluation of handcrafted and learned local descriptors[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu:IEEE,2017:3852-3861.

(收稿日期:2025-06-18 编辑:刘晓艳)

(上接第118页)

[19] 李宏波,张冬月,葛学元. 基于 PSO-LSSVM 算法的隧道掘进机掘进参数预测方法[J]. 科学技术与工程,2023,23(14):6230-6237. (Li Hongbo,Zhang Dongyue,Ge Xueyuan. Tunnel boring machine tunneling parameters prediction method based on PSO-LSSVM algorithm[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(14):6230-6237. (in Chinese))

[20] Zhang Liamo,Guo Jing,Fu Xianlei,et al. Digital twin enabled real-time advanced control of TBM operation using deep learning methods[J]. Automation in Construction,2024,158:105240.

[21] 满轲,曹子祥,刘晓丽,等. 地质突变条件下基于组合模型的围岩等级和 TBM 掘进参数预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):55-62. (Man Ke,Cao Zixiang,Liu Xiaoli,et al. Prediction of surrounding rock grades and TBM tunnelling parameters based on combined model under geological mutation conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):55-62. (in Chinese))

[22] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (Xu Weiya,Chen Shizhuang,Zhang Guike,et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):52-59. (in Chinese))

[23] 赵宇,郑东健. 基于 QR-KOA-ITransformer-BiLSTM 的混凝土坝变形区间预测模型[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),2025-02-24. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250224.1500.004>. (Zhao Yu,Zheng Dongjian. A deformation interval prediction model for concrete dams based on QR-KOA-ITransformer-BiLSTM[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025-02-24. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250224.1500.004>. (in Chinese))

[24] Liu Feitony,Ting Kaiming,Zhou Zhihua. Isolation forest[C]//Proceedings of the 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. Pisa,Italy:IEEE,2008:413-422. doi:10.1109/ICDM.2008.17.

(收稿日期:2025-07-02 编辑:熊水斌)

(上接第128页)

[28] 邹敏,尹平保,贺炜. 交通荷载下镍铁渣-黏土路基动力响应特性分析[J]. 公路与汽运,2024,40(6):71-75. (Zou Min,Yin Pingbao,He Wei. Analysis of characterization of dynamic response of nickel-iron slag-clay roadbed under traffic loading[J]. Highways & Automotive Applications,2024,40(6):71-75. (in Chinese))

[29] Gao Xuhe,Tian Weiping,Li Jiachun,et al. Analysis of deformation characteristics of filled subgrade treated by micro-pile[J]. Advances in Civil Engineering,2021,2021(1):5755796.

[30] 马晓凡,陈红,刘瑾,等. CT 扫描视域下黏土干湿循环劣化机理[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):111-118. (Ma Xiaofan,Chen Hong,Liu Jin,et al. Deterioration mechanism of clay in dry-wet cycle under CT scanning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):111-118. (in Chinese))

[31] 黄玉纯. 降雨入渗对土工格室加筋路基动力响应的影响研究[J]. 公路交通科技,2023,40(11):61-71. (Huang Yuchun. Study on influence of rainfall infiltration on dynamic response of geocell-reinforced subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2023,40(11):61-71. (in Chinese))

[32] 余云燕,刘武通,付艳艳,等. 交通荷载作用红层填料道路沉降细观模拟[J]. 地震工程学报,2023,45(1):1-11. (Yu Yunyan,Liu Wutong,Fu Yanyan,et al. Meso-simulation of road settlement of red beds filling under traffic load[J]. China Earthquake Engineering Journal,2023,45(1):1-11. (in Chinese))

[33] 陈剑,苏跃宏. 交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究[J]. 公路交通科技,2011,28(5):44-48. (Chen Jian,Su Yuehong. Numerical simulation of dynamic performance of highway subgrade under traffic loads[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(5):44-48. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-08 编辑:熊水斌)