

超细矿粉水泥土配合比设计及耐久性试验研究

罗振京

(湖南省湘钧建设有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 采用正交试验设计超细矿粉水泥土配合比,通过室内冻融循环试验和抗腐蚀试验研究超细矿粉水泥土的耐久性。结果表明,水泥掺量对超细矿粉水泥土无侧限抗压强度的影响最显著,水泥掺量 $\geq 6\%$ 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量 $\geq 0.6\%$ 时,抗压强度提高幅度较小,建议超细矿粉水泥土配合比为水泥掺量 6% 、超细矿粉掺量 8% 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量 0.6% ;超细矿粉水泥土的抗冻性、抗腐蚀性优于普通水泥土,超细矿粉水泥土的质量损失率较 10% 水泥掺量改良土降低约 36.0% ,冻融残留强度比提高约 2.7% ,在 Na_2SO_4 溶液浓度为 1.5 g/L 时,普通水泥土与超细矿粉水泥土的抗压强度和抗腐蚀系数最大,超细矿粉水泥土的抗压强度较普通水泥土提高约 12.8% ,且 Na_2SO_4 溶液下超细矿粉水泥土前 28 d 抗压强度增长显著。

关键词: 公路;超细矿粉水泥土;配合比设计;耐久性

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)02-0060-05

水泥土是由水泥、土和水按一定比例拌合,经压实、养生后具有一定强度的硬化材料,因其取材方便、施工简便、经济实惠等优点,在软土地基加固、路基填筑、基坑围护等工程中得到广泛应用。但水泥土强度影响因素较多,致使水泥土在工程应用中存在不足,如水泥土抗压强度随着水泥掺量的增加逐渐提高,但强度增长速率降低、抗拉性能降低。选用合适的外掺剂改善水泥土的力学性能,既可避免水泥掺量过高,又能提高水泥土的耐久性。吴燕开等的研究表明,将适量钢渣粉掺入水泥土中,可有效提高其强度。夏永杰等的研究表明,水泥土中掺入 10% 掺量的钢渣,抗剪性能最优,且钢渣水泥土脆性程度随养生龄期增加逐渐提高。尹钰婷的研究表明,脱硫石膏和粉煤灰改良水泥土的力学性能和耐久性优于普通水泥土。许士钊采用水泥—碱渣改良软土,结果表明,水泥掺量为 10.5% 、碱渣掺量为 4.5% 时,土体压缩性显著降低。柯开展的研究表明,随着镍铁渣粉掺量的增加,水泥土早期微观结构致密性逐渐提高。上述研究表明,水泥土中掺入矿物掺合料可提高其性能,而不同土样对水泥土力学强度的影响不一样。另外,超细矿粉含有较多矿物活性成分,在砼材料中应用广泛,而掺超细矿粉水泥土设计及应用研究较少。为此,该文采用正交试验设计超细矿粉水泥土配合比,通过室内冻融循环试验和抗腐蚀试验评价超细矿粉水泥土的耐久性,为实际工程应用提供参考。

1 原材料与试验方案

1.1 试验材料

土样选用黏土,其物理性质见表1。水泥选用盾石牌P.O42.5普通硅酸盐水泥,其技术性质见表2。超细矿粉的比表面积为 $520\text{ m}^2/\text{kg}$,化学组成见表3。激发剂选用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量 $\geq 95\%$ 。

1.2 试验方案

(1) 超细矿粉水泥土配合比设计。采用正交试

表1 黏土的物理性质

物理性质	测试值	物理性质	测试值
液限/ $\%$	33.6	内摩擦角/ $^\circ$	14.1
塑限/ $\%$	16.8	最佳含水率/ $\%$	16.5
塑性指数	16.5	黏聚力/ kPa	30.9
最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.706		

表2 水泥的技术性质

技术性质	测试值
细度/ $\%$	1.1
凝结时间/ min	初凝 138
	终凝 300
烧失量/ $\%$	1.03
抗压强度/ MPa	3 d 24.6
	28 d 51.9
抗折强度/ MPa	3 d 4.8
	28 d 8.2

表 3 超细矿粉的化学组成

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO ₂	31.12	SO ₃	2.89
Al ₂ O ₃	14.06	Fe ₂ O ₃	1.34
CaO	45.32	P ₂ O ₅	0.13
MgO	3.77	其他	1.37

验设计超细矿粉水泥土配合比,试验方案见表 4。

(2) 超细矿粉水泥土耐久性分析。按超细矿粉水泥土最佳配合比制备试件,对照普通水泥土,采用室内冻融循环试验和抗腐蚀性试验评价超细矿粉水泥土的耐久性。冻融循环试验中,水泥掺量为 6%、8%、10%,养生龄期为 28 d,冻融循环次数为 0、1、3、5、7、9、12、15 次。抗腐蚀性试验中,选用 Na₂SO₄ 溶液,Na₂SO₄ 浓度为 1.5、3.0、4.5、6、9 g/L,养生龄期为 7、14、28、60 d。

表 4 超细矿粉水泥土正交试验方案

掺量/%				掺量/%			
试样 编号	水泥	超细 矿粉	Ca(OH) ₂	试样 编号	水泥	超细 矿粉	Ca(OH) ₂
1	2	8	0.0	9	6	8	1.2
2	2	6	0.6	10	6	6	1.8
3	2	4	1.2	11	6	4	0.0
4	2	2	1.8	12	6	2	0.6
5	4	8	0.6	13	8	8	1.8
6	4	6	0.0	14	8	6	1.2
7	4	4	1.8	15	8	4	0.6
8	4	2	1.2	16	8	2	0.0

1.3 试件制备及养生

超细矿粉水泥土由黏土、水泥、超细矿粉、Ca(OH)₂和水组成。土样风干碾碎,过 5 mm 圆孔筛,测定其风干含水率;根据掺超细矿粉水泥土室内最佳含水率,采用静压法成型压实度 96%的试样。试样制备完成后,用塑料薄膜包裹,放入(20±2)℃、湿度 95%以上的标准养生室进行养护。水泥和超细矿粉采用外掺法。试样尺寸为直径 100 mm×高度 100 mm。

1.4 性能测试方法

(1) 无侧限抗压强度试验。按 JTG E40—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中无侧限抗压强度试验方法测定超细矿粉水泥土的力学强度,试验仪器选用压力试验机 MYL—2000D,加载速率为 1 mm/min。

(2) 冻融循环试验。试件养生 28 d 后,测定试件质量 m_0 并放入冷冻箱中,在-15℃条件下冻结 12 h;冻结完成后放入 20℃恒温箱中融化 12 h,测定试件质量 m_n 和无侧限抗压强度,此为一次冻融循环过程。试件冻结与融化过程中,不拆除其表面塑料薄膜,以减少试件水分散失引起的误差。冻融循环试验结束后,按式(1)、式(2)分别计算试件的冻融残留强度比和质量损失率。

$$\eta_n = R_{cn} / R_{c0} \times 100 \tag{1}$$

$$\eta'_n = (m_0 - m_n) / m_0 \times 100 \tag{2}$$

式中: η 为冻融残留强度比(%); R_{cn} 为冻融循环 n 次时试件无侧限抗压强度(MPa); R_{c0} 为冻融循环前试件无侧限抗压强度(MPa); η' 为质量损失率(%); m_0 为冻融循环前试件质量(g); m_n 为冻融循环 n 次时试件质量(g)。

(3) 抗腐蚀性试验。试件标准养生 1 d 后,分别放入 Na₂SO₄ 溶液和清水中养生到养生龄期,测定其无侧限抗压强度,按式(3)计算抗腐蚀系数。

$$K = R_{c1} / R_{c0} \tag{3}$$

式中: K 为抗腐蚀系数; R_{c1} 为 Na₂SO₄ 溶液中养生 n 天时试件无侧限抗压强度(MPa); R_{c0} 为清水中养生 n 天时试件无侧限抗压强度(MPa)。

2 试验结果与分析

2.1 配合比设计

超细矿粉水泥土正交试验结果见图 1,正交试验极差见表 5。

由图 1 和表 5 可知:水泥掺量对超细矿粉水泥土无侧限抗压强度的影响最显著,Ca(OH)₂ 掺量次之,水泥掺量 8%、超细矿粉掺量 8%、Ca(OH)₂ 掺量 1.8%的改良土的抗压强度最大,为 7.55 MPa。水泥掺量、超细矿粉掺量、Ca(OH)₂ 掺量对水泥土无侧限抗压强度的影响见图 2。

从图 2 可看出:1) 随水泥掺量或 Ca(OH)₂ 掺量增加,水泥土无侧限抗压强度逐渐提高。水泥掺

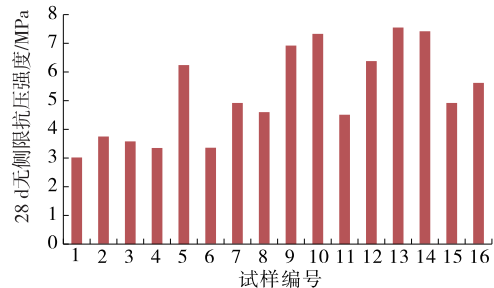


图 1 超细矿粉水泥土正交试验结果

表5 超细矿粉水泥土正交试验极差与方差

试验因素	K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	极差 R
水泥掺量	13.70	19.12	25.14	25.51	3.43	4.78	6.29	6.38	2.95
超细矿粉掺量	23.73	21.86	17.93	19.95	5.93	5.47	4.48	4.99	1.45
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量	16.51	21.29	22.52	23.15	4.13	5.32	5.63	5.79	1.66

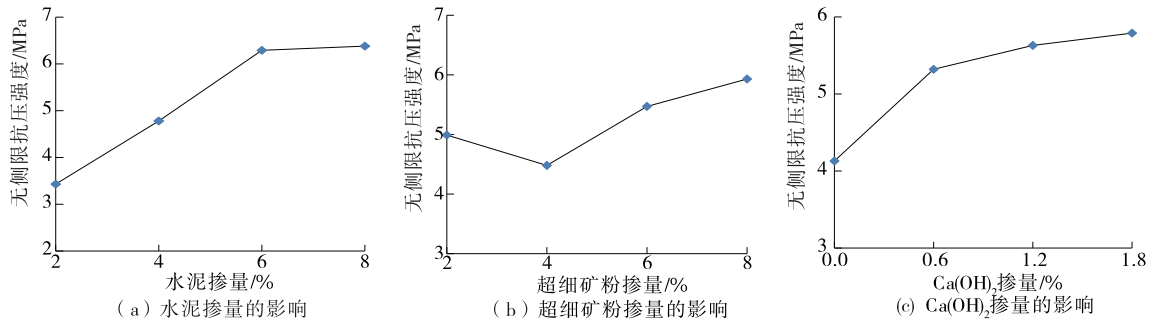


图2 固化剂对水泥土无侧限抗压强度的影响

量 $\leq 6\%$ 时,水泥掺量增加对提高超细矿粉水泥土抗压强度效果显著,水泥掺量增加1%,抗压强度提高约20.8%;水泥掺量由6%增加至8%时,超细矿粉水泥土抗压强度提高微小; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量由0增加至0.6%时,超细矿粉水泥土抗压强度提高显著,提高28.8%; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量 $\geq 0.6\%$ 时,超细矿粉水泥土抗压强度提高缓慢。建议水泥掺量和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量分别取6%、0.6%。2) 超细矿粉水泥土的无侧限抗压强度随超细矿粉掺量的增加先降低后增加,超细矿粉掺量为4%时,抗压强度最低,为4.48 MPa;超细矿粉掺量 $\geq 4\%$ 时,超细矿粉掺量增加1%,抗压强度提高8.1%以上。超细矿粉掺量对水泥土抗压强度的影响较大,建议超细矿粉掺量取8%。

2.2 耐久性分析

2.2.1 抗冻性

分别按水泥掺量6%、8%、10%制备普通水泥土试件,按水泥掺量6%、超细矿粉掺量8%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量0.6%制备超细矿粉水泥土试件进行冻融循环试验,结果见图3。

由图3可知:冻融循环条件下,普通水泥土与超细矿粉水泥土的质量损失率和冻融残留强度比变化规律一致,超细矿粉水泥土的抗冻性能优于普通水泥土。1) 冻融循环次数一致时,随水泥掺量增加,水泥土的质量损失率减小、冻融残留强度比增大,抗冻性能提高;水泥土的质量损失率与水泥剂量大致呈线性负相关,水泥掺量增加1%,水泥土的质量损失率降低16.3%以上,冻融残留强度比增长率逐渐

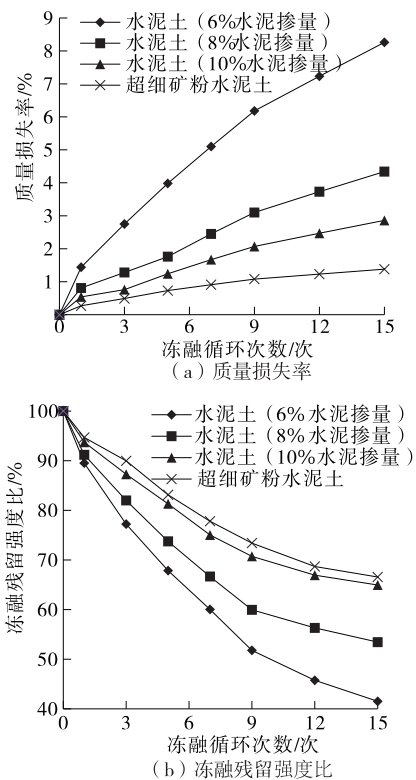


图3 超细矿粉水泥土冻融循环试验结果

增大。随冻融循环次数增加,水泥土的冻融残留强度比呈线性趋势增大(见图4);水泥掺量增加1%,水泥土冻融循环1次的残留强度比提高约1.2%,冻融循环15次的残留强度比提高约14.1%,说明水泥掺量增加,水泥土的抗冻性能提高较显著。2) 冻融循环次数一致时,与10%水泥掺量水泥土的抗冻性能相比,超细矿粉水泥土的质量损失率降低约36.0%、冻融残留强度比提高约2.7%。这是因为超

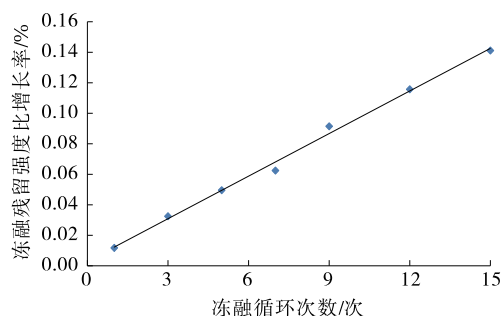


图4 冻融循环次数—水泥土残留强度比增长率关系

细矿粉中 SiO_2 、 Al_2O_3 等活性成分与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应,生成硅酸钙等凝胶物质填充土粒间孔隙,提高了土体密实度,改善了水泥土结构,使超细矿粉水泥土的抗冻性能优于普通水泥土。3) 随冻融循环次数增加,水泥土与超细矿粉水泥土的质量损失率呈线性增长,冻融残留强度比不断降低。这是因为冻结过程中,试件表面发生冻结,体积膨胀且不断向其内部深入,当冻胀应力大于结构强度时,胶凝材料与土粒界面结合处产生微裂缝;在融化阶段,水在压力作用下沿微裂缝流入试件内部较大孔隙,导致在冻结作用下冻胀应力增大,进一步破坏试件结构,使试件质量损失增加、承载能力降低。

2.2.2 抗腐蚀性

按水泥掺量 10% 制备普通水泥土试件,按水泥掺量 6%、超细矿粉掺量 8%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量 0.6% 制备超细矿粉水泥土试件,在 Na_2SO_4 溶液环境下进行抗腐蚀试验,结果见图 5、图 6。

从图 5~6 可以看出:1) 同龄期的超细矿粉水泥土的抗腐蚀性优于普通水泥土,其无侧限抗压强度提高 11.5% 以上;随 Na_2SO_4 溶液浓度升高,不同养生龄期水泥土和超细矿粉水泥土的无侧限抗压强度、抗腐蚀系数变化规律一致,抗压强度和抗腐蚀系数先增加后减少。 Na_2SO_4 溶液浓度为 1.5 g/L 时,抗压强度和抗腐蚀系数最大,水泥土和超细矿粉水泥土的结构更稳定。 Na_2SO_4 溶液浓度从 4.5 g/L 升高至 9.0 g/L 时,水泥土和超细矿粉水泥土的抗压强度呈线性缓慢降低,且两者降低速率相近, Na_2SO_4 溶液浓度增加 1.5 g/L,抗压强度降低约 3.9 g/L; Na_2SO_4 溶液浓度 ≤ 3 g/L 时,水泥土和超细矿粉水泥土的抗腐蚀系数 > 1 ,即抗压强度提高,一定浓度的 Na_2SO_4 溶液可促进水泥土和超细矿粉水泥土抗压强度的提高。2) 随养生时间增加,不同 Na_2SO_4 溶液浓度时,水泥土与超细矿粉水泥土的

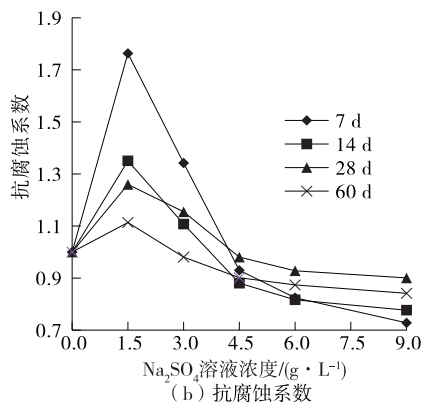
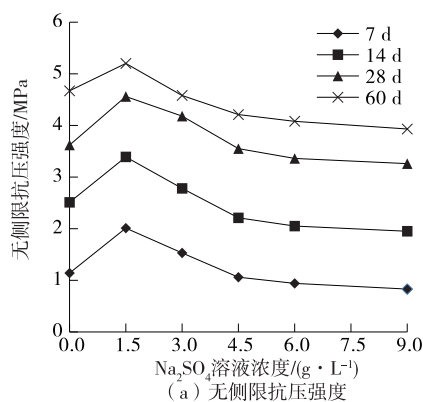


图5 普通水泥土抗腐蚀试验结果

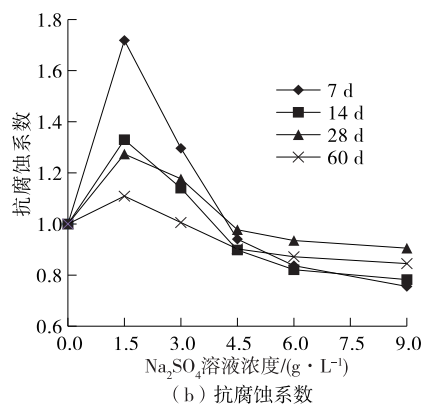
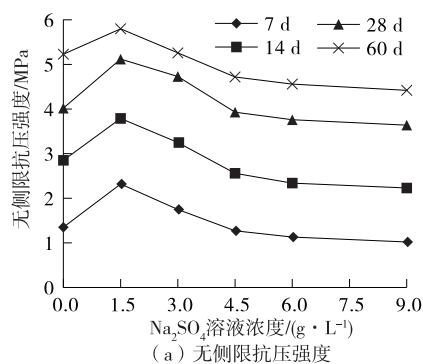


图6 超细矿粉水泥土抗腐蚀试验结果

抗压强度增长规律一致(见图 7)。前 28 d 抗压强度增长显著,随后抗压强度缓慢增长。养生龄期由 28 d

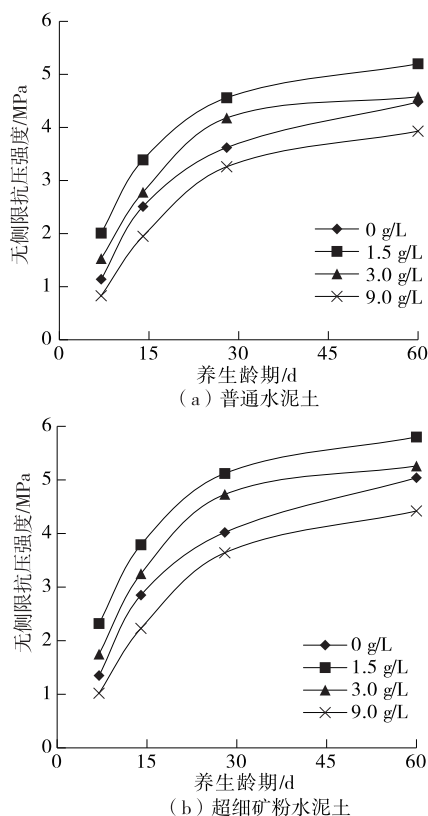


图7 不同 Na_2SO_4 溶液浓度时水泥土与超细矿粉水泥土抗压强度增长规律

增加至60 d时,水泥土与超细矿粉水泥土的抗压强度分别平均提高14.7%、15.3%。这是因为随养生时间增加,水泥熟料逐渐被消耗,在养生龄期28 d时,水泥水化反应基本完成,抗压强度增长减缓。另外, Na_2SO_4 溶液浓度为9.0 g/L时,水泥土与超细矿粉水泥土的抗压强度最小,较清水条件下抗压强度至少降低9.9%。可能是由于大量 SO_4^{2-} 与水泥水化产物反应产生膨胀力,使土粒间黏聚力减弱,导致试件出现微裂缝,因而抗压强度降低。

3 结论

(1) 水泥掺量对超细矿粉水泥土无侧限抗压强度的影响最显著, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量次之。水泥掺量 $\geq 6\%$ 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量 $\geq 0.6\%$ 时,抗压强度提高幅度较小;超细矿粉掺量 $\geq 4\%$,超细矿粉掺量对水泥土抗压强度的影响较大。建议超细矿粉水泥土配合比为水泥掺量6%、超细矿粉掺量8%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量0.6%。

(2) 超细矿粉水泥土的抗冻性能优于普通水泥土。水泥土的质量损失率与水泥掺量呈线性负相关,水泥掺量增加1%,水泥土的质量损失率降低16.3%以上;冻融循环次数一致时,超细矿粉水泥土

的质量损失率较10%水泥掺量改良土降低约36.0%,冻融残留强度比提高约2.7%。

(3) 超细矿粉水泥土的抗腐蚀性优于普通水泥土。 Na_2SO_4 溶液浓度为1.5 g/L时,超细矿粉水泥土的抗压强度和抗腐蚀系数最大,其抗压强度较水泥土提高约12.8%; Na_2SO_4 溶液下超细矿粉水泥土前28 d抗压强度增长显著,龄期由28 d增加至60 d时,抗压强度平均提高15.3%。

参考文献:

- [1] 丁向群,周向荣,罗超.超细矿粉对水泥土力学性能的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(5):899—905.
- [2] 吕鑫,李大伟,谢万超.水泥土在潮湿段路基应用质量控制措施研究[J].公路,2020(6):144—146.
- [3] 王达爽,杨俊杰,董猛荣,等.水泥土强度预测室内试验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(7):96—102.
- [4] KARPISZ I, PYDA J, CICHY L. Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 365(4): 2063—2067.
- [5] 阮庆,阮波,曾元,等.洞庭湖区淤泥质黏土水泥土力学性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(5):106—111.
- [6] 吴燕开,胡锐,赵位莹,等.钢渣粉固化淤泥质水泥土强度特性试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(15):306—311.
- [7] 夏永杰,王丽艳,刘瀚森.掺废弃钢渣的水泥土强度特性试验研究[J].中外公路,2016,36(5):243—246.
- [8] 尹钰婷.工业废渣复合固化膨胀土力学特性研究[D].淮南:安徽理工大学,2019.
- [9] 许士钊.水泥—碱渣加固软土的试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [10] 柯开展.早龄期镍铁渣粉水泥土强度试验研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(4):192—195.
- [11] 芮凯军,李俊才,杨宇,等.不同土质水泥土性质的室内试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,41(2):173—178.
- [12] 岳喜兵.废弃硅粉提升水泥土强度与抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].公路与汽运,2020(4):66—69.
- [13] 赵利平,龙骁鹏,黄筱云.水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):30—36+70.