

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.012

超细矿粉+水泥改良粉质黏土路基填料试验研究

刘晓林

(新余市公路桥梁工程局, 江西 新余 338000)

摘要: 为提高粉质黏土路基填料的工程力学性能,采用超细矿粉+水泥作为复合固化剂对其进行改良,同时掺入适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为激发剂。试验结果表明,超细矿粉水泥土的强度随复合固化剂、激发剂掺量的增加而增大,兼顾工程经济性,宜选用低水泥掺量、高矿粉掺量作为粉质黏土改良方案;超细矿粉水泥土的强度随冻融循环次数的增大先减小后增大,强度损失主要集中在冻融循环前期,后期因 CaO 的碳化作用强度略微回弹;合适体积密度的硫酸钠溶液可以促进超细矿粉水泥土强度的发展,硫酸钠溶液体积密度为 9 g/L 时,强度达到最大值;综合力学和耐久性,同时考虑工程经济性,采用水泥 4%+超细矿粉 8%+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1.8% 作为粉质黏土改良方案。

关键词: 公路;粉质黏土路基;超细矿粉水泥土; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发剂;强度;耐久性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)03-0057-04

粉质黏土在路基工程中比较常用。粉质黏土是一种软土,为使路基受压均匀,需对粉质黏土进行固化处理^[1-2]。水泥具有就地取材、施工方便、运输便捷等优势,在软土路基改良中最常用。但采用水泥改良软土存在强度不太高、结构不太稳定等不足,同时在大面积软土路基工程中不太适用,会因水泥用量过大导致工程效益不佳。因此,很多时候通过复掺矿物料对软土进行改良,如粉煤灰、硅灰、石灰等。超细矿粉作为一种比表面积大、细度高、活性高的材料,在混凝土中得到广泛应用,将大掺量超细矿粉取代水泥,不仅可以提高粉质黏土的强度,还可以减少水泥用量,提高工程效益^[3-5]。本文利用超细矿粉+水泥作为复合固化剂,同时掺入适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为激发剂对粉质黏土路基填料进行改良,为粉质黏土路基施工提供借鉴。

1 试验设计

1.1 原材料

土样:取自某路基施工现场,密度 1.9 g/cm³,液限和塑限分别为 34.5%、17.9%,塑性指数为 16.6,含水率为 20.5%,属于低液限粉质黏土。对取回的土样风干、碾碎后过 5 mm 筛,作为试验土样。

水泥:采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,平均烧失量为 2.22%,比表面积为 360 m²/kg。

超细矿粉:比表面积为 520 m²/kg,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO ,占比分别为 31.2%、13.8% 和

44.1%。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$:纯度大于 95%,盐酸不溶物含量为 0.05%。

试验用水:自来水。

1.2 试验方案

采用 $L_{16}(4^3)$ 正交表进行超细矿粉水泥土配合比试验,确定最佳配合比。三因素分别为水泥、超细矿粉和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,分别编号 A、B、C。水泥掺量分别为 2%、4%、6%、8%,超细矿粉掺量分别为 8%、6%、4%、2%, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量分别为 0.0、0.6%、1.2%、1.8%(见表 1)。

表 1 超细矿粉水泥土配合比方案

试验 编号	配合比 组合	掺量/%		
		A(水泥)	B(超细矿粉)	C($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
1	A1B1C1	2	8	0.0
2	A1B2C2	2	6	0.6
3	A1B3C3	2	4	1.2
4	A1B4C4	2	2	1.8
5	A2B1C2	4	8	0.6
6	A2B2C1	4	6	0.0
7	A2B3C4	4	4	1.8
8	A2B4C3	4	2	1.2
9	A3B1C3	6	8	1.2
10	A3B2C4	6	6	1.8
11	A3B3C1	6	4	0.0
12	A3B4C2	6	2	0.6

续表 1

试验 编号	配合比 组合	掺量/%		
		A(水泥)	B(超细矿粉)	C(Ca(OH) ₂)
13	A4B1C4	8	8	1.8
14	A4B2C3	8	6	1.2
15	A4B3C2	8	4	0.6
16	A4B4C1	8	2	0.0

1.3 试验方法

首先对各试验配合比下超细矿粉水泥土进行抗压强度试验,根据抗压强度试验结果选择最佳配合比方案。然后对最佳配合比方案下超细矿粉水泥土进行耐久性试验,包括抗冻性和耐腐蚀性试验。抗冻性试验采用快速冻融循环试验,冻融循环温度为 $-25\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,每个冻融循环周期为24 h,分别测试0、5次、10次和15次冻融循环后超细矿粉水泥土的抗压强度。耐腐蚀性试验主要测试野外腐蚀环境下超细矿粉水泥土的抗腐蚀性,考察在不同体积密度(0.0、1.5 g/L、4.5 g/L、9.0 g/L、18.0 g/L、22.5 g/L)硫酸钠溶液中浸泡后超细矿粉水泥土强度的变化,同时采用扫描电镜(SEM)观察超细矿粉水泥土微观结构的变化。

2 抗压强度试验结果与分析

不同配合比方案下超细矿粉水泥土的28 d抗压强度试验结果见图1。由图1可知:随着水泥掺量的增加,超细矿粉水泥土的强度增大,超细矿粉掺量和Ca(OH)₂掺量较高时,超细矿粉水泥土的强度较大;16种配合比中,第13种配合比(A4B1C4)的强度最高,达7.85 MPa。

对28 d抗压强度试验结果进行极差分析,结果显示,对超细矿粉水泥土强度影响大小排序为水泥

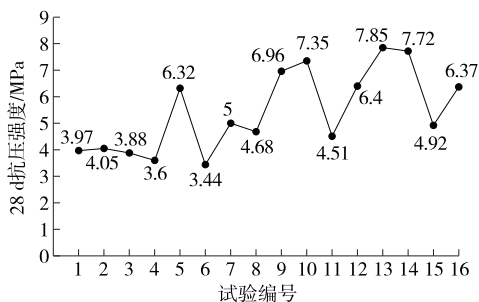


图1 不同配合比方案下超细矿粉水泥土的
28 d 抗压强度试验结果

掺量($R_1 = 2.84$) > 超细矿粉掺量($R_2 = 1.7$) > Ca(OH)₂掺量($R_3 = 1.38$),水泥掺量对改良土强度的影响最大,其次为超细矿粉掺量,Ca(OH)₂掺量对改良土强度的影响最小。

根据28 d抗压强度试验结果,当水泥、超细矿粉和Ca(OH)₂掺量最大时,改良粉质黏土的强度达到最佳,但水泥掺量过高对工程造价极为不利,尤其是对于大面积粉质黏土路基。超细矿粉作为一种工业废料,一方面与水泥一起组成复合固化剂,可以起到良好的固化效果;另一方面,超细矿粉固有的活性可以在碱性环境中生成Ca(OH)₂,促进火山灰作用,生成的C—S—H胶凝物质可以填充在水泥土内部孔隙中,促进强度的提升。为分析低水泥掺量时路基填土改良效果,对水泥掺量分别为2%、4%,超细矿粉掺量为8%,Ca(OH)₂掺量为1.8%(配合比组合为A1B1C4、A2B1C4)的超细矿粉水泥土的强度进行测试,结果见表2。

表2 低水泥掺量下超细矿粉水泥土的强度

配合比组合	各龄期抗压强度/MPa		
	7 d	14 d	28 d
A1B1C4	1.15	2.11	5.80
A2B1C4	2.32	4.29	7.10

从表2可以看出:水泥掺量为2%时,超细矿粉水泥土的28 d抗压强度为5.8 MPa,比A4B1C4试验组的强度降低26%;水泥掺量为4%时,超细矿粉水泥土的28 d抗压强度为7.10 MPa,比A4B1C4试验组的强度降低9.6%。虽然在强度上不能达到最佳,但可以满足工程实际需要。下面针对A1B1C4和A2B1C4进行耐久性分析。

3 耐久性试验结果与分析

3.1 抗冻性

对A1B1C4和A2B1C4配合比下超细矿粉水泥土进行抗冻性试验,结果见图2。

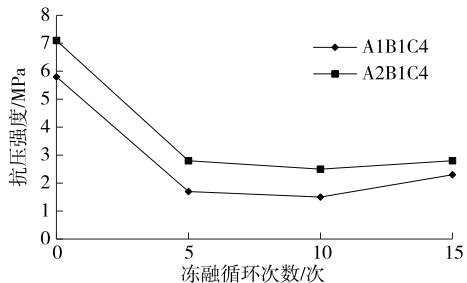


图2 超细矿粉水泥土抗压强度随冻融循环次数的变化

由图2可知:随着冻融循环次数的增加,超细矿粉水泥土的强度减小,0~5次冻融循环时强度下降幅度非常大,A1B1C4下降70.7%,A2B1C4下降60.6%;冻融循环10次时,抗压强度最小,A1B1C4、A2B1C4分别为1.5 MPa、2.5 MPa;冻融循环15次时,抗压强度相比冻融循环10次时反而有所增大,A1B1C4、A2B1C4分别为2.3 MPa和2.8 MPa。出现上述现象的原因可能是因为随着试验的进行,超细矿粉中的部分CaO发生碳化,而碳化作用是一个相对缓慢的过程,碳化作用对土颗粒具有一定的胶结作用,可以限制冻胀引起的变形,削弱冻融对土结构的影响,当碳化作用强于冻融作用时,会呈现强度增加的现象。一旦土体中CaO成分消耗完毕,冻融作用就会超过碳化作用,超细矿粉水泥土的强度会继续降低,直至发生宏观上的冻融破坏^[6]。

3.2 耐腐蚀性

A1B1C4和A2B1C4配合比下超细矿粉水泥土在不同体积密度硫酸钠溶液中浸泡7d时的抗压强度见图3。从图3可以看出:随着硫酸钠溶液体积密度的增大,超细矿粉水泥土的抗压强度先减小后增大再减小。硫酸钠溶液体积密度为0~4.5 g/L时,抗压强度小幅下降;溶液体积密度从4.5 g/L上升至9 g/L时,抗压强度大幅增长;溶液体积密度为9~22.5 g/L时,抗压强度缓慢降低。说明合适的硫酸钠体积密度可以提高超细矿粉水泥土的抗压强度。在合适的硫酸钠体积密度下,激发剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与硫酸钠溶液发生化学反应生成石膏,石膏再与水化硅铝酸钙反应生成钙矾石,钙矾石迅速结晶,使超细矿粉水泥土体积膨胀,并填充在孔隙结构中,超细矿粉水泥土的密实度提高。与此同时,钠离子与水泥水化产物发生化学反应生成 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 与游离 SiO_2 反应生成钠长石,钠长石中的钠离子具有吸附作用,可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的钙离子进行置换,生成的物质具有团粒结构,可凝聚周围黏土颗粒,使黏土颗粒更加紧密。但硫酸根离子过量时,产生的膨胀力可能超过黏土颗粒本身的凝聚力,会使超细矿粉水泥土产生裂纹^[7-8]。

A1B1C4和A2B1C4配合比下超细矿粉水泥土在不同体积密度硫酸钠溶液中浸泡7d时的抗硫酸盐侵蚀系数见图4。从图4可以看出:超细矿粉水泥土抗硫酸盐侵蚀系数的变化趋势与抗压强度一致。硫酸钠溶液体积密度为9 g/L时,抗硫酸盐侵蚀系数最大,A1B1C4和A2B1C4分别为1.29、1.40;

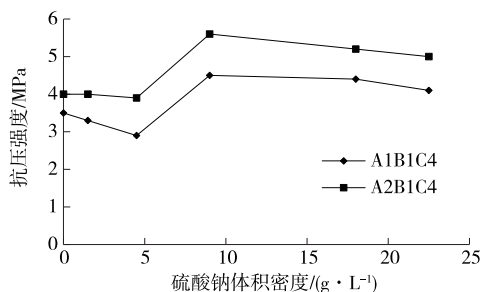


图3 超细矿粉水泥土抗压强度随硫酸钠体积密度的变化

在不同硫酸钠溶液体积密度下,两种配合比超细矿粉水泥土的抗硫酸盐侵蚀系数均大于0.8,其中A2B1C4超细矿粉水泥土的抗硫酸盐侵蚀系数接近1,超细矿粉水泥土具有较强的耐腐蚀性。

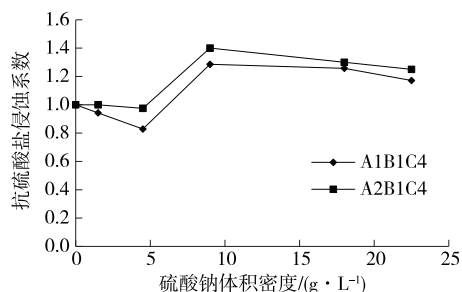


图4 超细矿粉水泥土抗硫酸盐侵蚀系数随硫酸钠溶液体积密度的变化

4 微观分析

综上,A1B1C4和A2B1C4配合比下超细矿粉水泥土的强度、抗冻性和耐腐蚀性满足工程要求,其中A2B1C4的抗压强度高于A1B1C4,且其抗硫酸盐侵蚀系数接近1,具有很强的耐腐蚀性,因此,采用A2B1C4作为粉质黏土改良方案。

成型28d龄期A2B1C4配合比下超细矿粉水泥土试件,将试件分别浸泡在清水和0、9 g/L、22.5 g/L硫酸钠溶液中,对试件进行SEM分析,结果见图5。从图5可以看出:在清水中浸泡时,超细矿粉水泥土的土颗粒结构排列疏松,没有形成有效的整体,有清晰可见的孔隙结构;在9 g/L硫酸钠溶液中浸泡时,生成的絮状凝胶和针状钙矾石结构排列紧密,孔隙结构明显减少;在22.5 g/L硫酸钠溶液中浸泡时,超细矿粉水泥土中含有大量针状钙矾石且相互搭接,表面有大量细微裂纹,这主要是由膨胀力超过土颗粒之间的黏聚力所致。

5 结论

(1) 随着水泥、超细矿粉和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量的增

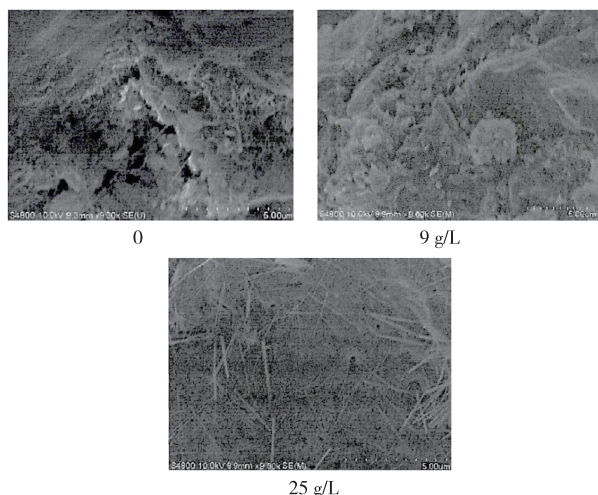


图5 A2B1C4配合比下超细矿粉水泥土在不同体积密度硫酸钠溶液中的SEM测试结果

加,超细矿粉水泥土的强度增大;水泥掺量对超细矿粉水泥土强度的影响最大,超细矿粉掺量次之, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量影响最小。为控制工程成本,宜选择低水泥掺量、高超细矿粉掺量和高 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量作为粉质黏土改良方案。

(2) 由于超细矿粉中 CaO 的碳化作用,随着冻融循环次数的增加,超细矿粉水泥土的抗压强度先减小后增大,冻融循环10次时,抗压强度最小;随着硫酸钠溶液体积密度的增大,超细矿粉水泥土的抗压强度呈先微弱减小后快速增大再缓慢降低的变化特征,硫酸钠溶液体积密度为9 g/L时,抗压强度最

大,水泥掺量为4%时,抗硫酸盐侵蚀系数 ≥ 0.975 。

(3) 采用水泥4%+超细矿粉8%+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1.8%)作为粉质黏土改良方案,在该改良方案下,改良土结构排列紧密,强度高,抗冻性和耐腐蚀性较好,工程经济性较佳,可满足工程实际需要。

参考文献:

- [1] 吴尧.路基工程中粉质黏土的石灰加固技术[J].交通世界,2021(9):108-109.
- [2] 孙文.改良低液限粉质黏土填筑路基关键技术研究[J].工程与建设,2019,33(1):94-96.
- [3] 殷俊.基于强度特性的超细矿粉水泥土配合比设计研究[J].北方交通,2021(9):51-54+58.
- [4] 佟钰,刘阳,罗超,等.聚丙烯纤维改性水泥土的力学性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):507-513.
- [5] 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.
- [6] 陈俊强,刘世强.路基饱和粉质黏土冻胀规律试验研究[J].粉煤灰综合利用,2021,35(5):118-122.
- [7] 丁向群,高博文,罗超,等.硫酸盐对超细矿粉水泥土强度的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(5):886-892.
- [8] 陈卫平,陈丽萍,夏玲.益马高速高液限土水泥改良处治及工后沉降分析[J].公路与汽运,2021(2):61-63.

收稿日期:2022-04-06

(上接第56页)

- [11] XU X, GUO H Y, WANG X F, et al. Physical properties and anti-aging characteristics of asphalt modified with nano-zinc oxide powder [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 732-742.
- [12] ZHANG H L, GAO Y, GUO G H, et al. Effects of ZnO particle size on properties of asphalt and asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 578-586.
- [13] 颜可珍,李慧丽,洪哲,等.LDPE/EVA复合改性沥青的流变性能[J].建筑材料学报,2022,25(4):408-414.
- [14] 陈海龙.胶粉与SBS复合改性沥青制备与性能研

究[J].公路与汽运,2023(1):60-63+74.

- [15] 张强,高学凯,梁春雨.热再生沥青混合料低温蠕变行为及黏弹性分析[J].中外公路,2022,42(2):218-222.
- [16] LI R Y, XIAO F P, AMIRKHANIAN S, et al. Developments of nano materials and technologies on asphalt materials: A review [J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 633-648.
- [17] 么子成,林祥波,刘昌崑,等.纳米碳化硅改性沥青的抗老化性能及机理研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):50-58.

收稿日期:2023-01-04