

复合改良剂对公路路基分散性土改良效果研究

刘国梁

(长沙市西工建设有限公司,湖南 长沙 410200)

摘要:为了研究复合改良剂对公路路基分散性土的改良效果,从某公路现场采取分散性土,制备了不同配比的石灰+三氯乙酸+聚丙烯酰胺复合改良剂改良试样,通过双比重计试验、液塑限试验、击实试验等方法获取了分散度、界限含水率、压实度、无侧限抗压强度(UCS)、CBR等指标的变化规律,探讨了复合改良剂的改良机理,最终通过试验段填筑及观测,验证了复合改良剂改良的有效性和可行性。研究表明:复合改良剂可降低分散性土的分散度、塑性指数和膨胀性,同时提高分散性土的UCS和CBR,相对非试验段,改良试验段沉降大幅减小,而且水稳定性也得到改善;综合室内试验结果及试验段沉降观测结果,建议复合改良剂的配比为7%CaO+0.8%三氯乙酸+0.2%聚丙烯酰胺,且改良土养护时间应尽量保持在7d以上。

关键词:路基;分散性土;复合改良剂;压实度;CBR;无侧限抗压强度

分散性土是一种在低含盐量水中由于离子相互间排斥力超过吸引力,导致土体颗粒分散的黏性土。其抗水蚀能力很低,是近年来岩土工程界比较关注的特殊土类之一,在中国黑龙江、广西、新疆、江苏、山东、河南、青海等10多个省(自治区)均有分布。分散性土含有较多的 Na^+ , Na^+ 促使土颗粒周围双电层水膜厚度增加,土颗粒间吸引力减小,一旦与水接触,呈团聚体状态存在的土颗粒体会全部或大部分彼此分离成松散状细粒,所以采用分散性土作为填料的公路路基,很容易受到水流的冲刷、侵蚀,从而造成路基水毁。

分散性土的处治研究始于20世纪50年代的澳大利亚和美国,一般采用石灰、粉煤灰、水泥等进行土性改良,这些无机结合料掺入土体后,通过水解水化反

应、阳离子交换反应、碳酸化反应和火山灰反应,可以有效地改善分散性土的工程特性。例如,Kumar发现加入熟石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以显著提高分散性土的强度,并降低其塑性,减少黏粒含量,增加土中粗颗粒的占比;Maharaj对南非分散性土的石灰处治效果进行了研究,发现掺入石灰可以降低分散性土道路路堤发生管涌、冲沟等病害的机率。中国研究人员对于石灰改良分散性土也做了一定研究工作:王文健等对南引水库强分散性土掺入4%的石灰进行改良,并采用反滤层保护分散性土;刘杰对均质土坝中的分散性土掺入2%~3%石灰进行改良;高明霞等对南坪水库筑坝土料掺入1%~2%熟石灰,以改善分散性;李华鑫等对大屯水库的分散性土料进行改性试验研究,发现石

- [D]. 吉林大学硕士学位论文,2007.
- [2] 冯仲仁,黄隆洋,郭蒙蒙,等.不同钢纤维掺入率的混凝土疲劳试验研究[J].中外公路,2018(2).
- [3] 朱春风.玻璃纤维改善沥青混凝土性能的理论及实验研究[D]. 吉林大学硕士学位论文,2007.
- [4] 崔世富.掺木质纤维的多孔沥青混合料性能研究[J].中外公路,2019(2).
- [5] 毕鹏.碳纤维增强沥青混凝土路用性能研究[J].中外公路,2019(1).
- [6] 陈晓娟.纤维沥青碎石封层适应性及阻裂效应研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2010.
- [7] 丁智勇.纤维沥青混合料应用研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2004.
- [8] 封基良.纤维沥青混合料增强机理及其性能研究[D]. 东南大学博士学位论文,2006.
- [9] 付极.玻璃纤维对沥青混凝土界面和路用性能的影响研究[D]. 吉林大学博士学位论文,2008.
- [10] 杨毅,郭彤,栾利强.掺加PR抗车辙剂的沥青混凝土疲劳性能研究[J].中外公路,2017(1).

灰剂量达到 1.5%时,改性效果最佳。目前来看,中国针对分散性土的研究大多是从水利水电、环保、农业的角度出发,所分析的指标也往往来自这些领域,实际上,在公路建设领域也会面临分散性土的问题,但目前从公路工程指标角度出发开展的路基分散性土改良研究工作报道较少,参考依据不足。

土体诱发发散性的原因可分为物理性原因和化学性原因,前者在于土体中缺乏胶结物,后者在于土体中含有较多的 Na^+ 。该文从上述机理及公路工程路基土指标出发,提出采用石灰+三氯乙酸+聚丙烯酰胺配比形成复合改良剂,对某公路路基分散性土进行改良,获取复合改良剂降低分散度的规律,分析复合改良

剂中石灰掺量对界限含水率、压实度、无侧限抗压强度、CBR 等指标的影响,最终通过试验段填筑及观测,验证复合改良剂改良的有效性和可行性,为路基分散性土改良应用提供必要支撑依据。

1 试验材料

1.1 试验用土

试验采用的分散性土来自某公路路基现场,该分散性土在干燥状态下具有足够的强度,但是浸水后强度迅速衰减,附近地区的路面频繁出现因路基不均匀变形造成的裂缝。试验用土的基本物理性质见表 1。

表 1 分散性土的基本物理性质

砾粒含量/%	砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	最优含水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑性指数
0	29.40	29.39	41.21	24.3	1.63	78.98	32.39

通过两次比重计试验测定土样中的黏粒($<0.005\text{ mm}$)含量,第 1 次按标准常规试验方法进行,加分散剂、煮沸、搅拌;第 2 次不加分散剂,让黏土颗粒自行水化分散。不加分散剂试验黏粒($<0.005\text{ mm}$)含量占常规试验加分散剂试验黏粒含量的百分数,即为分散度,分散度越大,表明土体趋于分散的程度越高。其中分散度小于 30%,则为非分散性土,分散度为 30%~50%,则为过渡性土,若大于 50%,则为分散性土。图 1 为试验用土的测试结果,由图 1 可知:试验用土的分散度约为 69.2%,属于分散性土。

主要针对化学性分散性土有效,聚丙烯酰胺主要针对物理性分散性土有效,因此,复合改性剂可进行配方的调整,使之达到较好的改良效果。参考文献[12],三氯乙酸和聚丙烯酰胺掺量(与原土质量比)采用 0.8%和 0.2%,而石灰掺量为 3%、5%、7%、9%共 4 种方案。

2 改良对降低分散度的效果分析

改良时将复合改良剂与天然含水率下的分散性土拌和均匀,在恒温恒湿条件下进行养护。分散度(7 d 养护)随复合改良剂中石灰掺量的变化如图 2 所示。

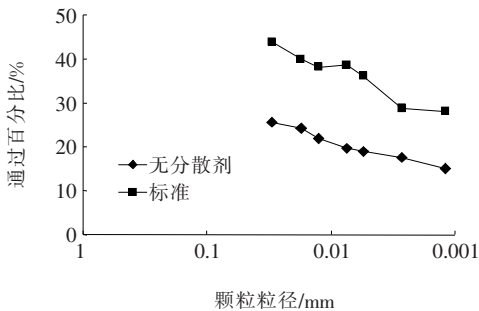


图 1 双比重计试验结果

1.2 复合改良剂

改良剂采用生石灰(CaO)、三氯乙酸(99.9%纯度)和聚丙烯酰胺,其中生石灰呈白色块状,将其进行粉碎、消解,形成熟石灰 $[\text{CaO}(\text{OH})_2]$,三氯乙酸为无色结晶,有刺激性气味,聚丙烯酰胺呈白色粉状。

在分散性土改性剂的原材料中,石灰和三氯乙酸

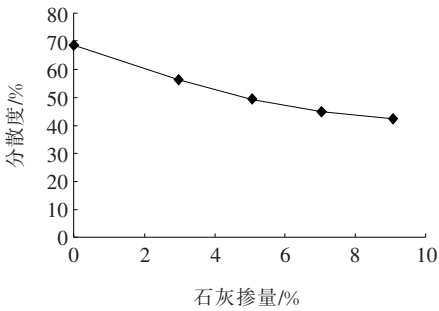


图 2 分散度随复合改良剂中石灰掺量的变化

由图 2 可以看出:随着石灰掺量的增加,分散度从 69.2%降低为 42.6%,但减小速率逐渐放缓。当复合改良剂中石灰掺量超过 5%时,分散度 $<50\%$,改良土已经不属于分散性土的范畴。

图 3 为分散度随养护时间的变化。

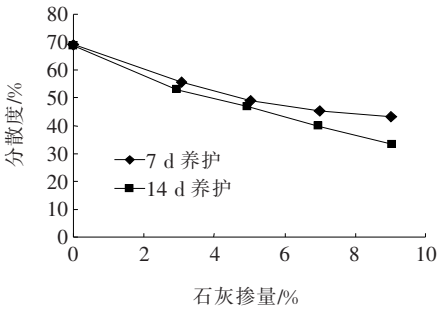


图3 分散度与养护时间的关系

由图3可以看出:养护时间越长,改良土的分散度越低,而且复合改良剂中石灰掺量越大,延长养护时间的效果越明显。

3 改良对分散性土工程性质的影响

对改良土进一步开展界限含水率试验、压实度试验、CBR 试验、UCS 试验等,均参照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》、JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中有关内容进行。

3.1 界限含水率

图4为改良分散性土界限含水率与复合改良剂中石灰掺量的关系(7 d 养护)。

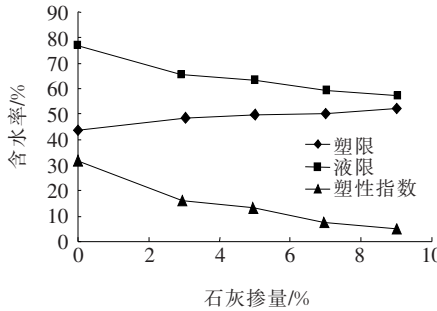


图4 界限含水率随石灰掺量的变化(7 d 养护)

由图4可以看出:当复合改良剂中不含石灰时,改良土液限为75.8%,仅比素土液限(78.98%)有小幅下降,当石灰掺量由3%增加至9%时,液限和塑性指数有所下降,但是塑限却略微增加,尤其当石灰掺量从5%增加至7%时,塑性指数大幅下降8.22%。

图5为改良分散性土界限含水率与养护时间的关系(7%石灰掺量)。由图5可以看出:养护第5~7 d,液限、塑限、塑性指数下降速率最大。

综合图4、5可知:在复合改良剂中增加石灰掺量有助于降低分散性土的液限,并略微增加其塑限,进而降低塑性指数,且养护时间超过7 d后降低效果更加

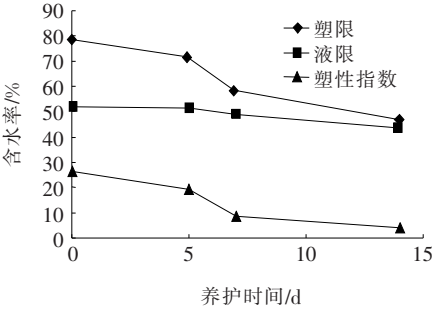


图5 界限含水率随养护时间的变化(7%石灰掺量)

明显。

3.2 压实度

图6为击实曲线随复合改良剂中石灰掺量的变化(7 d 养护),采用的是轻型击实试验。由图6可以看出:在7 d 的养护期下,当石灰掺量从0%增加至9%时,击实曲线逐渐向右下方偏移,最佳含水率从22.80%增加到30.23%,而最大干密度从1.63 g/cm³降低至1.50 g/cm³。对该工程而言,所处地区分散性土的天然含水率往往高于最佳含水率,经过改良后,最佳含水率提高,意味着可以减短路基压实前的翻晒时间。

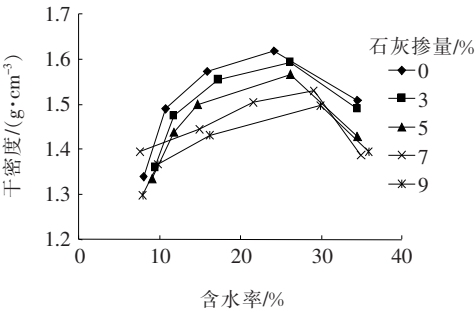


图6 击实曲线随石灰掺量的变化

3.3 无侧限抗压强度(UCS)

图7为改良土 UCS 与复合改良剂中石灰掺量的关系,其中含水率为图6中各掺量下的最佳含水率,压实度为93%。

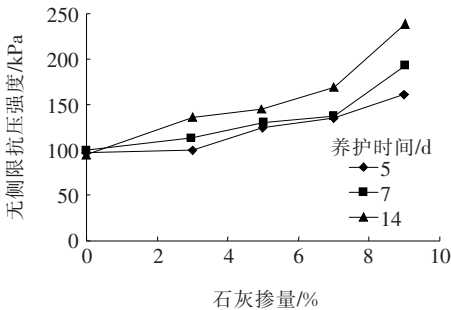


图7 不同石灰掺量及养护时间下分散性土的无侧限抗压强度

由图 7 可以看出:① 石灰掺量和养护时间都会对 UCS 产生明显的影响,当石灰掺量从 0%增加至 9%时,5、7、14 d 养护条件下 UCS 分别增长了 62%、95%、135%,尤其当石灰掺量>7%后,UCS 提升更加明显;② 石灰掺量越大,延长养护时间带来的益处越显著,当石灰掺量为 9%时,相对 5 d 养护,7、14 d 养护 UCS 可以提升 20.4%和 45.1%。

3.4 CBR 与膨胀率

表 2 为饱和改良土 CBR 值和膨胀率的变化,压实度为 93%。

表 2 CBR 和膨胀率的变化

石灰掺量/%	7 d 养护		14 d 养护	
	CBR/%	膨胀率/%	CBR/%	膨胀率/%
0	2.80	14.23	2.80	14.23
3	3.13	11.04	3.31	9.32
5	3.61	8.65	3.93	7.21
7	4.15	6.91	4.78	5.21
9	4.98	4.21	5.73	2.98

由表 2 可以看出:复合改良剂既提高了 CBR 又降低了膨胀率,随着石灰掺量从 0%增加至 9%,7 d 养护条件下 CBR 从 2.80%增加到了 4.98%,14 d 养护条件下,CBR 从 2.80%增加到了 5.73%。当复合改良剂中石灰掺量超过 7%时,改良土的 CBR 可以达到上路堤的填筑要求(>4%)。

4 复合改良剂机理分析

根据复合改良剂的成分,对分散性土进行改良的机理主要有以下 3 个方面。

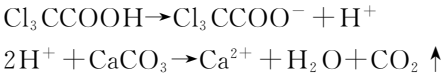
(1) 离子交换机理

由于分散性土中大量 Na⁺ 促使土颗粒周围双电层水膜厚度增加,土颗粒间吸引力减小,这是导致土出现分散性的主要原因;溶液中离子的交换能力主要取决于离子的化合价数和离子水化半径,溶液阳离子交换能力的顺序如下:Fe³⁺>Al³⁺>H⁺>Ba²⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺>Na⁺>Li⁺。复合改良剂可以提供大量的 Ca²⁺ 来置换土颗粒吸附的 Na⁺,土颗粒之间的双电层厚度减小,土粒间的吸引力增大,分散性减弱。

(2) 酸碱度改性机理

分散性土颗粒表面的羟基具有一定的分解趋势:SiOH→SiO⁻+H⁺,该反应受到 pH 值的强烈影响。

若反应环境的碱性增大,将促进上述化学反应进行,净负电荷数 SiO⁻ 增加,双电层变厚,土颗粒分散;反之,若酸性增大,将抑制上述反应的进行,净负电荷数减少,双电层厚度变薄,分散性减弱。复合改良剂中酸性 Cl₃CCOOH 可以抑制羟基的分解,其水解产生的 H⁺ 可进一步与石灰中含有的 CaCO₃ 反应,进一步增加 Ca²⁺ 含量,促进离子交换。化学反应方程式如下:



(3) 絮凝机理

聚丙烯酰胺(PAM)是由丙烯酰胺(AM)单体经自由基引发聚合而成的水溶性线性高分子聚合物,PAM 溶于水形成胶状体,通过黏结促进土壤团粒形成,使得土颗粒间的黏结力大大增加,改善了土体原本遇水分散的特性。

5 试验段改良土填筑效果

现场修筑了 200 m 长的试验段以验证复合改良剂的效果,其中 100 m(试验段 A)采用 5%CaO+0.8%三氯乙酸+0.2%聚丙烯酰胺方案,另 100 m(试验段 B)采用 7%CaO+0.8%三氯乙酸+0.2%聚丙烯酰胺方案,改良路基层主要针对路堤层。填筑流程如图 8 所示。

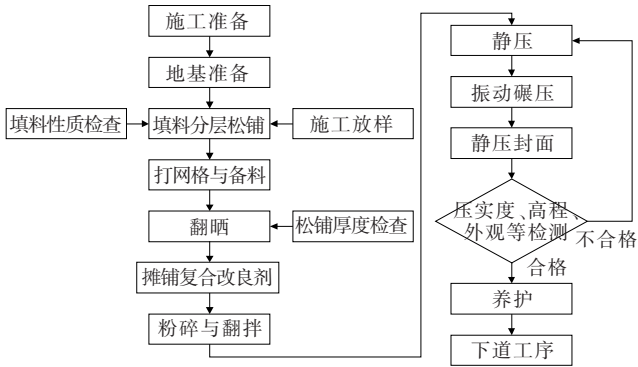


图 8 现场试验段施工工艺流程

路基填筑完成后,沿线路纵向设置了①、②两个剖面,剖面①上的测点 1、2、3 分别位于非试验段、试验段 A、试验段 B,剖面②上的测点 4、5、6 布置方式与此相同。沉降板埋设于路堤层顶面,图 9 为沉降观测曲线。

由图 9 可知:非试验路段测点 1 和 4 的最大沉降达到了 34.89 和 37.86 mm,其中观测第 85~95 d 期间,现场有降雨,由于地下水位上升和雨水入渗作用,路基土含水率快速提升,结构趋于松散、软化,在此期

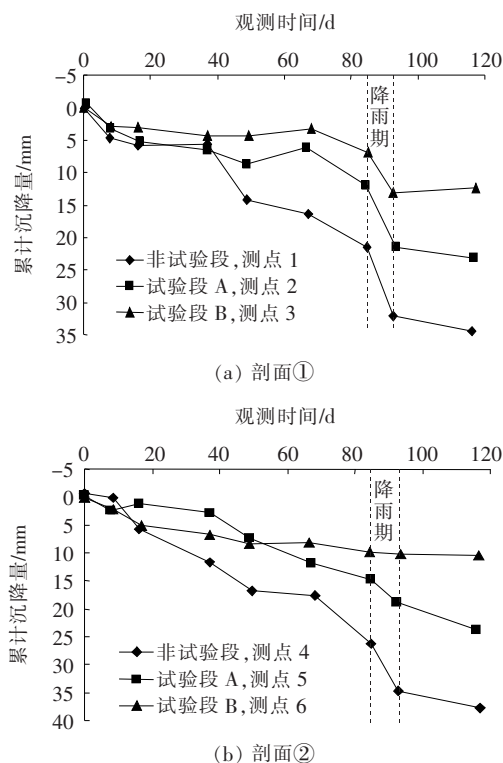


图9 沉降观测曲线

间沉降量急剧增加;而对于复合改良剂改良试验段,沉降明显减小,例如对于试验段B,复合改良剂中石灰掺量达到7%,最大沉降为10 mm左右,而且在第85~95 d的降雨期沉降没有发生“陡增”。根据3个多月的观测结果可知,通过复合改良剂改良,分散性土路基的变形沉降在一定程度上得到了控制,水稳定性也明显改善,路基质量有所提高。

6 结论

通过对分散性土中掺加复合改良剂进行研究,可得如下结论:

(1) 复合改良剂可通过离子交换、酸碱度改性、絮凝等作用改善分散性土的工程性质。对于分散性土,复合改良剂中石灰掺量越大,养护时间越长,改良土的分散度越低。

(2) 在复合改良剂中增加石灰掺量有助于降低分散性土的液限和塑性指数,而且养护时间达到7 d以上后降低效果更加明显。

(3) 经过复合改良剂改良后,分散性土的最佳含水率提高,最大干密度降低,该工程分散性土的天然含

水率往往高于最佳含水率,意味着通过复合改良剂改良可以减短路基压实前的翻晒时间。

(4) 通过复合改良剂改良可以有效提高分散性土的UCS和CBR,同时降低膨胀性。综合考虑分散性土改良后各指标的变化以及试验段沉降观测结果,对于该工程,建议复合改良剂的配比为7%CaO+0.8%三氯乙酸+0.2%聚丙烯酰胺,且养护时间应保持在7 d以上。

参考文献:

- [1] 张路,杨秀娟,樊恒辉,等.土样分散性综合判别方法的对比研究[J].水利发电学报,2020(4).
- [2] 张勇,樊恒辉,杨秀娟.黑龙江省渠道分散性土和膨胀土的工程危害及处理方法[J].中国农村水利水电,2017(12).
- [3] Harichane K, Ghrici M, Kena S. Effect of Curing Time on Shear Strength of Cohesive Soils Stabilized with Combination of Lime and Pozzolana[J]. Int. J. Geotech. Eng., 2001, 9(2): 90-95.
- [4] Kumar N, Swain S, Sahoo U. Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro-Level Investigation[J]. J. Geotech. Geol. Eng., 2012, 24(2): 43-46.
- [5] Maharaj A, Rooy LV, Paige-Green P. Revised Test Protocols for the Identification of Dispersive Soils[J]. Journal of the South African, 2015, 57(1): 31-37.
- [6] 王文健,张野,王立文.南引水库用分散性粘土筑坝的实践与经验[J].黑龙江水利科技,2002(2).
- [7] 刘杰.土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [8] 高明霞,李鹏,王国栋,等.南坪水库筑坝土料分散机理及原因分析[J].岩土工程学报,2009(8).
- [9] 李华鑫,高培法,穆乃敏,等.分散性土的鉴别及改性试验[J].山东大学学报(工学版),2010(4).
- [10] Fan HH, Kong LW. Empirical Equation for Evaluating the Dispersivity of Cohesive Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(9): 989-994.
- [11] 樊恒辉,张路,杨秀娟.分散性土及工程应用的研究进展[J].水利与建筑工程学报,2019(3).
- [12] 王中妮,樊恒辉,贺智强,等.分散性土改性剂对土的分散性和抗拉强度的影响[J].岩石力学与工程学报,2015(2).
- [13] JTG E40-2007 公路土工试验规程[S].
- [14] JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].