

# 无机处治风积沙强度特性及工程应用研究

冉武平\*, 赵杰, 黄文慧, 于江波

(新疆大学建筑工程学院, 新疆乌鲁木齐 830047)

**摘要:**为探究无机处治风积沙的工程特性,通过室内试验开展了3种无机胶结料处治风积沙的7 d回弹模量和无侧限抗压强度研究,明确了其强度特性和适用性.研究表明:随胶结料含量增加,3种处治风积沙回弹模量均增大,其中二灰处治效果最优,其次是水泥石灰处治和石灰处治;随着胶结料含量增加,水泥石灰和二灰处治的风积沙无侧限抗压强度均增大,而石灰处治的则随灰剂量增加先增大后减小,其中水泥石灰处治效果最佳,其次是石灰处治和二灰处治.综合分析强度特性,建议可将水泥石灰处治作为风积沙地区路基最优处治方法,并将其作为高等级公路的底基层和低等级公路的基层;石灰处治风积沙亦可作为低等级公路的底基层和风积沙地区路基,而二灰处治则对风积沙路基处治效果最好.

**关键词:**道路工程;无机处治风积沙;回弹模量;无侧限抗压强度;工程应用

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb201802005

## 0 引言

风积沙作为荒漠地区的一种特殊道路建筑材料,在西部地区特别是在新疆地区广泛分布.但由于其级配不良,颗粒无黏性,一方面松散不易压实,稳定性差,另一方面工程力学性质较差,主要表现在回弹模量较低、稳定性较差<sup>[1]</sup>,故而限制了风积沙的应用,尤其是在路面结构层中的应用.因此如何改善风积沙的工程特性和力学特性,从而将其广泛应用于道路

的含量大于总量的 70%，粉煤灰的比表面积大于 2 500 cm<sup>2</sup>/g，满足规范要求。

风积沙取自托克逊县境内的天然沉积风积沙，相对密度为 1.62，其级配组成如图 1 所示。通过计算可知，风积沙的最大粒径小于 5 mm，94.65%的粒径小于 0.5 mm，仅有 6.08%的粒径小于 0.074 mm；从曲线中可以看到该风积沙的粒径主要集中在 0.074~0.500 mm，经计算风积沙的不均匀系数为 3.57，不均匀系数小于 5 属于级配不良的匀粒土。

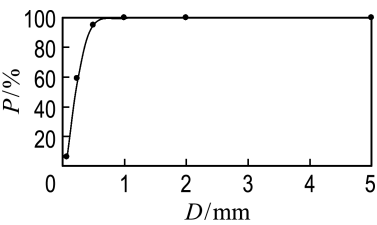


图 1 风积沙级配曲线

Fig.1 The aeolian sand grading curve

1.2 试验段道路结构及路基材料

本研究拟对风积沙采用石灰处治、水泥石灰处治和二灰处治 3 种处治方案。根据文献调研可知：石灰稳定细粒土的石灰用量一般控制在 15% 以内<sup>[13]</sup>，考虑到风积沙黏粒含量少，为充分发挥石灰的胶凝作用和获取较高的干密度，故选择如表 1 所示的石灰用量；而对于水泥石灰处治风积沙，水泥固化反应后具有较大的干缩性<sup>[14]</sup>，为防止开裂水泥用量一般控制在 4%~6%<sup>[15]</sup>，本研究则将水泥最大剂量控制在 5% 以下，水泥石灰配比控制在 1：1.5，故选择如表 2 所示的水泥石灰

表 1 石灰处治风积沙方案

Tab.1 The plan of lime treated aeolian sand

| 配比方案 | 石灰用量/% | 配比方案 | 石灰用量/% |
|------|--------|------|--------|
| 1    | 4      | 4    | 10     |
| 2    | 6      | 5    | 12     |
| 3    | 8      |      |        |

表 2 水泥石灰处治风积沙方案

Tab.

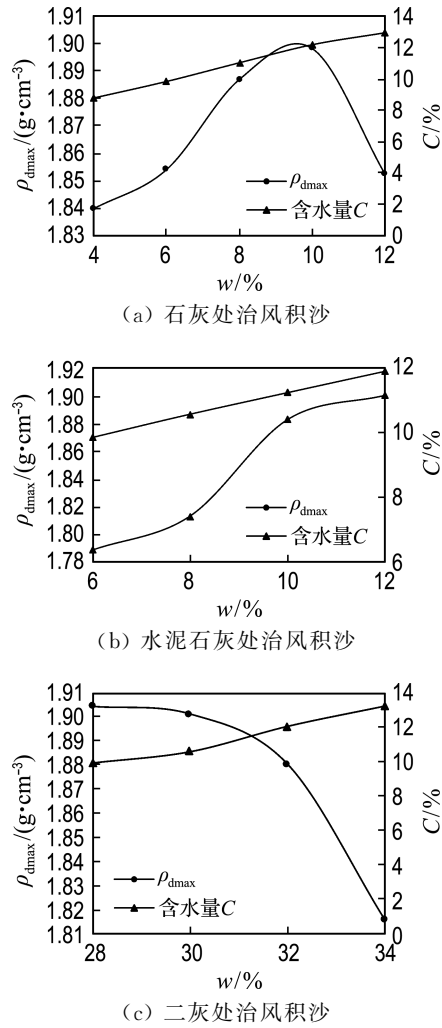


图 2 无机胶结料处治风积沙的最大干密度和最佳含水量

Fig. 2 Maximum dry density and optimum moisture content of inorganic binder treated aeolian sand

度不断减小,且含量越高干密度减小速度越快.这是因为粉煤灰微观结构系空心球体,粉煤灰和石灰细度大、自身密度小,且处治料需水量增大,故而随着二灰用量的增加,处治料的最佳含水量增加,最大干密度则呈显著的减小趋势.

2.2 无机处治风积沙回弹模量

回弹模量作为道路结构设计的重要参数,直接影响道路结构组合和厚度的选择.因而开展无机处治风积沙回弹模量的研究,可明确不同胶结料处治的风积沙结构力学性能及其适用性.本研究利用强度仪法研究了 7 d 龄期的石灰处治、水泥石灰处治、二灰处治风积沙回弹模量,具体研究结果见图 3.

</

治后,水泥能在风积沙中形成坚固的核心,在孔隙中形成水泥骨架,以约束风积沙.同时水泥中富含硅铝化合物,可以很好地和石灰中多余的钙离子进行化学反应,从而大大提高处治风积沙的力学性能.

由图 3(c)可知,二灰处治风积沙 7 d 的回弹模量在粉煤灰用量为 20%不变的情况下,随石灰用量的增加而增加.从 8%时的 88.7 MPa,分别增加了 10.4%、26.8%和 47.8%,石灰用量对强度的影响显著.与其他两种处治风积沙的回弹模量特性对比,二灰处治风积沙的效果最佳.这是因粉煤灰的加入提供了较多的活性硅铝矿物,从而在石灰的碱性激发与相互作用下生成含水硅铝酸钙.这些新生物胶凝结晶后,具有较强的胶结能力和稳定性<sup>[11]</sup>.因此就 7 d 回弹模量而言,其处置效果要远远优于石灰处治风积沙,且较水泥石灰处治风积沙效果也好.

2.3 无机处治风积沙无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是反映无机处治稳定料自身抗压能力的重要力学特性指标,它能准确反映改性风积沙抵抗轴向压力的力学特性.试验结果如图 4 所示.

由图 4(a)可知,石灰处治风积沙的石灰用量分别为 4%、6%、8%、10%和 12%时,其 7 d 无侧限抗压强度分别为 3.42、3.68、3.95、3.87 和 3.68 MPa.从变化规律可以看出石灰处治风积沙的 7 d 无侧限抗压强度随着石灰用量的增加,先增大后减小,在石灰用量为 8%左右,7 d 无侧限抗压强度达到最大值 3.95 MPa,能达到最佳的处治效果.石灰处治风积沙会产生两种相反的作用:一种作用是使土颗粒联结起来,包括离子交换、结晶作用、火山灰反应和碳酸化反应促使胶结料的强度增强;另一种作用是未参与反应的生石灰削弱风积沙之间的联结作用.石灰的用量为 4%时由于石灰用量较少主要起联结作用,随着石灰用量的增加残余的生石灰就会越来越多,当石灰用量超过 8%时削弱作用就会成为主要影响因素,故无机胶结料的无侧限抗压强度会降低.石灰处治风积沙的无侧限抗压强度存在最佳的石灰用量.

由图 4(b)可知,水泥石灰处治风积沙的 7 d 无侧限抗压强度随着水泥石灰总用量的增加而增大且几乎呈线性变化.在胶结料含量为 6%、8%、10%和 12%时,其 7 d 无侧限抗压强度分别为 4.0、4.3、4.8 和 5.1 MPa.与石灰处治风积沙的

超过12%时强度增长缓慢。二灰处治风积沙在胶结料含量28%时,其7 d无侧限抗压强度为2.6 MPa,当胶结料含量增加至30%、32%和34%时,强度增加7.7%、19.2%和23.1%。7 d无侧限抗压强度主要是风积沙自身的嵌挤作用与石灰和粉煤灰填充后发生的火山灰反应及结晶作用产生胶凝物提供。在石灰用量为8%时,由于石灰的用量较少,石灰与粉煤灰发生的火山灰反应消耗的粉煤灰有限,残余的粉煤灰由于早期强度低,还会影响风积沙之间的联结作用;随着石灰用量的增加,石灰与粉煤灰之间的火山灰作用更加充分,强度会增高;但石灰用量继续增加,则会有部分石灰残余,这将影响二灰与风积沙之间的联结作用。故二灰处治风积沙的无侧限抗压强度在胶结料较少时较低,随着石灰用量的增加,逐渐提高,且石灰用量达到一定值之后增速变缓;继续增加石灰用量二灰处治风积沙的强度会降低。由此可知,粉煤灰用量为20%、石灰用量为12%时用料最为经济合理。

### 3 结 论

(1)石灰、水泥石灰、二灰处治后的风积沙回弹模量都显著提高,且随着胶结料的增加,回弹模量均呈增长趋势。其中二灰处治风积沙回弹模量最大,超过100 MPa,水泥石灰处治风积沙回弹模量接近100 MPa,石灰处治风积沙回弹模量最小,仅为20~30 MPa。

(2)石灰、水泥石灰、二灰处治后的风积沙的无侧限抗压强度都显著提高,且随着胶结料的增加,水泥石灰处治和二灰处治风积沙无侧限抗压强度呈现出增长趋势,其强度值分别为4~5 MPa和2~3 MPa,而石灰处治风积沙无侧限抗压强度则先增大后减小,其强度值为3~4 MPa,最高强度值对应石灰用量为8%左右。因此就无侧限抗压强度性能指标而言,水泥石灰处治效果最佳,石灰处治效果其次,而二灰处治效果最差。

(3)石灰处治风积沙的无侧限抗压强度变化规律呈抛物线型,石灰的最佳用量为8%。水泥石灰处治风积沙的无侧限抗压强度随水泥石灰的用量呈线性增加,水泥石灰处治风积沙的强度高于石灰处治风积沙。二灰处治风积沙的无侧限抗压强度在粉煤灰用量确定时与石灰用量密切相关,初始随石灰用量的增加,无侧限抗压强度线性增长,随石灰用量的继续增加,增长缓慢,石灰用量为12%时能达到最佳的效果。

(4)从上述无机处治风积沙强度特性来看,水泥石灰处治风积沙总体效果最好,因此建议可将其作为高等级公路的底基层和低等级公路的基层;而二灰处治风积沙由于其回弹模量较高而无侧限抗压强度相对较低

- Highway and Transportation Research and Development**, 2000, **17**(6):26-29. (in Chinese)
- [10] 李德超. 石灰粉煤灰稳定沙漠沙路用性能研究[J]. 中南公路工程, 2005, **30**(3):92-96.
- LI Dechao. Properties of lime and fly-ash stabilized aeolian sand for highway applications [J]. **Central South Highway Engineering**, 2005, **30**(3):92-96. (in Chinese)
- [11] 张登良. 石灰稳定土原理及应用[J]. 西安公路学院学报, 1987(4):1-12.
- ZHANG Dengliang. Principles and application of lime soil [J]. **Journal of Xi'an Institute of Highway**, 1987(4):1-12. (in Chinese)
- [12] 宋学庆. 石灰粉煤灰黄土工程性质试验研究 [J]. 中外公路, 2017, **37**(5):228-232.
- SONG Xueqing. Experimental study on properties of lime-fly ash loess engineering [J]. **Journal of China and Foreign Highway**, 2017, **37**(5):228-232. (in Chinese)
- [13] 孟庆营. 无机结合料稳定风积沙路用性能研究[D]. 西安:长安大学, 2003.
- MENG Qingying. Road performance of inorganic binder stabilized aeolian sand [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese)
- [14] 余帆, 黄煜镔, 孙大权. 石灰土和水泥土的减水剂改性效果[J]. 建筑材料学报, 2017, **20**(2):283-287, 309.
- YU Fan, HUANG Yubin, SUN Daquan. Modification effect of lime soil and cement soil by water-reducing agent [J]. **Journal of Building Materials**, 2017, **20**(2):283-287, 309. (in Chinese)
- [15] 袁二键. 水泥石灰稳定处治粉砂土路基的应用技术研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2011.
- YUAN Erjian. Study on the application of the silt subgrade treatment by cement lime [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [16] 张向东, 曹启坤, 潘宇. 二灰改良土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8):2560-2564.
- ZHANG Xiangdong, CAO Qikun, PAN Yu. Experiment research of lime-fly ash soil's dynamics characteristics [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, **31**(8):2560-2564. (in Chinese)
- [17] 潘宇. 二灰改良风积土动力特性试验[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2011.
- PAN Yu. Experiment research of lime-fly ash soil's dynamics characteristics [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011. (in Chinese)