

不同掺量风化砂对宜昌市某公路膨胀土特性的影响研究

杨俊^{1,2}, 黎新春¹, 张国栋¹, 唐云伟³, 谢支钢⁴, 郭道谊⁴

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002; 2. 宜昌市虹源公路工程咨询监理有限责任公司, 湖北宜昌 443002;
3. 湖北省宜昌市交通运输局, 湖北宜昌 443002; 4. 湖北省宜昌市夷陵区小鸦一级公路改建项目部, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 针对湖北省宜昌市小溪塔至鸦鹊岭一级公路改建工程项目中广泛存在的膨胀土及当地可以利用的风化砂展开试验研究, 分别针对原状膨胀土和掺入 10%~50% 的风化砂改良膨胀土进行击实试验及膨胀性指标室内试验。通过在原状膨胀土中掺入不同含量的风化砂进行试验, 可以发现掺风化砂可以改变膨胀土的含水特性和密实特性; 掺不同含量的风化砂对膨胀土的膨胀性指标影响较大, 可以显著抑制膨胀土的膨胀性, 达到路基填料的标准。

[关键词] 膨胀土; 风化砂; 膨胀指标; 击实试验

[中图分类号] TU411.3 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)11-0057-06

1 前言

膨胀土是一种有着反复潜在性危害的不良土体, 它对公路工程不利的主要性质表现为遇水膨胀、强度骤减、失水干缩、易产生路堤滑塌、失稳、滑坡等严重事故, 还会产生路面开裂、膨胀、松散、剥落等病害^[1], 造成巨大的经济损失。

目前针对膨胀土改良方法的研究有很多, 也取得了一系列的成果。概括起来讲, 膨胀土改良方法有 3 类, 即物理改良、化学改良和生物改良。在工程实际中, 运用最多的还是化学改良方法, 如掺石灰、水泥、粉煤灰等^[2~6]。尽管在工程上运用很广泛, 但这些化学改良方法却有着许多的不足。例如, 掺石灰改良膨胀土能够明显减小膨胀土的塑性, 但是水稳定性较差, 施工周期较长, 施工的工序复杂, 并且现场施工难以拌和控制, 对环境污染比较大, 同时对施工人员的健康也存在着威胁; 掺水泥改良膨胀土凝结硬化快, 施工时间紧迫, 但干缩裂缝现象明显, 固化效果不好, 现场施工拌和也难以控制; 掺粉煤灰

改良膨胀土能够提高膨胀土的抗剪强度, 降低液限, 但是对胀缩性改良效果不明显, 且成本相对较高, 现场难以拌和均匀。化学改良还有一个最致命的缺陷就是它的时效性较差, 在大气、温度和水等综合作用下, 随着时间的推移, 会逐渐“失效”, 从而导致膨胀土中的粘粒矿物质“复活”, 再次产生胀缩特性, 致使公路路基被破坏。

笔者结合湖北省宜昌市小溪塔至鸦鹊岭一级公路(以下简称小鸦一级公路)改建工程项目的实际情况, 试图找到一种能就地取材地对膨胀土实施物理改良的方法。小鸦一级公路沿线膨胀土分布广, 周围没有其他可换填的材料。但是当地风化砂分布广泛, 根据实际情况, 拟采用风化砂对膨胀土进行物理改良, 利用风化砂的摩擦阻力来抵消膨胀土的膨胀力, 抑制膨胀土的膨胀, 达到路基工程材料的标准。同时能够充分合理利用材料, 做到就地取材, 降低工程造价, 还能起到保护环境的作用。再者, 膨胀土与风化砂拌和在施工现场控制相对比较容易。通过对不同掺砂量改良膨胀土的击实性能及膨胀特性

[收稿日期] 2012-05-14

[作者简介] 杨俊(1976—), 男, 湖北武汉市人, 三峡大学副教授, 国家注册监理工程师, 主要研究方向为道路与桥梁工程;

E-mail: wangjing750301@163.com

进行室内试验研究,验证了掺砂改良膨胀土的可行性,得到了不同掺砂量对改良膨胀土的击实性能和膨胀特性的影响程度。

2 宜昌市小鸦一级公路膨胀土及风化砂特性

研究过程中,试验采用的膨胀土取自湖北省宜昌市夷陵区小鸦一级公路 K24 + 800 ~ K25 + 400 段,试验用风化砂取自鸦鹊岭 K22 + 000 ~ K23 + 000 段。对

表 1 小鸦一级公路膨胀土基本物理性质指标

Table 1 The basic physical property indexes of Xiaoya highway expansive soil

粒组含量(粒径单位:mm)			天然含水率 ω /%	液限 ω_l /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p
砂粒组 0.075 ~ 2	粉粒组 0.005 ~ 0.075	粘粒组 < 0.005				
26.58 %	56.28 %	17.14 %	29.43	70.53	24.09	46.44

表 2 小鸦一级公路风化砂基本物理性质指标

Table 2 The basic physical property indexes of Xiaoya highway weathered sand basic

粒组含量(粒径单位:mm)			级配指标		天然含水率 ω /%
粗粒组 0.5 ~ 2	中粒组 0.25 ~ 0.5	细粒组 0.075 ~ 0.25	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	
11.5 %	21.4 %	67.1 %	2.84	0.86	13.64

从表 1 和表 2 可以看出,小鸦一级公路所在地的膨胀土天然含水率达到了 29.43 %,属于高含水率土。液限 ω_l 为 70.53 %,大于 50 %;塑限 ω_p 为 24.09 %;塑性指数 I_p 为 46.44,大于 17,故该膨胀土为高液限黏土。自由膨胀率 δ_{ef} 为 43 %,大于 40 % 小于 60 %,膨胀等级初步判定为弱膨胀土。风化砂试样中细粒径的含量达到 67.1 %,大于 50 %;不均匀性系数为 2.84,小于 5;曲率系数为 0.86,小于 1,由此可知,该地区风化砂为级配不良细砂。

试验将风化砂按照不同的比例掺入到膨胀土中进行对比研究。根据掺砂质量比例的不同,将混合试样分别进行编号,掺砂的质量比例分别为 0、10 %、20 %、30 %、40 %、50 %,对应的试样编号依次为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]。

3 不同掺砂量对膨胀土的击实试验影响

击实试验按照《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007) 制备击实土样,土样采用干法制备,击实土样不重复使用^[7]。取一定量风干的膨胀土和 风化砂,按照试验设计的配合比,配置不同比例的掺砂膨胀土样。按照土工试验规程选用 DJ-Q 型电动击实仪进行重型击实试验,选用直径 15.2 cm 的击实桶,土样分 3 层,每层 98 击,单位体积的击实功

膨胀土及风化砂进行外观检测可见:膨胀土土样颜色为灰白色,有滑感,黏土质较重,干燥土样强度很高,含水率较大时,黏性很强,肉眼可看到少量的白色钙质结核;风化砂颜色为土黄色,颗粒较细,砂粒的硬度较高且有一定的棱角。

通过现场取环刀试验、室内颗分试验、液塑限试验、自由膨胀率试验等,可得出试验用膨胀土和 风化砂的基本物理性质指标,见表 1 和表 2。

为 2 677.2 kJ/m³。按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E 51—2009),每个土样做 2 组平行试验,取平行试验差值满足精度要求的 2 组结果的平均值作为最终试验结果。不同掺砂量改良膨胀土的击实试验结果见表 3。

表 3 不同掺砂量改良膨胀土的击实试验结果

Table 3 Compaction test results of modified expansive soil with different dosages of sand

土样编号	掺砂比例/%	孔隙率 n /%	最佳含水率 ω_{op} /%	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$
1 [#]	0	1.55	12.82	1.899
2 [#]	10	1.56	12.49	1.913
3 [#]	20	1.56	12.26	1.965
4 [#]	30	1.58	12.05	1.947
5 [#]	40	1.59	11.49	1.931
6 [#]	50	1.61	11.07	1.918

试验结果表明如下几点。

1) 掺砂改变了膨胀土的击实特性。

2) 掺砂后,膨胀土的最佳含水率降低,且随着掺砂量的增大,最佳含水率降低的程度先减小后增大,掺砂比例在 0 ~ 30 % 变化时,最佳含水率变化的幅度约为 25 %,掺砂比例从 30 % 增大到 50 % 时,最佳含水率的减小幅度约为 50 %。产生这一现象的原因是由于加入风化砂之后,膨胀土的黏性越来

越低,保水性也随着降低,当掺砂比例达到一定程度时,由于试验采用的风化砂粒径较细,故遇水以后,其水稳定性较差。

3)孔隙率随着掺砂量的增加而增大,因为膨胀土属于高黏性土,掺入粒径较细的风化砂之后,增大了土颗粒之间的摩擦力,减小了黏性,增大了孔隙率。由于试验采用的风化砂以细粒含量为主,故掺砂量的增加并没有对孔隙率产生太大的影响。

4)最大干密度随着风化砂的加入,先逐渐增大,且随着风化砂掺量的增加,最大干密度增大的幅度也随着加大,当掺砂量达到20%时,其最大干密度达到最大值,继续掺入风化砂后,其干密度开始逐渐减小,且减小的幅度逐渐降低。产生这一现象的主要原因是掺入不同含量的风化砂,膨胀土的孔隙率、重度和最佳含水率均发生了改变,从而导致最大干密度也会发生相应的变化。

综上所述试验现象分析可知,掺入20%的风化砂对改良后的水稳定性和最大干密度均有最好的效果。

4 不同掺砂量对膨胀性指标的影响试验

4.1 不同掺砂量对膨胀土的自由膨胀率影响试验

自由膨胀率是指松散的烘干土粒在水和空气中分别自由堆积的体积之差与空气中自由堆积的体积之比,它反映了膨胀土的膨胀潜势的高低,同时也是反映膨胀土膨胀性质的最直观的指标,常作为膨胀土判别和分类的指标。

根据《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007),先将风干碾细的膨胀土土样和风化砂分别过孔径为0.5 mm的筛,然后在105~110℃下烘干至恒重,在干燥器中冷却后按照设计的配合比分别配制不同比例的掺砂土样,用标准量土杯取10 mL土样进行自由膨胀率试验。每个土样做4组平行试验,取平行试验差值满足精度要求的4组结果的平均值作为最终试验结果。不同掺砂量改良膨胀土的自由膨胀率试验结果见表4。

表4 不同掺砂量对自由膨胀率指标的影响

Table 4 The impact on the free expansion rate index with different dosages of sand

土样编号	掺砂比例/%	自由膨胀率 δ_{ef} /%
1#	0	43.5
2#	10	31.0
3#	20	26.0
4#	30	20.5
5#	40	19.0
6#	50	17.0

从表4中能够看出如下几点。

1)掺风化砂后膨胀土的自由膨胀率较未掺砂的要显著降低,说明掺砂对于抑制弱膨胀土的膨胀性起到了一定的作用。这是因为掺入风化砂后,一方面膨胀土的总量减少导致膨胀量有所降低,另一方面,由于砂粒之间的摩擦阻力作用,抵消了一部分膨胀能量。

2)随着掺砂比例的增大,膨胀土的自由膨胀率逐渐降低,从纯膨胀土到掺砂50%,膨胀土的自由膨胀率从43.5%下降到17.0%。从理论上讲,如果风化砂无法抑制膨胀,那么掺风化砂量为50%时,自由膨胀率也应减半至21%,但试验结果显示,自由膨胀率的减少量并非与风化砂掺量增加成直线比例变化,这进一步验证了掺风化砂能有效抑制膨胀土的自由膨胀。

3)随着掺砂比例的增大,膨胀土的自由膨胀率降低的幅度逐渐减小。这是因为膨胀土与风化砂拌和后,当风化砂含量比较少时,膨胀土颗粒将风化砂颗粒包裹着,膨胀的时候,风化砂能充分发挥作用,吸收膨胀能量;当风化砂掺量增大到40%以后,由于风化砂含量过大,一部分风化砂互相嵌挤并没有完全被利用,故在宏观上表现为自由膨胀率降低幅度减缓。当掺砂比例从0增大到10%的时候,自由膨胀率降低幅度最大,此时的掺砂效果是最好的。

4.2 不同掺砂量对膨胀土无荷膨胀率影响试验

无荷膨胀率是指试样在无荷载有侧限的条件下,浸水后在高度方向上的单向膨胀量与原高度的比值,常作为评价黏性土膨胀潜势的参考指标。

根据《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007),将风干碾细的膨胀土土样和风化砂分别过2 mm标准筛,在105~110℃下烘干至恒重,然后在干燥器中冷却后按照设计的配合比分别配制不同比例的掺砂土样。根据重型击实试验得到的最佳含水率,分别配制最佳含水率状态下的掺砂土样,然后焖料制样,无荷膨胀率试样直径为61.8 mm,高为20 mm,采用WZ-2型膨胀仪进行测试。每个土样做2组平行试验,取平行试验差值满足精度要求的2组结果的平均值作为最终试验结果,不同掺砂量对膨胀土的无荷膨胀率影响的试验结果见表5。

从表5试验结果中可以看出如下几点。

1)在有侧限无荷载的条件下,随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的无荷膨胀率逐渐减小,掺砂之后,无荷膨胀率从9.39%减小到6.83%。

表5 不同掺砂量对无荷膨胀率指标的影响

Table 5 The impact on the free load expansion rate index with different dosages of sand

土样编号	掺砂比例/%	无荷膨胀率 δ_e /%
1#	0	9.39
2#	10	8.74
3#	20	8.34
4#	30	7.78
5#	40	7.43
6#	50	6.83

2) 掺砂膨胀土的无荷膨胀率比未掺砂前低,但是掺砂之后无荷膨胀率减少量并不是很明显,说明掺砂对膨胀土的无荷载膨胀率的影响较小。

3) 随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的无荷膨胀率减小的趋势平缓。通过试验对比发现,无荷膨胀率与掺砂比例之间呈线性关系,关系式为

$$\delta_e = -0.0494\varphi + 9.32$$

式中, φ 为掺砂量; δ_e 为无荷膨胀率。

通过计算,无荷膨胀率与掺砂比例之间的相关系数为 0.9945,这表明掺砂对膨胀土的无荷膨胀率基本上影响不大。

4.3 不同掺砂量对膨胀土有荷膨胀率影响试验

有荷膨胀率指土样在有荷载、有侧限的条件下,浸水后在高度方向上的单向膨胀量与原高度的比值,一般用来模拟覆盖压力或者某一特定荷载下土的膨胀率,研究荷载与膨胀率之间的关系。

根据《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007),将风干碾细的膨胀土土样和风化砂分别过 2 mm 标准筛,在 105 ~ 110 °C 下烘干至恒重,然后在干燥器中冷却后按照设计的配合比分别配制不同比例的掺砂土样。根据重型击实试验得到的最佳含水率,分别配制最佳含水率状态下的掺砂土样,然后焖料制样,无荷膨胀率试样直径为 61.8 mm,高为 20 mm,采用双联固结仪进行测试。根据工程的需要,测试 25 kPa 和 50 kPa 下的膨胀率。每个土样做 2 组平行试验,取平行试验差值满足精度要求的 2 组结果的平均值作为最终试验结果。不同掺砂量对膨胀土的有荷膨胀率影响的试验结果见表 6。

从表 6 的试验结果能够看出如下几点。

1) 掺砂膨胀土的有荷膨胀率比未掺砂前明显降低;掺砂前,25 kPa 的膨胀率为 2.34%,掺砂 50% 后变为 0.56%;掺砂前,50 kPa 的膨胀率为 1.69%,掺砂 50% 后变为 0.09%。

表6 不同掺砂量对有荷膨胀率指标的影响

Table 6 The impact on the loaded expansion rate index with different dosages of sand

土样编号	掺砂比例/%	有荷膨胀率 δ_{ep} /%	
		25 kPa	50 kPa
1#	0	2.34	1.69
2#	10	1.98	1.36
3#	20	1.67	0.86
4#	30	1.55	0.69
5#	40	1.47	0.12
6#	50	0.56	0.09

2) 随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的有荷膨胀率减小量逐渐减少。当掺砂量为 10% 时,25 kPa 的膨胀率较未掺砂的膨胀率减小了 0.36%;当掺砂量为 20% 时,25 kPa 的膨胀率较掺砂量 10% 的膨胀率减小了 0.31%;当掺砂量分别为 30% 和 40% 时,25 kPa 的膨胀率较前一级减小量分别为 0.12% 和 0.08%。由此可见,如果从 25 kPa 作用下的有荷膨胀率来评价改良效果,掺砂量为 20% 时效果最好。

3) 随着掺砂比例的增大,50 kPa 的膨胀率的变化呈现周期性衰减,掺砂量为 10% 时,50 kPa 的膨胀率较未掺砂减少了 0.33%;掺砂量为 20% 时,50 kPa 的膨胀率较掺砂 10% 减少了 0.5%;掺砂量为 30% 时,50 kPa 的膨胀率较掺砂 20% 减少了 0.17%;掺砂量为 40% 时,50 kPa 的膨胀率较掺砂 30% 减少了 0.57%;掺砂量为 50% 时,50 kPa 的膨胀率较掺砂 40% 减少了 0.03%。由此可见,如果从 50 kPa 作用下的有荷膨胀率来评价改良效果,也是掺砂量为 20% 时效果最好。

4) 通过对相同掺砂量不同荷载下有荷膨胀率的比较,荷载越大,土样的膨胀率越小,说明增加荷载能抑制膨胀土的膨胀。产生这一现象的主要原因是因为外荷载能抵消膨胀土的膨胀力,外荷载越大,抵消的膨胀力就越多。

4.4 不同掺砂量对膨胀土的膨胀力影响试验

膨胀力是指在不允许侧向变形的情况下,保持土体充分吸水而不发生竖向膨胀所需施加的最大压力值^[8~10],是评定膨胀土膨胀潜势的重要指标。

根据《公路土工试验规程》(JTG E 40—2007),将风干碾细的膨胀土土样和风化砂分别过 2 mm 标准筛,在 105 ~ 110 °C 下烘干至恒重,然后在干燥器中冷却后按照设计的配合比分别配制不同比例的掺砂土样。根据重型击实试验得到的最佳含水率,分

别配制最佳含水率状态下的掺砂土样,然后焖料制样,膨胀力试样直径为 61.8 mm,高为 20 mm,采用平衡加压法进行测试。每组土样做 4 组平行试验,取平行差值满足精度要求的 4 组结果的平均值作为最终试验结果。不同掺砂量对膨胀土的膨胀力影响的试验结果见表 7。

表 7 不同掺砂量对膨胀力指标的影响

Table 7 The impact on the expansion force index with different dosages of sand

土样编号	掺砂比例/%	膨胀力 P_e /kPa
1#	0	72.54
2#	10	45.08
3#	20	36.45
4#	30	29.79
5#	40	23.03
6#	50	11.23

从表 7 中可以看出如下几点。

1) 掺风化砂膨胀土的膨胀力比未掺砂前有显著的降低,说明掺风化砂对于抵消膨胀力,抑制膨胀土的膨胀起到了较好的效果。

2) 随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的膨胀力逐渐减小。掺砂前,土样的膨胀力为 72.54 kPa;掺砂量为 50% 时,土样的膨胀力为 11.23 kPa。

3) 随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的膨胀力减小的幅度逐渐变缓慢。通过实验对比发现,当掺砂比例从 0 增大到 10% 的时候,此时膨胀力减小的幅度是最大的,掺砂的效果最好。

5 结语

1) 研究表明,掺风化砂对抑制膨胀土的膨胀是有效的,不同的掺砂量对改良膨胀土的膨胀指标有明显的影响。

2) 通过研究及其比对试验结果,可知掺风化砂改良膨胀土的方法可行,经过风化砂改良的膨胀土的膨胀率可以达到路基填料膨胀指标的要求。

3) 掺风化砂降低了膨胀土的最佳含水率,提高了膨胀土的最大干密度,减小了膨胀土的空隙率,表明掺砂改变了膨胀土的含水特性和密实特性。

4) 试验研究表明,掺风化砂降低了膨胀土的最佳含水率,掺砂 40% 时,最佳含水率减小得最为显著;掺砂增大了膨胀土的最大干密度,掺砂 20% 时,最大干密度增大得最为明显。

5) 掺砂对膨胀性指标影响较大,掺砂 10% 时,自由膨胀率、无荷膨胀率和膨胀力降低最显著;掺砂 20% 时,有荷膨胀率减小最明显。

6) 本文只是针对该地方的土性而进行的试验,把结果应用于其他地方时,应注意修正,并具体地方具体试验。综合考虑抑制膨胀性、水稳定等方面因素,确定掺砂 20% 对改良小鸦一级公路膨胀土有最好的效果。

参考文献

- [1] 陈守义,姚海琳. 当宜高速公路膨胀土岩土力学性质研究专题报告[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,1998.
- [2] 惠会清,雷胜友. 膨胀土的膨胀机理及其改良方法的综述[J]. 公路交通科技,2005,22(9):90-92.
- [3] 张季如,徐三峡. 石灰和粉煤灰稳定膨胀土路基的压实特性研究[J]. 武汉理工大学学报,2002,24(9):27-30.
- [4] 张季如,尹光辉,李明海. 弱膨胀土特性及路堤填筑控制标准探讨[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(1):37-39.
- [5] 尚云东,耿丙彦. HTAB 改良膨胀土性能试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(9):138-143.
- [6] 雷胜友,惠会清. 固化液改良膨胀土性能试验研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):612-615.
- [7] 饶锡保,黄斌,吴云刚,等. 膨胀土击实样膨胀特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(2):211-215.
- [8] 丁振洲,郑颖人,李利晟. 膨胀力变化规律试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1329-1332.
- [9] 余飞,余静,陈善雄,等. 膨胀土 CMA 改性与石灰改性对比试验[J]. 华中科技大学学报,2006,34(8):100-103.
- [10] 陈善雄,李伏保,孔令伟. 弱膨胀土工程特性及其路基处治对策[J]. 岩土力学,2006,27(3):353-359.

The impact on expansive soil characteristics with different dosages of weathered sand of a highway in Yichang

Yang Jun^{1,2}, Li Xinchun¹, Zhang Guodong¹,
Tang Yunwei³, Xie Zhigang⁴, Guo Daoyi⁴

- (1. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2. Hongyuan Highway Engineering Supervision and Advisory Limited Liability Company of Yichang City,
Yichang, Hubei 443002, China; 3. Yichang Transport Bureau, Yichang, Hubei 443002, China;
4. First-Class Highway Rebuilding Engineering Project From Xiaoxita to Yaqueling of Yichang City,
Yichang, Hubei 443002, China)

[**Abstract**] Aiming at widespread presence of expansive soil which can be obtained in the project from Xiaoxita to Yaqueling first-class highway rebuilding engineering in Yichang City of Hubei Province and weathered sand which can be made full use of locally, many experiments were made. Compaction experiments and expansibility index indoor experiments of undisturbed expansive soil and expansive soil mixed with sand range from 10 % to 50 % were made. Through the test of undisturbed expansive soil mixed with different content of weathered sand, it was found that undisturbed expansive soil mixed with weathered sand can change the expansive soil water characteristics and compaction characteristics. Undisturbed expansive soil mixed with different content of weathered sand can influence the expansibility of the expansive soil index and significantly inhibit the expansibility of the expansive soil and reach the standard of roadbed filler.

[**Key words**] expansive soil; weathered sand; expansion indicator; compaction test