

# 风化砂改良膨胀土对抗剪强度指标的影响研究

杨俊<sup>1</sup>, 童磊<sup>1</sup>, 张国栋<sup>1</sup>, 熊君来<sup>1</sup>, 唐云伟<sup>2</sup>, 梁勇<sup>3</sup>

(1. 三峡大学 土木与建筑学院 湖北 宜昌 443002;

2. 宜昌市交通运输局, 湖北 宜昌 443002; 3. 小鸦一级公路改建工程项目部, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:**通过对比分析石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土对抗剪强度指标的影响,引入风化砂改良膨胀土对抗剪强度指标影响的研究。在膨胀土中掺入不同比例的风化砂,进行了直剪试验。结果表明:掺入风化砂能有效提高膨胀土的抗剪强度;粘聚力随着掺砂比例的增加而逐渐减小,内摩擦角则随着掺砂比例的增加先增大后减小。改变掺砂膨胀土的含水率,进行直剪试验,结果得出:同一掺砂比例下的粘聚力与内摩擦角均随着含水率的增加先增大后减小。掺入不同比例风化砂进行胀缩特性试验得出:掺风化砂能有效抑制膨胀土的膨胀性和收缩性,改良后的胀缩总率低于 0.7%,能达到路基填料的标准。综合考虑掺砂比例和含水率对膨胀土抗剪强度指标的影响,可以得出:当掺砂比例为 30%、含水率为 10%时,掺砂膨胀土的抗剪强度指标达到最佳值。

**关键词:**膨胀土; 风化砂; 掺砂比例; 含水率; 抗剪强度; 胀缩特性

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)02-0276-06

## Research on Shear Strength Index of Expansive Soil Modified by Weathered Sand

YANG Jun<sup>1</sup>, TONG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Guo-dong<sup>1</sup>, XIONG Jun-lai<sup>1</sup>, TANG Yun-wei<sup>2</sup>, LIANG Yong<sup>3</sup>

(1. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Yichang Transport Bureau, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Headquarter of First-class

Highway Rebuilding Engineering Project from Xiaoxita to Yaqueling, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** Through the comparative analysis of the influences of expansive soils improved by lime, cement, coal ash on the shear strength index, impact of the weathered sand improved expansive soil on shear strength index was studied. The shear of the expansive soil mixing with different proportion of weathered sand was tested. The results showed that the expansive soil shear strength could be effectively improved after weathered sand was incorporated into expansive soil; its cohesive force will decrease gradually with the increase of sand addition proportion; and the angle of internal friction would firstly increased and then decreased along with the increase of sand addition proportion. The expansion characteristic was tested after adding different proportion of weathered sand, and the conclusion could be drawn as followings: blending weathered sand could effectively inhibit the expansion and contraction of expansive soil, the swell-shrink rate of the improved expansion soil was lower than 0.7%, therefore, it could reach the standard of packing filling. With respect to comprehensive consideration of the influence of the sand addition ratio and moisture content on expansive soil shear strength parameters, it could be concluded that when sand addition proportion was up to 30% and the moisture content was 10%, the shear strength of the expansive soil that added with weathered sand would achieve the best parameter.

**Key words:** expansive soil; weathered sand; proportion of sand; moisture content; shear strength; expansion and shrinkage characteristics

土壤的抗剪强度指标是指土体抵抗剪切破坏的极限能力,是进行路基设计的重要参数之一,膨胀土

抗剪强度来自土颗粒之间的摩擦力、电分子吸引力以及土中胶结物质对土颗粒的胶结作用产生的内聚

收稿日期: 2012-09-22

修回日期: 2012-10-03

资助项目: 湖北省交通运输厅需求主导性科技项目“风化砂综合改良膨胀土路基施工新技术研究”

作者简介: 杨俊(1976—),男,湖北省武汉市人,博士,副教授,主要从事道路与桥梁工程方面的教学及科研工作。E-mail: wangjing750301@163.com

力<sup>[1]</sup>。其抗剪强度有黏土的共性,又有别于一般黏土,膨胀土易软化,随着含水率的变化,土体抗剪强度表现为一个动态变化的过程,充分体现了膨胀土抗剪强度的复杂性。目前,在工程实践中,大多是在膨胀土中掺入石灰、水泥、粉煤灰等外加剂,通过化学手段进行改良,掺入后  $c$ 、 $\varphi$  值都有一定程度的提高,但石灰、水泥与土的反应速度较慢,导致抗剪强度提高也较缓慢,并且生成的水化物强度较低,耐久性较差,具有一定的时效性,随着时间的推移,改良效果也会发生变化。掺入粉煤灰可以提高膨胀土的抗剪强度,但其对抑制膨胀的效果不明显。且掺入的石灰、水泥、粉煤灰由于粒径较小,都存在现场难以拌合均匀的缺点。

本文结合湖北省宜昌市小溪塔至鸦雀岭(小鸦)一级公路改建工程,采用沿线广泛分布的风化砂对膨胀土进行物理改良处理。通过风化砂颗粒之间的摩阻力来提高膨胀土的抗剪强度,达到路基填筑用土的标准,并利用风化砂来调整膨胀土的颗粒结构,降低其抗剪强度对含水率的敏感性。另外,由于所掺入的风化砂具有一定的颗粒组成,现场拌合比较容易。大量室内研究结果表明,掺入风化砂对膨胀土的胀缩性改良效果十分明显。因而,研究风化砂改良膨胀土对抗剪强度的影响,找出不同掺砂比例、不同含水状态,对改良膨胀土抗剪强度指标的影响规律,意义十分重大。本文将风化砂掺入比例从 0% 提高到 50%,将含水率状态由 8% 提高到 16%,对风化砂改良后膨胀土的抗剪强度指标进行试验研究,深入分析改良膨胀土的抗剪强度指标与掺砂比例、含水率之间的关系,为风化砂改良膨胀土这一物理改良方法提供理论依据。

## 1 掺入石灰、水泥、粉煤灰对膨胀土抗剪强度 $c$ 、 $\varphi$ 值的影响

### 1.1 石灰改良膨胀土对抗剪强度指标 $c$ 、 $\varphi$ 值的影响

在膨胀土中掺入石灰,主要是通过石灰与膨胀土发生一系列的物理、化学反应,生成硅酸钙盐、铝酸钙水化物等,产生较强的胶凝作用,从而提高土体的抗剪强度指标。改性后土的内摩擦角、粘聚力都有所增加,尤其是粘聚力的增幅较大,可以提高一倍以上<sup>[2]</sup>。随着石灰掺量的增加,石灰改良膨胀土的粘聚力明显增加,且当掺灰量为 5%~7% 时,粘聚力的增长趋势更加明显,但当石灰掺量超过一定数量之后,改良膨胀土粘聚力提高不明显,甚至降低<sup>[3]</sup>。掺石灰对膨胀土的内摩擦角的影响也较大,随着掺石灰量的增加,其内摩擦角逐渐增大,但增大的趋势不如粘聚力明显,当石灰掺加量达到一定程度,通常在 10% 左右,

掺石灰对内摩擦角影响基本不大。结合工程经验,最佳掺灰率在 6%~8% 左右,在此情况下,改良后膨胀土的内摩擦角和粘聚力能达到最大值。

### 1.2 水泥改良膨胀土对抗剪强度指标 $c$ 、 $\varphi$ 值的影响

通过掺入水泥来提高改良后膨胀土抗剪强度与石灰类改良方法的思路完全一致。随着水泥的掺入,内摩擦角和粘聚力逐渐增长,但超过一定的比例时,由于水泥的水化作用导致改良土干燥收缩,裂缝数量显著增加,内摩擦角和粘聚力急剧下降<sup>[4]</sup>。大量研究表明:掺入水泥后,可大幅提高抗剪强度,当水泥掺入量由 5% 增加至 20%,在 7 d 龄期下,改良膨胀土粘聚力较未掺入水泥前可提高 3.5 倍左右,内摩擦角可相应提高 3 倍左右<sup>[5]</sup>,后期会随着时间的推移,其抗剪强度会越来越大。但水泥的掺量越多,其干缩特性会越强,由此将会导致水泥改良膨胀土路基出现大量的裂缝,使得雨水容易渗透进入路基体,而导致路基出现破坏。故采用水泥改良膨胀土,应严格限制其掺入量。

### 1.3 粉煤灰改良膨胀土对抗剪强度指标 $c$ 、 $\varphi$ 值的影响

在膨胀土中单纯掺入粉煤灰进行改良,能够在一定程度上提高改良后土的内摩擦角和粘聚力,但由于粉煤灰含钙量有限,所以掺入后土体抗剪强度提高并不是很明显。因此用粉煤灰进行改良来提高抗剪强度时,需要在粉煤灰中掺入一定数量的石灰或水泥作为改良材料。利用混合材料进行改良,改良后膨胀土早期内摩擦角和粘聚力迅速增长,能够提高改良土的抗剪强度,又由于掺入石灰,可以保证后期内摩擦角和粘聚力稳定增长<sup>[6]</sup>。实际上,掺入粉煤灰来改良膨胀土,对膨胀土抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值的影响是非常有限的,而且随着粉煤灰掺入量的增加,内摩擦角和粘聚力的增量都不是太大,当粉煤灰的掺入量超过一定的量(通常达到 30% 左右)时,粘聚力和内摩擦角反而会降低。再者,粉煤灰的加入对抑制膨胀土的胀缩特性并不明显。

## 2 风化砂改良膨胀土对抗剪强度指标 $c$ 、 $\varphi$ 值的影响

### 2.1 试验用风化砂及膨胀土的特性

本试验所用土样取自湖北省宜昌市夷陵区小溪塔至鸦雀岭一级公路改建工程项目 K24+000—K25+000 路段。从外观上观察,该膨胀土颜色为灰白色中间夹杂灰绿色,土块可层层分割成规则的几何形体,滑感较强,黏土质重,含有少量钙质与铁锰质结核。本试验所用的风化砂取自该项目 K22+000—K23+000 路段,风化砂颜色呈黄色,粒径较小,颗粒

呈棱角状,强度较高,并含有一定量的细粒土。通过室内试验,测得膨胀土和风化砂的基本物理性质指标,如表 1—2 所示。

表 1 膨胀土的基本性质指标

粒组含量/mm			自由膨胀率/%	液限 $\omega_L$ /	塑限 $\omega_p$ /	塑性指数 $I_p$
砂粒组 2~0.075	粉粒组 0.075~0.005	黏粒组 <0.005		%	%	
26.58	56.28	17.14	43	70.53	24.09	46.44

表 2 风化砂基本物理性质指标

粒组含量/mm			级配指标		天然含水率 $\omega$ /%
粗粒组 2~0.5	中粒组 0.5~0.25	细粒组 0.25~0.075	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

由表 1 中可知,该膨胀土的液限为 70.53%,大于 50%属于高液限土;塑性指数为 46.44,大于 40,属于极高塑性黏土;自由膨胀率为 43%,在 40%~60%之间,属于弱膨胀性。从表 2 中可以看出,风化砂细颗粒较多,不均匀系数  $C_u=2.84$ ,小于 5;曲率系数  $C_c=0.86$ ,小于 1,可见该风化砂为级配不良砂。

2.2 试验方案

试验方法参考《公路土工试验规程》(JTG E40—2007),风化砂掺量(质量比)按 0,10%,20%,30%,40%,50%设计成 6 种混合试样;每种掺砂比例下,土样的含水率按 8%,10%,12%,14%,16%进行配制,采用非饱和土进行试验。制样时,控制压实后土样的干密度为同一干密度——本次试验均采用根据重型击实试验得出的最大干密度状态下进行,最大干密度控制在 1.90 g/cm<sup>3</sup>,采用静压法制样。试验前先分别将膨胀土和风化砂碾碎之后过 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和最大干密度制作不同掺砂比例下的直剪试验的试样,试样直径 61.8 mm、高 20 mm。直接剪切试验采用四联应变控制式直剪仪,将不同掺砂比例下的试样分别在 100,200,300,400 kPa 垂直压力下进行快剪试验,每个编号的掺砂土样做 4 组平行试验,取平行试验差值满足精度要求的四组结果的平均值作为最终试验结果<sup>[7]</sup>。试验过程见图 1。

2.3 结果与分析

2.3.1 不同掺砂比例、不同含水率对内摩擦角的影响 根据《公路土工试验规程 JTG E40—2007》,将风干碾细的膨胀土土样和风化砂分别过 2 mm 筛,掺入预定剂量的风化砂拌合均匀,用喷雾设备喷洒预加含水量并充分拌合,配制成砂土混合料,然后装入容器内盖紧,润湿一昼夜。控制每个试样的干密度,使之达到预定的干密度 1.90 g/cm<sup>3</sup>,采用静压法制样。将制好的试样放在应变控制式直剪仪上进行不同垂直

荷载下的直剪试验,剪切速度为 0.8 mm/min。剪切破坏试样见图 2。



图 1 四轴联动应变控制式直剪仪



图 2 剪切后破坏的试样

每组土样做至少四组平行试验,取平行试验差值满足精度要求的四组结果的平均值作为最终试验结果。由此可得出不同比例风化砂以及不同含水率对改良后膨胀土内摩擦角的影响(表 3)。

表 3 不同掺砂比例、不同含水率状态下的内摩擦角 (°)

掺砂比/%	含水率/%				
	6	8	10	12	14
0	21.67	23.58	22.25	19.47	11.75
10	23.16	25.25	24.06	20.58	13.24
20	26.12	28.56	27.03	24.68	18.26
30	27.68	31.53	29.45	26.84	20.22
40	25.89	28.02	28.84	25.01	19.28
50	23.81	25.08	26.22	23.48	17.37

分别以含水率和掺砂比例为横坐标,以内摩擦角为纵坐标,得到了不同含水率、不同掺砂比例对内摩

擦角的影响关系曲线图,如图 3 和图 4 所示。

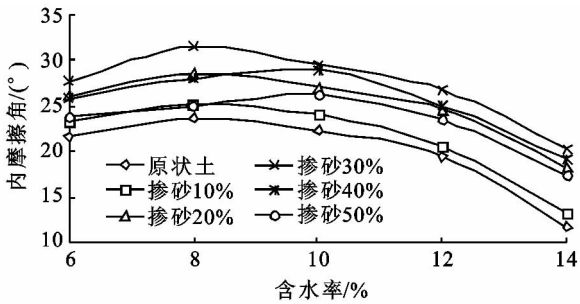


图 3 不同含水率对内摩擦角的影响

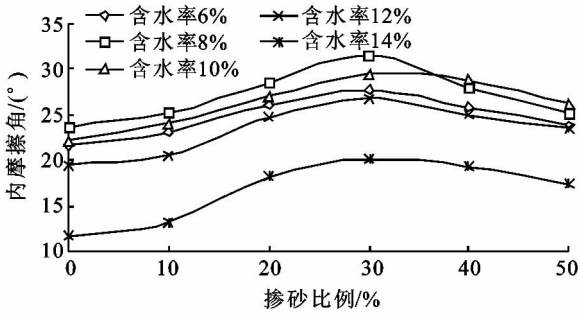


图 4 不同掺砂比例对内摩擦角的影响

(1) 通过改变掺砂比例和含水率可以明显改变膨胀土的内摩擦角。当掺砂比例达 30%,含水率为 8%时内摩擦角达到最大值,为 31.53°。

(2) 在同一含水率状态下,随着掺砂比例的增大,内摩擦角先增大后减小。掺砂比例在 0~10%之间变化时,内摩擦角变化的幅度约在 1.7°左右;掺砂比例在 10%~20%之间变化时,膨胀土内摩擦角增长最快,增幅约在 4°左右;当含水率为 14%时,内摩擦角增幅达到了 6°。产生这一现象的原因是掺入风化砂之后,风化砂颗粒夹杂在膨胀土黏粒之间,由于风化砂颗粒之间存在较大的摩阻力,从而导致膨胀土内摩擦角迅速增大。掺砂比例在 30%~50%之间变化时,膨胀土内摩擦角迅速下降,降低幅度在 3.5°左右,这是由于达到一定的掺砂比例时,砂性颗粒过多,导致土样整体的黏性降低,稳定性减小,故内摩擦角迅速减小<sup>[8]</sup>。

(3) 在同一掺砂比例下,内摩擦角随着风化砂的掺入先逐渐增大后逐渐减小,且土样掺砂比例为 0~30%时,含水率达 8%时,其内摩擦角达到最大值;土样掺砂比例为 30%~50%时,当含水率增至 10%时,其内摩擦角达到最大值。这是因为随着含水率的增大,土颗粒之间的黏结力增强,导致摩阻力增大。继续掺入风化砂后,其内摩擦角开始逐渐减小,且随着风化砂掺量的继续增加,膨胀土内摩擦角减小的幅度也随着加大。当含水率由 12%增加至 14%时,内摩擦角减小幅度最大,达 6°左右。产生这一现象的主要原因是由于含水率的持续增长,土样的孔隙比发生变

化,单位面积断面内土颗粒间的有效接触面积减小,另外在剪切过程中水起到了一定的润滑作用,甚至在局部产生超孔隙水压,故含水率的提高导致了内摩擦角的降低。

综合以上分析可知,当控制掺砂比例为 30%,含水率为 8%时,可使改良后膨胀土的内摩擦角达到最大值<sup>[9-12]</sup>。

2.3.2 不同掺砂比例、不同含水率对粘聚力的影响通过上述直剪试验,得出不同掺砂比例、不同含水率对膨胀土粘聚力的影响,结果如表 4 所示。

表 4 不同掺砂比例、不同含水率膨胀土的粘聚力 kPa

掺砂比/%	含水率/%				
	6	8	10	12	14
0	80.45	92.33	104.37	112.05	100.32
10	70.67	81.78	93.83	100.62	88.46
20	64.95	73.25	85.47	90.35	79.36
30	58.36	69.11	82.22	88.99	73.68
40	54.44	62.56	73.57	80.64	69.49
50	32.68	38.55	45.84	50.24	38.92

分别以含水率和掺砂比例为横坐标,以粘聚力为纵坐标,得到了不同含水率、不同掺砂比例对粘聚力的影响关系曲线图,如图 5 和图 6 所示。

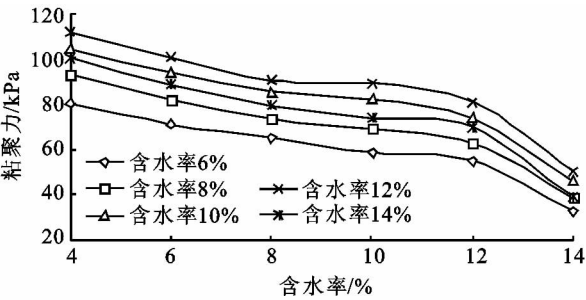


图 5 掺砂比例与粘聚力之间的关系

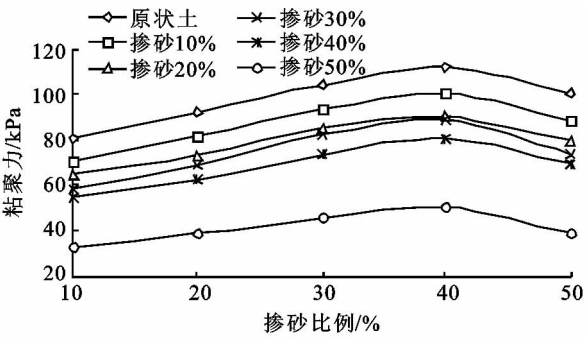


图 6 含水率与粘聚力之间的关系

(1) 掺砂比例和含水率对改良膨胀土的粘聚力影响较大,随着掺砂比例的增大,各含水率状态下的膨胀土粘聚力逐渐减小。

(2) 同一掺砂比例下,随着含水率的提高,改良后膨胀土的粘聚力先逐渐增大后逐渐减小,当含水率为 12%时,粘聚力达到最大值。这是因为通过重型击实试验得到该膨胀土的最佳含水率为 12.84%,而

12%的含水率正好最接近最佳含水率,在最佳含水率状态下进行压实,干密度能够达到最大值,土颗粒之间的相互吸引力最强,故粘聚力达到最大值。当含水率继续增大,在 12%~14%之间变化时,粘聚力迅速降低,降低幅度在 12 kPa 左右。产生这一现象的原因是,当含水率超过最佳含水率后,压实之后的干密度逐渐减小,土颗粒之间的吸引力也逐渐减弱,另一方面由于含水率的增加,导致土粒间的公共水膜粘聚力也减小,所以粘聚力急剧减小<sup>[13]</sup>。

(3) 相同含水率状态下,粘聚力随掺砂比例的增加而逐渐减小,掺砂比例在 0~10%之间时,粘聚力减小幅度约为 10 kPa;掺砂比例从 10%增加至 20%时,粘聚力减小幅度约为 8.5 kPa;掺砂比例从 20%增加至 30%时,粘聚力减小速度较慢,减小幅度约在

3.0 kPa 左右;掺砂比例从 30%增加至 40%时,粘聚力减大幅度约为 6.0 kPa;当掺砂比例在 40%~50%之间变动时,粘聚力值迅速降低,其降低幅度在 28 kPa 左右。粘聚力减小的幅度先减小后增大,产生这一现象的主要原因是因为膨胀土的粘性很强,而风化砂几乎没有粘性,当掺入风化砂比例增大时,整个土体的粘性逐渐降低,当掺砂比例达到 40%~50%时,风化砂颗粒几乎将膨胀土颗粒完全包裹住,导致土体的粘性迅速衰减<sup>[14]</sup>。

### 3 风化砂改良膨胀土对胀缩特性的影响

3.1 不同比例风化砂对膨胀特性的影响  
不同比例风化砂对自由膨胀率、无荷膨胀率、有荷膨胀率、膨胀力的影响试验结果见表 5。

表 5 不同比例风化砂对膨胀指标影响

土样编号	掺砂比例/%	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	无荷膨胀率 $\delta_e/\%$	有荷膨胀率 $\delta_{ep}/\%$		膨胀力 $P_e/\%$
				25 kPa	50 kPa	
1#	0	43.5	9.39	2.34	0.42	72.54
2#	10	31.0	8.74	1.98	0.26	45.08
3#	20	26.0	8.34	1.67	0.22	36.45
4#	30	20.5	7.78	1.55	0.17	29.79
5#	40	19.0	7.43	1.47	0.12	23.03
6#	50	17.0	6.83	0.56	0.09	11.23

从上述试验结果能够看出:掺砂膨胀土的自由膨胀率比未掺砂前显著降低,说明掺砂对于抑制弱膨胀土的膨胀起到了一定的作用,但是掺砂之后无荷膨胀率减少的量不是很明显,说明掺砂对膨胀土的无荷载膨胀率的影响较小;掺砂膨胀土的有荷膨胀率随着掺砂比例的增大逐渐减小;随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的有荷膨胀率减小的幅度逐渐增大;随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的膨胀力逐渐减小,说明掺砂对于抑制膨胀土的膨胀起到了一定的效果;随着掺砂比例的增大,掺砂膨胀土的膨胀力减小幅度逐渐变缓。

#### 3.2 不同比例风化砂对收缩特性的影响

不同比例风化砂对线缩率、体缩率、缩限、收缩系数、胀缩总率的影响试验结果见表 6。

表 6 不同比例风化砂对收缩指标影响

掺砂比例/%	线缩率/%	体缩率/%	缩限/%	收缩系数	胀缩总率/%
0	0.70	1.75	11.4	0.46	1.12
10	0.41	1.55	12.2	0.38	0.67
20	0.37	1.53	12.5	0.35	0.59
30	0.28	1.52	13.4	0.34	0.45
40	0.15	1.13	14.1	0.32	0.27
50	0.08	0.76	17.6	0.28	0.17

由表 6 看出,掺砂膨胀土的线缩率、体缩率、收缩系数、胀缩总率随着掺砂比例增加而减小;掺砂膨胀土的缩限随着掺砂比例增加而增大;掺砂膨胀土的胀缩总率小于 0.7%,可以达到公路路基填料要求。

### 4 风化砂改良膨胀土方案与其它材料改良方案的综合比较

(1) 无论是利用石灰、水泥、粉煤灰对膨胀土进行化学改良,还是通过掺入风化砂对膨胀土进行物理改良,都能够提高膨胀土的抗剪强度。

(2) 单纯从提高抗剪强度指标的角度考虑,在膨胀土中掺石灰比掺风化砂、水泥、粉煤灰更有效果。但从施工角度讲,由于石灰颗粒较小,现场施工难以拌和控制,对环境污染比较大。再者,石灰改良膨胀土,水稳定性较差,具有一定的时效性,随着时间的推移,环境的变化,改良后膨胀土的内摩擦角和粘聚力也会随之变化,影响工程项目的耐久性。

(3) 掺入水泥,虽然可以很好地提高膨胀土的抗剪强度,但是一方面水泥的掺量不好控制,一旦掺入量超过一定限值,改良土的收缩性将变大,裂缝数量将显著增加,直接导致改良膨胀土粘聚力和内摩擦角急剧下降。另一方面,水泥的单价太高,用水泥提高膨胀土的抗剪强度很不经济。其次,水泥颗粒粒径较

小,也存在难以拌合均匀,以及拌合过程中污染环境,危害作业人员健康的问题。

(4) 由于粉煤灰中含钙量有限,与膨胀土中的硅、铝发生水化反应后,生成的水化物较少,因此通过单纯的掺入粉煤灰来提高膨胀土内摩擦角的效果并不是很明显。在一些工程项目中通常利用二灰(石灰、粉煤灰)来改良膨胀土,提高抗剪强度。但石灰、粉煤灰二者的比例难以确定,且成本相对较高,现场难以拌和均匀,施工工序复杂。

(5) 本文通过掺入风化砂来提高膨胀土的抗剪强度,经过一系列的试验研究发现,掺入风化砂之后,膨胀土内摩擦角有显著提高。当掺砂比例为30%,含水率为8%时,内摩擦角可提高至 $31.53^{\circ}$ ,达到了路基工程材料的标准。其次,掺入风化砂对膨胀土进行的改性处理是一种物理改良方法,能够从本质上提高膨胀土的抗剪强度。另外,由于所用的风化砂有一定粒径组成,因此膨胀土与风化砂拌和在施工现场控制相对比较容易。再者,利用风化砂来提高抗剪强度,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。

综合考虑各项指标,通过掺入风化砂来提高膨胀土的抗剪强度的效果要优于其它方案。

## 5 结论

(1) 研究表明掺入风化砂对提高膨胀土抗剪强度是有效的,不同掺砂比例和不同含水率对膨胀土抗剪强度指标有明显的影响。粘聚力随着掺砂比例的增加而逐渐减小,同一掺砂比例下的粘聚力随着含水率的增加先增大后减小;内摩擦角随着掺砂比例的增加先增大后减小,同一掺砂比例下的内摩擦角随着含水率的增加先增大后减小。

(2) 通过试验研究可知,掺风化砂改良膨胀土这一方案是可行的,经过风化砂改良后的膨胀土的抗剪强度指标可以达到路基填料的要求;掺砂改良后的膨胀土能较好地抑制膨胀性,胀缩总率小于0.7%,能

达到路用填料的标准。通过与其它改良方案的比较可知,风化砂改良膨胀土具有较好的经济性和可操作性。

(3) 综合考虑掺砂比例和含水率对膨胀土抗剪强度指标的影响,当掺风化砂比例为30%,含水率控制在10%时,对改良小鸦一级公路膨胀土抗剪强度指标的效果最好。

### 参考文献:

- [1] 谭松林,黄玲,李玉花. 加石灰改性后膨胀土的工程性质研究[J]. 工程地质学报,2009,17(3):421-425.
- [2] 刘晓义,杨有海. 石灰改良膨胀土填料试验研究[J]. 铁道标准设计,2012(1):92-96.
- [3] 李庆鸿. 新建时速200公里铁路改良膨胀土路基施工技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
- [4] 陈涛,顾强康,郭院成. 石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土对比试验[J]. 公路,2008,6(6):6-10.
- [5] 牛越先,马俊. 土质边坡稳定性影响因素的研究[J]. 水土保持研究,2011,8(18):273-276.
- [6] 郑建龙,杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [7] 杜长江,杨忠,熊东红,等. 土壤胀缩研究的现状与展望[J]. 水土保持研究,2006,2(13):269-273.
- [8] 吴新明,巫锡勇,周明波. 水泥改良膨胀土试验研究[J]. 路基工程,2003(2):94-95.
- [9] 黄晓乐,许文年,夏振尧. 植被混凝土基材2种草本植物根—土复合体直剪试验研究[J]. 水土保持研究,2010,8(17):158-165.
- [10] 王云翔,孙海龙,罗龙皂,等. 人工石质边坡构树根系抗剪特性研究[J]. 水土保持研究,2012,19(6):114-118.
- [11] 刘伟静,刘冰,杨元明,等. 粉煤灰改性膨胀土的试验[J]. 中国农村水利水电,2011(3):94-97.
- [12] 高春华,李娜,张庆伟. 粉煤灰改性膨胀土与膨胀土抗剪强度比较研究[J]. 建筑科学,2011,7(27):50-52.
- [13] 孙长龙,殷宗泽. 膨胀土性质综述[J]. 水利水电科学进展,1995,15(6):10-14.
- [14] 谭罗荣,孔令伟. 膨胀土的强度特性研究[J]. 岩土力学,2005,7(7):1009-1013.