

冻融循环对不同比例风化砂改良膨胀土膨胀力的影响

杨俊^{1,2}, 刘世宜^{1,2}

(1. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 研究风化砂改良膨胀土的膨胀力与风化砂掺量、冻融循环次数之间的定性和定量关系, 为风化砂改良膨胀土用作公路路基提供理论依据。[方法] 在膨胀土中分别掺入 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 的风化砂, 在分别经过 0, 1, 3, 6, 9, 12 次冻融循环后, 在固结仪上进行膨胀力测试。[结果] 风化砂的掺入可明显降低膨胀土的膨胀力; 在相同的冻融循环次数下, 风化砂改良膨胀土的膨胀力随掺砂比例的增大而减小, 膨胀力降低的幅值随掺砂比例的增加亦逐渐减小; 在相同的掺砂比例下, 风化砂改良膨胀土的膨胀力随冻融循环次数的增大而减小, 膨胀力降低的幅值亦逐渐减小。当掺砂比例相同时, 风化砂改良膨胀土的膨胀力与冻融循环次数的自然对数呈线性负相关关系。[结论] 不同的冻融循环次数和不同的掺砂比例对膨胀土的膨胀力均有影响。

关键词: 膨胀土; 冻融循环; 风化砂; 膨胀力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0133-05

中图分类号: TU411.3

文献参数: 杨俊, 刘世宜. 冻融循环对不同比例风化砂改良膨胀土膨胀力的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4):133-137. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.024

Influences of Freezing-thawing Cycle on Expansive Force of Expansive Soil Improved by Different Proportional Weathered Sand

YANG Jun^{1,2}, LIU Shiyi^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area in Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] The qualitative and quantitative relations between the expansive force of weathered-sand-improved expansive soil and the effects of weathered sand content, the number of freezing-thawing cycles on the expansive force were studied. [Methods] Weathered sand was put into the expansive soil with the proportions of 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and the expansive force was tested on the consolidation test apparatus in condition of freezing-thawing cycles with the times of 0, 1, 3, 6, 9, 12. [Results] The expansive force of weathered-sand-improved expansive soil reduced obviously. Both the expansive force of weathered-sand-improved expansive soil and the extent of the expansive force reduces as the proportion of weathered sand increased in the same time of freezing-thawing cycles. In contrast, the two items reduced as the times of freezing-thawing cycles increased in the same proportion of mixed weathered sand. The expansive force of the weathered-sand-improved expansive soil and the natural logarithm of the number of freezing-thawing cycles showed negative linear correlation relationship in the same content of weathered sand. [Conclusion] Both of the freeze-thaw cycles and the proportion of mixed sands all affect the expansive force of expansive soil.

Keywords: expansive soil; freezing-thawing cycles; weathered sand; expansive force

膨胀土遇水膨胀, 失水干缩变形, 具有胀缩性、遇水崩解性、多裂隙性及强度衰减等特性。正是由于这

些特性, 常常使建筑物产生位移、开裂、倾斜甚至破坏, 是一种破坏性极强而分布又十分广泛的危害性地

收稿日期: 2015-10-17

修回日期: 2015-11-05

资助项目: 湖北省教育厅自然科学研究重点项目“风化砂改良膨胀土的室内试验研究”(D20131304); 国家自然科学基金青年项目(41302275)

第一作者: 杨俊(1976—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 主要从事公路特殊土路基处理、路面新材料开发利用、工业垃圾及建筑垃圾的路用特性方面的研究。E-mail: Wangjing750301@163.com。

质土,不能直接作为路基填料使用,需加以改良^[1-4]。常用的改良方法是掺入石灰、粉煤灰、水泥等材料,通过化学反应,抑制膨胀土的胀缩变形。这些粉末状材料在改良膨胀土时存在着拌和不均匀、污染环境等诸多弊端。为达到就地取材、节约成本的目的,本课题以湖北省宜昌市三峡库区广泛分布的风化砂来改良宜昌市的膨胀土。通过一系列的室内胀缩试验、力学试验,证明风化砂能较好地改善膨胀土的胀缩特性,能达到公路路基填料的要求。季节性冻土地区改良膨胀土路基在建设初期,其状况较好,但经过几次冻融循环后,其强度和变形会发生明显的变化,容易出现路面鼓包、弹簧、断裂和翻浆冒泥等现象。形成这些灾害的主要原因是冻融循环作用使路基土体的含水率升高,孔隙率增大,土体体积增大,从而使膨胀土发生膨胀变形,当变形受到约束时,土体必然产生内应力,即膨胀力,正是这种内应力改变了土颗粒之间的结构联接及排列方式,土体的力学性质也因此发生了改变^[5-8]。由此可见,风化砂改良膨胀土能否持久用作路基,还需进行深入研究,弄清冻融循环作用下改良膨胀土膨胀力的变化规律^[9-12]。本研究针对湖北省宜昌市小溪塔至鸦雀岭一级公路沿线膨胀土,采用风化砂来改良。通过掺不同量风化砂到膨胀土中,

经过不同次数的冻融循环作用,对试件进行室内膨胀力试验,得到了不同掺砂比例、不同冻融循环次数下风化砂改良膨胀土试样的膨胀力,通过对试验数据的分析,得到不同掺砂比例下风化砂改良膨胀土试样的膨胀力随冻融循环次数的变化关系,并建立起二者之间的数学模型,为风化砂改良膨胀土用作公路路基提供理论依据和试验证明。

1 试验材料与方案

1.1 膨胀土

考虑原状土样结构差别较大,试验结果比较离散,本研究采用重塑土样进行试验。试验所用土样取自湖北省宜昌市小溪塔至鸦雀岭一级公路沿线的灰白色膨胀土。该膨胀土样以粒径分布在 0.075~0.002 mm 的粉粒组为主,粒径小于 0.002 mm 的黏粒组主要成分为蒙脱石和伊利石等矿物成分。按照《公路土工试验规程(JTGE40-2007)》^[13],对该土样进行了物理性质指标测定。试验结果详见表 1。对该膨胀土进行了重型击实试验,其最佳含水率为 12.82%,最大干密度为 1.899 g/cm³。膨胀土的自由膨胀率为 53%,根据《膨胀土地区建筑技术规范》可以判别该试验土样为弱膨胀土。

表 1 膨胀土基本性质指标

粒组含量/%			液限/%	塑限/%	塑性指数/%
砂粒组 >0.075 mm	粉粒组 0.075~0.002 mm	黏粒组 <0.002 mm			
35.11	52.88	12.01	36.1	18.9	17.2
天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	重力密度/(kN·m ⁻³)	相对密度	活性指数	自由膨胀率/%
29.43	1.89	18.52	2.66	1.43	53

1.2 风化砂

试验所用风化砂取自湖北省宜昌市三峡库区乐天溪地区,所采试验用风化砂其外观颜色呈黄褐色,颗粒细小。

取料时对其天然含水率和天然密度进行了测定,

并在室内进行了颗粒分析试验,试验结果详见表 2。综合其粒径分布情况及不均匀系数和曲率系数这两个重要指标,可知该风化砂颗粒尺寸单一,级配较差(由于本试验试样均处于密实状态,因此砂级配对试验结果基本不会产生影响)。

表 2 试验用风化砂基本性质指标

粒组含量			不均匀系数	曲率系数
粗粒组 >0.5 mm	中粒组 0.5~0.075 mm	细粒组 <0.075		
0.65	72.70	26.66	51.61	13.16
天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	重力密度/(kN·m ⁻³)	相对密度	活性指数
11.54	1.65	16.17	2.46	0.31

1.3 试验方案

主要仪器设备为:内径 61.8 mm,高 20 mm 的金属环刀;压样器;千斤顶(20 t);反力架;双联杠杆式固结仪(杠杆比为 1:12);百分表。试验设计的掺砂比

例分别为 0,10%,20%,30%,40%和 50%,所谓掺砂比例,即风化砂干重占试样总干重的百分比。按《公路土工试验规程(JTG/E40-2007)》的要求,通过重型击实试验,得出 6 种不同土样对应的最大干密度及最

佳含水率(表3)。取经碾碎、过2 mm圆孔筛且烘干的膨胀土试样若干,按设计的掺砂比例将其与不同重量的风化砂混合,拌合均匀后,将不同掺砂比例的混合料配至最佳含水率,并焖料24 h备用。通过不同掺砂比例下各试样的最大干密度及环刀体积计算制作每个试件所需土样的质量,再将试样直接静压至环刀内进行试件制作(为使不同掺砂比例下各试样均处于密实状态,因此选用各自最佳含水率及最大干密度下的试样进行试验)。将制作好的试样进行室内冻融试验,为防止冻融循环过程中试件的水分蒸发,将制作好的带环刀的试件用塑料薄膜密封,然后放入冻融循环箱中(试件在反复冻融过程中并无质量损失)。根据工程所在地的气温资料,冷冻的最低温度确定为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,将冷冻24 h的试件取出,放置于室温条件下24 h,使其充分融化,此过程为一个完整的冻融循环。由于冻融循环达到一定次数后,土体性质变化的幅度较小,基本趋于稳定,参考前人的一些研究成果,确定本次试验冻融循环次数分别为0,1,3,6,9,12次^[14]。待试件完成相应冻融循环次数后,将试件装入双联固结仪上,其中试件上下均设有滤纸和透水石,采用平衡加压法进行膨胀力试验。所谓平衡加压法,即在试样吸水开始膨胀时,逐步施加荷载维持体积不变,因为采用这种方法,试验过程中基本不会引起土体结构破坏,符合膨胀力的物理意义,故采用此法进行试验。安装好试件后施加1 kPa的预压力,使试件与仪器各部接触,随后自下而上的向容器注入蒸馏水,并始终保持水面足够低,而不致使试件受到太大的上浮力。试验中通过向砂桶中加适量铁砂,使百分表仍回到初始读数,待维持某级平衡荷重达2 h,则认为试样在该级平衡荷重下达到稳定。根据稳定后桶中砂的总质量、固结仪的杠杆比及试样的面积,按公式(1)计算试样的膨胀力。

$$p_e = \frac{W \cdot m}{A} \quad (1)$$

式中: p_e ——膨胀力(kPa); W ——总平衡荷重(N); A ——试样面积(cm^2); m ——固结仪的杠杆比。

表3 不同掺砂比例下风化砂改良膨胀土的最佳含水率及最大干密度

掺砂比例/%	最佳含水率/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0	12.82	1.899
10	12.49	1.913
20	12.26	1.965
30	12.05	1.947
40	11.49	1.931
50	11.07	1.918

2 试验结果及分析

不同掺砂比例、不同冻融循环次数作用下,风化砂改良膨胀土的膨胀力试验结果详见表4。

表4 冻融循环对风化砂改良膨胀土膨胀力的影响 kPa

冻融循环次数	掺砂比例/%					
	0	10	20	30	40	50
0	93.3	87.3	82.8	78.7	75.9	73.5
1	72.8	67.5	62.4	58.6	55.9	53.6
3	59.4	53.6	48.6	44.6	40.5	38.7
6	50.7	44.8	39.9	35.3	32.5	30.5
9	43.3	37.5	32.8	28.6	25.5	23.8
12	37.9	31.5	26.8	22.4	19.8	16.5

2.1 风化砂改良膨胀土的膨胀力与掺砂比例的关系

根据表4中的试验数据,以掺砂比例为横坐标,以风化砂改良膨胀土的膨胀力为纵坐标,绘制膨胀力与掺砂比例的关系曲线(图1)。

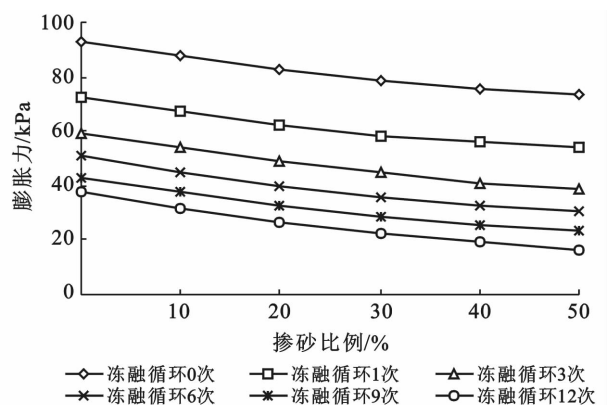


图1 不同冻融循环次数,膨胀力与掺砂比例的关系曲线

从图1可以看出,在同一冻融循环次数下,风化砂改良膨胀土的膨胀力随掺砂比例的增大而减小。在0,1,3,6,9,12次冻融循环作用下,当掺砂比例依次按0,10%,20%,30%,40%,50%递增时,膨胀力下降的幅度值依次为6.0,5.0,4.0,3.0,2.0 kPa。由此可见,膨胀力降低的幅值随掺砂比例的增加逐渐减小,当掺砂比例达到50%时,膨胀力的减小基本趋于稳定。原状膨胀土在经过12次冻融循环之后,膨胀力较冻融之前下降了59.4%;掺砂10%的膨胀土在经过12次冻融循环之后,膨胀力较冻融之前下降了63.9%;掺砂20%的膨胀土在经过12次冻融循环之后,膨胀力较冻融之前下降了67.6%;掺砂30%的膨胀土在经过12次冻融循环之后,膨胀力较冻融之前下降了71.5%;掺砂40%的膨胀土在经过12次冻融

循环之后,膨胀力较冻融之前下降了 73.9%;掺砂 50%的膨胀土在经过 12 次冻融循环之后,膨胀力较冻融之前下降了 77.6%。上述现象说明风化砂掺量越多,膨胀力下降幅度越大。产生这一现象的原因是,在膨胀土中掺入风化砂之后,一方面随着风化砂掺量的增加,膨胀土的含量相对减少,故降低了膨胀力;另一方面,由于风化砂有棱有角,相互之间摩擦嵌挤,抵消了一部分膨胀力。因此适量风化砂的掺入能较好地抑制膨胀土的膨胀性,对降低膨胀土的膨胀力具有显著的效果。

2.2 风化砂改良膨胀土的膨胀力与冻融循环次数的关系

根据表 4 中的试验数据,以冻融循环次数为横坐标,以风化砂改良膨胀土的膨胀力为纵坐标,绘制膨胀力与冻融循环次数的关系曲线(图 2)。从图 2 可以看出,在同一掺砂比例下,风化砂改良膨胀土的膨胀力随冻融循环次数的增大而减小。第 1 次冻融循环后,掺砂比例 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 下风化砂改良膨胀土的膨胀力相对未经历冻融循环的降低幅度分别为 20.5, 19.8, 20.4, 20.1, 20.0, 19.9 kPa; 经历 3 次冻融循环之后,掺砂比例 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 下风化砂改良膨胀土的膨胀力相对经历 1 次冻融循环的降低幅值分别为 13.4, 13.9, 13.8, 14.0, 15.4, 14.9 kPa; 经历 6 次冻融循环之后,掺砂比例 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 下风化砂改良膨胀土的膨胀力相对经历 3 次冻融循环的降低幅值分别为 8.7, 8.8, 8.7, 9.3, 8.0, 8.2 kPa; 经历 9 次冻融循环之后,掺砂比例 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 下风化砂改良膨胀土的膨胀力相对经历 6 次冻融循环的降低幅值分别为 7.4, 7.3, 7.1, 6.7, 7.0, 6.7 kPa; 经历 12 次冻融循环之后,掺砂比例 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 下风化砂改良膨胀土的膨胀力相对经历 9 次冻融循环的降低幅值分别为 5.4, 6.0, 6.0, 6.2, 5.7, 7.3 kPa。由此可见,在各掺砂比例下,随着冻融循环次数的增加,膨胀力降低的幅度逐渐减小。从图中曲线走势可知,随着冻融循环次数的不断增大,风化砂改良膨胀土的膨胀力相对于前一次冻融循环的降低幅度将越来越小,从而当冻融循环次数增大到某一值时,某一掺砂比例下风化砂改良膨胀土的膨胀力相对于前一次冻融循环的降低幅度将接近于 0, 基本不随冻融循环次数的增大而发生改变。之所以出现这些现象,主要是由于经过冻融循环后,试样发生冻胀现象,土体内颗粒进一步分散,黏结力减弱,水分迁移通道发生改变,使土体吸附结合水的能力减弱,导致水分迁移积聚的水量减少,从而导致试样膨

胀力的降低;随着冻融循环次数的增加,试件吸附结合水的能力进一步减弱,膨胀力降低的幅值也会越来越小。

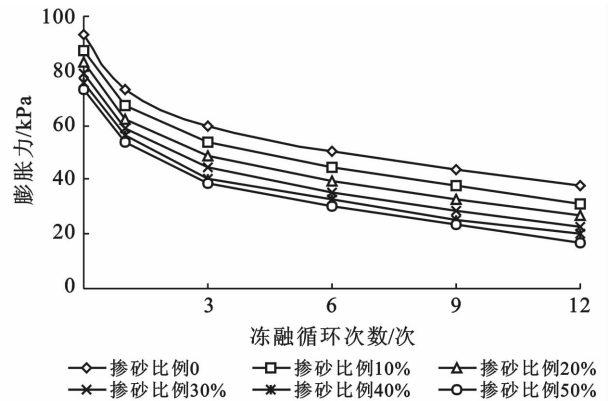


图 2 不同掺砂比例下膨胀力与冻融循环次数的关系曲线

3 冻融循环对膨胀力影响的拟合分析

通过对膨胀土试样掺入不同比例风化砂,在不同冻融循环次数下进行膨胀力试验,并对试验数据进行拟合分析,得到了各掺砂比例下风化砂改良膨胀土试样的膨胀力与冻融循环次数之间的关系(表 5),可用公式(2)进行表达。

$$p_e = A \times \ln(N) + B \quad (2)$$

式中: A, B ——拟合系数,随掺砂比例不同而变化,其值详见表 4; p_e ——风化砂改良膨胀土的膨胀力(kPa); N ——冻融循环次数(次),在 0~12 之间。

表 5 冻融循环对膨胀力影响的拟合结果

掺砂比例/%	系数 A	系数 B	R^2
0	-13.808	73.733	0.991 0
10	-14.154	68.417	0.990 6
20	-13.984	63.278	0.990 9
30	-14.235	59.459	0.992 3
40	-14.139	56.254	0.994 3
50	-14.313	54.297	0.988 0

以冻融循环次数为横坐标,以膨胀力为纵坐标,绘制不同掺砂比例下,风化砂改良膨胀土的膨胀力与冻融循环次数的关系曲线(图 3)。从图 3 可以看出,在同一掺砂比例下,风化砂改良膨胀土的膨胀力与冻融循环次数的自然对数呈线性负相关关系。从表 4 可以看出,随掺砂比例的增大,拟合系数 A 基本上无太大变化,而拟合系数 B 随掺砂比例的增大而减小。 R^2 为相关系数的平方值,其统计意义为回归模型的拟合优度,其值越大,则表示拟合的模型相关性越显著。各掺砂比例下拟合关系式的 R^2 均在 0.98 左右,

说明采用对数方式进行拟合,其相关性较好。通过对其进行拟合分析,可以预测某一确定掺砂比例、某一确定冻融循环次数下风化砂改良膨胀土的膨胀力,为季节性冻土地区膨胀土工程结构物的稳定分析提供了参考。

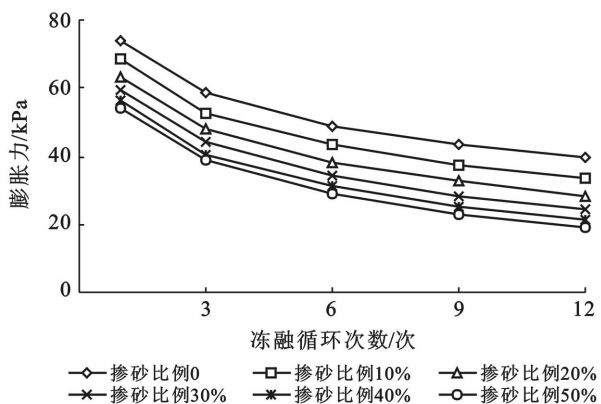


图3 冻融循环次数与膨胀力的拟合曲线

4 结论

(1) 风化砂的掺入可明显降低膨胀土的膨胀力,说明风化砂的掺入起到了显著抑制膨胀土膨胀变形的效果。

(2) 在同一冻融循环次数下,风化砂改良膨胀土的膨胀力随掺砂比例的增大而减小;膨胀力降低的幅值随掺砂比例的增加亦逐渐减小;风化砂掺量越多,膨胀力下降幅度越大;当掺砂比例达到50%时,膨胀力的减小基本趋于稳定。

(3) 在同一掺砂比例下,风化砂改良膨胀土的膨胀力随冻融循环次数的增大而减小;在各掺砂比例下,随着冻融循环次数的增加,膨胀力降低的幅度逐渐减小。当冻融循环次数增大到某一值时,风化砂改良膨胀土的膨胀力将趋近于一定值,基本不随冻融循环次数的增大而发生改变。

(4) 在同一掺砂比例下,风化砂改良膨胀土的膨胀力与冻融循环次数的自然对数呈线性负相关关系。

[参 考 文 献]

- [1] 叶为民, Schanz T, 钱丽鑫, 等. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 3861-3865.
- [2] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 756-762.
- [3] 张虎元, 崔素丽, 刘吉胜, 等. 混合型缓冲回填材料膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3087-3095.
- [4] 朱豪, 王柳江, 刘斯宏, 等. 南阳膨胀土膨胀力特性试验[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 11-14.
- [5] 周博, 陈善雄, 余飞, 等. 膨胀土膨胀力原位测试方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3333-3336.
- [6] 苗鹏, 肖宏彬. 膨胀土膨胀力的改进测定及其规律研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(7): 67-70.
- [7] 刘静德, 李青云, 龚壁卫. 南水北调中线工程膨胀岩一维膨胀力试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 23-26.
- [8] 孙发鑫, 陈正汉, 秦冰, 等. 高庙子膨润土一砂混合料的三向膨胀力特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 200-207.
- [9] 赵洪宝, 尹光志, 谌伦建. 砂岩热膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3303-3306.
- [10] 欧孝夺, 唐迎春, 钟子文, 等. 重塑膨胀岩土微变形条件下膨胀力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 1067-1071.
- [11] 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): 1328-1332.
- [12] 谢云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1635-1642.
- [13] 公路土工试验规程(JTG E40-2007). 交通部公路科学研究所[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] 杨海鸣, 宫全美, 周顺华. 膨胀土地区铁路路基拼接离心试验分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2008, 29(3): 110-114.