

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0067-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.015

钢渣改良膨胀土试验效果与机理分析

袁明月^{1, 2}, 张福海^{1, 2}, 王远航^{1, 2}

(1.河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2.河海大学 江苏省岩土工程技术研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 对膨胀土、石灰改良膨胀土、钢渣微粉改良膨胀土进行干湿循环试验、自由膨胀率试验、无侧限抗压强度试验, 比较验证钢渣微粉对膨胀土的改良效果。试验结果表明: 钢渣微粉对膨胀土干湿循环作用下裂隙的发展、自由膨胀率的减小、强度的增加均有明显改善效果。其中钢渣微粉对自由膨胀率的改良效果明显滞后于石灰, 但最终的改良效果两者相近, 强度改良效果钢渣微粉明显优于石灰。同时运用X射线能谱的方法对膨胀土、石灰改良膨胀土、钢渣微粉改良膨胀土进行矿物成分和化学组成成分进行分析, 发现钢渣微粉改良膨胀土与石灰改良膨胀土矿物成分相近结合, 自由膨胀率和无侧限抗压强度试验结果, 对比分析得出钢渣微粉改良膨胀土和石灰改良土在改良机理上有相似性。

关键词: 膨胀土; 干湿循环; 自由膨胀率; 强度

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

Experiments and mechanism of slag improving expansive soil

YUAN Mingyue^{1, 2}, ZHANG Fuhai^{1, 2}, WANG Yuanhang^{1, 2}

(1.Key Laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: The dry-wet cycling test, the free expansion rate test, unconfined compressive strength test are carried out for the expansive soil, lime improving expansive soil, the steel slag fine powder modified expansive soil to compare and verify the modified effect. The results show that the steel slag fine powder has improved significantly effect on the action of the expansive soil dry-wet circulation development of crack, the reduction of free expansion rate, the increase of strength. Among them, the modified effect of steel slag fine powder to free expansion rate is obviously behind the lime, but the ultimate improvement effect is similar. Strength improvement of steel slag fine powder is superior to lime. With the method of X-ray energy spectrum, the mineral composition and chemical composition of the expansive soil, lime improving expansive soil and the steel slag fine powder modified expansive soil are analyzed. The conclusion is that the mechanism of modifying expansive soil by steel slag fine powder is similar to the lime.

Key words: expansive soil; wet-dry cycle; free expansion rate; strength

膨胀土常被工程师们认为是一种“问题土”, 在实际工程中往往通过改良才能被运用到工程中^[1-2]。近年来不少学者根据膨胀土的工程不良机理提出了粉煤灰和电石渣、风砂、玄武岩纤维等掺合料改良

膨胀土^[3-5], 取得良好的效果。石灰改良膨胀土的方法作为较为成熟的处理方法之一^[6], 其改良机理一般归纳为离子交换、胶结作用、硬凝作用以及碳化作用^[7-8]。钢渣作为一种废弃物, 其含有的矿物成分

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778211); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20171434)。

作者简介: 袁明月(1993-), 男, 江苏扬州人, 硕士, 研究方向为边坡加固及地基处理。

与石灰相似,含有有活性的物质以及水硬性凝胶材料氧化钙、硅酸三钙和硅酸二钙,这为钢渣微粉改良膨胀土提供了有利的论证^[9-10],也为钢渣改良膨胀土特性研究提出一定的理论基础。本文运用对比分析的方式,将钢渣改良膨胀土与石灰改良膨胀土特性进行对比,在裂隙发展、自由膨胀率、强度变化和矿化成分方面对钢渣改良膨胀土进行分析。

1 试验内容

试验用土取自南京高淳某路段,膨胀土试验基本物理性质见表1,石灰的矿物成分见表2,钢渣微粉取自南京钢铁厂,其主要化学成分见表3。试验部分就干湿循环裂隙发展、自由膨胀率、无侧限抗压强度三方面分析膨胀土的改良效果。为保证土的均匀性本文采用重塑土进行试验。试验方法按照《公路土工试验规程》(JTJ E40-2007)进行。

1.1 干湿循环效应下裂隙发展情况

干湿循环作用下裂隙的发展是衡量膨胀土工程特性的一个重要指标。前人对于裂隙变化情况有很多种表示的方法,其中应用最多的有裂隙长度比、平均面积比以及裂隙面积率土块等方法^[11]。本文采用裂隙面积率和裂隙平均宽度变化表示裂隙发展情况。对膨胀土和掺入量为5%的钢渣微粉进行干湿循环试验,得到两种试样的裂隙面积率、裂隙平均宽度对比图,如图1、图2所示。由图可知:

表1 土样基本物理性质

Tab.1 Basic physico-mechanical properties of expansive soil

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	比重 G_s	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性 指数 I_p
23.4	1.92	1.53	2.79	54.4	17.8	37

表2 石灰的矿物成分

Tab.2 The chemical composition and content of lime

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃
含量	2.3	1.5	2.5	73.5	0.2

表3 钢渣微粉的矿物成分

Tab.3 The chemical composition and content of steel slag fine powder

成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	TF ₂ O ₃	TFe	P ₂ O ₃
含量	14.73	0.86	4.06	7.62	48.00	0.17	0.57	20.44	14.30	1.04

随着干湿循环次数的增加,膨胀土和钢渣微粉改良土的裂隙面积率、平均宽度都在增大,但钢渣微粉改良土试样的裂隙面积、裂隙平均宽度比膨胀土试样要小的多,在相同干湿循环次数下明显小于膨胀土。

钢渣微粉改良膨胀土的裂隙发育速率较膨胀土试样的裂隙发育速率要小得多。其中在干湿循环作用下膨胀土的裂隙面积率和平均宽度都达到最大值,是钢渣微粉改良膨胀土对应值的4至6倍。

1.2 自由膨胀率试验

本文在不同养护龄期的条件下,对掺量均为5%钢渣微粉改良膨胀土和石灰改良膨胀土进行自由膨胀率试验,试验结果如图3。

钢渣微粉改良土的自由膨胀率随着养护龄期的增加先减小后趋于稳定。在养护龄期14 d之前,自由膨胀率都在一直减小,在养护龄期14 d后,自由膨胀率基本不再变化,说明此时钢渣微粉与膨胀土

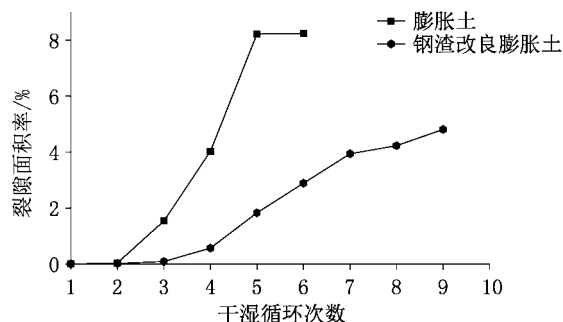


图1 湿循环情况下裂隙面积率变化

Fig.1 Changes of crack area ratio under wet circulation

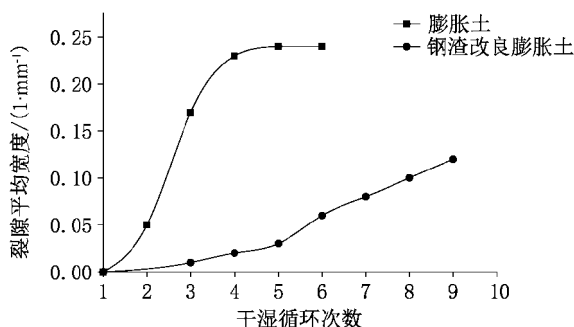


图2 循环情况下裂隙平均宽度变化

Fig.2 Average crack width changes under circulation

反应已经完成;而对于石灰改良土,自由膨胀率在最初的1 d下降幅度最大,在7 d后基本保持不变,即石灰与膨胀土反应速率明显快于钢渣微粉。

1.3 强度试验现象及结果

对不同养护龄期的条件下掺量为5%,压实度为93%的石灰、钢渣改良膨胀土分别进行无侧限抗压强度试验探究钢渣对膨胀土强度方面的效果。试验结果如图4。

通过试验得到养护龄期对石灰改良土和钢渣微粉改良土无侧限抗压强度有显著的影响。石灰的参入使得膨胀土的抗压强度有明显增加,而钢渣微粉早期强度方面的改良作用明显优于石灰,这对早期强度要求高的工程,钢渣微粉具有更好的实用性。

由于石灰掺入膨胀土中会出现部分不溶于水的 CaCO_3 结晶体,将 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 隔开,阻止进一步离子交换作用、碳化作用以及结晶作用的发生。随着龄期的增长,石灰改良膨胀土后期强度有着显著效果,而早期强度不高。对于钢渣改良膨胀土由于其 CaO 含量较少,使得前期硬凝作用占主导作用,抗压强度会随着龄期的增长先迅速增大后缓慢增大。

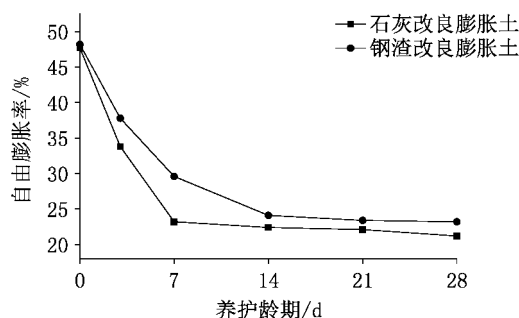


图3 自有膨胀率随时间变化图

Fig.3 Free expansion rate change by time

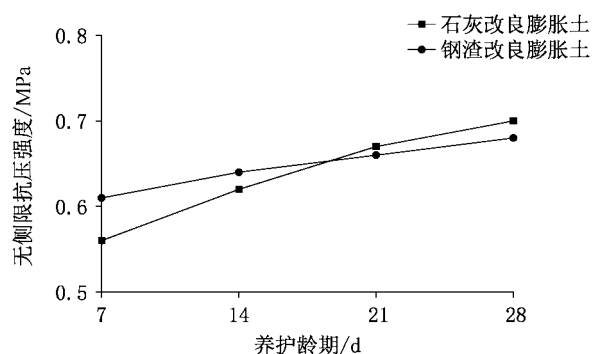


图4 无侧限抗压强度与养护龄期关系曲线

Fig.4 Relation curves of unconfined compressive strength with curing period

2 钢渣微粉改良膨胀土机理分析

膨胀土的矿物构成以及化学成分决定了它具有吸水膨胀,失水收缩的性质。探究膨胀土以及改良土的矿物构成以及其化学成分有助于探讨膨胀土改良机理,从而降低膨胀土在工程实践中产生的危害。本文利用X射线能谱的方法对素土、掺量均为5%的两种改良土进行化学成分分析,得到三种土的化学成分与含量,见表4。

膨胀土化学成分主要是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ,三种氧化物的含量之和为83.94%,说明在粗粒中石英类矿物相对较多,而在细颗粒中铁铝硅酸盐类粘土矿物较多。在膨胀土的化学成分中,钠、镁、钾、钙等金属离子含量较高,这些活泼的金属离子在气候、水介质等环境条件下,极易与外界发生反应,加快伊利石转化为蒙脱石的速率,增强膨胀土的亲水性。

膨胀土经过石灰以及钢渣微粉改良后,改良土中 CaO 和 MgO 含量在增加, Na_2O 和 K_2O 含量在减少。所以无论是石灰改良土还是钢渣微粉改良土的改良机理都是在掺入改良剂后,使得土中二价的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 增加,遇水后发生离子交换,替换了土中单价的 Na^+ 和 K^+ 离子,使得膨胀土中 Na^+ 和 K^+ 离子含量减小。这样的离子交换反应使得改良土中蒙脱石等粘土矿物含量降低,这个过程降低了结合水膜厚度,使得颗粒间连接力增强,发生团聚作用,形成相对粗粒的成分。而钢渣微粉中 CaO 和 MgO 总含量仅有55%左右,而石灰中 CaO 和 MgO 总含量高达76%,所以在离子交换能力方面钢渣微粉改良剂不如石灰改良剂,在宏观力学参数表现方面,钢渣改良膨胀土的自由膨胀率随龄期降低速率明显小于石灰改良膨胀土,无侧限抗压强度随龄期增长速率也缓于石灰改良膨胀土,后期石灰改良膨胀土的改良效果优于膨胀土。

由表4可知两种改良土中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量都在降低,这是由于改良土中改良剂与膨胀土发生硬凝反应。改良剂中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与膨胀土发生反应,在低价离子的电离作用下,形成水化硅酸钙和水化铝酸钙胶凝体,不但降低了土颗粒表面的面积,还降低了土颗粒的亲水性能,达到降低其膨胀性的目的,并且形成一种高碱性的环境。在这样的环境中生成氢氧化钙和氢氧化铝,增强土体强度,改善土体结构性。

表 4 膨胀土与改良土化学成分与含量

Tab.4 Chemical composition and content of expansive soil and improved soil

化学成分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO ₂	Fe ₂ O ₃
膨胀土	2.65	3.71	22.37	50.10	2.49	1.19	1.25	4.60	11.47
石灰改良土	1.06	4.12	11.73	45.66	1.67	31.35	0.94		3.46
钢渣微粉良土	1.58	5.30	15.53	58.88	1.74	17.04	1.00		3.93

3 结论

1) 钢渣微粉的掺入对膨胀土干湿循环作用下裂隙的发展有明显的改进作用, 且能够很明显的延缓裂隙的产生和发育速度。

2) 钢渣微粉改良土的自由膨胀率随着养护龄期的增加先减小后趋于稳定, 并且钢渣微粉对膨胀土自由膨胀率改良效果前期比较缓慢但最终与石灰的改良效果相近。钢渣微粉改良膨胀土早期强度明显优于石灰改良膨胀土。建议工程上可以采用石灰和钢渣按一定比例混合改良膨胀土, 满足特殊工程对早期强度要求。

3) 从改良土前后化学成分和含量以及结合自由膨胀和强度变化过程对比分析可知, 石灰改良土和钢渣微粉改良土在改良机理上有相似性。

参考文献:

- [1] 许 雷, 刘斯宏, 鲁 洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2016(Z2): 167-174.
- [2] 储 亚, 查甫生, 刘松玉, 等. 基于电阻率法的膨胀土膨胀性评价研究 [J]. 岩土力学, 2017(1): 157-164.
- [3] 赵 林. 粉煤灰、电石渣改良膨胀土机理及长期稳定性

研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

- [4] 黎新春. 风化砂改良膨胀土特性试验研究 [D]. 宜昌, 三峡大学, 2014.
- [5] 边加敏, 蒋 玲, 王保田. 石灰改良膨胀土路基施工控制参数 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014(2): 51-58.
- [6] 周 谈. 玄武岩纤维和二灰改良膨胀土的试验研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- [7] PRASANAKUMAR PRINCIPAL S M. Silica and Calcium effect on Geo-Technical Properties of Expansive soil Extracted from Rice Husk Ash and Lime[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Environment Science and Engineering, 2012.
- [8] 温 建. 钢渣的活性激发及资源化利用 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [9] 袁明月, 张福海, 陈 翔, 等. 钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017(2): 81-85.
- [10] 吴燕开, 胡 锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉掺合料改良膨胀土特性试验研究 [J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2017(1): 136-143.
- [11] 赵 鑫, 阳云华, 朱瑛洁, 等. 裂隙面对强膨胀土抗剪强度影响分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 130-133.

(责任编辑 王利君)

(上接第 61 页)

- [8] 胡亚元, 陈云敏. 本构模型与软黏土强度增长的关系研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004(6): 80-84.
- [9] 李 志, 罗嗣海, 巩田捷. 排水固结法中固结引起强度增长的计算方法探讨 [J]. 建筑科学, 2009, 25(11): 19-22.
- [10] 曹宇春. 固结后软黏土不排水抗剪强度简化计算方法比较 [J]. 土木工程学报, 2014(10): 107-116.
- [11] 沈珠江. 饱和粘土抗剪强度的变化规律及其在土工建筑稳定分析中的应用 [J]. 土木工程学报, 1963(2): 29-36.
- [12] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计 [J]. 岩土工程

学报, 1998(1): 100-111.

- [13] SKEMPTON A W. The pore pressure coefficients A and B[J]. Geotechnique, 1954, 4(4): 143-147.
- [14] 曹宇春, 杨建辉. 基于有效固结应力法确定结构性黏性土不排水抗剪强度 [J]. 岩土力学, 2013(11): 3085-3090.
- [15] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [16] AMERATUNGA J, SIVAKUGAN N, DAS B M. Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering[M]. Springer, 2016.

(责任编辑 王利君)