

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.015

钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究

袁明月^{1,2}, 张福海^{1,2}, 陈翔³, 施海建^{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;

3. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 钢渣微粉是钢渣加工产生的副产品, 一直未被有效利用。 Ca^{2+} 含量占40%~60%, 考虑是否可以用有效改良膨胀土。分别对膨胀土、素土和不同钢渣微粉掺量的改良土进行液塑限试验、直剪试验、干湿循环试验, 得到结论: 钢渣微粉的掺入使得膨胀土液限下降, 塑限上升, 且掺量大于3%时液、塑限符合路基规范要求; 钢渣微粉的掺入对于膨胀土强度具有很好的改良效果, 且钢渣微粉的最优掺入比例为5%; 钢渣微粉对干湿循环后膨胀率的下降以及强度的增长均有很好的改良效果。试验结果表明膨胀土通过钢渣微粉的改良后符合工程规范要求。

关键词: 膨胀土; 钢渣微粉; 液塑限; 剪切强度; 干湿循环

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0081-05

Micro-powder Improvements of Steel Slag Treated Expansive Soil

YUAN Mingyue^{1,2}, ZHANG Fuhai^{1,2}, CHEN Xiang³, SHI Haijian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. China Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: The steel slag fine powder is a by-product in the process of steelmaking and is still not utilized effectively. Ca^{2+} content in the steel slag fine powder is 40% ~ 60%, but it is unknown if it's feasible to improve expansive soil effectively. A series of laboratory tests based on plain soil and expansive soil improved by different amounts of steel slag fine powder were done. The tests include liquid plastic limit test, direct shear test and wetting-drying test. Conclusions are as follows: the steel slag fine powder could decrease liquid limit and increase plastic limit. When the dosage exceeds 3%, liquid plastic limit conform to subgrade criterion. The steel slag fine powder could also improve the strength of expansive soil well and the optimal dosage is 5%. Steel slag fine powder can make expansion rate of the expansion soil after drying and watering cycle decrease and it also has good effects on improving the strength. Test results showed that steel slag fine powder has good effects on expansion soil improvements and the improved soil can satisfy the engineering criterion.

Keywords: expansion soil; steel slag fine powder; liquid plastic limit; shear strength; drying and watering cycle

膨胀土是由强亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成的特殊土, 具有胀缩性、裂隙性、超固结性、遇水软化和低渗透性^[1]。正是这些特殊性决定了膨胀土需要经过改良才能直接在工程实践中运用。目前, 膨胀土改良方法分为物理类和化学类。物理类的处理方法主要是考虑膨胀土的矿物组成, 采取一定的

技术手段全部或部分代替膨胀土中不良组成成分, 改变膨胀土颗粒间组合, 改善膨胀土的结构方面特性, 达到降低膨胀土胀缩性质的目的^[2-4]。化学类的处理方法主要是在膨胀土中加入一定比例的石灰、水泥、石膏和水玻璃等具有活性的物质, 加入一定比例的改良剂后使得膨胀土中大量游离的铝硅离

子产生相互交换,并发生团聚反应和硬凝作用,养护一段时间可较大的增加膨胀土的塑限,并且能够很好地降低膨胀土的塑性指数,使得膨胀土的胀缩性得到改善^[5-7]。钢渣作为炼钢过程中产生的废料,其主要成分是 Ca、Si、Fe、Mg、Al、Mn 等氧化物,其中含量最多的是 CaO 和 SiO₂,分别占总量的 40% ~ 60%和 13% ~ 20%,而 CaO 可作为膨胀土改良的有效成分。另外,钢渣微粉中有硅酸三钙和硅酸二钙等具有活性的物质,并且这些物质具有与水泥相似的水硬胶凝性,这就为钢渣微粉改良膨胀土提供了另一个有力的论证^[8-10]。

表 1 膨胀土基本物理性质

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	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 钢渣微粉的化学成分

成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	TFe 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

2 液塑限试验

液塑限作为判断是否符合工程应用的标准之一,本文将按照钢渣微粉掺量分别为 0%、1%、2%、3%、4%、5%来进行试验得到改良效果。本次试验是将同一种掺量的土风干并用木槌敲碎,拌匀,次天取土样 300 g 并将试样过 0.5 mm 的筛,根据液塑限联合测定法来做液塑限试验^[11]。得到实验结果如图 1 所示。

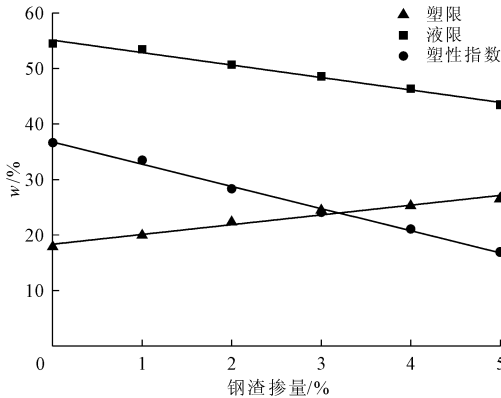


图 1 不同钢渣微粉掺量下膨胀土液塑限

由图 1 可见,随着钢渣微粉含量的增加,液限的数值降低,塑限增加,塑性指数在逐渐减小。这是因为钢渣微粉中有硅酸三钙、硅酸二钙及铁铝酸盐等具有活性的物质,这些物质具有与水泥相似的水硬

本文通过液塑限试验、自有膨胀率试验、直剪试验、干湿循环试验对钢渣微粉改良膨胀土的效果以及合理掺量进行研究,为钢渣微粉改良膨胀土在工程上的应用提供理论支持。

1 基本物理力学性质

本文所用膨胀土取自南京高淳某路段,通过室内常规试验得出土样的基本物理性质参数,见表 1。钢渣微粉取自南京钢铁厂,其化学成分见表 2。经判断所用土为高液限黏土,经过自有膨胀率试验得自有膨胀率为 57%,属于弱膨胀。

胶凝性,当土颗粒处于相对流动的状态时,钢渣微粉能够与土颗粒充分胶凝,降低含水率,也就使得液限减小;而塑限之所以增加是因为自然界中黏粒通常都带有负电荷,容易吸引周围阳离子形成反离子层,阳离子的化学成分和离子浓度决定了扩散层的厚度和结合水的数量以及性质,而钢渣微粉含有大量氧化钙,水化生成的 Ca(OH)₂ 溶于水后,使得土颗粒周围的离子浓度增加,二价的 Ca²⁺ 离子将膨胀土中单价的 Na⁺ 和 K⁺ 离子交换出来,降低结合水膜的厚度,减小膨胀土颗粒间的孔隙,使得膨胀土颗粒相互凝聚,引起塑性的变化,改善工程性质。

经过改良,改良土掺量 3%、4%、5% 所对应的液限和塑性指数均符合公路路基设计规范要求^[12]。

3 自由膨胀率试验

自由膨胀率是反映膨胀土胀缩特性的重要指标之一,反映膨胀土的膨胀潜势的高低,同时也是反映膨胀土膨胀性质最直观的指标,常作为膨胀土判别和分类的指标,以百分率表示。

本文将钢渣微粉掺量按质量比例控制为 1%、2%、3%、4%、5% 进行设计,而养护龄期控制为 7 d、14 d、21 d 和 28 d,将试样放置在潮沙中进行养护,分别进行自由膨胀率试验,并且平行测定,得到结果见图 2。

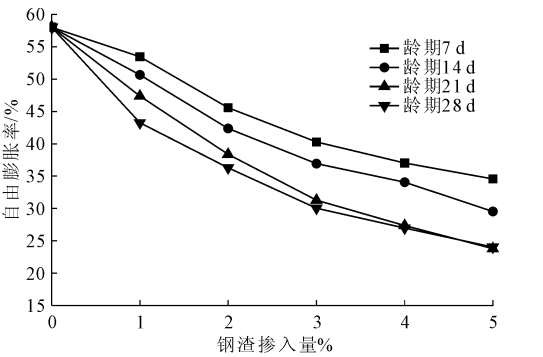


图 2 改良土自由膨胀率随钢渣掺量变化

由图 2 可知,对于钢渣微粉改良剂,改良土的自由膨胀率随着掺量的增加而降低。在掺量 5% 养护龄期 28 d 时,改良土自由膨胀率下降幅度最大,达到 24.02%,远低于规范给出的膨胀土临界自由膨胀率 40% 的标准。说明钢渣微粉的加入对于膨胀土胀缩特性的改良效果良好,能够达到工程应用的条件。并且养护龄期 21 d 和 28 d 所对应的曲线极其相似,在相同掺量的情况下,两者的自由膨胀率相差不大,可以认为在养护龄期 21 d 的时候,反应已经基本完成。

4 直剪试验

工程实践和室内试验都证实了土的破坏主要是由于剪切引起的,所以研究改良土的抗剪强度对于工程设计、施工、管理都具有非常重要的实际意义。

通过自由膨胀率试验,确定了钢渣微粉改良膨胀土的最佳养护龄期为 21 d,为了分析不同钢渣微粉掺量下改良膨胀土的抗剪强度的变化,进行直接剪切试验。将压实度控制在 93%,养护龄期为 21 d,按掺量 1%,2%,3%,4%,5% 分别做快剪试验。得到试验结果见表 3。

表 3 不同钢渣微粉掺量抗剪强度

钢渣微粉 掺量/%	不同垂直压力(kPa)下抗剪力强度/kPa			
	50	100	150	200
1	93.83	117.25	140.10	156.72
2	120.23	144.25	163.31	185.02
3	143.42	162.01	190.27	210.31
4	167.36	197.25	213.05	246.45
5	177.15	200.12	231.44	262.35

由表 3 可见,改良土随着垂直压力的增大,其抗剪强度也随之增大。随着钢渣微粉掺量的增加,相同荷载对应的强度也逐渐变大。为了更好分析钢渣

微粉改良土抗剪强度指标随着掺量变化情况,将内摩擦角以及黏聚力单独拿出来分析。结果见图 3、图 4。

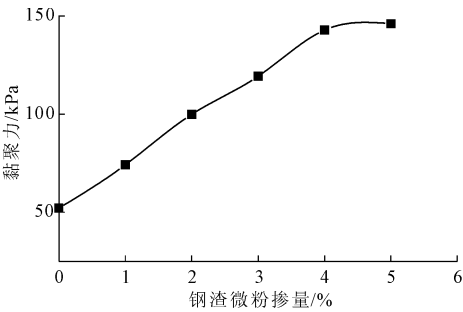


图 3 不同钢渣微粉掺量下改良土的黏聚力

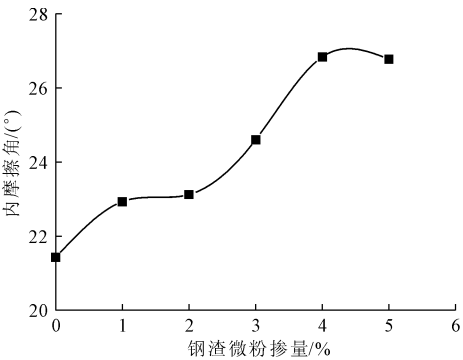


图 4 不同钢渣微粉掺量下改良土的内摩擦角变化曲线

由图 3 可得,改良土黏聚力随钢渣微粉含量的变大而增加。黏聚力从膨胀土未加入钢渣微粉时的 52.11 kPa 增加到 146.04 kPa,这是因为掺入钢渣微粉发生水化和水解反应,生成的水化物一部分与膨胀土发生离子交换反应和团聚作用,一部分发生胶凝作用,使得膨胀土内部结构发生变化,同时增大颗粒间的作用力,使得在剪切阶段的时候能够克服颗粒间的换位、翻滚和移动的所需要的功,具体表现为黏聚力的增大。

由图 4 可得,改良土的内摩擦角随钢渣微粉掺量的增加而变大。内摩擦角从 21.43° 增加到 26.78°,内摩擦角的增大是因为钢渣微粉与膨胀土发生离子交换作用,胶凝作用以及团粒化作用使得膨胀土中颗粒粒径发生变化,粗颗粒含量增加,在剪切过程中土颗粒间的摩擦阻力增大,表现为内摩擦角的增大。

抗剪强度的增大是由于钢渣微粉的掺入致使改良土内摩擦角和黏聚力增大所引起的。无论是黏聚力还是摩擦角,都是随着钢渣微粉掺量的增加先增大再趋于平缓,在钢渣微粉掺量达到 4% 之后,两者曲线开始趋于平缓,说明钢渣微粉改良土在掺量达

到 4% 后,其抗剪强度达到一个稳定状态。

5 干湿循环效应下钢渣微粉改良土特性研究

根据前文结论,以下所进行干湿循环试验所用改良土养护龄期均为 21 d,掺量 5%。本文采用无荷干湿循环,具体过程如下:

加湿:常温下(室内温度 20℃ 左右)浸水直至试样饱和;干燥:试样放置通风环境,采用取暖灯烘烤(温度保持在 40℃ 左右),反复测量确定试样质量,通过计算使其含水率控制在 20% ~ 24%,即为一次干湿循环。干湿循环过程中,记录下相应的试样高度、直径以及试样质量的变化。本文就干湿循环后膨胀率变化和强度变化进行研究。

5.1 干湿循环效应后膨胀率变化情况

为探究膨胀土和改良土在干湿循环条件下的变形规律,研究在干湿循环后膨胀率的变化情况,将其定义如下:

$$\delta_a = \frac{h_w - h_0}{h_0} \times 100\%$$

式中: h_0 为试样的原来的高度; h_w 为经过膨胀之后稳定下来的试样高度。

试验结果如图 5 所示:膨胀土试样和改良土试样在干湿循环效应下的膨胀率均随着干湿循环次数的增加,表现出先增大后减小最终趋于稳定,并且在相同干湿循环次数下,改良土均远小于膨胀土。在干湿循环 1 次时,膨胀土和改良土膨胀率达到最大,在干湿循环次数继续增大的同时,膨胀土在干湿循环 2 次时膨胀率下降明显,之后缓慢下降直至稳定,而改良土在干湿循环 2 次后膨胀率下降一直较为平缓。这是因为膨胀土随着干湿循环的进行,自由水在进入试样内部,形成渗水通道,增大吸着水膜厚度,增大试样孔隙率和孔径,就使得在第一次干湿循环膨胀率增大后,膨胀土内部结构部分破坏,膨胀速率加快,但最终能达到的试样高度在降低。而对于改良土,由于其内部土颗粒间连接紧密,抵抗水渗入的能力比膨胀土要大的多,所以在相同干湿循环次数下膨胀率大小远小于膨胀土。

5.2 干湿循环效应后强度变化情况

膨胀土是一种特殊性质的土,其独特的矿物构成有非常强的水敏性^[13],使得其工程特性在大自然环境中变化很大,强度也会出现明显变动。在干湿循环的前提下,探究膨胀土强度的变化情况,这对工程实际能够起到很好的理论指导意义^[14-15]。

为了探究膨胀土以及改良土在干湿循环情况下,抗剪强度的变化规律,本文对膨胀土试样一共做了 6 次干湿循环实验,并且在每次循环后都对试样进行直剪试验,而对改良土试样仅循环 1 次、3 次、5 次、7 次以及 9 次后的试样进行直剪试验。

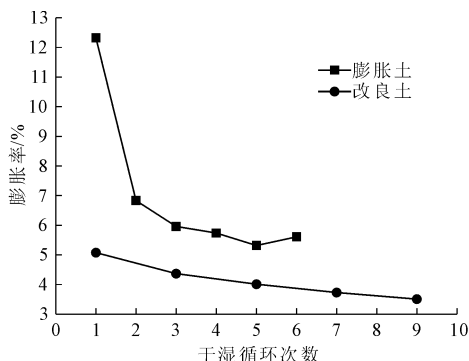


图 5 干湿循环情况下膨胀率变化

本文为了更好地分析干湿循环条件下抗剪强度的变化规律,将抗剪强度指标单独拿出来分析。内摩擦角试验结果如图 6 所示,无论是膨胀土还是改良土内摩擦角随干湿循环次数的增多变化较小。这是由于在干湿循环过程中土颗粒间的错动变化是相对无规律的,使得在不同干湿循环次数下的内摩擦角呈现波动性的变化,并且两种土体内部颗粒大小形状固定,所以在多次干湿循环过程中内摩擦角变化相对较小。经过钢渣微粉改良,改良土中蒙脱石等黏土矿物减少,粗粒增多,颗粒级配要优于膨胀土,增大了抗滑性,使得改良土内摩擦角大于膨胀土,即图中膨胀土内摩擦角在 20° 左右波动,改良土内摩擦角在 30° 左右波动。

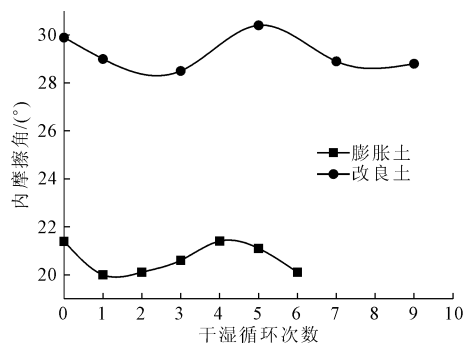


图 6 干湿循环情况下内摩擦角变化

黏聚力试验结果如图 7 所示。改良土黏聚力明显大于膨胀土黏聚力,并且无论是膨胀土还是改良土,伴随干湿循环次数的增多,试样的黏聚力在减小。对于膨胀土,干湿循环使得水更容易进入试样,很大的降低了土颗粒间的连接力,在试样中形成水

渗入的通道,严重时可形成裂隙贯穿试样,降低试样的结构强度,具体表现为黏聚力的降低。而对于改良土,黏聚力也在降低,但降低幅度较膨胀土小,这是因为改良土在初始阶段内部结构紧密,水稳定性强,在干湿循环作用下,试样内部蒙脱石等亲水性的黏土矿物较少,抵抗变形的能力较强,这在宏观上表现为试样表面裂隙的发育较缓,结构性得到保持,所以在多次干湿循环后并没有像膨胀土一样出现贯穿裂隙,土块隆起的现象。

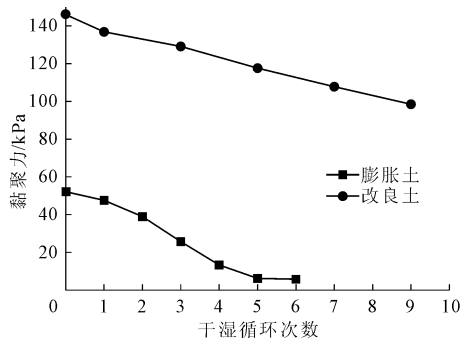


图7 干湿循环情况下膨胀土的黏聚力

6 结 论

通过上述一系列的试验,研究发现:

(1) 钢渣微粉的掺入使得膨胀土液限下降,塑限上升,并且随着钢渣微粉含量的增加,液限的数值在降低,塑限在增加,塑性指数在逐渐减小。当钢渣微粉掺量大于等于3%时对膨胀土改良效果符合公路路基规范设计要求。

(2) 随着钢渣微粉掺量的增加膨胀土自由膨胀率下降,且当养护达到21 d时反应基本完成;掺量达到4%后,其抗剪强度随着掺量的增加变化稳定。

(3) 膨胀土和改良土膨胀率在第一次干湿循环中均达到最大值,之后急剧下降并趋于稳定,改良土膨胀率下降较为平缓,且各级干湿循环情况下均明显小于膨胀土。

(4) 由强度试验发现,相同的干湿循环次数下,改良土试样黏聚力远远大于膨胀土,内摩擦角较大于膨胀土。改良土黏聚力随循环次数的增加衰减较为均匀,而膨胀土衰减幅度较大。钢渣微粉改良土很好地控制了膨胀土在干湿循环条件下强度衰减过快情况。

本文试验结果论证了钢渣微粉的掺入对膨胀土具有很好的改良效果并且改良后的膨胀土符合工程规范,说明钢渣微粉对膨胀土改良具有很好的适用性,可以有效地运用于工程实践当中。

参考文献:

- [1] 吴 华,袁俊平,赵士文. 裂隙膨胀土性质研究综述及展望[J]. 江苏建筑,2012(1):78-82.
- [2] 杨 俊,童 磊,张国栋,等. 初始含水率及风化砂掺量对改良膨胀土无荷膨胀率的影响[J]. 水电能源科学,2014,32(3):162-166.
- [3] 杨 俊,黎新春,张国栋,等. 风化砂改良膨胀土强度特性试验研究[J]. 公路,2013(2):161-165.
- [4] 孙树林,郑青海,唐 俊,等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(6):1608-1612.
- [5] 邱雪莲,王保田. 膨胀土化学改良效果及其在边坡工程中应用的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(2):190-195.
- [6] 张亚杰,洪宝宁,刘 鑫. 高液限土掺灰改良的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):6-10.
- [7] 唐云伟,童 磊,张国栋,等. 水泥改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究[J]. 淮阴工学院学报,2013,22(3):26-30.
- [8] 刘 攀,侍克斌,努尔开力·依孜特罗甫,等. 单掺钢渣粉混凝土早期抗裂性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):96-99.
- [9] 张朝晖,廖杰龙,巨建涛,等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J]. 钢铁研究学报,2013,25(7):1-4.
- [10] Guo X, Shi H. Utilization of steel slag powder as a combined admixture with ground granulated blast-furnace slag in cement based materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013,25(12):1990-1993.
- [11] 蒋佰坤,王春华. 液塑限联合测定法的应用与研究[J]. 工程勘察,2012,40(1):32-34.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范:GBJ112-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [13] 葛 松. 合肥新桥机场膨胀土和灰土的水分迁移机理试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
- [14] 李凌芸. 基于干湿循环的膨胀土工程特性试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [15] 曾召田,吕海波,赵艳林,等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学,2013,34(2):322-328.