

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.013



# 铁尾矿砂改良膨胀土基本工程性质试验研究

赵辉, 储诚富, 郭坤龙, 叶浩

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 研究利用工业废料铁尾矿砂作为添加剂改良膨胀土的可行性与改良效果。通过室内试验, 对尾矿砂改良土的基本物理性质指标、膨胀性指标、强度指标以及微观结构进行了研究。试验结果表明, 随着掺砂率的增大, 试验土样的界限含水率及塑性指数都减小; 自由膨胀率、有荷膨胀率和膨胀力等膨胀特性指标随掺砂率的增大均降低。无侧限抗压强度和黏聚力随着掺砂率的增加先增大后减小, 在掺砂率为 30% 时达到最大; 内摩擦角随着掺砂率增大而增大。通过观察 SEM 试验结果, 发现在掺砂率为 30% 时, 改良土结构处于最稳定状态, 说明掺铁尾矿砂改良膨胀土具有显著效果, 为膨胀土改良提供了一种新方法。综合考虑各项指标, 认为铁尾矿砂改良膨胀土的最佳掺入比应为 30%。

**关键词:** 铁尾矿砂; 膨胀土; 抗压强度; 膨胀特性; 微观结构

**中图分类号:** TU443      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0098-07

## Experimental analysis of the basic engineering properties of expansive soils improved by iron tailings sand

Zhao Hui, Chu Chengfu, Guo Kunlong, Ye Hao

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the feasibility and effect of expansive soils improved by industrial waste that iron tailings sand, the basic physical properties and swelling characteristics and unconfined compressive strength of improved soil were study by laboratory test. Besides, by means of SEM, the microstructure of series of samples is studied. The result of test indicated that the marginal moisture content and plasticity index of improved soil decrease with the increase of tailings sand content; free swelling ratio and loaded swelling ratio and swelling pressure also decrease with the increase of tailings sand content. The unconfined compressive strength and cohesion increases with the increase of tailings sand content, but it decreases when tailings sand content more than 30%; internal friction angle increase with the increase of tailings sand content. It was found that the structure of improved soil in the most stable state when tailings sand content is 30% by observing the results of SEM. It is shown that the effect of expansive soils improved by iron tailings sand is obvious. So for the improvement of expansive soils provides a new

**收稿日期:** 2017-06-05

**基金项目:** 安徽省自然科学基金(1608085MD81)

**作者简介:** 赵辉(1992-), 男, 主要从事特殊改良研究, (E-mail) Zhao\_hq001@163.com.

储诚富(通信作者), 男, 博士(后), 副教授, (E-mail) chuchengfu@163.com.

**Received:** 2017-06-05

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Anhui Province(No. 1608085MD81)

**Author brief:** Zhao Hui(1992-), main research interests: special soil improvement, (E-mail) Zhao\_hq001@163.com.

Chu Chengfu(corresponding author), postdoctoral, (E-mail) chuchengfu@163.com.

method. Considering all the indicators, the optimum content of iron tailings sand that improved expansive soils should be 30%.

**Keywords:** iron tailings sand; expansive soils; compressive strength; swelling characteristics; microstructure

膨胀土具有吸水体积膨胀、失水体积收缩且反复胀缩的变形特性,同时,还具有浸水后强度衰减的强度特性,所以,膨胀土属于特殊土的范畴<sup>[1-3]</sup>。正是由于其特殊的性质,常常导致修筑在膨胀土地基上的建筑物发生破坏,尤其是轻型构筑物以及公路、铁路、水利工程等工程建筑物。因此,位于膨胀土地区的工程在建设之前必须先对膨胀土进行处理,减弱膨胀土的胀缩性,增强膨胀土的稳定性,使其满足工程建设的要求,所以,如何改良膨胀土成为该领域的重点研究问题。目前,最常用的改良方法是化学改良法,主要利用石灰、水泥、粉煤灰、碱渣等<sup>[4-10]</sup>来对膨胀土进行改良。但石灰、水泥均属于资源性材料,对膨胀土进行改良,成本相对较高;同时,开采原材料能耗大,加剧环境的破坏,加工原材料会进一步污染环境。根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》<sup>[11]</sup>,矿产资源是经济和社会可持续发展的重要物质基础,中国矿产资源严重紧缺,坚持资源节约优先,引导和支撑循环经济发展,强化废弃物减量化、资源化利用与安全处置,加强发展循环经济的共性技术研究;优先综合治污与废弃物循环利用,开发废弃物等资源化利用技术,建立发展循环经济的技术示范模式。而利用粉煤灰、碱渣等工业废弃物来改良膨胀土,与水泥、石灰相比虽然可降低改良成本,但同时又带来新的问题。例如,碱渣属于碱性材料,改良膨胀土进行工程建设时可能会对周边环境造成一定的影响;粉煤灰改良膨胀土对胀缩性改良效果不明显,而且现场施工难以控制。化学改良法有一个共同的问题,改良土存在一定的时效性,由于外部环境(大气和温度)的长期影响,改良土的工程性质随着时间逐渐难以满足工程需求,使得膨胀土的膨胀性会再次“复活”,可能会给工程埋下隐患。纵观世界研究进展,利用工业废料尾矿砂来改良膨胀土的研究工作开展较少,对于这方面的研究也鲜有报道。

尾矿砂是一种工业废料,是选矿完成后产生的像细砂一样的细粒废弃物,多以泥浆形式外排,日积月累形成尾矿库。尾矿库不仅占用大面积土地,而且容易造成塌方、溃坝等灾害,给周边环境带来很大的安全隐患。21世纪以来,中国开发矿产资源的规模持续增大,尤其对于金属矿产的开发,每年产生的

尾矿数以亿吨计。据统计,目前,中国尾矿的堆放量近80亿t。数量如此庞大的尾矿砂,同时,也是一种可利用的资源。目前,尾矿利用主要集中在生产改性砂浆、水泥以及制砖等方面<sup>[12-15]</sup>,取得了不少有益的成果,对尾矿砂的利用实现了废弃物的资源化、无害化和减量化。但是,以上处理方式由于处理成本高或是掺入量少等原因,使得每年消耗利用的尾矿砂相对于产生的量较少。因此,从减少尾矿砂对土地的占用、降低对环境的破坏、更大程度地利用数量巨大的尾矿资源这个角度出发,对尾矿砂的资源化利用方面有待进一步研究。

基于“以废治废”的思想,根据中国尾矿库中尾矿砂多数是铁尾矿砂的实际情况,本文考虑利用铁尾矿砂对膨胀土进行改良研究,探讨铁尾矿砂改良膨胀土的可行性,为今后的工程应用提供参考。利用工业废料铁尾矿砂对膨胀土进行改良,不仅可以减少对资源性材料的使用,从而降低工程造价,而且,还为处理废弃物铁尾矿砂找到新出路,实现尾矿开发利用资源化、减量化和无害化,形成一种“废物利用、变废为宝”的资源规模化利用模式。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验用土取自合肥市宁国路与九华山路交口的某工地基坑,该区域膨胀土以弱膨胀土为主。土样呈黄褐色,肉眼可看到少量的红褐色球状铁锰质结核,硬塑状态,有滑感。不均匀系数 $C_u=3.63$ ,曲率 $C_c=0.81$ ,最大干密度 $\rho_{d\max}=1.83\text{ g/cm}^3$ ,最优含水率 $\omega_{op}=16.5\%$ ,其它基本物理性质指标见表1,膨胀土及各掺砂率改良土颗粒分布情况见图1。

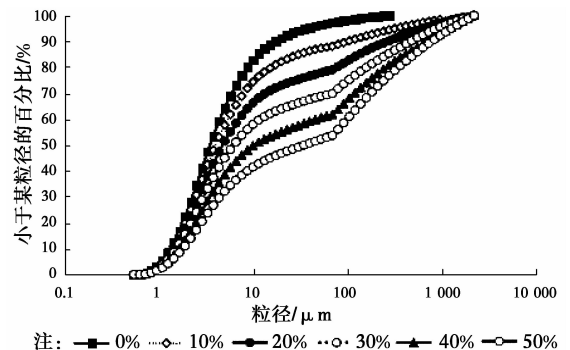


图1 不同掺砂率下颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve under different tailings sand content

从图 1 可以看出,素土的粒径分布范围较小,但随着掺砂率的增加,尾矿砂改良土中黏粒的含量不断减少,粉粒和砂粒的含量增加,粒径分布范围逐渐扩大。而且,分布曲线随着掺砂率的增大出现较明

显的拐点,位于拐点之前的曲线随着掺砂率的增大逐渐从较陡的状态过渡为较平缓的状态,位于拐点之后的分布曲线则随着掺砂率的增大逐渐变陡。

表 1 膨胀土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of expansive soils

密度 $\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比重 $G_s$	孔隙比 $e$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_p$	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	颗粒分布/ $\%$		
							$>0.075 \text{ mm}$	$0.002 \sim 0.075 \text{ mm}$	$<0.002 \text{ mm}$
1.92	2.72	0.76	46.6	22.1	24.5	53	2.43	73.39	24.18

从表 1 中可以看出,该土样的自由膨胀率为 53%,液限为 46.6%,塑性指数为 24.5,黏粒含量( $<0.002 \text{ mm}$ )为 24.18%,根据陈善雄等<sup>[16-18]</sup>建议的分类方法及《膨胀土地区建筑技术规范》<sup>[19]</sup>推荐的判别方法对该膨胀土样进行分类,判别结果为弱膨胀土。

试验所用尾矿砂取自庐江龙桥铁矿,灰黑色,颗粒质地较为坚硬,粒径与砂粒相当,颗粒本身不具有活性和水硬性。其化学成分主要是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  等,其粒径分布见表 2。

表 2 尾矿砂粒径分布范围

Table 2 particle size distribution range of tailings sand

粒径范围/mm	$<2$	$<1$	$<0.5$	$<0.25$	$<0.075$
百分量	97.25	91.45	72.27	51.97	6.98

## 1.2 试验方法

试验按照《土工试验方法标准》<sup>[20]</sup>进行。对土样分别进行液塑限试验、颗粒分析试验、重型击实试验(采用干土法)、自由膨胀率试验、有荷膨胀率试验、膨胀力试验、剪切试验以及无侧限抗压强度试验。

文中掺砂率是指干铁尾矿砂质量占干土和干铁尾矿砂质量之和的比率。进行掺尾矿砂土(改良土)的自由膨胀率试验时,将制备好的土样和尾矿砂按照设计配比混合均匀,按规范进行改良土的自由膨胀率试验。按比例称取一定质量的烘干的膨胀土和尾矿砂,将尾矿砂与土样均匀拌和后,根据液塑限试验结果,用量筒称取一定量的水掺入改良土混合物中,搅拌均匀后装入保鲜袋中,闷料 24 h 后进行击实试验。再根据击实试验所得最大干密度和最优含水率的结果,将按照设计配比拌和好的改良土混合物和水搅拌均匀后装入保鲜袋进行 24 h 闷料,再进行有荷膨胀率、膨胀力、剪切以及无侧限抗压强度试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 掺铁尾矿砂对膨胀土工程性质指标的影响

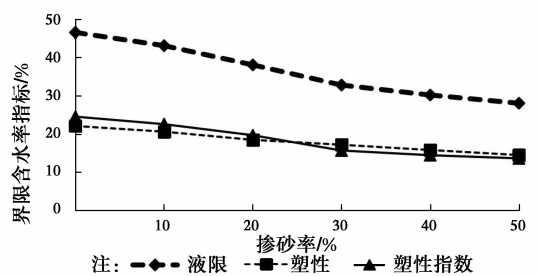
为研究掺入铁尾矿砂对膨胀土的基本物理性质

指标的影响,对尾矿砂含量为 0、10%、20%、30%、40%和 50%的改良土分别进行了液塑限试验和颗粒分析试验,探讨不同掺砂率对膨胀土液塑限和塑性指数的影响,试验结果如表 3、图 2、图 3 所示。

表 3 不同掺砂率下试验土样的基本物理性质指标

Table 3 Basic physical properties under different tailings sand content

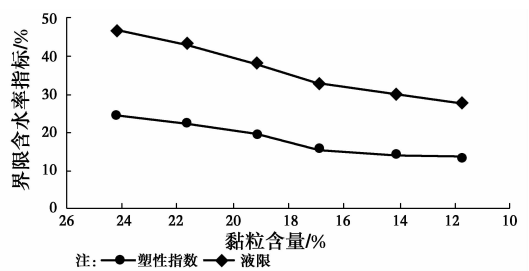
掺砂率/ $\%$	液限/ $\%$	塑限/ $\%$	塑性指数	黏粒含量/ $\%$
0	46.6	22.1	24.5	24.18
10	43.1	20.6	22.5	21.65
20	38.1	18.4	19.6	19.12
30	32.8	17.1	15.6	16.88
40	30.2	15.8	14.4	14.12
50	28	14.4	13.6	11.76



注: —◆— 液限 —■— 塑性 —▲— 塑性指数

图 2 掺砂率与界限含水率的关系

Fig. 2 Relationship between Atterberg limits and tailings sand content



注: —◆— 液限 —■— 塑性指数

图 3 黏粒含量与界限含水率的关系

Fig. 3 Relationship between atterberg limits and clay content

从图 2 和表 3 可知,掺铁尾矿砂可以显著降低膨胀土的液、塑限及塑性指数。随着掺砂率的增大,改良土的液限大幅度降低,总下降率达到 39.9%

(即 $(46.6-28)/46.6$ ),且降低的速率变化较明显。虽然,改良土的塑限随着掺砂率的增大也降低,总下降率达34.8%,但是,降低的速率与液限相比表现地相对平缓些,从而,改良土的塑性指数随着掺砂率的增大也逐渐减小,总下降率达44.5%(即 $(24.5-13.6)/24.5$ )。液限和塑性指数都是判别膨胀土的重要参数,而且,液限和塑性指数越小,土的膨胀性则越弱<sup>[21]</sup>,即膨胀土越稳定,对工程建设的影响越小。试验结果表明,掺铁尾矿砂可以改善膨胀土的膨胀性,而且,铁尾矿砂改善膨胀土膨胀性的效果与掺砂率有关。在掺砂率为30%时,改良土的液限和塑性指数下降速率均达到最大,分别为13.91%(计算: $(38.1-32.8)/38.1$ )和20.41%(如式 $(19.6-15.6)/19.6$ ),说明掺砂率为30%时改良效果最明显。从图3和表3还可以看出,随着掺砂率的增大,改良土中黏粒含量不断降低。与此同时,改良土的液限和塑性指数随着黏粒含量的减少而降低。由图2得出,改良土液限和塑性指数两者的减小是由于掺砂率增大这个外部因素所造成的,但实质上是由于土体中掺入铁尾矿砂,随着尾矿砂掺量的增大使改良土中亲水性的黏粒含量降低,比表面积减小,从而减弱膨胀土的亲水性,起到降低膨胀土膨胀性的作用。

## 2.2 掺铁尾矿砂对膨胀土膨胀性的影响

针对膨胀土的膨胀特性,对不同掺砂率的土样进行了自由膨胀率试验、不同荷载下的膨胀率试验以及膨胀力试验,以了解掺铁尾矿砂对膨胀土膨胀性的影响以及何种配比对于改善膨胀土的膨胀性效果最好,不同掺砂率与膨胀土的自由膨胀率、有荷膨胀率、膨胀力等膨胀性指标的关系如图4~图6所示。

从图4可以看出,随着掺砂率的增加,改良土的自由膨胀率大幅度降低,说明掺铁尾矿砂可以有效抑制膨胀土的膨胀性。当掺砂率为30%时,自由膨胀率下降速率最大,达到15.8%,此时,改良土的自由膨胀率为32%。因此,掺砂率为30%时足以减弱膨胀土的膨胀性,增强膨胀土的稳定性,满足工程建设对膨胀土的要求。

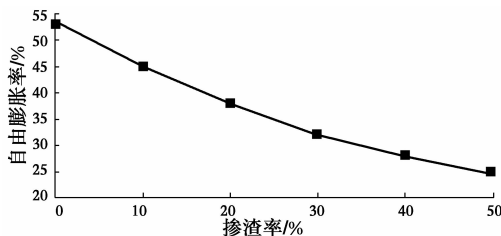


图4 掺砂率与自由膨胀率的关系

Fig. 4 Relationship between free swelling ratio and tailings sand content

由图5可知,掺入铁尾矿砂对膨胀土有荷膨胀率有很大影响。当上覆荷载一定时,改良土的有荷

膨胀量随着掺砂率的增加逐渐减小。这是因为:掺入铁尾矿砂后,土样中的亲水性黏粒被置换出来,而铁尾矿砂性质稳定,不会遇水膨胀;铁尾矿砂有一定的棱角,黏土颗粒在吸水膨胀变形时与铁尾矿砂存在相对摩擦,此时尾矿砂会对黏土颗粒产生一定的阻力。因此,掺砂率越高,效果越明显。掺砂率相同的情况下,随着上覆荷载的增大,有荷膨胀量逐渐减小,说明上覆荷载的增加可以有效地抑制膨胀土的膨胀性,而且,当上覆压力大于膨胀力时,土体会出现负膨胀量,产生压缩变形。这是由于上覆荷载的增大会使土样中有效应力增大,降低土样的吸力,间接地阻止水分进入膨胀土中,从而抑制颗粒间水膜厚度的增大,对土体膨胀变形起到一定的积极作用。

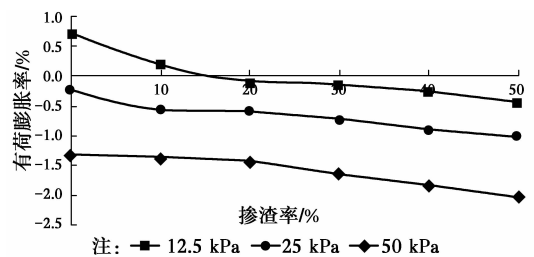


图5 掺砂率与有荷膨胀率的关系

Fig. 5 Relationship between loaded swelling ratio and tailings sand content

从图6可以看出,掺铁尾矿砂可以显著降低膨胀土的膨胀力。改良土的膨胀力随着掺砂率的增大逐渐减小。产生这一现象的原因是:随着掺砂率的增大,土样中置换出来的亲水性黏粒也逐渐增多,土样中含有的引起遇水膨胀的黏土颗粒逐渐减少,而且,尾矿砂有一定的棱角,黏土颗粒在吸水膨胀变形时与铁尾矿砂存在相对摩擦,此时,尾矿砂会对黏土颗粒产生一定的阻力,此阻力可以抵消一部分膨胀力,故改良土膨胀力随着掺砂率的增大显著降低。

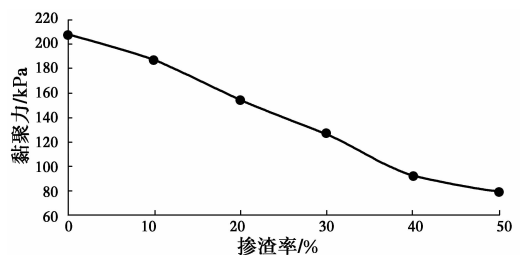


图6 掺砂率与膨胀力的关系

Fig. 6 Relationship between swelling pressure and tailings sand

## 2.3 掺铁尾矿砂对膨胀土强度的影响

为了研究掺入铁尾矿砂对膨胀土强度的影响,本研究对尾矿砂含量为0%、10%、20%、30%、40%和50%的改良土分别进行了无侧限抗压强度试验和剪切试验,探讨不同掺砂率对膨胀土强度的影响,试验

结果如图 7~图 9 所示。

从图 7 可以看出,掺入铁尾矿砂对膨胀土无侧限抗压强度有很大的影响。随着掺砂率的增加,无侧限抗压强度逐渐增大,在掺砂率为 30% 时,达到最大,当掺砂率继续增加时,无侧限抗压强度反而急剧降低。当掺砂率为 30% 时,无侧限抗压强度达到最大值 1 171 kPa,较素土无侧限抗压强度 747 kPa 增长约 56.8%。这是因为,尾矿砂颗粒的表面摩擦力较大,使得砂土颗粒之间产生的咬合更加紧密,抵抗竖向压力的能力增强;另外,由于尾矿砂颗粒硬度较大,起到类似于混凝土骨料砂、石的作用,即尾矿砂颗粒在改良土中起骨架作用<sup>[22]</sup>,而黏土颗粒包裹在尾矿砂颗粒表面并填充其孔隙,从而改善了改良土结构,提高其密实性。因此,掺入适量的尾矿砂后无侧限抗压强度有所增大。当掺砂率由 30% 继续增长至 50% 时,无侧限抗压强度反而大幅度降低,这是由于掺入过多尾矿砂,使得改良土中黏粒含量相对太少,颗粒间的粘结作用减弱,从而导致改良土无侧限抗压强度迅速减小。

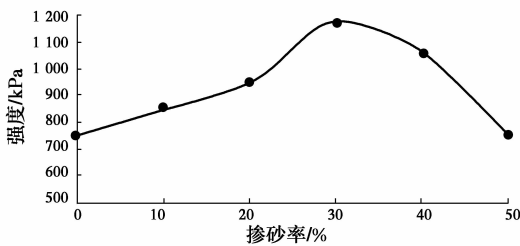


图 7 掺砂率与无侧限抗压强度的关系

Fig. 7 Relationship between unconfined compressive strength and tailings sand content

从图 8 和图 9 可以看出,掺入铁尾矿砂对膨胀土抗剪强度有较大的影响。改良前的素土  $c = 169.96 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 30.7^\circ$ 。随着掺砂率的增加,黏聚力逐渐增大,在掺砂率为 30% 时达到最大,当掺砂率继续增加时,黏聚力反而急剧降低。当掺砂率为 30% 时,黏聚力达到最大值 206.36 kPa,较素土黏聚力 169.96 kPa 增长约 21.4%。上述变化趋势产生的原因可以从以下方面解释:土的黏聚力包括原始黏聚力(主要由土粒间水膜受到相邻土粒之间的电分子引力形成)、固化黏聚力(由土中化合物的胶结作用而形成)以及毛细黏聚力(由毛细压力引起,一般可忽略不计)<sup>[23]</sup>。所以,也就是说土体的黏聚力主要由原始黏聚力和固化黏聚力决定。未掺入尾矿砂时,土粒周围的水膜厚度较大,原始黏聚力较小;随着尾矿砂的掺入,尾矿砂颗粒不断进入到土粒水膜之中,使得土粒周围的水膜厚度不断减小,原始黏聚力逐渐增加。但是,尾矿砂的掺入量存在一个阈值,当掺入量超过这个阈值时,土体的黏聚力就会降

低。这是因为在达到阈值之前,尾矿砂的掺入在没有破坏固化黏聚力的基础增大了原始黏聚力,而超过阈值后由于尾矿砂掺入过多,降低了固化黏聚力,从而使得黏聚力整体表现为降低,而改良土的内摩擦角随着掺砂率的增大持续增加。土体内摩擦角的大小主要由内摩擦力控制,由于尾矿砂颗粒的表面摩擦力较大,随着铁尾矿砂掺量的增加,使得改良土颗粒之间表面摩擦力增大,颗粒连锁作用产生的咬合更加紧密,所以,改良土的内摩擦角呈现出增大的趋势。

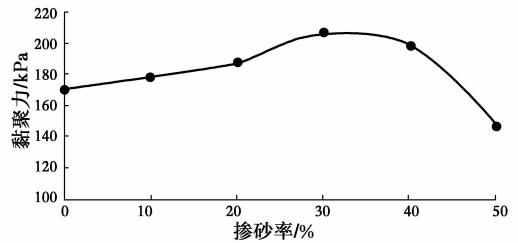


图 8 掺砂率与黏聚力的关系

Fig. 8 Relationship between cohesion and tailings sand content

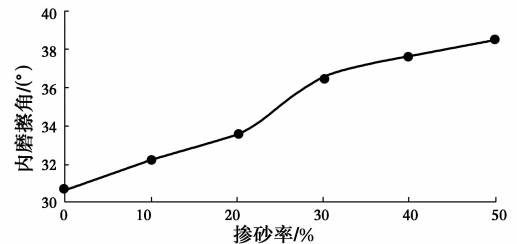


图 9 掺砂率与内摩擦角的关系

Fig. 9 Relationship between internal friction angle and tailings sand content

## 2.4 微观结构分析

由图 10(a)可以看出,未掺铁尾矿砂改性的膨胀土颗粒以粒状为主,含片状颗粒,黏土物质连续、无定向分布,孔隙形状不规则且孔隙发育;排列结构以粒状颗粒堆积为主,含紊流结构、絮凝结构等<sup>[24]</sup>。

由图 10(b)可以看出,掺砂率为 20% 的改良土,颗粒以片状和扁平状集聚体为主,含有粒状颗粒。从总体来看,片状和扁平状颗粒展现出一些板块状团粒集合体,整体上具有连续的、排列呈现一定的定向趋势的特征。结合方式包括面-面结合和边-边结合,孔隙发育程度较未改性前有所减弱。微结构特征以层流结构为主,含紊流结构、粒状堆积结构等。

由图 10(c)可以看出,掺砂率为 30% 的改良土,颗粒以片状为主,含有粒状颗粒。片状颗粒展现出大量的板块状团粒集合体,整体连续性好,排列呈现出明显的定向趋势。与掺砂率为 20% 的改良土相似,结合方式包括面-面结合和边-边结合,以面-面结合为主。孔隙发育程度在掺砂率为 20% 的改良

土的基础上又有所减弱。微结构特征以片堆结构为主,含层流结构、粒状堆积结构等。

由图 10(d)可以看出,掺砂率为 40% 的改良土,颗粒以片状和卷曲片状颗粒为主,含有粒状颗粒。总体来看,片状和卷曲片状颗粒形成大量团聚体,但与掺砂率为 30% 的改良土相比,整体性较差,排列呈现出的定向趋势不明显,而且,孔隙发育程度有所增强。微结构特征以紊流结构为主,含片堆结构、粒状堆积结构等。

掺入尾矿砂后,膨胀土的微观结构发生显著变化,土的结构是决定其物理力学性质最主要因素之一<sup>[25]</sup>。由图 10 可见:膨胀土改良后微团粒间连接紧密、牢固,改良土土粒边缘卷曲减少,呈现出板块状团粒集合体,整体连续性好,排列呈现出明显的定向趋势,缩小了微团粒间的微孔隙和微裂隙,从而降低了膨胀土的亲水性,胀缩性得到有效抑制,且提高了膨胀土的抗压强度和抗剪强度,使得物理力学性质得到改善。

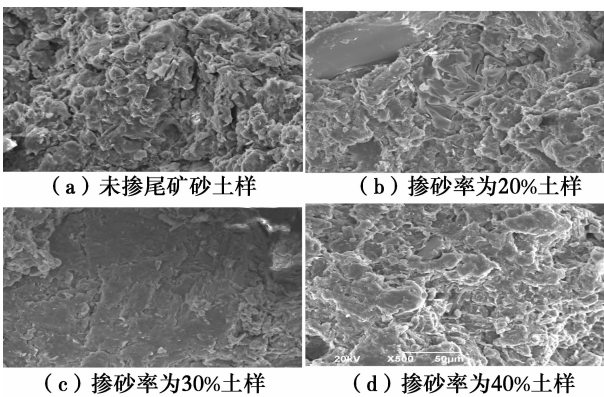


图 10 不同掺砂率下改良土微观结构

Fig. 10 The microstructure of improved soil under different tailings sand content

### 3 结论

1) 随着掺砂率的增加,尾矿砂改良土中粉粒和砂粒的含量增加,黏粒的含量不断减少。从外部因素分析,改良土液限和塑性指数两者的减小是由于掺砂率增大所造成的,从内部因素分析,实质上是由于土体中掺入铁尾矿砂,随着尾矿砂掺量的增大使改良土中亲水性的黏粒含量降低,比表面积减小,从而减弱膨胀土的亲水性,起到降低膨胀土膨胀性的作用。

2) 膨胀土中掺入铁尾矿砂可以有效抑制膨胀土的膨胀性,降低膨胀势。膨胀土的膨胀性指标(自由膨胀率、有荷膨胀率和膨胀力)随着掺砂率的增加均显著降低。膨胀土中掺入铁尾矿砂可以有效提高膨胀土的无侧限抗压强度和抗剪强度,随着掺砂率的

增加,内摩擦角逐渐增大,而无侧限抗压强度和黏聚力在掺砂率为 30% 时,达到最大。

3) 结合 SEM 试验结果,通过观察改良土的微观结构,发现在掺砂率为 30% 时,整体性最好,结构处于稳定的以片堆结构为主的状态。

4) 综合考虑各项指标,认为铁尾矿砂改性膨胀土的最佳掺入比应为 30%。

### 参考文献:

- [1] 李吴刚,杨庆,刘文化,等.基于 SFG 模型的非饱和膨胀土本构模型研究[J].岩土工程学报,2015,37(8):1449-1453.  
LI W G, YANG Q, LIU W H, et al. Constitutive model for unsaturated expansive clays based on SFG model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8):1449-1453. (in Chinese)
- [2] PRIYANTHI M A, KALPANA S K, DINESH R K. Insight into role of clay-fluid molecular interactions on permeability and consolidation behavior of nanomontmorillonite swelling clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2):138-146.
- [3] 黎伟,刘观仕,汪为巍,等.湿干循环下压实膨胀土裂隙扩展规律研究[J].岩土工程学报,2014,36(7):1302-1308.  
LI W, LIU G S, WANG W W, et al. Crack propagation law of compacted expansive soils under wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7):1302-1308. (in Chinese)
- [4] STOLTZ G, CUISINIER O, MASROURI F. Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil [J]. Applied Clay Science, 2012, 61:44-51.
- [5] 汪明武,赵奎元,张立彪.基于联系期望的膨胀土和改良土胀缩性评价模型[J].岩土工程学报,2014,36(8):1553-1557.  
WANG M W, ZHAO K Y, ZHANG L B. A novel evaluation model based on connectional expectation for swelling-shrinkage grade of untreated and treated expansive clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8):1553-1557. (in Chinese)
- [6] SECO A, RAMIREZ F, MIQUELEIZ L, et al. Stabilization of expansive soils for use in construction [J]. Applied Clay Science, 2011, 51:348-352.
- [7] 张涛,刘松玉,蔡国军,等.木质素改良粉土热学与力学特性相关性试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1876-1885.  
ZHANG T, LIU S Y, CAI G J, et al. Experimental study on relationship between thermal and mechanical properties of treated silt by lignin [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10):1876-1885.

- (in Chinese)
- [8] AL-RAWAS A A, HAGO A W, AL-SARMI H. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman [J]. *Building and Environment*, 2005, 40: 681-687.
- [9] NALBANTOGLU Z. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18: 377-381.
- [10] 孙树林, 郑青海, 唐俊. 碱渣改良膨胀土室内试验研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(6): 1608-1612.  
SUN S L, ZHENG Q H, TANG J. Experimental research on expansive soil improved by soda residue [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(6): 1608-1612. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)[Z]. 2006.  
The State Council of the People's Republic of China. Outline of national medium and long-term scientific and technological development plan(2006-2020). 2006[Z]. (in Chinese)
- [12] ZHAO F Q, LI H, LIU S J, et al. Preparation and properties of an environment friendly polymer-modified waterproof mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25: 2635-2638.
- [13] CHOI Y W, KIM Y J, CHOI O, et al. Utilization of tailings from tungsten mine waste as a substitution material for cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23: 2481-2486.
- [14] 刘辉敏. 用硅石尾矿粉作混合材料制备管桩用水泥[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(6): 1526-1529.  
LIU H M. Preparation of cement used in pipe pile with silica tailings powder [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(6): 1526-1529. (in Chinese)
- [15] 刘辉敏. 用硅石尾矿粉和石屑制备蒸压灰砂砖[J]. *非金属矿*, 2013, 36(3): 60-62.  
LIU H M. Autoclaved sand-lime bricks from silica tailings powder and stone chips [J]. *Non-Metallic Mines*, 2013, 35(3): 60-62. (in Chinese)
- [16] 陈善雄, 余颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1895-1900.  
CHEN S X, YU S, KONG L W, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1895-1900. (in Chinese)
- [17] 段海澎, 陈善雄, 余飞, 等. 膨胀土的适用性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2121-2127.  
DUAN H P, CHEN S X, YU F, et al. Applicability of recommended classification in specification method for expansive soil in the middle area of Anhui Province [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2121-2127. (in Chinese)
- [18] 曾斌, 王青薇, 刘清秉, 等. “引江济汉”工程渠坡膨胀土分级评价量化模型研究 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(6): 959-966.  
ZENG B, WANG Q W, LIU Q B, et al. Quantitative model for hierarchic evaluation of expansive soil in Yangtze River-Hanjiang River water transfer project [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(6): 959-966. (in Chinese)
- [19] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Technical code for buildings in expansive soil regions: GB 50112-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [20] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.  
Standard for soil test method: GB/T 50123-1999[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)
- [21] 王芳, 曹培, 严丽雪. 南水北调中线膨胀土变形特性的试验研究 [J]. *水利学报*, 2014, 45(Sup2): 142-146.  
WANG F, CAO P, YAN L X. Study on swelling characteristic of expansive soil in the middle route of South-to-North Water transfer project [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(Sup2): 142-146. (in Chinese)
- [22] 吴子龙, 朱向阳, 邓永锋, 等. 砂-黏土混合物的压缩性状及其粗颗粒骨架形成机 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(2): 121-128.  
WU Z L, ZHU X Y, DENG Y F, et al. Compression behavior of sand-clay mixtures and formation mechanism of coarse granulesand skeleton [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(2): 121-128. (in Chinese)
- [23] 殷宗泽. 土工原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.  
YIN Z Z. *Earthwork principle* [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007. (in Chinese)
- [24] 陈宇龙. 云南膨胀土的微观结构特征 [J]. *岩土工程学报*, 2013(Sup1): 334-339.  
CHEN Y L. Microstructure of expansive soil from Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013(Sup1): 334-339. (in Chinese)
- [25] MITCHELL J K. *Fundamentals of soil behavior* [M]. 2nd. New York: Wiley and Sons, 1993.