

[文章编号] 1003—4684(2019)04-0104-04

# 磷尾矿—玄武岩纤维改良膨胀土试验研究

庄心善, 李 凯, 王 康, 王俊翔

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以湖北黄石某公路膨胀土为研究对象,在最大干密度和最佳含水率条件下,分别将不同比例磷尾矿和玄武岩纤维掺入膨胀土中进行室内试验研究。试验结果表明:适量磷尾矿能提高膨胀土的抗压强度和剪切强度,掺量为 10%效果最佳;玄武岩纤维对膨胀土强度影响较小,但能显著抑制其胀缩性,且掺量不宜过多,掺量为 0.3%效果最佳;通过三轴正交试验分析,得到不同掺量磷尾矿—玄武岩纤维改良膨胀土抗剪强度与法向正应力拟合关系式,确定磷尾矿、玄武岩纤维最佳混合掺量分别为 10%、0.3%。

[关键词] 膨胀土; 磷尾矿; 玄武岩纤维; 强度; 三轴试验

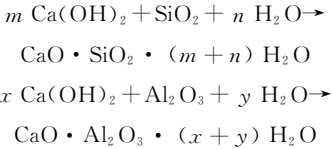
[中图分类号] TU 411

[文献标识码] A

膨胀土是由亲水矿物蒙脱石、伊利石组成,具有显著的吸水后膨胀软化、失水后收缩开裂等不良工程特性的特殊土体。此特性经常导致膨胀土地区公路、铁路、房屋、水工建筑物不均匀变形、开裂等工程灾害。目前国内外对膨胀土改良进行了大量研究,邓友生等<sup>[1]</sup>研究发现,在最优含水量的基础上,聚丙烯纤维能够提高膨胀土强度且增加延性,且存在最佳掺入量;陈晓雪等<sup>[2]</sup>对膨胀土中掺入玄武岩纤维进行了蠕变试验,发现纤维能显著改善膨胀土的蠕变性能,且存在最佳纤维掺量和最优含水量;张雁等<sup>[3]</sup>将煤矸石掺入非饱和膨胀土中研究发现,煤矸石的掺入可以提高膨胀土的强度、降低非饱和膨胀土的吸力,减小膨胀土的膨胀率;杨俊等<sup>[4]</sup>对风化砂改良膨胀土进行了研究,发现随着掺砂量的增大,改良土的黏聚力减小,内摩擦角增大;刘宇翼等<sup>[5]</sup>研究了 EPS 改良膨胀土特性发现,EPS 颗粒能显著降低改良土的膨胀率和膨胀力,特别是对强膨胀土更为显著;李丽华等<sup>[6]</sup>对轮胎颗粒改良膨胀土动力特性进行的研究发现,混合土的剪切刚度有效降低,可以起到减震隔震效果;周成等<sup>[7]</sup>研究发现,香根草根系能够增大膨胀土抗剪强度和减小膨胀力;庄心善等<sup>[8]</sup>研究发现,石灰的掺入主要影响膨胀土的黏聚力,对内摩擦角影响较小;吴燕开等<sup>[9]</sup>研究发现,随钢渣粉掺量的增加,改良土的膨胀率降低,无侧限抗

压强度增加。

将磷尾矿掺入膨胀土中,促使土颗粒中的粘粒矿物与磷尾矿化学组成成分会发生一系列的离子交换、硬凝等复杂化学作用,加强了膨胀土的内部结构特性指标、抑制其裂缝和胀缩现象的开展,最后达到提高膨胀土抗剪强度的效果。其反应机理如下两式所示:



式中: $m, n, x, y$  为系数,视具体反应条件而定。

玄武岩纤维改良膨胀土指的是,将不同比例的纤维混入膨胀土中使其成为新的复合体结构。这种结构类似于加筋土物理改良方式,共同目的是减少了土体颗粒间相对位移,增加内部约束力从而达到改良效果。

## 1 试验材料

### 1.1 膨胀土

试验用土取自湖北黄石某公路膨胀土试验路段,在自然状态下呈红褐色、半坚固其基本物理性质指标如表 1 所示。

[收稿日期] 2018—09—19

[第一作者] 庄心善(1962—),男,河南淮阳人,湖北工业大学教授,研究方向环境岩土工程及边坡工程

[通信作者] 李 凯(1992—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向膨胀土改良

表 1  膨胀土物理性质指标

|   |                    |      |
|---|--------------------|------|
| 天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 1.79               |      |
| 含水率 $w\omega/\%$                            | 19.7               |      |
| 液限 $W_L/\%$                                 | 54                 |      |
| 塑限 $W_P/\%$                                 | 18                 |      |
| 自由膨胀率/ $\%$                                 | 57                 |      |
| 比重  | 2.73               |      |
| 颗粒含量/ $\%$                                  | $<0.005\text{ mm}$ | 36.9 |
|   | $<0.002\text{ mm}$ | 24.1 |

1.2  玄武岩纤维

玄武岩纤维主要由二氧化硅、三氧化二铁、氧化铝等矿物质构成,具有电绝缘、耐高温、耐腐蚀等多种良好特征。试验所用玄武岩纤维性质如表 2 所示。

表 2  短切玄武岩束状单丝纤维基本性能物理指标

|                                       |             |
|---------------------------------------|-------------|
| 单丝直径/ $\mu\text{m}$                   | 12          |
| 密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 2640        |
| 平均长度/ $\text{mm}$                     | 6           |
| 抗拉强度/ $\text{MPa}$                    | $\geq 2000$ |
| 弹性模量/ $\text{GPa}$                    | 90—110      |
| 极限延伸率/ $\%$                           | 3.5         |
| 熔点/ $^{\circ}\text{C}$                | 1260        |

1.3  磷尾矿

磷尾矿取自大冶某磷矿加工厂,颜色为灰褐色,呈粉末状。其化学成分如表 3 所示。

表 3  磷尾矿主要化学成分

| 成分                      | 含量/ $\%$ | 成分             | 含量/ $\%$ |
|-------------------------|----------|----------------|----------|
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 2.3      | $\text{MgO}$   | 16.88    |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0.35     | $\text{SiO}_2$ | 4.36     |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 32.82    | $\text{MnO}$   | 0.14     |
| $\text{CaO}$            | 32.62    | 其他             | 12.73    |

2  试验方案

基于《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)规范,对膨胀土进行了多组击实试验得到最大干密度和最优含水率。在保持该干密度和含水率条件下,以质量配比,磷尾矿掺量分别为 0%、5%、10%、15%;玄武岩纤维掺量分别为 0%、0.1%、0.3%、0.5%进行制备试样。

参照上述试验规范对单一磷尾矿改良土进行龄期为 7 d、14 d、28 d 的无侧限抗压强度试验,对单一玄武岩纤维改良土进行膨胀力试验,对磷尾矿-玄武岩纤维混合改良土进行三轴剪切试验。无侧限抗压强度试验采用 YYW-II 型无侧限抗压仪进行试验,其应变速率为 0.08 mm/min;膨胀力试验采用直径尺寸为 61.8 mm,高度为 20 mm 的环刀试样,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状态;CU 剪切试验采用全自动

三轴仪,控制应变速率为 0.05 mm/min,并设置了在 100 kPa、200 kPa、300 kPa 三个不同围压进行的三轴试验。

3  试验结果与分析

3.1  膨胀土的最大干密度与最佳含水率

制备含水率分别为 13%、15%、16%、18%、19%、21% 的 6 个试样两组,进行击实试验取平均值,得出干密度与含水率关系曲线,如图 1 所示。由图可知,膨胀土的最优含水率为 17%,最大干密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>。

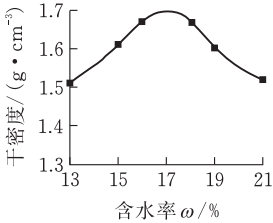


图 1  膨胀土含水率与干密度关系曲线

3.2  磷尾矿对膨胀土无侧限抗压强度的影响

从图 2、图 3 曲线规律所示,当试样养护龄期相同时,含量为 10% 磷尾矿的改良土的无侧限抗压强度值达到极大值,较素土提高了近 360%;当磷尾矿掺量不变时,养护龄期对试样的无侧限抗压强度值提升缓慢,养护 28 d 后几乎无增加趋势。主要原因磷尾矿中含有大量的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaO 等化合物,其中含量较高的 CaO 与水发生反应而迅速地消解,形成胶凝材料 Ca(OH)<sub>2</sub> 包裹土颗粒达到一定粘结效果,而其他化学成分也会和膨胀土中的粘性颗粒矿物发生的化合作用增强了土颗粒间摩擦力。磷尾矿与膨胀土发生离子交换作用,其中高价阳离子与土体中含有的低价阳离子发生置换,从而减少表面阳离子电荷膜厚度,降低了土体塑性指数,提高膨胀土初期强度;随着反应进一步发展,磷尾矿中的生成的氢氧化物与空气里的水、二氧化碳等会发生碳化作用,生成强度更高的水化碳酸盐、水化硅酸盐固体颗粒,促进了土体摩擦力增长。所以随着养护期的延续,磷尾矿改良膨胀土无侧限抗压强度有缓慢增长的过程。

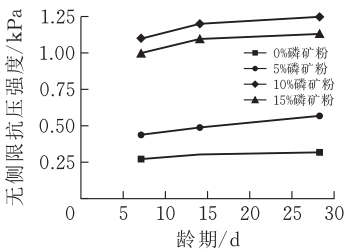


图 2  无侧限抗压强度与养护龄期之间关系曲线

3.3  玄武岩纤维对膨胀土膨胀力的影响

从图 3、图 4 中可以得到结论,膨胀土随纤维掺

量的增加膨胀力呈现先减小后增大的趋势,当玄武岩纤维比例为 3%时,膨胀力抵消最明显达到极小值。究其原因,当膨胀土遇水膨胀时,水未充分占据土体空隙,在周围的约束下产生极具的膨胀力,掺入的纤维均匀包裹于土颗粒起到一定的抗拉作用,有效的抵消一部分的膨胀应力,从而降低膨胀土的膨胀力。然而随着玄武岩纤维掺入量超过最优值,大量堆积成絮分布极不均匀,从而降低了纤维提供的拉应力,使得膨胀力又迅速增大。因此,根据本试验结果可以看出,玄武岩纤维掺量为 0.3%改良效果。

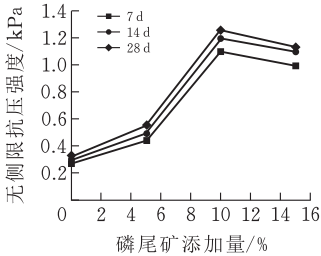


图 3 无侧限抗压强度与磷尾矿掺量之间关系曲线

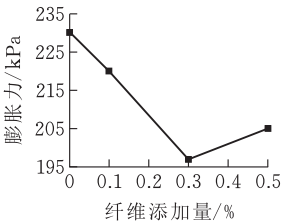


图 4 膨胀力与玄武岩纤维掺量关系曲线

3.4 磷尾矿—玄武岩纤维共同作用改良膨胀土强度影响

基于膨胀土最大干密度和最优含水率,分别将不同比例的磷尾矿、玄武岩纤维以质量为配比掺入膨胀土中,进行不同围压下的固结不排水三轴试验。试样养护龄期是 7 d,得出改良后膨胀土抗剪强度与法向应力之间的关系表达式结果如表 4 所示。

从表 4 中可以明显地看出,磷尾矿的化学组成成分与土体粘性颗粒的化学组成成分发生化学反应、胶凝作用等,使改良膨胀土内摩擦角呈现先增大后减小趋势,而黏聚力最终有所下降但不明显。一方面当磷尾矿掺入土体后,磷尾矿中高含量的钙离子、镁离子置换出大量存在的钠离子、钾离子等发生离子交换的作用,这将会导致土体颗粒表面吸附水膜变薄,缩短颗粒了的距离,压缩了土体的孔隙度,降低了改良土的塑性指数,使得土体之间聚集紧密,因此内摩擦角得到大幅度提升,而黏聚力变化并不明显。另一方面磷尾矿的掺量存在最佳值,掺量过多容易使磷尾矿团聚体过量,当土体吸水软化,容易造成土体的相对移动,使得内摩擦角和粘聚力有所下降。从而得出结论,磷尾矿掺量 10%能达到改良

膨胀土最大抗剪强度。

表 4 膨胀土抗剪强度  $\tau$ (kPa)与法向应力  $\sigma$ (kPa)关系式

| 玄武岩纤维掺量/% | 磷尾矿掺量/% | 关系式                                   |
|-----------|---------|---------------------------------------|
| 0         | 0       | $\tau=0.3511\sigma+133.8, R^2=0.9623$ |
|           | 5       | $\tau=0.3632\sigma+140.8, R^2=0.9983$ |
|           | 10      | $\tau=0.5237\sigma+151.7, R^2=0.9556$ |
|           | 15      | $\tau=0.3230\sigma+121.5, R^2=0.9782$ |
| 0.10      | 0       | $\tau=0.3529\sigma+133.6, R^2=0.9765$ |
|           | 5       | $\tau=0.3725\sigma+146.5, R^2=0.9777$ |
|           | 10      | $\tau=0.4527\sigma+159.7, R^2=0.9467$ |
|           | 15      | $\tau=0.3418\sigma+125.3, R^2=0.9256$ |
| 0.30      | 0       | $\tau=0.3623\sigma+141.8, R^2=0.9743$ |
|           | 5       | $\tau=0.4587\sigma+152.3, R^2=0.9754$ |
|           | 10      | $\tau=0.5424\sigma+164.9, R^2=0.9743$ |
|           | 15      | $\tau=0.3398\sigma+135.7, R^2=0.9635$ |
| 0.50      | 0       | $\tau=0.3691\sigma+144.9, R^2=0.9865$ |
|           | 5       | $\tau=0.3795\sigma+140.1, R^2=0.9421$ |
|           | 10      | $\tau=0.5070\sigma+151.9, R^2=0.9748$ |
|           | 15      | $\tau=0.3344\sigma+121.8, R^2=0.9799$ |

玄武岩纤维对膨胀土抗剪强度影响略小但有所增加。究其原因,纤维在土体中起到一定的抗拉作用,当围压施加土体使得颗粒间压缩更加紧密,适量纤维均匀分布于土颗粒表面,这样围绕于颗粒四周约束更加明显,从而有效抑制了改良土斜截面破坏。然而当玄武岩纤维掺量超过最佳值,玄武岩纤维会在土体内团聚成絮,分布不均,土体相对滑动面变多,从而降低了土体的抗剪强度。因此,玄武岩纤维的掺量不宜过高。

4 结论

基于膨胀土最大干密度与最佳含水率的条件下,分别将不同掺量磷尾矿和玄武岩纤维以质量为配比掺入膨胀土中,进行了无侧限抗压强度试验、膨胀力试验以及固结不排水三轴剪切试验,得到结论如下:

- 1)磷尾矿可有效增加膨胀土的无侧限抗压强度。当磷尾矿掺入量为 10%的时候,提升最明显;养护龄期 28 d 的试样无侧限抗压强度要比养护龄期 7 d 的试样提升约 20%。
- 2)不同掺量的玄武岩纤维加入到膨胀土中进行膨胀力试验,膨胀力先减小后增大,当玄武岩纤维掺量为 0.3%时,膨胀力最小。
- 3)通过磷尾矿—玄武岩纤维复合改良土三轴剪切试验,磷尾矿、玄武岩纤维掺量分别为 10%、0.3%时,膨胀土的改良效果最佳。且磷尾矿与玄武岩纤维不产生反应。

[参 考 文 献]

[1] 邓友生,吴鹏,赵明华,等.基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J].岩土力学,2007,38(2):350-360.

[2] 陈晓雪,独莎莎,张丹,等.纤维加筋膨胀土的三轴蠕变特性试验研究[J].工程地质学报,2017,25(1):80-87.

[3] 张雁,张宇,郭利勇,等.非饱和压实膨胀土掺煤矸石的特性研究[J].环境工程学报,2016,10(9):5115-512.

[4] 杨俊,袁凯,狄先均,等.天然砂砾改良膨胀土力学指标试验及模型分析[J].江苏大学学报,2016,37(3):359-366.

[5] 刘宇翼,周国庆,苏运河,等.聚苯乙烯泡沫塑料颗粒-膨胀土混合料的胀缩特性试验研究[J].工业建筑,2017,47(5):90-95.

[6] 李丽华,肖衡林,唐辉明,等.轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究[J].岩土力学,2014,35(2):359-422.

[7] 周成,路永珍,黄月华.香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J].岩土工程学报,2016,38(2):30-35.

[8] 庄心善,彭伟珂,吴镜泊.石灰改良膨胀土强度试验研究[J].公路工程,2017,42(5):1-5.

[9] 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,2017,36(1):136-143.

An Experimental Study on the Characteristed of Improved Expansive Soil with Phosphorus Tailings- Basalt Fiber

ZHUANG Xinshan,LI Kai, WANG Kang,WANG Junxiang

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China )

**Abstract:** Taking the expansive soil of a highway in Huangshi, Hubei as the research object, based on maximum dry density and optimum moisture content, different proportions of phosphorus tailings and basalt fibers were added into the expansive soil respectively. The experimental results show that a proper amount of phosphorous tailings can improve the compressive strength and shear strength of the expansive soil, and the effect is best when the amount of doping is 10 %; basalt fiber exerts little influence on the strength of expansive soil, but it can significantly inhibit its characteristics of shrinkage and expansion. And the amount of doping should not be too much. The best effect was achieved with an amount of doping at 0.3%. Through the analysis of three axis orthogonal tests, the fitting relationship between the shear strength and normal stress of the modified expansive soil with different contents of phosphorus tailing and basalt fiber is obtained, and the optimum mixing amount of phosphorus tailing-basalt fiber is 10% and 0.3%, respectively.

**Keywords:** expansive soil;phosphate tailing;basalt fibre;strength;triaxial compression test

[责任编辑：裴 琴]