

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.040

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



膨润土对双轮铣水泥土搅拌墙体强度和渗透特性的影响

陈宇航¹, 唐昊陵², 章定文¹

(1. 东南大学 交通学院; 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 南京 211189;

2. 南京城建隧桥经营管理有限责任公司, 南京 213000)

摘要:膨润土浆液常作为地下工程双轮铣水泥土搅拌墙(CSM)的铣削液来改善土体搅拌均匀性和维持槽壁稳定。通过室内试验研究膨润土-水泥土试样无侧限抗压强度和渗透系数等特性随膨润土掺入量的变化情况,并结合压汞试验分析掺入膨润土对水泥土微观孔隙特征的影响,探讨掺入膨润土后试样孔隙比的变化与水泥土试样无侧限抗压强度和渗透系数的内在关联。结果表明,掺入膨润土可显著降低水泥固化砂土和粉土的渗透系数;掺入膨润土还能提高无侧限抗压强度,砂土试样的无侧限抗压强度增幅较水泥固化粉土试样更大;固化土无侧限抗压强度和孔隙比与水泥掺量的比值近似呈幂函数关系;膨润土能有效填充孔隙,同时与水泥水化产物发生化学反应,改变水泥土孔隙分布;掺入适量的膨润土可改善水泥土试样承强防渗效果,在固化粉土和砂土试样中膨润土的适宜掺入量分别为5%和2.5%~5%。

关键词:双轮铣水泥土搅拌墙;膨润土;抗压强度;渗透系数

中图分类号:TU525.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)06-0031-07

Influence of bentonite on the unconfined compressive strength and hydraulic characteristics of cutter soil mixing wall

Chen Yuhang¹, Tang Haoling², Zhang Dingwen¹

(1. School of Transportation; Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China; 2. Nanjing City Construction Tunnel Bridge Management, Nanjing 213000, P. R. China)

Abstract: Soil-bentonite mixtures are often used to maintain the stability of the deep mixed pile method for the double round milling wall (Cutter Soil Mixing, CSM). The effect of bentonite content on the unconfined compressive strength and permeability of soil-bentonite mixtures in CSM when the local soil was sand and silt. The properties including the unconfined compressive strength and permeability was measured, and microstructure was investigated using MIP. The relationship between the change of pore ratio and the unconfined compressive strength and permeability coefficient of cement soil samples was investigated. The results show that the expansion of the bentonite and chemical reaction with cement hydration products can change the pore distribution of soil-bentonite mixtures; The variation of bentonite

收稿日期:2019-12-12

基金项目:国家重点研发计划(No. 2016YFC0800201)

作者简介:陈宇航(1995-),男,主要从事地下工程研究, E-mail: 220172962@seu.edu.cn.

章定文(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: zhangdw@seu.edu.cn.

Received:2019-12-12

Foundation items:National Key Research & Development Projects of China (2016YFC0800201)

Author brief:Chen Yuhang (1995-), main research interest: underground engineering, E-mail: 220172962@seu.edu.cn.
Zhang Dingwen (corresponding author), professor, doctoral supervisor, zhangdw@seu.edu.cn.

content can significantly reduce the permeability coefficient and improve the unconfined compressive strength; The increase of unconfined compressive strength of sand samples is larger than that of silt samples; The ratio of compressive strength to porosity and cement content is approximately a power function relationship; Bentonite can effectively fill the pores, and at the same time, it reacts with cement hydration products to change the pore distribution in cement soil; A certain amount of bentonite is effective in improving the strength of the cement soil sample, but the marginal effect of improving the dosage is not obvious. The optimum content of bentonite in silt is 5% and in sand is 2.5%~5%.

Keywords: cutter soil mixing (CSM) wall; bentonite; compressive strength; permeability

膨润土常作为地下工程墙体施工的添加剂,如欧美国规范采用水泥-膨润土和土-膨润土系竖向隔离墙作为城市工业污染场地的防污防渗墙^[1-2]。在施工双轮铣水泥土搅拌墙(Cutter Soil Mixing,简称 CSM)时,往往也需要注入以膨润土泥浆为主的铣削液来改善土体搅拌均匀性和维持槽壁稳定^[3]。

无侧限抗压强度和渗透系数是评价地下工程墙体工程性能的指标。现有水泥土搅拌墙技术规程中膨润土对水泥土搅拌墙强度和渗透系数的作用并不明确。水泥固化土颗粒的强化作用有硬凝反应、团粒化作用和结晶作用,水泥常作为提高软黏土强度和刚度的添加剂^[4-5]。Lorenzo 等^[6]提出水泥土孔隙率与水泥掺入量的比值表征水泥土的无侧限抗压强度,然而掺入大量的水泥会增加工法成本。适量地掺入膨润土对改善水泥土墙体渗透系数和强度有积极影响。Agus 等^[7]和秦冰等^[8]研究钙基膨润土与砂混合物的膨胀特性及膨胀量预测方法,通过建立不同竖向力和孔隙比的线性对应关系,预测不同掺砂率的膨润土-砂混合物在不同竖向应力下由初始状态至浸水饱和状态产生的体变量和吸水量。Carreto 等^[9]研究膨润土-水泥浆体的应力应变特性和渗透性,提出一种纤维海绵介质的微观结构模型解释混合体的作用机理。Fan 等^[10]研究膨润土-黏土混合体的工程特性,当膨润土掺量为 5%~15%时,固结体的渗透系数可降至 10^{-7} cm/s。徐超等^[11]认为掺入膨润土可将水泥-膨润土固结体的渗透系数在 28 d 龄期时降至 10^{-7} cm/s 以下。Opdyke 等^[12]研究矿渣-水泥膨润土材料,表明混合体的渗透系数最低降至 10^{-8} cm/s,且认为水泥等胶凝材料是贡献无侧限抗压强度的主要来源。朱伟等^[13]认为掺入膨润土极大地提高水泥固化含重金属污泥的无侧限抗压强度,当水泥和膨润土的掺入量均为 20%(相对于仅有的水泥掺入量为 40%)时,

强度可提高 6 倍多。

在砂土层和粉土层,掺入水泥-膨润土浆液与地层原状土固结浆体的性能研究较少,且对掺入量的讨论较少。掺入膨润土对无侧限抗压强度和渗透系数的增长规律多为定性分析,无法指导现场设计和施工。笔者以粉土、砂土土样掺入膨润土和水泥的混合料为研究对象,通过室内试验研究水泥土固结体的无侧限抗压强度和渗透系数随膨润土掺入量的变化规律;研究孔隙比与水泥掺入量比值表征强度方法的适用性;结合压汞试验分析膨润土对水泥土微观孔隙的变化特征,探讨膨润土掺入量与水泥土试样孔隙变化量的关系,为 CSM 工法水泥土搅拌墙的施工提供理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

选取粉土和砂土作为研究对象,其中,粉土取自山东阳谷某建设场地地层 2~3 m 处,呈黄褐色,简称粉土样;砂土土样由商用河砂(过 2 mm 筛)、高岭土按 1:1 的比例配制而来,简称砂土样。试验中膨润土选用商用钙基膨润土。水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。上述试样用土的基本物理特性如图 1 和表 1 所示,膨润土膨胀指数的测定方法参照 ASTM D5890-11。

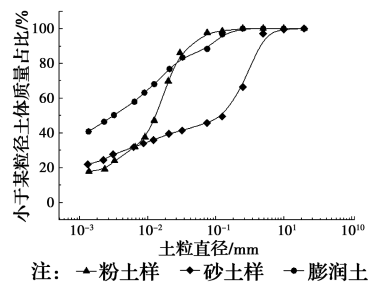


图 1 土体粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of soil sample

表 1 土体物理特性指标

Table 1 Physical properties of soil samples

名称	比重	塑限/%	液限/%	塑性指数	砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	膨胀指数/(mL·(2g) ⁻¹)
粉土样	2.79	21.1	30.8	9.7	2.33	78.65	19.02	
砂土样	2.75				54.33	31.9	13.77	
膨润土	2.62	34.0	269.4	235.4	11.71	43.75	44.54	15.0

1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 试验方案 试验配合比如表 2 所示。室内试验水泥掺入量(C)分别为 20%、22%以及 24%。大量地下墙体工程应用中,膨润土掺入量常见范围是 4%~7%^[14]。CSM 工法制浆时的膨润土掺入量通常为 5%~8%,故膨润土掺入量(B)的范围为 0~10%,分别取 0、2.5%、5%、7.5%和 10%。每种配合比制备 3 个平行样,取平均值作为测试结果。

表 2 试验配合比

Table 2 Test program of soil-cement mixtures

水泥掺入量/%	膨润土掺入量/%	含水率/%
20、22、24	0、2.5、5.0、7.5、10	50

1.2.2 试验步骤

1)用一定量的膨润土和蒸馏水配制膨润土浆液,搅拌均匀并密封放置 24 h。将试验所用土样风干粉碎,过 2 mm 筛,加入相应比例的水泥,充分搅拌后加入膨润土泥浆,继续搅拌至均匀(搅拌约 10 min)。

2)将搅拌均匀的混合土料灌入尺寸为高 10 cm、直径 5 cm 的 PVC 管模具,分层振捣后直接放入标准养护室(温度 20±2 °C,相对湿度 95%),养护 48 h 后脱模,继续养护至预定龄期后进行相应测试。

3)无侧限抗压强度试验前测试试样的质量与体积,计算试样密度。无侧限抗压强度的加载应变速率为 1%/min。强度试验后取碎料测试试样养护后的含水率。

4)采用三轴柔性壁渗透仪进行渗透试验。将试样放入饱和缸真空饱和 12 h,将饱和后的试样装入三轴柔性壁渗透仪中,反压饱和 48 h 后进行试验,具体方法参照《土工试验规程》(SL 237—1999)。

5)将切成小块的试样放入冻干机中冷冻 24 h,将试样放入压汞仪中开展压汞试验。

2 试验结果

2.1 膨润土对水泥土无侧限抗压强度的影响

图 2 为养护龄期为 28 d 的两种水泥土试样无侧限抗压强度的变化规律。固化土无侧限抗压强度随膨润土掺入量的增加而增加;相比于未掺入膨润土,当膨润土掺入量为 10%时,固化粉土样强度提高了 37.3%~58.9%,固化砂土强度提高了 80.1%~97.6%。在膨润土掺入量较小时,固化土强度增加率较大;当膨润土掺入量大于 5%时,固化粉土试样强度增速变缓;当膨润土掺入量大于 7.5%后,固化砂土样强度增幅变缓。

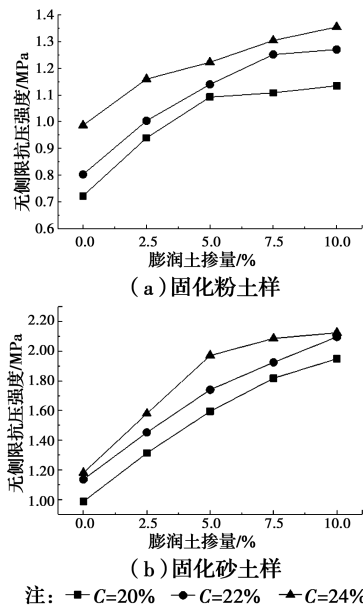


图 2 无侧限抗压强度与膨润土掺入量的关系

Fig. 2 Relationship between UCS and bentonite content

无论是粉土样或砂土试样,不掺膨润土的情况下,水泥掺入量越高,无侧限抗压强度越大。随着膨润土掺入量增加,不同水泥掺入量的试样出现不同程度的增长。一般水泥掺入量越高,无侧限抗压强度增幅出现拐点越早。

从土的颗粒级配来看,砂土颗粒组成以粗颗粒中的细砂为主,而粉土属细粒土,其粉粒含量占绝对优势。水泥土试样在水泥掺入量、龄期等其他条件

相同情况下,土颗粒越大,砂粒含量越大,试样无侧限抗压强度越大。掺入膨润土可使砂土试样中的粗颗粒更好吸附在水泥骨架上,形成更高的胶结强度,导致膨润土提高砂土试样抗压强度的幅度相比粉土试样更高。

需注意的是,在固化砂土试样 C22B10 和 C24B10 两种工况下,无侧限抗压强度只提高了 30 kPa 左右。这是由于在水泥掺入量较为接近或增加幅度不大的情况下,高掺入量(此时为 10%)膨润土的填充作用对改善强度起到主要作用。

2.2 膨润土对水泥土渗透系数的影响

图 3 为两种水泥土试样渗透系数在养护龄期为 28 d 时的变化情况。由图可见,水泥土试样的渗透系数均随着膨润土掺入量的增加而降低。对比膨润土掺入量为 0 和 10% 时,固化粉土试样渗透系数降低了 91.5%~95.4%,固化砂土试样渗透系数降幅在 92.4%~95.1% 之间。

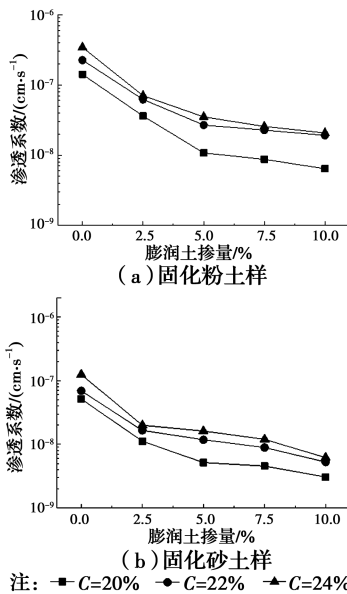


图 3 渗透系数与膨润土掺量的关系

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and bentonite content

对于两种试样,当膨润土掺量较小(小于 2.5%)时,试样渗透系数的下降幅度明显高于其他掺量下的下降幅度。固化粉土试样曲线的拐点则在膨润土掺入量为 5% 出现,而固化砂土试样的拐点在膨润土掺入量为 2.5% 处。

综合无侧限抗压强度和渗透系数试验,一味掺入膨润土提升水泥土试样性能的边际效果在减弱。水泥土墙体的 28 d 无侧限抗压强度应大于 0.5 MPa,渗透系数应降至 10^{-7} cm/s 以下。忽略室

内试验和现场施工不同的搅拌均匀程度问题。在两种水泥土试样的强度和渗透系数满足工程要求情况下,对于粉土试样,当膨润土掺入量大于 5% 时,渗透系数趋于平缓的直线,抗压强度的增幅也变缓。对于砂土试样,渗透系数下降至平缓的拐点在 2.5%~5% 之间,此时的试样强度也满足要求。综合无侧限抗压强度和渗透试验结果,无论是粉土试样或砂土试样,掺入膨润土可以显著提高水泥土的抗压强度和降低渗透系数,但膨润土掺入量超过一定范围后,改善水泥土试样性能的效果不显著,即膨润土掺入量存在边际效应。对于粉土试样,膨润土的掺入量应取 5%,砂土试样在 2.5%~5% 之间。

孔隙比是影响渗透系数的主要因素。未掺入膨润土时,水泥水化反应的絮凝作用使原状土颗粒粒径变大,形成团粒,增加了水泥土试样的孔隙,同时,火山灰反应的胶结产物充斥在土颗粒或团粒间,使水泥土试样孔隙变小。此时,水泥土试样的孔隙是水泥水化反应和火山灰反应综合的结果^[5]。掺入膨润土后,膨润土水化后均能填充封闭土颗粒或团粒间的小孔隙,降低水泥土试样的渗透系数。对于两种试样,因填充作用带来的孔隙比变化幅度较为相近,也导致两种水泥土试样渗透系数降幅也较为相近。

2.3 膨润土对水泥土微观孔隙结构的影响

选取试验方案中 C20B0 与 C20B10 固化粉土试样的压汞试验结果,其累计进汞曲线如图 4 所示。从图 4 可知,在粉土试样中掺入膨润土后,试样的最终进汞量从 0.367 mL/g 下降至 0.344 mL/g。土中曲线呈现向“左”移动趋势且趋于平滑,反映出微观孔隙更加均匀、部分孔隙被填充的效果,与孔隙比和渗透系数等宏观物理特性降低相一致。

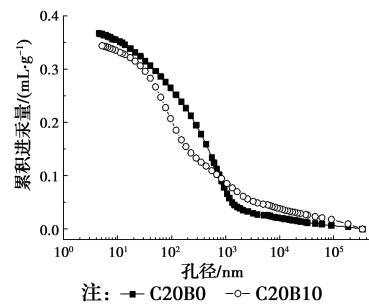
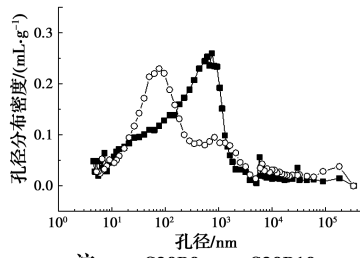


图 4 试样累积进汞量

Fig. 4 Mercury intrusion versus pore size curve

图 5 所示为 C20B0 与 C20B10 的固化粉土试样孔隙分布密度曲线图。由图中两条曲线对比可知,

孔径分布密度曲线形态由单峰向多峰形态转变,曲线趋于平缓;并且孔径峰值位置左移,峰值处的孔径大小由 725 nm 降低至 77.2 nm,峰值由 0.26 mL/g 降低至 0.23 mL/g。这反映出掺入膨润土后,改变了水泥土试样的颗粒级配,导致小孔径增多,试样更加密实。膨润土具有很好的分散性,有利于填充孔隙,从而降低孔隙比。



注: ■ C20B0 ○ C20B10
图 5 孔径分布密度

Fig. 5 Log differential intrusion versus pore size curve

3 结果分析与讨论

3.1 膨润土对水泥土孔隙比的影响

试样在养护至相应龄期后的孔隙比按式(1)计算。

$$e = \frac{(1 + \omega_t)G_s \gamma_w}{\gamma_t} - 1 \quad (1)$$

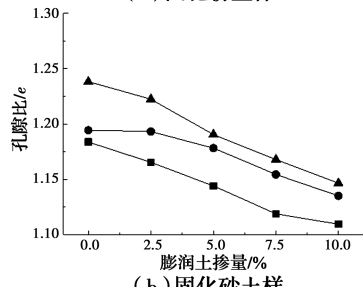
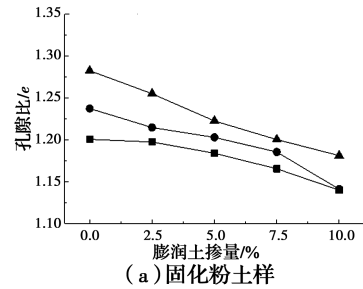
式中: G_s 为水泥土颗粒的比重,按文献[15]中对水泥土各组分按质量比例加权平均的方法近似估计水泥土试样的比重; ω_t 为试样养护后的含水率,在无侧限抗压强度试验完成后测得; γ_t 为试样容重, γ_w 为水的容重,取 1 g/cm^3 。

图 6 所示为 28 d 龄期时两种水泥土试样孔隙比的变化规律。由图 6 可见,在相同水泥掺入量情况下,固化粉土样和固化砂土样的孔隙比均随着膨润土掺入量的增加而降低。

3.2 无侧限抗压强度与孔隙比的关系

孔隙比的降低与无侧限抗压强度的增长有很强的相关性。早期研究提出水灰比对固化土的强度特性起到控制作用。文献[6]提出 e/C 代替水灰比表征水泥土试样的无侧限抗压强度特性。文献[16]提出 $n/(C_{iv})^{\text{exponent}}$ 参数(n 为孔隙率, C_{iv} 为水泥体积掺入比)表征水泥土的无侧限抗压强度。

采用表征参数 $e/(C)^{\text{exponent}}$ 评价无侧限抗压强度,建立不同水泥掺量的无侧限抗压强度与孔隙比的关系,对 $e/(C)^{\text{exponent}}$ 和无侧限抗压强度之间的关系进行拟合,如图 7 所示。拟合公式如式(2)、式(3)



注: ■ C=20% ● C=22% ▲ C=24%
图 6 孔隙比与膨润土掺入量的关系

Fig. 6 Relationship between void ratio and content of bentonite

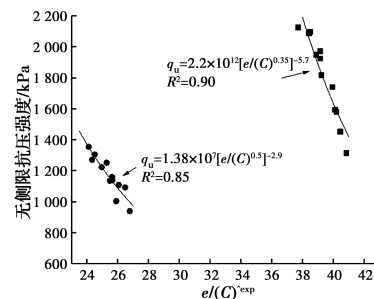
所示。

粉土样:

$$q_u = 1.38 \times 10^7 [e/(C)^{0.5}]^{-2.9}, R^2 = 0.85 \quad (2)$$

砂土样:

$$q_u = 2.2 \times 10^{12} [e/(C)^{0.35}]^{-5.7}, R^2 = 0.90 \quad (3)$$



注: ● 粉土样 ■ 砂土样
图 7 无侧限抗压强度与孔隙比/水泥掺量指数比值关系

Fig. 7 Relationship between UCS and void ratio/cement content index ratio

孔隙比/水泥掺量的比值与无侧限抗压强度有很好的对应关系。这一经验公式表明:掺入膨润土后水泥土试样的无侧限抗压强度与孔隙比、水泥掺入量有关。

建立水泥土试样掺入膨润土后的孔隙变化公式如式(4)。

$$e = e_0 - B \times a \quad (4)$$

式中: e_0 为不掺膨润土时水泥土试样的初始孔隙比; B 为膨润土掺入量; a 为单位质量的体积变化系数。建立孔隙比差值 $e_0 - e_1$ 与 $B \times a$ 的关系求解 a ,如图

8 所示。

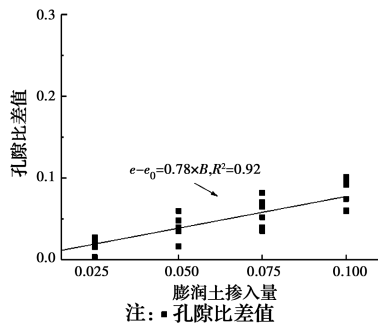


图 8 膨润土掺入量与孔隙比变化量的关系

Fig. 8 Relationship between the amount of bentonite incorporation and the change of void ratio

由图 8 可知,单位质量膨润土的体积变化系数 $a=0.78$ 。单位质量膨润土的体积变化系数 $a < 1$,可见,膨润土不仅起到填充的作用,同时参与化学反应。膨润土是以蒙脱石为主的含水硅铝酸盐,可与水泥水化产物发生反应,生成凝胶产物充斥在水泥-原状土骨架中,同时,蒙脱石层带负电荷,相互排斥使得薄层之间的距离增大,引起膨胀,填充在水泥土孔隙,使得固结体更加密实。微观试验结果证实膨润土可改善水泥土试样的孔隙分布。因此得出膨润土对水泥土试样无侧限抗压强度和渗透系数改善贡献主要在其分散性、膨胀性和与水泥水化产物发生的化学反应。

3.3 渗透系数与孔隙比的关系

选取 28 d 龄期固化试样的孔隙比和渗透系数,并建立 $e-\ln(k)$ 关系如图 9 所示。水泥土试样的 e 与 $\ln(k)$ 有较好的线性关系。掺入膨润土减少孔隙比,可进一步降低渗透系数。

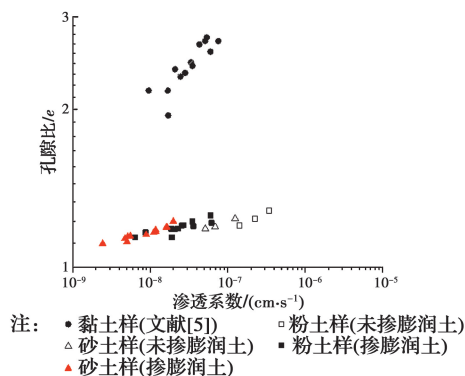


图 9 渗透系数与孔隙比的关系

Fig. 9 Relationship between permeability coefficient and void ratio

4 结论

通过室内试验分别研究了掺入膨润土对固化粉土和砂土水泥土试样强度,渗透系数的影响,通过压汞试验分析了水泥土试样内部孔隙变化,并量化掺入膨润土后试样孔隙变化过程,得出以下主要结论:

1) 掺入膨润土的分散性、膨胀性和化学反应可显著提高水泥土的无侧限抗压强度和降低水泥土的渗透系数。水泥固化砂土试样的无侧限抗压强度增幅较水泥固化粉土试样更大。在粉土样中,28 d 强度平均提高 51%,而在砂土样中 28 d 强度可平均提高 87%;渗透系数均最低可达到 10^{-9} cm/s 数量级。

2) 膨润土能够降低水泥土孔隙比,减小孔隙(尤其是大孔隙)数量,改善孔隙分布密度,既有物理填充作用,也有化学反应作用。经计算,单位质量的膨润土体积变化系数为 0.78。

3) 可使用孔隙比与水泥掺入量的比值评价水泥土试样的无侧限抗压强度。研究结果可作为现场掺入膨润土的配合比试验工作参考,指导现场设计施工。

4) 适当掺量的膨润土可提高强度和改善防渗性能,超过适量范围的膨润土掺入量改善水泥土试样性能的效应减弱。综合考虑强度和抗渗性能,对于粉土试样,膨润土的掺入量应取 5%,对于砂土试样应在 2.5%~5% 之间。

参考文献:

- [1] 杜延军, 范日东. 改性土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32 (Sup1): 49-54.
- [2] DU Y J, FAN R D. Compressibility and permeability behavior of two types of amended soil-bentonite vertical cutoff wall backfills [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 49-54. (in Chinese)
- [3] JOSHI K, KECHAVARZI C, SUTHERLAND K, et al. Laboratory and in situ tests for long-term hydraulic conductivity of a cement-bentonite cutoff wall [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4): 562-572.
- [4] 唐昊陵. 双轮铣水泥土搅拌墙工程特性研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [5] TANG H L. Study and engineering application of soil mixing cutter(SMC) deep mixing wall [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

- [4] LEE Y. A framework for the design of jet grout piles in Singapore marine clay [D]. Singapore: National University of Singapore, 1999.
- [5] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 (7): 696-706.
- [6] LORENZO G A, BERGADO D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay: New approach [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(10): 1042-1050.
- [7] AGUS S S, SCHANZ T. A method for predicting swelling pressure of compacted bentonites [J]. *Acta Geotechnica*, 2008, 3(2): 125-137.
- [8] 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): 756-763.
- QIN B, CHEN Z H, LIU Y M, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31 (5): 756-763. (in Chinese)
- [9] CARRETO J M R, CALDEIRA L M M S, DAS NEVES E J L M. Hydromechanical characterization of cement-bentonite slurries in the context of cutoff wall applications [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(2): 04015093.
- [10] FAN R D, DU Y J, REDDY K R, et al. Compressibility and hydraulic conductivity of clayey soil mixed with calcium bentonite for slurry wall backfill: Initial assessment [J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101(2): 119-127.
- [11] 徐超, 黄亮, 邢皓枫. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗墙渗透性能的影响 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 422-426.
- XU C, HUANG L, XING H F. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 422-426. (in Chinese)
- [12] OPDYKE S M, EVANS J C. Slag-cement-bentonite slurry walls [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131 (6): 673-681.
- [13] 朱伟, 林城, 李磊, 等. 以膨润土为辅助添加剂固化稳定化污泥的试验研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(5): 1020-1025.
- ZHU W, LIN C, LI L, et al. Solidification/stabilization (S/S) of sludge using calcium-bentonite as additive [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5): 1020-1025. (in Chinese)
- [14] MILLET R A, PEREZ J Y. Current USA practices: Slurry wall specifications [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, 107(8): 1041-1056.
- [15] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(Sup1): 3446-3454.
- CAO Z G, ZHANG D W. Key parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34 (Sup1): 3446-3454. (in Chinese)
- [16] CONSOLI N C, FONSECA A, SILVA S R, et al. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils [J]. *Géotechnique*, 2012, 62 (2): 177-183.

(编辑 章润红)