

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032123121983

文章编号:1674-599X(2023)06-0066-09

引用格式:罗震宇. 干湿循环作用下改良膨胀土力学特性及微观机制研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6):66-74.

Citation: LUO Zhenyu. Study on mechanical properties of modified expansive soil under the action of dry and wet cycles and its microscopic mechanism[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6):66-74.

干湿循环作用下改良膨胀土力学特性及微观机制研究

罗震宇

(长沙市公路桥梁建设有限责任公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:为探讨水泥改良膨胀土在不同干湿循环作用下的力学特性,开展不同掺量、干湿循环次数、干湿幅度作用下的水泥改良膨胀土直剪试验与扫描电镜试验,分析干湿循环次数、水泥掺量及干湿幅度对改良膨胀土的抗剪强度、黏聚力及内摩擦角的影响,并探讨干湿循环作用下改良膨胀土强度的劣化机制。研究表明:改良膨胀土的抗剪强度衰变率随干湿循环次数的增加呈前期急剧增长,后期逐渐变缓的趋势;相较于原状膨胀土,改良膨胀土的抗剪强度与水泥含量呈正相关关系,在100 kPa法向应力下,水泥掺量为8%的改良膨胀土在0次干湿循环下的抗剪强度比原状膨胀土的增长了约72.5%;干湿循环幅度越大,抗剪强度衰变越快;水泥掺量为8%的改良膨胀土在100 kPa法向应力下,4%→50%干湿幅度的比4%→30%干湿幅度的抗剪强度小16.2 kPa;水泥主要是通过胶结作用增大黏聚力,增强膨胀土的强度,而干湿循环作用导致膨胀土颗粒间的微观孔隙增大,水化产物部分脱落,进而使其强度减小。

关键词:道路工程;改良膨胀土;干湿循环作用;强度衰变率;微观机制

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Study on mechanical properties of modified expansive soil under the action of dry and wet cycles and its microscopic mechanism

LUO Zhenyu

(Changsha Highway and Bridge Construction Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of cement improved expansive soil under the action of different dry and wet cycles, direct shear and scanning electron microscopy tests of cement improved expansive soil under the action of different dosing, number of dry and wet cycles and amplitude of dry and wet cycles were conducted. The variation patterns of the number of wet and dry cycles, cement dosing, and the amplitude of wet and dry cycles on the shear strength, cohesion, and internal friction angle of the modified expansive soil were analyzed, and the mechanism of strength deterioration of modified expansive soils by the action of dry and wet cycles was also explored. The research results indicate that, the shear strength decay rate of the modified expansive soil tends to increase sharply in the early stage and slow down in the later stage with the increase of the number of wet and dry cycles. The shear strength of the modified expansive soil is positively correlated with the cement content compared to the unmodified expansive soil, and the shear strength of the modified expansive soil with 8% cement admixture at 100 kPa for 0 wet and dry cycles increases by

收稿日期:2022-03-21

作者简介:罗震宇(1983—),男,长沙市公路桥梁建设有限公司高级工程师。E-mail:47476599@qq.com

about 72.5% compared to the unmodified expansive soil. A higher amplitude of wet and dry cycles induces a faster decay of shear strength, resulting in smaller shear strength of 16.2 kPa for 8% cement-amended expansive soils at 4%→50% wet and dry amplitude than it at 4%→30% wet and dry amplitude at 100 kPa. Cement mainly increases the cohesion through cementation to enhance the strength of expansive soils, and as a result of the wet and dry cycle, the microscopic pores between the particles of the expanded soil are enlarged and the hydration products are partially dislodged, thus reducing its strength and consequently its shear strength.

Key words: road engineering; improved expansive soil; wet and dry cyclic; strength decay rate; microscopic mechanisms

膨胀土含有大量的高岭石、蒙脱石和伊利石等黏土矿物,在干湿循环作用下,土体内部微裂隙发育,强度急剧劣化,极易诱导膨胀土路堤出现不均匀沉降、滑塌等地质灾害^[1-4]。近年来,极端天气加剧,路堤长期处于干湿循环条件,发生路堤病害的概率增加,极大地影响了高速公路的安全运营^[5-8]。

为解决该问题,工程上通常采用改良后膨胀土进行路堤填筑。目前,常用的膨胀土改良方法主要是利用水泥、石灰等胶凝材料对膨胀土进行改良^[9-12]。KHADKA等^[13]通过石灰、石膏改性偏高岭土和粉煤灰地聚物,改善了膨胀土的力学性能,取得了较好的效果。COKCA等^[14]发现,利用高炉矿渣和水泥改良膨胀土,可以显著降低膨胀土的干缩湿胀性能。刘维正等^[15]研究了湿化作用下改良膨胀土在多级加载作用下的永久变形特性,但未对其力学强度进行深入阐述。郝建斌等^[16]利用粉煤灰-剑麻纤维复合改良膨胀土,发现掺入粉煤灰和剑麻纤维可有效抑制裂隙的发育及扩展,但未深入研究湿循环作用对其力学性能的影响。工程研究表明,即使经过了改良,膨胀土在干湿循环作用下强度仍会发生一定程度的劣化,从而影响膨胀土路堤的稳定性^[17-20]。李国维等^[21]研究了在干湿循环作用下不同粒径组崩解性砂软岩改良膨胀土的抗剪强度,但崩解性砂软岩改良膨胀土的改良机制

与水泥等胶凝材料的改良膨胀土的机制存在明显区别。邓云叶等^[22]研究了干湿循环作用下石灰粉煤灰改良膨胀土的抗剪强度,并建立了改良膨胀土的双屈服面本构关系,为工程实践提供了良好借鉴,但未探讨干湿循环幅度对改良膨胀土的影响。已有研究表明,干湿循环幅度对膨胀土的强度指标影响显著^[23]。因此,研究改良膨胀土在不同干湿循环次数、干湿循环幅度下力学性能的变化规律很有必要。

本研究通过水泥改良膨胀土的直剪试验,探讨干湿循环次数、水泥掺量及干湿循环幅度对改良膨胀土强度的衰减作用及其抗剪强度参数的变化规律,以期改良膨胀土路堤的沉降及防治提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用膨胀土均取自广西壮族自治区百色市环城高速,该膨胀土呈褐黄色。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)的要求进行筛分试验,发现其细颗粒(≤ 0.075 mm)的含量可达43.8%,自由膨胀率为67.5%,属于中等膨胀土。其基本物质性质见表1。

表1 膨胀土的基本特性

Table 1 Basic characteristics of expansive soil

液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	土的相对 密度	最优 含水率/%	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	自由 膨胀率/%	线收缩量/ %	颗粒质量分数/%		
								>0.075 mm	0.005 ~ 0.075 mm	≤ 0.075 mm
56.5	35.0	21.5	2.71	26.2	1.48	67.5	1.94	5.6	51.6	43.8

利用水泥改良膨胀土可以显著增强其力学性能,并降低其湿胀干缩特性。水泥改良膨胀土的

最佳掺量通常为2%~7%。因此,在本次试验中,选取的水泥掺量分别为0%、2%、4%、6%、8%。采

用P·O 42.5的普通硅酸盐水泥,其基本性质见表2。

表2 P·O 42.5普通硅酸盐水泥成分

Table 2 Composition of P·O 42.5 ordinary silicate cement %

w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(Na ₂ O)	其他
52.0	40.0	1.0	2.5	0.8	0.5	3.2

1.2 试验方案

为了研究水泥改良膨胀土在干湿循环作用下的力学性能及其微观机理,开展了不同的循环次数、脱湿程度、掺量下水泥改良膨胀土的直剪试验。具体方案见表3。

表3 试验方案

Table 3 Test scheme

水泥掺量/%	干湿循环次数	干湿幅度/%	法向应力/kPa
0、2、4、6、8	0、2、4、6、8	4→30、4→50	100、200、300、400

注:4%→30%为干燥时试样含水率为4%,加湿至含水率为30%的一个干湿循环幅度;4%→50%是指干燥时试样含水率为4%,加湿至含水率为50%的一个干湿循环幅度。

1.3 试验方法

具体试验步骤如下:

1) 试样制备。

按表3中方案,将水泥掺量与膨胀土混合,并配置成最佳含水率(26.2%)的混合物,焖料24 h后,采用静压法分层制备压实度为95%的环刀试样,并将其放置于恒温恒湿箱中标准养护7 d。

2) 加湿。

标准养护7 d后,称取试样质量后,采用滤纸包裹后,喷水加湿至相应的湿度,然后用保鲜膜包裹,并置于恒温恒湿箱中静置24 h,使试样内部含水率达到平衡。

3) 脱湿。

加湿完成后,将其置于40℃烘箱中进行脱水干燥,每隔10 min称取试样质量,直至试样含水率达到30%或50%。

4) 干湿循环。

一次干湿循环是指试样完成一次加湿和一次脱湿,重复步骤2)~3),直至试样的干湿循环次数达到设计次数。

5) 开始直剪试验。

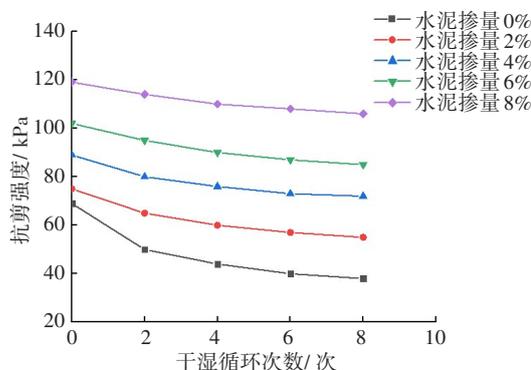
试样进行相应的干湿循环次数后,按照《公路

土工试验规程》(JTG 3430—2020)要求进行直剪试验。试验中,法向应力分别为100、200、300、400 kPa,速率为0.08 mm/min。

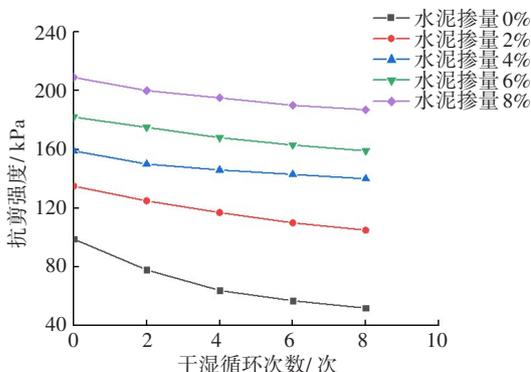
2 结果与分析

将水泥掺量分别为0%、2%、4%、6%、8%的改良膨胀土经过8次干湿循环后,对其进行了不同法向应力条件下的直剪试验。试验结果如图1~2所示。

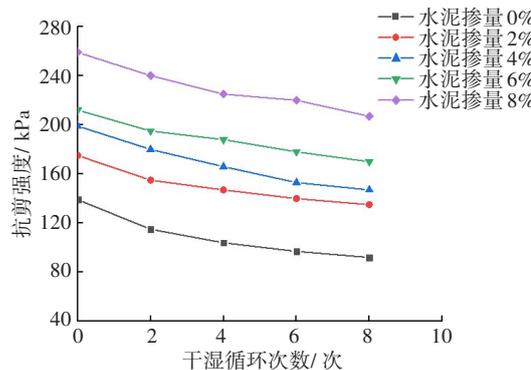
从图1~2可以看出,随着法向应力的增加,其抗剪强度也相应增强,但增长幅度逐渐减小。



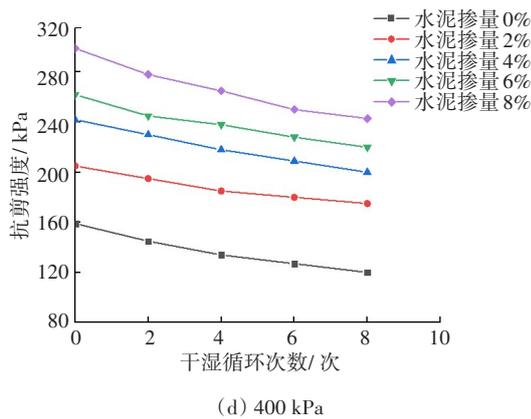
(a) 100 kPa



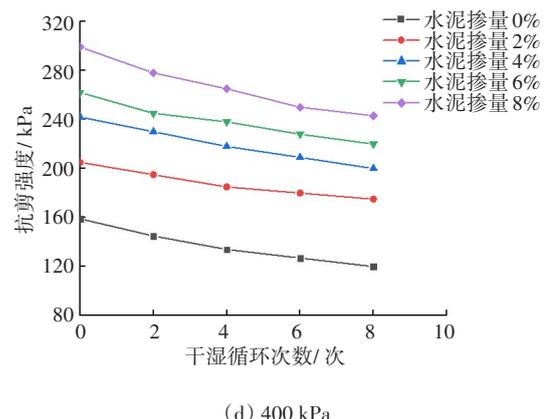
(b) 200 kPa



(c) 300 kPa



(d) 400 kPa



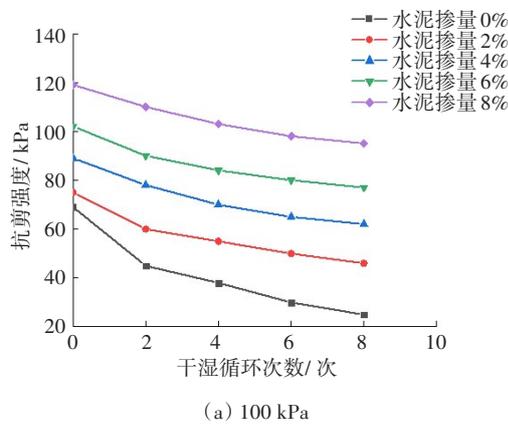
(d) 400 kPa

图1 4%→30%干湿幅度下改良膨胀土抗剪强度

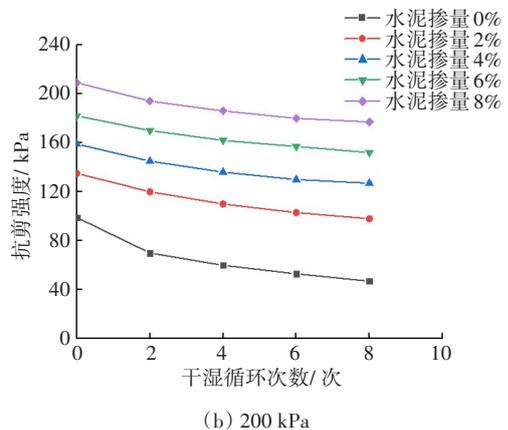
Fig. 1 The shear strength of modified expansive soil under 4%→30% wet and dry amplitude

图2 4%→50%干湿幅度下改良膨胀土抗剪强度

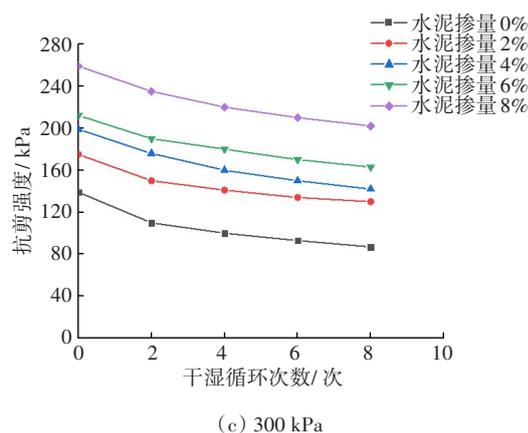
Fig. 2 The shear strength of modified expansive soil under 4%→50% wet and dry amplitude



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



(c) 300 kPa

2.1 干湿循环作用下改良膨胀土强度衰减分析

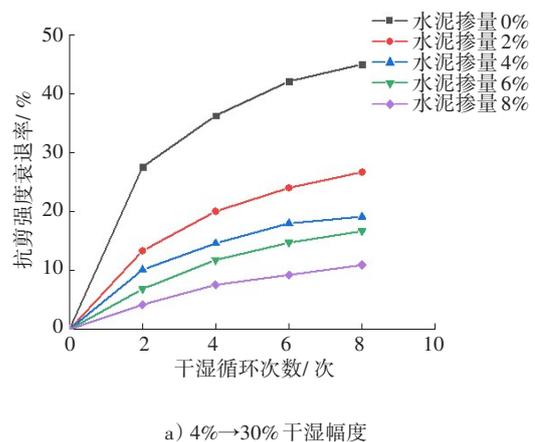
在干湿循环作用下,膨胀土的抗剪强度会随着干湿循环次数的增加而呈现不同程度的衰减。因此,干湿循环作用后,水泥改良膨胀土的抗剪强度是评价其改良效果的重要指标。

从图1~2可以看出:

1) 原状膨胀土在干湿循环作用下抗剪强度急剧下降,特别是在前期下降较快。以100 kPa法向应力作用下的抗剪强度为例,干湿循环8次后,抗剪强度下降了44.9%。

2) 在同一法向应力条件下,改良膨胀土的抗剪强度在干湿循环作用下抗剪强度衰退率远小于原状膨胀土的。以4%→30%干湿幅度,100 kPa法向应力作用下的抗剪强度为例,干湿循环8次后,水泥掺量为8%的改良膨胀土的抗剪强度下降了10.9%,这种下降幅度远小于原状膨胀土的。

在100 kPa法向应力作用下,改良膨胀土与原状膨胀土抗剪强度衰退率变化曲线如图3所示。



a) 4%→30% 干湿幅度

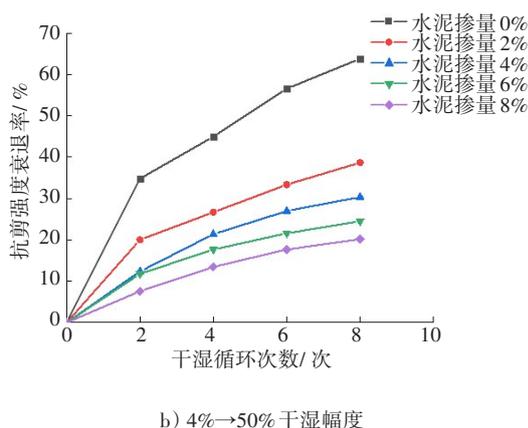


图3 改良膨胀土抗剪强度衰退率(100 kPa)

Fig. 3 The shear strength recession rate of modified expansive soil (100 kPa)

从图3中可以看出,在100 kPa法向应力作用下,改良膨胀土与原状膨胀土衰变率变化曲线均呈前期急剧增长,后期变缓的趋势。

2.2 水泥掺量对改良膨胀土强度衰减影响

从图1~2中还可以看出,改良膨胀土的抗剪强度大于原状膨胀土的抗剪强度,且水泥掺量越大,抗剪强度越大。以4%→30%干湿幅度,在100 kPa法向应力下改良膨胀土0次干湿循环的抗剪强度为例,当水泥掺量为2%时,其抗剪强度为75 kPa,相较于原状膨胀土的抗剪强度69 kPa,仅增长了6 kPa。但随着水泥掺量的增加,其强度的增长幅度变大。当水泥掺量为8%时,其抗剪强度为119 kPa,比原状膨胀土增长了50 kPa,增长率约为72.5%。

从图3中可以看出,随着水泥掺量的增加,改良膨胀土抵抗干湿循环作用的能力增大,抗剪强度衰退率逐渐减小。以4%→30%干湿幅度,在100 kPa法向应力下的改良膨胀土为例,经过8次干湿循环后,水泥掺量为2%、4%、6%、8%的改良膨胀土的抗剪强度衰退率分别为26.7%、19.1%、16.7%、10.9%。这是因为水泥水化后形成了具有胶凝作用的水化产物——水化硅酸钙,极大地增强了膨胀土颗粒间的黏聚力,所以改良膨胀土受干湿循环的影响较小。

2.3 干湿幅度对改良膨胀土强度衰减的影响

干湿循环对膨胀土抗剪强度的影响,实质是水分对膨胀土中黏土矿物的作用。因此,研究不同干湿循环幅度下改良膨胀土抗剪强度的演变规律具有重要作用。

在100 kPa法向应力、不同干湿幅度和不同水

泥掺量下,改良膨胀土抗剪强度衰退率的变化规律,如图4所示。

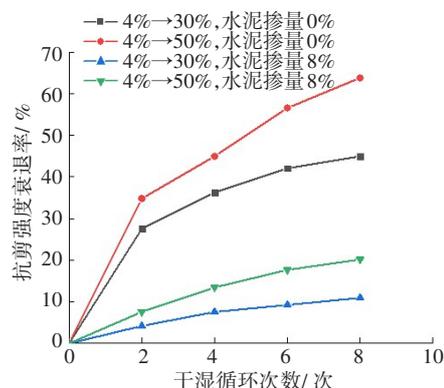


图4 不同干湿幅度下改良膨胀土抗剪强度衰退率(100 kPa)

Fig. 4 The shear strength recession rate (100 kPa) of modified expansive soil under different wet and dry amplitudes

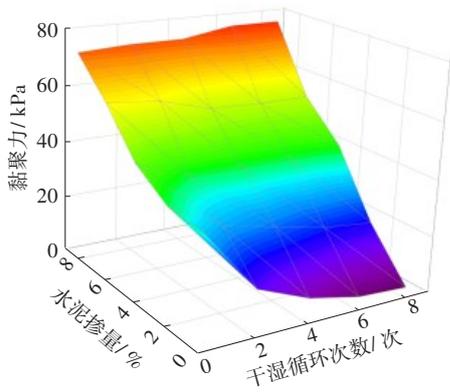
从图4可以看出,原状膨胀土在4%→30%干湿幅度下的抗剪强度衰退率小于在4%→50%干湿幅度下的衰退率。从图1~2还可以看出,改良前、后的膨胀土在4%→30%干湿幅度下的抗剪强度均大于在4%→50%干湿幅度下的抗剪强度。这是因为干湿幅度的延长更易导致膨胀土内部黏土矿物溶蚀,进而导致其抗剪强度的减小。

2.4 抗剪强度参数分析

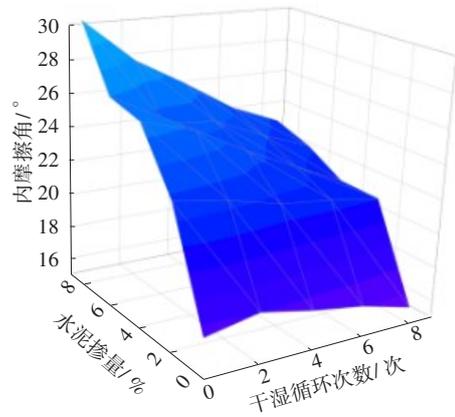
不同干湿幅度下改良膨胀土黏聚力的变化曲线如图5所示。从图5(a)可以看出,4%→30%干湿幅度下原状膨胀土黏聚力随干湿循环次数的增长迅速减小;干湿循环8次后,其黏聚力仅剩初始黏聚力的10.3%,此时膨胀土已经接近破坏。然而,随着水泥含量的增加,其黏聚力迅速提高。与原状膨胀土相比,0次干湿循环后水泥掺量为4%的改良膨胀土的黏聚力可达47.5 kPa;8次干湿循环后,改良膨胀土的黏聚力仍可达88.4%。对于0次干湿循环后水泥掺量为8%的改良膨胀土,其黏聚力可达74.0 kPa,并且经过8次干湿循环后基本保持不变。这表明随着水泥掺量的增加,干湿循环对改良膨胀土黏聚力的影响逐渐减小。这主要是因为水泥水化产物的胶结作用。4%→50%干湿幅度下,改良膨胀土黏聚力随干湿循环次数的变化规律与4%→30%干湿幅度下的变化规律相似,如图5(b)所示,但其黏聚力的下降幅度大于4%→30%干湿幅度的下降幅度。4%→50%干湿幅度下,水泥掺量为8%的改良

膨胀土的黏聚力为62.0 kPa,下降幅度约为16.2%。

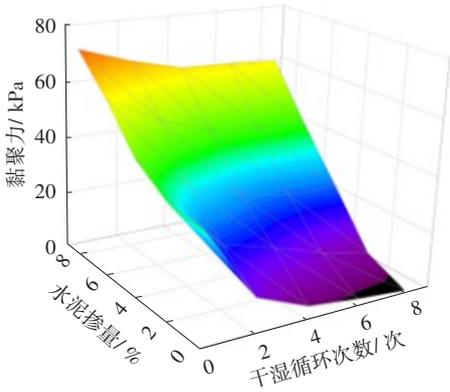
黏聚力来改良膨胀土的抗剪强度,而干湿循环作用则主要对黏聚力产生影响,从而减小其抗剪强度。



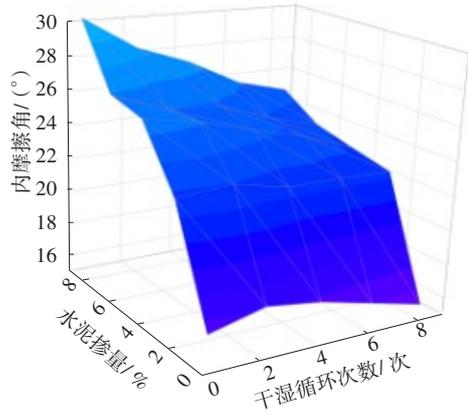
a) 4%→30% 干湿幅度



a) 4%→30% 干湿幅度



b) 4%→50% 干湿幅度



b) 4%→50% 干湿幅度

图5 不同干湿幅度下改良膨胀土黏聚力变化

图6 不同干湿幅度下改良膨胀土内摩擦角变化

Fig. 5 The variation in cohesion of modified expansive soil under different dry and wet amplitude

Fig. 6 The variation in internal friction angle of modified expansive soil under different dry and wet amplitudes

不同干湿幅度下改良膨胀土内摩擦角变化规律如图6所示。从图6可以看出:

1) 无论是4%→30%,还是4%→50%的干湿幅度下,改良膨胀土的内摩擦角都呈现出随着水泥掺量的增加而增大,随着干湿循环次数的增加而减小的趋势。

2) 在4%→30%干湿幅度下,改良膨胀土的内摩擦角变化趋势较为平缓;而在4%→50%的干湿幅度下,改良膨胀土的内摩擦角的变化较大。由此可见,在工程实践中,减小干湿循环过程中的干湿幅度,可在一定程度上保持膨胀土边坡稳定性。

3) 与黏聚力相比,改良膨胀土的内摩擦角随水泥含量增加而增大的幅度较小,随干湿循环次数的增加而减小的幅度也较小。这表明水泥主要通过增强

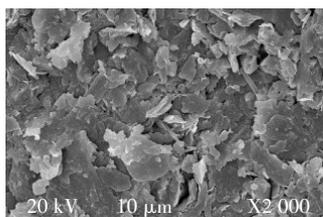
2.5 强度劣化机制分析

原状膨胀土与水泥掺量为8%的改良膨胀土(8%水泥改良膨胀土)未进行干湿循环前的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像如图7所示。8%水泥改良膨胀土在不同干湿幅度下经历8次干湿循环的SEM图像如图8所示。

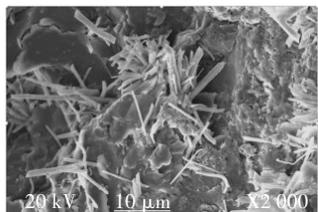
从图7中可以看出,原状膨胀土主要由片状结构组成,以片片、面面的形式堆叠,结构较为松散,并存在许多孔隙。相比之下,掺入为8%水泥改良后的膨胀土,在微观结构上出现了明显的针状晶体(钙矾石),这些晶体将各颗粒紧密地胶结。这是因为水泥遇水后产生具有胶结作用的水化产物—水化硅酸钙。这种物质可以有效地填充膨胀土颗粒间的微观孔隙,并使它们结成一个整体,增

大其黏聚力。

从图8(a)可以看出,在干湿幅度4%→30%条件下,经过8次干湿循环后,改良膨胀土的颗粒间仍存在明显的针状结构。但与图7(b)相比,这些针状结构明显减小,同时孔隙有所增大。这是因为在干湿循环作用下,改良膨胀土强度出现劣化。孔隙率的增加导致改良膨胀土颗粒间的胶结作用减弱,黏聚力减小,抗剪强度减小。



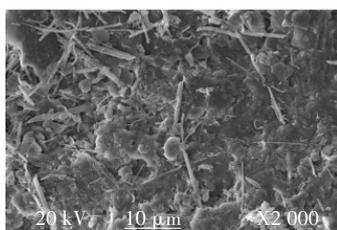
(a) 原状膨胀土



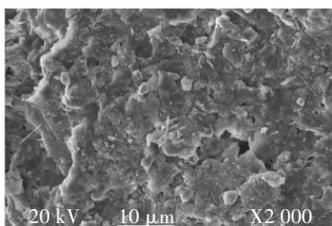
(b) 8%水泥改良膨胀土

图7 0次干湿循环作用时改良前后膨胀土SEM图

Fig. 7 The SEM image of swelling soil before and after improvement at 0 dry and wet cycles



(a) 干湿幅度4%→30%



(b) 干湿幅度4%→50%

图8 8次干湿循环作用后8%水泥改良膨胀土SEM图

Fig. 8 The SEM image of 8% cement-amended expansive soil after 8 dry and wet cycles

从图8(b)可以看出,在干湿幅度4%→50%的

条件下,经过8次干湿循环后,针状结构明显减少,并且出现了明显的孔洞。与干湿幅度为4%→30%下相比,结构更加松散,孔隙率增大。这与改良膨胀土在干湿幅度4%→50%条件下干湿循环后的强度小于干湿幅度4%→30%条件下干湿循环后的强度的结果相符。

综上所述,水泥主要通过填充膨胀土颗粒间的微观孔隙,并生成水化产物胶结膨胀土颗粒,增强其黏聚力;而在干湿循环作用下,膨胀土颗粒间的微观孔隙增大,部分水化产物脱落,使其强度减小。

3 结论

本研究利用水泥改良膨胀土,探讨水泥掺量、干湿循环次数及干湿循环幅度对改良膨胀土的抗剪强度等参数的影响。通过直剪试验和SEM,得到以下结论:

1) 膨胀土的抗剪强度随干湿循环次数的增加而逐渐降低,改良膨胀土与原状膨胀土的衰变率均在前期急剧增长,后期趋于变缓。干湿循环8次后,原状膨胀土衰变率为44.9%,而8%水泥掺量的改良膨胀土的衰变率则仅为10.9%。

2) 经过水泥改良后的膨胀土的抗剪强度大于原状膨胀土的抗剪强度,且水泥掺量越高,抗剪强度越大。在100 kPa的法向应力下,水泥掺量为8%的改良膨胀土0次干湿循环后的抗剪强度为119 kPa,比原状膨胀土的提高50 kPa,其增长率约72.5%。

3) 改良前、后的膨胀土在4%→30%干湿幅度下的抗剪强度均大于其在4%→50%干湿幅度下的抗剪强度。

4) 水泥主要是通过增强黏聚力来改良膨胀土的抗剪强度,而干湿循环作用主要影响黏聚力,从而降低其抗剪强度。

参考文献(References):

- [1] 陶坚,王桂尧,常婧美,等. 香根草根系对膨胀土渗透性影响试验研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 10-16. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.002.
TAO Jian, WANG Guiyao, CHANG Jingmei, et al. Experimental study on the effect of vetiver root system on the permeability of expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 10-

16. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.002.
- [2] 王亮亮,王照腾,方薇,等.气候边缘地带膨胀土强度特性随冻融循环劣化规律[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):288-295. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.023.
WANG Liangliang, WANG Zhaoteng, FANG Wei, et al. Deterioration law of strength properties of expansive soils in climatic marginal zone with freeze-thaw cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53 (1) : 288-295. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.023.
- [3] 王东星,张子伟,王协群,等.干湿-冻融循环作用下水泥改性膨胀土的路用性能与微观机制[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):306-316. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.025.
WANG Dongxing, ZHANG Ziwei, WANG Xiequn, et al. Performance and micromechanism of cement-modified expansive soils under the influence of freeze-thaw and dry-wet cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1):306-316. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.025.
- [4] 张坤勇,徐娜,陈恕,等.膨胀土完全软化强度指标试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(11):1988-1995. DOI: 10.11779/CJGE202011003.
ZHANG Kunyong, XU Na, CHEN Shu, et al. Experimental study on fully softened shear strength of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (11) : 1988-1995. DOI: 10.11779/CJGE202011003.
- [5] 常锦,杨和平,肖杰,等.酸性环境干湿循环条件下膨胀土的膨胀特性及微观作用分析[J].中国公路学报,2019,32(3):34-43. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.03.004.
CHANG Jin, YANG Heping, XIAO Jie, et al. Swelling characteristics and microscopical analysis of expansive soil under dry-wet cycles in acid environment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 34-43. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.03.004.
- [6] 潘高峰,刘先峰,袁胜洋,等.超固结膨胀土地基桩网结构路基承载特性现场试验研究[J].铁道学报,2022,44(10):131-141. DOI: 10.3969/i.issn.1001-8360.2022.10.017.
PAN Gaofeng, LIU Xianfeng, YUAN Shengyang, et al. Field test study on bearing characteristics of geogrid-roadbed and pile-supported embankment in over-consolidated expansive soil [J]. Journal of The China Railway Society, 2022, 44(10): 131-141. DOI: 10.3969/i.issn.1001-8360.2022.10.017.
- [7] 李燕,王斯海,朱锐.复杂边界条件下膨胀土的体变特性与抗压强度研究[J].水利水运工程学报,2022,(4):106-113. DOI:10.12170/20210627001.
LI Yan, WANG Sihai, ZHU Rui. Study on volume changes and strength characteristics of expansive soil under complex boundary mconditions [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022 (4) : 106-113. DOI: 10.12170/20210627001.
- [8] 范峥,李金明,何李.降雨条件下膨胀变形对膨胀土边坡暂态饱和区的影响研究[J].公路与汽运,2021(6):69-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.06.017.
FAN Zheng, LI Jinming, HE Li. Study on influence of expansion deformation on transient saturation zone of expansive soil slope under rainfall condition [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(6) : 69-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.06.017.
- [9] DANG L C, KHABBAZ H, NI B J. Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100637. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100637.
- [10] WU Y K, QIAO X L, YU X B, et al. Study on properties of expansive soil improved by steel slag powder and cement under freeze-thaw cycles [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25 (2) : 417-428. DOI: 10.1007/s12205-020-0341-6.
- [11] KHAZAEI J, MOAYEDI H. Soft expansive soil improvement by eco-friendly waste and quick lime [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44 (10): 8337-8346. DOI: 10.1007/ s13369-017-2590-3.
- [12] 程天成,张承帅,占雪芳.水泥改良膨胀土次固结特征的试验研究[J].公路工程,2021,46(3):208-213,262. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.03.031.
CHENG Tiancheng, ZHANG Chengshuai, ZHAN Xuefang. Experimental research on secondary consolidation performance of cement-treated expansive soil [J]. Highway Engineering, 2021, 46(3) : 208-213, 262. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.03.031.

- [13] KHADKA S D, JAYAWICKRAMA P W, SENADHEERA S, et al. Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum [J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 23: 100327. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100327.
- [14] COKCA E, YAZICI V, OZAYDIN V. Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(4): 489-499. DOI: 10.1007/s10706-008-9250-z.
- [15] 刘维正, 徐阳, 石志国, 等. 湿化作用下改良膨胀土永久变形特性多级加载试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 296-305. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.024.
- LIU Weizheng, XU Yang, SHI Zhiguo, et al. Characterization of permanent deformation of modified expansive soil under wetting effect using multi-stage dynamic triaxial test [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 296-305. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.024.
- [16] 郝建斌, 张焕, 李耕春, 等. 粉煤灰-剑麻纤维复合改良膨胀土强度及裂隙发育特性[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(9): 2620-2628. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20211117.
- HAO Jianbin, ZHANG Huan, LI Gengchun, et al. Strength and cracking characteristics of expansive soil improved by fly ash and sisal fiber [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(9): 2620-2628. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20211117.
- [17] 汪时机, 杨振北, 李贤, 等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 113-122. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.05.013.
- WANG Shiji, YANG Zhenbei, LI Xian, et al. Experimental study on crack evolution and strength attenuation of expansive soil under wetting-drying cycles [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(5): 113-122. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.05.013.
- [18] LI M M, FANG C L, KAWASAKI S, et al. Fly ash incorporated with biocement to improve strength of expansive soil [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2565. DOI: 10.1038/s41598-018-20921-0.
- [19] HUANG Z, WEI B, ZHANG L, et al. Surface crack development rules and shear strength of compacted expansive soil due to dry - wet cycles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37, 2647-2657. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00784-y>.
- [20] ZHAO G T, HAN Z, ZOU W L, et al. Evolution of mechanical behaviours of an expansive soil during drying-wetting, freeze - thaw, and drying-wetting-freeze-thaw cycles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10), 8109-8121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02417-w>.
- [21] 李国维, 王佳奕, 陈伟, 等. 干湿循环对不同粒径组崩解性砂软岩改良膨胀土的影响[J/OL]. *岩土工程学报*, 2021: 1-9. (2021-11-01). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211029.1709.004.html>.
- LI Guowei, WANG Jiayi, CHEN Wei, et al. Influence of wetting-drying cycles on expansive soil improved with disintegrated sandstone of different particle size groups[J/OL]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021: 1-9. (2021-11-01). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20211029.1709.004.html>.
- [22] 邓云叶, 文畅平. 干湿循环下石灰粉煤灰改良膨胀土的双屈服面本构关系[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(2): 75-83. DOI: 10.15961/j.jsuese.202000141.
- DENG Yunye, WEN Changping. Constitutive relation with double yield surfaces of expansive soil improved by lime and flyash subjected to wetting-drying cycles [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(2): 75-83. DOI: 10.15961/j.jsuese.202000141.
- [23] HUANG Z, WEI B X, CHEN Y M, et al. Experimental study on the ultrasonic nonlinear damage characteristics of expansive soil during constant amplitude dry-wet cycles [J]. *Scientia Iranica*, 2021. DOI: 10.24200/sci.2021.55447.4225

(责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)