

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.012

# 硫酸钠环境下气泡混合轻质土的抗干湿性能研究\*

杜杰<sup>1</sup>, 黎冰<sup>1</sup>, 王勇<sup>2</sup>, 马文昊<sup>1</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096; 2. 上海勘察设计院(集团)有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 制备了不同密度的气泡混合轻质土试样, 研究了硫酸钠环境下气泡混合轻质土的抗干湿循环性能, 重点分析了气泡混合轻质土的体积、密度和强度随浸泡时间和干湿循环次数的变化规律。试验结果表明, 气泡混合轻质土在硫酸钠溶液和干湿循环共同作用下, 硫酸钠晶体的析出和溶解以及钙矾石等物质所致的试样膨胀与表层剥落, 均会对试样的体积产生显著的影响, 较高的初始强度和孔隙率对于试样体积稳定性是有利的; 试样在膨胀、剥落前的密度随干湿循环次数变化曲线相互平行乃至重合, 试样在膨胀、剥落后的密度变化曲线相互交错; 硫酸钠侵蚀试样生成钙矾石等物质, 致使试样在干湿循环作用下更易产生裂缝, 选用较高初始强度和较低水泥用量的试样可有效控制这一影响。

**关键词:** 气泡混合轻质土; 硫酸钠; 干湿循环; 体积; 密度; 强度

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0581-08

## Study on Resistance to Dry-wet Cycles of Air-foam Treated Light Soil under Sodium Sulfate Environment

DU Jie<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, MA Wenhao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. SGIDI Engineering Consulting(Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Air-foam treated light soil samples of different densities are prepared to study the resistance to dry-wet cycles under sodium sulfate environment. The influence of sodium sulfate solution and the dry-wet cycles on the volume, density and strength of the samples is studied. The experimental results show that, under the effect of sodium sulfate solution soaking and dry-wet cycles, the precipitation and dissolution of sodium sulfate crystals and the expansion and surface peeling of samples caused by calcium alum and other substances have a significant impact on the volume of samples. High initial strength and high porosity are beneficial to volume stability. The density variation curves of samples before expansion and exfoliation are parallel to and even coincide with each other. Calcite and other substances are produced when the samples are eroded by sodium sulfate, making the samples more prone to cracking under the effect of dry-wet cycles. The influence can be effectively controlled by selecting samples with high initial strength and low cement content.

**Keywords:** air-foam treated lightweight soil; sodium sulfate; dry-wet cycles; volume; density; strength

\* 收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578145)资助

作者简介: 杜杰(1994-), 男, 硕士研究生。主要从事土工材料方面的研究。Email: 1252849901@qq.com

## 引言

气泡混合轻质土是在上世纪末发展的一种新型填筑材料,由原料土(细砂或者黏土等)、固化剂、水和由发泡剂制备出的气泡经充分混合搅拌后养护而成<sup>[1]</sup>,具有密度小且可调节、流动性大、方便施工和强度可调节等优点<sup>[2]</sup>。目前,气泡混合轻质土已广泛运用于公路拓宽、隧道覆土减荷以及桥台台背回填等工程<sup>[3]</sup>。由于天气变化,气泡混合轻质土可能经历干湿交替变化,因而其抗干湿循环性能是研究的关注点之一。当气泡混合轻质土应用于海岸工程或盐碱地区时<sup>[4]</sup>,会受到水质环境的影响,所以研究盐分环境中气泡混合轻质土的抗干湿循环性能很有必要。

目前,关于气泡混合轻质土的抗干湿循环和盐类侵蚀性能的研究很少,但针对混凝土和水泥土材料这方面的研究有不少,可供气泡混合轻质土的研究参考。陈记豪等<sup>[5]</sup>研究了干湿循环和硫酸钠共同作用下混凝土内钙矾石的生成过程,并用热分析的方法定量分析产物。韩鹏举等<sup>[6]</sup>利用X-射线衍射和扫描电镜研究了不同掺量的硫酸钠对水泥土强度的影响机理,认为适宜含量的硫酸钠可以提高水泥土的强度,含量过高时会导致水泥土强度降低。王建华等<sup>[7]</sup>研究了干湿循环对水泥改良粉质黏土与粉土的强度的影响,认为强度的衰减主要发生在前两个干湿循环过程,且合理的掺砂可以有效降低强度损失率。G.Ranjani等<sup>[8]</sup>研究了硫酸钠环境和硫酸镁环境中的泡沫混凝土的性能裂化现象,认为泡沫混凝土的质量和强度损失与硫酸盐的浓度和类型有关。

刘楷等<sup>[9]</sup>研究了密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的水泥轻质土和地聚合物轻质土在干湿循环环境和硫酸钠环境中的耐久性,认为水泥轻质土的抗干湿循环能力强于地聚合物轻质土,而水泥轻质土的抗硫酸钠侵蚀能力弱于地聚合物轻质土。王勇<sup>[10]</sup>研究了不同密度的气泡混合轻质土试样在普通干湿循环下的耐久性,总结了试样的体积、密度和强度等物理力学特性的变化规律。梁朋涛等<sup>[11]</sup>研究了干湿循环对不同气泡含量和原料土掺量的气泡混合轻质土的强度的影响规律,认为原料土掺量为 $35\%\sim 40\%$ ,气泡掺量为 $30\%$ 时,气泡混合轻质土的强度衰减最小。需要指出的是,文献[9]分别研究了硫酸钠和

干湿循环对气泡混合轻质土力学性能的影响,且只研究了一个密度的气泡混合轻质土,气泡含量的不同对土体耐久性有何影响尚不清楚。

为了研究硫酸钠环境中气泡混合轻质土的抗干湿循环性能,本文制备了3种不同密度的试样,开展了气泡混合轻质土试样受硫酸钠侵蚀以及经历不同次数的干湿循环后的强度、密度和体积变化特性试验研究。

## 1 试验内容及方法

### 1.1 试样制备

原料土采用细砂,颗粒比重为2.68,粒径范围为 $0.075\sim 1\text{mm}$ ,颗粒级配曲线如图1所示。固化剂为镇江北固海螺有限责任公司生产的标号为32.5的复合硅酸盐水泥。发泡剂采用杭州妙能生物科技有限公司生产的SH-02型发泡剂和SH-100型稳泡剂。

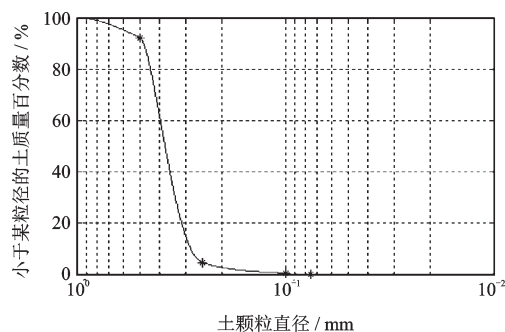


图1 试验用砂颗粒级配曲线

Fig.1 The grading curve of sand particles used in the test

制备试样时,首先将按表1所示的配合比称量细砂、水泥和水倒入拌和机中搅拌均匀,再将发泡剂、稳泡剂和水以 $3:1:90$ 的比例混合,搅拌均匀后倒入泡沫发生器中,通过ZBM-0.1/8型空气压缩机给发泡剂加压,待压力指示表接近 $0.3\text{MPa}$ 时,打开液阀门和出气阀门,待压力升至 $0.3\text{MPa}$ ,同时也是气泡稳定连续发出的时候,开始用塑料量杯接气泡至预定体积,将气泡倒入料浆中搅拌均匀。将新拌合的气泡混合轻质土倒入有机玻璃三瓣膜( $\Phi 50\text{mm}\times 100\text{mm}$ )中,并移至温度为 $20.1\sim 21.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度为 $99\%$ 的YH-40B型标准恒温恒湿养护箱中养护1d,最后将试样从模具中取出并继续养护至28d。通过上述方法制备密度分别为 $0.6$ 、 $0.8$ 和 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 和气泡混合轻质土试样。

表1 不同密度的气泡混合轻质土试样配合比

Table 1 Mixing ratio of air-foam light soil samples of different densities

密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/g	砂土/g	水/g	气泡/ml
600	9 867	2 466	4 933	16 000
800	5 586	11 199	4 480	16 000
1 000	5 560	13 900	4 725	14 000

注:表中数据对应的是制备80个试样时的用量

## 1.2 硫酸钠溶液浸泡试验

参考已有相关研究<sup>[9,12]</sup>,采用质量分数为2.5%的硫酸钠溶液,制备方法是将25.6 g无水硫酸钠(分析纯)溶解并定容至1 000 ml。将上述硫酸钠溶液注入洗净的水槽中,直至硫酸钠溶液的液面高于试样顶面3 cm。对于密度较低而浮于液面上的试样,在其顶端加盖透水石以保证其浸没于水面之下。浸泡0、7、28 d后分别测定试样的体积、密度和无侧限抗压强度,每组3个平行试样。试样的体积由游标卡尺测得的直径和高度按式(1)计算。密度按式(2)计算,其中质量由电子秤直接测得。强度测量方法如下:将待测试样放入万能试验机上以应变速率为3 mm/min加载,直至试样明显破坏。然后按式(3)计算试样的强度。

$$v = \frac{\pi h d^2}{4 000} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

$$q = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中, $v$ 为试样体积(cm<sup>3</sup>); $h$ 为试样高度(mm); $d$ 为试样直径(mm); $\rho$ 为试样密度(g/cm<sup>3</sup>); $m$ 为试样质量(g); $q$ 为试样无侧限抗压强度(MPa); $F$ 为万能试验机施加最大的竖向力(N)。

按上述强度测试方法测出的0.6、0.8、1.0 g/cm<sup>3</sup>试样的初始强度分别为0.672、0.593、0.875 MPa。

## 1.3 干湿循环试验

本文试验采用美国 ASTM D559/D559M-15 干湿循环试验标准<sup>[13]</sup>,具体步骤如下:

(1)将试样在室温条件下浸入配制好的硫酸钠溶液中5 h(湿),注意试样底部应垫有透水石,试样顶面应低于液面至少3 cm,对于密度较小,浮于液面上的试样应在顶面加盖透水石。取出试样测其

体积和密度变化;

(2)放入温度设置为70℃的电子鼓风干燥箱中烘42 h(干),取出试样在干燥环境中冷却至室温后测其体积和密度变化;

(3)最后试样在室温下空气干燥3 h以上,本试验设定干燥时间为18 h,此即一次干湿循环;

(4)根据所需干湿循环次数进行重复试验。

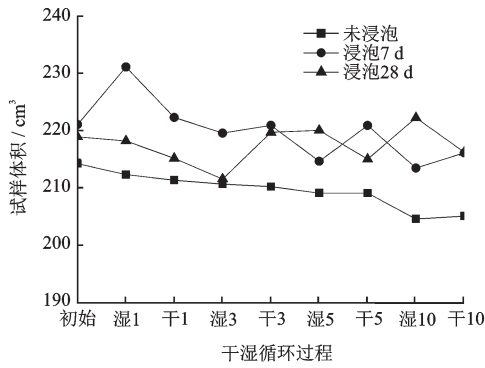
本次试验中对每个试样进行10次干湿循环试验,每组3个平行样。在第1、3、5、10次干湿循环后采用1.2中的试验方法测量试样的体积和密度,待10次干湿循环之后采用1.2节中的试验方法测量试样的无侧限抗压强度。

## 2 试验结果与分析

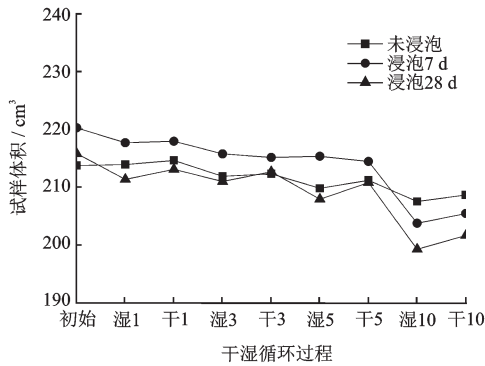
### 2.1 体积变化特性

图2是三种密度的气泡混合轻质土试样在硫酸钠溶液中浸泡不同时间后再经历干湿循环过程时的体积变化曲线。从图中可以看出,在进行干湿循环前(图中的“初始”),经硫酸钠溶液浸泡的试样体积比未浸泡的试样体积大,即试样出现了不同程度的体积膨胀。这是硫酸根离子与水泥水化产物水化铝酸钙反应生成钙矾石<sup>[14]</sup>以及试样吸收硫酸钠溶液的共同作用的结果。其中,1.0和0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样在浸泡7 d后的体积总是大于浸泡28 d时的体积,而0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样浸泡7 d时体积变化并不明显,浸泡28 d时体积才有明显膨胀。造成这种差异的原因是钙矾石会随着浸泡时间的延长逐渐填满气泡混合轻质土试样内部孔隙,直至使试样膨胀开裂。这就意味着气泡混合轻质土孔隙率越大,能够容纳的钙矾石就越多,达到相同体积膨胀率所需的浸泡时间就越长。因而具有较高孔隙率的0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样在浸泡28 d时,体积才具有明显增大;而具有较低孔隙率的1.0和0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样在浸泡7 d时,体积就已产生明显膨胀,并且浸泡28 d时,试样内部膨胀致使表面剥落,体积有所减小。这一结果与混凝土<sup>[15-16]</sup>的研究结果也是一致的。

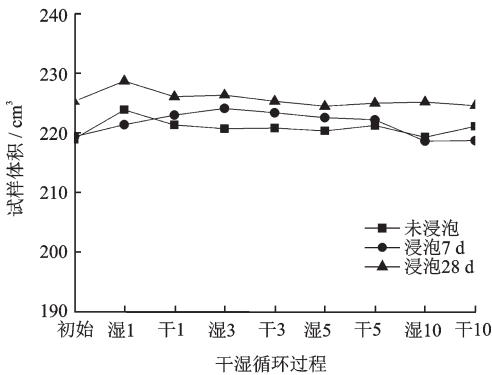
从干湿循环作用的角度来看,这些试样表现出了与普通干湿循环(采用纯水浸泡)不同的结果。普通的干湿循环过程中,试样会表现出湿胀干缩的性质,即试样浸泡时体积会略微膨胀,烘干时体积会略微收缩,但整体变化较为平稳<sup>[10]</sup>。而在本试验中,这一特征并不明显,甚至出现了相反的结果。



(a) 密度为1.0 g/cm<sup>3</sup>时试样的干湿循环过程



(b) 密度为0.8 g/cm<sup>3</sup>时试样的干湿循环过程



(c) 密度为0.6 g/cm<sup>3</sup>时试样的干湿循环过程

图2 浸泡硫酸钠溶液不同时间后不同密度试样在干湿循环过程中的体积变化曲线

Fig.2 Volume changing curves of samples with different densities during dry-wet cycles after immersed in sodium sulfate solution for different days

造成这一现象的原因是试样的体积变化不仅受吸水 and 失水的影响,还受硫酸钠的影响,且这些影响具有很大的不确定性。具体来说,试样在烘干过程中,不仅会失去大量水分,体积减小,也会析出大量的硫酸钠晶体,这些晶体会富集在试样表面(图3(a)),使得尺寸测量值变大,因而烘干后试样体积未必减小;而试样在浸泡时,虽会吸入大量的硫酸钠溶液,体积变大,但表面的硫酸钠晶体同样会溶解

在溶液中,使得尺寸测量值变小,因而试样在浸泡后体积未必增大;此外,浸泡过程中还会反应生成钙矾石等物质,并可能发生由于膨胀而导致试样表面剥落的情况发生(图3(b)),进而体积减小,而部分试样却可能发生膨胀甚至开裂(未剥落),体积增大。正是由于上述诸多因素的不确定性,气泡混合轻质土在硫酸钠溶液中进行干湿循环时,体积的变化也具有很大的不确定性,这也反映了海水循环侵蚀对于土工材料体积影响的复杂性。

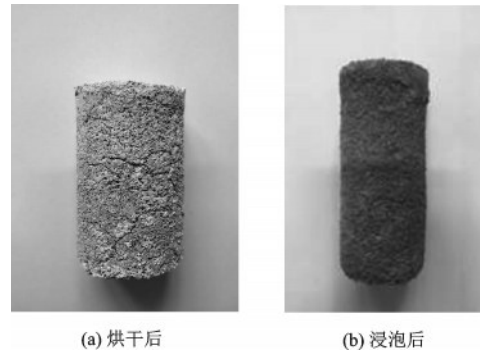


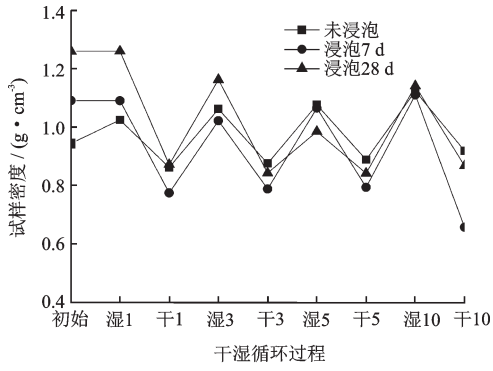
图3 干湿循环作用下试样表层变化

Fig.3 Surface variation of samples under dry-wet cycles

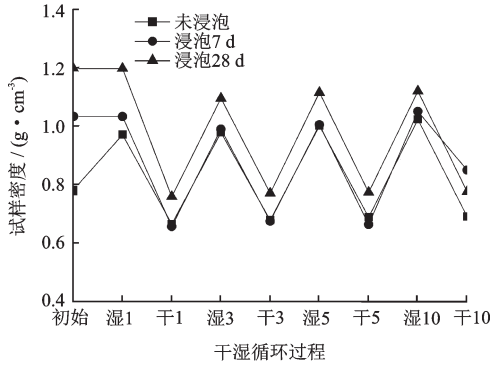
此外,不同密度试样也表现出不同的特征。1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样在第3个干湿循环结束后,体积变化在波动中呈现出稳定态势,0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样在第5个干湿循环结束后,体积变化就较为剧烈,而0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样在整个干湿循环过程中体积变化始终比较稳定。在三种密度的试样中,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样初始强度最大,0.6 g/cm<sup>3</sup>的强度次之,0.8 g/cm<sup>3</sup>的强度最小。而从10次干湿循环后的体积变化来看,0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样受干湿循环的影响最大,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样受干湿循环的影响次之,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样受干湿循环的影响最小。这说明较高的强度和较高的孔隙率对于气泡混合轻质土在硫酸钠和干湿循环的共同作用下的体积稳定性是有利的。

## 2.2 密度变化特性

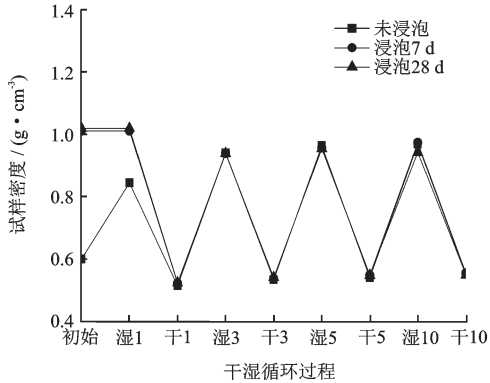
图4是三种密度的气泡混合轻质土试样在硫酸钠溶液中浸泡不同时间后再经历干湿循环过程时的密度变化曲线。根据图中结果,不同密度试样在浸泡硫酸钠溶液后,密度均出现了不同程度的增大。这主要是试样吸收硫酸钠溶液的结果。其中,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样的密度增长率最大,为69.8%,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样的密度增长率最小,为15.5%。造成这一差异的原因是0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样的密度初始值小



(a) 密度为1.0 g/cm<sup>3</sup>时试样的干湿循环过程



(b) 密度为0.8 g/cm<sup>3</sup>时试样的干湿循环过程



(c) 密度为0.6 g/cm<sup>3</sup>时试样的干湿循环过程

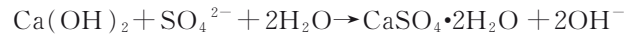
图4 浸泡硫酸钠溶液不同时间后不同密度试样在干湿循环过程中的密度变化曲线

Fig.4 Density changing curves of samples with different densities during dry-wet cycles after immersed in sodium sulfate solution for different days

且孔隙率高以致于吸液量大。

需要指出的是,硫酸根离子与水泥水化产物的反应对于试样质量的影响相对较小。硫酸根离子与水泥水化产物的反应主要有下述公式(4)、(5)中的两类<sup>[14]</sup>,这两个反应中,试样与硫酸根离子和游离水反应,游离水转化为结合水。在干湿循环过程中,反应产物中的结合水又会在持续的高温下变成游离水而脱离试样。所以针对该反应而言,试样质

量变化的主要原因是吸收了硫酸根离子。这部分质量相对于试样本身质量来说,也只占很小的比例。事实上,这一反应对密度的影响主要体现在对试样体积的影响。依据2.1节中的试验结果,部分试样因硫酸根离子的侵蚀而表面剥落,也有部分试样因产物集聚而膨胀,这会给试样密度带来很大影响。



(5)

从整个干湿循环的过程来看,不同初始密度试样的密度变化表现出了一致的规律,即湿增干减,这与普通的干湿循环的结果也是一致的,主要是由试样的吸水和失水造成的。此外,比较每一次干湿循环的结果可以发现,第一次循环对于密度的影响总是最大的。这是因为长期的浸泡使得试样吸入内部的溶液量较大,在进行烘干时损失的水分较多,因而密度变化较大;而自第二次干湿循环开始,由于浸泡时间短,吸入内部的溶液较少,在烘干时损失的水分较少,因而密度变化较小。

纵观整个干湿循环过程,还可发现在第一次干湿循环后,0.8 g/cm<sup>3</sup>试样的未浸泡以及浸泡7 d的密度变化曲线相互重合,而0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样三条密度变化曲线均基本重合。这是因为在干湿循环过程中,试样的密度变化主要是由试样的吸水和失水决定的,因而同一组内的不同试样的密度变化率基本一致,密度变化曲线也就相互平行,而1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样的三条密度变化曲线相互交错。出现这些结果的原因是试样的质量变化规律在第一次干湿循环后就基本一致(因硫酸根离子的影响不大,所以浸泡时间的影响主要反映吸水量的影响,而在第一次烘干后,这部分影响也被消除),所以三条密度变化曲线的差异主要是体积变化曲线差异的体现(但控制密度变化的主要因素仍是质量)。0.8和0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样的体积变化曲线相对稳定,所以其密度变化曲线就平行乃至重合,而1.0 g/cm<sup>3</sup>试样的体积变化曲线相互交错,所以其密度变化曲线也相互交错。这一结果与文献[10]中普通干湿循环的结果存有一定差异。文献[10]中三种密度试样的密度变化曲线在第一次干湿循环结束后均高度重合。造成这种差异的原因主要是硫酸钠对试样的侵蚀作用所引起的体积变化所导致的,而在普通干

湿循环中,试样在结构受损前的体积变化相对稳定,所以密度变化曲线主要与质量变化相关。

### 2.3 强度变化特性研究

图5是三种密度的气泡混合轻质土试样在硫酸钠溶液浸泡不同时间后经历10次干湿循环和未经干湿循环的样本数据散点和强度变化曲线。

首先,从未经干湿循环的试样强度变化曲线来

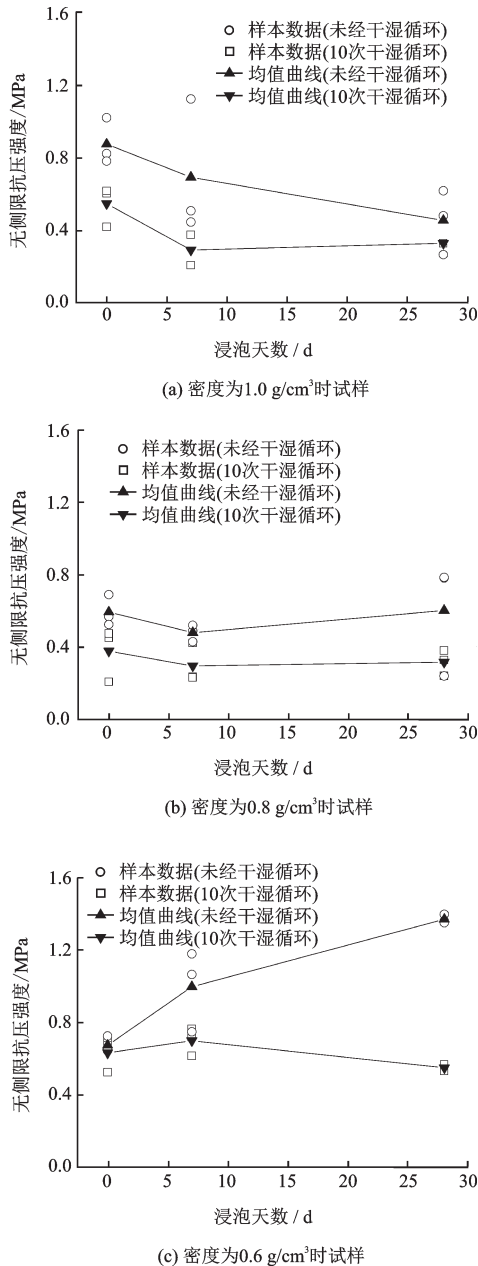


图5 浸泡硫酸钠溶液不同时间后不同密度试样经历10次干湿循环的抗压强度变化曲线

Fig.5 Compressive strength changing curves of samples of different densities after ten dry-wet cycles and immersed in sodium sulfate solution for different days

分析硫酸钠浸泡对于试样强度的影响规律。根据文献[9]的试验结果,密度为1.0 g/cm<sup>3</sup>的气泡混合轻质土试样在浸泡28 d时达到最大强度,此后强度一直降低直至破坏。而在本文的试验中,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样在浸泡过程中,强度一直在降低,而0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样的强度在浸泡7 d时,强度明显降低,浸泡28 d后,强度反而增大,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样在浸泡过程中强度一直在增大。这主要是因为浸泡初期,硫酸根离子与试样表层的水泥水化产物反应生成钙矾石等物质,这些物质本身结构疏松,而且强度低于试样本身强度<sup>[17]</sup>,且会在一定程度上损害试样的原结构,因而使得试样强度降低,这是硫酸根离子对试样侵蚀作用的第一个阶段。浸泡时间延长后,硫酸根离子进入试样内部,生成的钙矾石等物质又会逐渐填充试样内部孔隙,促使试样内部骨架结构更加紧密,使试样的强度有所提高,这是硫酸根离子对试样侵蚀作用的第二个阶段。浸泡时间进一步延长时,产生的钙矾石过多,促使试样膨胀甚至开裂,强度显著减小,这是硫酸根离子对试样侵蚀作用的第三个阶段。

图5(a)中的曲线主要反映了最后一个阶段,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样孔隙率最小,容纳钙矾石的能力最弱,因而浸泡7 d时,试样就已经产生膨胀,内部产生裂缝,强度减小,浸泡28 d时,试样进一步膨胀甚至开裂,强度进一步减小,需要指出的是这一曲线看似并未反映前两个阶段的变化,事实上浸泡7 d时的强度降低是这三个阶段共同作用的结果,只是第三阶段的作用远大于第二阶段而表现出强度降低。图5(b)中的曲线反映了前两个阶段,0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样由于硫酸根离子与水泥水化产物的反应,强度有所降低,此后钙矾石在孔隙中积累,又使得试样强度上升,需要指出的是,浸泡7 d时的强度降低并不只是第一阶段的作用,而是前两个阶段的共同作用的结果,只是后者的作用在此时小于前者,因而表现出强度的降低。图5(c)中的曲线主要反映了第二个阶段,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样孔隙率最大,容纳钙矾石的能力最强,即使浸泡时间达到28 d,产生的钙矾石也不足以使试样膨胀开裂,需要指出的是这一曲线看似并未反映第一阶段的变化,事实上浸泡7 d时的强度上升是前两个阶段共同作用的结果,只是第二阶段的作用大于第一阶段而表现出强度的上升。

再从10次干湿循环的作用来看,不同密度的试

样在经历10次干湿循环后强度均出现了明显的降低,这是因为干湿循环作用下试样内部会不断交替发生膨胀和收缩变形,当变形应力超过试样本身结构强度时,就会在内部产生微裂缝,随着干湿循环次数的增加,裂缝也不断发展,宏观上表现为强度的降低。

在文献[10]的普通干湿循环试验中,10次干湿循环后,0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度最大,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度次之,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度最小。王勇在文献[10]中对这一现象的解释是,试样的龄期强度增长可以持续至120 d,因而进行10次干湿循环后的试样的实际龄期已达到58 d以上,这部分强度增长弥补了部分因干湿循环而损失的强度,而0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样的水泥用量高于其他试样,龄期强度增长幅度大于其他试样,所以强度衰减幅度小于0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样;1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样的初始强度最大,抗干湿循环作用更具优势,因而降低的幅度最小。而在本试验中,未浸泡过的试样(即0 d所对应的试样)的干湿循环试验中,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度最小,这可能是因为在本试验中0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样的水泥用量很大,超过了文献[10]中的0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样,且未浸泡过的试样,在干湿循环时水泥水化产物与硫酸根离子未能充分反应,在相同浓度的硫酸钠溶液条件下,三种密度试样反应消耗的水泥水化产物接近,而0.6 g/cm<sup>3</sup>试样的水泥用量远大于0.8和1.0 g/cm<sup>3</sup>,其龄期强度增长的幅度大于0.8和1.0 g/cm<sup>3</sup>试样,所以0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度最小。但是浸泡在硫酸钠溶液28 d后的试样的干湿循环试验结果却正好与之相反,0.6 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度最大,0.8 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度次之,1.0 g/cm<sup>3</sup>的试样强度衰减幅度最小。这主要是因为在进行干湿循环试验前,试样已浸泡在硫酸钠溶液中长达28 d,试样内部的水泥水化产物与硫酸根离子充分反应,虽然反应产物会填充试样孔隙,使得试样强度有较大增长,但是其内部大量的钙矾石等物质吸水膨胀、失水收缩的性质十分突出,当其受到干湿循环作用时,反复的吸水与失水使得试样内部更容易产生收缩裂缝,且裂缝一旦发展,对于其内部结构的损害是极其严重的,因而强度降低的幅度也就最大。因而在易接触到硫酸盐且干湿交替的环境中使用气泡混合轻质土时,要注意控制水泥的用量。

### 3 结 论

(1)硫酸钠溶液和干湿循环共同作用下,硫酸钠晶体的析出和溶解以及钙矾石等物质所致的试样膨胀与表层剥落,均会对试样的体积产生显著的影响,总体来说,较高的初始强度和较大的孔隙率对于气泡混合轻质土的体积稳定性有利。

(2)硫酸钠溶液和干湿循环共同作用下,气泡混合轻质土的密度整体上呈现湿增干减的趋势。在试样在发生明显的膨胀或剥落后,不同浸泡时间的试样密度变化曲线平行甚至重合;试样因硫酸钠的侵蚀而发生膨胀开裂或表层剥落后,不同浸泡时间的试样密度变化曲线相互交错。

(3)硫酸钠溶液和干湿循环共同作用下,硫酸钠侵蚀作用产生的钙矾石等物质会填充孔隙,提高试样强度,但这些产物因其吸水膨胀、失水收缩的性质使得试样在干湿循环过程中更容易产生收缩裂缝,使得试样强度急剧降低。总体来说,试样初始强度越高、水泥含量越小,强度受到硫酸钠溶液和干湿循环共同作用的影响就越小。

#### 参考文献:

- [1] 章灿林,梁斯,谢云飞,等. 气泡轻质土的制备与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(8): 32-34.  
Zhang C L, Liang S, Xie Y F, et al. Preparation and properties of foamed cement banking[J]. New Building Materials, 2014, 41(8): 32-34. (in Chinese)
- [2] 陈忠平,王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 117-120.  
Chen Zh P, Wang Sh L. The review and application of foamed lightweight soil [J]. Journal of China&Foreign Highway, 2003, 23(5): 117-120. (in Chinese)
- [3] 蔡力,陈忠平,吴立坚. 气泡混合轻质土的主要特性及其应用[J]. 公路交通科技, 2005, 22(12): 71-73.  
Cai L, Chen Zh P, Wu L J. Foamed cement banking mechanics and its application [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(12): 71-73. (in Chinese)
- [4] Kikuchi Y, Nagatome T. Durability of cement treated clay with air foam used in water front structures [C]// Proceedings of sessions of GeoShanghai 2010, Ground Improvement and Geosynthetics, China, [s.n.], 2010, 1-30.

- [5] 陈记豪, 赵顺波, 姚继涛. 干湿循环下受硫酸钠侵蚀混凝土内钙矾石热分析研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 950-958.  
Chen J H, Zhao Sh B, Yao J T. Thermal analysis of ettringite in concrete attacked by sodium sulfate in dry-wet cyclic environment[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6): 950-958. (in Chinese)
- [6] 韩鹏举, 刘新, 白晓红. 硫酸钠对水泥土的强度及微观孔隙影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2 555-2 561.  
Han P J, Liu X, Bai X H. Effect of sodium sulfate on strength and micropores of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2 555-2 561. (in Chinese)
- [7] 王建华, 高玉琴. 干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 23-27.  
Wang J H, Gao Y Q. Study on strength degradation mechanism of cement soils resulting from dry wet cycles [J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 23-27. (in Chinese)
- [8] Ranjani G, Indu Siva, Ramamurthy K. Behavior of foam concrete under sulfate environments [J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(7): 825-834.
- [9] 刘楷, 李仁民, 杜延军, 等. 气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增1): 362-366.  
Liu K, Li R M, Du Y J, et al. A durability experimental study of lightweight soil subjected to wetting-drying cycles and sodium sulfate soaking [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 1): 362-366. (in Chinese)
- [10] 王勇. 干湿循环作用下气泡混合轻质土的性能劣化研究[D]. 南京: 河海大学, 2018.  
Wang Y. Study on performance degradation of air-foam treated lightweight soil under freeze-thaw cycles [D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese)
- [11] 梁朋涛, 李章珍, 冀伟, 等. 干湿循环条件下气泡混合轻质土的水稳定性试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017, 35(2): 21-24.  
Liang P T, Li Zh Zh, Ji W, et al. An experimental study of water stability of bubble mixed light soil under wetting-drying cycles conditions [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2017, 35(2): 21-24. (in Chinese)
- [12] Kamon M, Suparkij N, Takeshi K. Utilization of stainless-steel slag by cement hardening [J]. Soils and Foundations, 1993, 33(3): 118-129.
- [13] American Society for Testing and Materials. D559M-15 Standard test method for wetting and drying compacted soil-cement mixtures [S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [14] 张晓佳, 张高展, 孙道胜, 等. 水泥基材料硫酸盐侵蚀机理的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(7): 1 174-1 180.  
Zhang X J, Zhang G Zh, Sun D Sh, et al. Progress of the mechanism of sulfate attack on cement-based materials [J]. Materials Review, 2018, 32(7): 1 174-1 180. (in Chinese)
- [15] Santhanam M, Cohen M D, Olek J. Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1. Summary of experimental results [J]. Cement & Concrete Composites, 2002, 32(6): 915-921.
- [16] Santhanam M, Cohen M D, Olek J. Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 2. proposed mechanisms [J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 33(3): 341-346.
- [17] 李镜培, 赵高文, 李林. 夹泥引起的混凝土内部  $SO_4^{2-}$  扩散特性及破坏模式研究与分析 [J]. 混凝土, 2017(3): 1-6.  
Li J P, Zhao G W, Li L. Study on failure mode and diffusion manner of  $SO_4^{2-}$  within concrete caused by infiltrated mud [J]. Concrete, 2017(3): 1-6. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)