

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210307001

# 降低气泡混合轻质土吸水性的试验研究\*

杨卫东, 黎冰, 马文昊

(东南大学土木工程学院, 江苏南京210096)

**摘要:** 气泡混合轻质土的孔隙率高, 处于地下水位以下时, 随着时间的推移其部分孔隙会被水填充, 使其丧失轻质特性, 进而威胁到工程安全, 所以研究如何降低气泡混合轻质土的吸水性很有必要。分别制备了掺入憎水剂、减水剂、早强剂和粉煤灰(内掺和外掺)的气泡混合轻质土试样, 通过吸水性试验和相容性试验研究了掺入不同外加剂对于降低气泡混合轻质土吸水性的效果, 并分析了外加剂与气泡混合轻质土之间的相容性问题。试验结果表明, 掺入适量的憎水剂、减水剂、早强剂和粉煤灰都能降低气泡混合轻质土的吸水性, 但降低效果各不相同。内掺10%的粉煤灰时降低气泡混合轻质土的吸水性效果最佳, 可将气泡混合轻质土的吸水率降低4.8%, 且内掺粉煤灰不仅可以降低气泡混合轻质土的吸水率, 还可以在在一定程度上替代水泥的作用, 节省造价, 在工程中具有更好的实用性。掺入减水剂后消泡现象明显, 导致制备的气泡混合轻质土密度明显增大, 所以掺入减水剂对于降低气泡混合轻质土的吸水性效果最差。虽然掺入适量的憎水剂和早强剂也可以降低气泡混合轻质土的吸水率, 但效果有限, 且也会因为相容性问题引起消泡进而造成土体密度的明显增大。

**关键词:** 气泡混合轻质土; 吸水率; 粉煤灰; 憎水剂; 减水剂; 早强剂

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1061-08

## Experimental Study on Reducing Water Absorption of Air-foam Treated Lightweight Soil

YANG Weidong, LI Bing, MA Wenhao

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The porosity of the air-foam treated lightweight soil is high. When air-foam treated lightweight soil is lower than the groundwater level, part of its pores will be filled with water and its lightweight feature will not work with elapsed time, threatening the safety of the project. Therefore, it is necessary to study how to reduce the water absorption of air-foam treated lightweight soil. In this study, the air-foam treated lightweight soil samples were prepared with water-repellent admixture, water reducing agent, early-strength admixture and fly ash (mixed in and out). Through the water absorption and compatibility tests, the effect of different admixtures on reducing the water absorption of air-foam treated lightweight soil was studied, and the compatibility between the admixture and the bubble mixed lightweight soil is analyzed. The experimental results show that, adding appropriate

\* 收稿日期:2021-03-07;修回日期:2021-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51578145)资助

作者简介:杨卫东(1996—),男,硕士研究生。主要从事土工材料方面的研究。E-mail:2628553891@qq.com

通讯作者:黎冰(1981—),男,副教授,博士。主要从事土力学与岩土工程方面的教学与科研工作。

E-mail: lbershui@seu.edu.cn

amount of water-repellent admixture, water reducing agent, early-strength admixture and fly ash can reduce the water absorption of air-foam treated lightweight soil, but the reduction effect is different. Adding 10% fly ash is most effective on reducing the water absorption of the air-foam treated lightweight soil, and it can reduce the water absorption by 4.8%. In addition, internal adding fly ash can not only decrease the water absorption rate of the air-foam treated lightweight soil, but also can replace cement to save cost to some extent, having better practicability in engineering application. After adding water reducing agent, the defoaming phenomenon is obvious, which leads to the significantly increased density of the air-foam treated lightweight soil, so the effect of water reducing agent on reducing the water absorption of air-foam treated lightweight soil is the worst. Although mixing appropriate amounts of water-repellent and early-strength admixtures can also reduce the water absorption of air-foam treated lightweight soil, the effect is not good, and due to the defoaming phenomenon caused by the compatibility issues, such measure lead to the increase of soil density.

**Keywords:** air-foam treated lightweight soil; water absorption; fly ash; water-repellent admixture; water reducing agent; early-strength admixture

## 引言

气泡混合轻质土由原料土、水泥、水和气泡等按照一定比例混合搅拌而成<sup>[1]</sup>,具有轻质、强度和重度根据工程需要可以自由调节等优点,目前已在软基处理、桥台背回填、地下空洞回填和山区道路高填方等工程中得到了较为广泛的应用<sup>[2-7]</sup>。

气泡混合轻质土之所以具有轻质的特性,原因是掺入的气泡使其成为一种多孔隙材料。当气泡混合轻质土应用于海岸工程或者处于地下水位以下时,部分孔隙会被水填充,从而丧失轻质的特性。N.Takeshi等<sup>[8]</sup>通过CT扫描研究了不同配比的气泡混合轻质土浸水后的吸水特性和吸水过程,发现其吸水性与气泡掺量有关,气泡掺量越高,吸水性越强,密度增幅也越大,何国杰等<sup>[9]</sup>和周宏楚<sup>[10]</sup>通过研究得到了类似的结论。徐佳辉<sup>[11]</sup>研究了冻融循环作用对气泡混合轻质土吸水性的影响,发现冻融循环作用会导致轻质土的吸水性和渗透性增大,并且试样的初始含水量越大,冻融循环的影响越显著。王勇<sup>[12]</sup>通过试验研究发现,干湿循环作用会提高气泡混合轻质土的吸水性。杜杰等<sup>[13]</sup>通过试验研究了硫酸钠环境下气泡混合轻质土的抗干湿性能。

水的渗入使得气泡混合轻质土丧失其轻质性,进而会威胁到工程的安全。因此,如何降低气泡混合轻质土的吸水性成了必须深入研究的关键问题,然而目前尚无公开的降低气泡混合轻质土吸水性方面的研究成果,但在泡沫混凝土领域多采用掺入

外加剂的方法降低吸水性,可为气泡混合轻质土的研究提供参考。H.S.Gökçe等<sup>[14]</sup>在水泥基泡沫混凝土中添加了粉煤灰和硅灰,试验结果发现掺入粉煤灰可以有效降低泡沫混凝土的吸水率,而硅灰使试样的吸水性增大。丁曼<sup>[15]</sup>探究了内掺硅氧烷憎水剂、石蜡乳液和硬脂酸锌乳液对水泥基泡沫混凝土吸水性能的影响,试验结果表明,硬脂酸锌乳液降低吸水性的效果最好,但是会降低试样的强度。杨钱荣等<sup>[16]</sup>研究了甲基纤维素和减水剂对泡沫混凝土的影响,结果显示掺入适量的甲基纤维素和减水剂可以改善泡沫混凝土的孔隙结构。

与泡沫混凝土相比,气泡混合轻质土的原料组成和用途都不相同,导致两者的性质有很大的差异,所以降低泡沫混凝土的研究成果不一定适用于气泡混合轻质土。因此,本文考虑掺入不同的外加剂,通过试验探索降低气泡混合轻质土吸水性的方法,并从微观角度分析气泡混合轻质土吸水性的变化机理。

## 1 试验材料与试验方案

### 1.1 试验材料与试样制备

试验所用原料土为黏土,黏土的基本物理力学性质指标见表1,颗粒级配曲线如图1所示,黏土的成分主要为氧化硅和氧化铝;固化剂采用镇江北固海螺有限责任公司生产的标号为PC 32.5的复合硅酸盐水泥;发泡剂和稳泡剂分别为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;采用的外加剂有优索化工科技公司生产的SHP 50有机硅憎水剂,鲁川化工公司生产的硬脂酸钙憎水剂,华禹建材厂生产的HY-3型混凝土早强剂以及苏州市建筑科学研究院生产的GS-1B型高效减水剂;矿物掺合料选用河南郑州生产的I级粉煤灰。

表1 黏土的基本物理力学性质指标

液限/%	塑限/%	土粒比重	$c_{cu}/kPa$	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$
46.6	28.8	2.71	18.3	19.6

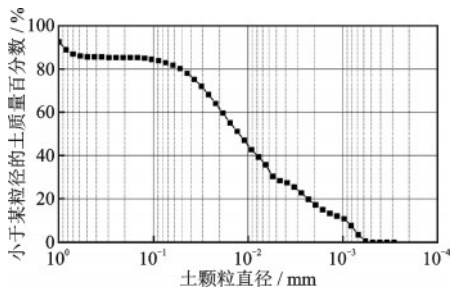


图1 黏土的颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of clay

试验中采用直径50 mm、高100 mm的圆柱形试样,试样的制备过程如下:①按照设定的配合比将水泥和原料土混合均匀,然后加入水并搅拌均匀;②将稳泡剂、发泡剂、水按照1:3:90的比例混合并发泡;③用量杯量取气泡,并将气泡与水泥土浆体搅拌均匀,搅拌时间为3 min;④将搅拌完成的混合物装入50 mm×100 mm三瓣模中,用铁铲轻敲模具侧面,并抹平试样顶面;⑤将试样移至温度为20.1~21.9℃、湿度为99%的标准恒温恒湿养护箱中养护24 h,之后脱模并继续养护至28 d。

## 1.2 试验方案

为了研究掺入憎水剂、减水剂、早强剂以及粉煤灰对气泡混合轻质土吸水性的影响,设计了见表2所示试验方案,其中粉煤灰的掺入分为外掺法(在原配合比基础上额外掺入一定比例的粉煤灰)和内掺法(采用粉煤灰等量取代原配比中的部分水泥)。为了避免偶然误差,每种配比设置5个平行试样。

## 1.3 吸水性试验

将养护28 d试样取出测定其含水率,一般在10%~25%。为了掺入不同外加剂试样的吸水率具

表2 气泡混合轻质土试样配比

Table 2 Mixture ratios of air-foam treated lightweight soil samples

配比编号	外加剂种类	水泥/g	黏土/g	水/g	泡沫/cm <sup>3</sup>	外加剂/g
空白对照		2 000	400	1 200	1 600	0
硬-0.5	硬脂酸钙	2 000	400	1 200	1 600	10
硬-1.0	硬脂酸钙	2 000	400	1 200	1 600	20
硬-1.5	硬脂酸钙	2 000	400	1 200	1 600	30
硬-2.0	硬脂酸钙	2 000	400	1 200	1 600	40
硅-0.5	有机硅	2 000	400	1 200	1 600	10
硅-1.0	有机硅	2 000	400	1 200	1 600	20
硅-1.5	有机硅	2 000	400	1 200	1 600	30
硅-2.0	有机硅	2 000	400	1 200	1 600	40
减-0.5	减水剂	2 000	400	1 200	1 600	10
减-1.0	减水剂	2 000	400	1 200	1 600	20
减-1.5	减水剂	2 000	400	1 200	1 600	30
减-2.0	减水剂	2 000	400	1 200	1 600	40
减-2.5	减水剂	2 000	400	1 200	1 600	50
早-1.0	早强剂	2 000	400	1 200	1 600	20
早-3.0	早强剂	2 000	400	1 200	1 600	60
早-5.0	早强剂	2 000	400	1 200	1 600	100
粉1-5	粉煤灰	2 000	400	1 200	1 600	100
粉1-10	粉煤灰	2 000	400	1 200	1 600	200
粉1-15	粉煤灰	2 000	400	1 200	1 600	300
粉2-5	粉煤灰	1 900	400	1 200	1 600	100
粉2-10	粉煤灰	1 800	400	1 200	1 600	200
粉2-20	粉煤灰	1 600	400	1 200	1 600	400

注:编号中汉字代表外加剂种类;数字代表外加剂掺量与原水泥掺量的百分比(去掉百分号);其中粉1代表外掺粉煤灰,粉2代表内掺粉煤灰

有可比性,测定气泡混合轻质土的吸水性时,先将养护完成后的试样放入温度为70℃的鼓风干燥箱内,48 h后取出冷却至室温,然后分别使用游标卡尺和电子秤测算试样的体积和质量;再将试样放入水槽内,保持水槽内的水面高于试样顶面不少于3 cm;浸水87 d后取出称重。最后按照下式计算试样的体积吸水率:

$$\alpha = \frac{m_t - m_0}{\rho_w V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为试样的体积吸水率, 用百分数表示;  $m_1$  为试样浸水一定时间后的质量, 单位为 g;  $m_0$  为试样烘干后的质量, 单位为 g;  $\rho_w$  为水的密度, 单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $V_0$  为试样浸水前的体积, 单位为  $\text{cm}^3$ 。

#### 1.4 外加剂与气泡混合轻质土的相容性试验

在气泡混合轻质土试样的制备过程中, 掺入的外加剂可能会与气泡发生化学反应而产生消泡现象, 改变气泡混合轻质土的孔隙结构和密度, 进而影响气泡混合轻质土的吸水性, 所以有必要分析外加剂与气泡混合轻质土的相容性问题。本文是通过对比分析外加剂掺入前后气泡混合轻质土的密度差异来判定外加剂与轻质土的相容性, 若掺入外加剂后轻质土的密度显著增大, 则两者的相容性差。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 憎水剂降低气泡混合轻质土吸水性的效果

分别掺入硬脂酸钙和有机硅后气泡混合轻质土的体积吸水率变化规律如图 2 所示。硬脂酸钙和有机硅对气泡混合轻质土吸水性的影响规律类似, 都是随着掺量的增多吸水率先减小后增大, 硬脂酸钙的掺量为 0.5% 时降低吸水性的效果最优, 而有机硅的掺量为 1% 时效果最优。

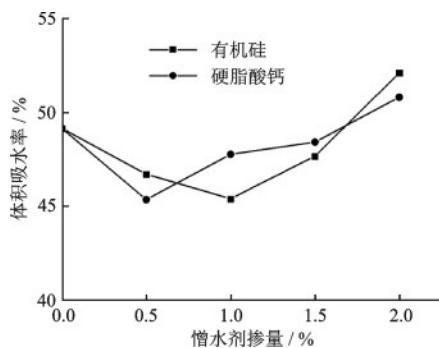


图 2 试样体积吸水率随憎水剂掺量变化曲线

Fig.2 Variation curves of volumetric water absorption of samples with water-repellent admixture dosage

掺入外加剂后气泡混合轻质土的吸水率发生了变化, 很可能是它的孔隙结构发生了改变, 为了验证这一假想, 需从微观角度对比分析掺入外加剂前后轻质土的孔隙差异。由于轻质土中的孔隙并不一定是圆形, 所以定义孔隙的等效半径  $r$ , 具体含

义是指将轻质土中孔隙横截面面积等效为圆形面积时所对应的半径, 按式(2)计算确定。确定孔隙横截面面积时, 先用高清相机给试样断面拍照, 然后采用 ImageJ 软件将试样断面图放大 60 倍, 此时通过软件可直接计算获得孔隙面积  $S$ 。

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (2)$$

式中,  $r$  为孔隙的等效半径, 单位为  $\mu\text{m}$ ;  $S$  为孔隙的横截面面积, 单位为  $\mu\text{m}^2$ 。

图 3 和图 4 分别是掺入硬脂酸钙和有机硅后的试样内部孔结构, 图 5 为孔径分布。结合试样内部的孔结构和孔径分布可以看出, 憎水剂的掺入显著改变了孔径的大小和分布, 例如未掺入憎水剂时, 试样中的孔径在 50~550  $\mu\text{m}$  相对均匀分布, 并且半径介于 250~550  $\mu\text{m}$  的气孔占比达 22.7%; 但当掺入 0.5% 的硬脂酸钙时, 轻质土中气孔间的壁厚明显增大, 小气孔更多, 约 93% 的气孔半径集中在 50~250  $\mu\text{m}$ ; 有机硅掺量为 1.0% 时, 半径介于 50~250  $\mu\text{m}$  的气孔比例达到了 96.1%。但是随着憎水剂掺量的进一步提高, 小孔径的气孔比例随之降低, 平均孔径逐渐增大, 连通孔的数量明显增多, 从而导致吸水率提高。

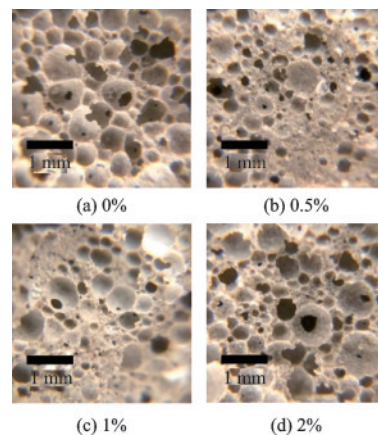


图 3 掺入硬脂酸钙的轻质土内部孔结构

Fig.3 Pore structures of lightweight soil mixed with calcium stearate

掺入适量硬脂酸钙能够降低气泡混合轻质土吸水率的原因是硬脂酸钙中的羧基 ( $\text{R}-\text{COOH}$ ) 可以与水泥中的  $\text{CaO}$  以及水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等物质发生反应<sup>[17]</sup>, 生成不溶性的针状盐晶体和钙皂的薄膜疏水层, 附着在孔壁上, 阻碍水的渗入。有机硅聚合物表面张力和表面能较弱, 成膜能力强, 具有优良的疏水性, 并且有机硅憎水剂中的活性基

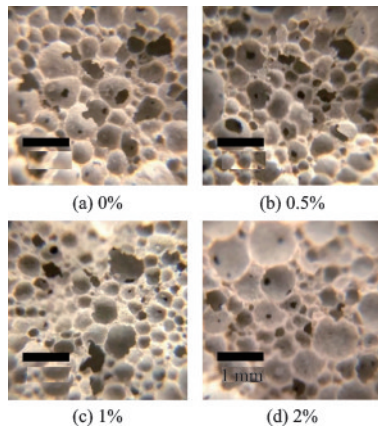


图4 掺入有机硅的轻质土内部孔结构

Fig.4 Pore structures of lightweight soil mixed with organo-silicon

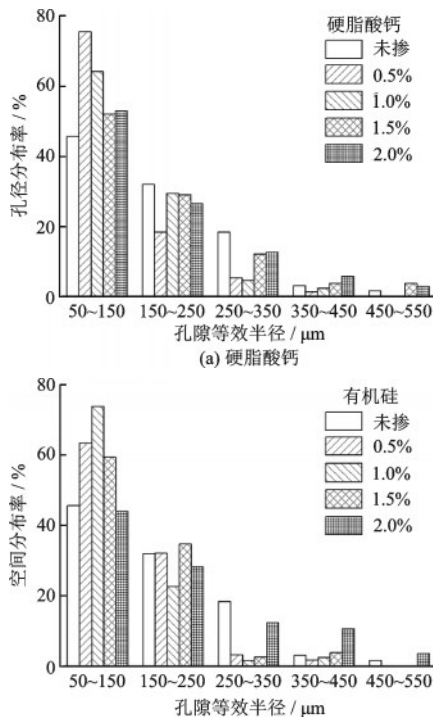


图5 掺入憎水剂的轻质土孔径分布

Fig.5 Pore size distribution of lightweight soil mixed with water-repellent admixture

团可以和水泥中的羟基(-OH)反应生成疏水性很强的Si-R硅氧烷链<sup>[18]</sup>,均匀地分布在混合物中,改善了气泡(试样成形后即气孔)环境,使气泡分布更均匀,孔径更小,所以掺入适量的有机硅也能降低气泡混合轻质土的吸水性。另一方面,由于气泡混合轻质土的特殊性,还需要考虑憎水剂与气泡的相容性。图6为试样密度与憎水剂掺量的关系曲线,从图中可以看出掺入憎水剂后,试样的密度随掺量的增加有明显上升趋势,特别是硬脂酸钙,这是因

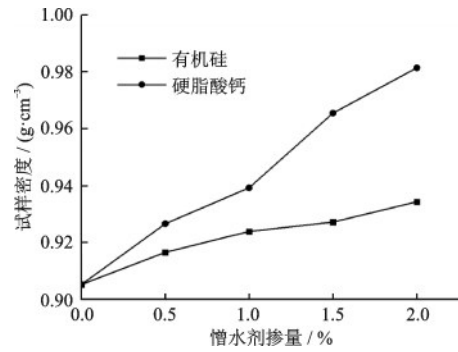


图6 试样密度随憎水剂掺量变化曲线

Fig.6 Variation curves of sample density with water-repellent admixture dosage

为过量时导致消泡现象严重。

## 2.2 减水剂降低气泡混合轻质土吸水性的效果

图7为气泡混合轻质土的体积吸水率随减水剂掺量的变化曲线,可以看出掺入1.0%的减水剂时轻质土的体积吸水率最低,为48.9%。但相较于未掺入外加剂的空白对照组的体积吸水率49.9%,降低效果不明显。本文试验的其它掺量下,减水剂的掺入反而提高了试样的体积吸水率。试验过程中发现,掺入减水剂后,消泡现象明显,标准养护24 h脱模后测得的试样密度数据也反映了这一点,如图8所示。

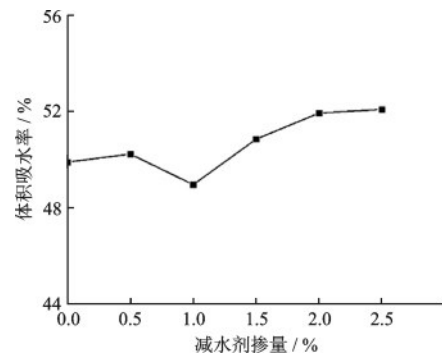


图7 试样体积吸水率随减水剂掺量变化曲线

Fig.7 Variation curve of volumetric water absorption of the sample with water reducing agent dosage

## 2.3 早强剂降低气泡混合轻质土吸水性的效果

气泡混合轻质土的体积吸水率随早强剂掺量的变化曲线如图9所示。从图9中可以看出,随着早强剂掺量的增加,轻质土的体积吸水率逐渐降低,掺量5%时试样的体积吸水率降幅为2.7%。图10为掺入早强剂的轻质土孔径分布图,可以看出随

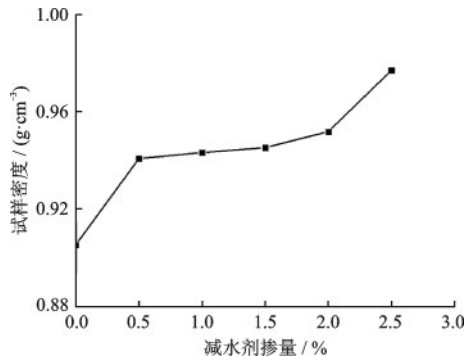


图8 试样密度随减水剂掺量变化曲线

Fig.8 Variation curve of sample density with water reducing agent dosage

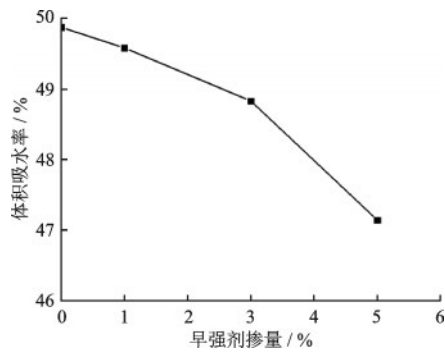


图9 吸水率随早强剂掺量变化曲线

Fig.9 Variation curve of water absorption with early-strength admixture dosage

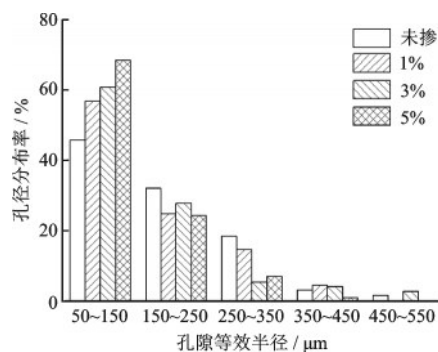


图10 掺入早强剂的轻质土孔径分布

Fig.10 Pore size distribution of lightweight soil mixed with early-strength admixture

随着早强剂掺量的增加,试样内等效半径介于50~150 μm的气孔比例显著提高,当掺量为5%时,50~250 μm的气孔占比达到了92.2%。

掺入早强剂可以降低气泡混合轻质土吸水率的原因主要有两方面,一是无机盐类早强剂会与水泥水化产物Ca(OH)<sub>2</sub>等物质反应生成难溶于水的钙矾石晶体,钙矾石晶体可以填充轻质土中的孔隙,降低轻质土的体积吸水率;另一个原因是早强

剂的掺入加快了轻质土的成形,这样一定程度上减轻了因消泡导致的试样塌陷现象,改善了轻质土的孔结构,减少因泌水等原因产生的连通孔,从而降低了吸水率。图11为试样密度随早强剂掺量的变化曲线,规律是试样密度随早强剂掺量的增加先略有减小再随之增大,但增幅相对较小,说明早强剂与气泡之间的相容性较好。

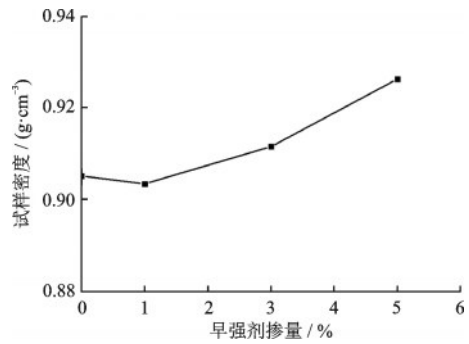


图11 试样密度随早强剂掺量变化曲线

Fig.11 Variation curve of sample density with early-strength admixture dosage

#### 2.4 粉煤灰降低气泡混合轻质土吸水性的效果

图12为气泡混合轻质土的体积吸水率随粉煤灰掺量的变化曲线。从图12中可以看出,轻质土的吸水率随粉煤灰掺量的增多而先减小后增大,并且内掺粉煤灰和外掺粉煤灰均是在10%掺量时达到最优的效果,内掺粉煤灰的效果更佳。图13为掺入粉煤灰后轻质土的孔径分布图,从图中可以看出,掺入适量的粉煤灰后轻质土中50~150 μm的小气孔比例显著提高,但当粉煤灰掺量超过10%之后,轻质土中的大气孔比例逐渐提高,特别是外掺粉煤灰的情况下,出现了半径600 μm及以上的大气孔,

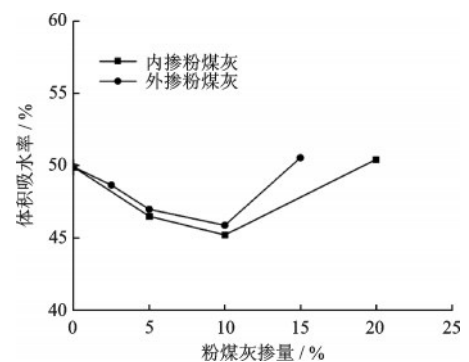


图12 试样体积吸水率随粉煤灰掺量变化曲线

Fig.12 Variation curves of volumetric water absorption of samples with fly ash dosage

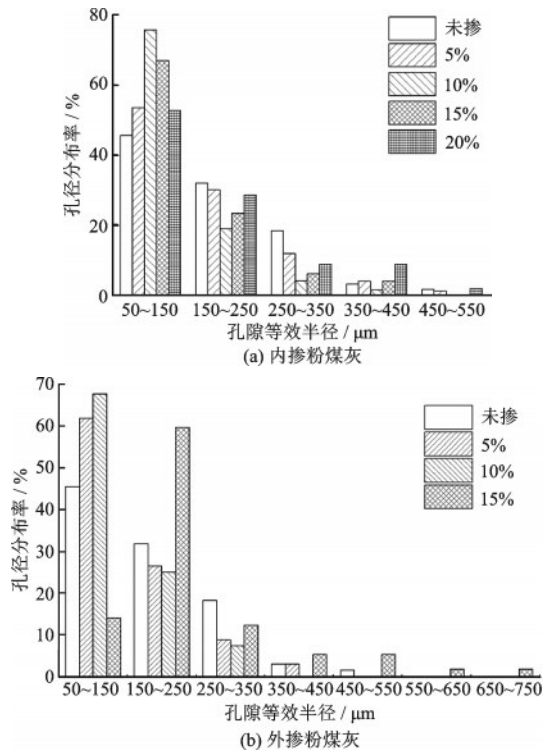


图13 掺入粉煤灰的轻质土孔径分布

Fig.13 Pore size distribution of lightweight soil mixed with fly ash

同时 150 μm 以内的小气孔比例显著降低。

掺入粉煤灰之所以可以降低气泡混合轻质土的吸水性,原因在于粉煤灰中的  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  等与水泥水化产物  $Ca(OH)_2$  反应生成水化铝酸钙和硅酸钙等凝胶体,进而填充和改善孔隙。但若粉煤灰掺量过多,则原料混合物的流动性降低,搅拌过程中由于摩擦力的增加导致消泡,导致轻质土的吸水率增大。

图 14 为试样密度与粉煤灰掺量的关系曲线,从图中可以看出,当粉煤灰掺量不超过 10% 时,外掺法条件下试样密度略有增加,内掺法条件下试样密度略有减小,说明粉煤灰与气泡之间的相容性较

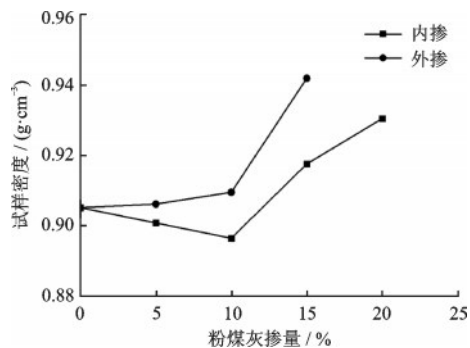


图 14 试样密度随粉煤灰掺量变化曲线

Fig.14 Variation curves of sample density with fly ash dosage

好。但当粉煤灰掺量超过 10% 之后,不论是内掺还是外掺,试样密度都明显增大,所以粉煤灰掺量不宜超过 10%。

## 2.5 各方法的效果对比分析

由前文分析可知,掺入憎水剂、减水剂、早强剂和粉煤灰(内掺和外掺)对于气泡混合轻质土吸水性的降低效果各不相同,现将各方法的最佳掺量和相应的气泡混合轻质土吸水率降低量统计见表 3。从表中可以看出,效果最好的是内掺 10% 的粉煤灰,可将轻质土的吸水率降低 4.8%;其次是外掺 10% 的粉煤灰,可将轻质土的吸水率降低 4.0%;效果相对最差的是掺入减水剂,仅能降低 1% 的吸水率。由于粉煤灰中含有活性物质,能一定程度上替代水泥的作用,所以采用内掺粉煤灰的方法不仅可以降低气泡混合轻质土的吸水率,还可以节约水泥用量,在工程中具有更好的实用性。

表 3 外加剂的最佳掺量与相应吸水率降低幅度

	外加剂的最佳掺量与相应吸水率降低幅度					单位:%
	Optimum dosage of admixture and the decrease ranges of water absorption					
	硬脂酸钙	有机硅	减水剂	早强剂	内掺粉煤灰	外掺粉煤灰
最佳掺量	0.5	1	1	5	10	10
降低量	3.8	3.7	1.0	2.7	4.8	4.0

## 3 结论与建议

本文通过试验探索了降低气泡混合轻质土吸水性的方法,分析了掺入憎水剂、减水剂、早强剂和粉煤灰对于降低气泡混合轻质土吸水性的效果,得到如下结论:

(1)相对于憎水剂、减水剂和早强剂,内掺 10% 的粉煤灰降低气泡混合轻质土的吸水性效果最佳,且粉煤灰可以在一定程度上替代水泥的作用,所以采用内掺粉煤灰的方法不仅可以达到降低吸水率的目的,还可以节约造价,具有更好的工程适用性。

(2)通过掺入外加剂的方法以降低气泡混合轻质土的吸水率,需要注意外加剂与轻质土之间的相容性问题,特别是憎水剂和减水剂,虽然在合适的掺量下对于轻质土吸水率的降低有一定的效果,但会引起消泡造成土体密度的明显增大。

## 参考文献:

- [1] 三岛信雄,长尾和之.气泡セメント盛土工法(FCB工法)の研究[J].土木学会志,1994(1):18-21.  
Nobuomiyoshi, Kazuyukikakei. Study on geotechnical method of bubble mixed cement filling [J]. Journal of the Japan Society of Civil Engineers, 1994, (1): 18-21. (in Japanese)
- [2] 蔡力,陈忠平,吴立坚.气泡混合轻质土的主要力学特征及应用综述[J].公路交通科技,2005,22(12):71-74.  
Cai L, Chen Z P, Wu L J. Foamed cement banking mechanics and its application [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (12): 71-74. (in Chinese)
- [3] 陈磊.浅谈气泡混合轻质土在市政工程中的应用[J].建材与装饰,2019,(10):230-231.  
Chen L. Application of air-foam treated lightweight soil in Municipal Engineering [J]. Building materials and decoration, 2019, (10): 230-231. (in Chinese)
- [4] 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 Z P, Wang S L. The review and application of foamed lightweight soil [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23(5): 117-120. (in Chinese)
- [5] 邓飞.泡沫轻质土在杭州东站软土路基地基处理中的应用[J].铁道标准设计,2018,62(3):31-35.  
Deng F. Application of air-foam treated lightweight soil in foundation treatment of Hangzhou East Railway Station soft soil base [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(3): 31-35. (in Chinese)
- [6] 李东民,毕伟涛,李春轩,等.气泡混合轻质土在陕北淤地坝地基台背回填中的应用研究[J].路基工程,2019,(4):64-68.  
Li D M, Bi W T, Li C X, et al. Study on application of air-foam treated lightweight soil in back filling of warping dam foundation in Shanbei [J]. Subgrade Engineering, 2019, (4): 64-68. (in Chinese)
- [7] 汪旻磊.气泡轻质混合土在山区城市道路高填方设计中的应用[J].城市道桥与防洪,2019(6):262-263+280+28-29.  
Wang M L. Application of air-foam treated lightweight soil in high fill design of urban road in mountainous area [J]. Urban Roads and Bridges and Flood Control, 2019 (6): 262-263+280+28-29. (in Chinese)
- [8] Takeshi N, Taichi H, Jun O, et al. Absorption property evaluation of light weight soil with air foam due to different mixing conditions [J]. Journal of the Society of Materials Science, 2010, 59(1): 68-73.
- [9] 何国杰,郑颖人,杨晨曦.气泡混合轻质土的吸水特性和抗冻融循环性能[J].后勤工程学院院报,2008,24(4):6-8.  
He G J, Zhen Y R, Yang C X. Water absorption and freeze thaw cycle resistance of air-foam treated light-weight soil [J]. Journal of Logistics Engineering College, 2008, 24(4): 6-8. (in Chinese)
- [10] 周宏楚.气泡混合轻质土用于冻土地基隔热保温的应用技术研究[D].长沙:中南大学,2008.  
Zhou H C. Study on application technology of air-foam treated lightweight soil for thermal insulation of frozen soil foundation [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [11] 徐佳辉.冻融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.  
Xu J H. Study on performance degradation of air-foam treated lightweight soil under freeze-thaw cycles [D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 杜杰,黎冰,王勇,等.硫酸钠环境下气泡混合轻质土的抗干湿性能研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4):581-588.  
Du J, Li B, Wang Y, et al. Study on resistance to dry-wet cycles of air-foam treated light soil under sodium sulfate environment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 581-588. (in Chinese)
- [14] Gökçe H S, Hatungimana D, Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 194(10): 1-11.
- [15] 丁曼.防水性泡沫混凝土研究[D].长沙:湖南大学,2011.  
Ding M. Study on waterproof foam concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- [16] 杨钱荣,王冰,裴闪闪,等.脱硫石膏泡沫混凝土性能及相关性分析[J].粉煤灰综合利用,2013,(5):3-6.  
Yang Q R, Wang B, Pei S S, et al. Performance and correlation analysis of desulphurization gypsum foam concrete [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2013, (5): 3-6. (in Chinese)
- [17] Gerdes A, Oehmichen D, Preindl B, et al. Chemical reactivity of silanes in cement-based materials [C] // Proceedings of hydrophobic IV, water repellent treatment of building materials. Zurich: Aedificatio Publisher, 2005:47-58.
- [18] 李崇智,冯乃谦,李永德.聚羧酸类高性能减水剂的研究进展[J].化学建材,2001,(6):38-41.  
Li C Z, Feng N Q, Li Y D. Research progress of polycarboxylate superplasticizer [J]. Chemical building materials, 2001, (6): 38-41. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)