

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.057

泡沫轻质土渗透及吸失水性能试验研究

谢祺¹, 严科¹, 赵军涛¹, 慕习刚¹, 余金²

(1. 中建安装集团有限公司, 江苏南京 210000; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013)

摘要: 通过对湿重度分别为 5.5 kN/m³、6 kN/m³ 的泡沫轻质土进行渗透及吸失水试验, 研究了泡沫轻质土的孔隙状态、渗透系数及吸失水性能。试验结果表明: 气泡混合轻质土是一种高孔隙率材料, 其孔隙占比在 75% 以上, 渗透系数约为 10⁻⁵~10⁻⁶ 数量级, 介于粉质粘土与粘土的渗透系数之间; 受水浸泡后, 泡沫轻质土容重最大增加约 25%, 失水后容重仍然有约 9.5% 增加量, 在工程设计中应根据不同置换路基施工环境对设计容重按照 1.0~1.25 之间进行修正。

关键词: 泡沫轻质土; 渗透系数; 吸水率; 失水率; 重度修正

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)04-0216-04

0 引言

泡沫轻质土是近年来发展起来的一种新型工程材料, 其具有自重轻、流动性好、强度高、环境影响低等优点, 目前已在市政、公路、铁路及地下工程领域得到了较为广泛的应用^[1-6]。对于泡沫轻质土的物理力学特性, 国内外相关学者通过室内试验及工程实测开展了大量研究, 取得了一系列研究成果^[7-11], 但对泡沫轻质土的渗透及吸失水特性研究相对较少。

当泡沫轻质土应用于路基填筑时, 受降水或其他因素导致的地下水位变化影响, 泡沫轻质土可能处于地下水位以下。由于泡沫轻质土具有多孔特点, 在浸水条件下会发生吸水作用导致其密度逐渐增大, 从而对路堤下部基层结构产生较大影响。本文依托南京西岗北片区基础设施建设工程项目, 采用室内试验方法对泡沫轻质土的渗透及吸失水特性进行分析, 研究其对应物理力学指标的变化规律, 为工程设计及施工提供参考。

1 工程概况

本项目所在区域位于南京仙林副城青龙片区。本次捷运大道实施里程范围为道路中桩里程 K1+440~K2+138, 总长为 698 m, 规划为城市主干路, 道路红线宽度 45~52.5 m, 设计速度 50 km/h。其中, 项目南北横跨南京地铁四号线西岗桦墅站正上方(见图 1)。由于常规土的容重在 12 kN/m³ 以上,

在地铁共线条件下采用常规土体进行路基填筑将对下方既有隧道产生较大影响, 无法满足设计验算要求。根据第三方评估单位将地铁隧道参数与道路填筑进行建模验算, 要求该段道路路基需采用容重 5~6 kN/m³ 泡沫轻质土回填。考虑到泡沫轻质土在运营阶段会受到外界降水或地下水位影响, 需要对其渗透及吸失水性能进行研究, 以确保在吸水状态下泡沫轻质土重度满足设计要求。

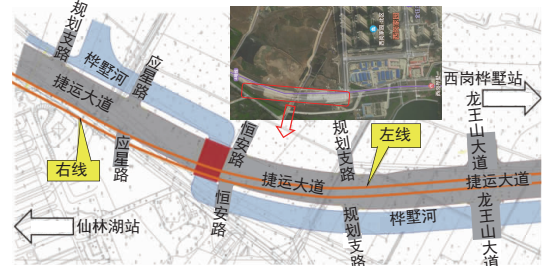


图 1 新建道路与地铁共线示意图

2 泡沫轻质土制备

2.1 泡沫轻质土配合比

通过不断试验调试, 本文确定了两组不同湿重度情况下 ($\gamma=5.5$ kN/m³、6.0 kN/m³) 的泡沫轻质土配合比方案, 见表 1。其中, 水泥采用 P.O42.5, 发泡剂采用 F60B, 水采用自来水。

表 1 气泡混合轻质土配合比方案

设计湿容重 / (kN·m ⁻³)	设计流动度 / mm	每立方米材料用量			设计值 / MPa
		水泥 / kg	水 / kg	气泡群 / L	
5.5	180	320	195	701.8	28 d 强度 不小于 0.6
6.0	180	350	210	677.1	28 d 强度 不小于 0.8

收稿日期: 2022-05-19

作者简介: 谢祺(1989—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥施工技术工作。

2.2 试样制作及养护

采用自主设计加工的泡沫发泡机成功实现了不同发泡倍率的泡沫制备,将泡沫掺入至配合好的水泥浆液中,并进行充分搅拌即可制备出特定湿容重的泡沫轻质土填料,见图2。

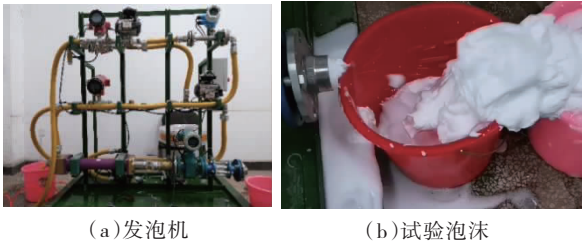


图2 泡沫制备

将制备好的泡沫轻质土填料灌入至三轴试验制样的三开模中,三开模直径为61.8 mm、高度为125 mm。为防止材料表面干缩,泡沫轻质土浇筑高于模口,待终凝后再用刀片刮平,同时为避免试样水分蒸发引起试样干缩现象,将试样放置在塑料袋中自然养护大约30 h后开始拆模,拆模后再次放入塑料袋中养护28 d,试样制备过程见图3。

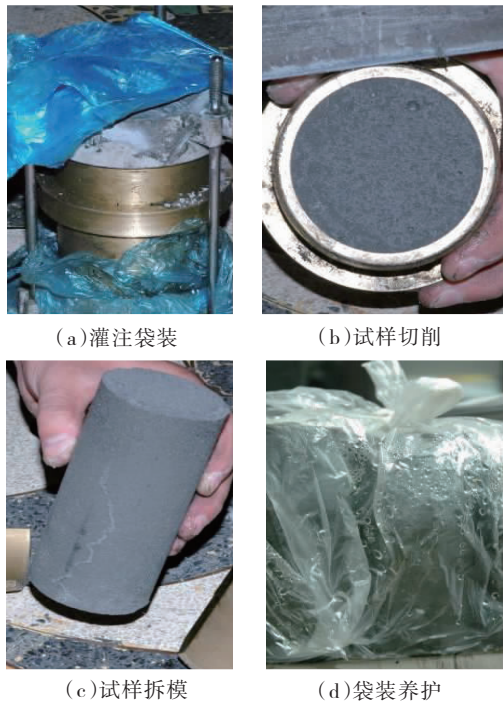


图3 试样制备流程图

3 泡沫轻质土渗透性能试验

3.1 渗透试验操作过程

将同批次、同龄期、同强度圆柱状试样一组放入抽气饱和桶内进行反压饱和,为保证试样充分饱和,先在0.1 MPa反压渗透至排水恒定(即反压饱和)后,再进行渗透试验测定。渗透压在0.005~0.35 MPa,操作方法及注意事项见土工试验规范。在各级渗透

压作用下,选取渗透排水速度相对稳定时的排水量及其相应排水时间,由式(1)计算各级渗透压下的渗透系数。同时,再选取同批次、同龄期三个不进行抽气饱和的原状样,直接进行非饱和渗透试验,渗透试验过程,以排水管出现排水量界定试验开始,并测定不同渗透压下的排水量和排水时间,根据公式确定非饱和态的渗透系数。

$$k_T = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (1)$$

式中: k_T 为水温为 T 摄氏度时试样的渗透系数,cm/s; Q 为时间 t (s)内的渗透水量,cm³; L 为排水路径经过的试样高度,cm; A 为试样横截面面积,cm²; H 为平均渗透压(水头差),cm。

3.2 渗透试验分析

根据不同饱和状态下泡沫轻质土渗透试验结果,绘制饱和和非饱和试样渗透系数与渗透压之间的关系曲线图,见图4、图5。如图4所示,在温湿条件下养护28 d后抽气饱和测定试样的渗透系数约为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 数量级,其渗透性介于粉质黏土到黏土之间,渗透系数比一般多孔隙材料小。渗透系数受单位面上可通过的渗水孔隙横截面积限制,渗透系数基本不随渗透压的增加而增加(整体呈现不变或者略微减小趋势),且在较小渗透压作用下,渗透系数有略微波动的现象,这是由于水泥材料有很强的亲水性,渗透需要克服渗透路径接触界面上的初始渗透阻力。

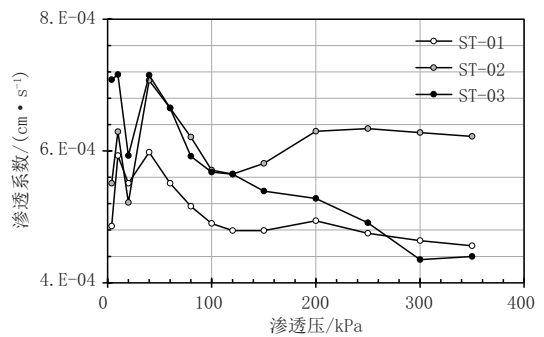


图4 饱和样渗透系数-渗透压关系图

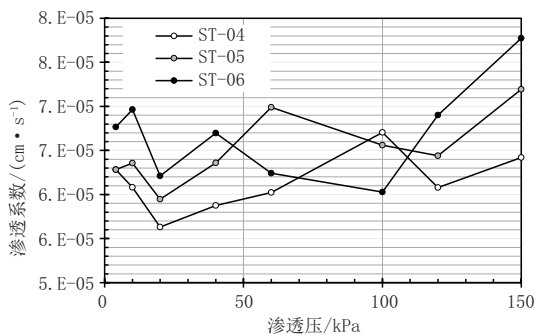


图5 非饱和样渗透系数-渗透压关系图

如图5所示,在非饱和试样渗透试验过程中,测定计算的渗透系数略小于饱和样测定的渗透系数(渗透系数约为 10^{-6} 数量级),渗透系数随渗透压增加有明显增加的趋势。随着渗透压的不断增大,被封闭在渗透孔隙中的气体逐渐失去平衡而被排出,增大了材料可排水截面,则测定渗透系数增大。这种现象与实际工况相对比分析,由于实际情况下气泡轻质土材料多处于非饱和环境,可知非饱和试样测定的渗透系数更能反映实际工程材料的渗透性。

4 泡沫轻质土吸失水性能试验

4.1 吸水试验过程

从试样中分别选取容重为 5.5 kN/m^3 和 6.0 kN/m^3 同批次、同龄期的圆柱状试样各一组,用精度为 0.1 g 的电子秤称量各试样的初始质量 m_0 ;之后将该试样全部静置于 0.2 m 深的水池中浸泡,试样浸泡过程中称量试样随吸水时间 t 变化的吸水后质量 m_i ,根据初始质量和吸水后试样质量 m_i ,利用式(2)计算随吸水时间变化的吸水率 n_i 。同时,根据计算吸水率 n_i 与吸水时间 t 之间关系绘制曲线图,见图6和图7。待试样吸水容重增加相对稳定后,称量稳定时试样质量 m_n ,并记录其相应时间 t_n 。

气泡混合轻质土的吸水率 n_i 为:

$$n_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n_i 为吸水至吸水率 t_i 时刻的吸水率; m_0 为初始质量,g; m_i 为吸水至 t_i 时刻称量质量,g。

试样吸水质量恒定后,将试样从水中取出,放置于常温室室内使试样自然失水,并记录失水过程试样质量 m_i' 随失水时间 t_i' 的变化,根据式(3)计算失水量 $m_n - m_i'$,与吸水稳定质量 m_n 做比计算材料吸水相对饱和后的失水率,并绘制失水率 n_i' 随时间 t_i' 的变化关系,见图6和图7。

气泡混合轻质土的失水率 n_i' 为:

$$n_i' = \frac{m_n - m_i'}{m_n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: n_i' 为吸水至吸水率 t_i' 时刻的吸水率; m_n 为吸水恒定质量,g; m_i' 为失水至 t_i' 时刻称量质量,g。

4.2 吸失水试验结果分析

图6和图7为不同重度条件下泡沫轻质土吸水率试验曲线,试验结果表明:设计湿润容重为 5.5 kN/m^3 的气泡混合轻质土浸水后容重最大增加达 25.2% ,其重度增加显著。在进行气泡轻质土自然失水试验时,试样失水后容重不能完全恢复到初始

容重,与原容重相比仍有 9.5% 的增加,气泡轻质土中的孔隙水难以有效排出。

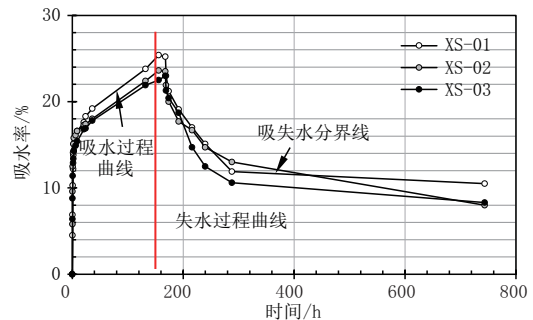


图6 气泡混合轻质土吸水失水率(容重为 5.5 kN/m^3)

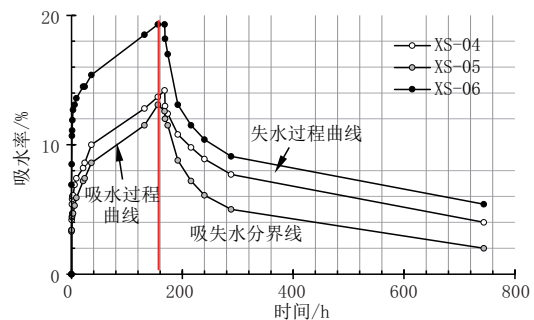


图7 气泡混合轻质土吸水失水率(容重为 6.0 kN/m^3)

同理,设计湿润容重为 6.0 kN/m^3 的气泡混合轻质土浸水后其试验结果类似,容重最大增加达 19.3% ,自然失水后容重仍比原容重高 5.4% 。表明泡沫轻质土内孔隙会存在连通现象,泡沫轻质土在长期受水浸泡后,孔隙内水体难以有效排出,材料设计容重将有一定程度增加,需要对其设计容重进行修正。

容重为 5.5 kN/m^3 泡沫轻质土在抽气饱和后,容重增加 113% ,和干容重相比可知,泡沫轻质土有 75% 以上孔隙,这说明泡沫轻质土材料部分闭合孔可以被高压水头破坏,变成容水空间。因此,设计中避免应用于有高压水头破坏可能的工作环境。

同理,设计湿润容重为 6.0 kN/m^3 的气泡混合轻质土浸水后其试验结果类似,容重最大增加达 19.3% ,自然失水后容重仍比原容重高 5.4% 。表明泡沫轻质土内孔隙会存在连通现象,泡沫轻质土在长期受水浸泡后,孔隙内水体难以有效排出,材料设计容重将有一定程度增加,需要对其设计容重进行修正。

容重为 5.5 kN/m^3 泡沫轻质土在抽气饱和后,容重增加 113% ,和干容重相比可知,泡沫轻质土有 75% 以上孔隙,这说明泡沫轻质土材料部分闭合孔可以被高压水头破坏,变成容水空间。因此,设计中避免应用于有高压水头破坏可能的工作环境。

4.3 设计容重修正分析

根据吸失水试验分析结果,气泡混合轻质土是

一种由空气吹充水泥浆固化形成的蜂窝状多闭合孔的轻质填充材料,材料容重容易受水浸泡影响。在实际工程设计时,除非有严密防水措施或确定在使用期内基本不受水的影响外,使用期设计容重应在施工时测定容重的基础上,建议根据泡沫轻质土浸水的可能性或受水的影响程度对容重进行修正后确定设计值。对易经常受水浸泡环境下,为保守起见,泡沫轻质土设计容重需要乘以 1.25 左右的修正系数,其它情况根据泡沫轻质土受水影响程度在 1.00~1.25 范围之间结合吸水试验确定修正参数。

5 结 语

为验证气泡混合轻质土在路堤填筑中的实用性及可靠性,通过室内试验对气泡混合轻质土的渗透及吸失水特性进行研究,并得到如下试验结论:

(1)气泡混合轻质土是一种由纯水泥浆液充气固化形成的轻质材料,其渗透系数约为 10^{-5} ~ 10^{-6} 数量级,介于粉质粘土与粘土的渗透系数之间。

(2)气泡混合轻质土受水浸泡,容重最大增加约 25%,失水后容重仍然有约 9.5% 增加量,表明气泡轻质土受水浸泡对设计容重影响较大,应根据不同置换路基施工环境对设计容重按照 1.0~1.25 之间进行修正。

(3)容重为 5.5 kN/m^3 气泡轻质土在抽气饱和后,容重增加 113%,和干容重相比可知,气泡轻质土有 75% 以上孔隙,这说明气泡轻质土材料部分闭合孔

可以被高压水头破坏,变成容水空间,因此设计中避免应用于有高压水头破坏可能的工作环境。

参考文献:

- [1] 陈永辉,石刚传,曹德洪,等.气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J].岩土工程学报,2011(12):1854-1862.
- [2] 孙红林.高速铁路软土路基地基处理与沉降控制探究[J].铁道建筑技术,2017(05):1-10.
- [3] 吴海刚,王宝军,郑永红,等.大规模采用泡沫轻质土处理软基设计方法探讨[J].铁道工程学报,2016,33(2):28-33.
- [4] 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.
- [5] 李明,严松宏,李盛,等.采用泡沫轻质土对高填明洞二次回填的结构受力特性研究[J].铁道学报,2022,44(2):135-142.
- [6] 陶洁.高速公路改扩建泡沫轻质土路基分析[J].交通世界,2022(9):79-80.
- [7] Otani J, Mukunoki T, Kikuchi Y. Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams [J]. Soils and Foundations, 2002, 42(3):93-105.
- [8] 李明东,田安国.泡沫塑料混合轻质土在循环荷载下的力学性质[J].岩土工程学报,2010,32(11):1806-1810.
- [9] 陈金威,刘勇,石苏意,等.不同掺料泡沫轻质土的强度特性[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(4):15-22.
- [10] Le T H M, Lee S H, Park D W, et al. Evaluation on the full-scale testbed performance of lightweight foamed soil using railroad loading system [J]. Construction and Building Materials, 2022, 330: 127249.
- [11] 张宏博,刘明朋,孙玉海,等.粉土基泡沫轻质土三轴力学特性[J].山东大学学报(工学版),2022,52(1):39-46,57.

(上接第 211 页)

- 构,2018,48(7):68-72.
- [3] Culmo M P. Accelerated Bridge Construction - Experience in Design, Fabrication and Erection of Prefabricated Bridge Elements and Systems[J]. Bridge Members, 2011.
 - [4] Tomek, Radan. Advantages of Precast Concrete in Highway Infrastructure Construction[J]. Procedia Engineering, 2017, 196:176-180.
 - [5] 逮宗典.采用高阻尼支座的 PHC 管桩桥梁抗震性能分析[J].结构工

程师,2021,37(3):58-62.

- [6] 翟莲,杨莹莹,张竹军,等.预应力混凝土管桩研究现状及前景[J].混凝土世界,2020(3):46-48.
- [7] 邸昊.PHC 管桩抗震性能试验研究及数值模拟 [J]. 铁道工程学报, 2017,229(10):20-24.
- [8] 王铁成,王文进,赵海龙,等.不同高强预应力管桩抗震性能的试验对比[J].工业建筑,2014,44(7):84-89.