

文章编号: 1005-0523(2024)02-0041-07



轻质泡沫混凝土泡沫剂的性能优选与配比试验研究

周宇航^{1,2}, 罗如平^{1,2}, 朱碧堂^{1,2}, 李青强^{1,2}, 余金³, 梁启帆^{1,2}, 胡扬扬^{1,2}

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013; 3. 江西水利职业学院建筑工程系, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】研究轻质泡沫混凝土泡沫剂及其溶液的优选、最优配比。【方法】通过对几种典型泡沫剂的表面张力、发泡倍率、半衰期以及所产生泡沫的稳定性开展系统性试验研究为方法, 提出了优选泡沫剂的性能指标及其浓度值。在此基础上, 以C40水泥土配合比为参照, 将制备好的泡沫与C40水泥浆液按照不同的注入体积比进行混合, 测定其干、湿重度, 确定不同设计重度条件下轻质泡沫混凝土配比方案。进一步, 分别进行无侧限抗压强度试验测定不同重度条件下轻质泡沫混凝土试块抗压强度值和电镜扫描试验了解其微观结构组成。【结果】试验结果表明: 不同类型泡沫剂最优浓度约为3%, 发泡倍率为25, 表面张力32 mN/m, 半衰期为15 min; 轻质泡沫混凝土的密度和强度随泡沫注入率的增加显著降低, 相应气泡群含量和气泡大小离散性明显增大。【结论】轻质泡沫混凝土干密度与注入率呈衰减型指数关系, 无侧限单轴抗压强度与轻质泡沫混凝土干密度近似呈非平缓递增型指数关系。

关键词: 轻质泡沫混凝土; 泡沫剂; 最优浓度; 配比试验; 经验公式; 微观结构

中图分类号: TU52; U414

文献标志码: A

本文引用格式: 周宇航, 罗如平, 朱碧堂, 等. 轻质泡沫混凝土泡沫剂的性能优选与配比试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(2): 41-47.

Comparison Tests on the Performance of Foam Agents and Mixture Proportion Tests of Light Weight Foam Concrete

Zhou Yuhang^{1,2}, Luo Ruping^{1,2}, Zhu Bitang^{1,2}, Li Qingqiang^{1,2}, Yu Jin³, Liang Qifan^{1,2}, Hu Yangyang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Engineering R&D Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Department of Architectural Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】 Study on the optimization of foam agent and its solution and the optimal proportion. 【Method】 Through systematic experimental research on the research methods of surface tension, foaming ratio, half-life and stability of foam produced by several typical foam agents, the performance index and concentration value of foam agent for optimization were proposed. On this basis, with the C40 cement soil mix ratio as a reference, the prepared foam and C40 cement slurry are mixed according to different injection volume ratios, their dry and wet weight are measured, and the proportioning scheme of lightweight foam concrete under different design weight conditions is determined. Further, unconfined compressive strength tests were conducted to determine the compressive strength of lightweight foam concrete test blocks under different gravity conditions, and

收稿日期: 2023-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208343, 52020105003)

electron microscope scanning tests were conducted to understand their microstructure. **【Result】** The results showed that the optimal concentration of different types of foam agents was about 3%, the foaming ratio was 25, the surface tension was 32 mN/m, and the half-life was 15 minutes; The density and strength of lightweight foam concrete decrease significantly with the increase of foam injection rate, and the corresponding bubble group content and pore size dispersion increase significantly. **【Conclusion】** Dry density of lightweight foam concrete and the injection rate are in an exponential relationship of attenuation type, and the unconfined uniaxial compressive strength and the dry density of lightweight foam concrete are approximately in an exponential relationship of non gentle increase type.

Key words: lightweight foam concrete; foaming agent; optimal concentration; mixture proportion tests; empirical formula; microstructure

Citation format: ZHOU Y H, LUO R P, ZHU B T, et al. Comparison tests on the performance of foam agents and mixture proportion tests of light weight foam concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41 (2): 41-47.

【研究意义】出于知识产权保密需要,泡沫剂厂家往往避免公开其泡沫剂溶液的物理性质,导致在轻质泡沫混凝土制备过程中盲目选择泡沫剂及其发泡溶液浓度。在实际施工过程中存在轻质泡沫混凝土密度过大、强度过低、质量不过关及配合比不明确等问题,对轻质泡沫混凝土在工程建设和质量管控方面产生了许多阻碍,该研究有助于解决这一行业痛点。

【研究进展】近年来,轻质泡沫混凝土在建筑及岩土工程领域的应用研究取得了进展。张新全等^[1]研究了泡沫剂的半衰期、发泡倍率、表面张力等性能,为土压平衡盾构施工中泡沫剂的选择提供了一定的参考依据。王其伟等^[2]通过泡沫稳定性实验,研究了不同种类的泡沫稳定性物质对几种泡沫剂稳定性的影响,初步确定了几种具有明显改进泡沫稳定性的物质。李明等^[3]以西部某铁路高填明洞二次回填工程为依托,采用轻质泡沫混凝土作为回填材料,减轻隧道顶部二次回填对既有隧道结构产生的次生应力甚至破坏。

由于在轻质泡沫混凝土实际工程应用中离不开其各项性能指标参数,于是许多学者在轻质泡沫混凝土的密度及强度特性方面也进行了研究。李应权等^[4]对轻质泡沫混凝土配比进行了200~500 kg/m³的设计。张亚梅等^[5]对不同密度等级轻质泡沫混凝土的性能和孔结构进行了分析,表明密度低于600 kg/m³的轻质泡沫混凝土内部孔隙分布不均,试件表面的大孔较多,这是由于浆体与泡沫的体积比过低、浆

体无法均匀地包裹在泡沫表面所致。方永浩等^[6]研究了水泥-粉煤灰轻质泡沫混凝土的抗压强度与气孔结构的关系,粉煤灰取代水泥虽然会降低轻质泡沫混凝土的抗压强度,但其影响程度随轻质泡沫混凝土气孔率的增大而减小。

【创新特色】鉴于此,本文旨在研究轻质泡沫混凝土的最优泡沫参数以及密度配方,了解其微观结构。**【关键问题】**并对其进行一系列无侧限抗压强度实验分析,确定不同重度条件下轻质泡沫混凝土配比方案及其对应的强度特性,为轻质泡沫混凝土在工程中的应用提供参考。

1 泡沫剂性能优选试验

1.1 泡沫制备装置

为了便于对目标试件制备原料泡沫开展系统性试验研究,特研制一套发泡装置系统,如图1所示。发泡装置系统工作原理如下:

每一条输液管道均含有一个止水开关,泡沫原液箱和水箱分别在气动隔膜泵和压力泵的作用下通过DN20电磁流量计,最后与空气压缩机提供的压缩空气在泡沫发射器中汇合并发生分散,最后输出泡沫。空气压缩机的气压范围为0~0.8 MPa^[7]。

1.2 表面张力性能测试

试验过程中配置浓度分别为0.01%~5%的泡沫剂溶液,并取标准状态下的蒸馏水作为空白对照组。采用表面张力仪分别对其进行测定,得到不同浓度泡沫剂溶液下的表面张力值。

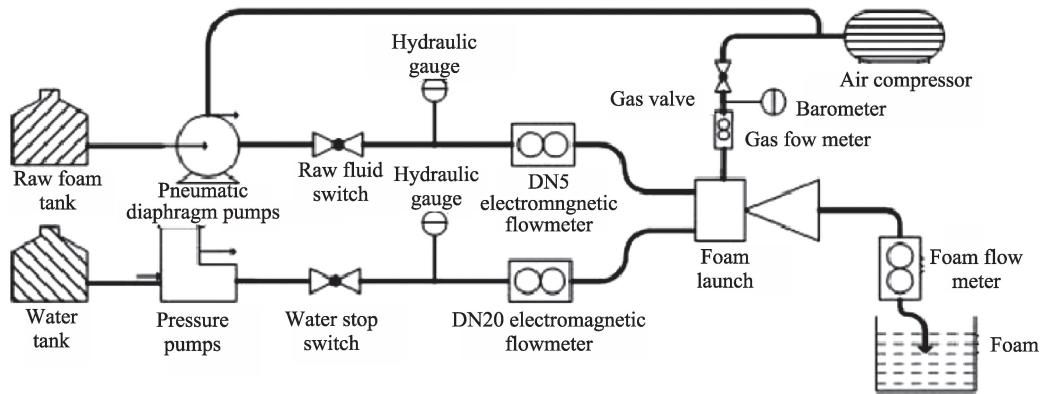


图1 发泡装置系统

Fig. 1 Foaming device system

如图2为不同浓度条件下泡沫剂溶液表面张力变化曲线,从图中可以看出:

1) 由于用MC-200A界面张力仪在室温条件下测得纯净水的表面张力约为71 mN/m(图中用0.001%表示纯净水),和理想环境下纯净水的理论表面张力72.8 mN/m十分接近,证明采用MC-200A界面张力仪可以精准测定泡沫剂溶液表面张力;

2) 往纯水中加入0.01%质量分数的泡沫剂后两种溶液表面张力分别急剧降低至53 mN/m和48 mN/m,纯水表面张力对表面活性剂非常敏感;

3) 继续往溶液中添加泡沫剂至质量分数达0.05%时,两种泡沫剂溶液表面张力进一步降低至32 mN/m;而后泡沫剂溶液的表面张力降低速率随泡沫剂溶液增加而变缓,溶液中的表面活性分子会逐渐形成胶束,我们将此时的浓度称之为临界胶束浓度(critical micelle concentration, CMC)。且两种

泡沫剂溶液均符合此趋势。由表面张力试验可以得出,合理的泡沫剂浓度约为0.05%。

1.3 稳泡性测试

图3为两种泡沫剂在5种浓度梯度下,随时间推移采用罗氏泡沫仪产生的泡沫体积变化情况:两种泡沫剂溶液产生的泡沫体积均随着浓度的上升而增加,且当浓度达到3%后泡沫体积趋于稳定,继续增加浓度泡沫体积增加不明显。考虑到3%已经达到泡沫剂临界胶束浓度且相关经济因素,试验用泡沫剂的最佳配比浓度均为3%。

1.4 泡沫发泡倍率研究

当使用泡沫与水泥浆液混合制作轻质泡沫混凝土时,表征泡沫的主要指标有发泡倍率和泡沫半衰期,前者代表了泡沫剂的发泡能力而后者反映了泡沫的稳定性。发泡倍率(foam expansion ratio,

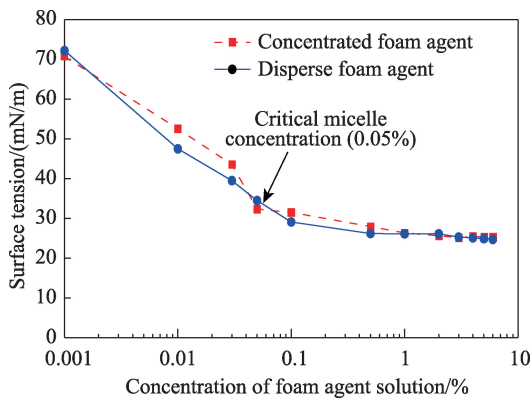


图2 不同浓度泡沫溶液表面张力值

Fig. 2 Surface tension values of foam solutions at different concentrations

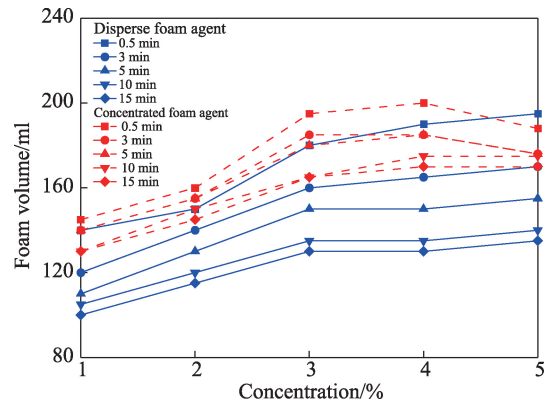


图3 不同泡沫溶液浓度下泡沫体积

Fig. 3 Foam volume at different foam solution concentrations

R_c)为单位体积的发泡剂溶液发出的泡沫体积的比值,计算如下

$$R_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

式中: V_1 为泡沫体积; V_2 为发泡剂溶液体积。

制备轻质泡沫混凝土时,发泡剂溶液往往需要达到良好的发泡状态,综合以上考虑,发泡剂发泡倍率通常为20~30。发泡倍率通常用量筒测试。

图4给出了两种发泡剂在5种浓度梯度下的发泡倍率。如图所示,两种泡沫剂溶液的发泡倍率随着泡沫剂溶液浓度的上升而缓慢增加,当浓度增加到3%后,两种泡沫剂溶液的发泡倍率均增加到最高点,分别为25和15;当浓度继续增加时,两种发泡剂的发泡倍率均略有降低。根据此次发泡倍率测试试验得出,泡沫剂溶液的最优发泡浓度为3%。

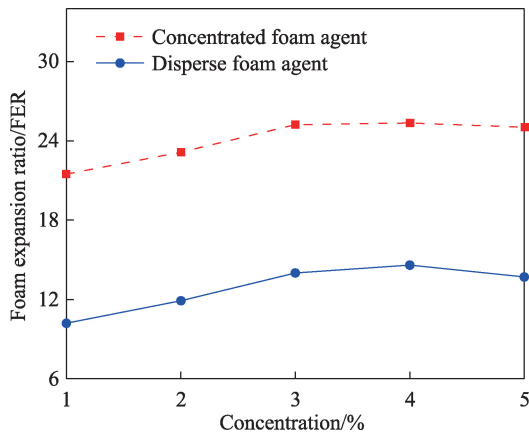


图4 不同发泡剂溶液浓度下泡沫发泡倍率

Fig. 4 Foaming rate at different foaming agent solution concentrations

1.5 泡沫半衰期

在施工过程中,配制轻质泡沫混凝土时需要先用发泡系统中制作出符合要求的泡沫,同时还需要配置好符合要求的水泥浆液之后再把二者加入搅拌机器中进行充分搅拌。在此过程中,伴随着时间流逝及施工搅拌,不可避免地会使得部分泡沫发生破灭。因此,要求轻质泡沫混凝土制作出来的质量达标就需要让发出的泡沫能稳定至与水泥浆液混合并能浇筑成型。泡沫的稳定性决定了泡沫混凝土制备的成功与否,泡沫的稳定性通常用半衰期表征。根据轻质泡沫混凝土实际工程应用,要求泡沫半衰期大于10 min。

如图5所示,给出了两种发泡剂溶液在不同浓

度的半衰期。由图可见,随着两种发泡剂溶液浓度的增大,两种泡沫的半衰期均不断上升,当发泡剂浓度达到3%后,随浓度的增加,两种泡沫剂溶液的半衰期趋于稳定。综上结果表明,泡沫剂溶液的最优发泡浓度为3%,半衰期约15 min。

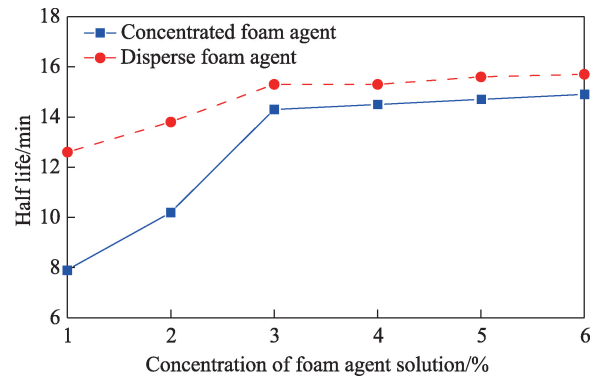


图5 泡沫半衰期与浓度图

Fig. 5 Relationship of foam half-life with agent concentration

如图6所示,显示了泡沫从刚制备装样到经历120 min时间内的破灭情况。可见泡沫在前2 min基本无变化而后30 min以减小泡沫绵密程度的形式衰落,30 min后泡沫体积逐渐减少。

综合以上各项指标对不同浓度泡沫剂溶液进行试验分析,可以得出对于不同的泡沫剂溶液均有最优浓度3%。并最终根据实际需求对比确定泡沫参数如下:浓缩型泡沫剂溶液浓度为3%,发泡倍率为25,表面张力为32 mN/m,半衰期为15 min。

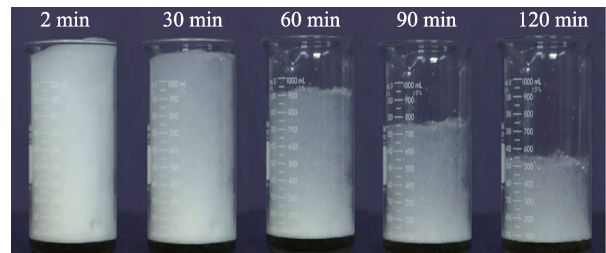


图6 泡沫破灭过程

Fig. 6 Process of bubble burst

2 轻质泡沫混凝土配比试验

2.1 试件制备与养护

采用自主设计的发泡装置实现了不同发泡倍率的泡沫制备,在确定好最优的泡沫之后将泡沫注入至配好的水泥浆液中,充分搅拌即可制备出目标

条件的轻质泡沫混凝土试件^[8]。

将制备好的轻质泡沫混凝土填料注入立方钢模(100 mm×100 mm×100 mm),并为保证试件表面平整,填料浇筑需略高模口;同时为了防止试件损失水分而导致试件干缩,用保鲜膜覆盖在试件表面上并自然养护48 h后脱模,脱模后放入标准养护箱中养护28 d。

因为轻质泡沫混凝土具有大量封闭孔隙,水分易损失,导致轻质泡沫混凝土存在自发式干燥收缩,因此造成很多轻质泡沫混凝土在早期发生开裂^[9-10]。

为减少早期开裂,在浇筑后定期在试件表面浇水来避免其干燥收缩。

2.2 轻质泡沫混凝土配比试验

轻质泡沫混凝土的原料为水泥、发泡剂和水,由于泡沫质量不方便测量,泡沫与水泥浆液混合后是以体积的方式呈现的。根据《泡沫混凝土》(JG/T 266—2011),下面特以体积作为各配料的计量单位而非质量,通过不断调试,本文确定了14组的轻质泡沫混凝土配合比方案,如表1所示,表中初始水泥浆液体积均为7 200 mL。水泥采用海螺牌水泥,发泡剂采用明洁浓缩型泡沫剂,水采用自来水,并且水泥浆液按照C40水泥土配方调配而成(水灰比0.4)。

并以泡沫注入率(foam injection rate, R_1)来表征将泡沫混合入水泥浆液的一个值,即 $R_1 =$

表1 轻质泡沫混凝土配比及干湿密度

Table 1 Mixture proportion of lightweight foam and its wet and dry density

Foam injection rate/%	Foam volume/mL	Dry density/(kg/m ³)	Wet density/(kg/m ³)
0	0	1 890	1 900
12.5	900	1 750	1 755
25	1 800	1 510	1 520
37.5	2 700	1 280	1 295
55.6	4 000	1 050	1 055
62.5	4 500	1 010	1 025
82.5	5 940	820	845
111.1	8 000	770	795
125	9 000	620	635
166.7	12 000	550	575
187.5	13 500	480	505
222.2	16 000	450	465
250	18 000	390	425

$\frac{V_{\text{foam}}}{V_{\text{cement grouting}}} \times 100\%$ 。根据以下数据可以看出,通过

改变轻质泡沫混凝土的泡沫掺入比可以明显改变泡沫轻质土的干湿密度。此轻质泡沫混凝土在刚刚开始掺入泡沫时密度下降明显,在注入率达到200%后变化平缓并逐渐趋于稳定至0.4~0.3 kg/m³左右。根据图7试验结果可以得出:

1) 此轻质泡沫混凝土在 R_1 达到1之前密度降低速率明显,而后干密度减少速率随 R_1 增大慢慢减小;

2) 轻质泡沫混凝土干密度与注入比呈衰减型指数曲线。

本文提出了一种通过泡沫注入比 R_1 确定轻质泡沫混凝土干密度 ρ 的经验公式,即

$$\rho = 780 \times R_1^{-0.52} \quad (2)$$

从图7实测数据与经验公式曲线拟合效果来看,所提出的经验公式能较为准确地反映轻质泡沫混凝土密度随注入比 R_1 的变化特性。

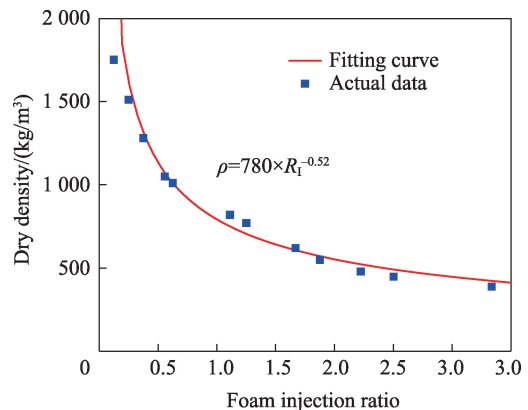


图7 轻质泡沫混凝土密度与泡沫体积注入比关系

Fig.7 Relationship of lightweight foam concrete density with the foam injection ratio

2.3 轻质泡沫混凝土抗压强度研究

分别选取各组中3块养护28 d后的轻质泡沫混凝土立方体试样共计14组。采用万能试验机来测定轻质泡沫混凝土28 d无侧限抗压强度。从图8可以看出。

1) 随着泡沫的掺入,混凝土的孔隙也会增多,密度和抗压强度都会变小。由于轻质泡沫混凝土具有的许多优良性能,可以让它在密度处于300~400 kg/m³之间可令其作为保温材料,在800 kg/m³左右时用作非结构承件,而1 200 kg/m³又可作为半

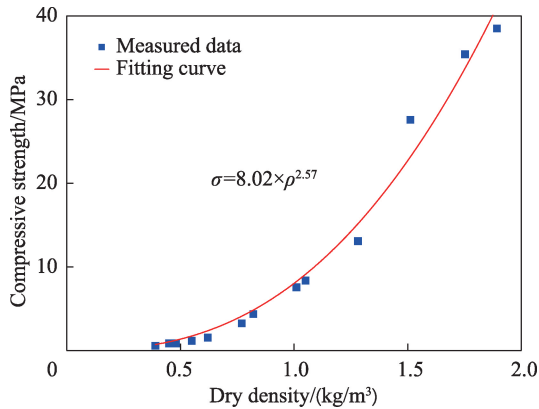


图8 轻质泡沫混凝土抗压强度与干密度关系

Fig. 8 Relationship between compressive strength and dry density of lightweight foam concrete

结构承件,或者与其强度合格的材料组成装配式复合材料,以达到保温、轻型、高强度的目的。

2) 轻质泡沫混凝土无侧限单轴抗压强度与泡沫混凝土干密度近似呈非平缓递增型指数曲线因实测数据与经验公式曲线拟合效果高度吻合。

在此本文同样提出通过轻质泡沫混凝土干密度 ρ 确定轻质泡沫混凝土无侧限单轴抗压强度 σ 的经验公式,即

$$\sigma = 8.02 \times \rho^{2.57}$$

2.4 轻质泡沫混凝土微观结构组成

为了对比不同密度等级的轻质泡沫混凝土的微观结构组成,本文特选取4个密度等级的轻质泡沫混凝土作为对照试件,对其进行X-CT扫描,扫描结果如图9所示。

由图12可见,1 900 kg/m³的纯水泥土密度很高,表面基本无气孔,密度等级为400 kg/m³的轻质泡沫混凝土试件气孔大小相较于其他试件离散性较大,且气孔尺寸明显偏大,且由图中比例尺可见,气孔大小为10 μ m到500 μ m不等,孔壁偏薄,这是因为在同体积轻质泡沫混凝土的制作过程中所使用的胶凝材料较少,凝固时包裹泡沫的气孔壁较薄。而密度等级为800,1 200 kg/m³的轻质泡沫混凝土内部充满均匀的封闭孔隙,且气孔尺寸较小,由于胶凝相较充足,形成孔壁较厚,其抗压强度也较大。轻质泡沫混凝土的密度和强度随泡沫注入率的增加显著降低,相应气泡群量含量明显增大^[11-12]。

3 结论

1) 通过对两种典型泡沫剂的表面张力、发泡倍

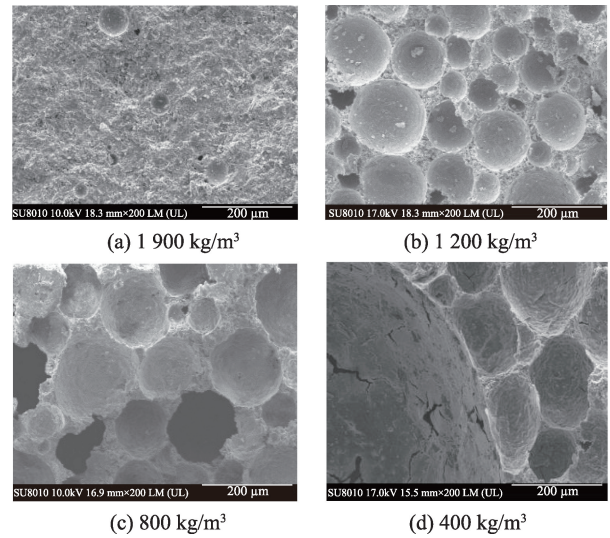


图9 不同密度等级轻质泡沫混凝土气孔大小及分布二维平面图

Fig.9 2D plan of pore size and distribution of lightweight foam concrete with different density grades

率、半衰期以及所产生泡沫的稳定性开展系统性试验研究,得出对于不同的泡沫剂溶液均拥有最优浓度3%。

2) 通过对轻质泡沫混凝土的定性密度研究,发现轻质泡沫混凝土密度与注入比呈衰减型指数曲线,提出了一种通过泡沫注入比 R_1 确定轻质泡沫混凝土密度的经验公式 $\rho = 780 \times R_1^{-0.52}$ 。

3) 与强度试验得出轻质泡沫混凝土无侧限单轴抗压强度与泡沫混凝土干密度近似呈非平缓递增型指数曲线,提出通过轻质泡沫混凝土干密度 ρ 确定轻质泡沫混凝土无侧限单轴抗压强度 σ 的经验公式 $\sigma = 8.02 \times \rho^{2.57}$ 。

4) 通过对轻质泡沫混凝土的电镜扫描观察其微观结构组成得知轻质泡沫混凝土的密度和强度随泡沫注入率的增加显著降低,相应气泡含量明显增大,气孔分布逐渐分布不均匀,孔壁随之变薄。

参考文献:

- [1] 张新全,张丽丽,高胜雷,等. 泡沫剂性能检测装置研制及性能研究[J]. 市政技术,2019,37(4):251-255.
ZHANG X Q,ZHANG L L,GAO S L,et al. Development and performance test of foaming agent properties testing device[J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37 (4): 251-255.
- [2] 王其伟,周国华,李向良,等. 泡沫稳定性改进剂研究[J]. 大庆石油地质与开发,2003,22(3): 80-81.

- WANG Q W, ZHOU G H, LI X L, et al. Study on foam stability improver[J]. Petroleum Geology & Oil Field Development In Daqing, 2003, 22(3): 80-81.
- [3] 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.
- LI M, YAN S H, LI S, et al. Study on structural mechanical behavior of secondary backfill of high filled open cut tunnel with foamed lightweight soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(2): 135-142.
- [4] 李应权, 朱立德, 李菊丽, 等. 泡沫混凝土配合比的设计[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2011, 26(2): 1-5.
- LI Y Q, ZHU L D, LI J L, et al. Study on mix ratio design of foamed concrete[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2011, 26(2): 1-5.
- [5] 张亚梅, 孙超, 王申, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的性能和孔结构[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(8): 54-63.
- ZHANG Y M, SUN C, WANG S, et al. Properties and pore structure of foam concrete with different density[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(8): 54-63.
- [6] 方永浩, 王锐, 庞二波, 等. 水泥-粉煤灰泡沫混凝土抗压强度与气孔结构的关系[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 621-626.
- FANG Y H, WANG R, PANG E B, et al. Relationship between compressive strength and air-void structure of foamed cement-fly ash concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 621-626.
- [7] 徐琳琳, 余金, 蒋亚龙, 等. 泡沫性能测试及其在富水砂层渣土改良中应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 345-353.
- XU L L, YU J, JIANG Y L, et al. Testing of foam properties and its application in soil conditioning for water bearing sandy grounds[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 345-353.
- [8] SHAH S N, MO K H, YAP S P, et al. Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105103.
- [9] 周云东, 王勇, 黎冰, 等. 气泡混合轻质土试样制备研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4413-4420.
- ZHOU Y D, WANG Y, LI B, et al. Study of the preparation of air-foam treated lightweight soil samples[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4413-4420.
- [10] 严科, 赵军涛, 李晓菡, 等. 不同加载条件下泡沫轻质土力学特性试验研究[J]. 市政技术, 2022, 40(10): 6-12.
- YAN K, ZHAO J T, LI X H, et al. Experimental study on mechanical properties of goamed lightweight soil under different loading[J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(10): 6-12.
- [11] 李婧. 泡沫混凝土密度与抗压强度试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1327-1331.
- LI J. Experimental study on density and compressive strength of foamed concrete[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 1327-1331.
- [12] 嵇鹰, 张军, 武艳文, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 3657-3662.
- JI Y, ZHANG J, WU Y W, et al. Influence of fly ash on void and compressive strength of foam concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11): 3657-3662.



第一作者:周宇航(2000—),男,硕士研究生,研究方向为地铁盾构渣土改良及泡沫混合土。E-mail:2278830491@qq.com。



通信作者:罗如平(1989—),男,副教授,博士,研究方向为地基基础及隧道。E-mail:luo.ruping@outlook.com。

(责任编辑:姜红贵)