

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, 罗如平^{1,2}, 朱碧堂^{1,2}, 余金³

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西南昌 330013; 2. 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: 轻质泡沫混凝土在岩土工程领域中得到了推广应用, 但在泡沫剂及其溶液的优选、最优配比方面研究相对较少。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, 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。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孔大小离散性明显增大; 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平缓递增型指数关系, 并给出了对应经验计算公式。

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 **文献标识码:** A

Comparison tests on the performance of foam agents and mixture proportion tests of light weight foam concrete

Zhou Yuhang¹, Luo Ruping^{1,2}, Zhu Bitang^{1,2}, Yu Jin³

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

Abstract: Lightweight foam concrete has been widely applied in the field of geotechnical engineering in the last decade or so, but relatively little research has been carried out on the selection and optimal proportioning of foam agent solutions. In this paper, the surface tension, foaming multiplicity, half-life and stability of the foam produced by several typical foam agents are studied systematically, and the performance indicators and concentration values of the preferred foam agents are proposed. In this paper, the surface tension, foaming rate, half-life and foam stability of several typical foam agents were systematically studied, and the optimum performance index and concentration value of foam agents were proposed. On this basis, with the C40 soil-cement mix ratio as reference, the prepared foam and C40 cement grout were mixed according to different injection volume ratios, and the dry and wet weights were measured to determine the ratio scheme of lightweight foamed concrete under different design weights. Furthermore, unconfined compressive strength tests were carried out to determine the compressive strength values of lightweight foamed concrete specimens under different stress conditions, and scanning electron microscopy tests were conducted to understand the microstructure of the specimens. The results show that the optimal concentration of foam agent is about 3%, foaming rate is 25, surface tension is 32 mN/m, half-life is 15 min. The density and strength of lightweight foamed concrete decreased significantly with the increase of foam injection rate, and the dispersion of bubble population and pore size increased significantly. The dry density of lightweight foamed concrete has a decaying exponential relationship with the injection rate, and the unconfined uniaxial compressive strength has a non-gentle and progressive exponential relationship with the dry density of lightweight foamed concrete. The empirical formulas can be fitted by nonlinear curves to be applied in geotechnical engineering.

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

轻质泡沫混凝土是用发泡系统将泡沫剂进入发泡装置进行发泡, 并将水泥浆液和泡沫均匀混合, 进行浇筑成型的一种充满大量封闭孔隙的新型轻质材料, 它具有密度较轻、防火隔音、渗透率低等特点^[1-4]。

近十余年来, 轻质泡沫混凝土在建筑及岩土工程领域也获得了推广应用。王武祥等^[6]在山西引黄工程联结段洞穿管回填灌浆中, 采用密度为 1200 kg/m³ 的泡沫轻质土进行回填, 检测表明轻质泡沫混凝土基本能充填整个洞穿管与隧洞间的空隙。陈文平等^[7]将轻质泡沫混凝土用于浏醴高速公路桥

梁台背回填,可大幅降低填土荷载、抑制软基的沉降和侧移和提高路堤的稳定性。李明等^[8]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,减轻隧道顶面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^[9]对轻质泡沫混凝土配比进行了 200~500 kg/m³ 的设计。张亚梅等^[10]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^[11]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。

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。

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,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^[12]。

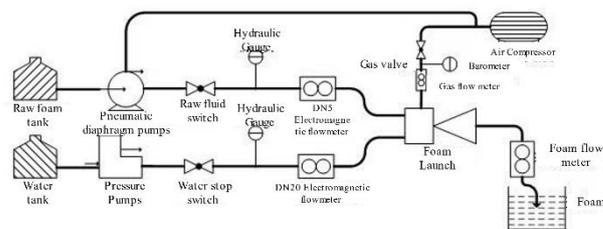


图 1 发泡装置系统

Fig. 1 Foaming device system

1.2 表面张力性能测试

表面张力是影响泡沫剂泡沫稳定性的一个重要因素。与此同时,泡沫剂溶液的表面张力越小,泡沫剂就越容易起泡,因此表面张力是在制备轻质泡沫混凝土中一项重要的指标。

由于试验泡沫剂过于粘稠,无法直接使用表面张力仪对其进行测定。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。

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, MCM)。且两种泡沫剂溶液均符合此趋势。因此,由表面张力试验可以得出,合理的泡沫剂浓度约为 0.05%。

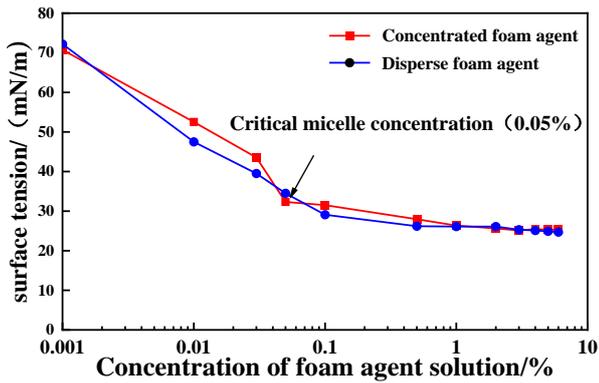


图 2 不同浓度泡沫溶液表面张力值

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

1.3 稳泡性测试

在实际施工过程中，需要将制备好的泡沫和水泥浆液充分搅拌，从而得到符合要求的浆液，而在泡沫的转移与搅拌过程中往往伴随着泡沫的损失，因此泡沫存活时间的长短是一项必不可少的指标。本文根据国标 GB/T7162-94 和 ISO696-75 标准，选择了罗氏泡沫仪来作为此次测定泡沫稳定性和起泡能力^[13]。

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%。

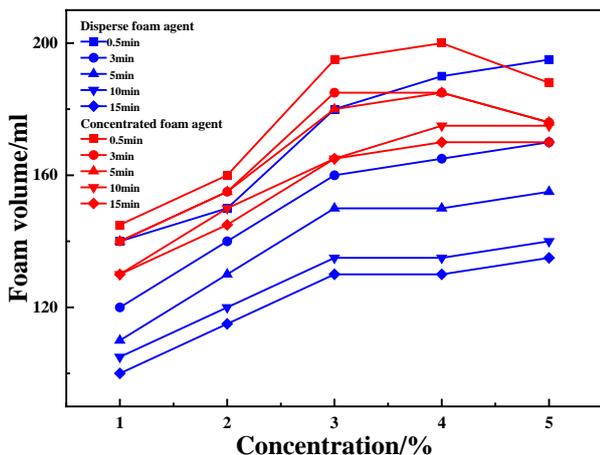


图 3 不同泡沫溶液浓度下泡沫体积

Fig.3 Foam volume at different foam solution concentrations

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, FER) 为单位体积的发泡剂溶液发出的泡沫体积的比值，计算公式如下：

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

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，泡沫剂溶液往往需要达到良好的发泡状态，综合以上考虑，泡沫剂发泡倍率通常为 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。因此根据此次发泡倍率测试试验得出，的泡沫剂溶液的最优发泡浓度为 3%。

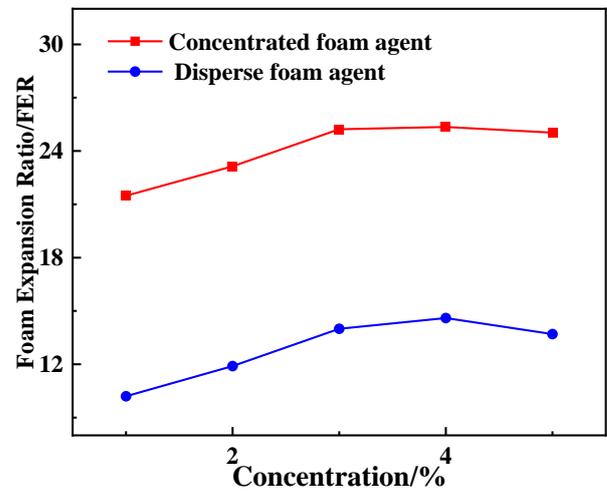


图 4 不同发泡剂溶液浓度下泡沫发泡倍率

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，因此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。

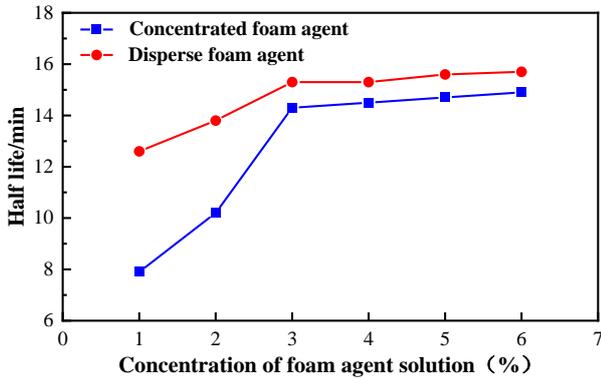


图 5 泡沫半衰期与浓度图

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。

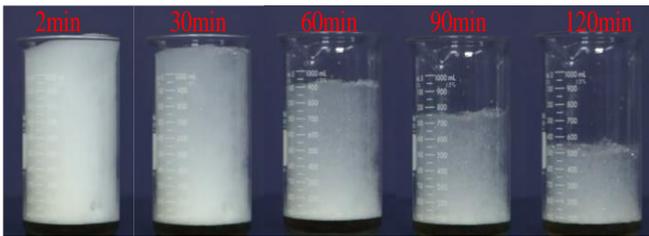


图 6 泡沫破灭过程

Fig.6 Process of bubble burst

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 32 mN/m、半衰期为 15 min。

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^[14]。

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^[15-16]。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，并且当在泡沫与水泥浆液混合后是以体积的方式呈现的，并且根据 JG/T266-2011《泡沫混凝土》，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。其中，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, FIR）来表征将泡沫混合入水泥浆液的一个值，即 $FIR = \frac{V_{\text{泡沫}}}{V_{\text{水泥浆液}}} \times 100\%$ 。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，并且在可以看出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/m 左右。根据图 7 试验结果可以得出：

1) 此轻质泡沫混凝土在 FIR 达到 1 之前密度降低速率明显，而后干密度减少速率随 FIR 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 FIR 确定轻质泡沫混凝土干密度的经验公式, 即:

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

式中 ρ 为轻质泡沫混凝土干密度 (kg/m^3), FIR 为泡沫注入率。

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 FIR 的变化特性。

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

Cement groutin g/mL	Foam injection rate/%	Foam volume/m L	Dry density/ (kg/m^3)	Wet density/ (kg/m^3)
7 200	0%	0	1890	1900
7 200	12.5%	900	1750	1755
7 200	25%	1 800	1510	1520
7 200	37.5%	2 700	1280	1295
7 200	55.6%	4 000	1050	1055
7 200	62.5%	4 500	1010	1025
7 200	82.5%	5 940	820	845
7 200	111.1%	8 000	770	795
7 200	125%	9 000	620	635
7 200	166.7%	12 000	550	575
7 200	187.5%	13 500	480	505
7 200	222.2%	16 000	450	465
7 200	250%	18 000	390	425
7 200	333.3%	24 000	380	405

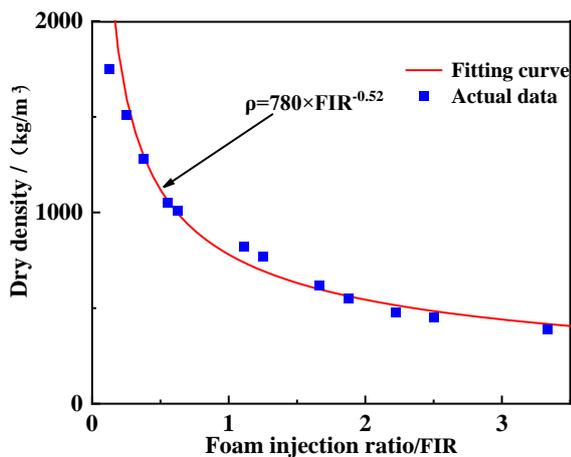


图 7 轻质泡沫混凝土密度与泡沫体积注入比关系

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

分别选取各组中三块养护 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^[17]。图 8 所示可以看出:

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, 而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/m^3 之间可令其作为保温材料, 在 800 kg/m^3 左右时用作非结构承件, 而 1 200 kg/m^3 又可作为半结构承件, 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^[18-19]。

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:

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

式中: σ 代表轻质泡沫混凝土无侧限单轴抗压强度, MPa; ρ 代表轻质泡沫混凝土干密度, g/cm^3 。

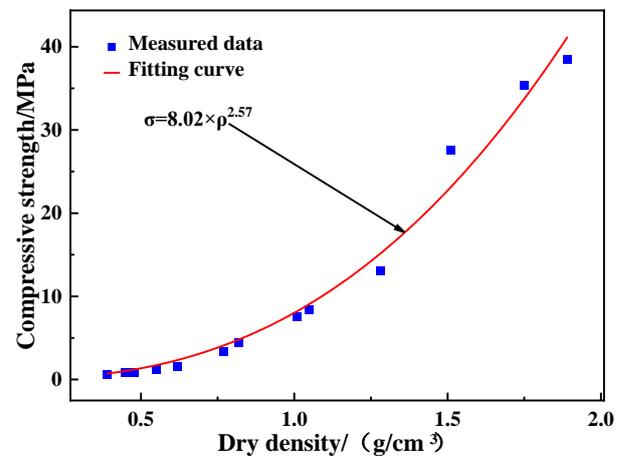


图 8 轻质泡沫混凝土抗压强度与干密度关系

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

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。

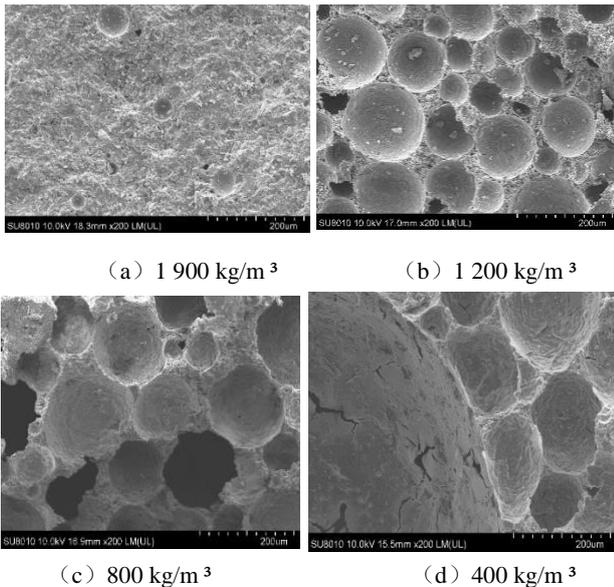


图9 不同密度等级轻质泡沫混凝土气孔大小及分布二维平面图

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

由图9可见, 1900 kg/m³的纯水泥土密实度很高, 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 µm到500 µm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 kg/m³, 1200 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^[20-21]。

3 结论

通过一系列室内试验对泡沫剂性能、优选溶度及泡沫轻质土的配比方案、强度特性进行了研究, 得到如下试验结论:

1) 通过对两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, 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 FIR 确定轻质泡沫混凝土密度的经验公式 $\rho = 780 \times FIR^{-0.52}$;

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] CHICAL, ALZATE A. Cellular concrete review: New trends for application in construction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 637-647.
- [2] 任先艳, 张玉荣, 刘才林等. 泡沫混凝土的研究现状与展望[J]. 混凝土, 2011(02),256(02): 139-141.
REN X Y, ZHANG Y R, LIU C L, et al. Present status and prospects of research on foam concrete[J]. Concrete, 2011, 256(02): 139-141.
- [3] 张磊, 杨鼎宜. 轻质泡沫混凝土的研究及应用现状[J]. 混凝土, 2005(08): 44-48.
ZHANG L, YANG D Y. State of study and application of light weight foam concrete[J]. Concrete, 2005(08): 44-48.
- [4] 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(04): 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(04): 251-255.
- [5] Samson G, Lanos C, Phelipot-Mardele A. A review of thermomechanical properties of lightweight concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69(4): 201-216.
- [6] 王武祥, 刘宁, 罗栓定. 泡沫混凝土在引黄工程洞穿管回填中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(04): 12-15.
WANG W X, LIU N, LUO S D. Application of foaming concrete for refilling the empty space between tunnels and PCCP in engineering of conducting the huanghe river's water[J]. China Concrete And Cement Products, 2002(04): 12-15.
- [7] 陈文平, 谭存茂, 杨和平. 气泡混合轻质土在台背回填施工中的应用[J]. 公路, 2012(11): 162-166.
CHEN W P, TAN C M, YANG H P. Application of air bubble mixed light soil in abutment backfill construction[J]. Highway, 2012(11): 162-166.
- [8] 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(02): 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.
- [9] 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(02): 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, 2011, 26(02): 1-5.

- [10] 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(08): 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(Natural Science Edition), 2020, 43(08): 54-63.
- [11] 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(04): 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(04): 621-626.
- [12] 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.
- [13] 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(03): 80-81.
WANG Q W, ZHOU G H, LI X L, et al. Study on foam stability improver[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development In Daqing, 2003, 22(3): 80-81.
- [14] Shah S N, Mo K H, Yap S P, et al. Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105103.
- [15] 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
- [16] 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. 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.
- [17] AMRAN M, ONAIZI A M, FEDIUK R, et al. An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications—A review[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01096.
- [18] WU K, SHAO Z, QIN S. A solution for squeezing deformation control in tunnels using foamed concrete: A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119539.
- [19] Zhang Z, Provis J L, Reid A, et al. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction[J]. Construction and Building Materials, 2014, 56: 113-127.
- [20] 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.
- [21] 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, 博士, 硕士生导师, 研究方向为地基基础及隧道。E-mail: luo.ruping@outlook.com。