基于河道淤泥气泡混合土微观构造特征的发泡剂适用性研究

李荣贺，顾欢达

（苏州科技大学 土木工程学院，江苏 苏州 215011）

摘　要：[目的] 研究发泡剂种类及气泡生成方式对河道淤泥气泡混合土(FMLSS)的适用性，为环境保护和河道淤泥的资源化利用提供支持。[方法] 从微观和宏观角度对不同 FMLSS 进行考察，对比微观构造特征的差异性，以及不同微观构造特征对各类河道淤泥气泡混合土物理力学性能的影响。[结果] ①不同类型 FMLSS 微观构造差异性受气泡掺量影响显著，受水泥掺量影响相对较小。②同等气泡掺量下，双氧水(H 型)消泡严重，且制备的 FMLSS 内部含有少量大气孔且分布不均匀。同等密度下，大气孔含量更多，制成的 FMLSS 质量较差。③复合类发泡剂 F(F 型)和阴离子型发泡剂 $K_{12}A$(K 型)在料浆中稳定性较好，制成的 FMLSS 微孔分布均匀性较好，但 F 型发泡剂成孔尺度较小且分布均匀，表现出良好的强度变形特性。[结论] 先发泡工艺优于后发泡工艺，F 型发泡剂在工程制备河道淤泥气泡混合土时适用性较好。

关键词：河道淤泥；发泡剂；适用性；物理力学特性；微观构造

文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2018)06-0144-07　　**中图分类号**：TU411

文献参数：李荣贺，顾欢达. 基于河道淤泥气泡混合土微观构造特征的发泡剂适用性研究[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：144-150. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 06. 022. Li Ronghe, Gu Huanda. Applicability of foaming agent based on microstructure characteristics of foamed mixture lightweight soil of river sludge[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 144-150.

Applicability of Foaming Agent Based on Microstructure Characteristics of Foamed Mixture Lightweight Soil of River Sludge

LI Ronghe, GU Huanda

(*Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou, Jiangsu* 215011, *China*)

Abstract: [Objective] The applicability of different types of foaming agents and different bubble preparation methods in the preparation of foamed mixture lightweight soil of sludge(FMLSS) was studied in order to provide reference for environmental protection and utilization of river sludge. [Methods] From the micro and macro perspectives, different channels of silt and bubble mixed soil were investigated. The microscopic characteristics of different mixed soil of river silt and bubble was compared, and the influences of different microstructural characteristics on the physical and mechanical properties of various river silt mixed soil was anayzed. [Results] ① The microstructural differences of different types of river silt and bubble mixed soil were significantly affected by the amount of air bubbles and were less adffected by cement content. ② When the amount of air bubble was constant, the bubble would be burst seriously by hydrogen peroxide(H type), and the prepared soil with mixed river silt and bubble by hydrogen peroxide contained a small amount of big atmospheric pores and the distribution was uneven. Under the same density, the air pore content of H type river silt and bubble mixed soil was more, and the quality of the mud-bubble mixing soil was worse. ③ The distribution of FMLSS micro pores made by compound foaming agent(F type) and anionic foaming agent $K_{12}A$(K type) were better. But the pore size of F type foaming agent was small and the distribution was uniform and good strength and deformation characteristics were shown. [Conclusion] The first foaming process is better than the later foaming process. The F type foaming agent has better applicability in the preparation of foamed mixture lightweight soil using of river sludge.

Keywords: **river sludge; foaming agent; applicability; physical and mechanical properties; microstructure**

收稿日期：2018-05-24　　**修回日期**：2018-06-22

资助项目：国家自然科学基金项目“河道淤泥气泡混合土的力学性质及破坏机理研究”(51378327)

第一作者：李荣贺(1989—)，男(汉族)，江苏省徐州市人，硕士研究生，研究方向为软土地基处理及技术应用研究方面。E-mail：lrh3050@sina. com。

通讯作者：顾欢达(1958—)，男(汉族)，江苏省无锡市人，博士，教授，主要从事软土地基处理技术及原理方面的工作。E-mail：ghdgx@163. com。

为了疏通河道,保证水利水运工程的正常运行和环境改善,需要对河道网定期或不定期疏浚,如何避免疏浚淤泥很可能造成二次污染及再利用,已成为各界关心的问题。

为保护环境及淤泥的资源化利用,国内外学者对此进行了可行性探索。包建平、顾欢达等[1-3]对淤泥的处理技术和工程性质进行探讨。在国外,横田圣哉等[4-6]学者对气泡轻质土物理力学性质的研究起步较早;国内关于与气泡轻质土的研究,原料土主要为沙土和黏土;淤泥混合轻质土,轻质材料以塑料泡沫颗粒居多。以淤泥作为原料土,气泡作为轻质材料的相关研究较少。郑少午、姬凤玲等[7-13]对以 EPS 颗粒为轻质材料的轻质土进行研究,考察了其不同因素对其工程性质的影响及配方优化;何国杰,顾欢达等[14-16]考察了以气泡为轻质材料的轻质土,考察了其物理力学特征及耐久性;事实上,土体宏观性能的发挥与土体内部微孔微观分布特征相关。TTOVEY 等[17]对不同土体微观构造技术进行了研究,主要包括定向及定量方面;申春妮等[18]从微观角度对 Q_2 黄土特殊的湿陷性进行解释;顾欢达等[19-20]分别用压汞试验和图像处理技术考察了不同配比条件对河道淤泥气泡混合土微观构造的影响,以及微观构造与宏观性能的相关性。发泡剂作为河道淤泥气泡混合土主要发泡材料,其制备气泡的性能直接对混合土性质产生影响,目前,市场上流通的发泡剂品种繁多,而不同发泡剂制备的气泡性能各不相同,甚至差异很大,由其制备的 FMLSS 内部微孔结构特性的差异,以及对宏观特征的影响值得探讨。

1　材料与方法

为考察发泡剂的适用性,前发泡选用第 2 代表面活性剂类 K_{12} A、第 4 代复合类发泡剂 F,后发泡选用双氧水作为轻质材料,利用上述不同发泡剂类型制作 FMLSS,通过比对试验,考察其适用性。

FMLSS 依照气泡的制备方式,可以分为后生成式和前生成式两种。后发泡法通常直接将发泡剂溶液,倒入混合土料浆中,通过机械搅拌作用将发泡剂溶液分散于料浆中,利用双氧水在碱性环境下易分解为氧气,同时双氧水自身还会电离出氢气,利用生成的氧气和氢气作为气源,在料浆中产生气泡,从而制备成轻质土;前发泡将由发泡装置预制的气泡加入搅拌均匀的混合土料浆中搅拌均匀制成气泡混合土,为后述方便起见,将 K_{12} A 制备的 FMLSS 记为 K 型,复配类发泡剂制备的 FMLSS 记为 F 型;后发泡型中,将双氧水制备的 FMLSS 记为 H 型。

1.1　试验原料及配比设计

以苏州市某河道淤泥质土为原料土,其基本物理指标如表 1 所示。

表 1　原料土的物理性质指标

密度 ρ/(g·cm^{-3})	含水量 ω/%	相对密度 d_s	塑限 ω_P/%	液限 ω_L/%
1.71	52.05	2.65	26.30	42.00
孔隙比 e	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
1.36	15.7	1.67	5.0	1.31

试验所用的前发泡型发泡剂包括 K12A(阴离子表面活性剂)和复合类发泡剂(F 型),各前发泡型发泡剂的理想性能如表 2 所示;后发泡型发泡剂为浓度 30%工业级双氧水,碱性条件下具有很强的氧化性,产生气体;试验用水为自来水,水泥选用 PO42.5 的普通硅酸盐水泥。以干土质量为试验原料掺量控制指标。气泡掺入比 ω_e 为气泡质量(后发泡为双氧水质量,)与干土质量之比,水泥掺入比 ω_c 为水泥质量与干土质量之比,原料土含水量 ω 指掺入水和原料土原有水的质量之和与干土质量之比。试验配合方案如表 3 所示。

1.2　试样制备及试验方法

根据试验设计配比,称取原料土、水,达到设计含水量,利用搅拌机将土水混合均匀;加入水泥搅拌均匀,形成水泥土料浆,再加入预制的气泡(前发泡型)或双氧水(后发泡型),通过搅拌直至气泡或双氧水完全融入到水泥土料浆中。将混合料装入内径 3.91 cm,高 7.8 cm 的模具,浆体分 3 层装入模具,每层沿模具 4 个方向各震动 30 下,保证密实,每个试样至少制备 3 个平行样,在标准养护室中养护 24 h 后进行脱模,用保鲜膜将土样封闭,避免水分蒸发,在标准养护条件下,养护至试验龄期。

表 2　各前发泡型发泡剂的性能

发泡剂种类	K_{12}A	复合类发泡剂(F 型)
发泡剂浓度/%	0.90	1.15
发泡倍数	29	21
半衰期/min	40	106

表 3 不同材料试验方案

项 目	试验设计配比			龄期/d	混合土类型
	水泥掺入比/%	气泡掺入比/%	含水量/%		
无侧限试验	20,25,30,35	0,1,2,3,4,5	110	28	F 型
密度试验	20,25,30,35	0,1,2,3,4,5	110	28	K 型
	25	0,1,2,3,4	110	28	H 型
微观构造特	25,35	0,1,2,3,4	110	28	F 型
性分析试验	25,35	0,1,2,3,4	110	28	K 型
	25	0,1,2,3,4	110	28	H 型

(1) 密度试验。为测定其密度,对每个配比制成的 3 个试样称量其质量,测得密度 ρ 为:

$$\rho=M/V \tag{1}$$

式中:V——试样体积(cm^3); M——试样质量(g),为减少试验误差,以试样的密度偏差率为控制指标,当一组平行样密度偏差率小于 1%时,认为满足制样要求。

(2) 强度试验。主要采用无侧限抗压强度仪,试验中轴向应变速率约为 1 mm/min。

FMLSS 微观构造特性分析试验:将养护 28 d 的试样选择观测断面进行图像摄取并分析,为了减少样本误差,每个试样在 2,4,6 cm 这 3 个高度上各选 3 个观测区域摄取图像(图 1),再通过图像处理软件 Image J 对图像进行预处理及二值化处理,提取数据对观测区域的微孔结构进行统计分析,最后计算平均值。

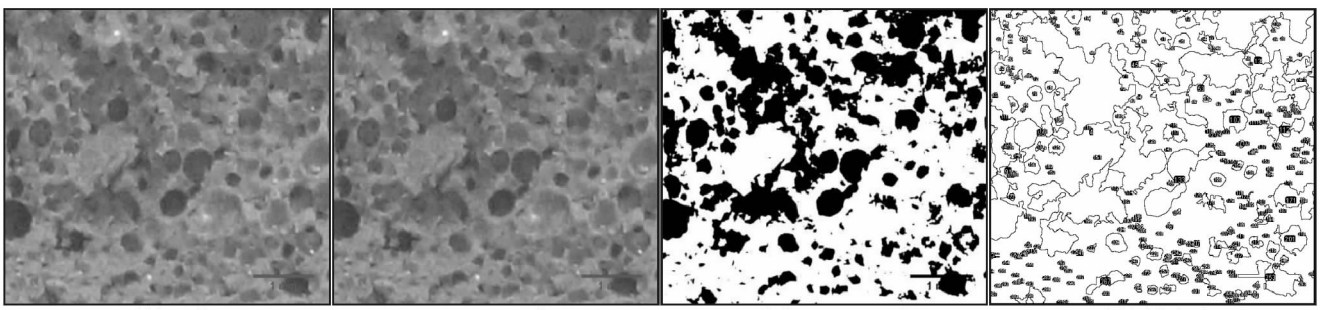


图 1 图像处理及阈值分割

为了对 FMLSS 微观构造特征进行定量分析,采用以下定义的微孔分布特征参数:

微孔面积百分比 M:由 Image J 直接读出,微孔总面积与整个断面图像的总面积之比。

$$d=\left(\frac{4\cdot A}{\pi}\right)^{0.5} \tag{2}$$

$$A=\frac{1}{N}\cdot(A_1+A_2+A_3+\cdots+A_n) \tag{3}$$

$$S=\frac{N_{0.1}}{N_{0.01}} \tag{4}$$

式中:d——平均等效孔径(mm); A——微孔平均面积(mm^2); A_1,A_2,A_3,…,A_n——单个微孔的面积(mm^2); S——大小微孔数量比; $N_{0.1}$,$N_{0.01}$——大于 0.1 mm 及小于 0.01 mm 的微孔数量。

2 试验结果分析

2.1 微孔分布特征分析

为定量的考察不同 FMLSS 内部的微孔尺度及微孔分布的均匀性,引用大小微孔数量比 S 和平均等效孔径 d,平均等效孔径 d 越大,表明土体内部气孔尺度越大;大小微孔数量比 S 越大,表明土体中小气孔中含有大气孔数量越多,反映了土体内部气孔分布的不均匀性。图 2 为微孔分布特征参数随与气泡掺入比的关系。由图 2 可知,随着气泡掺量增大,各微观构造参数随之增大。此结果表明,掺入气泡越多土体内部孔结构尺度增大、大孔数量增多、孔径分布趋于不均匀。进一步考察可知,不同类型发泡剂孔结构特征有所区别,H 型发泡剂在气泡混合土制备过程中消泡明显,其微孔数量及平均孔径均明显少于其他类型发泡剂,说明 H 型发泡剂形成大气孔数量较少,总体上相比较 H 型发泡剂轻质化效果较差。土中气泡分布特征直接影响混合土密度,从图 3 可以看出不同的发泡剂对 FMLSS 密度影响明显,K 型与 F 型密度小于 H 型,随气泡掺入量的增大 FMLSS 密度呈减小趋势;水泥掺量对密度有一定的影响,随水泥掺量的增大密度提高,与 F 型相比,在高气泡掺量下,水泥掺

量的增大对 K 型影响较为明显,原因为水泥掺量的增大使料浆的黏性增大,在相同高气泡掺入比条件下,稳定性差的 K 型自身易消泡,同时气泡接触的几率增大,气泡不均匀导致气泡间的融合造成大尺度气泡过多,气泡稳定性降低,最终消泡过多将使成型后的 FMLSS 密度增大,掺入气泡作为 FMLSS 轻量化要素,气泡在料浆中的稳定性对 FMLSS 密度影响明显。

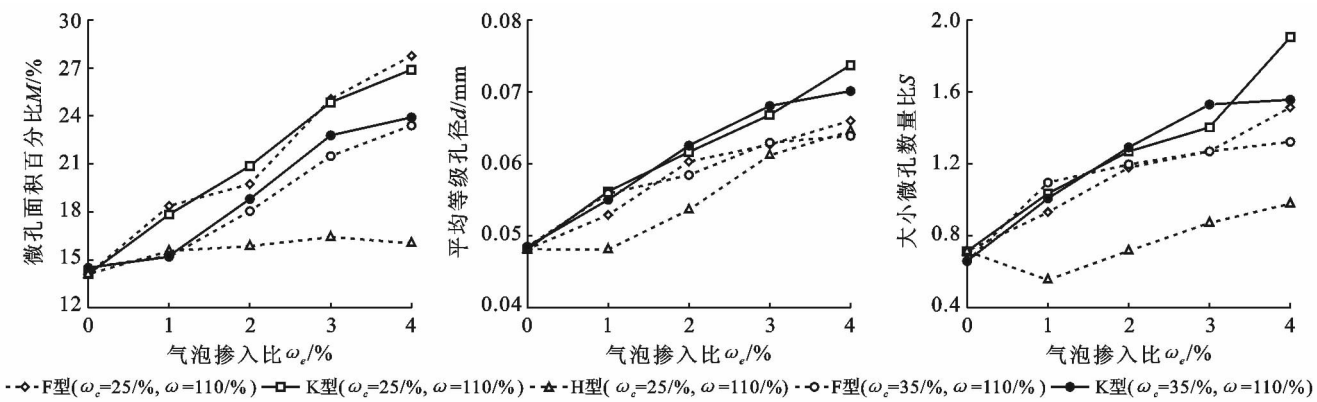


图 2　微孔分布特征参数

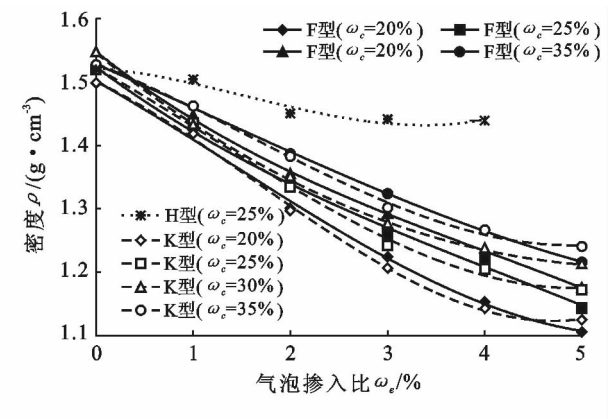


图 3　3 种类型 FMLSS 密度对比

为了说明不同类型发泡剂对 FMLSS 密度的影响机理,可以根据图 4 所示的孔径分布曲线阐明。孔径分布曲线根据 Image J 读取土体中各微孔面积,通过换算得出小于某等效孔径的微孔累积百分比,得出孔径分布曲线,曲线右移表明孔径尺度越小;曲线越陡,孔径分布越均匀。从图 4 可以看出,H 型曲线位于 K 型和 F 型曲线右侧,根据图像观测,H 型 FMLSS 土体内部以细小孔隙为主,其原因在于 H 型发泡剂制备过程中消泡较多,大部分孔隙为土粒间的毛细孔,而非由气泡所形成的气孔,因此其密度大于 K 型和 F 型,但同时 H 型 FMLSS 中孔径超过 0.2 mm 大孔含量较 K 型和 F 型多,此结果说明 H 型 FMLSS 中孔径分布均匀性较差。而 K 型和 F 型曲线位于左侧,曲线较为平缓,说明平均孔径较大。对比 K,F 型曲线可以发现,K 型在 F 型的左边,且曲线较为平缓,图 4 所示,在气泡掺量较小时,两条曲线间距较小,随气泡掺量增大,K 型曲线左移,且更为平缓。此结果表明,在两者密度差异不大条件下,K 型的平均孔径增大,且分布更不均匀。同时,随水泥掺量的增加,曲线右移,即平均孔径减小。

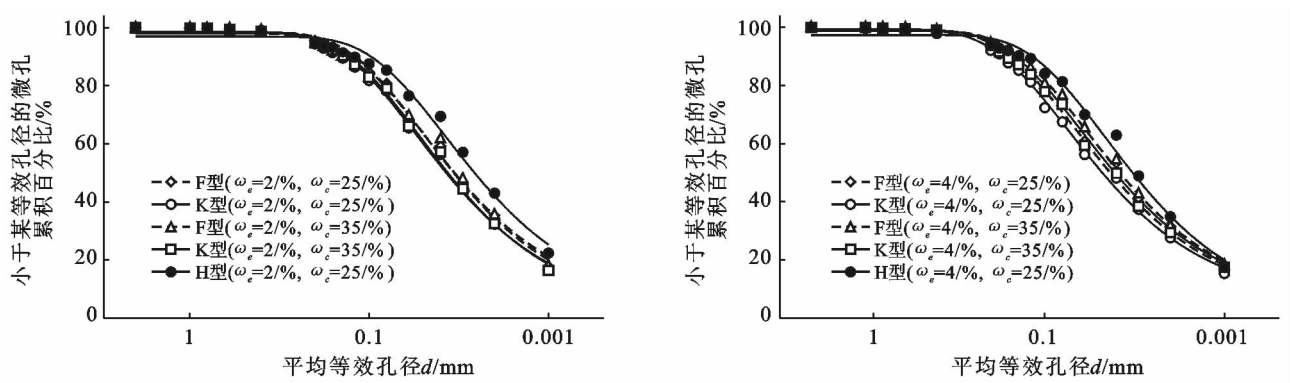


图 4　FMLSS 微孔孔径分布曲线

对比 K 型与 F 型发泡剂,由图 2 可以看出利用气泡置换土体的效果两者差异较小;若进一步考察,在同等气泡掺量条件下,F 型的平均等效孔径 d,大小微孔数量比 S 均较 K 型要小,则表明与 K 型相比,

F 型发泡剂成孔分布较为均匀。随水泥含量增大土中微孔数量减小、轻质化效果减弱，但平均等效孔径及孔径分布相差不大，表明水泥掺量对混合土微观构造参数的影响相对较小。

2.2 微孔分布特征与力学性质的相关性分析

在工程应用中，除了轻量化指标外，强度发挥是衡量 FMLSS 能否满足工程要求的重要指标。在设计上为了适应低地基承载力条件或降低侧向压力的轻量化要求，往往需要在满足强度发挥指标的前提下尽可能降低 FMLSS 的密度，因此，在同等强度条件下 FMLSS 密度越小越有利。FMLSS 的强度发挥与变形性质往往与混合土中的孔结构分布特性密切相关。根据前述分析结果可知，水泥对 FMLSS 微观构造差异性影响相对较小，以下重点考察水泥掺量为 25%时，3 种不同类型发泡剂形成的 FMLSS 强度发挥的差异性。

对不同气泡掺量条件下 FMLSS 强度发挥与微孔结构特征参数的相关性进行分析(图 5)。由图 5 可以看出，随气泡掺量的增大，土体内成孔尺度及孔径分布产生了变化，随着平均等效孔径及大孔径微孔数量的增大，FMLSS 的抗压强度呈降低趋势。其中，H 型发泡剂在后发泡过程中，除了消泡现象比较明显导致气泡数量明显减少密度增大外，还较易在土体内部形成少量尺度超过 0.5 mm 较大的气孔，结果在硬化后的土体内部形成了较大空腔，容易导致土体受载后内部应力分布不均匀。

因此，H 型发泡剂制成的 FMLSS 其内部孔结构分布不均匀，成型后的气泡混合土不仅密度大、轻质化效果差，而且强度发挥较差。对比前发泡型 F 型与 K 型的试验结果可知，在气泡掺量较小的情况下，虽然 F 型发泡剂成型后的混合土微孔分布均匀性较 K 型要好，但在气泡掺量较少的情况下，土骨架体积占比较大，微孔结构分布的少量差异对土骨架强度发挥的影响并不明显，显示两者的强度发挥在相同气泡掺量条件下比较接近。随着气泡掺量的增大，混合土中土骨架占比逐渐减少，微孔结构分布性对气泡混合土的影响逐渐增大。对比两者的变化趋势可以看出，K 型发泡剂成型后的混合土微孔分布均匀性较差，随着气泡掺入量增大、微孔数量增多，对混合土强度发挥的削弱作用更为显著，相比之下 F 型发泡剂成型后的混合土内部成孔分布比较均匀、气孔尺度较小、大孔径微孔数量较少，因此，不仅轻质化效果较好，随气泡掺量增大混合土强度下降趋势也没有其余两种混合土显著。因此，在轻质化效果及强度发挥方面，相比 H 型及 K 型，F 型发泡剂在制备 FMLSS 时显示更好的适用性。

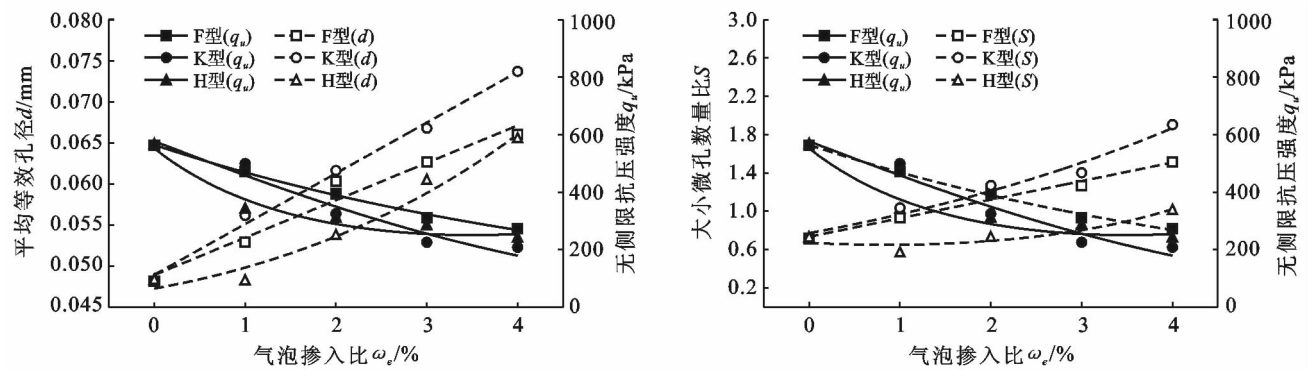


图 5 气泡条件下微孔参数与强度相关性

为定量考察不同密度等级下，不同种类 FMLSS 强度发挥受微观构造差异性的影响，分别对强度及 d，S 随密度的变化进行非线性拟合，强度方面，F 型、K 型、拟合优度为：0.993 02，0.975 35；d 方面，F 型、K 型、拟合优度为：0.974 52，0.944；S 方面，F 型、K 型、拟合优度为：0.941 66，0.975 35。由于 H 型离散性较大，图中趋势线仅作为参考。图 6 显示，H 型轻质化效果较差，密度等级为 1.43～1.51 g/cm^3，H 型离散性较大，d 最大达到 0.065 mm 远高于 F 型及 H 型，同等密度条件下内部过大孔径微孔，导致其强度发挥明显低于其它两种发泡剂制成的 FMLSS。而 F 型与 K 型相比，在气泡掺量较小时，土中微孔数量较少的情况下，如密度在 1.45～1.51 g/cm^3 范围内，F 型与 K 型 d 相差量 0～0.003 mm，S 相差量在 0～0.104，两者微观构造差异性较小，对 FMLSS 强度发挥影响较小；随着气泡掺量增大，土中微孔分布均匀性对 FMLSS 强度发挥产生的影响趋于显著，如在1.20～1.45 g/cm^3，强度差异性呈现先增大后减小的趋势，从趋势线可以看出，随密度的减小，F 型 d 与 S 小于 K 型，且两者差异性有增大的趋势，在一定的强度储备

下,F 型良好的微孔尺度及均匀性,更有利于强度的发挥,强度方面远优于 K 型,但随着密度的继续减小,土骨架削弱严重,强度储备降低,微观构造的差异性影响相对减弱,上述结果更进一步说明,由于 F 型发泡剂制备的 FMLSS 具有较好的微孔分布均匀性,对于制备 FMLSS 显示更好的轻质化效果及工程适用性。

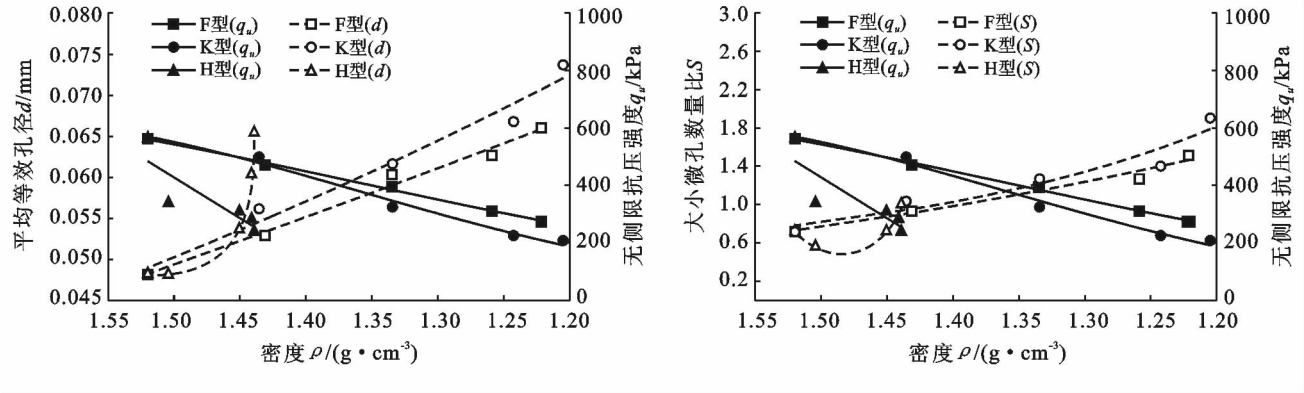


图 6　密度条件下微孔参数与强度相关性

图 7 为不同类型 FMLSS 应力应变关系,整体上显示,不同气泡掺量,H 型其破坏应变较小,维持在 1%左右,强度达到峰值后,迅速降低,呈脆性破坏,弹性阶段曲线斜率与前发泡型相比较小,整体变形特性较前发泡型差。前发泡型中,随气泡掺入比增大,K 型和 F 型受影响较为明显,FMLSS 的弹性模量逐渐减小,破坏峰值强度逐渐降低,破坏形式由脆性破坏逐渐变成延性破坏。

图 8 为不同密度条件下破坏应变与微孔结构特征参数的相关性。结果显示,微孔构造分布的变化对同种 FMLSS 破坏应变的影响相对较小,但微孔小而分布比较均匀的 F 型,FMLSS 的破坏应变相对较高,而 H 型由于过大微孔的存在,导致土体在较小应变条件下发生破裂,总体上属于呈脆性破坏。

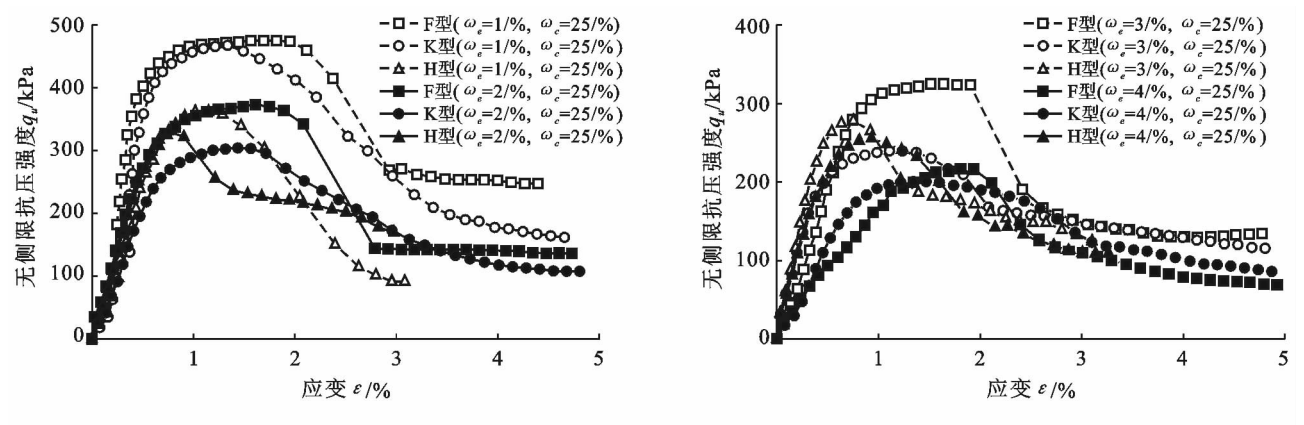


图 7　ω_c=25%时 FMLSS 应力应变关系变化

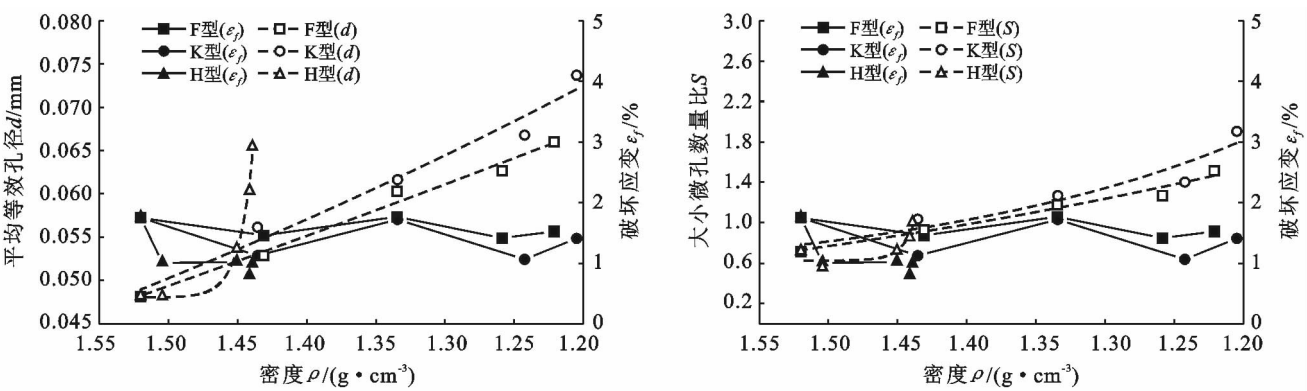


图 8　微孔参数与破坏应变相关性

为了进一步考察 FMLSS 在荷载作用下的变形特性，对 E_{50} 随密度的变化进行线性拟合，F 型和 K 型拟合优度较高在 0.9 左右，H 型由于离散性较大，拟合优度为 0.45，仅作为参考。图 9 为不同密度条件下变形模量 E_{50} 与微孔结构特征参数的相关性。考察结果显示，类似于强度发挥，同等密度条件下 H 型发泡剂制成的 FMLSS 由于微孔结构分布不均匀，土中含有的超过 0.5 mm 大孔径微孔削弱了土体的刚度，显示较小的刚度特性。对比 F 型及 K 型发泡剂制成的FMLSS，在密度范围 1.43～1.5 g/cm^3 以上时，两者 d 在 0.048～0.056 mm，S 在 0.71～1.0 相差较小，微观构造差异性小，其抵抗变形能力较为接近，E_{50} 在 60～65 MPa；但在低密度条件下，密度范围在 1.2～1.43 g/cm^3 范围内，F 型 d 在 0.052～0.066 mm，K 型 d 在 0.056～0.073 mm、F 型 S 在 0.93～1.51，K 型 S 在 1.03～1.9，F 型微孔尺度及分布均匀性明显由于 K 型，图中显示出，两者 E_{50} 差异性增大，低密度条件下，F 型抵抗变形的能力优于 K 型。在实际工程应用中具有承载力更高、变形更小的适应性。

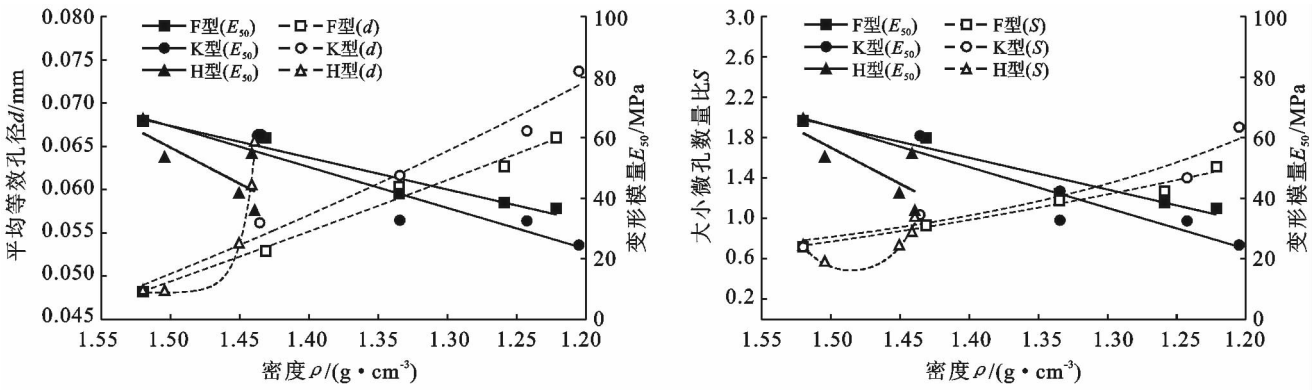


图 9 微孔参数与 E_{50} 相关性

3 结 论

(1) 微孔分布特征：不同类型 FMLSS 微观构造差异性受气泡掺量影响显著，受水泥影响较小，H 型消泡严重且内部存有过大尺度微孔，F 型较 K 型微孔尺度小而分布均匀，且随气泡掺量的增大，三者差异增大，F 型成孔优势更明显。

(2) 强度与微观构造相关性：H 型内部的过大微孔对土体强度削弱严重，F 型与 K 型对比，低气泡掺量下，微孔结构分布的少量差异对土骨架强度发挥的影响并不明显，高气泡掺量下，内部微孔尺度小而分布均匀的 F 型受力均匀，强度发挥优于 K 型。

(3) 变形特性与微观构造相关性：H 型内部过大微孔，导致土体应力集中显著，在整个配比内表现出脆性破坏；成孔效果较好的 F 型较 K 型具有良好的土骨架结构，同等密度下刚度和破坏应变均优于 K 型，表现出物理分布越均匀，力学变形特征优越。

[参 考 文 献]

[1] 徐杨，阎长虹，许宝田，等. 城市河道淤泥特性及改良试验初探[J]. 水文地质工程地质，2013，40(1)：110-114.

[2] 顾欢达，陈甦. 河道淤泥的流动化处理及其工程性质的试验研究[J]. 岩土工程学报，2002，24(1)：108-111.

[3] 徐杨，阎长虹，许宝田，等. 城市河道淤泥资源化利用的烧结制砖试验研究[J]. 土木建筑与环境工程，2013(S1)：125-129.

[4] 横田聖哉，三鳩信雄. 気泡混合軽量土を用いた人工軽量地盤[J]. 土と基礎，1996，445(480)：5-8.

[5] 矢島寿一，丸尾茂樹，小川正二. 飽和軽量土のせん断特性への気泡混入率の影響[J]. 土木学会論文集，1995，511：173-180.

[6] Tsuchida T. Development and use of foamed treated soil in port and airport project[J]. Report of Port and Harbor Research Institute, 1999, 38(2): 131-167.

[7] 郑少午，陈亮，赵旭航. 疏浚淤泥与 EPS 颗粒混合轻质土路基填料的试验研究[J]. 路基工程，2015(2)：71-76.

[8] 姬凤玲，李强疏. 浚淤泥 EPS 颗粒轻质土等向压缩变形特性研究[J]. 环境科学与技术，2016，39(S1)：16-19.

[9] 沙玲，王国才，金菲力，等. 淤泥再 EPS 颗粒混合轻质土变形特性的试验研究[J]. 工程抗震与加固改造，2013(2)：80-85.

[10] 沙玲，王国才，金菲力，等. 淤泥再生混合轻质土强度特性试验研究[J]. 南京理工大学学报，2013，37(3)：441-446.

[11] 章灿林，黄俭才，熊永松，等. 不同原料土掺量的气泡轻质土耐久性研究[J]. 武汉理工大学学报，2014，36(8)：32-36.

[12] 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(8)：32-34.

(下转第 155 页)

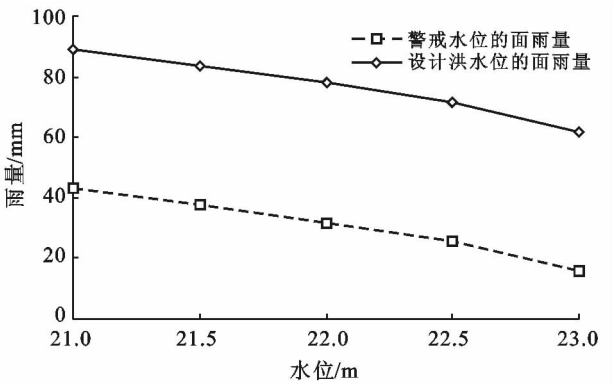


图 6　警戒水位和设计洪水水位下前期不同水位的临界面雨量

4　结 论

应用 HBV 水文模型模拟富春江流域径流量，在序列的率定期和验证期，模拟与实测的径流过程分布一致，模拟径流峰值区与大降水的实况分布比较一致，模拟与实测洪峰的平均相对误差小于 5%。经率定后的 HBV 模型在富春江流域的整体模拟效果较好。可见对于富春江流域这样面积较大，HBV 在此具有一定的适用性。

另外，通过建立降水、径流、水位三者的响应关系，确定水库在警戒水位、设计洪水位时不同前期水位的临界面雨量。该气象产品主要是针对于气象部门在暴雨灾害风险预警和评估业务中的应用研发的。当面雨量预报达到临界面雨量值时，气象部门可向水库、电力、防汛等相关单位和部门提供，雨量、径流预报信息和致灾预警信息的发布有利于水库的科学调洪和流域防洪减灾工作的开展。而对于水库来讲，雨量、径流、水位这三者的预报更加有利于水库调洪的决策需求，但因目前水库与气象部门之间尚未实时共享相关信息，气象部门暂能提供雨量和径流的实时预报产品，水位实时预测还需水库部门结合其实际水情进行科学决策制定。

[参 考 文 献]

[1] 张调风，赵全宁，时兴合，等. HBV 模型在隆务河流域洪水致灾临界面雨量研究中的应用[J]. 中国农业大学学报，2017，22(3)：69-75.

[2] 谷一，郝振纯，王国庆，等. HBV 模型在逊比拉河流域的适用性研究[J]. 水资源与水工程学报，2017，28(1)：20-25.

[3] 刘义花，鲁延荣，周强，等. HBV 水文模型在玉树巴塘河流域洪水临界雨量阈值研究中的应用[J]. 水土保持研究，2015，22(2)：224-228.

[4] 王有恒，谭丹，景元书. HBV 水文预报模型在白龙江流域的应用研究[J]. 水土保持通报，2015，35(3)：218-221.

[5] 林志强，洪健昌，尼玛吉，等. 基于 HBV 模型的尼洋曲流域上游洪水致灾临界面雨量研究[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：2-26.

[6] 卢燕宇，田红. 基于 HBV 模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J]. 气象，2015，41(6)：755-760.

[7] 吴辰，郝振纯，基于 HBV 模型的牡丹江流域的水文过程模拟研究[J]. 中国农村水利水电，2017(5)：105-109.

[8] 邵琳，王丽萍，黄海涛，等. 水电站水库调度图的优化方法与应用：基于混合模拟退火遗传算法[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(12)：40-49.

[9] 陈颖，陈鹏翔，江远安，等. 乌鲁木齐河流域致灾洪水临界雨量分析[J]. 沙漠与绿洲气象，2017，11(2)：8-13.

[10] 何思为，南卓铜，王书功，等. 四个概念性水文模型在黑河流域上游的应用与比较分析[J]. 水文，2012，32(3)：13-19.

(上接第 150 页)

[13] 李苏醒. 气泡混合轻质土抗冲击试验与应用在机场中的有限元分析[D]. 江苏 南京：南京航空航天大学，2012.

[14] 何国杰，丁振洲，郑颖人. 气泡混合轻质土的研制及其性能[J]. 地下空间与工程学报，2009，5(1)：18-22.

[15] 顾欢达，顾熙. 河道淤泥气泡混合轻质土的性质稳定性试验[J]. 北京工业大学学报，2010，36(4)：469-474.

[16] 顾欢达，顾熙. 河道淤泥的轻质化处理及其工程性质[J]. 环境科学与技术，2010，33(9)：63-66.

[17] Tovey N K, Krinsley D H, Dent D L, et al. Techniques to quantitatively study the microfabric of soils [J]. Geoderma, 1992, 53(3/4): 217-235.

[18] 方祥位，申春妮，汪龙，等. Q_2 黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. 岩土力学，2013，34(5)：1319-1324.

[19] 周远忠，刘新荣，张梁，等. 红黏土微观结构模型及其工程力学效应分析[J]. 地下空间与工程学报，2012，8(4)：726-731.

[20] 骆顺成，顾欢达，陈冬青. 河道淤泥气泡混合土微观构造对其力学性能的影响[J]. 水电能源科学，2016，34(9)：131-135.

[21] 章培培，顾欢达，陈冬青. 河道淤泥气泡混合土微观构造及力学性质相关性[J]. 土木建筑与环境工程，2015，37(6)：78-86.