

固废底泥水下应用抗分散性能研究

盛传明^{1,3}, 马超¹, 练继建^{1,2}, 刘昉¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津理工大学, 天津 300384; 3. 天津大学(武清)前沿技术研究院, 天津 301700)

摘要: 为了实现固废底泥在水下应用时不发生分散, 通过开展水下抗分散试验和黏度试验, 研究了影响底泥水下抗分散性的因素, 提出了使用底泥黏度来量化其水下抗分散性的方法。研究表明: 黏度是影响固化底泥水下抗分散性的内在因素, 注浆高度是影响固化底泥水下抗分散性的外在因素, 黏度越大, 注浆高度越小, 则抗分散性能越强。羟丙基甲基纤维素的增黏效果优于瓜尔豆胶和聚丙烯酰胺, 更适用于固化底泥的水下应用, pH 值法和透光度法可用于表征固化底泥的水下抗分散性能。底泥黏度小于 $3.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 水下注浆易发生下落扩散和触底碰撞扩散; 底泥黏度介于 $3.7 \sim 22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 水下注浆只发生轻微触底碰撞扩散; 底泥黏度大于 $22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时, 水下注浆不易发生扩散。固化底泥在水下应用时, 推荐其黏度为 $3.7 \sim 22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、注浆高度在 30 cm 以内。

关键词: 固废底泥; 水下应用; 抗分散; 黏度; 透光度

中图分类号: TV41

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0181-09

Washout resistance analysis of solidified silt in underwater applications

SHENG Chuanming^{1,3}, MA Chao¹, LIAN Jijian^{1,2}, LIU Fang¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin University Frontier Technology Research Institute, Tianjin 301700, China)

Abstract: To avoid the washout loss of solidified silt in underwater applications, the main factors that affect the washout resistance of solidified silt are analyzed and the grout viscosity is adopted to quantify the washout resistance based on underwater tests. Test results indicate that the viscosity is the intrinsic factor and the grouting height is the extrinsic factor that affect the washout resistance of solidified silt. The greater the viscosity and the smaller the grouting height, the greater the washout resistance of the solidified silt. HPMC is more suitable for underwater solidified silt than GG and PAM due to its high thickening effectiveness, and the pH and transmissivity methods can be used to characterize its performance on washout resistance. Both falling and collisional diffusions will occur when the viscosity is smaller than $3.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, only collisional diffusion will happen when the viscosity is varying from 3.7 to $22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, but no diffusion is spotted when the viscosity is greater than $22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Solidified silt with viscosity varying from 3.7 to $22 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ and grouting height smaller than 30 cm is recommended for underwater applications.

Key words: solidified silt; underwater application; washout resistance; viscosity; transmissivity

1 研究背景

在江河湖泊中, 底泥的不断积累减小了水域的有效容量^[1], 并影响了航道的通航^[2]。疏浚是底泥清理的主要手段, 疏浚工程产生了数量庞大的固废

底泥, 固废底泥如果不能得到及时妥善的处理, 其长期堆积不仅会占用大量的土地资源, 还有可能造成严重的二次污染^[3]。

底泥固化是通过固化技术改善底泥高含水率、低强度的性质, 使其可作为建筑材料使用^[3]。与一

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC15084); 武清区科技发展计划项目(WQKJ202033)

作者简介: 盛传明(1987-), 男, 山东潍坊人, 博士, 工程师, 研究方向为水利工程和海洋工程。

通讯作者: 马超(1981-), 男, 天津人, 博士, 教授, 研究方向为水利工程。

般土料相比,底泥固化后具有不易产生固结沉降、强度高、透水性小等优点,同时又能将各种污染物包裹在浆液内部,避免水体污染,该技术已应用于众多填海造岛^[4]、地基加固^[5]和海洋平台桩基防护^[6]等工程中,固化底泥的工程应用既实现了大量废弃底泥的消解处置,又节省了砂石等自然资源,社会和经济效益显著。

若将固化底泥直接注入水中,会发生浆液分离现象,造成水体污染。土田孝等^[7]研究了固化底泥材料属性与水下抗分散和强度之间的关系,发现当材料配比不合理时,水下抗分散性能差,固结后强度明显降低。湯恰新等^[8]开展了固化底泥水下注浆试验,发现添加增稠剂后,高含水率固化底泥的抗分散性能明显提升。Li等^[9]在竖直有机玻璃管中进行固化底泥倾倒试验,研究了水泥掺量、倾倒高度、取水位置等对浆体水下抗分散性能的影响,发现降低倾倒高度可以减少水体污染。上述研究表明,针对高含水率疏浚底泥,通过添加增稠剂和降低注浆高度,可提升浆体的水下抗分散性能。

目前并无针对底泥水下应用的专用增稠剂及试验规范,可参考的相似规范为《水下不分散混凝土试验规程》^[10]。关于水下混凝土抗分散的研究主要集中于增稠剂的选择和抗分散性能表征。李冬梅等^[11]对比了天然多糖型聚合物和纤维素型两种增稠剂对水下混凝土抗分散性能的影响,研究表明纤维素型增稠剂效果优于天然多糖型聚合物。施展等^[12]研究了聚丙烯酰胺和纤维类两种增稠剂对水下混凝土抗分散性、流动性和抗压强度的影响,发现聚丙烯酰胺和纤维素作为絮凝组分可配制出符合标准要求的水下不分散混凝土,聚丙烯酰胺掺量为纤维素的2倍。Sikandar等^[13]研究了阿拉伯胶、黄原胶、高吸水树脂、改性淀粉和铝硅酸镁盐5种增稠剂对水下混凝土抗分散性能的影响,结果表明添加阿拉伯胶、黄原胶和高吸水树脂后,水下混凝土抗分散性能良好。由此可知,适当添加增稠剂后,水下混凝土的抗分散性能得到明显提高,不同类型增稠剂对水下混凝土的抗分散性能影响效果不同。因固化底

泥与水下混凝土在材料组成、颗粒级配和理化性质等方面均存在较大差异,故适用于水下混凝土的增稠剂不一定适用于固化底泥。关于水下混凝土抗分散性能表征方面,Heniegal等^[14]通过添加减水剂和增稠剂制备水下混凝土,研究了增稠剂掺量和水泥掺量对水下混凝土抗分散性能的影响,找到了最佳增稠剂掺量。陈卫涛^[15]使用不同分子量、不同掺量的聚丙烯酰胺以及不同掺量的减水剂,进行了水泥净浆的水下抗分散试验,确定了抗分散剂的最佳掺比。高礼雄等^[16]研究了增稠剂掺量对水下混凝土抗分散性能的影响,建立了水胶比、增稠剂和减水剂掺量与水下抗分散性能的关系。Baluch等^[17]使用纤维素作为增稠剂制备水下混凝土,研究了含水率、矿渣和增稠剂掺量对抗分散性能的影响,得出最佳材料掺比。由此可知,在水下混凝土应用中,针对特定的骨料、水泥和增稠剂,采用试配的方法能够得出满足抗分散性能的材料配比。但针对底泥而言,由于不同底泥的理化性质有所不同,且即便是同一型号的水泥或增稠剂,不同厂家产品的参数也不尽相同,因此试配结果不具有普遍适用性。

本文从受力角度对底泥的水下分散现象进行分析,比较不同增稠剂类型的有效性,提出使用黏度来量化水下分散程度的方法,建立浆体黏度与抗分散的普遍规律,为固废底泥多元化的水下应用提供参考。

2 材料与研究方法

2.1 试验材料

选取3种常见类型底泥进行试验研究,分别为海泥、河道泥和水库泥,海泥取自天津塘沽港的沉积海相疏浚淤泥,河道泥取自黄河宁蒙河段什四分子弯道处疏浚河道泥,水库泥取自天津武清区南湖水库疏浚湖库淤泥。所选3种底泥的基本物理性质和化学成分组成如表1、2所示。

水泥是一种用途极为广泛的建筑材料,水泥与水拌和后呈胶凝状态,在固化底泥中主要起粘结作用。试验采用冀东水泥扶余有限公司生产的盾石牌42.5级普通硅酸盐水泥作为固化剂。

表1 所选3种底泥的基本物理性质指标

底泥类型	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	比重	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
海泥	51.8	20.5	31.3	2.70	3.8	56.0	40.2
河道泥	26.8	14.8	12.0	2.67	25.7	59.3	15.0
水库泥	50.6	36.4	14.2	2.71	8.0	72.0	20.0

表 2 所选 3 种底泥的化学成分组成

底泥类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TFe	K ₂ O	Na ₂ O	其他	烧失量
海泥	58.88	13.68	6.04	2.33	4.80	3.05	1.95	3.07	6.20
河道泥	65.75	12.60	4.19	1.93	3.97	2.50	2.12	3.06	3.88
水库泥	63.03	14.58	2.30	0.82	2.28	0.41	0.90	3.00	12.68

选取 3 种典型的增稠剂进行研究,分别为纤维素类的羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methyl cellulose, HPMC)、天然类的瓜尔豆胶(guar gum, GG)和丙烯类的聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)。HPMC 由晋州市富强精细化工有限公司生产,黏度为 200 000 mPa·s;GG 由尚天生物科技有限公司生产,黏度为 3 000 mPa·s;PAM 选用阴离子型,由河南省巩义市立清水处理材料销售有限公司生产,分子量 300×10^4 。

2.2 水下抗分散试验

水下抗分散的表征方法主要有目测法、pH 值法、透光度法、浊度法和质量流失法^[18-19],本研究采用质量流失法、透光度法和 pH 值法对固化底泥的水下抗分散性能进行表征。

水下抗分散试验在 0.6 m×0.5 m×0.5 m(长×宽×高)的矩形水箱中开展,如图 1 所示。在水箱中注入 0.5 m 高的水,将适量水泥、增稠剂加入到底泥中充分搅拌,制备成固化底泥,测试其黏度,再称取 1 kg,通过注浆管将浆液从一定高度注入水中,浆体在水中自由下落。注浆完成后,随即打开排水阀门并接出适量水,测量水体的透光度和 pH 值。待水完全流出后,称取水箱中剩余底泥质量,通过差值计算质量流失率。pH 值测试使用德国邦特品牌 SDJ01 型的酸碱度 pH 测试笔,其精确度为 0.01。透光度测量使用上海雷磁仪器有限公司生产的 752N 型紫外分光光度计,其测量准确度为 $\pm 0.5\%$ 。试验前对透光度进行设置,将试验前清水的透光度设置为 100%,将不透光障碍物的透光度设置为 0。

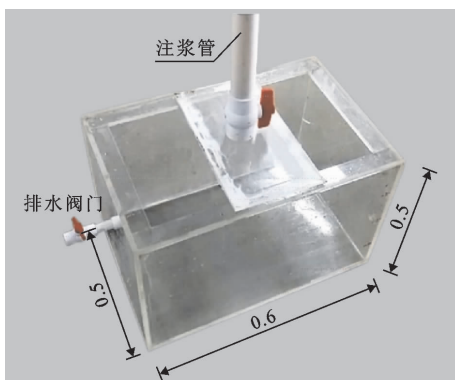


图 1 固化底泥水下抗分散试验水箱(单位:m)

2.3 黏度试验

黏度是流体黏滞性的一种量度,是流体流动力对其内部摩擦现象的一种体现。使用黏度来表征水泥基材料的黏性力已在众多研究中得到广泛应用^[6,20]。本研究使用上海越平科学仪器有限公司生产的 NDJ-8S 型旋转黏度计测量固化底泥的黏度,此种黏度计是一种通用的同轴圆筒式旋式黏度计,仪器转速为 0.3、0.6、1.5、3、6、12、30 和 60 rpm,共计 8 个转速档位,测量范围为 1~2 000 Pa·s,测量误差为 $\pm 5\%$ 。

将固化底泥装入量筒中,选择合适的测针,将测针缓慢下降,使转子完全浸入待测浆体中,保证测针转子上的标记与液面持平。测量前,转子在样品中浸泡 3 min,使转子温度与样品温度一致。测量时,转子以一定速率在浆液中旋转,浆液受到剪切产生黏性力矩,经过计算机转换后得到被测浆体的黏度。每次测量历时不少于 20 s,使测量的数值维持稳定。

2.4 试验工况

对于 3 种疏浚底泥,改变增稠剂掺量、水泥掺量、含水率和注浆高度,研究固化底泥水下抗分散性能。试验中,底泥含水率约为液限的 2~3 倍,接近正常疏浚底泥的含水率^[21],水泥掺量为 100~350 kg/m³,此时抗压强度约为 100 kPa~1 MPa 量级,满足绝大多数填方工程强度要求^[22],各试验工况如表 3 所示。表 3 中的组次 G₁ 在底泥中只添加水泥,不添加增稠剂;组次 G₂~G₁₂ 均在固化底泥中添加增稠剂,其中,组次 G₂~G₁₀ 增稠剂为 HPMC,组次 G₁₁ 增稠剂为 GG,组次 G₁₂ 增稠剂为 PAM。

3 结果与分析

3.1 固化底泥浆体水下受力分析

对浆体水下受力进行分析有助于揭示浆体发生分散的原因,找到避免或减轻发生分散的对策。浆体束在水中自由下落时,竖直方向上受到重力 G 和阻力 F_d ,在水平方向上,外侧颗粒(粒团)受到水流切应力 τ_s ,在此切应力作用下,颗粒(粒团)会产生垂直于切应力的分散力 F_{rs} ,同时,此颗粒(粒团)还受到右侧相邻颗粒产生的黏性力 F_η ,分散力 F_{rs} 与

黏性力 F_η 满足受力平衡关系,浆体在水中自由下落 时的受力分析如图 2 所示。

表 3 固化底泥水下抗分散试验工况

底泥(增稠剂)	组次	增稠剂掺量 $V /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥掺量 $C /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 $w / \%$	注浆高度 h / cm
海泥(无)	G_1	0	0 ~ 500	100	40
	G_2	0 ~ 6	150	130	40
海泥(HPMC)	G_3	3	100 ~ 250	130	40
	G_4	3	150	120 ~ 150	40
	G_5	3	150	130	10 ~ 50
	G_6	0 ~ 6	250	80	40
河道泥(HPMC)	G_7	3	150, 250, 350	80	40
	G_8	3	250	70, 80, 90	40
	G_9	3	250	80	10 ~ 50
水库泥(HPMC)	G_{10}	0 ~ 5	150	140	40
海泥(GG)	G_{11}	0 ~ 30	150	130	40
海泥(PAM)	G_{12}	0 ~ 20	150	130	40

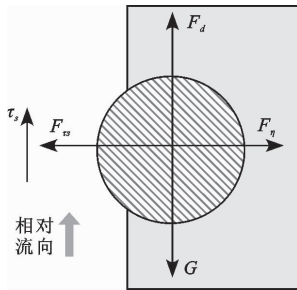


图 2 固化底泥浆体在水中自由下落时的受力分析

浆体下落过程中,外侧颗粒受到的切应力 τ_s 可写作:

$$\tau_s = f \frac{r}{8g} u_s^2 \quad (1)$$

式中: τ_s 为切应力,N; f 为阻力系数,Pa; r 为颗粒等效半径,m; u_s 为颗粒外侧速度,m/s。

在此切应力的作用下,浆体粒团受到的分散力 F_{τ_s} 可写为:

$$F_{\tau_s} = C_s S_s \tau_s = C_s S_s f \frac{r}{8g} u_s^2 \quad (2)$$

式中: F_{τ_s} 为分散力,N; C_s 为分散力系数; S_s 为颗粒有效受力面积, m^2 。

浆液分散主要发生在下落过程和触底碰撞过程中^[23]。浆体水中自由下落时,初始速度较小,分散力也较小,在重力作用下,下落速度逐渐增大,致使切应力逐渐增大,从而引起分散力增大。当分散力

大于颗粒间的黏性力时,颗粒脱离浆体束扩散到水中,发生分散现象。颗粒触底后具有较大的动能,产生碰撞力,当碰撞力大于颗粒间的黏性力时,颗粒会脱离浆体束,进入流体中发生二次扩散。

通过上述受力分析可知,浆体黏性力和下落速度是影响浆体水下抗分散的关键因素,后续通过试验来进行验证。

3.2 增稠剂类型选择试验分析

当底泥含水率 $w = 100\%$ 且不添加增稠剂时,水泥掺量 C 为 200、500 kg/m^3 条件下固化底泥水下扩散形态分别如图 3(a)、3(b) 所示(侧视图),不同水泥掺量下底泥的黏度变化如图 3(c) 所示。

由图 3(a)、3(b) 可知,当水泥掺量为 200 kg/m^3 时,底泥下落时发生了明显的下落扩散和触底碰撞扩散,水体混浊;当水泥掺量增加到 500 kg/m^3 时,下落扩散有所减弱,触底碰撞扩散仍然严重。通过测试黏度(图 3(c))可知,当水泥掺量由 200 kg/m^3 增长到 500 kg/m^3 时,黏度仅由 1.31 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 增长到 2.11 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,颗粒间的黏性力较小,在水下易发生分散。因此,不添加增稠剂,只增加水泥掺量较难实现固化底泥的水下不分散。

当底泥含水率 $w = 130\%$ 且水泥掺量 $C = 150 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,对比瓜尔豆胶(GG)、聚丙烯酰胺(PAM)和纤维素(HPMC)3种增稠剂对底泥黏度和水下抗分散性能的影响,如图 4、5 所示。

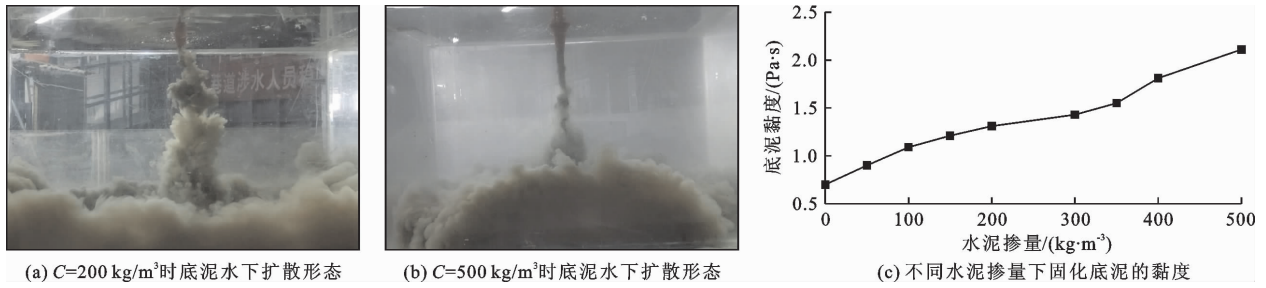


图 3 无增稠剂固化底泥在不同水泥掺量下的水下抗分散特性

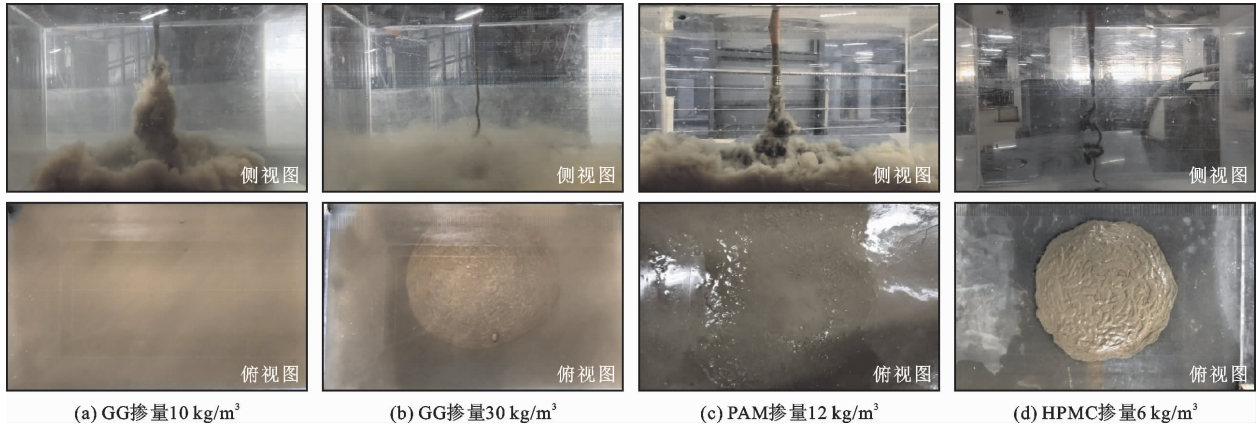


图 4 3种增稠剂固化底泥的水下注浆形态

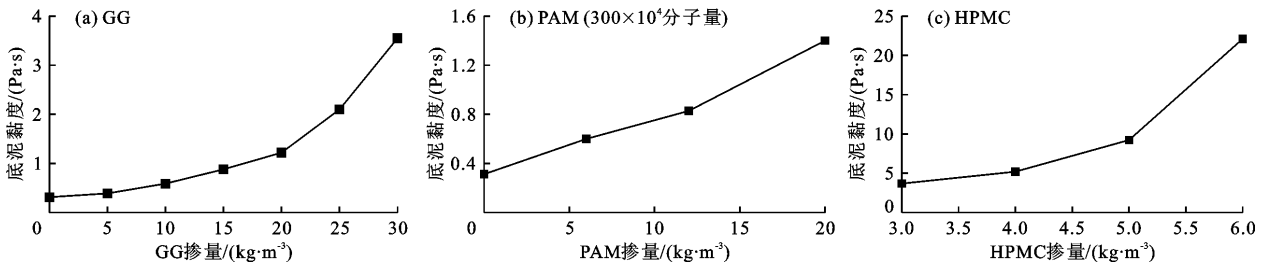


图 5 3种增稠剂不同掺量下固化底泥的黏度变化

由图 4、5 可知,掺加少量 GG 和 PAM 增稠剂后,固化底泥的黏度仍然较小,水下注浆时发生了明显的分散,此两种增稠剂对增大固化底泥黏度的作用不明显。掺入适量的 HPMC 增稠剂后,底泥浆体黏度明显增大,当 HPMC 掺量为 6 kg/m³ 时,浆体黏度达到 22 Pa·s,浆体下落时未发生分散现象。

GG、HPMC 和 PAM 增稠剂的市场价格分别约为 15、26 和 10 元/kg。虽然进一步掺加 GG 和 PAM 会使底泥浆体黏度提高,但要达到与 HPMC 相同黏度时,其成本较高。因此,从经济性和增稠效果来看,HPMC 是三者中最经济高效的增稠剂。

3.3 固化底泥水下抗分散性的表征方法

分别采用透光度法、质量流失法和 pH 值法对 HPMC 增稠剂不同掺量下固化海泥的抗分散性能进行表征,结果如图 6 所示。

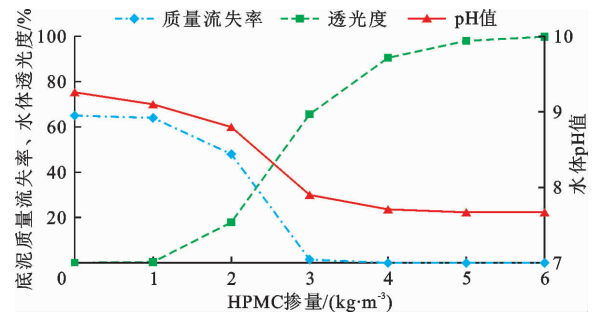


图 6 固化海泥水下抗分散性 3 种表征方法对比

对图 6 所示的 3 种表征方法进行分析:(1) 增稠剂由 1 kg/m³ 增加到 3 kg/m³ 时,质量流失率变化敏感,当增稠剂掺量大于 3 kg/m³ 后,质量流失率几乎为零,主要因为低增稠剂掺量时,浆体黏度较低,下落过程中底泥和水泥均扩散到水中,浆体质量损失较大;而当固化底泥具有一定黏度后,浆体下落

过程中虽有部分浆液流失,但也从周围水体中吸收水份,致使触底后底泥质量变化不大。另外,水箱排水及取泥过程均会给底泥质量的测量带来误差,因此,质量流失法不适合于固化底泥的抗分散性能表征。(2)增稠剂由 0 增加到 6 kg/m^3 时,水体 pH 值由 9.26 减小为 7.67。当水泥掺量较大且浆液发生明显分散时,水体 pH 值出现明显升高,可用 pH 值法表征浆体的水下抗分散性能,而当水泥掺量较少时,使用 pH 值表征浆体抗分散性能则不敏感。(3)随着增稠剂掺量的逐渐增大,水体透光度出现明显变化,与浆体抗分散性能的变化相对应,且透光度测量方便、准确度高,因此可用透光度来表征固化底泥的水下抗分散性能。

3.4 固化底泥水下抗分散性的影响因素

3.4.1 底泥黏度影响 以固化海泥 ($C = 150 \text{ kg/m}^3$, $w = 130\%$, $h = 40 \text{ cm}$) 为例,不同 HPMC 掺

量下,底泥浆体抗分散性能试验结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,当增稠剂 HPMC 掺量 $V = 1 \text{ kg/m}^3$ 时,底泥黏度为 $1.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,底泥浆体下落时发生了明显的下落扩散和触底碰撞扩散,水体浑浊;当增稠剂 HPMC 掺量为 3 kg/m^3 时,浆体黏度为 $3.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,浆体未发生下落扩散,只发生了轻微触底碰撞扩散,抗分散性能明显提高;当增稠剂 HPMC 掺量为 6 kg/m^3 时,浆体黏度达到 $22.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,浆体未发生分散现象,触底后在重力作用下自然流平,呈圆饼状。因此,通过添加增稠剂来增大浆体黏度,可提升固化底泥的抗分散性能。

在固化底泥的实际应用中,水泥掺量需根据强度要求进行调整,含水率需根据流动性要求进行调整^[24]。以固化海泥为例,控制增稠剂 HPMC 掺量为 3 kg/m^3 ,不同水泥掺量和含水率下固化底泥的水下抗分散性能如图 8、9 所示。

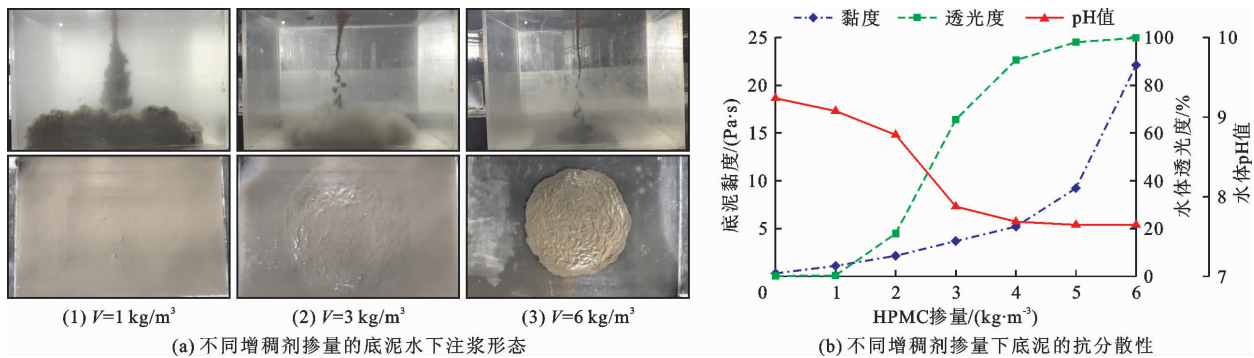


图 7 增稠剂掺量对固化底泥水下抗分散性能的影响

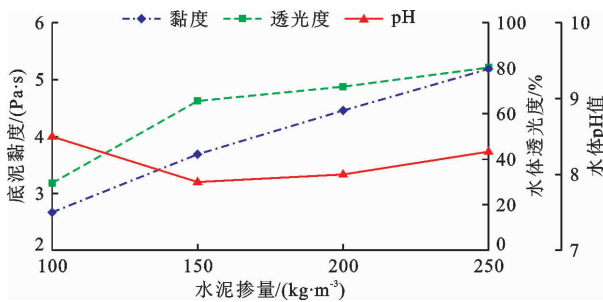


图 8 不同水泥掺量下固化底泥的水下抗分散性能

由图 8 可以看出,随着水泥掺量的增大,固化底泥黏度和水体透光度增大,但 pH 值变化不大,原因是在少量的增稠剂掺量下,底泥水下注浆时发生分散,虽然增大水泥掺量可提高底泥黏度,从而提高水体的透光度,但同时也会使更多的水泥颗粒扩散到水中,增大了水体的 pH 值。由图 9 可以看出,随着含水率的增大,固化底泥黏度和水体透光度减小, pH 值升高,原因在于当固化底泥含水率较高时,增

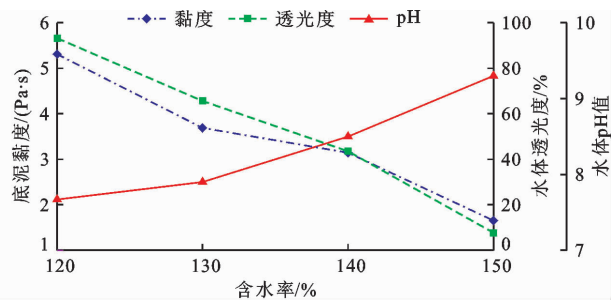


图 9 不同含水率下固化底泥的水下抗分散性能

稠剂无法将全部的底泥、水泥和水交织成致密网格,底泥的抗分散性能差,注浆时发生分散现象,而当含水率降低时,底泥黏度增大,抗分散性能提高。

选择河道泥和水库泥制备固化底泥,使用 HPMC 作为增稠剂,水下抗分散性能如图 10 所示。

由图 10 可知,随着增稠剂掺量的增大,两种固化底泥的黏度和水体透光度增大,与固化海泥的抗分散性能变化规律相同,表明虽然不同底泥具有不

同的理化性质,但通过向其添加增稠剂后,底泥黏度均增大,水下抗分散性能均得到提高。

综上所述,对于不同的增稠剂类型、增稠剂掺量、水泥掺量、含水率和底泥类型,固化底泥黏度越大,则抗分散性能越好,因此,固化底泥黏度是影响其水下抗分散性的内在因素。

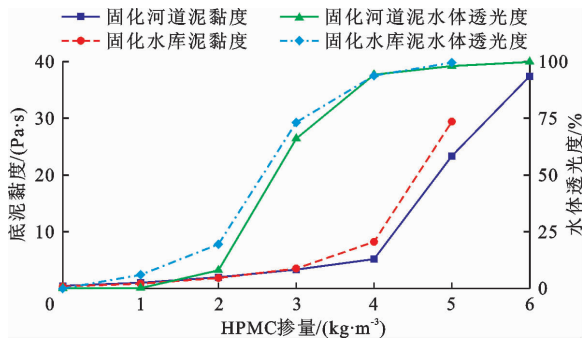


图 10 不同增稠剂掺量下固化河道泥和水库泥的水下抗分散性能

3.4.2 注浆高度影响 制备固化海泥和河道泥,不同注浆高度下固化底泥的抗分散性能如图 11 所示。

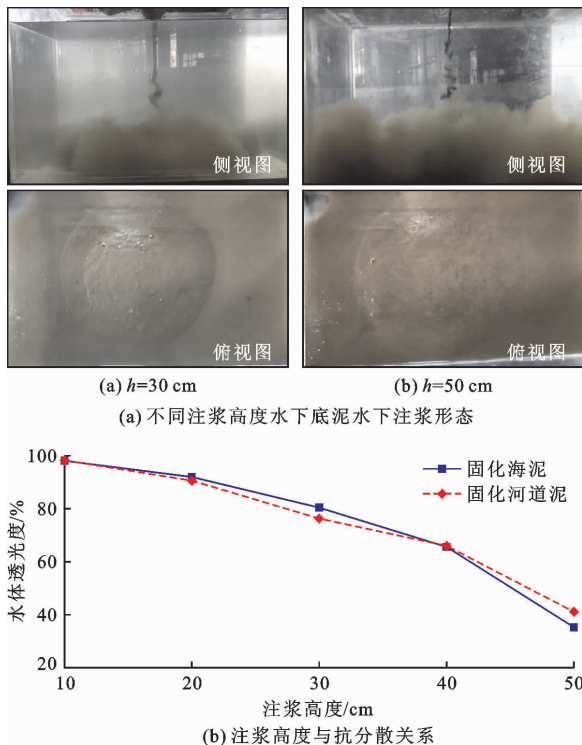


图 11 注浆高度对固化底泥水下抗分散性能的影响

由图 11 可见,当注浆高度较小(特别是小于 30 cm)时,水体透光度较大,固化底泥的抗分散性较好;当注浆高度大于 40 cm 时,水体透光度明显减小,固化底泥的抗分散性能变差。注浆高度的增大使底泥浆体触底时动能增大,导致浆体以较高的速度向四周扩散,分散严重;当注浆高度较小时,浆体

触底时动能较小,发生碰撞扩散的概率低。因此,注浆高度是影响底泥水下抗分散性的外在因素。

3.5 固化底泥水下抗分散性量化公式

通过以上研究可知,在一定的注浆高度下,固化底泥黏度越大,则其抗分散能力越强,水体透光度也越大。以固化海泥为例,当注浆高度为 40 cm 时,底泥黏度与水体透光度的关系曲线如图 12 所示。

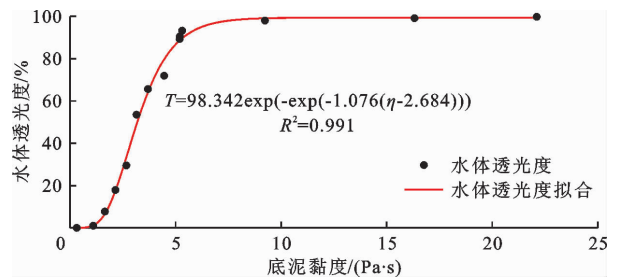


图 12 底泥黏度与水体透光度拟合关系曲线

通过数据拟合可知,底泥黏度与水体透光度符合 SGompertz 函数关系,拟合优度 R^2 为 0.991,量化公式可写为:

$$T = 98.342 \exp(-\exp(-1.076(\eta - 2.684))) \quad (3)$$

式中: T 为水体透光度; η 为底泥黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

相同注浆高度下,使用固化海泥、河道泥和水库泥对量化公式进行试验验证,验证结果如图 13 所示。

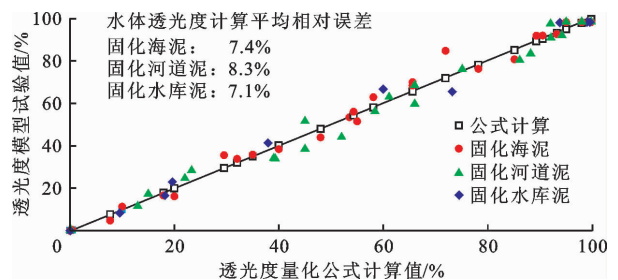


图 13 底泥黏度与水体透光度关系量化公式试验验证

由图 13 的验证结果可知,固化海泥、河道泥、水库泥水下注浆的水体透光度量化公式计算值与试验值相比,平均相对误差分别为 7.4%、8.3%、7.1%,相对误差均小于 10%。考虑到水下注浆是复杂的固-液多相流问题,较多的水动力因素均会对浆液的分散产生影响,量化公式在预测固化底泥水下抗分散性方面具有一定的准确性,可作为工程参考使用。

3.6 固化底泥抗分散性区域划分及推荐黏度

通过固化底泥水下抗分散性试验,得到不同透光度的水体试样,如图 14 所示。图 14 显示,当透光度大于 90.5% 时,水质清澈;当透光度为 60% 时,水体较为清澈,水中有少量杂质;当透光度小于 40.2% 时,

水体浑浊,有较多杂质悬浮在水中。以固化海泥为例,根据固化底泥黏度与水体透光度的关系,将固化底泥抗分散性按其黏度分为3区域,如图15所示。

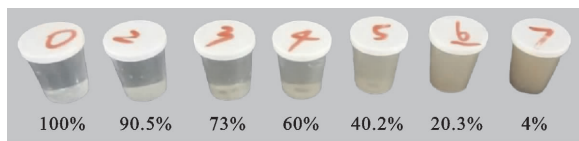


图14 不同透光度的水体试样

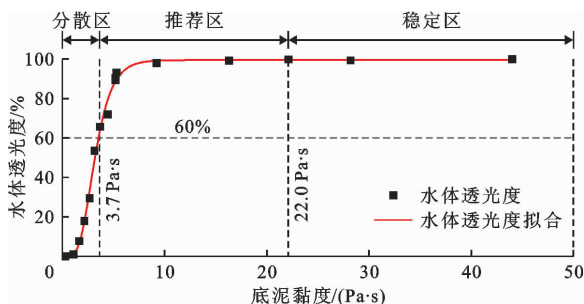


图15 固化底泥抗分散性黏度区域划分

(1)分散区。当固化底泥黏度小于 $3.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,底泥水下注浆过程中发生下落扩散和触底碰撞扩散,导致水体混浊,透光度小于60%。此区域固化底泥一般具有较低的增稠剂掺量和水泥掺量以及较高的含水率,因而浆体黏度小,易发生分散,固化底泥的力学性能较低,严重时会导致注浆失败。

(2)推荐区。当固化底泥黏度介于 $3.7 \sim 22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,浆体水下注浆时水体透光度大于60%,不发生下落扩散,只发生轻微的触底碰撞扩散,水体较清澈。此区域固化底泥一般具有适当的增稠剂掺量、水泥掺量和含水率,黏度适中,同时浆体流动性较好,落到底面后具有良好的自流平和自密实性能,有利于泵送运输和浇筑施工。

(3)稳定区。当固化底泥黏度大于 $22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,浆体水下注浆时水体透光度接近100%,浆体基本不发生分散现象。此区域固化底泥一般增稠剂和水泥掺量均较高,黏度较大,但过高的黏度易导致注浆困难、管道堵塞及注浆时间的延长,且浆液触底后自流平性能差。关于固化底泥的流动性能将在后续研究中探讨。

综合考虑黏度和注浆高度对固化底泥水下抗分散性能的影响,工程应用中的固化底泥黏度宜控制在 $3.7 \sim 22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,同时注浆高度宜控制在30 cm以内,在满足良好的自流平和自密实条件下,注浆高度越低越好,以保证固化底泥具有良好的抗分散性、流动性及力学性能。

4 结论

本文通过水下抗分散试验和黏度试验,研究了影响固化底泥水下抗分散的因素,得到如下结论:

(1)固化底泥在水中下落时,浆体束外侧颗粒受到水流切应力的影响而产生分散力,当分散力大于颗粒间的黏性力时,底泥颗粒将扩散到水中,引起浆体分散,浆体分散主要发生在下落阶段和触底碰撞阶段。

(2)未添加增稠剂时,固化底泥黏度小,水下注浆分散严重,添加增稠剂后,固化底泥抗分散性能明显提高。羟丙基甲基纤维素较瓜尔豆胶和聚丙烯酰胺的增稠效果好且成本低,更适用于固化底泥的水下应用。

(3)在表征固化底泥水下抗分散性方面,质量流失法测量误差较大,敏感性差;pH值法和透光度法可用于表征固化底泥的水下抗分散性能,但水泥掺量较少或底泥分散不严重时,水体pH值变化不大。

(4)加大增稠剂掺量、水泥掺量及减小含水率可增大底泥黏度,提高其抗分散性能,黏度是影响底泥抗分散性的内在因素;注浆高度越高,则浆体触底时的速度越大,分散越严重,注浆高度是影响底泥抗分散性的外在因素。在一定的注浆高度下,固化底泥黏度与水体透光度呈SGompertz函数关系。

(5)当固化底泥黏度小于 $3.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,底泥水下注浆易发生下落扩散和触底碰撞扩散;当固化底泥黏度介于 $3.7 \sim 22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,底泥水下注浆不易发生下落扩散,只发生轻微触底碰撞扩散;当固化底泥黏度大于 $22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,底泥水下注浆基本不发生扩散现象。固化底泥在水下应用时,推荐其黏度为 $3.7 \sim 22.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,注浆高度为30 cm以内。

本文的研究结果主要基于物理试验,相关结论还需要在工程实践中进一步验证。

参考文献:

- [1] 练继建,菅佳乐,徐奎,等. 锦屏二级非常规洪水冲沙减淤优化调控研究[J]. 水力发电学报,2018,37(12):44-53.
- [2] 黄开斌,张丽艳. 环保理念下的港口航道疏浚工程措施研究[J]. 低碳世界,2016(23):212-213.
- [3] 陈萌,杨国录,徐峰,等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):128-138.
- [4] MIZUKAMI J, MATSUNAGA Y. Construction of D-Runway at Tokyo International Airport[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2(2): 122-134.
- [5] ZHANG Guijin, LIU Jie, LI Yi, et al. A pasty clay-cement grouting material for soft and loose ground under groundwater conditions[J]. Advances in Cement Research, 2017, 29(2): 54-62.

- [6] MA Chao, SHENG Chuanming, LIAN Jijian, et al. Solidification sludge as a scour countermeasure in ocean engineering[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110423.
- [7] 土田孝,松下弘志,吉原正博,等. 评估泡沫混合处理的土壤在水下浇筑过程中的材料分离阻力[C]//土木学会论文集,2000(644):1-12.
- [8] 湯怡新,宫崎良彦,落合英俊,等. 水泥混合处理的土壤在水下浇筑过程中对海水环境的影响[C]//土木学会论文集,2002(708):211-220.
- [9] LI Yunquan, ZHU Wei, WU Silin, et al. Environmental impact of fluidized solidified silt casting on surrounding water bodies [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(5): 604-610.
- [10] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 水下不分散混凝土试验规程:DL/T 5117—2000 [S]. 北京:电力出版社,2014.
- [11] 李冬梅,王文忠. 水下快凝快硬修补材料的试验研究[J]. *中外公路*,2013,33(6):313-317.
- [12] 施展,沙建芳,陆加越. 絮凝剂品种对水下不分散混凝土性能影响的试验研究[J]. *江苏建筑*,2016(2):104-106+110.
- [13] SIKANDAR M A, WAZIRN R, KHAN A, et al. Effect of various anti-washout admixtures on the properties of non-dispersible underwater concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118469.
- [14] HENIEGAL A M, MAATY A A E S, AGWA I S. Simulation of the behavior of pressurized underwater concrete[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2015, 54(2): 183-195.
- [15] 陈卫涛. 深水区水下不分散混凝土抗分散剂的配制研究[J]. *国防交通工程与技术*,2020,18(4):43-46.
- [16] 高礼雄,崔皓. 铝酸盐水泥基砂浆水下不分散性研究[J]. *混凝土*,2020(11):105-107+111.
- [17] BALUCH K, BALUCH S Q, YANG H S, et al. Non-Dispersive anti-washout grout design based on geotechnical experimentation for application in subsidence-prone underwater karstic formations[J]. *Materials*, 2021, 14(7): 1587.
- [18] 王朋硕. 高性能水下不分散混凝土的制备及配合比优化[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [19] 张营. 动水水下不分散混凝土的研制及其性能测试[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [20] 张佳兴. 粘度时变浆液流变-固化特性与注浆扩散机理研究[D]. 成都:成都理工大学,2020.
- [21] 纪文栋,张宇亭,颜容涛,等. 高吸水材料改善高含水率淤泥流动性的试验研究[J]. *岩土力学*,2015,36(S1): 281-286.
- [22] TANG Yixin, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment [J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(5): 129-143.
- [23] 任晓芬. 自由下落颗粒流扩散及产尘特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [24] 黄英豪,戴济群,徐锴. 新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J]. *岩土工程学报*,2022,44(2):235-244.

(上接第 180 页)

- [8] 于健,刘丹忠,林治佳,等. 振冲碎石桩联合堆载预压地基处理工艺在复杂地层中的应用[J]. *中国港湾建设*, 2022,42(1):48-51.
- [9] 胡贵良,魏永新,刘保柱,等. 超深振冲碎石桩施工技术及应用[J]. *水力发电*,2020,46(11):76-80.
- [10] 刘强,卢伟,李晓力,等. 超深振冲碎石桩加固处理深厚覆盖层围堰堰基应用研究[J]. *水利水电快报*,2022, 43(4):90-95.
- [11] 任佳丽. 碎石桩处理昆明新机场红粘土地基的固结沉降分析研究[D]. 武汉:长江科学院,2008.
- [12] 卢萌盟,谢康和,王玉林,等. 碎石桩复合地基非线性固结解析解[J]. *岩土力学*,2010,31(6):1833-1840.
- [13] 蒋大煌. 水下振冲碎石桩复合地基沉降计算方法及工程案例研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [14] 刘洋,闫鸿翔,汪成林. 复合振冲碎石桩加固机理及施工过程数值模拟[J]. *工程科学学报*,2015,37(3):390-397.
- [15] 王家辉,饶锡保,江洵洵,等. 振冲碎石桩复合地基抗剪机制的模型试验研究[J]. *岩土力学*,2021,42(4): 1095-1103.
- [16] 梁雨. 基于实际工程对振冲碎石桩的研究[J]. *北方交*通,2022(3):65-67+71.
- [17] MITCHELL J K, HUBER T R. Performance of a stone column foundation[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(2): 205-223.
- [18] CASTRO J, SAGASETA C. Consolidation and deformation around stone columns: Numerical evaluation of analytical solutions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(3): 354-362.
- [19] ALAMGIR M, MIURA N, POOROOSHASB H B, et al. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions [J]. *Computers and Geotechnics*, 1996, 18(4): 267-290.
- [20] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [21] 虞晓军,刘强,曹瑞琅,等. 基于随钻技术的振冲碎石桩施工质量评价方法研究[J]. *水利水电快报*,2021,42(12):59-64.
- [22] 刘强,赵宇飞,杨帆,等. 超深振冲碎石桩施工智能化监控系统研发与应用研究[J]. *水利水电快报*,2021,42(12):65-71.