

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0134

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. CHEN M, YANG G L, XU F, et al. Research progress on solidification treatment of dredged silt[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 128-138. (in Chinese)

淤泥固化处理研究进展

陈萌¹, 杨国录², 徐峰¹, 魏红艳³

(1. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 长江科学院 水力学研究所, 武汉 430010)

摘要: 淤泥固化处理是淤泥资源化利用的有效方式之一。主要从淤泥固结体的物理特性、力学特性、淤泥固化机理研究方法和成果等方面, 总结了淤泥固化处理的研究进展。主要综述了固化处理对淤泥液限、塑限、塑性指数、密度、容重、粒径、含水率和流动性等物理特性的影响以及含水率、黏粒含量、矿物组成、有机物、固化剂种类和含量、养护龄期、养护环境等因素对淤泥固结体力学特性的影响; 然后, 基于孔隙液化学性质分析法、微观结构分析法、水分转化法和电阻率法等方法, 综述了淤泥固化的机理; 最后, 根据目前淤泥固化存在的问题, 指明了淤泥固化处理未来的研究方向: (1) 淤泥脱水-固化-稳定化一体化研究; (2) 淤泥固化机理的定量研究; (3) 淤泥固结体耐久性方面以及大规模应用等方面研究。

关键词: 淤泥; 固化; 物理特性; 力学特性; 固化机理

中图分类号: TV 851 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)05-0128-11

Research progress on solidification treatment of dredged silt

CHEN Meng¹, YANG Guolu², XU Feng¹, WEI Hongyan³

(1. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Department of Hydraulics, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Solidification treatment of dredged silt is one of the effective methods to utilize the silt resource. This paper summarizes the research progress of solidification treatment of dredged silt in terms of the physical and mechanical properties of solidified silt and the methods and results of studies on silt solidification mechanism. It mainly reviews the influence of solidification on the physical properties of silt, such as liquid limit, plastic limit, plasticity index, density, unit weight, particle size, water content, and fluidity, as well as the influence of water content, clay content, mineral composition, organic matter, type and content of solidified agent, curing age, and curing environment on the mechanical properties of solidified silt. Then, it reviews the solidification mechanism based on the methods of chemical property analysis of pore water, microstructural analysis, water transfer method, and resistivity method. At last, in light of the current problems facing silt solidification, it points out the research directions for the future, including (1) integration of dehydration, solidification, and stabilization, (2) quantitative research on solidification mechanism, and (3) study of durability of solidified silt and large scale application in practical engineering.

Key words: silt; solidification; physical properties; mechanical properties; solidification mechanism

收稿日期: 2018-04-02 修回日期: 2018-08-28 网络出版时间: 2018-09-10
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180906.1732.004.html>
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005)

Fund: Major National Science and Technology Projects for Water Pollution Control and Management (2014ZX07104-005)

作者简介: 陈萌(1989), 女, 河南信阳人, 工程师, 博士, 主要从事防洪排涝、河道整治和泥水环境等方面的规划设计和研究工作。E-mail: dongyuecao@126.com

近年来我国水环境问题突出,江河湖泊水质恶化,污染严重。与此同时,水体中的污染物不断在底泥中累积,并在一定条件下重新释放到上覆水体中,底泥在一定程度上充当了水体的内源污染源。清淤疏浚是河道治理的常用方法之一,然而疏浚过程中不可避免产生大量淤泥。疏浚淤泥一般具有含水率高、压缩性大、粒径细、有机物含量高等特点,如果不能及时妥善的处理,不仅占用大量的土地资源,还会造成严重的二次污染。淤泥的资源化利用是疏浚淤泥处理与处置的最终出路。淤泥固化处理是淤泥资源化利用的有效方式之一,它是指向淤泥中加入一定量的固化材料,改善淤泥的理化性质和力学性能,将其转变成满足一定承载力要求的土体,应用到堤防工程、道路工程、填方工程和绿化工程中^[1-3]。国内外学者对淤泥固化展开了一系列研究,取得了许多成果。本文主要从淤泥固结体的物理特性、力学特性等方面介绍淤泥固化研究取得的进展,并综述目前淤泥固化机理的研究方法和相关成果。在此基础上,提出淤泥固化处理今后的发展方向。

1 固结体的物理特性

与一般土体不同,疏浚淤泥含水率高,黏粒含量高,组成成分复杂,不仅包括矿物成分,还含有有机物、重金属等成分。向淤泥中加入固化剂,改变淤泥固结体的物理性质,使其向着有利于资源化利用的方向发展。

国内外学者对淤泥固结体物理特性的研究主要集中在液限、塑限、塑性指数、密度、容重、粒径、含水率和流动性等方面。付广义^[4]研究了水泥、石灰、高炉矿渣、脱硫石膏单掺对佛山市汾江河淤泥物理性质的影响,结果表明随着各固化剂掺量的增加,淤泥固结体的液限和塑性指数均呈下降趋势,塑限均呈上升趋势。杨海龙^[5]考察了石灰和水泥对淤泥液限、塑限和塑性指数的影响,结果显示在掺砂 10% 的情况下,淤泥固结体的液限和塑限均随石灰掺量的增加而升高,塑性指数则随石灰掺量的增加而下降;在掺砂 10%、石灰 6%、石膏 0.5% 的情况下,淤泥固结体的液限和塑限均随水泥掺量的增加而升高,塑性指数则随水泥掺量的增加而降低。以上两位学者关于水泥和石灰对淤泥固结体塑限和塑性指数影响的观点较为一致,而关于水泥和石灰对淤泥固结体液限影响的观点有所不同。

一些学者研究了固化处理对淤泥固结体密度、容重和粒径等物理性质的影响。韩苏建等^[6]分析了淤泥固结体的密度随水灰比和水泥掺量的变化,结

果显示淤泥固结体的密度随水灰比的增大而降低,随水泥掺量的增加而增大,但总体变化不明显。Jongpradist 等^[7]探讨了水泥和粉煤灰掺量对高含水率淤泥容重的影响,结果表明淤泥固化后的容重随水泥和粉煤灰掺量的增多而增大。杨云芳等^[8]研究了以生石灰、粉煤灰和水泥为组分的固化材料对淤泥固化后颗粒粒径的影响,他指出经三种材料固化后,黏粒含量均从原来的 34% 降低至 1% 以下,其中石灰对粒径的增大效果最显著。

淤泥含水率高,常大于液限,呈流动状态,不仅不便于运输,而且不利于后续的资源化利用。因此,一些学者研究了淤泥含水率与流动性之间的关系,以及固化处理对淤泥含水率和流动性的影响。Lee 等^[9]考察了美国帕斯卡古拉港淤泥的流动性,他发现淤泥的流动性与含水率近似呈线性关系,且含水率越低,流动性越差。丁建文等^[10]对江苏白马湖疏浚淤泥的流动性进行研究后得出了相似的结论,他还指出淤泥的流动值随固化材料(主要由水泥和工业废渣组成)掺量的增加呈线性关系下降。张丽华等^[11]则分析了粉煤灰的影响,得到含水率随粉煤灰掺量的增加呈下降趋势的结论。纪文栋等^[12]研究了高吸水材料对天津市滨海新区河道淤泥流动性的影响,得到的结论与 Lee、丁建文有不同之处。他认为淤泥的流动值和含水率成二次函数关系;同时,高吸水材料能迅速降低淤泥的流动性,搅拌持续时间和强度对淤泥流动性改善效果无明显影响。

2 固结体的力学特性

影响淤泥固结体力学性能的主要因素有淤泥自身的性质、外加固化材料和养护条件等。淤泥自身的性质一般包括淤泥的含水率、黏粒含量、矿物组成、有机物含量和有机物种类;外加固化材料的影响主要与固化材料的种类、掺量以及配比有关;养护条件主要指养护龄期、养护温度、压力等环境条件。

2.1 含水率的影响

张春雷等^[13]通过室内试验研究了初始含水率对水泥固化白马湖淤泥效果的影响,结果表明淤泥固结体的无侧限抗压强度随淤泥含水率的增加呈幂关系下降,且淤泥含水率越高,破坏应变越大,黏聚力越低。王亮等^[14]研究了含水率对重塑淤泥不排水强度的影响,得出不排水抗剪强度随含水率与液限比值的增大而减小,在双对数坐标中,两者近似呈线性关系;当含水率与液限的比值相同时,不同种类的重塑淤泥不排水强度较为接近。黄英豪等^[15]研究了初始含水率对水泥固化南水北调东线工程淮

安白马湖淤泥压缩特性的影响, 结果表明淤泥固结体的屈服应力随初始含水率的增加而降低。丁建文等^[16]以水泥和专用固化材料 SEU. P(主要成分是磷石膏)为固化剂研究了初始含水率对江苏白马湖淤泥压缩特性的影响, 得到与黄英豪学者相似的结论。关于含水率对淤泥固结体强度的影响, 各学者的研究成果较为一致, 即较高的含水率不利于淤泥固结体强度的发展。

2.2 黏粒含量的影响

淤泥中黏粒含量较多, 一般来说, 黏粒颗粒较细, 比表面积较大, 因此颗粒表面的物理化学作用更明显, 对淤泥的压缩性、强度等方面也会有一定的影响。王春义等^[17]研究发现土体中黏粒过多或过少均不利于水泥加固土强度的提升, 即存在一个最佳黏粒含量使土体抗压强度达到最大, 且最佳黏粒含量随龄期的延长呈下降趋势。冯志超等^[18]研究了黏粒含量对水泥固化淤泥无侧限抗压强度、凝聚力以及内摩擦角等力学参数的影响, 结果表明随着黏粒含量的增加, 淤泥固结体的无侧限抗压强度呈现先增大后减小的趋势, 即存在一个最优黏粒含量使淤泥的抗压强度最大, 且最优黏粒含量随水泥掺量的增加而增大, 龄期对最优黏粒含量基本没有影响; 同样存在一个最优黏粒含量使淤泥固结体的凝聚力最大; 内摩擦角则随黏粒含量的增加而减小。

以上两位学者关于存在最优黏粒含量使淤泥抗压强度达到最大的观点是一致的, 而最佳黏粒含量是否随龄期变化则有不同意见。结合两位学者的研究成果可知, 具有良好级配的淤泥更有利于固化剂发挥效果。

2.3 矿物组成的影响

淤泥的固相主要包括矿物、有机物、营养盐和重金属等物质, 其中矿物是构成淤泥骨架的物质, 其按成因不同可分为原生矿物和次生矿物。常见的原生矿物有石英、长石等; 常见的次生矿物主要是铝硅酸盐类矿物, 包括高岭石、伊利石和蒙脱石等^[19]。研究表明固化剂对不同矿物组成的软土加固效果不同。Croft 等^[20]研究了矿物成分对水泥固化土体效果的影响, 结果表明石灰对以蒙脱石为主要矿物成分的土体加固效果较好, 而水泥则对以高岭石和伊利石为主要矿物的土体加固效果明显。宁建国等^[21]将高岭石和钠蒙脱石按一定比例配制成矿物成分不同的土样, 考察水泥掺量对土样抗压强度的影响, 结果显示钠蒙脱石含量较高的土样生成的水化产物量较少, 强度较低。He 等^[22]研究了不同矿

物经水泥固化后的效果, 具体表现为钙蒙脱石经水泥固化后抗压强度最高, 其次是伊利石, 接着是高岭石、钠蒙脱石, 强度最低的是海泡石。因此, 淤泥固化时, 可先分析其矿物组成, 然后根据矿物成分有针对性的选择适宜的固化剂。

2.4 有机物的影响

淤泥中的有机物含量较高。彭丹等^[23]对云南滇池底泥 118 个样品进行分析, 得出滇池底泥中有机质的含量为 4%~9%。朱广伟^[24]对杭州西湖 8 个湖区底泥进行分析, 得到西湖底泥有机质含量为 2.9%~20.5%。淤泥中的有机物一般包括腐殖质和非腐殖质两类, 其中腐殖质占有有机质总量的 85%~95% 左右。根据腐殖质在酸碱中的溶解程度不同, 可将其分为富里酸、胡敏酸和胡敏素三类, 通常将前两者统称为腐殖酸^[25-26]。鉴于淤泥中有机物含量高且成分复杂, 一些学者探讨了有机物含量和种类对淤泥固化的影响。

范昭平等^[27]将两种有机质含量差别较大、其它性质差别很小的淤泥按质量比调制不同有机质含量的淤泥, 研究了其对水泥固化效果的影响, 结果表明有机质的存在不利于无侧限抗压强度的发展, 而当有机质含量超过临界值 4.3% 后, 对强度的影响较小。朱伟等^[28]则进一步研究了有机质中的主要组分腐殖质对水泥固化淤泥的影响, 结果表明腐殖酸在一定程度上抑制了水泥的水化, 使固化土的无侧限抗压强度降低, 而当腐殖酸含量超过临界值 3.62% 后, 腐殖酸对固化土的强度和破坏应变影响较小。这一结论与范昭平学者相似。陈慧娥等^[29]采用向土体中加入腐植酸钠的方式来模拟有机物, 并从抗剪强度和无侧限抗压强度两方面着手考察了水泥对有机质软土的加固效果, 结果表明有机质的存在降低了土体的内摩擦角, 有机质虽能在一定程度上提高黏聚力, 但由于内摩擦角对强度的贡献较大, 因此抗剪强度还是有所降低; 此外, 她也得出了有机质对抗压强度发展不利的结论, 与范昭平、朱伟等学者的观点一致。Tremblay 等^[30]研究了包括乙酸、苯甲酸、腐殖酸、丹宁酸、纤维素、淀粉、蔗糖、煤油、植物油、甲苯二甲苯混合物、EDTA、乙二醇、硝基苯在内的十三种有机物对水泥固化加拿大魁北克城两种土的影响, 研究结果表明: 乙酸、腐殖酸、丹宁酸等有机物严重影响了水化产物的生成, 进而降低了试样的不排水抗剪强度; 一些有机物如油和碳氢化合物等对凝结时间有影响, 但不会影响最终的抗剪强度; 此外, 煤油、甲苯二甲苯混合物能提高水泥固化圣阿尔邦土的不排水抗剪强度, 但降低了三河

镇土的不排水抗剪强度。

以上国内外学者研究了有机物对淤泥固化效果的影响,其中国内学者主要研究的是腐殖质、腐植酸钠等有机物的影响,国外学者研究的有机物种类较广,包括酸、糖和多糖、油和碳氢化合物以及 EDTA、乙二醇、硝基苯等其它物质。各学者研究有机物对淤泥固化的影响时,大多以水泥作为基材。从总体上来看,大多数有机物不利于水泥固化淤泥强度的发展。而其它材料作为主固化剂以及多种复合固化剂作用时,有机物对淤泥固化的影响则有待进一步研究。

2.5 固化剂种类及掺量的影响

淤泥固化剂按其成分可分为无机固化剂和有机固化剂;按固化剂添加的剂量来分,可分为主固化剂和添加剂。目前淤泥固化时常以水泥、粉煤灰、石灰、石膏等无机固化剂为主要固化剂,并在此基础上加入剂量较小的添加剂,其中添加剂可以选用无机材料,也可以选用高分子材料、纳米材料等新型材料。

2.5.1 主固化剂

水泥作为一种主要的固化剂,广泛应用于淤泥的加固中。张春雷等^[31]研究了水泥掺量对淤泥强度的影响,他指出存在临界水泥掺量,当低于此掺量时,几乎没有效果,超过临界值后,淤泥的强度随水泥掺量的增加近似呈线性关系增大。徐桂平等^[32]研究了水泥对淤泥力学性质的影响,结果表明,随着水泥掺量的增加,淤泥固结体的无侧限抗压强度和抗剪强度指标黏聚力、内摩擦角均呈增大趋势。

除水泥外,石灰、石膏也是较为常用的固化剂,邢伟等^[33]通过试验研究了石灰对淤泥抗压强度和抗剪强度的影响,结果表明石灰能够显著增加淤泥的无侧限抗压强度和变形模量,减小破坏应变,且石灰掺量为 3% 时效果最佳;同时,石灰可有效改善淤泥试样的凝聚力,但对内摩擦角的影响不大。Jaubertie 等^[34]考察了水泥、石灰单掺和水泥石灰双掺对法国布列塔尼北岸河道淤泥的固化效果,结果表明水泥石灰双掺更有利于淤泥强度的发展。丁建文等^[35]研究了水泥和磷石膏双掺对南水北调东线工程江苏淮安白马湖疏浚淤泥固化效果的影响,研究表明磷石膏对疏浚淤泥的增强效果显著,并存在最佳掺量,最佳掺量随淤泥初始含水率的增大而增大。

粉煤灰是火电厂的副产物,同时也是一种火山灰质材料,其含有的活性二氧化硅、活性氧化铝等成分能与氢氧化钙发生反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等具有一定强度的产物,因此一些学者考虑用

粉煤灰来固化淤泥。粉煤灰按氧化钙含量可分为高钙粉煤灰和低钙粉煤灰,其中氧化钙含量高于 10% 的粉煤灰为高钙粉煤灰,氧化钙含量低于 10% 为低钙粉煤灰^[36]。王东星等^[37]、Zentara 等^[38]研究了低钙粉煤灰在水泥、石灰作用下对法国敦刻尔克海港东部港区疏浚底泥的固化效果,表明低钙粉煤灰与水泥、石灰一起能显著改善淤泥的强度特性,固化淤泥的弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度均有不同程度的增加。周红波等^[39]则探讨了高钙粉煤灰的固化效果,结果表明经高钙粉煤灰固化后,淤泥的无侧限抗压强度、压缩性等方面均有明显改善。

除上述传统的固化材料外,王宏伟等^[40]将低碳、环保的活性 MgO 引入到淤泥固化处理中,探讨了其对固化淤泥压缩性的影响,结果表明随着 MgO 掺量的增加,固化淤泥的压缩性和初始孔隙比呈减小趋势,固结屈服应力呈增大趋势,活性 MgO 对固化淤泥的压缩性有明显的改良作用。

2.5.2 添加剂

以上研究主要集中在水泥、石灰、石膏和粉煤灰等掺量较多的主固化剂上,还有一些学者研究了在主固化剂的基础上,掺量较小的添加剂对固化效果的影响。

程福周等^[41]研究了以水泥为主固化剂,添加剂硅酸钠对淤泥固结体强度的影响,结果表明,不同水泥掺量下,淤泥固结体的 28 d 强度均有明显增加,最高可达无硅酸钠时的 3.6 倍,可见硅酸钠对淤泥固结体 28 d 强度有明显的促进作用;同时,他还指出水泥掺量一定时,存在最佳硅酸钠掺量,例如水泥掺量为 12% 时,硅酸钠的最佳掺量为水泥的 6%。叶元宝等^[42]研究了 SN- $\bar{0}$ 型高效减水剂、氢氧化铝和氯化钙三种添加剂对水泥固化淤泥质粘土抗压强度的影响,结果表明在水泥作用下,氢氧化铝和氯化钙对各个龄期阶段固化淤泥的强度均有所改善,而 SN- $\bar{0}$ 型高效减水剂只对 28 d 强度有促进作用,7 d 和 90 d 强度反而下降。金裕民等^[43]研究了以水泥为主固化剂,三乙醇胺、硫酸钠和氯化钠等添加剂对温州龙湾区某滩涂淤泥固化效果的影响,结果显示各添加剂的掺量均存在临界值(临界值分别为 0.05%、1.5%、0.9%),在临界值内,固化淤泥的强度随外加剂的增加而增加,超过该值后,随外加剂的增加而减小或变化不大。杨爱武等^[44]研究了添加剂氢氧化钠和碳酸钠对水泥固化天津滨海新区海积软土的效果,他指出碱性外加剂有助于提高水泥固化软土的强度,且添加剂含量在 0.5%~0.8% 左右时效果最佳。陈萌等^[45]以水泥和粉煤灰为主固化

剂,研究了氢氧化钠对东湖子湖官桥湖淤泥的固化效果,结果表明淤泥固结体的无侧限抗压强度随氢氧化钠掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,且氢氧化钠掺量为 0.4% 时,对强度的促进作用最显著。蒲凡^[46]研究了在主固化剂水泥、生石灰、生石膏、硅酸钠的基础上,高效减水剂 WL-A-IX、强氧化剂高锰酸钾和强碱氢氧化钠对浙江省椒江海涂淤泥强度的影响,结果表明减水剂 WL-A-IX 降低了淤泥固结体的强度;高锰酸钾掺量为 0.5% 时的强度与不加高锰酸钾的强度接近,掺量为 1.0% 时能促进强度的增长;氢氧化钠能够促进淤泥固结体强度的发展,且掺量为 1.0% 时对强度的促进作用比掺量 0.5% 时更显著。为了进一步探究氢氧化钠的效果,蒲凡^[46]还研究了氢氧化钠对水泥固化淤泥效果的影响,结果显示氢氧化钠掺量低于 0.8% 时,淤泥固结体各个龄期的强度与不掺氢氧化钠时接近;氢氧化钠掺量高于 1.6% 时,对淤泥固结体强度的促进作用更显著;氢氧化钠掺量为 3.2% 时,仍能促进强度的发展。

上述研究中,杨爱武学者认为存在氢氧化钠的最佳掺量 0.5% ~ 0.8%,使固结体的强度最大;陈萌也认为存在一个氢氧化钠的最佳掺量对强度的促进作用最显著,最佳掺量为 0.4%;而蒲凡学者的结果则显示淤泥固结体的强度随氢氧化钠掺量的增加而增大,氢氧化钠掺量 3.2% 时仍能促进强度的发展。杨爱武、陈萌与蒲凡学者关于氢氧化钠对固化淤泥强度影响的观点不同,笔者认为有两方面原因,一方面可能与淤泥本身的性质不同有关;另一方面,可能受主固化剂种类和掺量的影响。

除上述添加剂外,一些学者引入高分子材料、纳米材料等新型材料来探究对淤泥固结体力学特性的影响。曹玉鹏等^[47]在传统水泥、生石灰固化的基础上,引入高分子添加剂来改善淤泥的固化效果,结果表明,水泥掺量 7%、生石灰掺量 11% 时,新型固化材料仅添加 1%,处理初始含水率 2 倍液限的高液限淤泥,早期强度可达到大于 0.5 MPa,28 d 强度可达到大于 1 MPa。肖继强等^[48]以水泥作为主固化剂,研究了纳米 SiO₂ 和纳米 Al₂O₃ 对湖州地区河湖疏浚淤泥固化效果的影响,结果表明纳米 SiO₂ 能够促进淤泥固结体 7 d 和 14 d 龄期无侧限抗压强度的发展;纳米 Al₂O₃ 对 7 d 龄期抗压强度起促进作用,对 14 d 龄期抗压强度的影响与 Al₂O₃ 掺量有关,14 d 龄期抗压强度随着纳米 Al₂O₃ 掺量的增加呈现先增加后减小的趋势。高术森^[49]探讨了以水泥为主固化剂,聚丙烯纤维掺量和长度对淤泥固结

体性质的影响,结果表明随着聚丙烯纤维含量由 0% 增加至 0.3%,淤泥的无侧限抗压强度显著增大,而抗剪强度指标的黏聚力逐渐增大,内摩擦角逐渐减小;随着聚丙烯纤维长度从 0 mm 增加到 12 mm,淤泥固结体的无侧限抗压强度逐渐增大。付广义^[4]研究了以水泥为主固化剂,三种高分子聚合物聚丙烯酸酯(AR)、乙烯醋酸乙烯聚合物(EVA)和聚乙烯醇(PVA)在佛山市汾江河淤泥固化中的效果,研究表明,三种聚合物对固化淤泥的强度均有明显的促进作用,且固化后的淤泥表现出良好的持久性和耐酸性;三种聚合物中,PVA 处理后的淤泥表现出更好的强度特性,而 EVA 处理后的试样表现出更好的持久性和耐酸性。

2.6 养护龄期

一般来说,水化反应和火山灰反应需要较长时间才能完成,而且不同时间阶段反应程度不同,因此养护龄期对强度的发展也有一定的影响。朱伟等^[50]研究了龄期对固化淤泥抗压强度的影响,结果表明随着龄期的延长,淤泥固结体的抗压强度逐渐增大,但增长速率减慢。同时,抗压强度随龄期的变化规律与水泥掺量有关,当水泥掺量较低时,固结体的强度随龄期的增长速率较小;水泥掺量较高时,固结体的强度随龄期的增加呈现出较大的增长速率。丁建文等^[51]用水泥和以磷石膏为主要成分的专用材料固化江苏白马湖淤泥,探讨了龄期对固结体强度的影响,结果表明淤泥固结体的强度随龄期的延长呈现先快后慢的对数增长规律。陆萍^[52]研究了扬州某地淤泥在 GX04 固化剂(水泥 18%、减水剂 1.5%、水玻璃 5%、石膏 2%、石灰 6%)的作用下,随龄期的变化规律,结果显示养护龄期在 7~28 d 时,固化强度随龄期显著增长,90 d 后强度仍有增长的趋势,但增长缓慢。从以上各学者的研究成果可以看出,在不同种类固化剂作用下,养护龄期对淤泥固结体强度影响的观点较为一致。

2.7 养护环境

养护环境主要指淤泥固结体试样养护时的温度、压力等环境条件。章荣军等^[53]研究了养护温度对水泥固化疏浚海泥强度发展的影响,结果表明较高的养护温度不仅能够显著提高早期强度,而且能较明显地提高后期强度。郑少辉等^[54]研究了养护温度对水泥固化海泥和武汉南湖淤泥强度的影响,结果显示养护温度对淤泥固结体强度的影响显著。具体表现为:经固化后,海泥的早期强度和晚期强度均随养护温度的升高而提高,这一成果和章荣军学

者的看法一致;然而,武汉南湖淤泥经水泥固化后,早期强度在较高的养护温度下有所下降,这一现象可能与南湖淤泥中含有较多的有机质有关。此外,郑少辉等^[54]还研究了养护压力对强度发展的影响,他指出淤泥固结体的强度随养护压力的增大明显提高。实际中,应结合淤泥自身的特性,选择适宜的养护环境,以达到最优的固化效果。

3 固化机理研究方法及其成果

固化机理的研究方法主要有孔隙液化学性质分析法、微观结构分析法、水分转化法和电阻率法等。

3.1 孔隙液化学性质分析法

固化剂的加入会影响淤泥孔隙液的性质,因此可以通过孔隙液离子的成分和含量来分析淤泥固化的机理。曾科林^[26]通过考察淤泥固结体孔隙液中 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度来研究有机质含量对淤泥固化影响的机理,结果显示随着有机质含量的增加,pH 值和孔隙液中 OH^- 浓度均呈下降趋势, Ca^{2+} 浓度则表现为先下降后趋于稳定。有机质含量对固化淤泥孔隙水溶液中 Ca^{2+} 浓度、 OH^- 浓度的影响规律与对强度和水化产物量的影响规律一致。孔隙水溶液中 Ca^{2+} 浓度、 OH^- 浓度与试样无侧限抗压强度近似呈线性增长关系,且 Ca^{2+} 浓度对强度的影响存在一个最小浓度值,孔隙水溶液中 Ca^{2+} 浓度低于这一值时(1.685 mmol/L),固化淤泥就没有强度。冯志超^[18]通过分析淤泥固结体孔隙水中 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度的变化,来探究不同水泥掺量下、不同黏粒含量对淤泥固化影响的机理,结果表明水泥掺量为 5% 时,固化淤泥的无侧限抗压强度随黏粒含量的增加而增加;水泥掺量为 7.5%、10%、15% 时,固化淤泥的强度随黏粒含量的增加呈先增大后减小的趋势。水泥掺量 $\leq 5\%$ 时, Ca^{2+} 浓度随黏粒含量的增加呈先增加后减小的趋势, OH^- 浓度随黏粒含量的增加而减小;水泥掺量 $\geq 8\%$ 时, Ca^{2+} 浓度随黏粒含量的增加而减小,各黏粒含量下 OH^- 浓度保持在 30.9 mmol/L 左右。也就是说,不同黏粒含量下,水泥固化淤泥的强度与孔隙水中 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度没有明显的相关关系,即黏粒含量主要不是通过影响 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度来影响淤泥固结体强度的。以上学者的研究表明通过考察淤泥固结体孔隙液离子的成分和含量,可以分析淤泥固化的机理,其中有机物主要是通过影响淤泥孔隙液 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度来影响强度的,而黏粒含量对强度的影响机理则并非如此。

3.2 微观结构分析法

一些学者从微观结构的角度探讨淤泥固化的机

理,微观结构的研究方法有扫描电镜法(SEM)^[55-56]、透射电镜法(TEM)、X 射线衍射分析(XRD)、傅里叶变换红外光谱法(FTIR)和压汞法(MIP)^[57-58]。

丁建文^[59]通过扫描电镜试验从微观结构层面研究了淤泥固化的机理,他指出淤泥经水泥和专用固化材料固化后,生成大量纤维状、针棒状胶结物质,这些胶结物质改变了淤泥颗粒的连接方式,使颗粒间连接更紧密,同时这些胶结物质不断延伸填充到孔隙中,使孔隙减小,密实度增加,即淤泥固结体强度增加的主要原因是固化材料水化产物的化学胶结作用和填充密实作用。高术森^[49]通过扫描电镜法研究了聚丙烯纤维促进固化淤泥强度发展的机理,他指出聚丙烯纤维在淤泥固结体中的三维乱向分布作用形成了网状结构,这种网状结构能够有效的阻止裂缝的发展,因此能在一定程度上提高淤泥的无侧限抗压强度和凝聚力。张丽娟等^[60]通过对水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰几种固化剂进行组合,得到促进强度发展的最优配比和次优配比,并在此基础上分析固化淤泥微观结构的变化进而阐明固化机理,结果表明,与原状淤泥相比,最优配比和次优配比下淤泥固结体的颗粒个数和颗粒分布分维有所增大,孔隙率、孔隙个数和孔隙分布分维有所降低,其中最优配比下淤泥固结体的孔隙率减小 59.8%。陈萌等^[61]通过扫描电镜法研究了淤泥经水泥和粉煤灰固化后,无侧限抗压强度和分形维数的关系,结果表明原状淤泥及其固结体均具有多重分形特性,且淤泥固结体的强度特性与多重分形特性关系密切,无侧限抗压强度随容量维、信息维和关联维的增大而增大。

X 射线衍射法(XRD)可以用来研究晶体物质的生成、消失和晶体结构的变化。Rekik 等^[62]研究了水泥对法国兀斯特罕海港淤泥的加固效果,并采用 X 射线衍射法分析了相关机理,他指出水泥固化后生成了新物质水化硅酸钙,从而提高了强度。李志威等^[63]通过 XRD 试验研究了 HAS 高强耐水固化剂固化淤泥的机理,结果表明淤泥固化后生成的水化碳铝酸钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)能够促进强度的发展。甘雅雄等^[64]通过 XRD 试验研究了硫铝酸盐水泥相对于硅酸盐水泥在固化淤泥时具有早强性能的机理,结果表明在养护初期,普通硅酸盐水泥固化土中只有 CSH 凝胶出现,而硫铝酸盐水泥固化土中不仅有 CSH 生成,还有钙矾石(Aft)生成,即结晶态钙矾石的生成是硫铝酸盐水泥在固化淤泥时具有早强性能的原因。王朝辉等^[65]借助 TEM 试验、XRD 试验和 FTIR 试验分析了蛭

石粉固化淤泥的机理,结果表明蛭石粉能均匀分散在淤泥颗粒周围,且能有效吸收淤泥中的水分,在蛭石固化淤泥的过程中,没有发生化学反应产生新物质,而只是物理吸水过程。童琦^[66]借助扫描电镜(SEM)和X衍射射线(XRD)试验,通过分析疏浚淤泥固化前后孔隙和产物的变化阐明固化的机理,他指出淤泥固化后晶相的种类和数量增多(固化前晶相主要有石英和斜方钙沸石,固化后晶相主要有石英、钠长石、正长石、钠沸石和水钙沸石),且固化后淤泥孔隙减少,结构更紧密,即物相中的晶相是促使结构密实、改善淤泥力学性能的主要原因。Chew等^[67]通过SEM、XRD、MIP等方法研究了水泥固化新加坡海洋淤泥的机理,他指出固结体强度的发展主要来源于四个方面,即水化反应生成的氢氧化钙促使淤泥中的伊利石黏土颗粒发生聚集,高岭石与钙离子发生火山灰反应,水化产物在黏土絮团表面沉积并填充孔隙,以及黏土絮团对水分的封闭作用。

丁建文等^[68]采用压汞法研究了水泥和以磷石膏为主要成分的专用固化材料固化江苏白马湖淤泥的机理,结果表明淤泥孔隙的体积和D50孔径(进汞量为总进汞量50%时对应的入口孔径)随固化材料的增加、龄期的延长明显减小。张亚灿等^[69]研究了水泥掺量和初始含水率对固化淤泥渗透系数的影响,并通过压汞法研究微观孔隙结构,进而阐明淤泥固化的机理,结果表明,随着水泥掺量的增加、初始含水率的降低,淤泥固结体的渗透系数逐渐降低,最可几孔径(孔径分布曲线峰值对应的孔径)逐渐减小,两者具有良好的相关性。

3.3 水分转化法

淤泥固结体中的水分可分为自由水、结合水和矿物水三类,其中结合水和自由水统称为孔隙水。淤泥固化时会发生一系列的物理化学反应,这些反应在一定程度上改变了水分的数量和存在形态,进而影响淤泥固结体的性质,因此一些学者通过水分转化法来揭示淤泥固化的机理。Zhu等^[70]分别用水化产物中矿物水和结合水的含量来表征结晶态和凝胶态水化产物的生成量,他指出两种水化产物的生成均有利于强度的发展,但对强度的贡献不同,具体表现为:结晶态水化产物对强度的发展一直有贡献,而凝胶态水化产物只有达到一定量后才有较明显的影响;当两种水化产物的量都比较低时,固化淤泥不具有明显的强度。程福周等^[71]借助核磁共振技术研究淤泥固结体中孔隙水含量和分布规律,进而阐明淤泥固化的机理,他指出随着水泥掺量的增加和养护龄期的延长,孔隙水含量逐渐减少,孔隙水

逐渐分布在较小的孔隙中;龄期的主要作用是减小大孔隙的水分含量,而水泥不仅有利于减小大孔隙的水分含量,也有利于减小小孔隙的水分含量;随着淤泥固结体内部化学反应的进行,水分逐渐被消耗或转成了矿物水。甘雅雄^[64]对比了硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥对太湖梅梁湾淤泥的固化效果,并从水分转化的角度探讨了硫铝酸盐水泥在淤泥固化中具有早强性能的机理,他认为:淤泥固结体的抗压强度与结合水增量之间呈幂函数关系,不同种类水泥作用下,结合水对强度的贡献不同,其中硫铝酸盐水泥水化形成的凝胶态CSH表现出更强的结合势;淤泥固结体的抗压强度与矿物水增量基本呈线性关系,两种水泥作用下的关系比较接近,其结晶物基本相同,但早期硫铝酸盐水泥作用时,矿物水的增长速率明显高于普通硅酸盐水泥。

3.4 电阻率法

电阻率法已广泛应用于水泥水化过程的研究中,通过电阻率的变化可以分析水泥基材料的离子迁移和微观化学反应等信息^[72]。目前,电阻率法用于淤泥固化机理方面的研究较少。程福周等^[73]借助无接触电阻率法研究了淤泥固结后的微观反应,他将淤泥固结体内部的化学反应过程划分为I溶解期,0诱导期和0硬化期,其中第1阶段主要是水泥颗粒向固化淤泥系统中溶入离子,电阻率下降;第0阶段主要是淤泥开始发挥对离子的吸附作用,是淤泥吸附和水泥溶解的动态期,为第0阶段准备条件;第0阶段是电阻率上升的硬化期,水泥的水化作用消耗了液相中的离子,同时水化产物填充了土颗粒的间隙,这两方面原因使得电阻率上升。国内外学者用电阻率法研究淤泥固化机理的较少,这方面的研究有待进一步加强。

4 结语

4.1 目前存在的问题

综上所述,以上学者展开了一系列淤泥固化方面的研究,取得了许多有价值的研究成果,为淤泥的资源化利用提供了理论依据,然而目前淤泥固化仍存在以下几方面问题。

(1)目前淤泥固化大多是在淤泥含水率较高、呈流动状态下进行的,这就意味着要加入较多的固化材料,因此不仅固化效果不佳,而且经济适用性差。

(2)由于河流湖泊水体污染严重,疏浚淤泥大多含有一定量的污染物,因此淤泥固化土在道路工程、堤防工程等方面应用时,淤泥固结体中的污染物可

能会在雨水的作用下释放出来,对地表水和地下水造成二次污染。

(3)关于淤泥固化机理方面的研究主要侧重于定性分析,对于淤泥固化机理的定量研究有待进一步深入。

(4)目前对淤泥固化的研究主要以室内试验为主,对于室外试验以及大规模的应用方面研究较少。同时,相对于淤泥固结体的强度指标来说,在耐久性方面比如抗冻性、耐冲刷性等方面的研究较少。

4.2 应对措施和研究发展方向

针对以上存在的问题,今后应加强以下几方面的研究。

(1)进行淤泥脱水-固化-稳定化一体化研究。先对疏浚淤泥进行脱水,将含水率降低到一定程度后,再进行固化,从而减少固化剂的掺入量,同时提高淤泥固化的效果。在进行淤泥固化时,要考虑对淤泥稳定化的影响,即在满足强度等力学指标和耐久性的同时,还应研究淤泥固化对污染物的稳定和固定作用。在实际中,应优先选用同时有利于淤泥固化和稳定化的固化材料。

(2)采用多手段联合的方法,对淤泥固化的机理进行定量研究和分析。

(3)淤泥固结体的耐久性方面以及在实际工程中的大规模应用有待进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] DERM ATAS D, PAULDUTKO P, BALORDA-BARONE J, et al. Geotechnical properties of cement treated dredged sediment to be used as transportation fill[C]. Proceedings of the 3rd specialty conference on dredging and dredged material disposal, 2002.
- [2] KAM ALI S, BERNARD F, DUBOIS V, et al. Beneficial use of marine dredged sand and sediments in road construction[C]. First International Conference On Engineering for Waste Treatment: Beneficial Use of Waste and By-Products. Albi, France, 2005.
- [3] SIHAMA K, FABRICEA B, EDINE A N, et al. Marine dredged sediments as new materials resource for road construction[J]. Waste Management, 2008, 28(5): 919-928. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.03.027.
- [4] 付广义. 城市河道疏浚淤泥固化处理研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2012. (FU G Y. Experimental study on solidification of sediments dredged from city rivers[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, 2012. (in Chinese))
- [5] 杨海龙. 淤泥固化机理与路用工程性状试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2010. (YANG H L. Experimental study on the mechanism and road engineering characteristic of solidified silt[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))
- [6] 韩苏建, 李宁, 郭敏霞, 等. 淤泥水泥土和填筑黄土的物理力学特性试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(5): 97-100. (HAN S J, LIN N, GUO M X, et al. Study on physical mechanical characters of cement stabilized mud and filling loess[J]. Journal of northwest sci tech university of agriculture and forestry(Natural Science Edition), 2004, 32(5): 97-100. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1671-9387.2004.05.023.
- [7] JONGPRADIST P, JUMLONGRACH N, YOU WAI S. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement admixed clay at high water content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 49-58.
- [8] 杨云芳, 陈萍, 施萍萍. 化学固化对淤泥颗粒粒径及含水率影响的试验研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(1): 38-40, 69. (YANG Y F, CHEN P, SHI P P. Experimental study on the influence on size distribution and water content of chemical solidified dredged sediment[J]. Journal of Zhejiang Sci Tech University, 2008, 25(1): 38-40, 69. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-3851.2008.01.009.
- [9] LEE L T. Method to rapidly assess the index properties of fine grained dredged materials[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(5): 464-468.
- [10] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(z1): 280-284. (DING J W, HONG Z S, LIU S Y. Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(z1): 280-284. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2011.s1.123.
- [11] 张丽华, 范昭平. 石灰粉煤灰改良高含水率疏浚淤泥的试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 91-95. (ZHANG L H, FAN Z P. Experimental study on lime fly ash improving high water content dredged material[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 35(1): 91-95. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2013.01.019.
- [12] 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(z1): 281-286. (GI W D, ZHANG Y T, YAN R T, et al. An experimental study of decreasing fluidity of silt with high moisture content by high water absorbent material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(z1): 281-286. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.048.
- [13] 张春雷, 汪顺才, 朱伟, 等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(z1): 567-570. (ZHANG C L, WANG S C, ZHU W, et al. Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(z1): 567-570. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.z1.115.
- [14] 王亮, 谢健, 张楠, 等. 含水率对重塑淤泥不排水强度性质的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2973-2978. (WANG L, XIE J, ZHANG N, et al. Influences of water content on undrained shear strength of remolded dredged materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2973-2978. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2012.10.007.
- [15] 黄英豪, 朱伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究[J].

- 岩土力学, 2012, 33(10): 2923-2928. (HUANG Y H, ZHU W, ZHOU X Z, et al. Experimental study of compressibility behavior of solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2923-2928. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2012.10.003.
- [16] 丁建文, 吴学春, 李辉, 等. 疏浚淤泥固化土的压缩特性与结构屈服应力[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 627-632. (DING JW, WU X C, LI H, et al. Compression properties and structure yield stress for solidified soil composing of dredged clays[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 627-632. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2012.04.021.
- [17] 肖林, 王春义, 郭汉生. 建筑材料水泥土[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. (XIAO L WANG C Y, GUO H S. Cement Soil of Building Material[M]. Beijing: China Water and Power Press, 1987. (in Chinese))
- [18] 冯志超. 粘粒含量对淤泥固化效果的影响及其机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (FENG Z C. The influence of clay content on solidification effect of silt and the influence mechanism [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [19] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. (ZHANG R J. dynamics of river sediment (Second Edition) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1998. (in Chinese))
- [20] CROFT J B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization[J]. Geotechnique, 1967, 17(2): 119-135. DOI: 10.1680/geot.1967.17.2.119.
- [21] 宁建国, 黄新. 土样矿物成分对固化土抗压强度增长的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 113-117. (NING J G, HUANG X. Effect of mineral component of soil on strength increasing of stabilized soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 113-117. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.01.021.
- [22] HE C L, OSBAECK B, MAKOVICKY E, et al. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(8): 1691-1702. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00165-4.
- [23] 彭丹, 金峰, 吕俊杰, 等. 滇池底泥中有机质的分布状况研究[J]. 土壤, 2004, 36(5): 568-572. (PENG D, JIN F, LV J J, et al. Content and distribution of organic matter in Dianchi sediment[J]. Soils, 2004, 36(5): 568-572. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.0253-9829.2004.05.020.
- [24] 朱广伟, 李静, 朱梦圆, 等. 锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1451-1459. (ZHU G W, LI J, ZHU M Y, et al. Effect of phoslock on the reduction of sediment phosphorus release in Lake Xihu[J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1451-1459. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjkk.201609123.
- [25] 赵萱. 我国不同生态型湖泊沉积物有机质赋存形态及其与重金属相互作用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012. (ZHAO X. Investigation on distribution of organic matter and its complexation with heavy metals in sediments of different ecological lakes in China [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012. (in Chinese))
- [26] 曾科林. 腐殖酸对淤泥固化效果的影响及其机理[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZENG K L. The influence of humic acid on the solidification effect of silt and its mechanism [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [27] 范昭平, 朱伟, 张春雷, 等. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1327-1330, 1334. (FAN Z P, ZHU W, ZHANG C L, et al. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1327-1330, 1334. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.08.027.
- [28] 朱伟, 曾科林, 张春雷, 等. 淤泥固化处理中有机物成分的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 33-36. (ZHU W, ZENG K L, ZHANG C L, et al. Influence of organic matter component on solidification of dredged sediment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.01.007.
- [29] 陈慧娥, 王清. 有机质对水泥加固软土效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(z2): 5816-5821. (CHEN H E, WANG Q. Influences of organic matter on the effects of consolidating soft soil with cement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(z2): 5816-5821. (in Chinese))
- [30] TREMBLAY H, DUCHESNE J, LOCAT J, et al. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 535-545. DOI: 10.1139/t02-002.
- [31] 张春雷. 淤泥固化土力学性质及固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (ZHANG C L. Research on Mechanical property and Solidification mechanism of Solidified Silt [D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [32] 徐桂平, 史迎春. 淤泥固化土力学性质试验研究[J]. 港工技术, 2016, 53(6): 102-106. (XU G P, SHI Y C. Experimental study on mechanical property of silt solidified soil[J]. Port Engineering Technology, 2016, 53(6): 102-106. (in Chinese)) DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20160626.
- [33] 邢伟, 王东星. 石灰改性淤泥的抗压和抗剪强度试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(24): 84-87, 97. (XING W, WANG D X. Experimental study on compressive and shear strength of lime modified sludge[J]. Yangtze River, 2016, 47(24): 84-87, 97. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1007-4179.2016.24.019.
- [34] JAU BERTHIE R, RENDELL F, RANGEARD D, et al. Stabilisation of estuarine silt with lime and/or cement[J]. Applied Clay Science, 2010, 50: 395-400. DOI: 10.1016/j.clay.2010.09.004.
- [35] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817-2822. (DING J W, ZHANG S, HONG Z S, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817-2822. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.09.021.
- [36] 王将军, 孙立军. 高钙粉煤灰的界定[J]. 粉煤灰综合利用, 2002(5): 27-29. (WANG J J, SUN L J. The definition of high calcium fly ash[J]. Fly ash comprehensive utilization, 2002

- (5): 27-29. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-8249.2002.05.009.
- [37] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664. (WANG D X, XU W Y. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3659-3664. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2012.12.039.
- [38] ZENTARA R, WANG D X, ABRIAK N E. et al. Utilization of siliceous aluminous fly ash and cement for solidification of marine sediments[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 856-863. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.024.
- [39] 周红波, 李恒, 王天龙, 等. 高钙粉煤灰加固促淤地基机理和性状试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 783-788. (ZHOU H B, LI H, WANG T L, et al. Test study on mechanism and behavior of reclaimed soft land improved by high calcium fly ash[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 783-788. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.05.022.
- [40] 王宏伟, 王东星, 贺扬. MgO 改性淤泥固化土压缩特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 2133-2141. (WANG H W, WANG D X, HE Y. Experimental study on compressibility behavior of solidified dredged sludge with reactive MgO[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(8): 2133-2141. (in Chinese)) DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.08.022.
- [41] 程福周, 雷学文, 孟庆山, 等. 水泥—水玻璃固化东湖淤泥的室内试验研究[J]. 人民长江, 2013, 44(24): 45-48. (CHENG F Z, LEI X W, MENG Q S, et al. Indoor experiment study on solidification of lake silt by cement-sodium silicate[J]. Yangtze River, 2013, 44(24): 45-48. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2013.24.013.
- [42] 叶观宝, 陈望春, 徐超, 等. 水泥土添加剂的室内试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 12-17. (YE G B, CHEN W C, XU C, et al. Test on additive of cement-soil in laboratory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 12-17. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1001-7372.2006.05.003.
- [43] 金裕民, 郑旭卫, 蔡纯阳, 等. 水泥粉煤灰固化滩涂淤泥的强度与固化机理研究[J]. 科技通报, 2015, 31(5): 132-136, 141. (JIN Y M, ZHENG X W, CAI C Y, et al. Study on the strength and curing mechanism of beach silt stabilized soil using cement fly ash[J]. Bulletin of science and technology, 2015, 31(5): 132-136, 141. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7119.2015.05.029.
- [44] 杨爱武, 闫瀚旺, 杜东菊, 等. 碱性环境对固化天津海积软土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2930-2934. (YANG A W, YAN S W, DU D J, et al. Experimental study of alkaline environment effects on the strength of cement soil of Tianjin marine soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2930-2934. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.09.040.
- [45] 陈萌, 杨国录, 余亮英. 粉煤灰和 NaOH 固化稳定化受污淤泥试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 123-127. (CHEN M, YANG G L, YU L Y. Experimental study on solidification and stabilization of polluted silt using fly ash and sodium hydroxide[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(10): 123-127. (in Chinese)) DOI: 10.13245/j.hust.2013.10.013.
- [46] 蒲凡. 固化海涂淤泥的强度和变形特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (PU F. Research on the strength and deformation characteristics of solidified tideland sludge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [47] 曹玉鹏, 卞夏, 邓永锋. 高含水率疏浚淤泥新型复合固化材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(z1): 321-326. (CAO Y P, BIAN X, DENG Y F. Solidification of dredged sludge with high water content by new composite additive[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(z1): 321-326. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2011.s1.086.
- [48] 肖继强, 黄志义, 殷成龙. 纳米材料改性淤泥质土试验研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(8): 98-102. (XIAO J Q, HUANG Z Y, YIN C L. Experimental study on nano material modified silt soil in Huzhou area[J]. Low temperature architecture technology, 2017, 39(8): 98-102. (in Chinese)) DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2017.08.027.
- [49] 高术森. 聚丙烯纤维对固化海涂淤泥物理力学性能的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (GAO S S. Research on the effect of polypropylene fiber on mechanical properties of solidified tideland sludge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [50] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚淤泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(10): 1561-1565. (ZHU W, ZHANG C L, GAO Y F, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39(10): 1561-1565. (in Chinese)) DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2005.10.023.
- [51] 丁建文, 刘铁平, 曹玉鹏, 等. 高含水率疏浚淤泥固化土的抗压试验与强度预测[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(z2): 55-60. (DING J W, LIU T P, CAO Y P, et al. Unconfined compression tests and strength prediction method for solidified soils of dredged clays with high water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(z2): 55-60. (in Chinese))
- [52] 陆萍. 淤泥常温固化及其力学性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015. (LU P. The Research on the solidification and mechanical properties of sludge[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015. (in Chinese))
- [53] 章荣军, 郑俊杰, 程钰诗, 等. 养护温度对水泥固化淤泥强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3463-3471. (ZHANG R J, ZHENG J J, CHENG Y S, et al. Experimental investigation on effect of curing temperature on strength development of cement stabilized clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3463-3471. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.015.
- [54] 郑少辉. 低掺量水泥固化高含水率淤泥强度影响因素试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015. (ZHENG S H. Experimental study on the influence factors of strength behavior of cement sta

- bilized clay at high water content[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [55] HORPIBULSU K S, RACHAN R, RAKSACHON Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in bleached cement stabilized silty clay [J]. *Soils and foundations*, 2009, 49(1): 85-98. DOI: 10.3208/sandf.49.85.
- [56] 贾苍琴, 黄茂松, 姚环. 水泥粉煤灰加固闽江口地区软粘土试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(7): 884-888. (JIA C Q, HUANG M S, YAO H. Experimental research on stabilization of soft soil with cement and fly-ash in the Minjiang Estuary[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2004, 32(7): 884-888. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2004.07.009.
- [57] PENUMADU D, DEAN J. Compressibility effect in evaluating the pore size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(2): 393-405. DOI: 10.1139/199-121.
- [58] HONG Z S, TATEISHI Y, HAN J. Experimental study of macro and micro behavior of natural diatomite[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(5): 603-610. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(603).
- [59] 丁建文. 高含水率疏浚淤泥流动固化土的力学性状及微观结构特征研究[D]. 南京: 东南大学, 2011. (DING J W. Research on strength behavior and microstructure of flow-solidified soils of dredged clays with high water content[D]. Nanjing: Southeast University, 2011. (in Chinese))
- [60] 张丽娟, 刘仁钊. 南沙港淤泥固化前后物理性学性能和微观结构变化[J]. *水利水运工程学报*, 2015(3): 3F36. (ZHANG L J, LIU R Z. Physico-mechanical properties and changes in microstructure of silt before and after solidification in Nansha port[J]. *Hydro Science and Engineering*, 2015(3): 3F36. (in Chinese) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.005.
- [61] 陈萌, 杨国录, 范杨臻, 等. 固化对淤泥结构单元体多重分形特性的影响[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 51-55. (CHEN M, YANG G L, FAN Y Z, et al. Effect of solidification on multifractal characteristics of silt structural unit [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(2): 51-55. (in Chinese)) DOI: 10.13245/j.hust.140211.
- [62] REKIK B, BOU TOUIL M. Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio[J]. *Geomarine Letters*, 2009, 29(3): 171-179. DOI: 10.1007/s00367-009-0134-x.
- [63] 李志威, 朱书景. 改性淤泥做码头填筑材料试验研究[J]. *水运工程*, 2006(6): 85-88. (LI Z W, ZHU S J. Experimental research on use of treated silt as wharf filling material[J]. *Port and waterway engineering*, 2006(6): 85-88. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2006.06.021.
- [64] 甘雅雄, 朱伟, 吕一彦, 等. 从水分转化研究早强型材料固化淤泥的早强机理[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 755-760. (GAN Y X, ZHU W, LYU Y Y, et al. Early strength mechanism of cementitious additives from perspective of water con-
- version [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 755-760. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201604022.
- [65] 王朝辉, 赵娟娟, 曾伟, 等. 新型 CVC 固化剂固化淤泥结构表征与路用性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(3): 917-924. (WANG C H, ZHAO J J, ZENG W, et al. Microstructures and road performance of silt stabilized by new CVC stabilizer[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(3): 917-924. (in Chinese))
- [66] 童琦. 粉煤灰一矿粉固化疏浚淤泥力学特性及机理研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2015. (TONG Q. Mechanical characteristics and mechanisms of dredged silt solidified by fly ash and slag[D]. Tangshan: Hebei United University, 2015. (in Chinese))
- [67] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physico-chemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(7): 696-706. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(696).
- [68] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉, 等. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(12): 3591-3596, 3603. (DING J W, HONG Z S, LIU S Y, et al. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3591-3596, 3603. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.12.010.
- [69] 张亚灿, 赵仲辉, 胡孝彭, 等. 固化淤泥渗透性的微观分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(7): 243-247. (ZHANG Y C, ZHAO Z H, HU X P, et al. Micro-analysis of permeability properties of solidified dredged material[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(7): 243-247. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.07.047.
- [70] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C F. Soil-water transfer mechanism for solidified dredged materials [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 2007, 133(5): 588-598. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(588).
- [71] 程福周, 雷学文, 孟庆山, 等. 基于核磁共振技术的疏浚淤泥固化土孔隙水含量及分布研究[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(10): 116-120. (CHENG F Z, LEI X W, MENG Q S, et al. Pore water content of solidified dredging silt and its distribution based on nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(10): 116-120. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20150689.
- [72] XIAO L Z, LI Z J. Early age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008; 38(3): 312-319. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.027.
- [73] 程福周, 雷学文, 孟庆山, 等. 基于无接触电阻率法的疏浚淤泥固化土的早期固化机理研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(8): 275-280. (CHENG F Z, LEI X W, MENG Q S, et al. Research on the early curing mechanism of solidified dredging silt based on the non-contacting resistivity measurement[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(8): 275-280. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.08.047.