



固化土在码头桩基冲刷防护应用的试验与数值模拟研究

程立星¹, 顾勇², 梁鑫^{3,4}, 郝宇驰^{3,4}

(1. 嘉兴市银建工程咨询评估有限公司, 浙江 嘉兴 314031; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002;
3. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201314;
4. 疏浚技术装备国家工程研究中心, 上海 201314)

摘要: 冲刷防护是码头桩基设计维护中需要面临的重要问题之一。探索固化渣土用于桩基冲刷防护的可行性, 即利用工程建设渣土添加适宜的固化剂形成固化土, 通过适宜方式对桥墩冲刷区进行覆盖, 增强床面的抗冲性能, 从而起到防护作用。针对不同的固化土配方, 对其流动性、抗剪强度以及抗冲刷情况进行物理模型试验以及数值模拟研究。试验结果表明, 固化土塌落直径随着水土比的增加而增加, 并且固化土的流动性随时间降低较快; 固化土的抗剪强度随时间而缓慢提高, 灰土比提高, 固化土强度亦会随之提高; 固化土整体对水流冲刷侵蚀抵抗效果较好, 可用作新型的冲刷防护材料; 在水下环境中, 固化土的强度也会随时间不断增加, 耐久性能良好。

关键词: 码头桩基; 冲刷防护; 工程渣土; 固化土; 流动性; 抗剪强度

中图分类号: U656; U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0184-07

Experimental and numerical simulation research on application of solidified soil in scour protection of dock pile foundation

CHENG Lixing¹, GU Yong², LIANG Xin^{3,4}, HAO Yuchi^{3,4}

(1. Jiaxing Yinjian Evaluation Engineering Consulting Co., Ltd., Jiaxing 314031, China;

2. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

3. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201314, China;

4. National Engineering Research Center of Dredging, Shanghai 201314, China)

Abstract: Scour protection is one of the important issues that need to be faced in the design and maintenance of dock pile foundations. This article explores the feasibility of using solidified soil for pile foundation erosion protection, that is, using engineering construction soil to add suitable solidification agents to form solidified soil, covering the scouring area of bridge piers in an appropriate way, enhancing the anti erosion performance of the bed surface, and thus playing a protective role. This article conducted targeted physical model experiments and numerical simulations on the flowability, shear strength, and erosion resistance of different solidified soil formulations. The experimental results show that the collapse diameter of solidified soil increases with the increase of soil to water ratio, and the fluidity of solidified soil decreases rapidly with time. The shear strength of solidified soil slowly increases over time, and as the ash to soil ratio increases, the strength of solidified soil will also increase accordingly. The overall resistance of solidified soil to water flow erosion is good, and it can be used as a new type of erosion protection material. In underwater environments, the strength of solidified soil also increases over time, and its durability is good.

Keywords: pier pile foundation; scour protection; engineering waste soil; solidified soil; mobility; shear strength

收稿日期: 2024-04-16

作者简介: 程立星 (1989—), 男, 工程师, 从事水利及水环境工程的研究和管理工作。

码头下方桩基会明显改变附近水流的水力条件,使水流在桩基附近产生紊动、涡漩,进而对码头下方海床形成冲刷。桩基附近的局部冲刷非常复杂^[1-2],日积月累,冲刷坑逐渐增大,甚至会影响桩基的稳定性,严重威胁到码头的安全。因此,开展码头下方桩基的局部冲刷防护,对保证码头的安全稳定,延长其使用寿命具有重大意义。

冲刷防护应从两方面出发,一是将桩基打深,二是减小海床冲刷。但是由于打深基础需要消耗极大的人力物力,所以减小海床冲刷的方法被更广泛地使用。目前已有的冲刷防护方式包括抛石防护^[3-5]、扭工字块^[6]以及在结构物附近修建水工建筑物^[7]等。针对这些防护方式,许多学者利用理论分析、物理模型试验、现场观测^[8]和数值模拟^[9-10]等方法开展了各种研究。杜硕等^[11]提出在波流作用下的桩基局部冲刷深度的预测公式;毕明君等^[12]研究了砂质海床中桩基础的冲刷特征,发现采用无搭接方式铺设砂被并且采用沙袋填充冲刷坑可对桩基结构周围底床形成良好的防护;杨少磊等^[13]通过数值模拟建立了桩基础的优化模型,发现适当增加桩径和壁厚比直接增加桩长更经济合理。

桩基的防护,归根到底就是改变水流-桩基-泥沙之间的耦合作用关系,通过各种方式减小水流对桩基附近泥沙的冲刷,但是不当的防护措施可能会造成负面效果^[14]。本文探索固化土用于桩基新型防护方式的可行性。这种方法可以利用工程产生的渣土,降低施工成本,并且对床面地形以及附近水力条件影响较小。

1 试验与数值方法

1.1 试验用土

试验土体来源于上海某工程渣土。经测试,试验土质为黏土,中值粒径为 $10.4\ \mu\text{m}$,天然密度为 $1.78\ \text{g/cm}^3$,天然含水率为 51.41% ,土质基本参数见表1,土的粒径分布曲线见图1。

表1 土质基本参数

Tab. 1 Basic parameters of soil

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	$d_{10}/$ μm	$d_{30}/$ μm	$d_{50}/$ μm
1.78	51.41	39.5	21.3	0.26	5.1	10.4

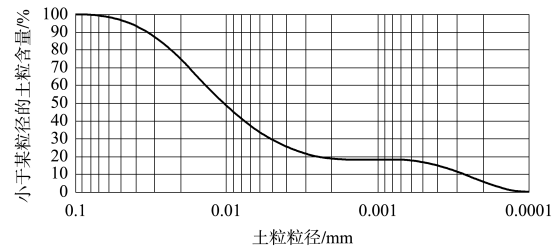


图1 土体粒径分布曲线

Fig. 1 Distribution curve of soil particle size

1.2 试验方法

1.2.1 流动性试验

泵送方式是较为常用的一种运送方式,但泵送方式要求固化土需具有较大的流动性^[15],因此,测试和研究固化土在不同水泥、水的掺量下的流动性,及固化土的流动性随时间的变化规律是十分重要的。先将直径 $80\ \text{mm}$ 、高 $80\ \text{mm}$ 的试验筒置于透明水平的有机玻璃板上,然后将刚搅拌均匀的固化土装入试验筒至表面溢出,用刮刀将表面刮平,见图2,之后快速提起圆筒,测试固化土塌落后的直径,作为试样的流动性指标。



图2 流动性试验过程

Fig. 2 Liquidity test process

1.2.2 抗剪强度试验

固化土铺到海底后,水流对固化土表面进行冲刷,土体表面受到剪应力作用,土体抗剪强度过低,则会导致固化土被水流冲刷侵蚀,不能起到良好的防护作用。将固化土置于环刀中,分别

于空气中和水下进行养护, 见图 3, 测试其抗剪强度随时间的变化。

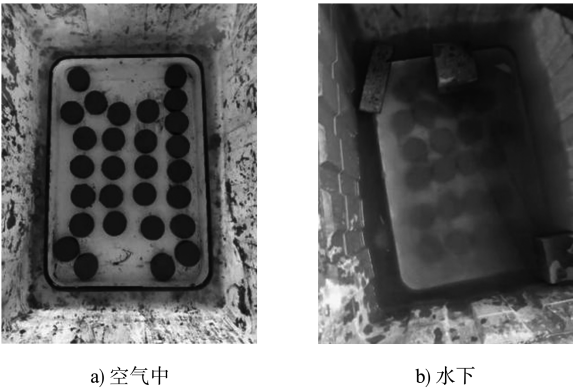


图 3 试样在水下与空气中养护
Fig. 3 Sample cured underwater and in air

1.2.3 抗冲刷试验

抗冲刷试验在疏浚研究中心的多功能疏浚风浪流水槽中进行。水槽总长 107.0 m、宽 2.0 m、高 2.5 m。试验水深取 30 cm, 以满足试验流速的要求。固化土铺设长 1.00 m、厚 0.10 m、宽 1.20 m。在试验段前后设置标尺, 以记录试验水深; 采用 ADV 流速仪测试试验流速。

试验开始前, 根据设计断面要求铺设固化土。待铺设完成后, 向水槽内注水, 严格控制水流速度, 以避免注水过快导致试验断面破坏, 直至预设水位; 逐步调整轴流泵频率和阀门开启度至设定试验流速, 待水位及流速稳定后, 记录观测段水深及流速; 继续调节轴流泵转速和阀门开启度, 增加试验流速, 并观测试验断面稳定性及其失稳运动情况。

1.3 数值模拟方法

为了研究码头桩基附近的流场结构特征, 建立桩基模型, 并导入冲刷坑地形(图 4), 通过设置不同的边界流速, 研究不同工况下桥墩附近的流场变化。为了分析冲刷坑内填充物对桥墩附近流场的影响, 通过将实际的冲刷坑内填充 3 m 渣土, 如图 4 所示, 分析填充前后的流场变化情况(工况 1 和 3)。工况设置见表 2。

表 2 桩基附近流场研究工况

Tab. 2 Conditions of flow field near pile foundation		
工况	边界流速/(m·s ⁻¹)	冲刷坑是否填充
1	2.68	否
2	3.40	否
3	2.68	是

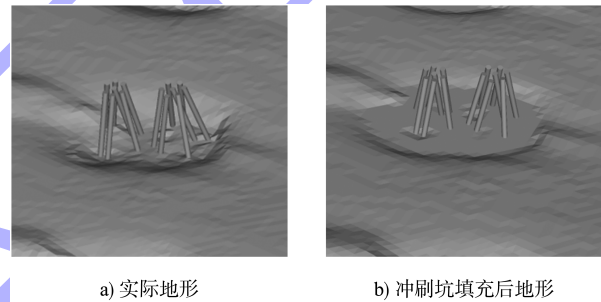


图 4 桩基附近地形
Fig. 4 Terrain near pile foundation

2 试验结果分析

2.1 流动性试验

在不同的灰土比(水泥:渣土)情况下, 改变水土比(水:渣土), 进行流动性试验, 见图 5。

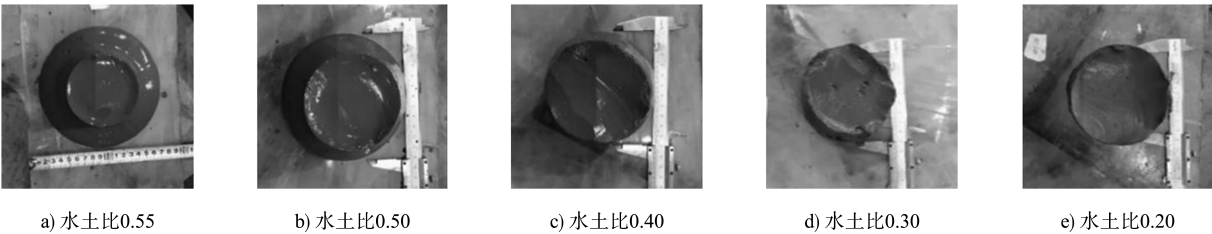


图 5 流动性测试结果 (灰土比为 0.20)
Fig. 5 Liquidity test results (ratio of cement to muck is 0.20)

固化土流动性随水土比的变化见图 6。由图可见, 塌落直径随水土比的增加而增加, 且当灰土

比较低时, 塌落直径增速较快; 当水泥含量提高后, 塌落直径随水土比的增速会有所减缓。这是

因为水泥发生水化反应产生胶凝物, 在土颗粒之间形成胶结, 减小了土体内部的孔隙率, 使固化土的流动性降低。

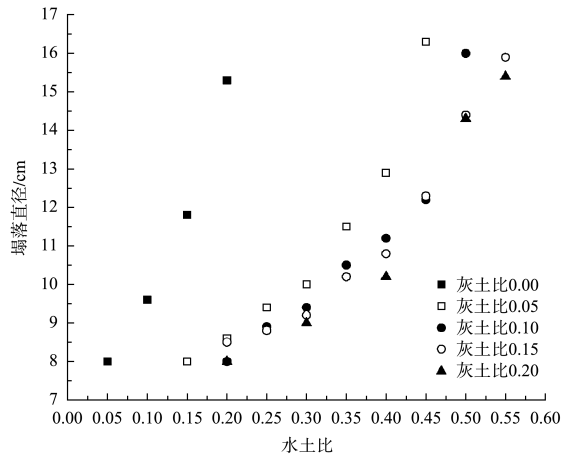


图6 流动性随水土比变化规律

Fig. 6 Variation of liquidity with ratio of water to muck

在水土比为0.40的情况下, 针对灰土比为0.10和0.20的2种工况, 研究固化土流动性随时间的变化规律, 见图7。如图所示, 灰土比为0.10与0.20时, 2种固化土流动性随时间变化曲线基本相似, 可认为灰土比对流动性随时间变化影响较小。

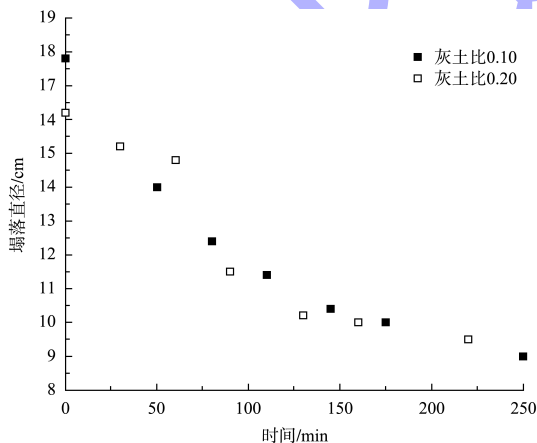


图7 固化土流动性随时间变化规律

Fig. 7 Variation of solidified soil flowability with time

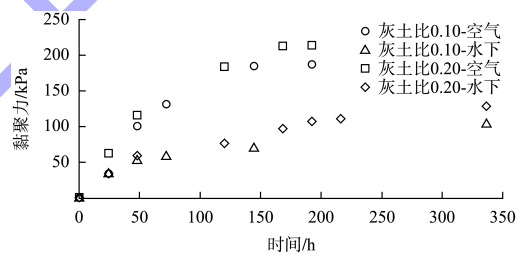
2.2 抗剪强度试验

根据流动性试验结果及相关经验, 仅对灰土比分别为0.10和0.20的2种固化土进行空气及水下(淡水)养护环境的强度试验。

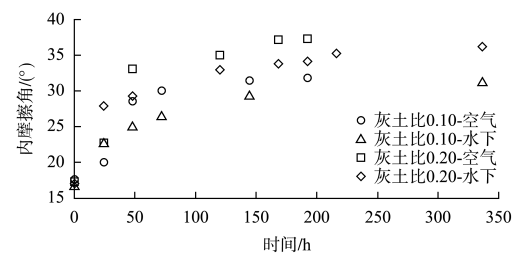
固化土的内摩擦角与黏聚力随时间变化见图8。

由图8a)可知, 在试验配比下, 固化土的强度均远大于扰动土。固化土的黏聚力在空气环境下上升很快, 养护192 h后, 相邻两次测量强度变化小于1%, 基本达到极限值。两种固化土黏聚力均呈现随时间而不断增长的趋势, 并且增速均在不断降低。在水下环境中, 黏聚力强度上升较慢, 在养护期间黏聚力持续上升, 并且相同养护时间下黏聚力均远小于空气中养护的固化土黏聚力。

由图8b)可知, 内摩擦角呈先迅速增加, 之后在某时间之后增速变缓, 在最初的24 h内, 水下土样的内摩擦角增速高于空气中的土样, 但是之后水下土样的内摩擦角增速变缓, 空气中土样的内摩擦角增速则基本保持不变直至50 h。直至养护结束, 灰土比0.10的2组固化土内摩擦角均约达到30°, 灰土比0.20的2组固化土则约达到35°。



a) 黏聚力随时间变化



b) 内摩擦角随时间变化

图8 固化土强度随时间变化规律

Fig. 8 Variation of solidified soil strength with time

因此, 固化土的强度会随时间而不断增加, 随着时间的增加, 固化土强度上升, 抗冲刷能力亦会增加。吴开燕等^[16]研究发现, 在淡水条件下, 固化土的强度将持续增加, 而在海水侵蚀条件下, 固化土强度在20 d后开始缓慢降低, 但最终强度(120 d时)仍超过最大值的80%。

2.3 抗冲刷试验

由于灰土比为 0.10 与 0.20 的 2 种配比的固化土抗剪强度差别不大,使用灰土比为 0.10 的固化土进行抗冲刷试验。

图 9 为试验冲刷前后床面的对比。试验起始流速为 1.50 m/s,逐级增加,每级试验流速维持约 5 min,试验最大流速达 3.40 m/s。试验流速 1.74、2.68 和 3.40 m/s 工况分别持续 30 min,并进行排水观测,在试验流速 1.74 m/s 情况下,表层分离的小块被冲走,表层整体变平滑,未观测到明显的起动和冲刷现象;在试验流速 2.68 m/s 工况下,床面出现轻微的沙纹状冲痕,靠近水槽右侧有部分区域呈现轻微斑驳状剥落,但尚未形

成明显的冲刷;固化土在流速 3.40 m/s 工况下的冲刷情况见图 10。由图可知,当水流速度达到 3.40 m/s 时,固化土表面仍可保持完好的状态,但是靠近水槽壁的边角处有大块被冲走,断面形状较为整齐,可能是整块固化土被水流冲走。这说明流速 3.40 m/s 基本已经达到了固化土冲刷破坏的临界点。除此之外,试验中还发现,在同样流速情况下,固化土冲刷侵蚀破坏与否与冲刷时间关系不大。固化土在冲刷时间内基本无明显变化。这与和庆东等^[17]的结论十分相似,他们跟踪了某海上风电项目的固化土防护,发现 18 个月后固化土的外形轮廓未发生变化,无冲刷现象产生。

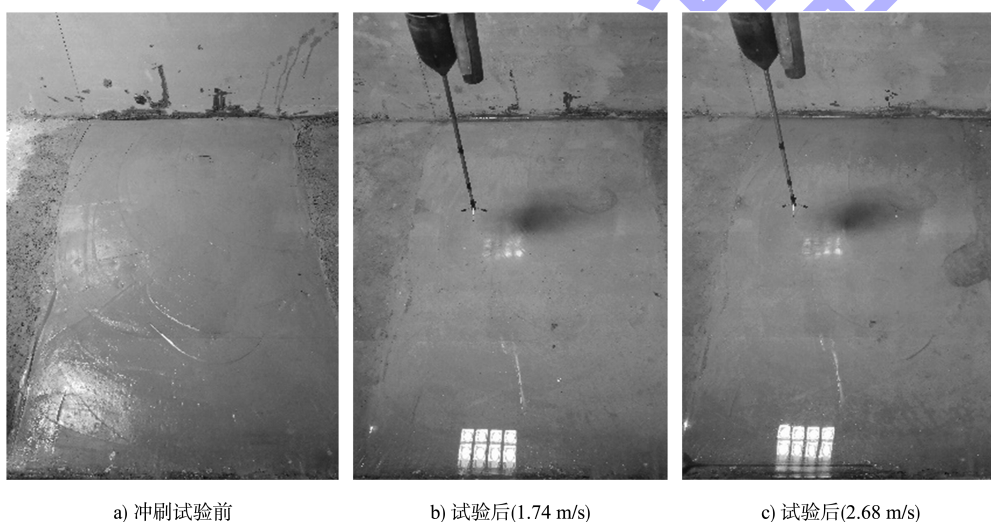


图 9 试验前后床面对比
Fig. 9 Comparison of bed surface before and after experiment

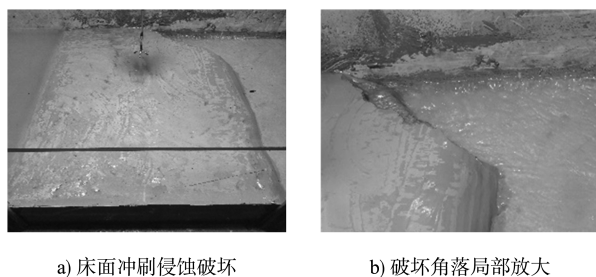


图 10 床面冲刷侵蚀破坏情况 (3.40 m/s)

Fig. 10 Erosion and damage of bed surface (3.40 m/s)

3 数值模拟结果分析

为了研究不同工况下冲刷坑内的流场分布特征,选取各工况下距桩基冲刷坑底部 0.3 m 处的

流场进行分析,见图 11。在实际地形条件下,当边界流速为 2.68 m/s 时,冲刷坑底部的流速整体均小于 2.00 m/s,其中,冲刷坑前缘流速较小,约为 1.30 m/s,冲刷坑边壁附近流速较大,约为 2.00 m/s,桩基后方的流速仅为 0.50 m/s 左右。在边界流速为 3.40 m/s 的情况下,冲刷坑内的流场结构特征未发生变化,仅流速整体有所增大。冲刷坑边壁的流速达到 3.00 m/s,冲刷坑前缘的流速为 2.00 m/s。桩基附近的流场纵剖面见图 12。由图可知,当边界流速为 2.68 m/s 时,冲刷坑上游的流速与边界流速基本一致,在进入冲刷坑后,

流速减小至 2.00 m/s, 冲刷坑前缘底部流速仅为 1.40 m/s 左右, 位于 2 个桥墩之间的流速最小, 约为 0.50 m/s。由横向剖面流场可以看出, 桥墩正后方的流速整体较小, 不超过 1.20 m/s。由冲刷坑边壁向外延伸的区域, 流速均较大, 近底层流速达到了 2.00 m/s。当边界流速为 3.40 m/s 时, 流场的剖面结构与 2.68 m/s 边界流速时相近, 上游来流在冲刷坑前缘附近开始减小, 2 个桥墩之间的流速达到最小, 约 0.30~1.00 m/s, 冲刷坑后方的流速为 2.50 m/s。当对冲刷坑进行填充后, 流场的垂向结构发生了变化。在冲刷坑前缘, 近底层流速有所增大。

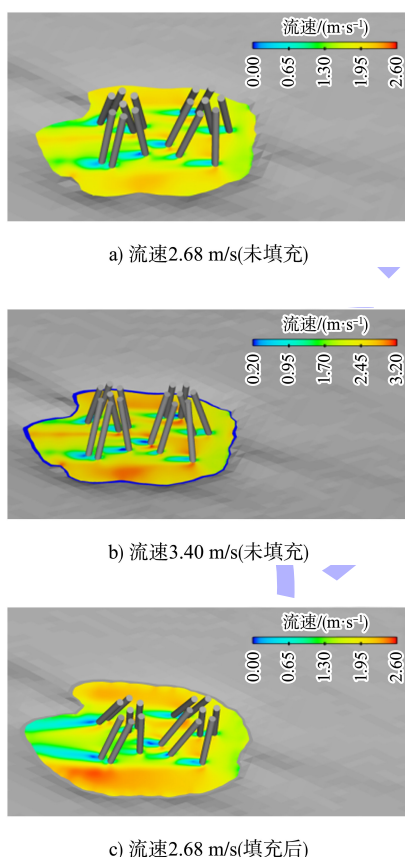
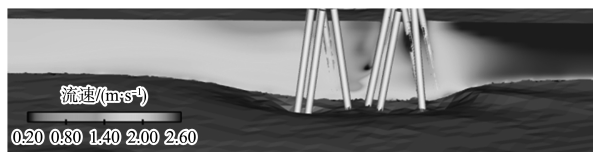
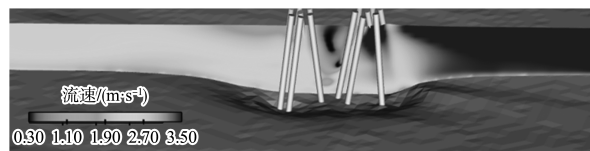


图 11 桩基附近流场横向剖面

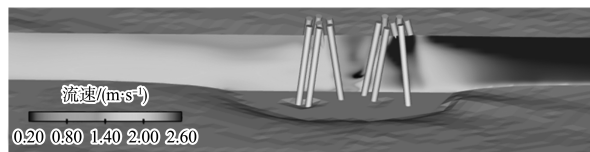
Fig. 11 Transverse section of flow field near pile foundation



a) 流速 2.68 m/s(未填充)



b) 流速 3.40 m/s(未填充)



c) 流速 2.68 m/s(填充后)

图 12 桩基附近流场纵向剖面

Fig. 12 Longitudinal section of flow field near pile foundation

综上所述, 冲刷坑内流速分布差异较大, 其中冲刷坑两侧边壁流速较大, 与上游来流速度相近, 冲刷坑前缘速度较小, 约为 1.50 m/s(上游来流为 2.68 m/s 工况下), 桥墩后方的流速为 0~0.80 m/s。上游不同来流速度对桥墩附近的流场结构特征影响较小, 仅改变了流速大小。对冲刷坑进行填充之后, 冲刷坑内流场变化较大, 尤其是桥墩两侧变化尤为显著, 靠近冲刷坑边壁附近的近底层流速达到 2.30 m/s, 相比于未填充前的流速增大了 0.20~0.30 m/s。这要求填充物的抗冲刷流速需达到 2.30 m/s, 才能起到防护作用。而抗冲刷的试验结果表明, 本固化土的抗冲刷流速大于 2.68 m/s, 因此可以起到良好的抗冲刷效果。

4 结论

1) 固化土流动性随着水土比的增加而增加, 随时间降低较快, 满足泵送要求所需掺水量大体约 45%~55%, 根据现有经验, 大量掺水会对固化土的强度及抗水流冲刷能力产生较大负面影响, 宜考虑如抛填等其他方案。

2) 固化土的抗剪强度随时间增加而增加, 在淡水条件下养护的固化土抗剪强度小于空气中养护的固化土抗剪强度, 固化土在海水侵蚀条件下, 强度随时间略微下降, 但仍超过最大强度的 80%, 耐久性较好。

3) 抗冲刷试验及数值模拟计算表明, 理想状

态下, 试验配比下的固化土具有很强的抗冲刷能力, 其失稳破坏的临界流速在 3.40 m/s 以上, 用于普通土质或砂质河床桥墩冲刷防护具有合理性和可行性, 为后续桥墩局部冲刷防护研究提供良好的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 陈翔 梅新咏. 平潭海峡公铁两用大桥主航道斜拉桥深水基础设计[J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 86-91.
CHEN X, MEI X Y. Design of deepwater foundations of main ship channel cable-stayed bridge of Pingtan Straits rail-cum-road bridge [J]. Bridge construction, 2016, 46(3): 86-91.
- [2] 魏凯, 徐博, 李义强. 基于实测水压力的跨海桥梁围堰波浪力计算[J]. 桥梁建设, 2018, 48(3): 50-54.
WEI K, XU B, LI Y Q. Calculation of wave loads on cofferdams for sea-crossing bridge based on field measurement of hydraulic pressure [J]. Bridge construction, 2018, 48(3): 50-54.
- [3] 高正荣, 黄建维, 卢中一. 苏通大桥主塔墩冲刷防护工程关键技术[J]. 水利水运工程学报, 2005(2): 18-22.
GAO Z R, HUANG J W, LU Z Y. Key techniques for scouring protection of the main pylon pier of Sutong Bridge [J]. Hydro-science and engineering, 2005 (2): 18-22.
- [4] 江胜华, 周智, 欧进萍. 基于赫兹接触理论的桥墩局部冲刷防护石块起动简化公式[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 118-124.
JIANG S H, ZHOU Z, OU J P. Simplified formula of riprap initiation for bridge pier local scour protection based on Hertz contact theory [J]. China journal of highway and transport, 2014, 27(5): 118-124.
- [5] 江胜华, 周智, 欧进萍. 桥墩局部冲刷防护的石块起动[J]. 泥沙研究, 2013(4): 63-67.
JIANG S H, ZHOU Z, OU J P. Incipient motion of rocks for bridge piers local scour protection [J]. Journal of sediment research, 2013(4): 63-67.
- [6] 房世龙. 扭工字块体防护群桩桥墩局部冲刷效果研究[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2018, 17(4): 50-52.
FANG S L. Effect of partial scouring dolosse pile piers [J]. Journal of Nantong vocational and technical shipping college, 2018, 17(4): 50-52.
- [7] 祁一鸣, 陆培东, 曾成杰, 等. 海上风电桩基局部冲刷试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015, (6): 60-67.
QI Y M, LU P D, ZENG C J, et al. Experimental studies on local scour of offshore wind turbine pile [J]. Hydro-science and engineering, 2015, (6): 60-67.
- [8] 张继东, 陈星宇, 颜永先, 等. 金塘大桥桥墩冲刷现状分析[J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2014, 15(3): 32-36, 42.
ZHANG J D, CHEN X Y, YAN Y X, et al. Current situation of scour around piers of Jintang bridge [J], Journal of Zhejiang institute of communications, 2014, 15(3): 32-36, 42.
- [9] 尹则高, 徐统, 迟万清, 等. 浮泥床面桥墩绕流冲刷的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11): 81-84.
YIN Z G, XU T, CHI W Q, et al. Numerical simulation of flow around piers under fluid mud bed [J]. Water resources and power, 2012, 30(11): 81-84.
- [10] 段海澎, 刘武, 朱大勇, 等. 非均质河床双排桥墩局部冲刷数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 155-160.
DUAN H P, LIU W, ZHU D Y, et al. Numerical Simulation for local scour around double-row bridge piers in uneven sandy riverbed [J]. Journal of water resources and water engineering, 2020, 31(2): 155-160.
- [11] 杜硕, 戴国亮, 高鲁超, 等. 波流作用近海风机单桩基础局部冲刷深度预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 616-622.
DU S, DAI G L, GAO L B, et al. Prediction of local scour depth at offshore wind turbine monopile foundation in combined waves and current [J]. Journal of Southeast University (Natural science edition), 2020, 50 (4): 616-622.
- [12] 毕明君, 刘晋超, 苏荣, 等. 砂质海岸单桩基础的冲刷特征与防护措施试验研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 103-111.
BI M Y, LIU J C, SU R, et al. Experimental study on scour characteristics and protection measures for monopile on sandy coast [J]. Southern energy construction, 2020, 7(2): 103-111.

(下转第 210 页)