

吹填软土固化室内试验研究

袁保军，贾 磊

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司，上海 200120)

摘要：针对软土地表层填筑砂石等材料日益稀缺的问题，进行吹填软土固化室内试验研究。采用无侧限抗压强度试验对比研究吹填软土在低掺入比情况下3种固化剂的加固效果。结果表明：在3种固化剂的低掺入比情况下，吹填软土经固化后强度均增长明显；在水泥中加入复合激发剂和矿渣微粉，对固化土的强度均有提高，矿渣微粉的效果优于复合激发剂；总掺入比不变，采用矿渣微粉替代部分水泥可以进一步提高固化效果。通过室内试验研究吹填软土在低掺入比下的固化规律并反馈工程应用，解决了软土地场填筑材料稀缺的难题。

关键词：固化剂；吹填软土；无侧限抗压强度；低掺入比

中图分类号：TU 411.6；U 655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)09-0186-06

Laboratory test for solidification of soft dredger fill

YUAN Bao-jun, JIA Lei

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Regarding the increasing scarcity of materials such as sand and gravel for the surface filling of soft soil sites, this study conducts laboratory tests on the solidification of soft dredger fill. The research uses unconfined compressive strength tests to compare the reinforcement effects of three curing agents under the condition of a low incorporation ratio. The results demonstrate that the strength of soft dredger fill increases significantly after solidification under the condition of a low incorporation ratio of three curing agents. The addition of compound activator and slag powder to cement can improve the strength of solidified soil, and the effect of slag powder is superior to that of compound activator. The replacement of part of cement with slag powder can further improve the reinforcement effect when the total incorporation ratio remains unchanged. Through the above laboratory tests for the solidification laws of soft dredger fill under a low incorporation ratio and feedback to the engineering applications, this study solves the problem of the scarcity of filling materials in the soft soil sites.

Keywords: curing agent; soft dredger fill; unconfined compressive strength; low incorporation ratio

我国东部沿海地区软土分布广泛且吹填软土成陆的工程众多，对于此类软土地常采用无砂垫层真空预压法进行软土加固^[1]，加固后的场地已具备一定的承载力，但较难满足车辆通行和开发建设的需求。

针对上述情况，结合目前较为成熟的软土固化技术^[2]，在软土或真空预压加固后的场地上，通过利用吹填软土与土壤固化剂拌和后，在地基

表层形成一层厚度较小、强度较高、覆盖面积较大的人工硬壳层^[3]，既可以有效控制和减小软基的沉降量、满足后续工程建设需求，又节省了砂石等稀缺材料用量。

相对于一般传统掺入比的固化土，围海造陆等相关工程中由于固化土工程量大，普遍用较低掺入比的固化材料对其进行处理^[4]，形成的固化土特性不同于常规的水泥土，且关于较低掺入比

的固化土的研究较少, 积累的经验公式也较少^[5]。本文以福建莆田某工程吹填软土为研究对象, 采用较低掺入比的水泥、水泥+复合激发剂及水泥+矿渣微粉分别拌制固化土试样, 通过室内无侧限抗压强度试验, 分析研究较低入比情况下的龄期、掺入比、固化剂种类等对固化土强度的影响, 为工程实践提供指导作用。

1 工程概况

工程位于福建省莆田市秀屿区, 工程范围内陆域吹填于2015年完成, 吹填土主要为淤泥质黏土和淤泥, 厚度为2.6~10.8 m。吹填土下部为厚度5~10 m的天然淤泥或淤泥质软土层, 该层含水量大、孔隙比大、工程性质差。采用无砂垫层真空预压法对吹填软土及下部土层进行排水固结处理, 真空预压处理完毕后, 场地表层填筑0.6~2.5 m厚土石方至设计高程, 其需求的土石方量较大, 且周边缺乏满足要求的土石方来源, 拟采用工程区周边同时间吹填的软土掺拌固化剂固化后作为填筑料。本文针对该工程吹填软土为研究对象, 采用较低掺入比的3种固化剂进行室内试验, 并分析研究固化土的强度规律。

2 固化土室内试验

2.1 试验材料

2.1.1 试验土体

试验所用土体取自工程区的吹填软土, 该土的主要物理力学性质指标见表1。

表1 试验土体物理力学性质指标

初始含水率/%	密度/(t·m ⁻³)	液限/%	塑限/%	液性指数	十字板抗剪强度/kPa
63	1.62	49.9	26.3	1.55	11.32

2.1.2 土壤固化剂

1) 水泥。采用P·O 42.5水泥。

2) 水泥+复合激发剂。复合激发剂的主要成分为硫酸钠、氯化钙、硅酸钠、氢氧化钠、硫酸铝, 配制时在1 kg水泥中掺入3 g硫酸钠、2 g氯化钙、2 g硅酸钠、1 g氢氧化钠、2 g硫酸铝。

3) 水泥+矿渣微粉。采用P·O 42.5水泥; 矿

渣微粉选用满足《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》^[6]的产品, 其等级为S95, 掺量固定为2%。

2.1.3 拌和用水

拌和用水为实验室自来水, 水的密度 $\rho=1.0 \text{ t/m}^3$ 。

2.2 试验方案实施

2.2.1 试验方法

为研究影响固化土强度增长的因素, 通过无侧限抗压强度试验测定固化土的无侧限抗压强度。

试样制备及试验方法按《水泥土配合比设计规程》^[7]附录A、B执行, 无侧限抗压强度试验采用70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm立方体试样。

2.2.2 试验组次

根据地勘资料, 工程范围内吹填土经自然晾晒后, 表层已形成一层约0.5 m厚含水率较低的硬壳层, 硬壳层下部软土含水率依然较高, 含水率从表层至深层分布范围为41.9%~81.1%, 故本次试验试样初始含水率设定为40%、60%、80%共3组。

通过自然晾干后的土体添加自来水调节淤泥初始含水率至40%、60%、80%, 再将掺入比为4%、5%、7%的固化剂(掺入比为掺入的水泥质量与被加固土的湿质量之比), 用砂浆搅拌机将淤泥搅拌均匀, 制作成型, 在标准养护条件下温度(20±2)℃、相对湿度95%以上, 经过养护龄期7、28 d后分别进行试验, 一定龄期下每个配比平行试验的试样为6个, 试验组次见表2。室内试验见图1。

表2 试验组次

固化剂种类	掺入比		
	4%	5%	7%
水泥	-	✓	-
水泥+复合激发剂	✓	✓	✓
水泥+矿渣微粉	✓	✓	✓



a) 固化土搅拌



b) 固化土入模



图 1 室内试验

3 试验结果分析

3.1 不同固化剂对固化土强度的影响

3 种固化剂在 5% 掺入比条件下, 相同初始含水率时固化土抗压强度关系曲线见图 2。可以看出, 3 种固化剂配置试样的固化强度均随着龄期的增加而增加。以水泥固化剂试样为参照, 试验结果如下:

1) 40%、60%、80% 初始含水率条件下水泥+复合激发剂试样的 28 d 抗压强度分别为水泥固化剂试样强度的 1.10、1.35、1.09 倍。这表明添加了复合激发剂试样的固化强度较单水泥固化剂试样有所提高, 这是由于复合激发剂为碱性激发剂, 改变固化土的 pH 值, 促进水泥在土体中的水化反应, 从而提高固化土的强度。

2) 40%、60%、80% 初始含水率条件下水泥+矿渣微粉试样的 7 d 抗压强度分别为水泥固化剂试样强度的 1.23、2.09、1.69 倍; 水泥+矿渣微粉试样的 28 d 抗压强度分别为水泥固化剂试样强度的 1.72、2.93、2.43 倍。这表明添加了矿渣微粉试样的固化强度较单水泥固化剂试样大幅度提高, 通过分析认为原因有: ①矿渣微粉是活性材料, 含有大量的活性氧化硅、活性氧化铝等, 可以参与水泥的水化水解反应, 与氢氧化钙反应产生水化硅酸钙和水化铝酸钙, 使土体的强度增强^[8]; ②在水泥掺入比相同的条件下, 额外掺加 2% 矿渣微粉提高固化剂的总掺入比, 对提高固化土强度产生有利影响。

3) 40%、60%、80% 初始含水率条件下水泥固化剂试样 28 与 7 d 抗压强度的比值分别为 1.23、

1.22、1.17, 水泥+矿渣微粉试样 28 与 7 d 抗压强度的比值为 1.72、1.71、1.68。试验表明水泥+矿渣微粉试样抗压强度增长更快, 且 28 d 后强度增长趋势更高, 认为在水泥掺入比相同的情况下, 水泥+矿渣微粉固化剂中多加 2% 的矿渣微粉对固化土强度产生较大影响。

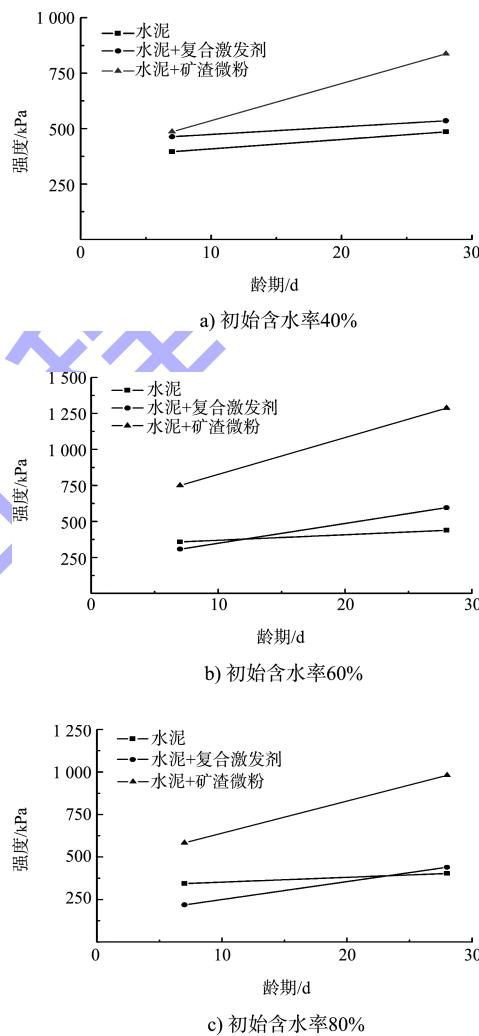


图 2 5% 掺入比时 3 种固化土强度关系曲线

3.2 添加剂对固化土强度的影响

掺入比 7% 的水泥+复合激发剂和掺入比 5% 的水泥+矿渣微粉固化剂配制的固化土试样在相同初始含水率条件下, 对应的固化土无侧限抗压强度关系曲线见图 3。以水泥+复合激发剂试样为参照, 试验结果如下:

1) 40%、60%、80% 初始含水率条件下水泥+复合激发剂试样 28 与 7 d 抗压强度的比值分别为 1.72、1.64、1.81, 水泥+矿渣微粉试样 28 与 7 d

抗压强度的比值为 1.72、1.71、1.68。这表明两种固化剂试样抗压强度增长均较快, 即在总掺量相同的条件下矿渣微粉和复合激发剂会对固化土强度增长产生较大影响。

2) 40%、60%、80% 初始含水率条件下水泥+矿渣微粉试样的 7 d 抗压强度分别为水泥+复合激发剂试样的 0.91、1.48、1.33 倍, 28d 抗压强度分别为水泥+复合激发剂试样强度的 0.92、1.55、1.24 倍。这表明试验土体含水量为 60%、80% 时, 水泥+矿渣微粉固化剂试样抗压强度均高于水泥+复合激发剂试样。

试验过程中当土体初始含水量 40% 时, 机械搅拌困难, 采用人工搅拌, 固化剂与土体难以拌和均匀, 导致 40% 含水量时水泥+矿渣微粉固化剂试样强度离散很大, 而 60%、80% 初始含水率试样均为机械搅拌制作, 搅拌较充分, 试验可靠性高, 故可以认为其余条件相同时, 5% 掺入比水泥+矿渣微粉固化剂(其中水泥掺入比 5%、矿渣微粉掺入比 2%) 固化效果高于 7% 掺入比的水泥+复合激发剂, 即在总掺入比不变的条件下利用部分矿渣微粉替代水泥既可以提高固化效果, 又可以节省成本, 具有较高的应用价值。

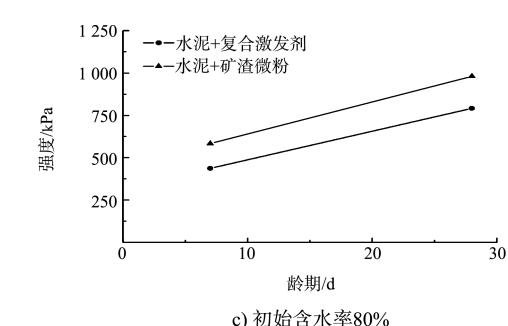
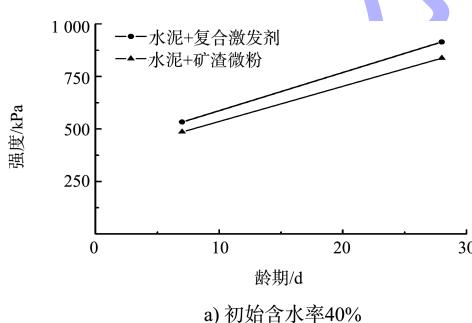
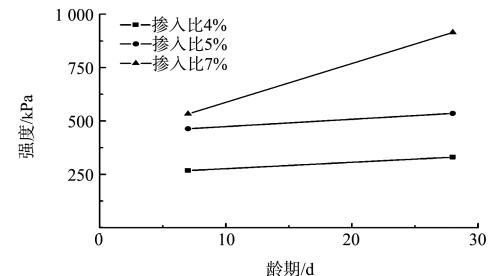
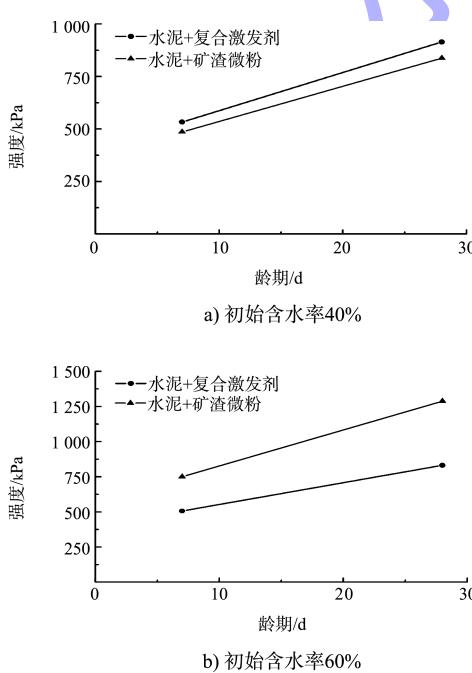


图 3 不同矿渣微粉掺入比下固化土强度关系曲线

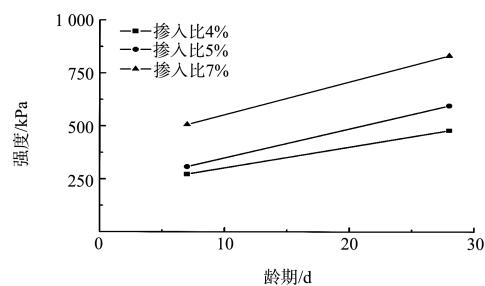
3.3 掺入比对固化土强度的影响

水泥+复合激发剂固化剂在 40%、60%、80% 初始含水率条件下, 不同掺入比的固化土强度关系曲线见图 4。可以看出, 随着固化剂掺入比越高, 固化土的强度也越高。以 4% 掺入比的固化土抗压强度为参考, 试验结果为: 1) 初始含水率 40% 时, 掺入比为 5%、7% 的试样 28 d 抗压强度分别为掺入比 4% 试样的 1.62、2.76 倍。2) 初始含水率 60% 时, 掺入比为 5%、7% 的试样 28 d 抗压强度分别为掺入比 4% 试样的 1.24、1.74 倍。3) 初始含水率 60% 时, 掺入比为 5%、7% 的试样 28 d 抗压强度分别为掺入比 4% 试样的 1.71、3.07 倍。

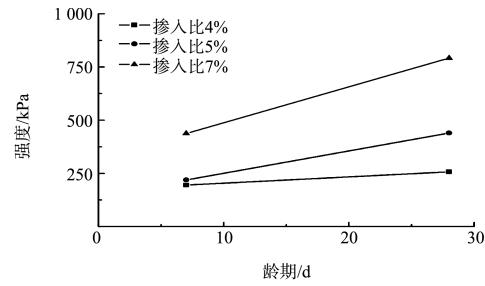
试验结果表明, 对于 3 种初始含水率, 固化土掺入比由 4% 提高至 5%, 固化土强度提高到 1.24~1.71 倍; 固化土掺入比由 4% 提高至 7%, 固化土强度提高到 1.74~3.07 倍。固化土掺入比的变化对固化土强度有显著影响, 实际应用时应根据目标软土的具体情况确定固化剂最佳掺入比, 在保证固化效果的基础上节省造价。



a) 水泥+复合激发剂, 初始含水率 40%



b) 水泥+复合激发剂, 初始含水率60%



c) 水泥+复合激发剂, 初始含水率80%

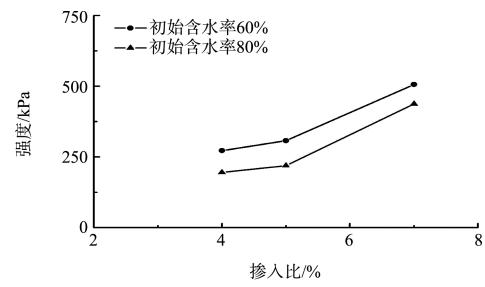
图 4 不同掺入比下固化土强度关系曲线

3.4 初始含水率比对固化土强度的影响

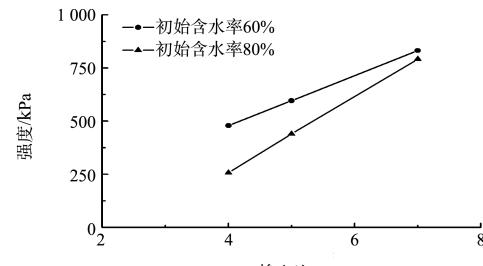
水泥+复合激发剂和水泥+矿渣微粉试样在各含水率条件下, 龄期 7、28 d 的固化土强度变化曲线见图 5。可以看出, 水泥+复合激发剂、水泥+矿渣微粉试样在龄期 7、28 d 时固化土强度均随着初始含水率的增加而降低。

初始含水率 40% 的试样液性指数为 0.58, 处于软塑状态(接近硬塑), 搅拌不均导致固化土强度离散性大, 图中未列出。

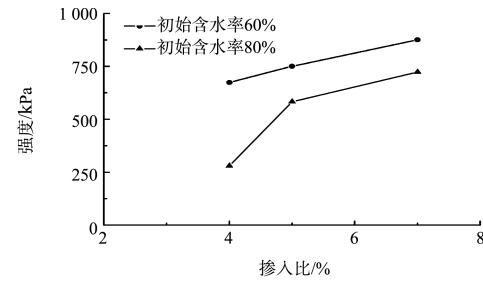
因此, 当实际工程中软土含水量较高时, 为达到相同的固化效果, 应适当增加固化剂掺量; 当含水量较低的土体接近硬塑状态时, 固化剂的拌和难度较大, 实际工程中应考虑不均匀性对强度的影响, 并采用适宜的拌和机械; 或者将土体晾晒粉碎后, 再拌和固化剂, 确保最终的固化效果。



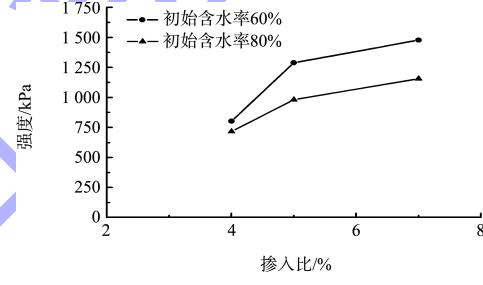
a) 水泥+复合激发剂, 龄期7d



b) 水泥+复合激发剂, 龄期28 d



c) 水泥+矿渣微粉, 龄期7 d



d) 水泥+矿渣微粉, 龄期28 d

图 5 各初始含水率下固化土强度的变化曲线

4 结论

1) 吹填软土通过掺入 3 种固化剂后, 固化土强度增长明显, 可用于本工程场地的填筑, 推荐吹填软土掺入 5% 水泥+2% 矿渣微粉固化剂, 可达到良好的固化效果。

2) 水泥掺入比相同情况下, 水泥+复合激发剂以及水泥+矿渣微粉的固化土试样均较单掺水泥固化剂试样的强度提高, 掺入水泥+矿渣微粉的强度明显高于掺入水泥+复合激发剂。

3) 总掺入比相同的情况下, 5% 掺入比的水泥+粉煤灰固化剂试样固化强度比 7% 掺入比的水泥+复合激发剂试样固化强度有较大提高, 在控制总掺入比不变的条件下利用部分矿渣微粉替代水泥既可以提高固化效果, 又可以节省成本。

4) 掺入比的变化对固化土强度有显著影响, 固化土的强度随着固化剂掺入比增加而提高, 实际应用时应确定固化剂最佳掺入比, 在保证固化

效果的基础上节省造价。

5) 固化土试样强度随着初始含水率的增加而降低, 当实际工程中软土含水量较高时, 为保证固化效果, 应适当增加固化剂掺量; 当含水量较低的土体接近硬塑状态时, 应采取适合的机械和工艺, 降低拌和不均匀性对强度的影响, 确保最终的固化效果。

参考文献:

- [1] 董志良, 张功新, 周琦, 等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1073-1080.
- [2] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] 王宁伟, 卢淑雯. 人造硬壳层对固化滩涂地基附加应力的影响[C]//冯夏庭, 李海波. 岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集.

(上接第 155 页)

3.5 整治建筑物技术状况分析

根据近年测图与最后一次维修完工后测图以及上年度的对比分析, 鱼嘴外围护坡水上情况总体较完整, 但受水流冲刷作用影响, 鱼嘴头部水域河床仍有下切, 水下岸坡明显变陡。鱼嘴内部水凼内冲刷坑有淤有冲, 并向下游侧冲刷发展。

结合图 4 中 2017—2018 年的损毁分析结果可以看出, 靠新堤夹一侧水凼上角出现一处垮塌变形, 已形成贯穿, 并有发展扩大趋势; 该处整治建筑物损坏较明显, 尚能发挥整治功能, 但需及时修复。经综合考虑, 技术状况建议评定为三类, 该分析结果与当年的工程实际相符。

4 结论

1) 通过梳理航道整治建筑物维护管理流程及需求, 提出了一种基于 BIM 和 GIS 的航道整治建筑物维护分析方法, 集成了航道整治建筑物维护分析所需信息内容, 并简化了分析流程, 维护分析操作更便捷高效。

2) 研究成果在界牌水道整治建筑物维护管理中开展应用, 研发了整治建筑物维护分析示范平

武汉: 湖北科学技术出版社, 2010: 453-458.

- [4] 袁飞飞. 高初始含水率滩涂淤泥固化土的工程特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [5] ZHANG R J, SANTOS A M, TAN T S, et al. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2013, 139(12): 2170-2181.
- [6] 中国建筑材料科学研究院, 上海宝田新型建材有限公司, 嘉华建材(香港)有限公司, 等. 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉: GB/T 18046—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [7] 福建省建筑科学研究院, 福建建工集团总公司. 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 王国才, 吴曼炯. 滩涂淤泥固化土力学特性试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(4): 468-472.

(本文编辑 王璁)

台, 实现了三维展示、建筑物损毁分析、航道演变分析、整治建筑物状况分析等功能, 验证了 BIM 和 GIS 技术在整治建筑物维护管理应用的可行性, 解决了整治建筑物维护分析手段单一、系统性评估不足的问题, 可为航道整治建筑物的维护管理提供有效的手段。

参考文献:

- [1] 李文杰, 张浩游, 张文, 等. 基于模糊贝叶斯网络的长江上游航道整治建筑物技术状况评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 112-118.
- [2] 刘天云. BIM 在长江航道整治工程应用现状及前景展望[J]. 中国水运, 2017(9): 61-63.
- [3] 童钟, 王刚, 李国杰, 等. BIM 与 GIS 融合技术在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2021(4): 163-168, 179.
- [4] 郭涛, 余青容, 宋成果. 航道整治工程 BIM 关键技术研究及应用[J]. 水运工程, 2018(11): 1-4.
- [5] 郭涛, 宋成果, 余青容, 等. 基于 BIM 和 GIS 的航道整治建筑物维护分析方法: CN110059870B [P]. 2020-08-25.
- [6] 金瑞, 肖春红, 朱明, 等. 基于 BIM+GIS 技术的河床演变分析[J]. 水运工程, 2021(6): 206-211, 244.

(本文编辑 王传瑜)