



竹木桁架隔埝在吹填工程中的应用

刘航, 闫栋

(中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300451)

摘要: 在吹填工程中, 处于淤泥或淤泥质土区域的围埝建设常面临地基承载力不足、排水固结速度缓慢等技术难题, 导致围埝稳定性差、成形困难。传统方法通常需要对埝基进行预处理与加固, 存在施工周期长、工序复杂、成本高昂等问题。为有效解决上述问题, 对一种新型竹木桁架隔埝结构体系进行研究, 该结构专为高含水率、低强度的淤泥土质条件设计。通过建立有限元模型, 对其在软基条件下的结构安全性、整体稳定性和变形控制能力进行数值分析, 并结合黄骅港综合港区9#、10#通用泊位工程及贝宁阿海梅湖疏浚项目进行验证。结果表明, 该竹木桁架隔埝结构可显著提高整体稳定性, 节约工程造价。在实际应用中, 该体系工程造价较传统方法降低约20%, 同时具备良好的适应性与环保性能。该结构体系为软弱地质环境下的吹填围埝工程提供了一种经济、高效且可靠的解决方案, 具有重要的推广价值。

关键词: 竹木桁架; 隔埝; 吹填; 强度; 有限元

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0218-05

Application of bamboo-wood truss partition containment bund in hydraulic reclamation engineering

LIU Hang, YAN Dong

(CCCC Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: In reclamation projects, the construction of containment bund in areas with silt or silty soil often faces technical challenges such as insufficient foundation bearing capacity and slow drainage consolidation, leading to poor stability and difficulties in formation. Traditional methods typically require pre-treatment and reinforcement of the containment bund foundation, which involve issues such as prolonged construction periods, complex processes, and high costs. To effectively solve these problems, a new bamboo-wood truss partition containment bund structural system is studied, specifically designed for water-rich, low-strength silty soil conditions. Through the establishment of a finite element model, a systematic numerical analysis is conducted to evaluate its structural safety, overall stability, and deformation control capabilities under soft foundation conditions. The system is validated by the case studies of the No. 9 and No. 10 general berths project in Huanghua Port comprehensive port area and the Benin Ahime Lake dredging project. The results demonstrate that the bamboo-wood truss partition containment bund structure significantly enhances overall stability and reduces project costs. In practical applications, this system reduces project costs by approximately 20% compared to traditional methods, while also exhibiting excellent adaptability and environmental performance. This structural system provides an economical, efficient, and reliable solution for reclamation containment bund projects in weak geological environments, holding significant promotional value.

Keywords: bamboo-wood truss; partition cofferdam; reclamation; strength; finite element

吹填围埝^[1]是围海造陆工程中的关键临时水工构筑物, 其核心功能是拦截吹填物料、减少泥沙流失、保证吹填区有效淤积, 从而形成陆域。在吹填土为高含水率、承载力低的淤泥或淤泥质

土时, 如何在极软地基上快速、经济地建造稳定的围埝, 一直是该领域的一项重大技术挑战。解决这个难题对节约工程投资、缩短工期、推动绿色低碳建设具有重要意义。

收稿日期: 2025-07-17 录用日期: 2025-08-28

作者简介: 刘航(1983—), 男, 高级工程师, 从事疏浚与吹填工程施工及技术管理工作。

国内外学者围绕软土地基上围埝结构的稳定与建设进行了大量研究。传统方法普遍集中于对天然软基进行预处理以提高其承载力,王斐等^[2]研究真空预压对围埝岸坡稳定性的影响;夏玉斌等^[3]、Indraratna等^[4]研究真空预压法在软基处理中的应用;张爱霞等^[5]、董明等^[6]研究充填袋围埝施工方法;秦咸中等^[7]研究土工合成材料在围埝工程中的应用。这些方法虽在一定程度上能改善地基条件,但存在施工工序繁杂、周期漫长、材料消耗大、工程造价高昂且环境影响显著等问题。此外,现有研究大多致力于“被动”地改良地基以适应上部结构,而在开发一种能够“主动”适应极软地基、轻量化、装配化的新型围埝结构体系方面,仍存在明显的研究空白与技术薄弱环节。

针对上述现状,本文旨在开发一种适用于极软淤泥质吹填区的新型竹木桁架隔埝结构体系。拟通过数值模拟(有限元分析)与现场原型工程验证相结

合的方法,重点解决该新型结构在极软地基上的承载机理、整体稳定性与变形控制等关键科学技术问题。本文突破传统围埝的设计思路,不再依赖于大规模的地基预处理,预期成果将为在类似困难地质条件下建造经济、高效、环保的围埝提供全新的技术路径,具有重要的工程应用价值与推广前景。

1 竹木桁架隔埝工作原理分析

1.1 竹木桁架隔埝结构组成

竹木桁架隔埝主要结构构件有垂直桩、斜桩、水平梁、纵向水平支撑、竹管和土工布等部分,杆件相交处采用铁丝双丝十字绑扎,桁架内侧立面由竹管外包土工布构成,土工布钉接于桁架主体结构上,根据挡土高度及现状土质,可以设计成三排竹木桁架结构或双排竹木桁架的形式,见图1、2。对于缺乏竹材地区,桩可用实心圆木,竹管可采用木板或胶合板代替。

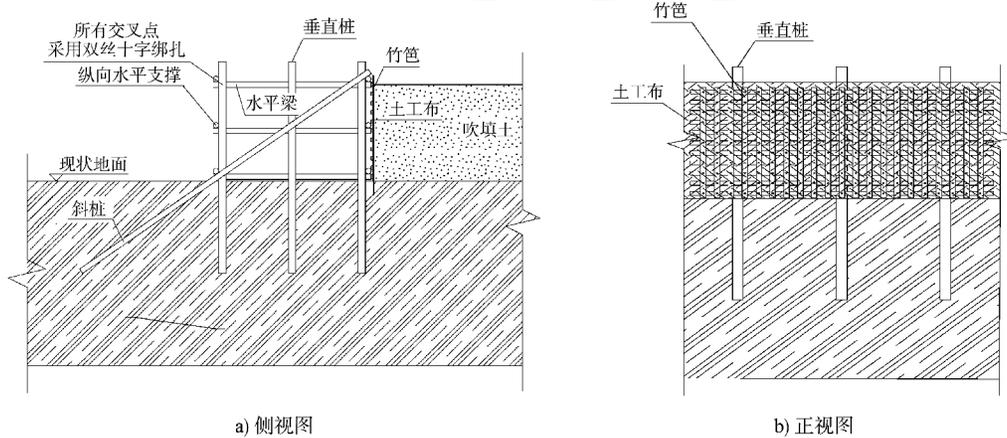


图1 三排竹木桁架隔埝结构
Fig. 1 Three-row bamboo-wood truss partition containment bund structure

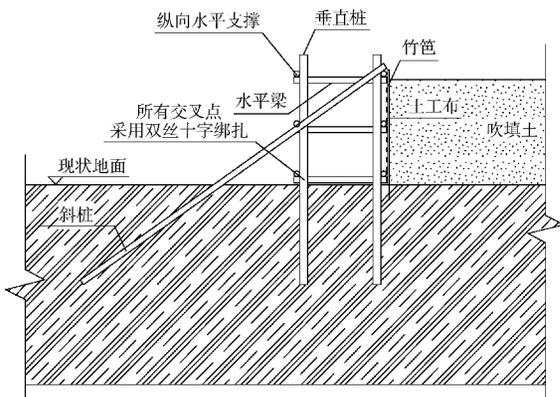


图2 双排竹木桁架隔埝侧视图
Fig. 2 Side view of two-row bamboo-wood truss partition containment bund

1.2 竹木桁架隔埝工作原理

随着吹填泥面的不断升高,土工布与吹填土直接接触,竹管可增大土工布受力面积,将荷载传至由垂直桩、水平梁、斜桩及桩间土组成的局部抗侧力桁架体系,整体协同变形,见图3,纵向水平支撑和竹管板能为桁架平面提供有利的侧向支撑,保证桁架结构平面的稳定。

吹填过程中,水位逐渐上涨,流速降低,泥沙沉淀,可通过自由调节土工布的高度使上部清水溢出。

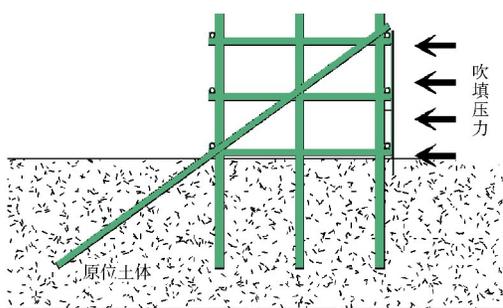


图3 局部抗侧力桁架体系

Fig. 3 Local lateral force-resisting truss system

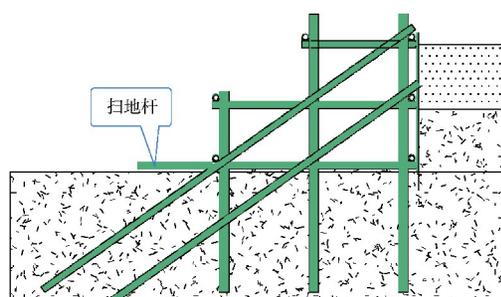


图4 双斜桩加扫地杆形式

Fig. 4 Form of double batter piles with kickers

2 竹木桁架隔墩设计

2.1 竹木桁架隔墩设计标准

1) 竹木桁架隔墩设计目标根据吹填区用途及使用要求确定。

2) 竹木桁架隔墩按照临时建筑物设计。

3) 竹木桁架隔墩应结合现场的水文、地质等条件进行构件的强度、变形及整体稳定性计算,且均满足吹填施工进度控制要求。

4) 根据竹桩的截面特性、墩基土质及挡泥高度,确定垂直桩及斜桩入土深度,使承载力满足要求。

2.2 墩顶高程的确定

竹木桁架隔墩墩顶高程应按式(1)确定:

$$H = H_R + H_C + H_A \quad (1)$$

式中: H 为墩顶高程, m; H_R 为吹填土高程, m; H_C 为预留沉降量, 根据原地基及吹填土质确定; H_A 为安全超高, m, 挡土时取 0.5~1.0 m, 挡水时取 0.3~0.5 m。

2.3 竹木桁架隔墩结构形式选取

主体结构可采用双排桩或三排桩的桁架形式, 须经计算确定。吹填土高度在 1.5 m 以内, 可采用双排桩的结构形式(图 2); 吹填土高度在 1.5~2.0 m 范围, 可采用三排桩形式(图 1); 若填土超过 2 m, 可采用双斜桩三排桩桁架形式, 若墩基承载力过低, 可采用双斜桩加扫地杆形式, 见图 4。

考虑工程经济及施工便捷, 桩间排距可取 1.5 m, 相邻桁架单元纵向间距根据计算, 可取 1.0~1.5 m, 桩入土深度通过土质情况确定, 不应低于 2 倍挡土高度。

纵向水平支撑搭接长度不小于 1.0 m 及纵向间距。杆件相交处采用双丝十字绑扎。

土工布底部应埋在原地面以下 0.3 m, 避免泥沙通过底部外泄; 土工布间的搭接长度不小于 1.0 m, 接缝处强度不宜低于土工织物拉伸强度的 60%。

2.4 竹木桁架隔墩材料选取

每榀结构单元侧向组成桁架结构体系, 各杆件之间均为二力杆, 仅承受拉、压力。毛竹抗拉、压强度指标较土、石均更高, 因此选用毛竹作为主要杆件。

竹材料具有高度的各向异性, 其顺纤维和逆纤维的力学性能差异较大, 而且其拉、压、弯和剪切强度与环境的湿度有关, 目前未有规范给出详细的毛竹材料参数。参照已有文献^[8-9], 毛竹顺丝抗拉强度 38.19 MPa, 顺纹抗压强度 22.32 MPa, 抗弯强度 37.19 MPa, 顺纹抗剪强度 4.73 MPa, 顺纹抗压强度 16.62 MPa。

竹木桁架隔墩材料选取遵循以下原则: 1) 垂直桩及斜桩选用根部直径 10~15 cm、壁厚不小于 10 mm 的毛竹或实心圆木, 长度根据计算所需入土深度确定; 水平梁及纵向支撑选用根部直径不小于 6 cm、壁厚不小于 6 mm 的毛竹或实心圆木。2) 为保证竹木桁架隔墩主体部分连接效果及整体强度, 铁丝须选用 8 号以上规格。3) 竹篾竹片纵横向间距以实际采购情况为主, 纵向间距不大于 150 mm, 横向间距不大于 600 mm, 若相邻竹片间距过大, 应适当加密布置, 竹篾可采用木板或胶合板代替。4) 土工布性能参数标准见表 1。

表 1 土工布性能参数指标

Tab. 1 Standard of geotextile performance parameters

单位面积质量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	经向断裂强力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	纬向断裂强力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	经纬向断裂 伸长率/%	顶破强力 (加州承载比法)/kN	梯形撕破 强度/kN	等效孔径/ mm	垂直渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
≥ 160	≥ 30	≥ 22	≤ 28	≥ 2.4	≥ 0.45	0.08~0.50	$10^{-4} \sim 10^{-1}$

3 竹木桁架隔墙结构计算分析

3.1 参数选取

计算分析中采用的杆件、土体参数见表 2。

3.2 计算分析

以黄骅港综合港区 9#、10# 通用泊位工程为依托工程, 采用 Midas/GTS NX 岩土有限元分析软

件, 桩、水平梁及纵向支撑采用一维弹性体模拟; 原位土及吹填土采用三维摩尔库仑单元类型。整体及三排桩桁架模型见图 5。挡泥高度按 2 m, 排间距 1.5 m, 垂直桩纵向间距 1.5 m, 桩入土深度为 4 m, 吹填土分 4 个阶段加载, 每次吹填 0.5 m, 进行竹木桁架隔墙主体结构强度及稳定性计算。

表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

构件或土层类别	外径/mm	壁厚/mm	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa	饱和重力密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
垂直桩、斜桩	130	13	18 000	0.30	-	-	-
水平梁、纵向支撑	60	6	18 000	0.30	-	-	-
原位土(淤泥质土)	-	-	2	0.40	7	4.1	16.9
吹填土(淤泥质土)	-	-	1	0.43	7	0	14.5

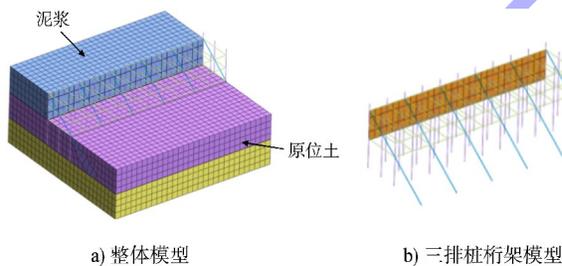


图 5 整体及三排桩桁架模型

Fig. 5 Overall and three-row pile truss models

分别计算吹填淤泥 0.5、1.0、1.5、2.0 m, 共 4 个加载阶段竹桩及斜竹桩的压拉应力、剪应力。各个杆件强度计算结果见表 3。

稳定性计算采用强度折减法(strength reduction method, SRM)^[10], 分别吹填淤泥 0.5、1.0、1.5、2.0 m 共 4 个加载阶段进行计算, 各阶段稳定系数计算结果见表 4。可以看出, 稳定性随着吹填淤泥高度增大而逐渐减小, 吹填淤泥高度为 2.0 m 时, 稳定系数最小, 为 1.42。

表 3 各个杆件强度计算结果

Tab. 3 Strength calculation results of individual members

吹填淤泥 高度/m	桩、斜桩(梁单元)			水平梁、纵向支撑(桁架单元)	
	压应力/MPa	拉应力/MPa	剪应力/MPa	压应力/MPa	拉应力/MPa
0.5	1.48	1.44	0.37	1.09	0.13
1.0	1.68	3.14	0.83	4.73	0.24
1.5	3.54	7.62	1.91	10.30	0.85
2.0	6.72	17.19	3.34	16.40	2.95
限值	22.32	38.19	16.62	22.32	38.19

表 4 稳定系数计算结果

Tab. 4 Calculation results of stability coefficient

吹填淤泥高度/m	0.5	1.0	1.5	2.0
稳定系数	5.90	2.82	1.90	1.42

目前尚无具体标准、手册给出竹桁架围(隔)墙抗倾覆安全系数要求。参照 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》^[11]第 4.12.5 条, 对于三级支护结构, 抗倾覆安全系数最小值为 1.15。工程

吹填淤泥 2.0 m 时, 最小稳定系数为 1.42, 大于 1.15, 满足要求。

4 工程应用

4.1 黄骅港综合港区 9[#]、10[#]通用泊位工程

黄骅港综合港区 9[#]、10[#]通用泊位工程位于黄骅港综合港区一港池南侧岸线, 规划通用码头作业区中部, 已建河钢通用码头东侧。该工程港池疏浚工程量合计 96.74 万 m³(含施工期回淤), 后方陆域吹填高程至 7.2 m。为降低泥沙的流失量、避免海洋污染, 同时保证吹填高程达到设计要求, 该工程在区域内布设 2 道竹桁架隔埝, 总长度约 2 900 m。通过计算材料采购、机械投入、人工等费用, 该工程采用竹桁架隔埝较传统土围埝节约支出总额约 8.90 万元, 较拦污屏围埝节约支出总额约 22.50 万元。

4.2 贝宁阿海梅湖疏浚项目

贝宁阿海梅湖疏浚项目位于西非南部沿海, 于 2021 年 11 月 24 日开工, 于 2022 年 11 月 24 日竣工。该项目建设木桁架隔埝 1 500 m, 在疏浚施工期间能有效阻止泥沙外漏, 且自身防冲刷, 有效阻止水流对过水面的破坏, 同时泥面增高后, 可通过调节土工布高度, 进一步提升隔埝高度, 提高隔埝利用率。通过计算材料采购、机械投入、人工等费用, 该工程采用木隔埝较袋装土围埝节约支出总额约 4.17 万元。

5 结论

1) 竹木桁架隔埝结构, 可实现吹填区临时隔埝的快速建造, 缩减工程造价, 较传统围埝降低工程造价约 20%。

2) 本文提出竹木桁架隔埝结构设计计算方法, 明确竹木桁架隔埝结构各杆件截面、间距及布置形式, 结构经济、节能、低碳、绿色、环保。

3) 竹木桁架隔埝可用于分区吹填分级沉淀施工中, 可实现吹填土有效沉淀, 从而使余水排放满足环保要求。

参考文献:

[1] 疏浚与吹填工程施工规范: JTS 207—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

Construction code for dredging and reclamation works: JTS 207-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

[2] 王斐, 朱平, 陈少青, 等. 软土吹填区的真空预压加固施工对围埝岸坡稳定性的影响[J]. 港工技术, 2013, 50(2): 61-63.

WANG F, ZHU P, CHEN S Q, et al. Influence of vacuum preloading reinforcement on cofferdam bank stability in soft soil dredger filled zone [J]. Port engineering technology, 2013, 50(2): 61-63.

[3] 夏玉斌, 刘强. 真空预压垂直铺塑侧向密封技术在软基处理工程中的试验与应用[J]. 水运工程, 2006(10): 212-214, 224.

XIA Y B, LIU Q. Experiment and application of VLLPM technology in subsoil consolidation treatment [J]. Port & waterway engineering, 2006(10): 212-214, 224.

[4] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, BARAL P, et al. Performance of marine clay stabilised with vacuum pressure: based on Queensland experience [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2019, 11(3): 598-611.

[5] 张爱霞, 李德光, 付长宏, 等. 吹填造陆及吹填土地基处理方法的几点设想[J]. 港工技术, 2016, 53(1): 90-93.

ZHANG A X, LI D G, FU C H, et al. Ideas of reclamation and reclaimed soil treatment [J]. Port engineering technology, 2016, 53(1): 90-93.

[6] 董明, 葛安定. 泥混砂充填袋围埝施工初步研究[J]. 中国水运, 2017, 17(5): 321-323.

DONG M, GE A D. Preliminary study on construction of sandy mud-filled geotextile bag revetments [J]. China water transport, 2017, 17(5): 321-323.

[7] 秦威中, 殷立中, 袁俊青, 等. 土工合成材料在吹填造陆工程中的应用[J]. 水运工程, 2019(S2): 124-128.

QIN X Z, YIN L Z, YUAN J Q, et al. Application of geosynthetic in dredger filling project [J]. Port & waterway engineering, 2019(S2): 124-128.

[8] 郝际平, 申国臣, 田黎敏, 等. 毛竹力学强度标准值和设计值的确定方法[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(1): 56-61.

HAO J P, SHEN G C, TIAN L M, et al. Methods for determination of mechanical strength standard value and design value of bamboo [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(1): 56-61.