



BIM 及 3D 打印技术 在密集桩群模拟沉桩中的创新应用

缪晨辉

(中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 海上桩基相互穿插的密集桩群施工, 极易发生桩在泥面以下碰撞、已施工桩基侵占打桩船沉桩路径, 导致后续桩基无法沉桩等问题。采用 BIM 技术建模、桩径扩大模拟和沉桩参数动态调整的方法, 分析桩基础碰撞与偏位容许最大误差, 实现沉桩碰撞预警与防范。采用 BIM 3D 打印技术制作海床、桩及打桩船缩尺模型, 引入水位模拟、定位装置等组合, 动态、高精度模拟海上沉桩, 验证桩位布置的合理性, 确定切实可行的沉桩工序。

关键词: 高桩码头; 密集桩群; BIM 技术

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0157-05

Innovative application of BIM and 3D printing technology in simulating pile sinking of dense pile groups

MIAO Chenhui

(China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: When constructing interpenetrated densely packed pile foundations at sea, problems are prone to occur such as collision of piles below the mud surface, and obstacles to pile sinking by pile driving vessels caused by already constructed piles. By using BIM technology modeling, pile diameter expansion simulation, and dynamic adjustment of pile driving parameters, the maximum allowable error of pile driving collision and deviation is analyzed, and the early-warning and prevention of pile driving collision are achieved. By using BIM 3D printing technology to make scaled models of seabed, piles, and pile driving vessels, bringing in combinations of water level simulation and positioning devices, dynamically and accurately simulating offshore pile sinking, verifying the rationality of piles position layout and determining feasible pile sinking construction sequences.

Keywords: high pile wharf; dense pile group; BIM technology

近年, 随着国家原油进口量的不断增多, 超大型油轮普及化, 国内沿海码头接卸能力难以适应船舶大型化的需求, 迫切需要建造更多 30 万吨级以上大型原油码头。超大型油轮对航道吃水要求高, 近岸航道水深不满足要求, 因此大型原油码头呈现离岸化、外海化的建造趋势。油轮船舶吨位大、吃水深, 外海海况环境复杂, 对原油码

头建造提出更高的要求。虽然高桩码头墩式^[1]布置较为常见, 但 30 万吨级以上大型原油码头因结构受力增大, 码头下部桩基设计多为密集桩群, 桩基扭角大、斜率大, 极易发生泥下碰撞, 工序不当后续无法沉桩等问题, 施工技术难度显著提升。

本文基于广东惠州港 30 万 t 原油码头工程,

收稿日期: 2023-07-22

作者简介: 缪晨辉 (1985—), 男, 高级工程师, 从事港航工程技术管理工作。

提出密集桩群模拟沉桩方法，通过 BIM+3D 打印等综合技术进行沉桩模拟，将密集桩群沉桩过程中可能遇到的问题提前暴露出来加以防范，避免密集桩基设计出现碰撞、无法沉桩及受外海风浪影响沉桩偏位导致发生沉桩碰撞等施工难题，实现复杂海况环境下大型原油码头密集桩群快速施工，旨在为同类工程提供技术参考。

1 工程背景

惠州港 30 万 t 原油码头工程为高桩墩台结构，码头呈蝶形布置，泊位长 470 m，包括 1 个码头工作平台、4 个靠船墩和 6 个系缆墩。该码头工作平台及靠船墩共有 106 根 $\phi 1200 \text{ mm}$ 的钢管桩，桩长为 43~54 m。设计钢管桩扭角多变、斜率大，其中靠船墩处斜率多为 3:1，工作平台处斜率多为 5:1。码头工作平台与靠船墩的间距仅 5.5 m，靠船墩之间的间距仅 6.0 m，泥下桩基相互穿插，属典型密集桩群，见图 1。



图 1 码头现场桩基

码头结构设计中，桩基扭角及斜率相比同类工程更大，且相互穿插，极可能发生相互碰撞的情况。码头距离海岸线 12 n mile，为外海孤岛水域施工，作业区域内风浪、潮落、暗涌、漩涡、回流等极为复杂，施工区域窗口期少，特别涌浪大，沉桩极可能有一定偏位，而偏位在密集桩群中极易造成后续桩基碰撞问题。此外，工程施工采用的固定臂架打桩船，船头有 2 个船舱凸起，因密集桩群桩位角度多变，打桩船需不断变换位置，沉桩工序安排不当将导致打桩船缺乏落位空间影响后续桩基施工^[2]。

2 技术思路

在密集桩群施工时，经常出现设计碰桩或桩群沉桩顺序不当导致打桩船无法进入打桩位沉桩作业的情况，因此需要提前进行桩间距计算和沉桩施工顺序模拟。以往沉桩碰撞采用桩间距计算公式^[3]和沙盘模拟，但最小桩间距计算公式复杂、计算量大，过程极为繁琐，往往仅计算其中部分可能碰撞的桩基；沉桩沙盘虽能模拟工序，但由于沙盘模拟精度低，受人为干扰大，且在沉桩过程中因为桩偏位无法及时准确进行调整。近年来，新兴的 BIM 技术三维建模^[4]主要用于桩位三维模拟，以避免桩基碰撞，但最小桩间距计算只能通过 BIM 三维模型手动测量，在桩数量多时测量繁琐，对打桩船能否进入打桩位施工模拟不够直观；BIM 3D 打印技术按照传统方法，无法实时模拟打桩船的沉桩落位，也无法动态调整设计变更桩位。

基于传统技术的缺陷，本文提出了 BIM 技术建模验证沉桩碰撞与实时跟踪，并通过桩径扩大模拟的思路验证最小桩间距；提出了 3D 打印海床预留打桩孔位模型+桩模型+打桩船模型+带刻度装水铁盒的组合，实现不同潮位高精度沉桩模拟；通过设计沉桩模拟定位器实现设计变更桩位的动态调整验证。

3 BIM 建模与空间关系验证

3.1 BIM 建模

1) 建模前需要做好前期数据收集工作，包括施工区域范围、水文情况、水下地形图等信息，以及工程拟选用的打桩船机设备。

2) 利用 BIM 技术 Autodesk Revit 软件，结合桩位设计图信息，明确坐标体系，录入桩径、桩长、扭角、斜率等信息以及水下地形信息，建立密集桩群三维信息模型，见图 2。其中，每根桩做好桩号标记，同类型、同直径的桩应建立族库，为后续做碰撞检测提供具体数据支持。

3) 结合打桩船构造特征，建立打桩船三维信息模型，用于制作模型和在桩基三维模型上模拟沉桩时打桩船的落位情况，见图 2。

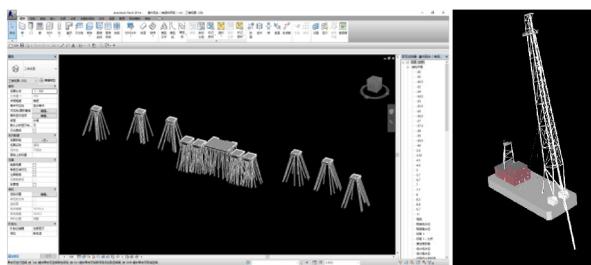


图2 桩群及打桩船建模

3.2 密集桩群空间关系验证

1) 通过BIM软件对密集桩群进行空间关系模拟,利用Navisworks进行碰撞检查,检验密集桩群是否碰撞,输出检查报告。当检测出有碰撞桩时,碰撞的桩模型变色,见图3。此时申请设计变更,按照设计变更修正后的桩位信息直接在BIM软件中同步修改更新。

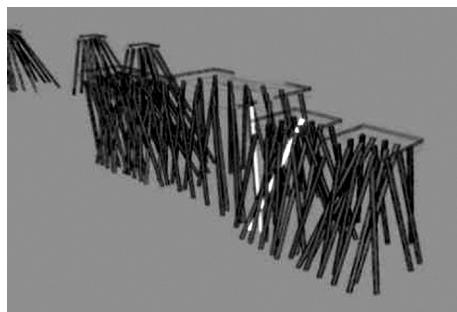


图3 桩群碰撞关系验证

2) 综合现场工况,分析沉桩偏位允许误差及规范要求,判断沉桩最小桩间距是否满足要求。BIM三维模型中,通过BIM软件测量工具手动选择桩表面空间可能最小距离的点,进行最小桩间距测量,反复旋转模型、人为判断、测量繁琐,当有许多桩时工作量极大。考虑BIM技术中的碰撞自动检测功能,提出一种扩大桩径建模验证法,如拟定桩最小间距不小于50 cm,则将同一族类型桩参数化调整,扩大桩径25 cm,利用Navisworks进行碰撞检查,输出检查报告,即可判定哪些桩间距小于50 cm。

3) 导入打桩船模型,结合水位高程,确定打桩船在BIM软件模型中的高度坐标,在BIM上固定高程移动打桩船模型,验证打桩船与桩基的碰

撞关系。因BIM上移动打桩船模型观看不够直观,容易忽视移船路径及抛锚等细节,因此本项操作仅作为验证打桩船移动碰撞检测的辅助手段,实际操作仍以3D打印模型动态模拟为主。

4 3D打印与动态模拟

4.1 模型制作

1) 通过3D打印技术,按照一定比例(建议1:100)打印施工区域海床3D模型,并根据工程桩数量制作模拟桩。需特别注意的是沉桩孔位需要在施工区域海床模型中打印预留,孔位需比桩径大1~2 mm,或桩模型比孔径小1~2 mm,便于后期模拟沉桩时,桩模型能顺利插入孔位。

2) 用普通钢板焊接一个适合施工模型区域海床模型尺寸的铁盒^[6],其顶部开口;铁盒四周顶部位置分别粘贴带有毫米级的刻度尺,刻度尺起始零点均位于铁盒中间,用于码头坐标体系转换(左右两边均有刻度)。

3) 将施工区域海床模型固定在铁盒内,安装时注意海床模型与刻度尺的对应关系,确保坐标体系转换的准确性。铁盒内注水模拟海平面,海床模型在铁盒内注水时要确保海床模型固定稳固不会上浮,通过水量控制模拟不同潮位水深情况,见图4。

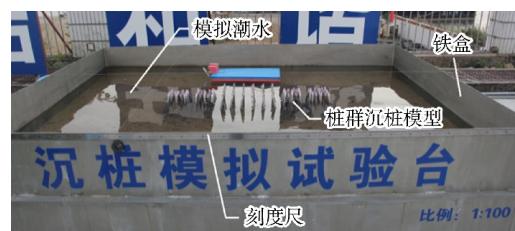


图4 沉桩模拟试验台

4) 打桩船模型按照打桩船构造同比例制作,特别注意打桩船首突出位置,见图5。在打桩船模型中间,明确具体坐标位置设计1根与船体垂直且带刻度的方形钢管,打桩船模型可上下移动;上部设置套管,在铁盒横向设置1根垂直于铁盒横边且带刻度的方形钢管,打桩船可在方形钢管

上移动。船舶在水上的旋转角度按照拟沉桩位扭角确定；桩的角度按照斜率计算确定。移动桩船模型，可读取桩船模型在试验台上的位置。通过坐标体系转化，确定打桩船的海上位置，利用 GPS 或北斗定位系统，实现海上船舶定位。

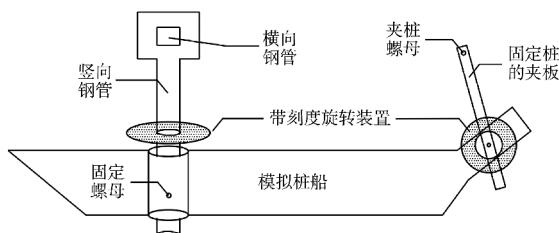


图 5 桩船模型设计

4.2 沉桩顺序验证

1) 对通过 BIM 建模碰撞验证的桩群，利用预先确定的桩编号，初步确定一个沉桩顺序表，以便按照顺序模拟沉桩施工。

2) 结合潮汐表，确定沉桩时间段水位高程，转换确定模拟沉桩台水位高度。利用打桩船模型验证沉桩顺序、移动方向以及抛锚位置，当出现打桩船无法正常移动或没有空间进行抛锚时，重新调整沉桩顺序，如反复调整沉桩顺序仍存在碰撞现象，则申请设计变更，调整桩位扭角等参数。

3) 申请调整变更的桩位，需再次利用 BIM 三维模型进行空间关系验证，确认不存在桩位设计碰撞问题并满足最小桩间距后，方可进行变更桩位的模拟沉桩。因 3D 打印模型为一次成型，设计变更调整的桩基模型在已打印的海床模型没有调整后的孔位插入，为此，设计了一种沉桩定位模拟器。其原理是设计一种模拟送桩器，通过纵横坐标及倾斜角度控制，精确模拟斜钢管桩沉桩位置及角度施工，从而实现模型桩的定位。沉桩定位模拟器制作及动态调整桩基模型定位安装如下：沉桩定位模拟器(图 6)由 3 个套管及与其连接的连杆、量角器、1 条长度大于模拟试验台宽度的方钢组成，通过方钢的平移、沉桩模拟定位器在方钢左右移动、在连杆的上下滑动、在连杆的转动，将试验钢管桩模型精确定位至沉桩模拟试验台任

意一点，技术原理与桩船模型设计相似。

对设计变更调整的桩位，计算桩位参数，通过坐标体系转换，确定模拟试验台上的坐标位置后，再将沉桩模拟定位器移动到计算坐标位置。对设计变更调整的桩基，需通过沉桩模拟定位器固定模型桩到 3D 打印的海床模型上。因水下粘结不便，且凝固时间长，因此在固定模型桩时，抽出模拟试验台的水，填充已变更桩位的模拟孔位，采用速凝胶水涂抹至模拟桩底端，利用沉桩模拟定位器将模型桩固定在海床模型上，待速凝胶能够稳固桩身后，解除沉桩模拟定位器固定，再注入清水模拟潮位，利用打桩船模型进行沉桩顺序及移船验证。

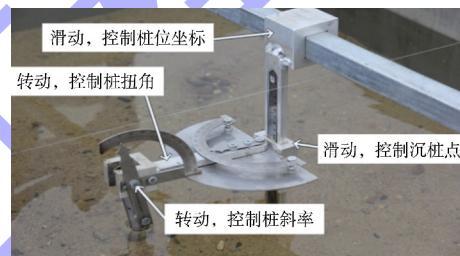


图 6 沉桩模拟定位器实物

如桩位调整数量多且集中，超过一定比例(如 10%)需综合考虑，建议重新制作打印 3D 模型，确保模拟施工精度。

由于海上沉桩受天气、风浪等因素影响，钢管桩沉桩难免发生偏位，可能导致后续沉桩发生碰撞。因此，每根桩沉桩完成后，测量记录钢管桩沉桩桩位信息，统计偏位数据。结合现场沉桩数据，重点对偏差值较大的桩位，使用 BIM 软件调整做出实际已沉桩的桩位三维图，与拟沉桩的钢管桩桩位进行碰撞检测，验证是否碰桩，以及计算最小桩间距是否满足施工允许偏差，保证后续钢管桩沉桩的安全。

5 应用实例

研究在惠州港 30 万 t 原油码头工程中引进 BIM 技术应用并创新，采用 BIM 技术建模进行碰撞检测时，发现 3 对钢管桩存在碰桩情况。采用

沉桩模拟试验台模拟沉桩时，发现位于靠船墩处的16根钢管桩需要调整扭角，以实现打桩船正常落位。通过模拟试验，以上问题在钢管桩沉桩前提前暴露，及时进行设计变更，保证了整个工程沉桩的顺利完成。此外，3D模型模拟沉桩施工技术使技术交底简洁直观，对施工起到良好的作用，为后续夹桩方案设计、现场钢管桩进场等提供了技术支撑。通过该技术应用，项目提前避免了沉桩碰撞造成成本增加与工期延误等问题，测算节约成本约515万元，节约工期约3.5个月。

6 结论

1) 运用BIM技术三维建模与碰撞检测功能，提出桩径扩大模拟和沉桩参数动态调整的创新方法，分析桩基碰撞与偏位容许最大误差，实现沉桩碰撞动态预警，解决了密集桩群采用传统方法计算桩间距工作量大的难题。

2) 运用高精度沙盘动态模拟方法，采用BIM 3D打印技术制作带桩孔位的海床、桩及打桩船缩尺模型，引入水位模拟、定位装置等组合，动态、高精度模拟不同潮位环境下打桩船沉桩行进路径，验证沉桩布置的合理性，确定了切实可行的沉桩施工顺序。

(上接第149页)

3) 相较于传统的二维设计模式的技术手段单一、绘图工作量大、易发生错漏碰缺、信息管理局限，BIM技术在船闸金属结构设计中的应用优势显著，且随着模型库的不断积累完善逐步迭代递进，设计效率与质量均能显著提升；并且其信息集成、存储与传递更加完备，能实现金属结构数据的高效传递与集成管理。

参考文献：

- [1] 钱丽, 刘松, 孙子宇, 等. BIM技术在水运基础设施的应用及发展战略[J]. 水运工程, 2017(10): 80-85.

3) BIM技术功能不局限于建模、碰撞检测、3D打印等功能。BIM技术的进度控制、成本控制等功能也在房建、市政等领域得到广泛应用^[7]，相比之下BIM技术在水工领域应用较少，如何深入挖掘BIM技术在水工领域应用潜能，是未来水工领域BIM技术应用的探索方向。

参考文献：

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [3] 中交第一航务工程局有限公司. 港口工程施工手册[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [4] 万其炎, 许书星. BIM技术在高桩码头碰桩验算中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(10): 164-166.
- [5] 缪晨辉, 李闯辉, 管德鹏, 等. 一种密集桩群模拟沉桩施工方法: CN202011587608.0[P]. 2021-04-30.
- [6] 许广林. BIM技术及缩尺模型动态模拟在密集桩基沉桩中的应用研究[J]. 低碳世界, 2018(3): 255-257.
- [7] 倪寅. BIM技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(4): 128-133, 166.

(本文编辑 赵娟)

- [2] 陶书东, 李树海, 刘成鑫, 等. 大型船闸金属结构BIM技术的应用[J]. 水运工程, 2018(1): 123-128.
- [3] 陶书东, 张珊, 李树海. 基于模块化理念的船闸金属结构设计[J]. 水运工程, 2011(9): 189-192.
- [4] 李玲君. 三角闸门自动化设计BIM技术应用[J]. 水运工程, 2022(1): 169-172, 178.
- [5] 严沾谋. 基于BIM技术的平面钢闸门三维设计计算和出图一体化软件的研发[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(3): 11-14.
- [6] 李超军, 叶雅思, 唐洁. BIM技术在船闸金属结构全生命周期中的应用[J]. 水运工程, 2019(3): 159-164.

(本文编辑 王传瑜)