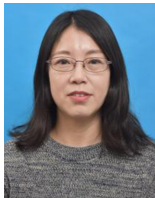


· 信息技术 ·



# 高桩码头 BIM 孪生建模及有限元模型 转换方法研究\*

潘新颖<sup>1,2</sup>, 费华平<sup>1</sup>, 史宏达<sup>1,2</sup>, 赵鸿鸣<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 在智慧港口建设的背景下, BIM 技术对港口数字化转型的推动作用愈发显著, 建立码头基础设施的数据底盘, 以此为载体实现码头基础设施数字孪生多维应用。为探究高桩码头数字化管理及孪生应用的有效方法, 基于 Revit 软件及其二次开发技术, 根据高桩码头结构特点, 提出衔接 BIM 模型和有限元模型的孪生建模方法, 建立高桩码头 BIM 模型; 开发高效的模型转换程序, 准确生成高桩码头有限元模型, 并通过案例应用, 验证了建模方法及转换过程的合理性和正确性。

**关键词:** BIM; 高桩码头; 孪生建模; 模型转换

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0165-06

## BIM twin modeling and finite element model conversion method of high-piled wharf

PAN Xinying<sup>1,2</sup>, FEI Huaping<sup>1</sup>, SHI Hongda<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongming<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In the background of smart port construction, building information modeling (BIM) technology plays an increasingly significant role in promoting the digital transformation of ports, and the data chassis of wharf infrastructure is built as a carrier to realize the multi-dimensional application of digital twins of wharf infrastructure. To explore the effective method of digital management and twin application of a high-piled wharf, based on Revit and its secondary development technology, and according to the structural characteristics of the high-piled wharf, this paper proposes a twinning modeling method connecting the BIM model and finite element model to build the BIM model of the high-piled wharf. The paper also develops an efficient model conversion program to accurately generate the finite element model of a high-piled wharf and verifies the correctness and rationality of the modeling method and conversion process by case application.

**Keywords:** BIM; high-piled wharf; twin modeling; model conversion

随着科学技术的进步和港口管理水平的发展, 各种新技术、新理论、新观念交叉融合应用, 大幅推动了智慧港口的建设发展。BIM 技术作为一项推进数字化的重要技术, 在智慧港口建设中发

挥越来越重要的作用。

现阶段, 建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 技术在港口工程尤其是在码头的应用大多依托于各类工程建设, 与具体工程密切相

收稿日期: 2022-12-09

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2601100)

作者简介: 潘新颖 (1976—), 女, 博士, 副教授, 从事海岸动力学工程应用及港口工程结构分析。

关,在高桩码头全生命周期各个阶段都存在巨大应用价值<sup>[1]</sup>。蔡波<sup>[2]</sup>在高桩码头设计时,提出 BIM 技术参数化设计、标准化出图等应用点,大幅提高了表达的准确性和设计效率;陈静等<sup>[3]</sup>基于 BIM 技术建立某高桩码头的三维模型及数据库,集成传感器监测数据,提高了码头信息化水平;李薇等<sup>[4]</sup>、原媛等<sup>[5]</sup>基于 BIM 技术,对高桩码头施工过程中的计划模拟、进度管理进行实践,优化了施工进度;于海涛等<sup>[6]</sup>通过搭建基于 BIM 的码头运维管理系统,建立三维模型,输入检查维修信息,提高码头智能化运维水平。根据已有研究可知, BIM 技术在码头工程中的应用多集中在数字模型构建、施工组织管理和管理平台搭建等单一方面,并不能满足码头孪生模型多维应用的要求。高桩码头三维受力复杂、敏感,拓展高桩码头 BIM 模型的力学分析功能,可进一步发挥码头数字孪生体的应用价值。

目前,利用 BIM 技术对码头结构进行力学分析的研究尚少,现有 BIM 软件中的力学分析功能,在计算求解、结果分析等方面有很大的局限性,相比专业有限元软件仍有较大差距<sup>[7]</sup>。由于高桩码头构件较多、结构形式复杂,在有限元软件中建立精细化模型难度较大、花费时间较长。因此,实现 BIM 模型向有限元分析模型转换是十分必要的。模型转换通常有 2 种方式:1) 通过 IFC 标准格式的中间文件进行间接转换;2) 通过提取 BIM 模型的几何信息和物理属性等信息,将其直接转换为力学模型建模语言格式,在有限元软件中生成有限元模型<sup>[8]</sup>。直接提取的方式可根据高桩码头结构形式和建设使用特点灵活设计,获取有限元模型生成的必要信息。

## 1 开发环境与思路

### 1.1 高桩码头 BIM 建模与有限元分析原理

Revit 软件在三维建模和信息集成方面,十分贴合高桩码头的 BIM 建模需求,具有添加模

型参数、定义材料属性、补充施工信息等功能,可导出 ACIS、IFC 等多种格式。通过 Revit 二次开发技术,可根据不同需求利用丰富的接口提取模型各类数据,用作其他软件或项目的信息输入。

高桩码头荷载情况复杂、构件数量庞大,结构传力难以计算和模拟,可选用有限元法进行力学特性分析。有限元分析的基本思想是利用有限多个离散的单元组合体近似替代原有的连续结构,然后分别对组合体进行力学分析,最后整体分析原连续结构的力学特性。本文将高桩码头整体简化假定为理想弹性体,采用线弹性模型对码头进行静力分析,符合广义胡克定律:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向叠加的累计应变;  $E$  为弹性模量;  $\mu$  为泊松比;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的正应力;  $\gamma_{xy}$ 、 $\gamma_{yz}$ 、 $\gamma_{zx}$  分别为  $xOy$ 、 $yOz$ 、 $zOx$  平面的剪应变;  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$  分别为  $xOy$ 、 $yOz$ 、 $zOx$  平面的剪应力;  $G$  为剪切弹性模量,满足:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3)$$

有限元分析的技术载体是有限元软件,本文选取 ANSYS 软件进行高桩码头有限元分析。形如高桩码头这类复杂的几何模型,在 ANSYS 中直接构建较为困难,可选择软件支持的 ACIS 文件格式,从其他数据源导入几何模型文件。

### 1.2 BIM 模型转换有限元模型方法与思路

目前, BIM 模型向有限元模型主要有 2 种方式: 1) 基于 IFC 标准进行信息传递, 但由于高桩码头模型的 IFC 标准尚不完善, 转换时容易导致信息丢失现象; 2) 基于软件的二次开发提取有限元模型生成所需的几何特性、物理信息、网格特征、约束荷载信息等。

转换过程须满足信息完整性、准确性、可调节性的要求。本文选取第 2 种方法, 利用 Revit 二次开发技术提取基于 ACIS 格式文件的几何信息, 并匹配密度、泊松比、弹性模量等物理信息, 然后通过用户界面(UI)交互窗口完成材料定义、网格划分、约束添加、荷载加载等前处理操作, 编写 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 命令流进入求解器求解。

ACIS 格式文件包含点、线、面等几何信息, 模型连接方式等拓扑结构和其他属性信息, 可以较好地描述复杂结构几何体; Revit 二次开发技术可灵活提取模型物理信息, 并与几何信息精确匹配; UI 交互窗口可满足不同力学分析要求, 有效控制有限元模型生成中的参数设定。

### 1.3 Revit 二次开发环境

Revit 为软件开发者提供了丰富的应用程序开发接口 API, 开发人员可使用 C#、VB 或者 C++ 等与 .NET 相关的语言进行编程, 将开发的程序或插件加载到 Revit 软件中, 快速实现用户预期功能, 为高桩码头孪生建模和有限元模型转换生成提供思路。

## 2 高桩码头 BIM 孪生建模方法

### 2.1 BIM 孪生建模流程

BIM 孪生建模以完成模型各功能需要的条件和信息输入为主线, 以达成多种预定功能融合衔接为节点, 拓展 BIM 模型的应用价值, 实现多维孪生应用。本文以高桩码头 BIM 建模衔接有限元模型准确转换为目的, 提出高桩码头 BIM 模型孪生建模方法, 见图 1。

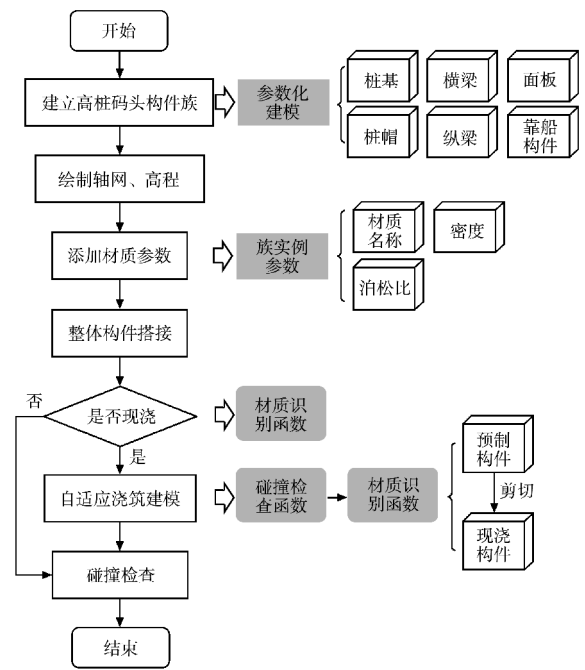


图 1 孪生建模流程

### 2.2 BIM 孪生建模具体步骤

1) 选择样板及族类建模。建议选择公制常规模型和公制结构柱模型样板, 可以自由拉伸、放样、融合、放样融合、旋转等操作, 相较于其他的族类样板更加灵活。

2) 添加材质属性。在 Revit 材质库中选择构件实际采用的混凝土型号材质, 对照有限元分析需要定义材质属性中有关的力学参数。

3) 绘制轴网、高程。高桩码头部件所处高程分层明显, 参考建筑行业楼层建模方式, 按照自下而上的原则, 绘制每层高程内的轴网图和参照线。

4) 整体构件搭接。将构件族按照高程、轴网布放至纵梁高程层后, 整体复制形成基础双排架结构, 依据码头构件施工安装图检查复制生成的构件型号; 接着摆放上层面板, 形成高桩码头双排架空间结构。

5) 预制和现浇部位处理。设计高桩码头自适应浇筑程序, 快速建模现浇构件, 优化相交构件逻辑关系。

6) 碰撞检查。建模完成后, 再次进行碰撞检查, 避免出现重叠、交错等不合理的模型现象。

### 2.3 自适应浇筑建模程序

高桩码头施工过程中存在大量的现浇块体, Revit 软件没有“现浇”功能, 在 BIM 建模时难以一步实现。本文提出一种自适应浇筑建模方法, 快速建立现浇构件, 提高建模效率; 并且修正 BIM 模型中不合理的构件重叠交错现象, 使得预制构件和现浇构件符合现实搭接情况, 为 BIM 模型向有限元模型转换做了铺垫。

程序遍历所有族实例并进行碰撞检查, 调用 API 接口中的 element intersects solid filter 类、material 类等获取相交构件和其材质信息。依据自定义材质, 将现浇构件和预制构件分组统计, 基于预制构件剪切现浇构件的逻辑处理相交部分, 实现自适应浇筑建模。

## 3 高桩码头有限元模型转换方法

### 3.1 转换程序二次开发框架

高桩码头有限元模型转换分为几何信息提取和物理信息提取 2 部分。以构件图元为基本单位, 筛选同种材质构件后读取其物理信息, 同时导出该构件几何信息, 信息匹配后编译为 ANSYS 可以读取的 APDL 命令流文件格式, 完成网格划分、约束荷载添加等操作, 进入求解器求解, 见图 2。

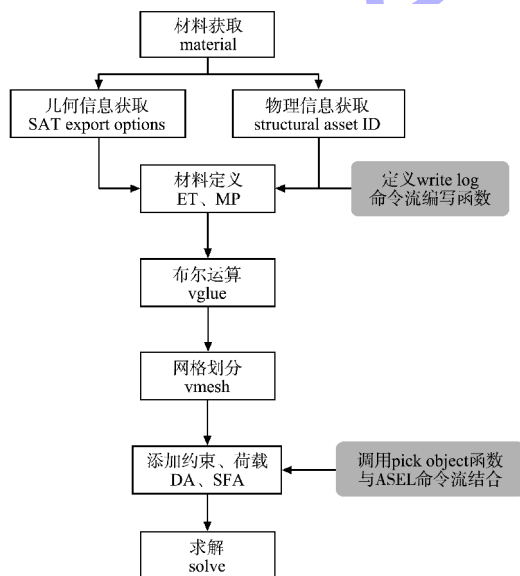


图 2 APDL 命令流编写思路

### 3.2 有限元模型转换方法

逐个遍历图元集合 (elements) 中的对象, 读取参数 (parameters) 中材质类 (material) 的 name 成员获取材质名称, 相同材质的模型存放在同一集合 (list) 中。模型几何信息获取以材质是 C40 混凝土的模型为例, 先调用 hide elements 类隐藏所有构件, 再调用 unhide elements 类显示材质为 C40 混凝土的模型集合 (list), 使用 SAT export options 类导出当前视图中显示的模型。调用 structural asset ID 函数获取并导出模型的物理信息, 包括材质的泊松比 (Poisson ratio)、杨氏模量 (Young modulus)、密度 (density)。循环遍历保证了每个循环体中几何信息与物理信息相互匹配, BIM 模型初步转换为有限元几何模型。

然后, 布尔运算处理有限元几何模型, 以保证不同构件共节点计算。网格划分默认使用自由划分方式和四面体单元形状。完成网格划分后, 添加约束及荷载。以添加面约束为例, 调用 pick objects 函数选取约束面, 获得其坐标点并转换为公制单位; 接着将坐标点作为 APDL 命令流中 ASEL 语句的输入参数, 实现约束面选择命令。采用 WPF 编程语言设计交互界面, 自定义输入约束类型和荷载数值。

定义 APDL 命令流编写函数将以上流程编写为 txt 格式, 导入有限元软件, 转换生成高桩码头有限元模型。

## 4 实例应用

### 4.1 BIM 孪生建模

天津港某高桩码头为顺岸梁板式高桩码头, 采用连片式布置, 岸线总长度为 375 m, 靠泊等级为 20 万吨级兼顾 25 万吨级。本文选取码头前方承台某结构段为研究对象, 满足孪生建模方法和模型转换程序验证要求的同时, 结构形式具有一定代表性。

桩基在载入时会有一定的斜度和转角, 采用



公制结构柱样板创建桩基族, 采用公制常规模型族样板创建桩帽、梁、面板、靠船构件等族类。根据构件截面特点设置参数注释, 并与相应参考平面锁定, 相应选择拉伸、连接等操作即可生成码头构件族模型, 见图 3。

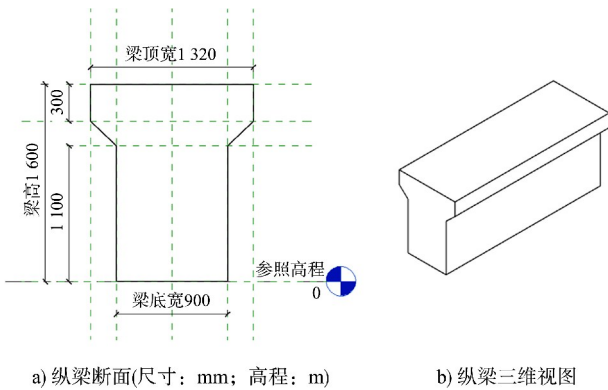


图 3 纵梁族参数化建模

在“材质浏览面板”定义该构件族材质参数, 从材质浏览库中选择合适材质, 按照统一命名规则修改材质名称, 并调整“机械”属性, 使其符合所建码头构件的实际力学性能。绘制轴网、高程和参照线, 将横梁底高程以下的构件摆放完成, 见图 4。面板层模型完善后, 加载自适应浇筑建模程序, 调整优化现浇构件与预制构件的相交部位, 并依次实现碰撞检查、材质获取、构件剪切等功能, 完成高桩码头 BIM 建模, 见图 5。

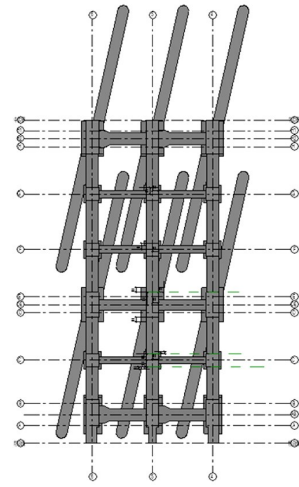


图 4 构件搭建过程

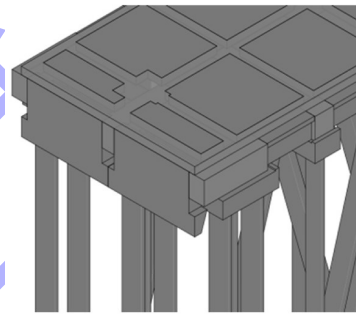


图 5 自适应浇筑建模处理效果

### 4.2 有限元模型转换

在 Revit 加载有限元模型转换程序, 自动将构件按材质分类, 获取 BIM 模型几何信息和物理信息并匹配, 编写模型导入、单元定义、布尔运算等命令流, 初步生成高桩码头有限元几何模型。高桩码头构件多、尺寸差异大, 通过 UI 交互窗口, 调整构件的网格、约束、荷载等参数, 见图 6。

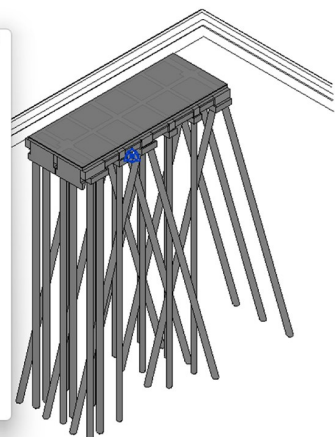
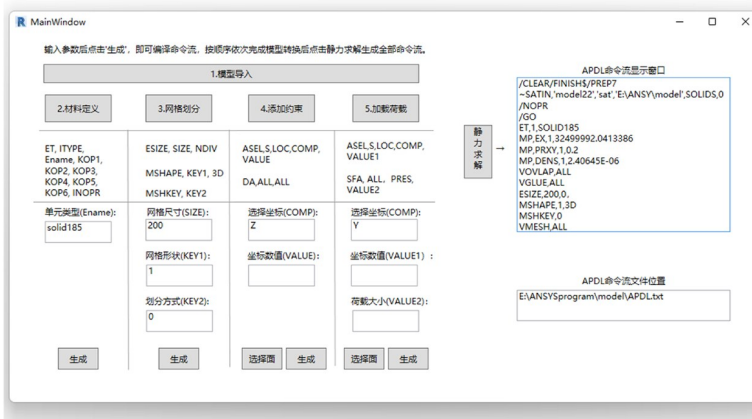


图 6 有限元模型转换界面

根据不同的力学性能分析需求，程序采用坐标信息和输入荷载为主要参数的命令流，来选取约束和受力位置，设定约束类型和荷载数值。以面约束为例，用户选择需要添加约束的体，进一步在体中选择面，通过“添加约束”功能获取此面的坐标，转化为命令流编写所需要的坐标参数。在交互界面输入约束种类和荷载数值后，通过“静力求解”功能自动加载求解命令流。

### 4.3 有限元模型验证

将 APDL 命令流文件内容复制粘贴到 ANSYS 命令流输入框，执行命令语句，生成高桩码头有限元几何模型。对桩基底部平面进行全约束，靠船构件前立面施加船舶靠船力，模型整体施加重力并求解，绘制码头总位移云图见图 7。通过分析可知，模型的位移形变符合高桩码头在靠船力作用下的位移规律。

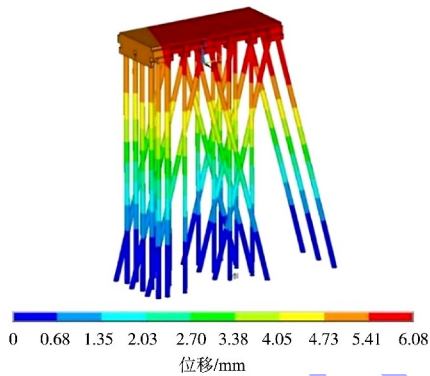


图 7 模型总位移云图

验证结果表明：高桩码头 BIM 孪生建模方法和自适应浇筑建模程序是有效的，建模流程高效可复制，材质设置统一规范；孪生建模方法在 BIM 模型衔接有限元模型转换应用方面是可行的，有限元模型精确生成无缺损变形，异型构件和搭接关系能准确转换，有限元分析过程合理有序、参数灵活可调。

### 5 结语

1) 本文提出的高桩码头 BIM 孪生建模方法，对现浇构件处理的自适应浇筑建模程序符合实际情况，实现了从码头实体到虚拟模型的映射，衔接了 BIM 建模和有限元模型转换生成，拓展了 BIM 模型多维孪生应用。以 BIM 模型为数据底盘，可帮助港口企业更好地进行基础设施数字化管理。

2) 基于 Revit 二次开发的高桩码头有限元模型转换程序，可以方便工程技术人员对已有 BIM 模型的高桩码头进行有限元分析，大幅减少了重复建模带来的工作量，为高桩码头领域 BIM 技术和有限元分析技术有效结合提供了新的思路和方法。

### 参考文献：

- [1] 李炳尧. 基于 BIM 技术的天津港建设项目全生命周期管理系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [2] 蔡波. BIM 技术在高桩码头设计阶段的应用[J]. 水运工程, 2021(3): 174-179.
- [3] 陈静, 杨凯, 马瑞鑫, 等. BIM 技术在高桩码头监测中的应用研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(11): 8-11, 62.
- [4] 李薇, 芦志强, 于水. BIM 技术在高桩码头设计施工一体化建设中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(10): 161-163.
- [5] 原媛, 谢开云, 吴双飞. 基于 BIM 技术的高桩码头施工进度优化[J]. 水运工程, 2022(6): 171-177, 183.
- [6] 于海涛, 于从芹. 基于 BIM 技术的码头运维管理系统研究[J]. 工程与建设, 2021, 35(6): 1378-1380.
- [7] 陈述, 程永舟, 孙鹰, 等. 基于 Revit 与 ANSYS 的船闸主体结构计算应用[J]. 水运工程, 2019(6): 140-146.
- [8] 陈志为, 吴焜, 黄颖等. 基于 BIM 的复杂结构有限元精细模型生成[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(5): 60-64, 81.

(本文编辑 王璁)

