

## · 信息技术 ·



# 基于 Civil 3D 的水运工程三维地质模型 技术研发与应用

李国杰, 刘莉, 牛作鹏

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

**摘要:** 针对水运工程三维地质模型建模效率低下、精度不高、模型难以在工程设计阶段得到有效应用的弊端, 结合地质插值计算方法, 通过 Civil 3D 二次开发实现地质层面模型和三维地质模型的快速创建技术, 并实现三维地质模型的任意剖切、地质剖面图的生成以及地质模型在桩承载力计算中的应用等。工程实践证明, 该技术方法切实可行, 可为类似的水运工程 BIM 技术应用提供借鉴。

**关键词:** 三维地质模型; 地质剖面; 桩; 轴向承载力; Civil 3D

中图分类号: U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0171-06

## Development and application of 3D geological model in port and waterway engineering based on Civil 3D

LI Guo-jie, LIU Li, NIU Zuo-peng

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

**Abstract:** In view of the disadvantages of low efficiency, low precision, and difficulty in application of the 3D geological model in the port and waterway engineering design, we realize the quick establishment of geological layer model and 3D geological model according to the geological interpolation calculation by the secondary development of Civil 3D. We also realize the arbitrary cutting of the 3D geological model, the generation of the geological profile, and the application of the geological model in the calculation of pile foundation bearing capacity. The engineering practice verifies that this technical method is practical and feasible, which can provide reference for similar application of BIM technology in port and waterway projects.

**Keywords:** 3D geological model; geological section; pile; axial bearing capacity; Civil 3D

三维地质建模(3D Geology Modeling)是运用计算机技术, 在虚拟三维环境下, 将空间信息管理、地质解译、空间分析与预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来, 并用于地质分析的技术<sup>[1]</sup>。工程地质是水运工程设计必不可少的关键因素之一, 近些年随着 BIM 技术的快速发展及其在水运工程领域的大力推广应用, 三维地质模型技术已成为水运工程 BIM 设计的关键技术之一。

随着三维地质建模理论的不断丰富和完善, 目前国内外已有不少成熟的三维地质建模软件, 比如国外的 GOCAD<sup>[2]</sup>、SURPAC<sup>[3]</sup>、Petrel<sup>[4]</sup>等专业化软件, 市场上也有基于 ArcGIS<sup>[5]</sup>、MapGIS<sup>[6]</sup>等软件进行建模应用。但这些软件由于数据结构和数据接口等差异, 不同数据转换时易造成信息丢失。目前, Autodesk 已成为国内外水运工程 BIM 应用的主流软件平台之一, 其旗下软件 Civil 3D 以及地质模块插件 Geotechnical 已在三维

地质模型创建技术中得到工程实践验证和应用<sup>[7-9]</sup>。但 Civil 3D 软件地质建模功能偏弱, 非剖面线钻孔之间地质插值为线性插值, 建模精度低, 若钻孔稀疏则易导致地质模型偏差较大, 而且缺少三维地质模型应用于水工结构计算分析的实践案例。

基于上述问题分析, 本文基于 Civil 3D 建模软件, 结合地质插值方法优化三维地质建模技术, 以提高三维地质模型建模精度, 并拓展三维地质模型的应用领域。

## 1 三维地质模型的创建

### 1.1 基本思路

利用有限的岩土勘察钻孔资料和地质剖面数据, 通过插值计算得到每一层土体的厚度, 进一步建立每一层土体的地质层面三维模型, 地质顶层面模型需通过原始地形数据创建。再基于地质层面模型在每相邻的地质层面之间围合创建地质体模型, 最终整合为完整的三维地质模型。

### 1.2 基础数据

基于钻孔资料、钻孔平面布置图、地质剖面图等基础数据资料, 从钻孔资料或钻孔柱状图获取钻孔位置坐标( $x, y$ )、土层分布、土体名称及每层土体厚度( $h$ )等; 从钻孔平面布置图获取所有钻孔编号、平面坐标及地质剖面线控制坐标等; 从地质剖面图获取剖面线位置的土层分布、土体名称及每层土体厚度。

### 1.3 技术流程

#### 1.3.1 处理地质剖面图分层数据

岩土勘察中地层情况往往比较复杂, 地层曲面多变, 中间可能存在一些零星的透镜体等, 综合考虑建模效率和工程具体需要, 在数据整理阶段可对岩土勘察提供的地层数据进行简化处理<sup>[10]</sup>。考虑到三维地质模型在施工阶段的应用要求, 对于需要在勘探点外包线范围外一定宽度的地层进行建模的情况, 可引入虚拟钻孔技术<sup>[11]</sup>。

对于剖面图中存在地层尖灭的情况(图 1), 可认为该土层底面从尖灭点位置开始与上覆土层

底面重合, 即从尖灭点处起该土层厚度视为 0。

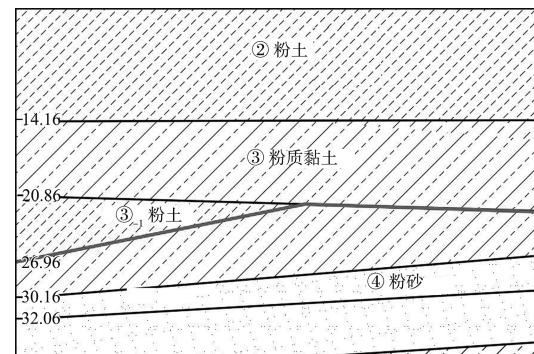


图 1 地质土层出现尖灭的情况 (单位: m)

#### 1.3.2 获取剖面线位置土层分界线数据

基于地质剖面图, 获取剖面上各土层分界线上每一点的坐标( $L_i, z_{ij}$ )、土层分布、土体名称及每层土层厚度( $h_{ij}$ )(图 2), 横坐标  $L_i$  表示剖面上一点与剖面线起点之间的投影长度; 根据横坐标  $L_i$  可在钻孔平面布置图的剖面线上换算得到该点的平面坐标, 从而得到地质剖面图中各土层分界线上各点的坐标( $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$ )。

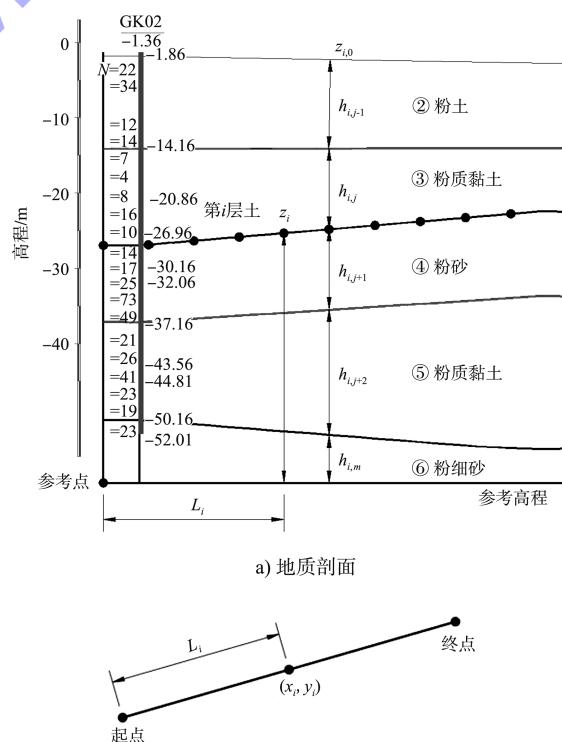


图 2 地质剖面和计算简图

#### 1.3.3 进行地质层的界面数据插值计算

Kriging 插值法能够在钻孔数据稀疏区域形成

更为合理的等高线梯度, 在已知数据分布不均或缺失的情况下具备较强的空间形态恢复能力<sup>[12]</sup>, 已广泛使用于三维地质建模中。本文采用开源的 Math. NET 按照 Kriging 插值法通过编程进行插值计算。

构建不同地质层的界面是三维地质建模的核心。通常将离散的钻孔和地质剖面图中地质层界面高程点作为插值数据源进行高程插值, 得到模型范围内地质层界面均匀的高程点。但是对于钻孔间距比较大而地层厚度比较薄的情况, 仅考虑单个层面的构建而忽略多个层面的位置关系, 直接对土层界面高程插值, 有时会出现模型超出地面、地层交叉等不合理现象。建议先进行地层厚度插值计算、后根据地面高程反算出各地质层界面的高程。

#### 1.3.4 创建地质层界面模型

利用插值计算得到模型范围之内岩土层界面上均匀的高程数据, 在 Civil 3D 中分别创建出地质层界面的三维面模型, 地质顶层面模型采用原始地形数据创建生成(图 3)。

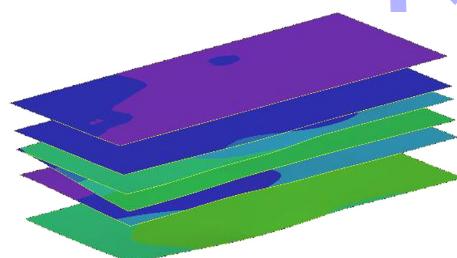


图 3 土层分界面模型

#### 1.3.5 创建地质实体模型

根据地层三维面模型( $S_i$ )在每相邻两层面之间创建三维实体模型。基于水运工程岩土勘探专业人员判定的透镜体、空洞等特殊地质体的范围, 进行特殊地质体模型创建, 并与已创建的三维实体模型进行布尔运算。

## 2 三维地质模型应用技术

### 2.1 模型的可视化表达

在建立三维地质模型之后, 为每一层地质体赋予相应的材质和颜色, 可形象化地展示和查询

相应的土层对象(图 4)。为了模型展示方便, 在 Civil 3D 平台可设置每一土层所在图层名称与对应岩土名称一致, 并建立岩土勘察信息数据库, 通过软件开发将模型识别号码与数据库对应的数据表关联, 也可将岩土属性直接写入模型的扩展属性集, 在模型中即时查询岩土特性(图 5)。

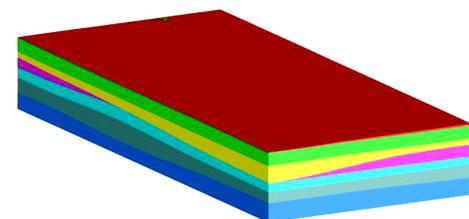


图 4 三维地质模型可视化表达

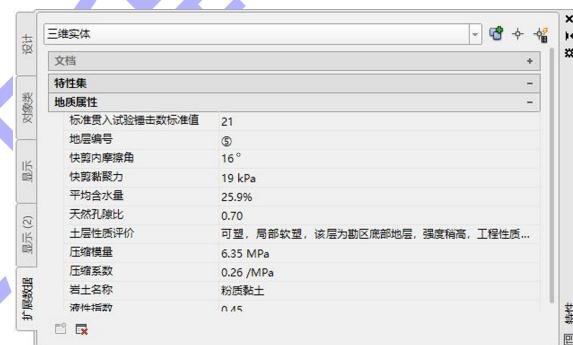
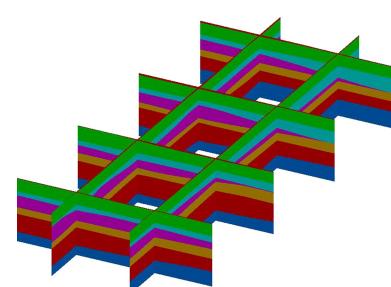


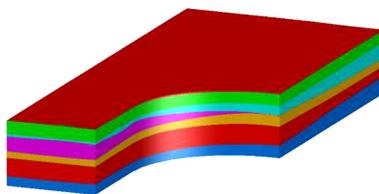
图 5 三维地质模型属性查询

### 2.2 任意剖面可视化表达

创建并展示地质体的剖切面能够更加清晰地展示地质剖面的形状和相对位置关系, 有助于工程技术人员从不同角度了解和分析工程构造。利用剖切面与实体模型相交得到相交面模型的方法, 通过软件二次开发可快速实现地质剖切面的创建与展示, 能够更加清晰、多角度地了解勘区范围内地层发育情况, 也可将地质体内部构造进行分割展示(图 6)。



a) 剖切模型1



b) 剖切模型2

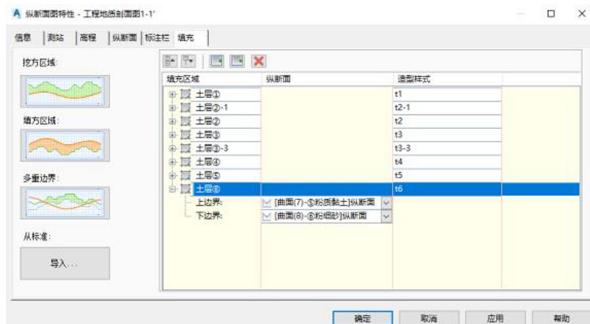
图 6 地质模型剖切可视化

### 2.3 地质剖面图

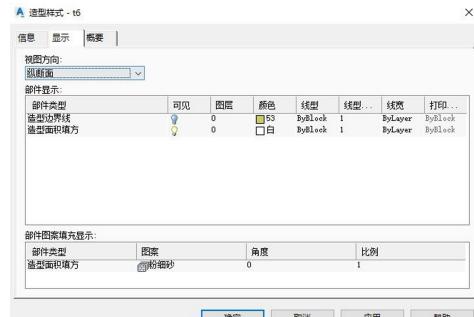
地质剖面图对于了解地质土层分布、厚度以及岩土物理、化学、力学特性等具有重要意义，直接影响水运工程设计方案的合理性和结构设计的可靠性。基于 Civil 3D 软件和所创建的三维地质模型，可通过三维地质层面或三维地质模型，实现任意剖切处地质剖面图的创建。

针对三维地质模型文件包含地质层面模型的情况，可借助 Civil 3D 软件自身的纵断面功能完成创建。首先快速生成剖面线位置地层面纵断面，并将纵断面添加到纵断面图中，在上下相邻纵断面之间采用已有的地质填充符号进行地质填充，并完善辅助标注文字，进而可实现基于地质层面模型创建任意地质剖面图(图 7)。

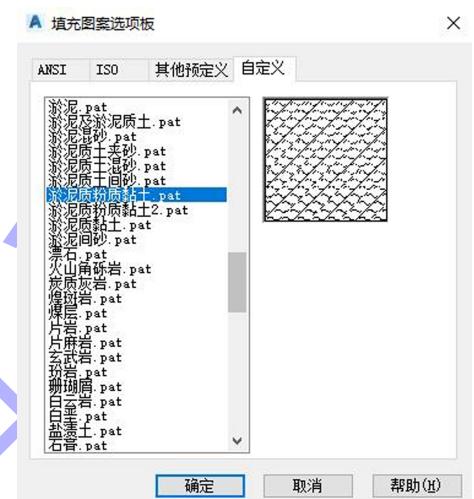
针对三维地质模型文件包含每一层地质实体模型但不包含地质层面模型的情况，关键是将地质实体剖面线位置处的剖切面，在剖面图上表达出来。通过 Civil 3D 软件纵断面图功能创建剖面线的地形纵断面图；通过 Civil 3D 二次开发，快速获取剖面线位置地质实体的剖切面轮廓，并自动将轮廓边界转化为封闭的三维多段线添加到地形纵断面图中，完善相应的图例和标注，即可实现地质剖面图的创建。



a) 纵断面地质特性



b) 造型样式



c) 剖面填充

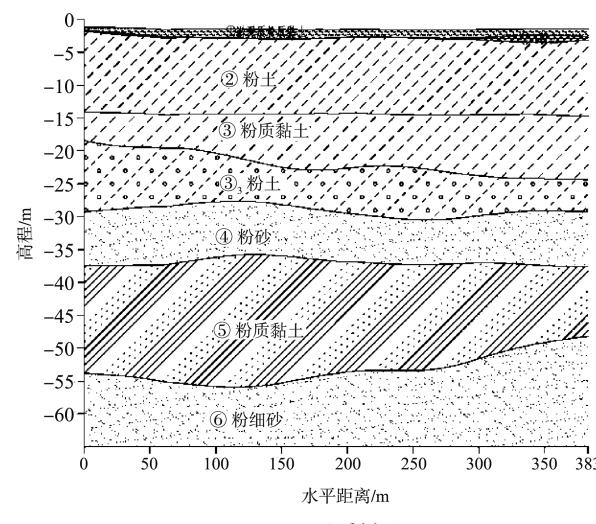


图 7 地质剖面图的创建

### 2.4 桩结构设计中的应用

在水运工程高桩码头 BIM 方式设计过程中，通过码头单体模型与地质模型的集成表达，可直观展示码头桩基布置与地质模型的空间相互位置关系，清晰展示桩端是否处于岩土勘察推荐的持

力层位置,有助于快速辅助判断桩的选型及桩长设计的合理性。此外,将地质模型用于桩承载力设计计算也具有十分重要的现实意义。

本研究通过 Revit 和 Civil 3D 软件的联合二次开发,按照下述研究思路实现桩轴向承载力的快速计算。

1) 获取桩模型的几何信息。通过 Revit 软件二次开发,在 Revit 平台批量获取桩基模型的桩径、桩长、平面扭角、与竖向夹角以及桩轴线坐标等几何信息,通过共享坐标系换算得到桩轴线位置的绝对坐标。

2) 计算桩构件在地质模型中的相对位置信息。通过 Civil 3D 软件二次开发,根据桩轴线和地质模型自动获取桩基经过的土层及桩基在该土层的顶底部坐标,从而快速计算出桩身穿过该土层的长度及桩身入土总深度。如果桩轴线与某土层仅有一个交点,则表明桩端位于该土层,桩身穿过该土层的长度为交点与桩轴线末端点之间的距离(图 8)。

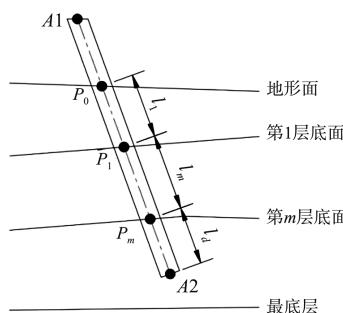


图 8 桩身穿过土层的长度示意

3) 计算桩轴向承载力。针对允许不作静载荷试桩的工程,按照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》相关规定<sup>[13]</sup>,利用上述桩构件的几何信息以及岩土勘察成果中单位面积极限桩侧摩阻力标准值和桩单位面积极限桩端阻力标准值,按承载力经验参数法快速计算单桩轴向承载力设计值。

### 3 工程应用

#### 3.1 工程概况

某油码头工程前沿线呈西南-东北向布置,泊位采用蝶形布置形式,设计代表船型为 10 万吨级

油船,共布置工作平台 1 座、靠船墩 2 座及系缆墩 6 座。码头水工建筑物包括工作平台、靠船墩、系缆墩、钢联桥、引桥、护岸等结构,除引桥拟采用高桩梁板结构外,其余水工建筑物拟采用高桩墩台结构。

工程勘察揭示勘区岩土层空间分布特征明显,层位分布稳定,规律性强。勘区揭示岩土层主要为第四系全新统黄河冲积与海陆交互沉积地层,主要由淤泥质粉质黏土、粉土、粉质黏土、粉细砂等组成。勘区水下地势总体平缓,属海底平原,无明显滑坡、坍塌、采空区、地面沉降等不良地质作用。

#### 3.2 技术应用

基于已有的岩土勘察成果和测量数据,采用本文阐述的三维地质模型创建技术方案,快速获取各剖面上各点的土层厚度及高程,并通过地质插值计算创建各土层分界面模型,进而生成本工程的三维地质模型(图 9)。该方案在提高地质模型建模精度的同时,使模型创建效率得到明显提升。

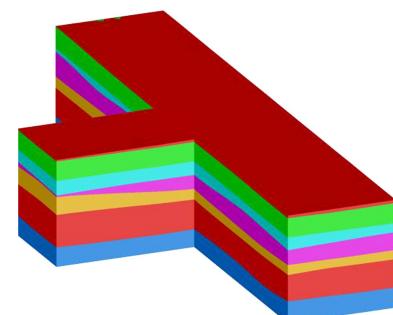


图 9 工程三维地质模型

将三维地质模型与码头单体模型集成到 Navisworks 软件,可清晰地展示桩基持力层的位置及桩身经过的岩层分布情况(图 10),为桩基设计方案的定性判断提供了支撑。

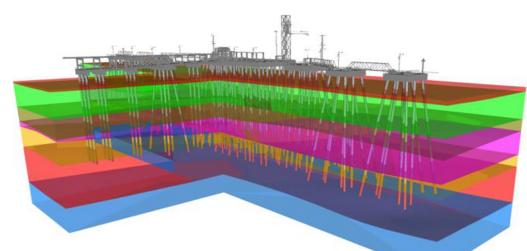


图 10 三维地质模型与码头单体模型的集成表达

通过 Revit 和 Civil 3D 软件的联合二次开发，在 Revit 平台快速读取桩基构件的几何信息和位置信息（图 11），在 Civil 3D 平台快速获取各桩桩身穿过岩土层的长度及对应的岩土特性，并根据桩型按承载力经验参数法自动计算出各桩轴向承载力设计值（图 12）。



图 11 桩基模型信息获取



图 12 桩基承载力计算

## 4 结语

1) 基于钻孔资料、地质剖面图、钻孔平面布置图及测量数据，通过地质插值计算建立地质层界面模型和三维地质体模型，地质模型创建效率和准确度得到进一步提升，并能够应用到水运工程 BIM 设计过程。

2) 本研究实现了地质模型的任意剖切可视化表达，基于模型成果实现两种任意地质剖面图的创建方法，为水运工程 BIM 设计全面了解地质构造特征提供强有力的技术支撑。

3) 通过 Revit 和 Civil 3D 软件的联合二次开发，利用三维地质模型与码头单体模型实现桩基

轴向承载力的快速计算，为桩基结构精细化设计分析提供了依据。

## 参考文献：

- [1] 李青元, 张洛宜, 曹代勇, 等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767.
- [2] 李豪, 王世明, 吴腾飞, 等. 基于 GOCAD 的地下工程三维地质建模与分析[J]. 四川建筑, 2018, 38(6): 83-85, 88.
- [3] 娄渝明, 韩鹏, 邓煜霖, 等. Surpac 软件在三维地质建模中的应用[J]. 四川地质学报, 2017, 37(2): 339-341, 352.
- [4] 吴永彬, 张义堂, 刘双. 基于 PETREL 的油藏三维可视化地质建模技术[J]. 钻采工艺, 2007(5): 65-66, 81.
- [5] 陈末, 卢文喜, 侯泽宇, 等. 基于 ArcGIS 的潮白河地下水水库三维地质建模及动态模拟[J]. 节水灌溉, 2013(8): 39-43, 49.
- [6] 丁秋红, 姚玉来, 王杰, 等. 基于 MapGIS 三维地质建模方法及实践: 以 1:25 万扎鲁特旗幅深部地质调查为例[J]. 地质与资源, 2016, 25(5): 494-499.
- [7] 刘莉, 李国杰, 乔伟刚. 基于 Civil 3D 的三维地质建模方法及应用[J]. 水运工程, 2018, 38(8): 140-144.
- [8] 李家华, 陈良志, 杨彪, 等. 三维地质模型在水运工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(10): 16-20.
- [9] 秦峰, 齐鲁尚, 洪亚东. 基于 Civil 3D 中 GeotechnicalModule 插件的三维地质建模方法[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(1): 97-98.
- [10] 初士立, 夏绵丽, 封明丽, 等. 基于 BIM 技术的岩土工程三维地质模型创建方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S1): 152-157.
- [11] 钟频. 基于虚拟钻孔技术的三维地质建模应用研究[J]. 现代信息科技, 2017, 1(3): 100-101.
- [12] 刘乐, 杨智. 基于钻孔数据的三维地质建模空间插值方法的对比研究[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(3): 162-164.
- [13] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 郭雪珍)