

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210815002

## 三维地质建模及其在地下空间开发的应用研究\*

俞美成<sup>1,2</sup>, 吴静红<sup>1,2</sup>, 王源<sup>1,2</sup>, 师文豪<sup>1,2</sup>, 王兴<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学城市地下空间利用与安全防护技术研究院, 江苏 苏州 215009; 3. 南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏 苏州 215123)

**摘要:** 为了建立精确三维地质模型, 了解地下空间情况, 提出一种优化的建模方法, 以钻孔数据为基础, 利用 surfer 软件对数据进行插值拟合, 运用 Civil 3D 的曲面功能创建三维地质模型, 并引入地质剖面图进行模型修正。以苏州观前街区为例建立三维地质模型, 较为真实地反映了该区地质情况; 通过剖切模型生成的三维地质模型栅格图、平切图对三维地质模型进行可视化分析, 从而了解研究区域地质构造、地层起伏和变化规律; 通过 Civil 3D 软件的二次开发建立剪切地下构筑物的插件, 实现地下空间开挖的功能, 直观清晰地获取研究区地下空间的地质情况。工程应用结果表明, 该建模方法较为精确, 生成的三维地质模型有助于指导地下工程建设, 对未来地下空间开发具有实际指导作用。

**关键词:** Civil 3D; 钻孔数据; 三维地质模型; 可视化; 地下空间

**中图分类号:** P642; TU91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0588-08

### 3D Geological Modeling and Its Application in Underground Space Development

YU Meicheng<sup>1,2</sup>, WU Jinghong<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>1,2</sup>, SHI Wenhao<sup>1,2</sup>, WANG Xing<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Urban Underground Space Utilization and Safety Protection Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Suzhou Institute of High Technology, Nanjing University, Suzhou 215123, China)

**Abstract:** To establish an accurate 3D geological model and gain an understanding of the underground space, an optimized modeling method is proposed in this study. Based on borehole data, Surfer is used for interpolation and fitting of data. The surface function of Civil 3D is adopted to create a 3D geological model, which is subsequently refined by incorporating geological profiles. Taking Suzhou Guanqian Street as an example, a 3D geological model was established, which offered a relatively true reflection of geological conditions; Visualized analysis was done using its grid map and slice map generated by sectioning the model. This approach allowed us to understand the geological structure, strata fluctuation, and change law of the study area; Through the secondary development of Civil 3D, a plug-in for cutting underground structures was established, which realized the function of under-

\* 收稿日期: 2021-08-15; 修回日期: 2021-09-16

**基金项目:** 江苏省人民防空办公室资助项目(2019006)、国家自然科学基金青年科学基金项目(41907232)、江苏省自然科学基金项目(BK20180972)、苏州市科技计划项目(SS201822)资助

**作者简介:** 俞美成(1997—), 女, 硕士。主要从事岩土工程和地下空间开发方面的研究。E-mail: ymc19970225@163.com

**通讯作者:** 吴静红(1989—), 女, 讲师, 博士。主要从事地质工程监测与评价研究。E-mail: wjh@mail.usts.edu.cn

ground space excavation, and intuitively and clearly obtained the geological conditions of the underground space in the study area. The engineering application results show that the modeling method is relatively accurate, the generated 3D geological model will provide practical guidance for construction of underground engineering and on the development of underground space in the future.

**Keywords:** Civil 3D; borehole data; 3D geological model; visualization; underground space

## 0 引言

随着城市化进程的不断推进,城市的公共基础设施、环境和交通都在承受着巨大的压力和挑战,有限的城市空间日益紧张,地下空间的开发利用已成为城市寻求可持续发展的必然选择。工程地质条件对地下空间的合理开发及地下建设的安全起决定性作用<sup>[1]</sup>,深入认识区域工程地质环境特点,加强工程地质问题的研究是城市地下空间合理开发利用的基础<sup>[2]</sup>。三维建模技术能弥补传统地质勘察的不足,深入掌握工程地质条件,为城市地下空间的开发利用提供直观立体的空间形态展示,其三维可视化有利于科学引导地下空间开发利用<sup>[3]</sup>,对于地下工程建设具有指导意义。2020年下半年,《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》明确提出实施城市更新行动,这是党中央作出的重大决策部署,加快推进新型城市基础设施建设,加快推进城市信息模型(CIM)平台建设是实施城市更新行动的主要任务之一,其中,CIM基础平台是依托城市基础地理信息,建立建筑物、基础设施等三维数字模型的平台。近年来,很多城市都开启了三维地质建模以助力CIM构建,如贵州省建成“玻璃国土”、山东省开展“透视山东”项目等,三维地质建模在城市三维数字模型搭建中必不可少,是优化城市空间结构,助力城市地下空间开发利用的必然要求,三维地质建模配合开展地下空间开发是促进城市更新,建设智慧城市、数字中国的重要举措。

三维地质建模是当前地学领域的一个研究热点<sup>[4]</sup>。国内外三维地质建模研究在建模方法和可视化表现方面均有明显进展,A.M.Lemon等<sup>[5]</sup>基于钻孔和剖面进行多层DEM建模,M.Hao等<sup>[6]</sup>结合垂直地质资料和水平地质资料提出了一种基于多重约束的平截面建模方法,H.Luo等<sup>[7]</sup>建立了三维地质模型,基于地质建模结果开展了钻孔设计等工程应

用。但由于原始数据不足,建立精确的三维地质模型仍然面临许多挑战<sup>[8]</sup>,陆续有学者利用钻孔数据挖掘地质特性,针对钻孔稀疏问题进行基于多源数据的建模<sup>[9-12]</sup>,但克服该难题仍需不断探索新思路。目前,三维地质建模在石油勘探、油田开发、矿产资源开发等领域得到广泛应用<sup>[13]</sup>,但在地下空间开发领域的应用还不够成熟,现有地下空间建模研究大多侧重于地层建模方面,对地下构筑物考虑较少<sup>[14]</sup>,地下空间情况在三维地质模型中未充分得到可视化展示。苏州市的地下空间利用起步较晚,1995年之前基本是地下人防设施,1995年之后陆续开始有非人防设施的地下空间开发。目前苏州古城区的地下空间类型以地下停车库、人防工程为主,地下商业街较少,功能单一,大部分地下空间为独立分散建设,互不相连。近年来,整个观前商圈的地面空间基本饱和,随着《苏州地下空间专项规划(2018-2035年)》和《观前商圈改造提升总体规划》编制工作的启动,建设互联互通的观前商圈地下空间成为重要任务,地下空间的开发利用为古城区寻求发展空间提供了新途径。

通过上述研究发现,目前地质资料有限的问题依旧存在,且大多只研究地层建模,在城市地下空间开发中的应用研究较少。因此,以Civil 3D软件为可视化工具,提出数据插值和剖面图修正的优化建模方法,二次开发剪切地下构筑物的插件,并以苏州观前街区为例,建立观前街区三维地质模型,对该区域的地质情况进行可视化分析,并对地下构筑物进行展示,为研究区地下空间安全合理开发利用提供重要指导意义。

## 1 地质体三维建模方法

### 1.1 Civil 3D基本建模原理

Civil 3D是Autodesk公司推出的一款面向基础设施行业的建筑信息模型(BIM)解决方案,近几年在设计行业应用比较广泛<sup>[15]</sup>。在Civil 3D中,三维地形被称之为曲面,曲面包括三角网曲面和栅格曲

面,其中,三角网曲面是通过任意一组点进行De-launay三角剖分而形成的,为了创建组成三角形的三角网线,Civil 3D会连接彼此最接近的曲面点,曲面中任何点的高程都是通过对该点所在三角形的顶点的高程进行内插来定义的,以此来逼近地形表面,能够更加精确模拟原始地形。Civil 3D建立曲面时,一般需先创建曲面,然后将源数据(钻孔点、DEM文件、等高线等)添加到曲面定义中,从而生成原始地形曲面和地质层曲面,再利用曲面提取实体功能将各地质层曲面围合形成地质层实体。本文选择三角网曲面进行创建,利用钻孔数据定义曲面。

### 1.2 建模方法

为构建精确的三维地质模型,提出一种优化的建模方法,遵循以钻孔数据为主快速建立三维地质模型,引入地质剖面图对模型进行局部修正从而提高精度的原则,图1为建模方法的流程,具体优化方法如下。

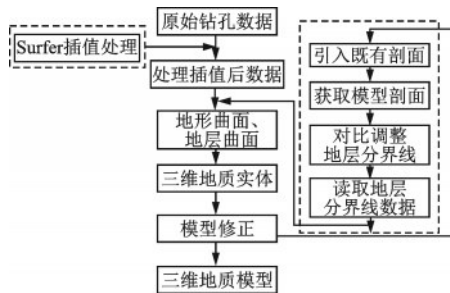


图1 建模方法流程

Fig.1 Flow chart of the modeling method

#### (1) Surfer插值处理

一般情况下,研究区钻孔布置越多,建立的三维地质体模型更准确。但由于获取资料有限,实际得到的钻孔信息常常比较稀疏、离散,如果直接基于原始钻孔数据创建地质层曲面,会导致所创建曲面不够光滑,模型精度较低<sup>[16]</sup>。因此,必须采用一定的插值方法加密钻孔点,从而建立满足精度要求的三维地质模型。尽管Civil 3D具有平滑曲面功能,但其只有克里格和自然临近内插法两种平滑方式可供选择,且效果并不理想。故本文结合具有强大插值功能的Surfer软件弥补Civil 3D的不足,采用较为常用和准确的克里金插值法进行插值加密。具体方法为:将原始钻孔数据以XYZ形式存储于Excel文件中,并导入surfer软件,设置XY方向的坐

标最大值和最小值及节点数,导出为“\*.dat”类型文件,并通过surfer进一步转化为Civil 3D支持的“\*.csv”类型文件。

#### (2) 控制点调整数据

Surfer插值生成的数据由一系列坐标点以矩阵形式排列<sup>[17]</sup>,如图2所示,其中不包括原始钻孔数据。为减小数据误差,将原始钻孔点作为控制点导入插值数据生成的散点图中,每个控制点都有与其距离最近的插值点,当插值点某层面Z值与控制点的相应层面标高相差较大时,将此插值点的层面Z值替换为控制点的相应层面标高,即原始钻孔点的真实层面高程。

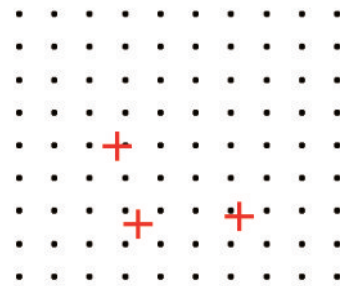


图2 地层面XYZ坐标点

Fig.2 XYZ coordinate points of stratum surface

#### (3) 层面相交处理

插值处理后的地层可能会出现层面相交的现象,即上一土层部分点的层底高程低于其下土层相应位置处的高程,此时,从上至下比较某一土层层底高程与其下一土层的高程,若出现当前土层层面上部分点的高程值 $Z_i$ 小于其下土层层面上对应点的高程值 $Z_{i+1}$ ,则将其下土层层底高程 $Z_{i+1}$ 修正为当前土层层面上点的高程 $Z_i$ ,保证各土层层次分明<sup>[18]</sup>,建立更加清晰准确的地质模型。

#### (4) 剖面图修正模型

利用钻孔数据直接建立模型是比较简单和常用的方法,但只依靠钻孔数据建模常常无法达到与实际地质情况吻合的效果,此时结合剖面图对模型进行修正,可以使模型更加符合真实地层起伏趋势,接近真实地质情况。具体方法为:根据既有工程地质剖面图中所经过钻孔的位置,获取已建模型对应位置的剖面图,对比既有地质剖面图的地层走势及层底高程,若存在不够精确的地层分界线,则利用软件的纵断面创建工具绘制较为吻合的地层分界线,读取各地层分界线的数据并导出为点文件形式,将这些新的钻孔点代替偏差较大的钻孔点与

处理后的插值数据一起进行重新建模,使新生成的地层模型更加精确。

### 1.3 模型验证

为了验证优化建模方法的可靠性,需要对所建模型进行验证。模型检验一般包括两方面<sup>[19]</sup>,一是具体高程点的精度检查,即检验模型的地层高程数据是否与在同一坐标位置处的实际数据一致。二是剖面图的检查,利用地勘资料中的工程地质剖面图与模型自动生成的经过相同钻孔点处的剖面图相对比,检查两者的地层走向与层面高程是否相吻合,地层形态是否一致。

利用具体高程点的精度来检验模型,事先预留一些原始钻孔作为验证样本,由剩余钻孔作为建模数据,参与上述 surfer 插值、控制点调整数据、层面相交处理和引入剖面图修正这一系列优化处理,最终建立模型。对应验证样本点的 XY 坐标,读取优化后的模型结果,得到各层面标高,对比模型结果与验证样本,采用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)两个评估指标对模型精度进行验证<sup>[20]</sup>。公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - O_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

式中, $n$ 为地层层数; $M_i$ 为模型数据; $O_i$ 为原始数据。

## 2 工程应用

### 2.1 研究区概况

研究区位于苏州市观前街区,东起宫巷,西至人民路,南抵干将东路,北到观前街,占地面积约 0.3 km<sup>2</sup>。研究区第四纪以来地壳运动以沉降为主,广泛接受堆积,形成广阔的冲积、湖积平原地貌,第四系地层分布广、厚度大,主要地层为第四系全新世沉积物、第四纪晚更新世冲湖积相沉积物、第四系晚更新世海陆交互相沉积物。根据勘探揭露情况,工程地质层自上而下、由新到老依次可概化为 12 层:①杂填土、素填土层②淤泥土层③黏土层④粉质黏土层⑤粉土层⑥粉质黏土层⑦粉砂夹粉土层⑧粉质黏土层⑨黏土层⑩粉质黏土层⑪粉质黏土层⑫粉土层。该区及邻近地区不存在全新活

动断裂和发震断裂,未发现岩溶、滑坡、地面沉降等不良地质作用。

### 2.2 研究区钻孔数据分析

研究范围内共有 88 个钻孔,可利用的钻孔为 77 个,编号为 J1-J77,钻孔点布置如图 3 所示。



图3 研究区钻孔点布置

Fig.3 Layout of borehole points in the study area

由于苏州观前街区未来地下空间开发利用主要实现地下停车+人防工程+地下交通环廊的功能,其开发利用深度一般不超过 30 m,故仅对地面高程至层底高程-30 m 深度内的地层进行三维地质建模。Civil 3D 三维地质建模所需要的数据为钻孔平面位置 XY 坐标和各地层高程,在实际情况中可能会出现土层非连续分布,某位置缺失某类土层的情况,此时取用上一土层底部标高来补充代替缺失土层标高,确保曲面能连续建立。另外某些钻孔点的钻探深度较浅,最大钻探深度处至-30 m 标高范围内的土层状况未揭露,此时,根据相应剖面图中相邻完整钻孔的土层揭露情况增设虚拟地层标高以完善钻孔数据。

预留 J22、J49、J55 三个原始钻孔作为验证样本,将剩余 74 个钻孔点各地层的 XYZ 数据文件导入 Surfer,选择克里金插值法,按研究范围设置 X、Y 方向的最大值和最小值,根据精度要求,将节点数改为 50,进而插值生成三维网格数据文件。将生成的文件转换为 csv 格式文件,得到插值后的各地层界面 XYZ 数据。将原始钻孔点作为控制点导入插值数据生成的散点图中,如图 4 所示,找到距离每个控制点最近的插值点,分析控制点与插值点对应各层面标高的误差,得到误差绝对值区间频数统计表(表 1),插值数据的整体精度较高,调整与实际数据偏离相对较大的插值数据,将各层面中绝对误差大

于0.5的相应插值点的 $z$ 值替换为控制点的相应层面标高。最后对层面相交情况进行处理,得到各层面的XYZ数据,以此数据为基础,可以生成地层三角网面域。

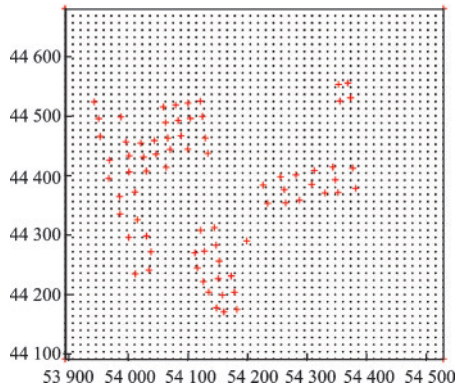


图4 插值数据散点

Fig.4 Scatter plot of the interpolation data

表1 绝对误差绝对值区间频数统计

Table 1 Interval frequency statistics of absolute error absolute value

绝对误差绝对值区间	[0,0.1)	[0.1,0.5)	[0.5,1)	[1,+∞)
频数	548	298	36	6

### 2.3 建模实体

#### 2.3.1 建模步骤

(1) 为便于获取地质模型的空间位置信息,首先导入一张研究区域的CAD文件作为底图,再创建并定义一个地形曲面,即可知道曲面每处所代表的实际地理位置;

(2) 依次创建12个三角网曲面,并命名为相应土层序号;

(3) 在每个曲面中添加插值处理后的相应点文件,直接生成各层曲面;

(4) 依次将相邻曲面通过从曲面提取实体功能生成实体,从而构建三维地质体模型;

(5) 由于surfer插值处理后的数据范围比实际研究区域更大,故用三维建模工作空间中的剖切命令将模型切割成实际研究范围大小;

(6) 引入剖面图修正模型,分别选取图3中1-1、2-2、3-3、4-4、5-5剖切线处的剖面图进行对比,当模型生成的剖面图的地层分界线与既有地质资料剖面图有不吻合处时,重新绘制地层分界

线,通过创建装配的方式将地层分界线投影到地形曲面上,将分界线创建为道路,再从道路创建多段线,读取地层分界线的XYZ值并导出。将导出的数据加入建模数据中重新建模,图5为最终模型。

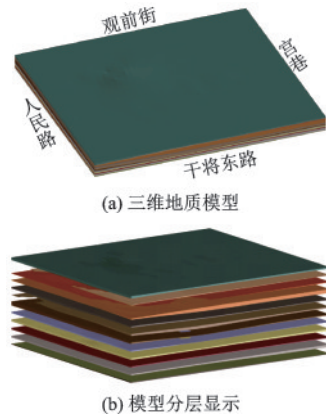


图5 观前街区三维地质模型及分层

Fig.5 3D geological model and stratification of Guanqian Street District

#### 2.3.2 模型验证

选取预留钻孔J22、J49和J55,将其数据与模型数据进行比较,根据验证公式(1)、(2)计算得到误差结果(表2)。采用优化的建模方法所建模型误差明显小于未优化模型误差,具有较小的MAE值和RMSE值,较未优化模型分别降低0.049~0.974 m、0.163~2.810 m。因此,该建模方法可以有效优化模型,所建模型精度较高,可建立较为真实可靠的三维地质模型。

表2 模型精度验证

Table 2 Model accuracy verification

单位:m

钻孔编号	平均绝对误差		均方根误差	
	未优化建模	优化建模	未优化建模	优化建模
J22	0.450	0.253	0.541	0.095
J49	0.626	0.577	0.638	0.475
J55	1.157	0.183	2.877	0.067

## 3 可视化分析与地下空间开发

### 3.1 模型剖切分析

从不同方向和视角对模型进行剖切,可以辅助挖掘隐含的地质信息,更好地观察地质构造情

况和变化规律。利用三维建模的剖切功能,将研究区模型进行栅格切割,如图6所示,可以直观清晰地展示观前街区地层起伏情况。①人工填土层整体平缓,土层厚度较为均一,在乐乡饭店一带呈凹陷状;②淤泥土层较薄,西北部、东北部地区甚至缺失,向乐乡饭店一带及干将东路一侧靠近的土层逐渐变厚;③黏土层起伏较小,靠近乐桥一带厚度逐渐变小,甚至该层缺失;④粉质黏土层厚度较大,北半侧由西往东呈一定坡降;⑤粉土层由北至南整体逐渐变薄,大井巷一带厚度变化较大,呈中间厚两侧薄的特征,人民路往东有明显的由高到低的倾斜特征;⑥粉质黏土层呈明显的波纹状起伏,在美罗商场地块弯曲向下凹陷;⑦粉砂夹粉土层起伏规律与⑥层相似,但其厚度相差较大,分布不均;⑧粉质黏土层和⑩粉质黏土层平缓,无明显起伏现象;⑨黏土层和⑩粉质黏土层厚度分布较均一,在塔倪巷和大井巷附近分别呈明显的凹陷和隆起现象。整体来看,邵磨针巷以西至人民路区域的地层起伏较大,土层缺失现象常见,地质情况相对较为复杂。

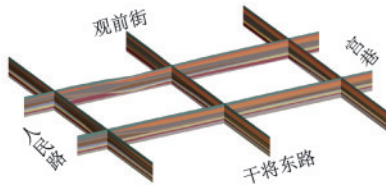
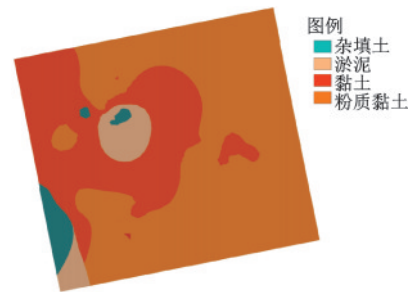


图6 研究区三维地质模型栅格图

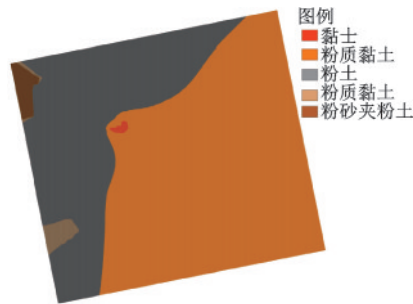
Fig. 6 Raster map of the 3D geological model in the study area

苏州观前街区既有地下空间类型主要为商场、机动车库和非机动车库,多为地下一层和二层,其基础埋深约在5 m和10 m左右,并且未来地下空间开发会向更深处展开,以地表下5 m、10 m和高程-15 m、-20 m处对模型进行平切,得到土层分布剖面图(图7)。

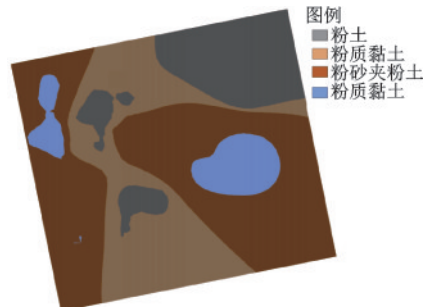
如图7所示,在地表以下5 m左右处,④层粉质黏土广泛分布在该切面东部,属中压缩性土,可塑为主,底部软塑-流塑,该地层工程性能一般;③层黏土分布区域将近占研究区一半,主要集中在西部和中部,属中压缩性土,可塑,局部硬塑,工程性能良好;①层人工填土和②层淤泥土少量分布在部分区域,压缩性高,属松软土,均一性差,工程性能差。在地表以下10 m左右处,④层广泛分布在该区域的中部和东部;⑤层粉土分布于北部和西部,属中-中



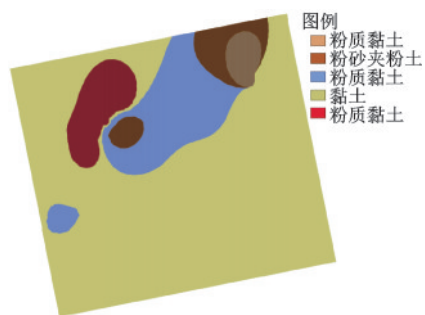
(a) 地下5 m土层分布剖面



(b) 地下10 m土层分布剖面



(c) 高程-15 m土层分布剖面



(d) 高程-20 m土层分布剖面

图7 土层分布剖面

Fig. 7 Sectional view of soil layer distribution

低压缩性土,土质较密实,饱和度高,工程性能良好;⑥层粉质黏土和⑦层粉砂夹粉土零星分布;⑧层属中压缩性土,工程性能一般;⑦层压缩性较低,土质较密,工程性能良好。高程-15 m处以⑤层、⑥层、⑦层和⑧层粉质黏土为主;⑧层压缩性中等偏高,工程性能较差。高程-20 m处⑨层黏土大面积出露,可塑性状态为可塑-硬塑,属中压缩性土,工程性能良好;⑩层粉质黏土少量分布于西北部,压缩性中等,工程性能一般。从整体来看,观前街区

的软弱土层主要集中在地表以下0~5 m处,地表以下15~20 m内分布压缩性较高的粉质黏土,这两处深度范围内土层的工程性能较差,在地下空间开发时应引起重视。

### 3.2 地下空间展示

在三维地质模型中开挖指定深度的地下构筑物时存在一些问题,三维模型是由多个地层单体组合而成,而地下构筑物是连续的整体模型,这使得构筑物需要与单个地层分别进行布尔运算,无法在地质模型中直接开挖地下构筑物。而且参与布尔运算的地层单体的数据量很大,每次运算完成后,用于挖除的实体就会消失,从而造成运算工作量加大,模型准确度降低。为了实现三维地质模型直接开挖地下构筑物的功能,以VB.NET作为开发语言,Visual Studio编程平台为开发平台<sup>[21]</sup>,基于Civil 3D软件二次开发剪切地下构筑物的插件。基于该插件,可以实现进行一次剪切即可完成地下空间开挖的功能,且只需选择要剪切的实体即可自动识别与三维模型相交部分从而开挖出地下空间,极大减少地层和地下构筑物之间布尔运算的次数,提高运算效率。

根据研究区既有地下空间的位置和深度,画出所有地下构筑物实体,通过布尔运算的“并集”命令将各个实体集成开挖形体;利用“NETLOAD”命令加载插件,调出二次开发的插件命令选择用于剪切的实体,即完成模型开挖,图8展示了地下空间情况。对开挖后的三维地质模型可以进一步开展可

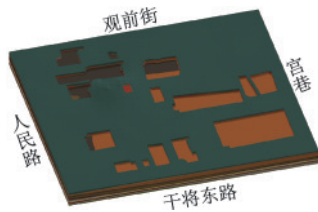


图8 观前街区地下空间情况

Fig. 8 Underground space of the Guanqian Street District



图9 美罗地下超市地下空间情况

Fig. 9 Underground space of Metro underground supermarket

视化分析,研究既有地下空间周边的土层揭露情况等。如图8所示,地下构筑物底部大部分为粉质黏土层,粉土层局部分布,乐乡饭店底部处于黏土层。以美罗地下超市为例,如图9所示,其地下空间侧壁从上至下分别为:①杂填土、素填土层③黏土层④粉质黏土层⑤粉土层。故在地层建模的基础上考虑地下构筑物,可以更直观清晰了解研究区地下空间的地质情况,掌握地质信息,有助于进行未来地下空间开发的选址评价,为地下工程建设提供重要的指导作用。

## 4 结 论

基于钻孔数据提出了一种优化的建模方法,以苏州观前街区为例建立了该区三维地质模型,证实了建模方法的可靠性,并采用剖切和开挖的方式对模型进行了可视化分析,得到如下结论:

(1)基于Civil 3D的曲面功能,采用surfer插值处理结合剖面图修正的建模方法可以生成较为精确的三维地质模型,能够较高质量满足地质勘探对三维地质模型的要求。

(2)基于Civil 3D的可视化功能,通过栅格剖切地质体三维模型可以直观清晰展示研究区地层起伏和变化规律,对三维模型进行平切可以了解不同深度处的土层分布情况,结合勘察资料中各土层的物理力学性能,有助于判断各地块及不同深度范围内的土体工程地质条件好坏。

(3)通过软件二次开发剪切地下构筑物,直观展示了苏州观前街区既有地下空间的土层揭露情况。在地层建模的基础上考虑地下构筑物,可以更直观了解研究区各地块的地质状况,有助于进行地下空间开发的选址评价,对地下空间科学合理开发具有实际指导意义。

随着城市向地下空间发展,城市深基坑、隧道开挖、地铁等工程建设必不可少<sup>[22]</sup>,为避免此类大型地下建筑物对地下空间开发及地下工程安全建设造成不利影响,今后有必要加强对深基坑、隧道及地铁等三维地质建模的研究,并实现与数值模拟的一体化研究。

### 参考文献:

[1] 荣耀, 吴江鹏, 阳栋, 等. 城市地下空间开发利用关键地质影响因素分析[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38

- (2): 250-255.
- Rong Y, Wu J P, Yang D, et al. Analysis of key geological influencing factors in urban underground space development and utilization[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(2): 250-255. (in Chinese)
- [2] 吴文博, 曹亮, 刘健, 等. 苏州地下空间开发地质环境因素的分析评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(2): 131-139.
- Wu W B, Cao L, Liu J, et al. Evaluation and analysis of geological environment for the development of underground space in Suzhou[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(2): 131-139. (in Chinese)
- [3] 吴立新, 姜云, 车德福, 等. 城市地下空间资源质量模糊综合评估与3D可视化[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 97-102.
- Wu L X, Jiang Y, Che D F, et al. Fuzzy synthesis evaluation and 3D visualization for resource quality of urban underground space[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1): 97-102. (in Chinese)
- [4] 朱合华, 李晓军. 数字地下空间与工程[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2277-2288.
- Zhu H H, Li X J. Digital underground space and engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2277-2288. (in Chinese)
- [5] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers and Geosciences, 2003, 29(5): 547-555.
- [6] Hao M, Li M, Zhang J L, et al. Research on 3D geological modeling method based on multiple constraints[J]. Earth Science Informatics, 2020, 14(1): 291-297.
- [7] Luo H, Wang J, Jiang S, et al. Construction and application of three-dimensional geological model in Xinchang Block for high-level radioactive waste disposal[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 568-575.
- [8] 王纯祥, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中地质建模研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1722-1726.
- Wang C X, Bai S W, He H J. Study on geological modeling in 3D strata visualization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1722-1726. (in Chinese)
- [9] Zhang W G, Han L, Zong Z X, et al. Digitalization of mechanical and physical properties of Singapore Bukit Timah granite rocks based on borehole data from four sites[J]. Underground Space, 2020, 6(5): 483-491.
- [10] Wu Q, Xu H, Zou X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers and Geosciences, 2004, 31(1): 35-43.
- [11] Kaufmann O, Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers and Geosciences, 2007, 34(3): 278-290.
- [12] 王瑶, 张像源, 陈文杰. 基于多源钻孔数据的工程地质三维建模方法及应用[J]. 中国矿业, 2017, 26(增2): 387-390.
- Wang Y, Zhang X Y, Chen W J. 3D modeling method and its application of engineering geology based on multi-source drilling data[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(Sup2): 387-390. (in Chinese)
- [13] 包世泰, 夏斌, 崔学军, 等. 地质三维信息模型研究及其应用[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(4): 470-476.
- Bao S T, Xia B, Cui X J, et al. Research and application of geological 3D information model[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(4): 470-476. (in Chinese)
- [14] 琚娟, 朱合华, 李晓军. 基于特征约束的地下空间一体化数据模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 199-203.
- Ju J, Zhu H H, Li X J. 3D integrated data model for underground space based on feature constraints[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 199-203. (in Chinese)
- [15] 李万红. 基于AUTO Civil 3D的三维地质建模与应用[J]. 人民长江, 2020, 51(8): 123-129.
- Li W H. 3D geological modeling and application based on AUTO Civil 3D[J]. Yangtze River, 2020, 51(8): 123-129. (in Chinese)
- [16] 张渭军, 王文科. 基于钻孔数据的地层三维建模与可视化研究[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(1): 108-113.
- Zhang W J, Wang W K. 3D modeling and visualization of geological layers based on borehole data[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(1): 108-113. (in Chinese)
- [17] 王大志, 黄鹏. 基于AutoCAD的工程地质三维实体建模方法[J]. 人民长江, 2017, 48(19): 72-78.
- Wang D Z, Huang P. 3D solid modeling method of engineering geology based on AutoCAD[J]. Yangtze River, 2017, 48(19): 72-78. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)

(下转第636页)