

基于三维地勘数据平台的快速有限元建模方法*

郑良玉¹, 李 佳¹, 陈 曦¹, 陈 淼¹, 穆树怀²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国石油管道局工程有限公司设计分公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 随着计算机可视化技术和数值分析方法的快速发展, 三维地质建模和有限元技术在岩土工程和城市防灾减灾领域应用越来越广泛。但目前对两者间有效衔接的研究还明显不足, 导致了許多重复性工作和较低的工作效率。针对这一问题, 提出了一种基于三维地勘数据平台的快速有限元建模方法。利用 Python 语言及其 Mayavi 库开发了基于有限个钻孔的可视化平台, 应用两种互补的空间插值法—反距离加权插值法(IDW)和克里格空间插值法(Kriging)实现地层分界面模拟, 并进行层间拓扑关系分析优化。重点引入虚拟钻孔概念, 提出将三维地层模型截取地块信息转化为有限元软件内置命令文件的衔接方法。以 Plaxis 3D 为例, 实现同一大型场地不同地块的快速有限元建模和分析, 为未来大规模岩土工程建设和城市防灾减灾的相关分析提供借鉴。

关键词: 三维地质建模; 有限元建模; 虚拟钻孔; Python; 反距离加权插值法; 克里格空间插值法

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)02-0334-08

Fast Finite Element Modeling Based on Geological Data of 3D Visualization Platform

ZHENG Liangyu¹, LI Jia¹, CHEN Xi¹, CHEN Miao¹, MU Shuhuai²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering CO., LTD., Langfang 065000, China)

Abstract: With rapid developments in computer visualization and numerical analysis, 3D geological modeling and finite element analysis have been widely applied to geotechnical engineering. The logical connection between 3D geological modeling and finite element modeling, however, hasn't been exploited efficiently, leading to a high workload and low modeling efficiency. Towards the problem, a fast finite element modeling method based on 3D geological survey data platform was developed. Based on limited boreholes and non-uniform data of boreholes, a visualization platform for strata modeling was established using Python programming language. In more detail, the inverse distance weighted (IDW) interpolation method and the Kriging method were employed to identify the interfaces of soil layers, and then the topological relations between these interfaces were analyzed and optimized. With the aid of the concept of virtual boreholes, a data extraction method was proposed to con-

* 收稿日期: 2020-08-01; 修回日期: 2020-11-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178309)、国家级大学生创新创业训练计划项目(202010004084)资助

作者简介: 郑良玉(1999—), 女, 研究助理, 本科。主要从事岩土工程三维可视化技术研究。

E-mail: 17231270@bjtu.edu.cn

通讯作者: 陈曦(1977—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事计算岩土力学、岩土工程风险方面的研究。

E-mail: xichen.geo@gmail.com

vert the regional data of the 3D stratigraphic model into executable files of different commercial finite element software. Taking Plaxis-3D as an example, rapid finite element modeling and analysis for different partitions of the same large-scale site were accomplished, illustrating that the presented finite element modeling technique is promising and shall be a future trend in disaster prevention and mitigation of geotechnical engineering.

Keywords: 3D geological modeling; finite element modeling; virtual borehole; Python; IDW; Kriging

0 引言

近年来,我国岩土工程建设和交通基础设施建设发展迅速。而即使在城区,也因地质条件多变、地层区域差别显著、岩土材料参数不确定性强等因素,给设计和数值建模分析带来诸多困难。

目前,国内外三维地质建模软件开发及其在各行业的应用已趋成熟^[1-2],国外有 Petrel、Surpac、VisualModflow、Go CAD^[3]等软件,我国研发的“深探”、3DMine、Visual Geo、Map GIS^[4]等在油气勘探、矿山开采、水文地质、地质调查等领域也得到了应用。三维有限元分析在岩土工程建设和城市防灾减灾中发挥了巨大作用,如胡田飞等^[5]利用 MIDAS GTS 的地质生成器 TGM 实现复杂边坡的三维几何可视化,再利用 Excel 实现数据转换并导入 FLAC^{3D} 进行大变形计算;黄仁杰等^[6]利用 Surfer、ANSYS 软件建立某高速公路隧道大型溶洞区的山体三维实体模型,再采用 FLAC^{3D} 对该复杂地质构造中地下洞室的稳定性进行分析。目前,三维地质模型平台与有限元软件相对独立,各自平行发展,未形成更加高效的衔接。此外,部分三维地质模型平台也没有实现地块截取功能以及相应数据导出功能,为进一步基于地块和地层的数值分析带来了不便。

针对上述问题,采用 Python 语言及 Mayavi 库开发了基于有限和非均布分布钻孔数据的三维地勘数据可视化平台。通过两种互补的空间插值法,即反距离加权插值法(IDW)和克里格(Kriging)空间插值法实现对导入钻孔数据的内插填补,模拟出整个场地的地层层间分界面,并进行拓扑关系分析和优化。由于整个场地的实际钻孔数量有限,截取的地块中钻孔数量更为有限,为了在数值软件中实现对地层变化更好的模拟,在导出地块数据时也根

据需要导出足够的虚拟钻孔及数据,存储为数值软件建模所需要的输入文件格式。下面以 Plaxis 3D 为例展示三维地质建模平台与岩土工程有限元软件的有效衔接,进而实现快速建模和快速分析、减少重复性工作和提高建模效率的目的。

1 自开发三维地勘数据可视化平台

图 1 为基于有限非均布钻孔获得大型场地三维地层模型的具体流程。其中,可通过 IDW 或 Kriging 以及不同钻孔同一土层顶面和底面标高计算获得地层分界面;可任意截取场地中地块、生成该地块内的虚拟钻孔并导出为 Plaxis 3D 地层模型输入文件。可见,如何高效衔接三维地质建模和有限元建模为本文建模方法的难点及创新点。

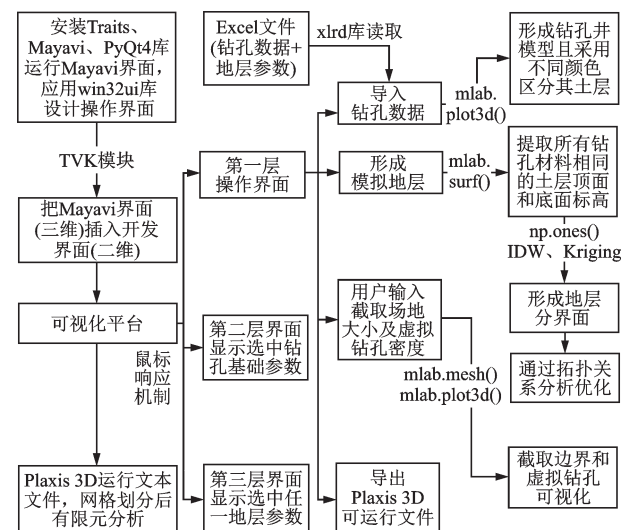


图 1 三维地勘数据可视化平台开发流程

Fig.1 Development flowchart for visualization platform of 3D geological data

所开发平台界面如图 2 所示,包括声明区、操作区和图像显示区三个区域,其中图像显示区为内嵌的 Mayavi 可视化界面,可实现对整个场地的翻转查看。

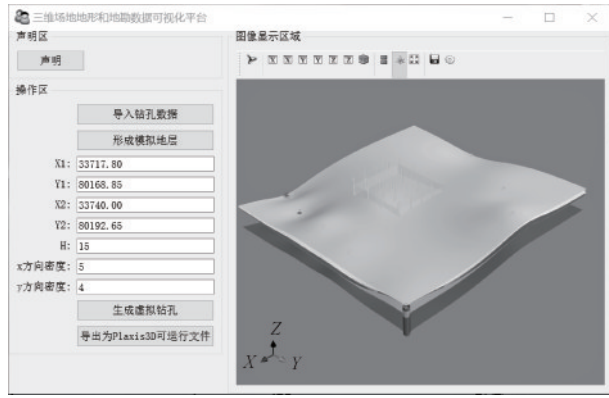


图2 可视化平台用户操作界面

Fig.2 GUI of the visualization platform

整个开发过程充分利用了Python丰富的第三方库和开源性,挖掘出win32ui和Mayavi的mlab模块在三维界面设计和三维绘图方面的优势,展示了Mayavi在地质地层信息可视化方面的应用效果。该平台简单易用、可扩展性强,为进一步开发钻孔数据和土层材料参数的统计分析提供了基础平台。

2 地层分界面建模

2.1 钻孔数据提取及可视化

基于Python的xlrd库读取Excel文件,该文件

sheet1表单存储钻孔数据(见表1),其中 $H_i(i=1,2,3,\dots)$ 表示该钻孔第 i 层土(T_i)的下底面标高;sheet2存储地层土性参数(见表2)。经过一系列字典、列表的变换,获得构建整个地层分界面的基础数据。进而,应用函数`mlab.plot3d()`绘制三维钻孔并获得`color`参数设置,完成钻孔的可视化并为每种土层配置不同颜色,如图3所示。可见,Mayavi三维可视化效果和颜色渲染良好,鼠标点击任一钻孔可查询该钻孔信息,展示了三维地质建模的直观性和可交互性。

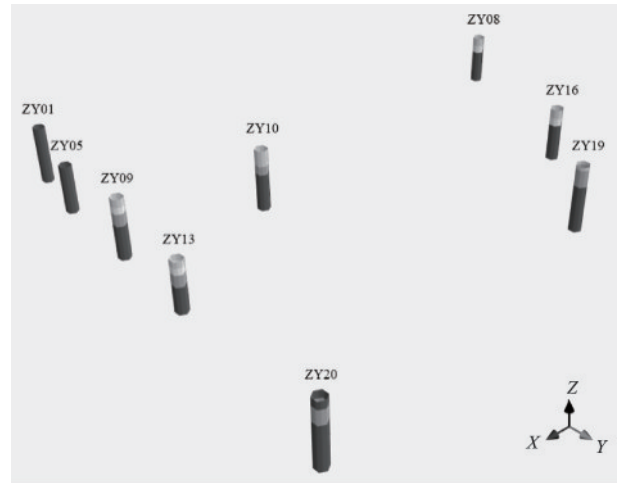


图3 钻孔可视化和土层颜色渲染

Fig.3 Visualization of boreholes and rendering of soil layers

表1 钻孔列表

Table 1 List of boreholes

单位:m

钻孔编号	钻孔深度	孔口高程	坐标		T1	H1	T2	H2	T3	H3	T4	H4
			x	y								
ZY01	10.40	887.56	33 751.09	80 139.50	砂岩	877.16	—	—	—	—	—	—
ZY05	8.30	891.12	33 757.61	80 158.22	砂岩	882.82	—	—	—	—	—	—
ZY08	8.40	892.00	33 680.63	80 174.60	素填	890.60	粉黏	889.30	砂岩	883.60	—	—
ZY09	10.10	896.81	33 761.91	80 178.79	素填	895.51	粉粘	894.41	泥岩	892.41	砂岩	886.71
ZY10	10.20	897.12	33 740.00	80 183.38	素填	894.52	泥岩	893.12	砂岩	886.92	—	—
ZY13	8.40	897.45	33 765.37	80 196.66	素填	896.45	粉黏	895.35	泥岩	893.45	砂岩	889.05
ZY16	8.40	899.61	33 703.92	80 208.78	素填	898.21	粉黏	897.01	砂岩	891.21	—	—
ZY19	10.30	902.06	33 717.94	80 223.27	素填	901.56	粉黏	898.96	砂岩	891.76	—	—
ZY20	10.50	900.00	33 771.71	80 229.36	砂岩	898.80	泥岩	896.50	砂岩	889.50	—	—

表2 地层及其土性参数

Table 2 Soil layers and the corresponding soil properties

材料名称	天然重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
粉质黏土	19.56	20.69	9.88E-08	38.56	0.35	19	14
泥岩	22.73	22.94	1.78E-08	78.89	0.39	35	21
砂岩	21.5	21.82	2.50E-06	102.42	0.27	60	30
素填土	18.82	20.23	6.00E-05	23.78	0.32	18	10

2.2 空间插值法对比

钻孔数据具有直观性、准确性、详细性和多尺度性等特点,是三维地质建模中最常用的数据来源,因其获取成本相对较高,钻孔在空间上表现出有限、离散、稀疏、分布不均等特点。

空间插值就是将离散分布的钻孔勘查数据转换为连续的地质体曲面数据。目前IDW和Kriging应用较为广泛,但两者的精确性和适用范围不同。在数据量大且分布较均匀的情况下,IDW法可以得到较平滑的等高线;在数据分布不均匀、地质条件复杂的情况下,Kriging法恢复曲面较为合理^[7]。普通克里格法(Ordinary Kriging,简称OK法)精度高、适用性强,可准确地揭示出地层空间发育分布规律,目前使用最多^[8]。

为满足不同建模需求,基于所开发平台,允许单独选择IDW或OK空间插值法或组合使用两种方法。缺省选项为组合使用两种方法,即在钻孔密集区通常选用IDW法,而在钻孔稀疏区或有特殊构造如风化带、溶洞等区域倾向选择OK法。

2.3 单个地层分界面模拟及可视化

利用numpy库中函数np.ones()构建一个二维矩阵 Z , $Z[s][t]$ 为其第 s 行第 t 列储存的高程值。为捕捉土层间更加精确的起伏变化,相邻两行或两列(即 x 或 y 方向)的差值均为0.1 m。

应用IDW法时,以粉质黏土层的上顶面为例,将提取的所有钻孔对应该层的上顶面标高插入矩阵对应位置,如ZY13: $Z[847][571]=896.45$ m。再把这些已知点三维坐标 (s_i, t_i, Z_i) 和高程矩阵的其余未知点的 (s, t) 坐标代入式(1),可获得插值点高程:

$$Z[s][t] = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{|d_i(s, t)|^\beta}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{|d_i(s, t)|^\beta}} \quad (1)$$

式中, β 为幂参数,一般取值为 $\beta=2$,幂参数越大,内插值越接近最近采样点的值; d_i 为第 i 个已知点到插值点的距离,其计算如下:

$$d_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2)$$

再利用mlab模块中的函数mlab.surf()完成该高程矩阵的可视化,如图4所示,钻孔中白色层即为粉质黏土层。

Kriging法相对复杂,但Python本身已有较为成

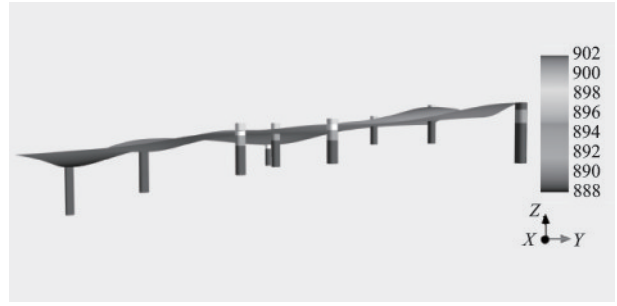


图4 IDW法粉质黏土层上分界面可视化

Fig.4 Visualization of the upper interface of silty clay layer by IDW method

熟的Kriging第三方集成库。本文运用了OK库中的函数OrdinaryKriging()、execute()进行高程矩阵的未知点计算,初始可视化效果如图5所示。再不断将先计算出的高程点加入OK模型训练,用以提高模型的精确性。



图5 OK法初始粉质黏土层上分界面可视化

Fig.5 Initial visualization of the upper interface of silty clay layer by OK method

IDW法与OK法获得的地层分界曲面分别以黄色和蓝色显示,如图6所示。可以看出,钻孔密集区与稀疏区,IDW法与OK法的适用效果不同,上下相对位置颠倒。



图6 IDW法与OK法所得地层分界曲面对比

Fig.6 Comparison of stratigraphic boundary surfaces obtained by IDW method and OK method

2.4 地层分界面间拓扑关系分析及优化

以IDW法为例,引入多层DEM建模概念^[9],重复2.3节过程建立多个高程矩阵,模拟出所有地层的上、下分界面。由于钻孔数据本身的有限、离散、稀疏、分布不均匀等特性,不同地层仅上分界面间就可能存在交叉、重叠等情况,如图7所示。由表1可知,模拟地层分界面时会涉及地层的尖灭(如ZY08缺失的泥岩层、ZY10缺失的粉质黏土层)、夹层(如ZY20的两层砂岩中间的泥岩层)等问题,仅靠有限钻孔数据进行IDW插值计算通常不够准确。

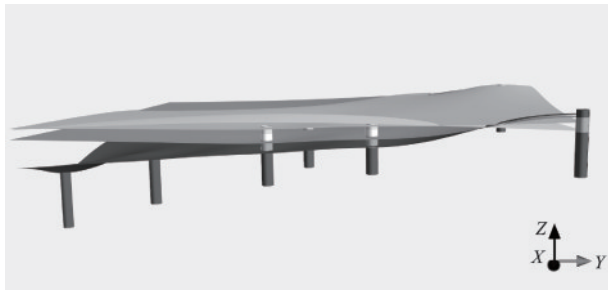


图7 拓扑分析优化前多层地层分界面可视化

Fig.7 Visualization of soil layer interfaces before topological optimization

拓扑表是地质对象间关系的表格,存储着层位间上覆、下伏和交切等的地层学关系及地质空间位置关系。基于拓扑关系分析,进行地层排序和钻孔数据预处理^[10],可有效解决上述问题。通过比对找到地层最为完整的钻孔ZY09,根据其地层排序,将其他缺失地层的钻孔补全,即在相应层序上插入厚度为0的缺失地层;当钻孔中存在多层同一性质土层(如ZY20中的砂岩层)时,则砂岩层上、下分界面模拟在取该钻孔已知点高程 Z_i 时分别取其第1层顶面和第3层底面标高,即可完成泥岩夹层的模拟。拓扑关系优化后的多层地层上、下分界面可视化如图8所示。

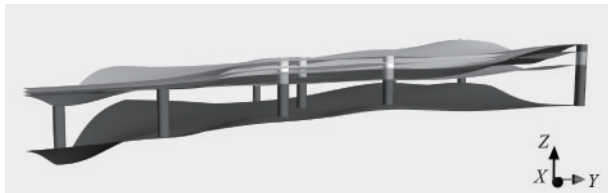


图8 拓扑分析优化后多层地层分界面可视化

Fig.8 Visualization of soil layer interfaces after topological optimization

3 与常用数值软件的有效衔接

基于所开发平台创建整个大型场地的三维地层模型后,如何从中任意截取地块并创建数值(网格)模型,以实现地勘模型与数值建模的高效衔接,是本文重点研究的问题。

两模型的转化主要分为两步:一是地质模型截取及数据输出;二是将输出数据转化为数值软件建模的输入格式。目前如理正勘察三维地质软件^[11]、苍穹地质三维建模平台等可实现地质建模,但其主要功能仍为三维建模及展示,输出数据也多为钻孔柱状图、剖切图等图表格式。近年来,一些数值软件开始提供能够直接导入的模型或数据文件格式(见表3),以便适应快速建模需要。但如何从地质模型向数值模型高效转换,目前还少有研究。针对上述问题,本文提出了一种三维地质建模平台与岩土工程领域常用商业数值建模软件的有效衔接方法,如图9所示,其核心概念为虚拟钻孔和编程转化命令文件。

表3 各种数值分析软件的导入文件格式

Table 3 File format which can be imported into some common numerical analysis software

常用岩土工程数值软件	可直接导入识取的文件格式 (除其本身输出文件外)
Abaqus	*.cae、*.inp、*.pes等
Ansys	*.igs、*.sat、*.txt、proe文件、UG文件等
Midas GTS	*.dxf、*.dwg、*.mxt、*.fpm、*.txt等
FLAC ^{3D}	*.txt、*.dat、*.csv等
Plaxis 3D	*.step、*.stp、*.dxf、*.brep、*.log、*.txt等

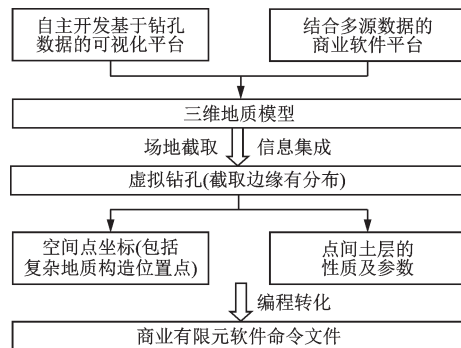


图9 模型转化与接口衔接方法

Fig.9 Method of model transformation and connection

由于真实(物理)钻孔数量有限,本文提出虚拟钻孔的概念。虚拟钻孔是在基于真实钻孔等数据

模拟的三维地层模型截取地块上取平面坐标所得,可均布获取,并自定义密度。通过虚拟钻孔,能够获得截取地块的所有地质要素信息,并还原出土层间起伏变化、复杂地质构造等。虚拟钻孔数据存储格式为其与各地层分界面交点的三维坐标和交点间的土层性质及参数,结构简单、转化便捷。

目前,常用数值建模软件一般都在主界面设置有命令行区域,显示出用户每一操作的内置命令。软件多可直接导入包含多条命令的*.txt文件(见表3),如FLAC^{3D}为采用命令驱动数值建模软件。例如,赵文等^[12]借助Matlab强大的矩阵功能和Surfer强大的插值功能,通过编程将CAD包含三维坐标信息的*.dxf文件转化为FLAC^{3D}的cell命令语言,实现复杂三维地质体建模。

基于虚拟钻孔的数据结构以及数值建模软件的内置命令,将虚拟钻孔数据编程转化、存储为所采用数值建模软件的内置命令行*.txt文件。该衔接方法具有较强的可操作性和通用性。

以所开发平台与Plaxis 3D的衔接为例,基于“真实钻孔—虚拟钻孔—Plaxis 3D钻孔”思路,基于Plaxis 3D内置命令导入土层材料并创建钻孔,通过Python编程实现了数据转化,并将该功能集成到开发平台。

4 Plaxis 3D 应用实例

4.1 地块截取及虚拟钻孔

以IDW法为例,输入预截取地块的平面矩形对

角线的平面坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 以及深度 h ,并给出虚拟钻孔在 x, y 轴方向上的密度 m, n ,且限制 $m \geq 2$ 和 $n \geq 2$,再利用mlab模块中的函数mlab.plot3d()和mlab.mesh()便可完成虚拟钻孔和截取边界的可视化。调整函数内置的opacity参数即设置透明度,为了不影响用户对实际钻孔和地层分界面的观察,使虚拟钻孔比最上层地层分界面的最高点 Z_{max} 高5 m。在截取矩形区域内均匀设置虚拟钻孔,并导出获得其与各地层分界面的交点数据。同一大型场地可任意截取所需要的地块,截取地块不同,导出虚拟钻孔后转化的有限元模型也不同,可满足工程师对大型工程涉及地区内不同地块的分析需求。如图10所示,在包含9个真实钻孔的 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 的大型场地截取3个 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的重点关注地块,具体截取地块见表4。

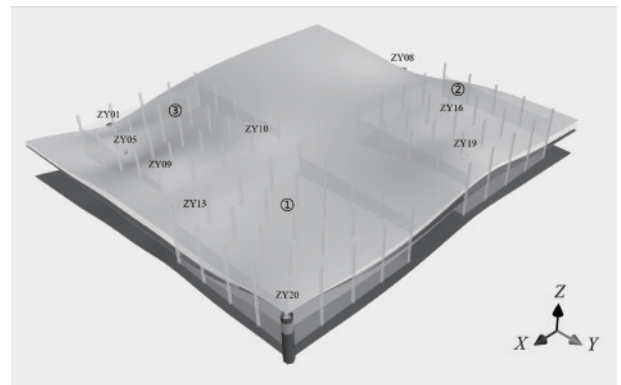


图10 场地截取及虚拟钻孔可视化

Fig.10 Visualization of virtual boreholes in an intercepted region

表4 同一大型场地截取不同地块的特点

Table 4 Characteristics of different partitions of the same large site

截取地块	截取地块 (截取矩形对角线坐标)	设置深度	虚拟钻孔密度	包含钻孔	分析需求
1	(33 741.71, 80 199.36), (33 771.71, 80 229.36)			ZY20(3层,中间泥岩,上下两层砂岩)	地层夹层
2	(33 695.00, 80 199.36), (33 725.00, 80 229.36)	8	5×5	ZY16, ZY19(都为3层,中间层不同:一为粉质黏土,一为泥岩)	地层尖灭(不同方向趋于消失的地层不同)
3	(33 735.00, 80 155.00), (33 765.00, 80 185.00)			ZY05(1层砂岩), ZY09(4层完整), ZY10(缺少中间层粉质黏土)	地层尖灭(单一方向多层地层趋于消失)

4.2 编程转化命令文件

岩土工程有限元软件Plaxis 3D可通过钻孔模

拟复杂地质条件,能通过本文建立的地质模型平台快速生成数值模型,进而开展岩土体受力变形、稳定性和渗流等分析^[13-14]。

表5为Plaxis 3D内置参考命令,可将虚拟钻孔平面坐标、其与地层分界面交点高程 H 以及土层材料参数等数据通过地质模型平台转化为Plaxis 3D可运行命令的文本文件,如GeoData.txt。

设置模型平面范围为 $0 \sim |x_1 - x_2|, 0 \sim |y_1 - y_2|$, 原交点高程 H 统一换算为:

$$H' = H - (Z_{\max} - h) \quad (3)$$

式中, Z_{\max} 为所有地层分界面的最高点高程值; h 为截取地块的深度。

导入不同土层材料参数时,部分参数可通过导入参数计算补充,例如,剪切模量 G 可通过杨氏模量(垂直方向的弹性模量) E 和泊松比 ν 按下式计算:

$$G = E / [2(1 + \nu)] \quad (4)$$

在Plaxis 3D中截取地块导出的*.txt文件,可立即导入大量钻孔信息,快速生成地质体,如图11所示。图11(a)为地块1,两层砂岩(红色)中间的泥岩层(蓝色)在 Y 方向上中间有明显的变薄过渡;图11(b)为地块2, X 方向上有粉质黏土层(白色)的尖灭, Y 方向上有泥岩层的尖灭;图11(c)为地块3, XY 方向上有素填土层(黄色)、粉质黏土层、泥岩层三层的尖灭。

基于Plaxis 3D内置的三维四面体单元类型,对导入的三个地块地质体进行有限元网格划分,如图12所示。本文算例中,Plaxis 3D读取单个地块文本

表5 Plaxis 3D内置参考命令
Table 5 Built-in commands of Plaxis 3D

序号	Plaxis 3D 2017	Plaxis 3D CE V20	说明
1	_initializerectangular SoilContour 0 0 *x *y		设置模型平面规模: $0 \sim *x, 0 \sim *y$
2	_soilmat "Comments" "" "MaterialName" "*name" "Colour" *colour "MaterialNumber" 0 "Einc" 0 *G *v *phi *c 0 0 0 0 *gamma_sat *gamma_sat 0 *kz 0 0		新建材料: *name(命名), *colour(配色), *G(剪切模量), *v(泊松比), *phi(内摩擦角), *c(粘聚力), *gamma_sat(天然重度), *gamma_sat(饱和重度), *kz(纵向渗透系数)
3	borehole *x *y		新建钻孔: *x(钻孔x轴坐标), *y(钻孔y轴坐标)
4	soillayer 0		新建钻孔土层
5	setsoillayerlevel Borehole_ _set Soillayer_*n2.Zones[*n1]. *n1 *n2 *h	Top/Bottom *h	设置钻孔土层的顶部/底部标高: *n1(第i个钻孔), *n2(第i层土), *h(第i层土顶部标高)
6	_set Soillayer_*n1.Soil.Material *name		设置土层的材料性质: *n1(第i层土, $i=1, 2, \dots, n$), *name(第i层土材料名字)

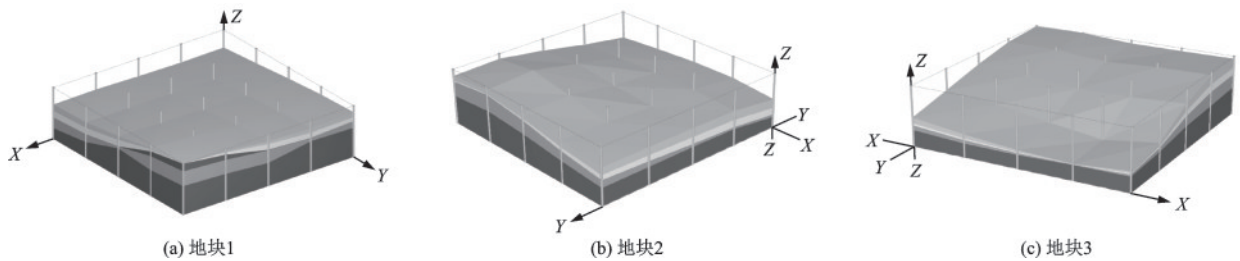


图11 Plaxis 3D运行三地块导出文本文件后生成的地质体模型

Fig.11 Geological body model generated by importing the *.txt file of the three selected areas into Plaxis 3D

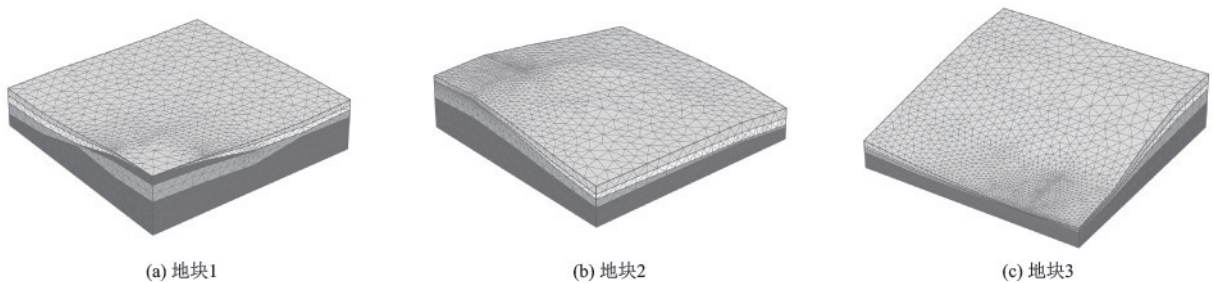


图12 截取三地块地质体有限元网格划分

Fig.12 Finite element meshes of geological bodies of the three selected areas

文件,该文件包含25个虚拟钻孔和4种土层材料、200余行命令,导入时间约为1.5 min左右。而同等数量的钻孔,手动创建钻孔则需要大量时间且容易出错。当需要进行多地块建模时,自动导出地块并创建数值模型的优势将更加明显。由此可知,采取地块自动截取和快速有限元建模方法,可减少大量重复性工作,是未来岩土工程防灾减灾的发展趋势。

5 结 语

以自开发的三维地勘数据可视化平台和Plaxis 3D的衔接为例,演示了三维地质模型向有限元模型转换的可行性,并得出以下结论:

(1)基于Python开发了地质建模平台,并利用Mayavi第三方库实现了三维地质建模的直观性和可交互性,该平台具有良好的扩展性。

(2)IDW法和Kriging法适用范围不同,组合使用两种方法能够实现多地层间拓扑关系优化,保证三维地层建模的精确性。

(3)重点演示了三维地质建模平台与常用数值分析软件的有效衔接,在截取地块中生成虚拟钻孔,导出数值软件所需内置命令文件。以Plaxis 3D为例,证实了方法的可行性。三维地质建模平台与常用数值分析软件的有效衔接能够显著减少有限元建模时间。

(4)未来城市防灾减灾将采用统一地质平台,允许按需要截取地块,快速生成有限元等模型并开展有限元分析和预测,本文研究方法可为城市防灾减灾提供参考。

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.
Li Q Y, Zhang L Y, Cao D Y, et al. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 759-767. (in Chinese)

[2] 孙文洁,杨文凯,王子超,等. 三维数值建模在地质工程综合设计中的应用[J]. 煤炭工程, 2019, 51(11): 120-122.
Sun W J, Yang W K, Wang Z C, et al. Application of

three-dimensional numerical modeling in simulation and comprehensive design of geological engineering [J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 120-122. (in Chinese)

[3] 范文遥,曹梦雪,路来君. 基于GOCAD软件的三维地质建模可视化过程[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24):9771-9778.
Fan W Y, Cao M X, Lu L J. Visualization process of 3D geological modeling based on GOCAD software[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24): 9771-9778. (in Chinese)

[4] 许珂,徐亚杏. 基于MapGIS-K9软件的城市三维地质建模方法探讨——以武汉市为例[J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(3):244-252.
Xu K, Xu Y X. Discussion on urban three-dimensional geological modeling method based on MapGIS-K9 software: a case study of Wuhan[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2018, 34(3): 244-252. (in Chinese)

[5] 胡田飞,刘建坤. 复杂边坡三维地质建模技术及稳定性分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 580-587.
Hu T F, Liu J K. Three-dimensional geological modeling technology and stability analysis method of complex slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4): 580-587. (in Chinese)

[6] 黄仁杰,余再富,李元松,等. 太平隧道大型溶洞的三维地质建模方法研究[J]. 路基工程, 2020(1): 170-173.
Huang R J, Yu Z F, Li Y S, et al. Study on three-dimensional geological modeling method of large karst caves in Taiping Tunnel [J]. Subgrade Engineering, 2020(1): 170-173. (in Chinese)

[7] 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.
Liu L, Yang Z. Comparison of spatial interpolation methods for 3d geological modeling based on borehole data[J]. Energy Technology and Management, 2019, 44(3): 162-164. (in Chinese)

[8] 刘晓磊,赵志峰,周玉明,等. 滨海地基土层的空间插值分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 794-801.
Liu X L, Zhao Z F, Zhou Y M, et al. Spatial interpolation analysis of coastal foundation soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 794-801. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)

(下转第386页)