

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.03.032

3D GIS 与有限元模拟无缝耦合方法 及其在隧道工程中的应用研究

刘振平¹, 刘 建¹, 何雨微², 贺怀建¹, 卞 康¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 湖北武穴长江公路大桥有限公司, 湖北 武穴 435400)

摘 要: 为实现数值模拟获得的各种场数据与 GIS 空间信息的综合集成, 有必要对 GIS 中融合有限元数值计算的方法开展研究。本文采用 GRASS GIS、VTK 等开源软件, 通过 Python 语言建立了 GIS 与有限元模拟的复合系统开发框架, 针对隧道开挖编写了 3D GIS 与有限元数值计算无缝耦合分析程序 (3DPyGisTFEM)。给出了由中心线上多条轮廓线生成隧道模型的算法, 提出了对各地层 DEM 与隧道模型进行剖切运算获得隧道开挖地质剖面的方法。引入 Delaunay 网格剖分算法, 对 GIS 中 TIN 模型不断改良, 获得了适合有限元模拟的地质剖面三角形网格。基于多个剖面计算结果, 运用插值手段, 形成研究区域场数据, 结合 GIS 空间分析方法, 对场数据分布规律进行综合分析, 实现了 GIS 与有限元的无缝耦合。黄家寨隧道工程实例表明, 相对坡度、隧道中心线缓冲区等因素, 地表距隧道拱顶高差的空间分布特征与地表沉降规律相关性更强。

关键词: 有限元法; 地理信息系统; Delaunay 网格剖分算法; 无缝耦合; 隧道工程

中图分类号: O 242.21; U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 03 - 0866 - 10

Seamless coupling of 3D GIS techniques with FEM and its application to tunneling engineering

LIU Zhen-ping¹, LIU Jian¹, HE Yu-wei², HE Huai-jian¹, BIAN Kang¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Hubei Wuxue Yangtze River Highway Bridge Co., Ltd., Wuxue, Hubei 435400, China)

Abstract: For the integration of GIS spatial information and a variety of field data obtained by numerical simulation, FEM (finite element method) is necessary to be combined with GIS. To improve the efficiency of system development, the open source softwares, such as GRASS GIS and VTK, are used to establish complex system development framework combining FE simulation and GIS by Python language. The platform named 3DPyGisTFEM enables seamless coupling between FE calculation and 3D GIS for tunneling analysis. Moreover, the algorithm of tunnel model generation connects a series of contour lines with tunnel center lines. The geological sections of tunnel excavation can be obtained by cutting operation on different strata layer DEMs and tunnel models. The triangular meshes for finite element simulation introduced by Delaunay mesh generation algorithm improve TIN model of GIS. The field data of research area are generated by interpolation of multiple geological sections simulation results from FEM. Then, the seamless coupling method with FEM in GIS is realized through comprehensive analysis of field data using GIS spatial analysis methods. The Huangjiashai tunnel engineering example shows that the ground surface elevation from tunnel crown has greater influence on surface settlement than other factors, such as relative slope, buffer and etc.

Keywords: FEM (finite element method); 3D GIS (three dimensional geographic information system); Delaunay mesh generation algorithm; seamless coupling; tunneling engineering

收稿日期: 2016-05-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0401802); 国家自然科学基金重点项目 (No.51539002); 国家自然科学基金青年基金项目 (No.51204158, No.51209198)

This work was supported by the National Key Research and Development Project (2016YFC0401802), the Key Program of National Natural Science Foundation of China (51539002) and the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (51204158, 51209198).

第一作者简介: 刘振平, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程地质灾害评价与 3D GIS 可视化技术的研究工作。E-mail: liuzhenping_2000@163.com

1 引言

有限元数值计算和模拟是岩土工程和地质灾害评价的常用手段,其核心思想是确定研究区域形状并进行离散化,即网格剖分。然而,在进行有限元分析时,有50%或更多的时间和资金是用在输入数据的准备和检查上^[1]。为提高建模效率,具有强大空间数据处理、分析以及可视化功能的地理信息系统 GIS (geographic information system) 被引入到岩土工程问题分析与数值模拟计算中^[2-6]。为充分发挥数值模拟获得的各种场数据与 GIS 空间信息综合集成的显著优势, GIS 与有限元数值计算耦合方法成为一个亟待解决的科学问题。

将 GIS 与数值模拟进行耦合,主要有两种形式,一种是松散耦合方法;另一种是无缝耦合体系。前者是将 GIS 平台作为一个建模与分析的工具,而计算则通过第3方专业模拟软件来完成;后者则是直接将 GIS 植入到专业软件中,构成一体,形成专业的数值模拟 GIS 软件,但实现起来非常困难^[7],因此,实际研究中大都采用前一种形式。如 Rienzo 等^[8]通过 3D GIS 软件建立了三维工程地质模型来对城市地下构筑物设计等进行优化,借助 FLAC 模拟计算软件,实现了对地铁开挖地表沉降量的预测,通过与实测的盾构开挖能量值对比,验证了基于 3D GIS 工程地质模型的有效性。Chungsik 等^[9]基于 ArcGIS 平台针对城市地铁线建立分析模型,借助 FLAC 计算软件以及神经网络智能方法,实现了地表沉降、建筑物变形等的评价与预测。王永志等^[10]基于 3D GIS 提出了一种盐腔围岩三维计算模型生成方法,并将其导入 FLAC^{3D} 软件对 10 a 后的三维空间蠕变情况进行数值模拟。吴江斌等^[11]采用 Delauney 四面体化算法构建三维地层,提出了地层的真三维四面体模型,通过四面体改良算法 (refine algorithm) 获得的地层四面体网格可用于数值计算。徐帮树等^[12]提出基于栅格的六面体有限元网格生成和基于 TIN 的三棱柱有限元网格生成,并利用 ArcGIS9.0、Ansys7.0 实现有限元网格自动生成。许冲等^[13]基于 ArcGIS 和 FLAC^{2D} 软件,结合编程技术将两者集成,实现了剖面自动生成和 FLAC^{2D} 计算数据前处理功能。王涛等^[14]在通过 RS/GIS 技术从宏观上对滑坡危险区域进行识别基础上,采用 FLAC^{3D} 软件从微观上对区域内局部危险边坡稳定性进行数值模拟;对于后一种无缝耦合形式,也有学者进行了一些初步尝试。如王纯祥等^[15]通过提出

的 L-W 拓扑模型 (local-whole topological model, 即 LWTM), 确定地层与开挖洞室形状的关键点,实现了三维地层信息系统中可视化网格与有限元分析网格的转化。刘汉龙等^[16]给出了一种用于地下开挖地表沉陷计算和岩土体应力分析的方法,即有限层法,并对该方法与 GIS 集成中的数据模型和数据组织方法进行了探讨。黄河等^[17]结合有限元分析,综合应用并行计算方法,以 GIS 三维地层信息为基础,提出并建立自主知识产权的基于 GIS 的并行有限元演化智能集成分析系统 IGIACS,提高岩土工程数值计算的速度与精度。并对龙滩水电工程左岸高边坡开挖过程进行数值计算。还有一些学者也在 GIS 与有限元数值计算方面开展了相应的研究工作,限于篇幅,这里不一一列举。

3D GIS 与有限元模拟的无缝耦合体系避免了数据在不同软件平台中的传输,具有相同的数据模型与数据结构,在系统集成灵活性、计算效率等方面优势显著。然而,此方面的研究目前尚不成熟,尤其是在地下空间开挖模拟方面。笔者认为,主要有两方面原因:首先,3D GIS 模型主要用于地理制图与空间分析,其网格不同于有限元模拟中的单元,不能直接用于数值计算;其次,系统或者从底层开发或者采用商业 GIS 软件为开发平台,开发效率较低,而且二次开发的灵活性较差。

鉴于此,本文将探索一种更加高效的系统集成方法,并基于开源地理信息系统 (GRASS GIS) 与网格剖分算法,对 3D GIS 与有限元数值计算无缝耦合方法及其在隧道开挖中的应用开展研究。

2 GRASS GIS 与有限元无缝耦合系统的实现

2.1 开源地理信息系统 (GRASS GIS)

GRASS GIS (geographic resources analysis support system 地理资源分析支持系统)是开源平台下一个重量级的 GIS 软件。起初在美国军方建筑工程研究实验室 (USA/CERL) 被开发出来,主要用于军事上的土地管理和环境规划^[18]。截至 2016 年 5 月,最新发布版本为 GRASS 7.0.4。基于 GRASS 开源的特点,用户可以直接得到相应的源代码,并根据各自的工作需要开发对应的功能^[19]。还能够对其官方发布的模块进行修改和添加,并将新的功能整合到最新的版本中,供学生、科研人员以及其他用户使用。同时,GRASS 采用简单实用的 Python^[20]作为其主要开发语言,进一步提高了它在研究、应

用中的通用性。除此之外,根据功能的灵活性对 GIS 软件进行等级划分,GRASS 属于最高级别^[21]。因此,本文基于 GRASS GIS 开展与有限元数值计算无缝耦合方法的研究。

2.2 复合系统开发框架

建立以 Python 语言为粘合剂的复合系统开发体系,框架如图 1 所示。一方面,采用 Python 语言编写对计算效率要求不高或者对系统工作流程进行控制的常规性程序;另一方面,通过编写接口程序对系统中各种模块进行调用和有序粘合。在所调用的模块中,首先是 Python 自带的内置函数库,如:适合于科学计算的 Scipy 模块、矩阵分析 Numpy 模块以及用于绘图的 matplotlib 模块等;其次,通过 wxPython 库与简单的 Python 程序可以实现任意复杂的程序界面;再次,采用 SQL Server 或者 PostgreSQL 数据库对模型几何、属性等信息进行存储,并通过 Python 对各种数据库进行管理与操作;接着,采用开源、免费的 VTK (the visualization toolkit) 作为主要的可视化技术开发接口^[22]。为方便 Python 程序调用,直接选择对 VTK 进一步封装后的 vtkpython 模块,通过其提供的重要算法,不仅可以实现三维模型的空间展布,还能够对各种数据集进行几何运算;然后,对于大量数据的操作,如系统数据结构模型、网格剖分、有限元数值计算以及 Kriging 插值等,为提高计算效率,选择采用 C 或者 C++来编写相应模块,并通过 Swig 或者 Boost 等工具将其转化为 Python 能够直接调用的 pyd 动态链接库;最后,设置 GRASS GIS 环境变量等参数,通过 Python 程序调用其强大的空间数据处理模块。

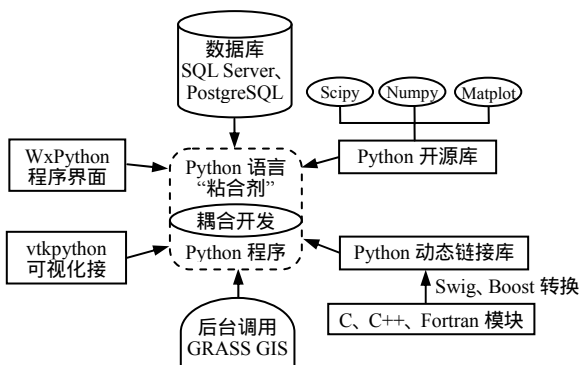


图 1 GRASS GIS 与有限元复合系统开发框架图
Fig.1 Framework for combined GRASS GIS and FEM system

2.3 隧道开挖中 3D GIS 与有限元数值计算无缝耦合分析平台

对于隧道开挖中 3D GIS 与有限元数值计算无缝耦合分析平台,系统需要实现基础数据的整理与

存储、隧道与三维地层建模、基于 GIS 的空间数据分析、数值计算以及可视化显示等功能。因此,耦合分析平台总体结构与详细功能如图 2(a)~(c)所示。

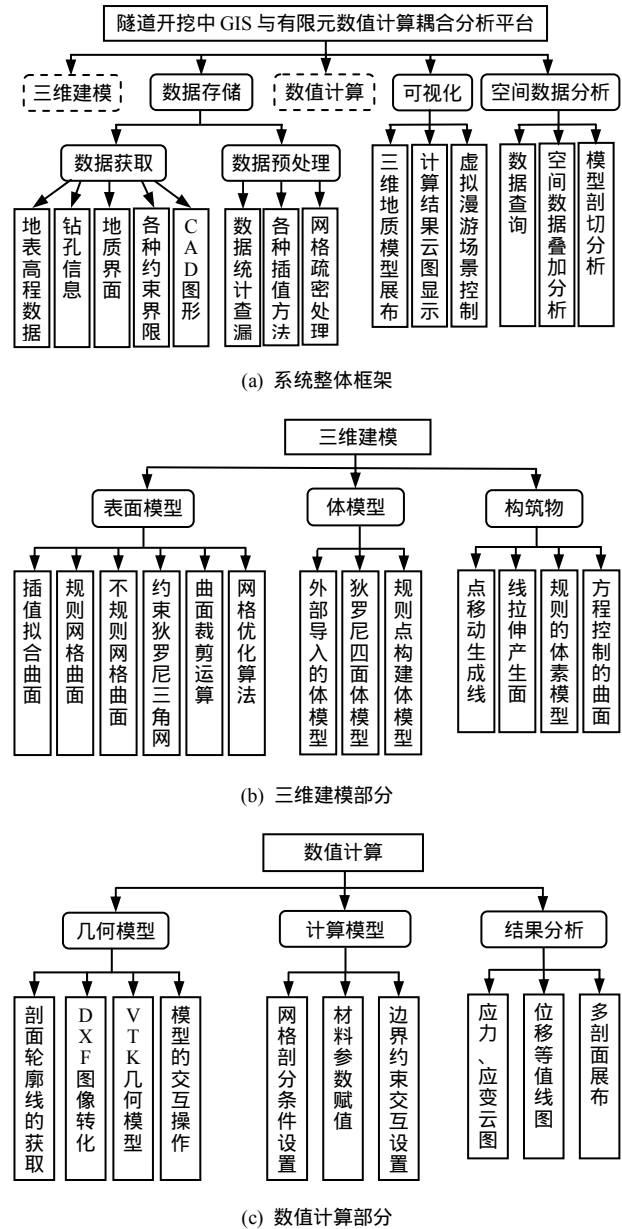


图 2 系统总体结构设计图
Fig.2 Structural designs of the system

3 隧道开挖中 3D GIS 与有限元无缝耦合方法

3.1 三维地层建模方法

为便于地质剖面的生成与提高建模效率,本文主要采用表面模型表达各地层曲面,主要实现步骤如下:

(1) 读取 DXF 文件获得地表高程点,通过插值手段形成地表面 DEM (digital elevation model);

(2) 结合钻孔资料与地质剖面图等，获得各地层界面高程点，并通过插值手段形成各地层 DEM；

(3) 按照各地层地质年代与实际分布规律，对各地层 DEM 相同网格点对应的高程值进行调整，生成各地层最终的 DEM。

3.2 隧道地质剖面的生成

隧道地质剖面由首尾相连的线段构成，主要分为两种，一种是剖切面与各地层切割形成的交线，另一种是剖切面与隧道切割形成的轮廓线，二者结合即为隧道地质剖面。

3.2.1 地层切割线的生成

考虑到操作的便捷性，本文在获得各地层 DEM 基础上，通过 Python 直接调用 GRASS GIS 软件相关模块来实现。假定 Z 轴表示地层曲面高程，剖切面法向与 Z 轴垂直，那么在 XOY 平面内给定任一线段 AB 或者线段顶点 (A 与 B) 坐标 (如图 3 所示，其中栅格单元尺寸为 2 m×2 m，网格中黑体数字表示各栅格高程属性)，即可确定线段范围内的剖切面，进而获得与地层的交线 (如图 4 所示)。主要调用过程如下：

```
grass.scrip.run_command ('r.profile', input=
FileIn,
output=FileOut, coordinates=
overwrite= 'True')
其中 ,grass.script 是 GRASS GIS 软件中 Python
脚本接口。
```

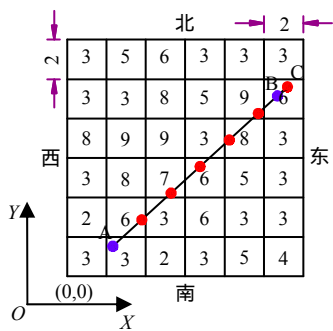


图 3 GRASS GIS 中 DEM 剖面示意图
Fig.3 Sketch map of DEM profile in GRASS GIS

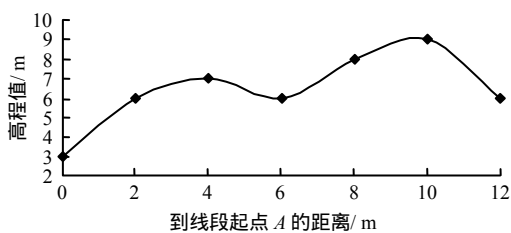


图 4 AB/AC 线段高程剖面图
Fig.4 Elevation section map of segment of AB/AC

3.2.2 隧道模型切割线的生成

为生成隧道模型任意剖面的切割线，一方面要高效地建立隧道模型；另一方面还需实现剖面与隧道模型的剖切运算。

3.2.2.1 隧道模型的建立

首先，根据建模精度在隧道设计平面轮廓线中选取关键点，如图 5 中 A、B、C、D 点；然后，将隧洞拱顶中心线作为隧道模型生成的路径，并将其离散为多线段 (如图 6 所示的 $SA_1A_2A_3 \dots A_n$ 多线段；接着，对图 5 中 XOY 隧道平面轮廓线进行坐标变换，并将其放置在路径各顶点位置。如将图 5 中 ABCD 轮廓线按照向量 AA_1 平移，再通过旋转使 ABCD 平面法向量与 SA_1 一致，进而形成 $A_1B_1C_1D_1$ 。同理，可生成隧道模型的多条轮廓线 $A_2B_2C_2D_2 \dots A_nB_nC_nD_n$ ；最后，对此轮廓线中关键点依次连接并建立拓扑关系，即可形成最终的隧道模型。

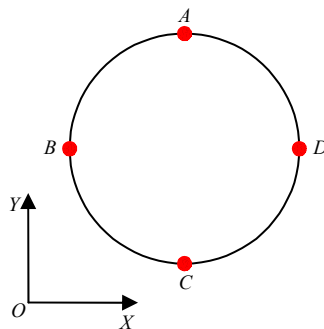


图 5 假设的隧道设计轮廓线平面图
Fig.5 Conceptual tunnel design outline plan

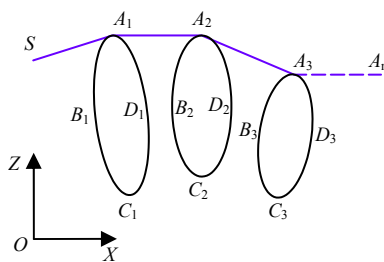


图 6 沿路径平移旋转后轮廓线
Fig.6 Tunnel outlines after translating and rotating in path

3.2.2.2 剖面与隧道模型的剖切运算

通过隐函数的形式来定义剖切面，如 $F(x, y, z) = s$ ，对于某一平面 π 表示如下：

$$F(x, y, z) = A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) \quad (1)$$

式 (1) 是平面点法式表达形式，其中法向量 $n = (A, B, C)$ ，通过空间点 (x_0, y_0, z_0) 。

根据 s 取值的不同，可定义多个剖切面，当 $s = 0$

时,表示某一特定的平面。对隧道模型进行剖切时,检测与剖切平面相交的所有三角形面片,计算三角形线段与平面交点,依次连接即可获得隧道模型切割线。通过调用 VTK 模块中 vtkCutter 类可实现此过程,如图 7 表示的是一个采用轮廓线生成模型,进而得到切割线的一个实例。其中,黑色线条表示用于生成隧道模型的轮廓线,紫色线条为获得的隧道模型切割线。

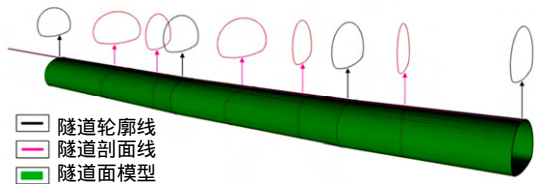


图 7 隧道模型切割线的获取
Fig.7 Cutting profile outlines of tunnel model

3.3 地质剖面的有限元网格计算模型

为实现有限元计算功能,需要将得到的隧道地质剖面进行网格剖分。本文引入 Delaunay 网格剖分算法,通过对 GIS 中 TIN 面模型中三角形不断改良,实现有限元三角形网格剖分的目的。

剖分算法主要通过边约束的 PLSG (planar straight line graph) 生成约束 Delaunay,以此为基础对网格进行剖分。核心思想是插入两类点,若任何一条约束的径向圆包含其他点,则插入约束边的“中点”;据网格剖分条件(最小内角、最大三角形面积等),插入“不良三角形”外接圆圆心,如图 8 所示。算法具体过程参见文献[23-25]。

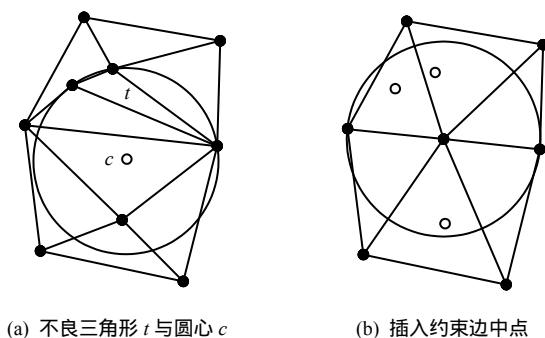


图 8 Delaunay 三角网格剖分算法
Fig.8 Triangular mesh generation algorithm based on Delaunay

Jonathan^[25]在对算法进行改进的同时,也提供了一个以三角形为基本数据结构的 C 语言 Triangle 函数。在此基础上,本文编写了相关的算法函数,并形成 Python 的动态链接库,通过调用接口,实现了基于 Delaunay 网格剖分算法的有限元三角形网

格剖分。

图 9 是一个从 Delaunay 三角化到网格剖分的完整实例,图 9(a)是初始的 PSLG,中间空洞表示挖空区,用半径为 1 的圆表示,中间正方形区域边长为 2,用来对空洞周围区域网格进行加密,最外面正方形区域边长为 5;图 9(b)是 9(a)进行严格约束 Delaunay 三角化的结果,其中的约束边中不允许插入 Steiner point;为了使图 9(b)中的三角形都满足 Delaunay 特征,需要将约束边界分割成几段,最终效果如图 9(c)所示,相比于图 9(b)三角形的数量有所增加;图 9(d)是施加 30° 边界约束后的结果,没有一个三角形的最小内角小于 30°;图 9(e)表示在图 9(d)基础上设置最大面积约束的剖分情况,其中中间区域最大面积约束为 0.2,外边区域为 1.0,这样中间区域没有面积大于 0.2 的三角形,外边区域的三角形面积没有大于 1.0 的;图 9(f)是在图 9(e)约束条件基础上为使每个三角形都满足 Delaunay 特性而进行的剖分,三角形单元个数为 298 个。

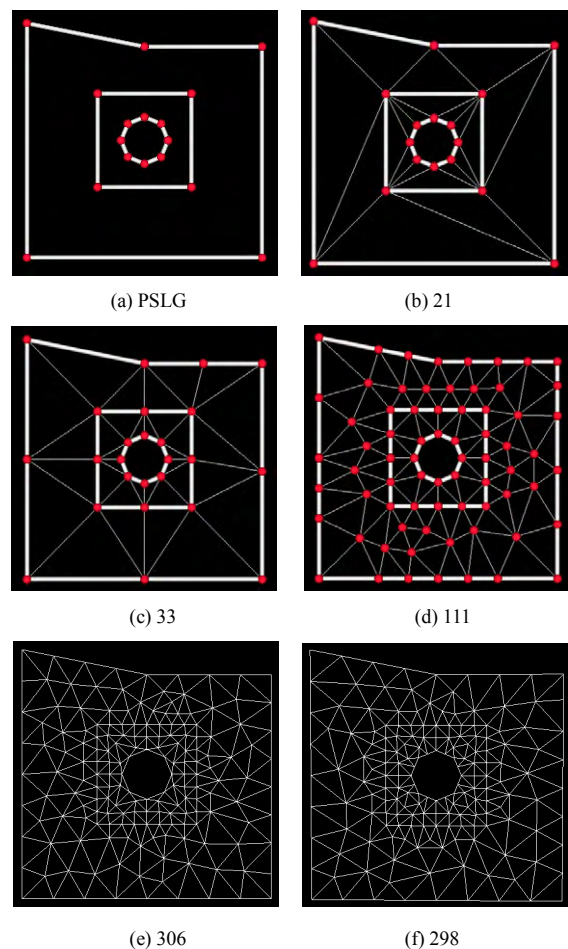


图 9 不同约束条件下 Delaunay 剖分算法获得的三角形网格
Fig.9 Triangular meshes obtained by Delaunay generation algorithm under different constraints

在对实际工程开展有限元计算时，可首先根据所模拟的对象确定各区域最小三角形单元剖分面积，在此基础上，当改变三角形最小内角约束条件时，将获得不同的有限元计算模型。而在最小内角约束条件设为最大值时，获得的三角形最接近正三角形，其网格模型能够有效提高数值计算模拟精度与减少奇异数值计算情况的发生概率。同时，不同的最小内角约束条件在网格剖分耗时与所获得的网格数量方面有所差异，若单元数量太大势必影响模型的经济性。为此，本文在上述图 9(f)的基础上，将中间区域最大面积约束改为 0.000 2，外边区域调整为 0.001，研究不同角度约束条件下普通笔记本电脑中网格剖分耗时与模型规模（节点与三角形单元个数），具体结果如表 1 所示。由表可知，随着剖分约束角度的增加，无论是网格剖分平均耗时还是节点与三角形单元数目都无明显的增多，表明一般情况下采用 Triangle 函数提供的最小内角约束条件中的最大值 30°，能够获得更优的三角形计算网格，同时还能够在一定程度上保证模型的经济性。

表 1 不同约束角度条件下三角形单元剖分情况
Table 1 Generations of triangular element under different conditions with various constraint angles

角度 / (°)	平均耗时 / s	节点数 / 个	三角形单元数 / 个
10	4.06	111 563	221 728
15	4.15	111 451	221 491
20	4.13	111 575	221 758
25	4.16	111 929	222 464
30	4.23	114 444	227 510

3.4 隧道开挖的有限元数值模拟

为分析隧道开挖后围岩应力、应变等力学特性变化规律，需要对研究区域内选取的多个隧道地质剖面开展有限元计算；然后，借助 GRAS GIS 空间分析与处理手段，对多个剖面计算结果进行插值，从而实现对整个研究区域内隧道开挖引起的多种场数据变化特征进行综合分析的目的。

对于有限元数值计算，作为尝试和探索，目前编写了三节点三角形单元的线弹性有限元计算程序，实现了隧道开挖中平面应力、应变的初步求解。模拟开挖主要是计算在开挖边界各点产生的“开挖卸载应力”，通过对开挖区域内所有单元建立矩阵（实际上只需要考虑开挖区域内与边界连接的那一层单元即可），计算相应的等效节点力，将其作为外载荷，求解矩阵方程即可。具体方法参见相关文献 [26-28]，这里不再赘述。

4 工程实例

4.1 工程与地质概况

麻竹高速公路黄家寨隧道位于南漳县长坪镇郑家院村及钟鼓坪村，为线路穿越低山区而设，线路走向为 251°，设计为分离式两车道隧道。进出口里程桩号为 K60+628 ~ K62+088，长为 1 460 m。隧道区覆盖层主要为第四系残坡积 (Q_{4el+dl}) 碎石土，下部岩石为志留系 (S₁₁) 页岩。隧道开挖实际揭露以强 ~ 中风化页岩为主，泥质结构，为较软岩 ~ 软岩，主要为薄层状，节理裂隙较发育。综合考虑隧道开挖后揭露围岩的实际情况、室内岩石力学试验、变形监测数据等，在工程类比的基础上确定各岩层物理力学参数如表 2 所示。

表 2 各岩土层物理力学参数值
Table 2 Mechanical properties of each rock stratum

土层名	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ
土层	1.95	12	0.31
强风化页岩	2.10	35	0.29
中风化页岩	2.25	300	0.26
微风化页岩	2.39	6 500	0.25

4.2 基于 GIS 的隧道开挖有限元计算

在隧址区地形图中选择用于隧道地质建模与计算分析的范围，如图 10 所示。其中水平向蓝色线条为隧道右幅中心线，绿色线条为隧道左幅中心线。黑色线框为设定的隧道开挖影响范围，边界距离隧道中心大于 5 倍洞径。紫色竖向线段为有限元计算剖面线，为提高分析精度，选取红色线框 ABCD 为主要研究区域，其中设置 P1 ~ P5 这 5 个地质剖面。图 11 为隧道右线地质纵剖面图，从上至下依次为第四系残坡积 (Q_{4el+dl}) 碎石土、强风化页岩与中风化页岩。红色虚线 (CD-AB) 段地表冲沟发育，与图 10 中 ABCD 区域对应。

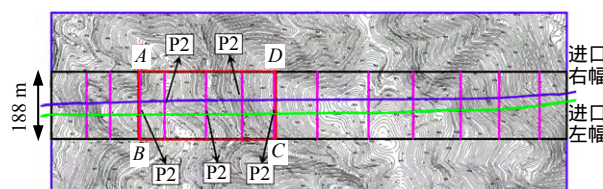


图 10 隧址区平面图与具体计算范围
Fig.10 Plan view of tunnel site area and calculation range

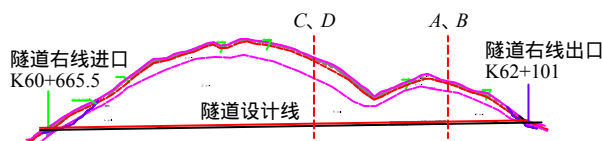


图 11 黄家寨隧道右线纵剖面图
Fig.11 Right line profile of Huangjiazhai tunnel

结合图 10、11，通过调用 GRASS GIS 相应模块生成个地层对应的 DEM 模型，基于隧道设计轮廓线与左右洞中心线生成隧道三维模型，根据图 10 所示的有限元计算剖面线生成多个地质剖面，在系统 (3DPyGisTFEM) 中具体实现界面如图 12 所示。绿色模型为隧道左幅，蓝色为隧道右幅，整个图形右侧为隧道进口端。

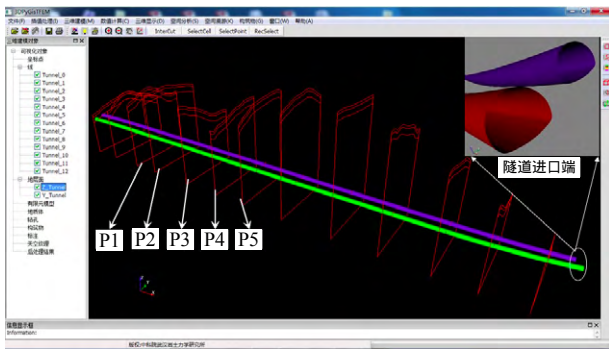


图 12 黄家寨隧道与各地质剖面模型
Fig.12 Models of geological sections and tunnels of Huangjiazhai

图 13 为地质剖面 P1 三角形网格剖分结果，其中节点数为 4 229，三角形单元个数为 8 307。为准确计算并提取地表与洞内变形等信息，在这些部位三角形网格剖分密度相对较大。图 14 为此剖面隧道开挖后 Y 方向位移计算结果图，最大变形集中在拱顶与底板位置，隧道轮廓线周边位移矢量图表明开挖导致围岩产生向洞内挤入的趋势，与实际情况一致。同理，可获得 P2 ~ P5 地质剖面有限元模型中各节点的位移等数据。

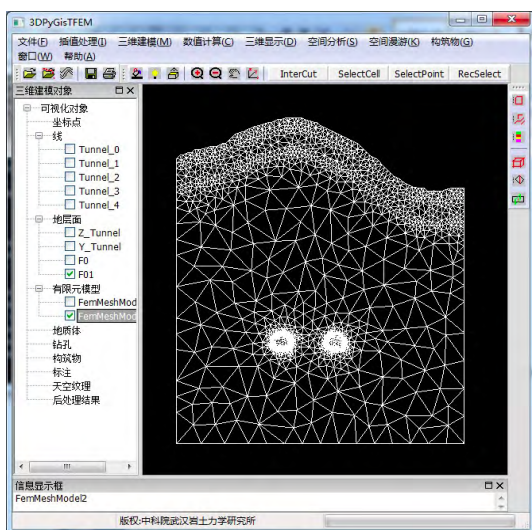


图 13 地质剖面 P1 三角形网格划分
Fig.13 Triangular mesh subdivision of geological section P1

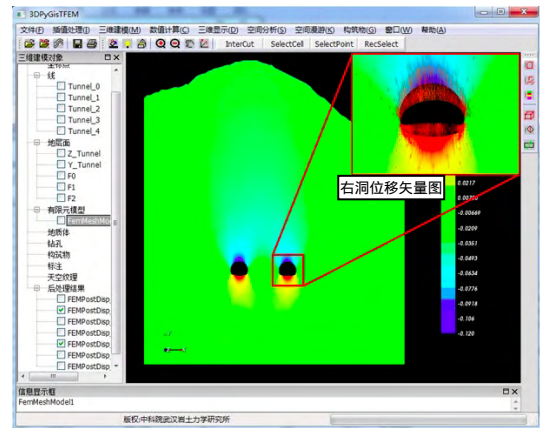


图 14 地质剖面 P1 位移计算结果图
Fig.14 Tunnel-induced displacement at geological section P1

4.3 结果分析

4.3.1 隧道拱顶沉降

图 15 表示图 10 中 ABCD 区域或者图 12 中 P1 ~ P5 这 5 个剖面左、右洞拱顶沉降值，结合各剖面形状进行分析，结果表明，隧道埋深大的一侧沉降值大于埋深浅的一侧。

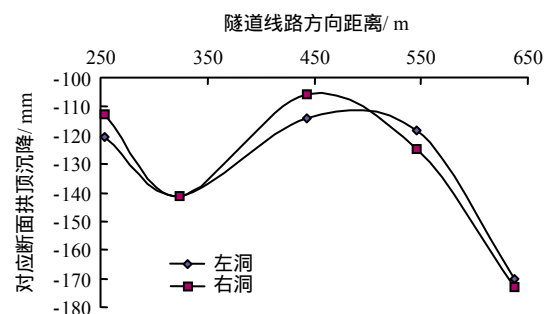


图 15 拱顶沉降曲线的计算
Fig.15 Crown settlement curves at different geological sections

4.3.2 区域 ABCD 地表沉降

提取 P1 ~ P5 这 5 个地质剖面中地表各节点对应的 Y 方向位移，通过 GRASS GIS 进行插值计算即可获得整个区域 ABCD 对应的地表沉降数据，结果如图 16 所示。

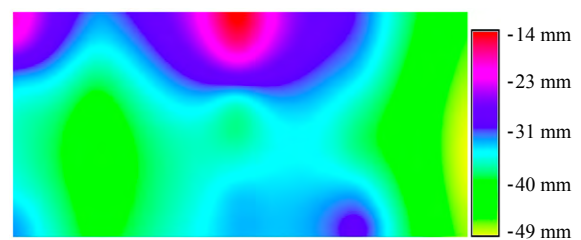


图 16 区域 ABCD 地表沉降云图
Fig.16 Surface settlement distribution in region of ABCD

为了结合空间信息对地表沉降规律进行综合分析，通过 GRASS GIS 生成了区域 ABCD 地表沉降值分类图、DEM 的坡度图、隧道缓冲区以及地表距拱顶相对高程图，分别见图 17~20。结合坡度、缓冲区以及相对高程等空间分布规律，对于区域 ABCD，地表沉降在坡度较缓的位置数值较大，到隧道中心距离越远沉降越小，与地表相对高程关系最为密切，埋深越大沉降越大。



图 17 区域 ABCD 地表沉降分类统计

Fig.17 Classification of statistics of surface settlement in the region of ABCD

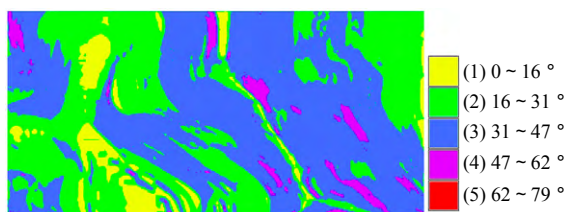


图 18 区域 ABCD 地表坡度分布图

Fig.18 Surface gradient distribution in region of ABCD

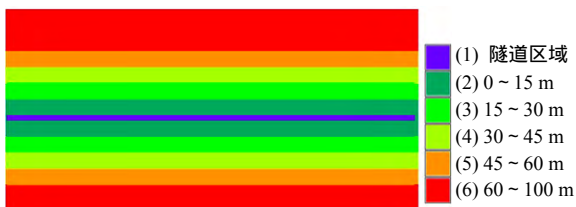


图 19 区域 ABCD 中到隧道中心距离缓冲区分布

Fig.19 Distribution of buffer away from tunnel centerline in region of ABCD

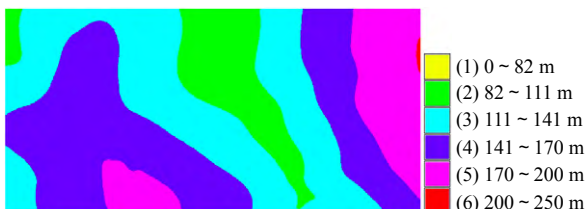


图 20 区域 ABCD 地表距拱顶相对高程分类统计

Fig.20 Classification of statistics of surface elevation relative to tunnel crown in region of ABCD

5 结 论

(1) 在 3D GIS 中，为实现不依靠第 3 方数值模

拟软件独立开展有限元数值计算的目的，基于 GRASS GIS、VTK 等开源软件，提出了以 Python 语言为粘合剂的 GIS 与有限元模拟的复合系统开发框架，提高了软件开发效率，并针对隧道开挖编写了 GIS 与有限元数值计算无缝耦合分析程序 (3DPyGisTFEM)。

(2) 给出了由中心线上多条轮廓线生成隧道模型的算法，提出了对各地层 DEM 与隧道模型进行剖切运算获得剖面的方法，可通过任意给定线段得到对应的隧道开挖地质剖面。

(3) 引入 Delaunay 网格剖分算法，在最小内角、最大三角形面积等网格剖分约束条件下，实现了地质剖面的有限元三角形单元剖分。

(4) 将数值计算结果与 GIS 空间分析方法相结合，实现了 GIS 与有限元的无缝耦合。通过黄家寨隧道工程实例计算结果表明，相对坡度、缓冲区等因素，地表距隧道拱顶高差的空间分布特征与地表沉降规律关系更为密切。

(5) GIS 与有限元的无缝耦合方法将进一步丰富岩土工程的研究手段。本文在此方面开展了一些探索性的研究工作，但还存在一些不足的地方，尤其是隧道开挖模拟目前采用线弹性本构模型，不能完全反映现场工程实际情况，需要在以后的工作中不断完善。

参 考 文 献

- [1] YATE D N, et al. The development of large scale digital computer codes for production structure analysis[R]. [S. l.]: Lockheed Structures Conference, 1970.
- [2] 周翠英, 林春秀, 刘祚秋, 等. 基于 GIS 技术的区域性滑坡发生概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (23): 911 - 914.
ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu, LIU Zuo-qiu, et al. Spatial probability analysis of landslides based on GIS technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, (23): 911 - 914.
- [3] XIE M, ESAKI T, ZHOU G, et al. GIS-based 3D critical slope stability analysis and landslide hazard assessment[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2003, 129(12): 1109 - 1118.
- [4] 王旭春, 何满潮, 蒋宇静, 等. 在 GIS 中实现基于力学原理的滑坡稳定性计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 977 - 980.
WANG Xu-chun, HE Man-chao, JIANG Yu-jing, et al. Stability analysis of landslide based on mechanics

- principle in GIS[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(6): 977 - 980.
- [5] 刘汉龙, 刘立民, 连传杰. GIS 地表塌陷计算的有限棱柱法及三维数据模型[J]. **岩土力学**, 2004, 25(6): 913 - 917.
LIU Han-long, LIU Li-min, LIAN Chuan-jie. Finite prism element method of ground subsidence calculation and 3D data model based on GIS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 913 - 917.
- [6] 王佳佳, 殷坤龙. 基于 WEBGIS 和四库一体技术的三峡库区滑坡灾害预测预报系统研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(5): 1004 - 1014.
WANG Jia-jia, YIN Kun-long. Landslide hazard predicting system based on WEBGIS and integrated databases in Three Gorges Reservoir area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(5): 1004 - 1014.
- [7] LI Xue-ping, LI Yun-an, ZHOU Shun-ping. Study and application of forecasting system for water inrush under high pressure in Xiamen submarine tunnel construction based on GIS[J]. **Procedia Environmental Sciences**, 2011, (10): 999 - 1005.
- [8] RIENZO F D, ORESTE P, PELIZZA S. Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning[J]. **Engineering Geology**, 2008, (96): 187 - 204.
- [9] CHUNGSIK Y, JEON Y W, CHOI B S. IT-based tunnelling risk management system (IT-TURISK)-Development and implementation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, (21): 190 - 202.
- [10] 王永志, 盛业华, 周良辰, 等. 3D GIS 支持下盐腔围岩三维计算模型的生成[J]. **岩土力学**, 2012, 33(5): 1557 - 1565.
WANG Yong-zhi, SHENG Ye-hua, ZHOU Liang-chen, et al. Generation method of three-dimensional computing model of wall rock of salt caverns supported by 3D GIS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1557 - 1565.
- [11] 吴江斌, 朱合华. 基于 Delaunay 构网的地层 3D TEN 模型及建模[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(24): 4581 - 4588.
WU Jiang-bin, ZHU He-hua. 3D TEN model of strata and its realization based on Delaunay triangulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4581 - 4588.
- [12] 徐帮树, 徐建华, 芮建勋, 等. 基于 GIS 的边坡有限元网格自动生成研究[J]. **地理与地理信息科学**, 2005, 21(3): 23 - 26.
XU Bang-shu, XU Jian-hua, RUI Jian-xun, et al. The method of automatically generation FEM based on GIS for slope[J]. **Geography and Geo-Information Science**, 2005, 21(3): 23 - 26.
- [13] 许冲, 李琰庆, 蒋日波. 基于 GIS 与数值模拟的边坡稳定性评价[J]. **岩土工程技术**, 2008, 22(2): 71 - 75.
XU Chong, LI Yan-qing, JIANG Bi-bo. Slope stability evaluation based on GIS and numerical simulation[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2008, 22(2): 71 - 75.
- [14] 王涛, 蔡晓斌, 陈晓玲, 等. 基于 RS/GIS 技术与数值计算的库岸边坡稳定性研究[J]. **武汉大学学报·信息科学版**, 2005, 30(10): 917 - 921.
WANG Tao, CAI Xiao-bin, CHEN Xiao-ling, et al. Stability of reservoir slope based on RS/GIS and numerical simulation[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2005, 30(10): 917 - 921.
- [15] 王纯祥, 白世伟. 三维地层信息系统与有限元方法集成研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(21): 3695 - 3699.
WANG Chun-xiang, BAI Shi-wei. Study on integration of 3D strata information system and FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3695 - 3699.
- [16] 刘汉龙, 刘立民, 李建刚. 基于 GIS 的地下开挖沉降计算的有限层法及数据场表达[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(12): 2170 - 2176.
LIU Han-long, LIU Li-min, LI Jian-gang. FLEM for ground subsidence calculation and data field expression model based on GIS[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2170 - 2176.
- [17] 黄河, 李卓球, 朱国甫. 基于 GIS 的并行有限元智能系统的开发应用[J]. **武汉理工大学学报**, 2010, 32(10): 1146 - 1151.
HUANG He, LI Zhou-qiu, ZHU Guo-fu. Development and application of a GIS-based system for the parallel intelligent FEM computation[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2010, 32(10): 1146 - 1151.

- 究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- ZHONG Shi-ying. Study on mechanical behaviors of lunar soil simulant and footpad dynamic response in soft landing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [34] 袁聚云. 土工试验与原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- YUAN Ju-yun. Geotechnical test and theory[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003.
- [35] 南京水利科学研究所. SL237-1999 土工试验规程 [M]. 南京: 中国水利水电出版社, 2003.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237-1999 Specification of soil test[M]. Nanjing: China Water & Power Press, 2003.
- [36] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14 - 19.
- ZHENG Yong-chun, OUYANG Zi-yuan, WANG Shi-jie. Physical and mechanical properties of regolith[J]. **Journal of Mineralogy and Petrology**, 2004, 24(4): 14 - 19.
- [37] PERKINS S W. Bearing capacity of highly frictional material[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1991, 18(4): 450 - 462.
- [38] 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1557 - 1561.
- LI Jian-qiao, ZOU Meng, JIA Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terra mechanics research in laboratory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1557 - 1561.
- [39] CUNDALL P A. PFC 3D user's manual(Version 4.0)[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 2008.

上接第 874 页

- [18] NETELER M, MITASOVA H, 2004. Open source GIS: A GRASS GIS approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [19] CARRERA-HERNANDEZ J J, GASKIN S J. The groundwater modeling tool for GRASS(GMTG): Open source groundwater flow modeling[J]. **Computers & Geosciences**, 2006, 32: 339 - 351.
- [20] 刘振平, 贺怀建, 李强, 等. 基于 Python 的三维建模可视化系统的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3037 - 3042.
- LIU Zhen-ping, HE Huai-jian, LI Qiang, et al. Study of the technology of 3D modeling and visualization system based on Python[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3037 - 3042.
- [21] SCHULTZ G A. Application of GIS and remote sensing in hydrology[C]//HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, Proceedings of the Vienna Conference. [S. l.]: [s. n.], 1993: 127 - 140.
- [22] WILL S. The VTK user's guide[M]. [S. l.]: [S. l.]:Kitware, Inc., 2002.
- [23] JIM R. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-Dimensional mesh generation[J]. **Journal of Algorithms**, 1995, 18(3): 548 - 585.
- [24] CHEW L P. Guaranteed-quality mesh generation for curved surfaces[C]//Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry. San Diego, California: Association for Computing Machinery, 1993.
- [25] JONATHAN R S. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. **Computational Geometry: Theory and Applications**, 2002, 22(1 - 3):21 - 74.
- [26] 郑宏, 葛修润, 谷先荣, 等. 关于岩土工程有限元分析中的若干问题[J]. 岩土力学, 1995, 16(3): 7 - 11.
- ZHENG Hong, GE Xiu-run, GU Xian-rong, et al. Some problems in FEA for geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(3): 7 - 11.
- [27] 王勇, 殷宗泽. 有限元计算深开挖中挖方等效荷载的分析[J]. 河海大学学报, 1998, 26(5): 71 - 74.
- WANG Yong, YIN Zong-ze. Analysis of equivalent load caused by the removal of soil in finite element calculation of excavation[J]. **Journal of Hohai University**, 1998, 26(5): 71 - 74.
- [28] 王小敏, 朱爱军, 王宏润, 等. 有限元法中开挖释放荷载计算方法的研究[J]. 水力发电, 2005, 31(7): 48 - 51.
- WANG Xiao-min, ZHU Ai-jun, WANG Hong-run, et al. The study of calculation method of excavation loading in finite element method[J]. **Water Power**, 2005, 31(7): 48 - 51.