

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0221

基于 MeshPy 的 3D GIS 与三维有限元 数值计算无缝耦合方法

刘振平¹, 杜根明^{1,2}, 蔡洁³, 周凡⁴, 刘建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. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 湖北交投宜昌投资开发有限公司, 湖北 宜昌 443000; 4. 湖北公路智能养护科技股份有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要: 3D GIS 与有限元数值计算耦合方法及其系统开发, 是目前 GIS 与岩土工程交叉学科的重要研究内容。通过对 MeshPy、GRASS GIS、vtkPython 以及 Scipy 等多个开源库的探索与编程实践, 以 Python 为“黏合剂”, 构建了 GIS 与三维有限元数值计算无缝耦合的平台框架。在满足几何形状、Delaunay 特性、角度、面积以及体积等约束条件下, 通过 MeshPy 包含的 Triangle 与 TetGen 库获得能用于有限元数值计算的三角形与四面体网格, 并阐述了限定 Delaunay 三角化 (CDT) 节点插入算法与四面体网格质量控制方法。以排土场为例, 针对 CDT 网格建立的地表模型, 结合 vtkPython 封装的模块与算法, 提出了根据节点分布位置综合采用线性与三角形重心坐标的插值方法, 有效消除了其他插值手段导致的部分地表高程畸变的现象。借助 Scipy 提供的矩阵运算模块, 开发了邓肯-张 $E-\mu$ 模型, 给出了采用中点增量法进行非线性求解的算法, 并通过对室内大型三轴剪切试验的数值模拟验证了程序的正确性。最后, 对准东露天煤矿北部排土场堆排过程开展三维有限元数值计算, 结合 GRASS GIS 对排弃物料高度与厚度空间分布规律的分析结果, 对排土场边坡位移变化规律进行初步研究, 结果表明, 排土场垂直位移与排弃料高度及厚度相关, 而最大水平位移则出现在各台阶坡体边缘位置, 与实际情况一致。

关键词: 三维地理信息系统 (3D GIS); 开源软件; 无缝耦合; 有限元法 (FEM); 排土场边坡

中图分类号: TD 73

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 10-3841-12

Seamless coupling method of 3D GIS combined with 3DFEM simulation based on MeshPy

LIU Zhen-ping¹, DU Gen-ming^{1,2}, CAI Jie³, ZHOU Fan⁴, LIU Jian¹, BIAN Kang¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yichang Investment, Hubei Investment and Development Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, China; 4. Hubei Highway Intelligent Conservation Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430014, China)

Abstract: Coupling and systematic development methods of three dimensional geographic information system (3D GIS) and finite element method (FEM) have recently become the research hotspot in interdiscipline of geotechnical engineering and GIS. By exploring and programming of open source libraries such as MeshPy, GRASS GIS, vtkPython and Scipy, and using Python as "glue", the platform framework of seamless coupling between GIS and 3D FEM was eventually built. Under the constraint condition of geometry, Delaunay properties, angle, area and volume, MeshPy's Triangle and TetGen library were used to generate the triangle and tetrahedron grids for finite element numerical calculation and the insert algorithm of constrained Delaunay triangulation (CDT) and the grid quality control method were expounded. Combining with related module and algorithm provided by vtkPython, the surface model of a coal mine dump was established and a new interpolation method considering both lineament and triangle barycenter coordinate was put forward, which can effectively eliminate the elevation distortions in certain areas. The program including Duncan-Chang $E-\mu$ model and nonlinear solution algorithm based on mid-point incremental method was developed and was verified by the numerical simulation of indoor large-scale triaxial shear test. Finally, taking Zhundong coal mine as an example, the 3D finite element numerical calculation about the heaping process of the northern dump was carried out. Combined with the spatial

收稿日期: 2017-10-08

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 Program of China (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可视化技术研究。E-mail: liuzhenping_2000@163.com

distribution of material height and thickness in GRASS GIS, a preliminary research on the displacement variation of dump slope was accomplished. It is shown that the vertical displacement is mainly controlled by material height and thickness. The maximum horizontal displacement mainly appears in slope edges of each step, which is consistent with the actual situation.

Keywords: three dimensional geographic information system (3DGIS); open source software; finite element method (FEM); seamless coupling; dump slope

1 引言

地理信息系统 GIS (geographic information system) 具有强大空间数据处理、分析以及可视化功能, 已被很多学者用来分析、解决岩土工程建设中遇到的资源勘查、环境保护以及灾害评估等一系列关乎民生的社会问题, 并逐渐形成了一门交叉学科。尤其是一些学者将 GIS 宏观分析手段与极限平衡等数值计算方法相结合^[1-3], 进一步深化了 GIS 在岩土工程领域中的应用。但是在实际工程中, 有限元模拟方法更具普遍性, 对三维有限元模拟与 3DGIS 耦合方法开展研究, 充分发挥 3DGIS 在模型构建与可视化表达方面的强大能力, 实现数值模拟获得的各种场数据与 GIS 空间信息综合集成, 对于区域边(滑)坡灾害定量评价、采场塌陷风险评估、公(铁)路选线、危废处置选址等都有重要意义。

在结合 GIS 开展有限元模拟方法的研究中, 主要成果集中体现在基于 GIS 的数值计算模型的构建、3DGIS 地质模型有限元网格生成以及数值模拟结果与 GIS 空间信息的综合集成等方面。如许冲等^[2]基于 ArcGIS 和 FLAC2D 软件, 结合编程技术将两者集成, 实现了剖面自动生成和 FLAC2D 计算数据前处理功能。王永志等^[4]基于 3DGIS 提出了一种盐腔围岩三维计算模型生成方法。王涛等^[5]基于四面体单元, 实现了 3DGIS 与 3DEC 软件两者优势的互补, 为水利水电工程中的地下洞室围岩稳定问题的咨询提供了有力的工具。王纯祥等^[6]通过提出的 L-W 拓扑模型 (local-whole topological model, 即 LWTM), 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。吴江斌等^[7]采用 Delauney 四面体化算法获得了可用于数值计算的网格。徐帮树等^[8]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方法, 并利用 ArcGIS9.0、Ansys7.0 实现了有限元单元自动生成。刘汉龙等^[9]将提出的有限层法与 GIS 进行了集成。黄河等^[10]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。Rienzo 等^[11]通过 3DGIS 软件建立了三维工程地质模型, 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。Yoo 等^[12]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。

与此同时, 还有一些学者对三维实体四面体网格剖分方法及其开源库进行了研究, 如吴火珍等^[13]介绍了一种三维约束 Delaunay 四面体网格剖分算法, 能够将复杂三维实体剖分成质量较好的 Delaunay 四面体网格, 可用于工程中有限元网格的生成。徐能雄等^[14]提出并实现了岩体结构三维无缝建模方法, 并实现了基于岩体结构无缝模型的四面体优化剖分。余淑娟等^[15]基于 Delaunay 三角剖分良好的边界约束适应能力, 提出了一种以地质层面 Delaunay 三角网为约束条件进行约束四面体剖分构建地质模型的方法。荆永滨等^[16]通过开源三维网格生成器 TetGen 使用方法, 确定表面模型数据至 TetGen、TetGen 网格划分结果至 FLAC3D 的对应关系, 实现能够准确描述地质体与工程开挖的 FLAC3D 计算模型的构建。孙黎明等^[17]采用开源四面体网格剖分软件 Netgen 来解决三维地质建模中难以表达层状地质体内部属性的问题。此外, 还有一些学者也在 GIS 与有限元数值计算耦合分析方法及网格剖分等方面开展了卓有成效的研究工作, 限于篇幅, 这里不一一列举。

综上所述, 目前大多数学者主要将各种 GIS 商业软件作为有限元前后处理的工具, 数值模拟仍需借助第三方商业有限元数值计算软件才能实现, 属于 GIS 与有限元的松散耦合方法。但是 GIS 与有限元在数据结构、文件类型等方面往往存在较大差异, 大量数据在不同软件平台中的频繁传输将会给用户造成极大的不便与困难; 并且商业软件对外提供接口较少, 源代码无法直接编辑, 对于具体工程问题或者科学探索而言, 操作的灵活性较差; 同时, 这种方法不能充分发挥 3DGIS 在空间数据分析、多场信息耦合等方面的强大功能。随着大量学者对不同网格剖分方法的持续探索, 尤其是对各种开源库研究与应用的不断深入, 为 3DGIS 与三维有限元计算的耦合提供了新的思路。

鉴于此, 本文将 Python 语言为“黏合剂”, 通过 MeshPy、GRASS GIS、vtkPython 以及 Scipy 等多个开源库, 构建 3DGIS 与三维有限元无缝耦合平

台，研究基于 MeshPy 实现三角形与四面体网格剖分的核心算法与具体实现方法。以排土场边坡为例，提出 BRep 三维模型构建方法与考虑约束条件的地表高程插值算法，开发三维有限元邓肯-张 $E-\mu$ 模型及其非线性求解模块，在不借助任何商业软件的情况下，对 3D GIS 与三维有限元无缝耦合方法开展研究。

2 系统平台与 MeshPy 开源库

2.1 3D GIS 与三维有限元数值计算耦合平台

系统采用 64 位 2.7.8 版本的 Python 为主要编程语言。一方面，编写 Python 模块完成一些对执行效率要求不高的功能，如通过 Python 程序对 DXF 文件中图形数据按照图层、图元类型等的不同进行导入，尤其实现了对排土场坡顶、坡底等三维多线段的识别；另一方面，充分利用 Python 语言强大的“黏合”功能将各种开源库进行耦合，并实现 GIS 与 FEM 的无缝耦合。如采用 vtkPython 封装的 VTK (the visualization toolkit) 开源库中各种三维图形构造算法，实现 BRep 三维模型的构建。MeshPy 库可以将封闭的平面区域与空间形体剖分成优质的三角形与四面体网格。利用 Python 内置函数 Scipy、Numpy 库提供的矩阵运算功能，可实现有限元刚度矩阵的快速构建与稀疏矩阵的高效求解。而 GRASS GIS (geographic resources analysis support system 地理资源分析支持系统) [18-19] 开源程序则提供了栅格、矢量图形大量空间数据分析功能，结合 wxPython 界面库与 vtkPython，可实现 GIS 空间信息与 FEM 计算结果的三维展示。具体系统模块组成与功能实现见图 1。

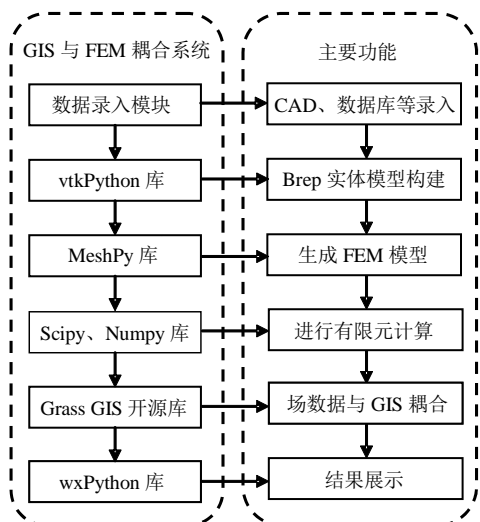


图 1 3D GIS 与三维有限元复合系统开发框架图
Fig.1 Combined system frame with 3D GIS and 3DFEM

2.2 MeshPy 开源库及其关键算法

MeshPy 是 Python 语言可直接调用的一个网格剖分开源库，它不仅包含由 Shewchuk^[20]开发的三角形网格剖分 Triangle 库，而且也涵盖 Si 等^[21-23]开发的四面体网格 TetGen 库。

2.2.1 三角形网格剖分

Triangle 是 Jonathan Richard Shewchuk^[20]采用 C 语言编写的三角形网格剖分模块。该模块在 Chew^[24]与 Ruppert^[25]的 Delaunay 优化算法基础上，通过所提出的 Terminator 算法，比较有效地解决了平面直线图 (planar straight line graph) PLSG 中存在小角度导致三角形网格在尖端剖分不合理的现象。Triangle 在形成 PLSG 所限定的约束 Delaunay 的同时，还能够考虑三角形最大、最小内角，三角形面积大小以及网格大小变化梯度等约束条件。其算法的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” (见图 2)；对于不满足网格剖分约束条件 (最小内角、最大三角形面积等) 的“不良三角形”，插入外接圆圆心 (见图 3)。算法具体过程参见文献[20, 24-25]。

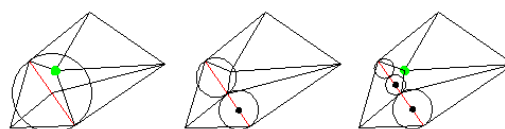


图 2 约束线段分割示意图
Fig.2 Segmentation of constraint lines

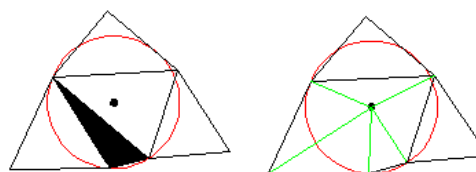


图 3 删除不符合约束条件的“不良三角形”
Fig.3 Deletion of “bad triangles” against constraint conditions

2.2.2 四面体网格剖分

TetGen 采用 ANSI C++ 语言，代码具有高度可移植性，能够在所有主流操作系统 (例如 Unix/Linux、Windows、MacOS 等) 编译和运行。该模块以三维 PLCs (3D piecewise linear complex) 围合形成的封闭空间模型为数据输入，采用 Si 等^[21-23]提供的约束 Delaunay 网格剖分算法，生成优质的四面体网格。

为确保程序的正常运行，三维 PLCs 图形的合理性非常重要。这种图形由一系列点、线、面构成，

通过线段边界形成的面围合而成,属于实体表达中的边界表示(boundary representation, BRep)模型,可以是内部包含孔洞的非凸面体。但是如果三维PLCs围合的空间模型没有封闭或者存在自相交的边与面时,将无法获得网格剖分结果。

四面体网格质量对于有限元数值模拟结果的准确性尤为关键,网格质量优劣判别应用最普遍的指标是长高比 $\eta(T)$,表达式为

$$\eta(T) = l_{\max} / h_{\min}, \eta(T) \in [\sqrt{2} / \sqrt{3}, +\infty] \quad (1)$$

式中: l_{\max} 为四面体最大边长长度; h_{\min} 为四面体最小高度。 $\eta(T)$ 数值越小,对应网格质量越优良。

TetGen通过对最小面角度(两条边夹角)与二面角(共用边两三角形所在平面夹角)的联合控制来达到设定长高比指标的目的。而最小面角度与半径-边长比 $\rho(T)$ 在控制四面体网格质量方面几乎是等效的,具体表达式为

$$\rho(T) = \frac{R}{l_{\min}} \geq \frac{1}{2 \sin \theta_{\min}} \quad (2)$$

式中: R 为四面体 T 外接圆半径; l_{\min} 为四面体中最短边长; θ_{\min} 为四面体 T 最小面角度,见图4。

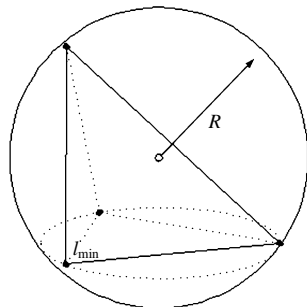


图4 四面体单元的半径-边长比
Fig.4 Radius-edge ratio of tetrahedral

当 T 为正四面体时, $\rho(T)$ 将获得最小值 $\sqrt{6}/4$, $\rho(T)$ 越小对应的四面体网格质量越好,当 $\rho(T)$ 取值大于2.0时,网格质量将变差。但薄片形状四面体是个例外,它不存在短的边,对应的 $\rho(T)$ 最小可达到 $\sqrt{2}/2$ 。因此,在TetGen模块中主要通过输入半径-边长比、最小二面角以及最小四面体体积等约束条件,来获取优质且满足有限元求解要求的网格。

2.3 MeshPy 开源库在 Python 程序中的应用

利用 pip 程序下载并安装与当前 Python 程序版本相同的 MeshPy 的.whl 文件,若 import MeshPy 语句运行无误,则表明安装成功。然后就可以利用

所提供的 triangle 与 tet 模块对输入的模型按照指定的角度、面积、体积等约束条件获得对应的网格单元,具体见流程图 5。同时,为便于控制网格剖分的质量,笔者在 MeshPy 模块 triangle 与 tet 类中,对 build 接口函数进行了完善,增加了 Delaunay 属性、是否插入边界与内部 Steiner Point、最小边长等多个能够进一步控制网格形状的约束条件。

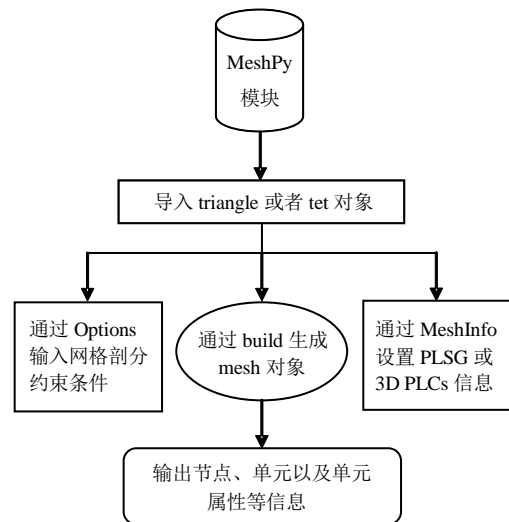


图5 采用 MeshPy 模块实现网格剖分方法流程图
Fig.5 Flowchart of mesh generation using MeshPy

3 BRep 三维模型及有限元网格生成

形成封闭的空间形体是进行有限元网格剖分的前提,而边界表示模型(boundary representation) BRep 以其能精确描述地物形状、建模效率高等优点一直都是三维模型主要表达方法。为建立精度高的三维模型,各面模型中节点分布的合理性与高程值的准确性尤为关键。因此,下面以排土场边坡为例,围绕限定 Delaunay 三角化(constrained Delaunay triangulation, CDT),以不同位置处节点高程确定方法为主,对三维模型建立过程开展研究。

3.1 基于 CDT 边坡表面网格的构建

地表面不仅涉及断层出露、不同地层界面交汇等复杂地质情况,而且边坡形态轮廓线准确表达对于稳定性分析结果的正确性也至关重要。为构建合理的 3D GIS 表面模型,不仅要获得符合各种约束条件的优质网格,而且要选取能得到与实际排土地表轮廓一致的高程插值方法。

3.1.1 边坡表面 CDT 网格生成

一方面,根据 BRep 模型中需要考虑的关键点、地层边界、坡顶、坡底以及开挖线等几何约束条件,形成初始 PLSG 文件,采用 MeshPy 中 triangle 模块

仅对其进行三角形剖分，形成没有插入任何新节点的初始表面三角形网格 (Origin_TriMesh) (如图 6 中黑色线段与节点),但其中包含一些质量较差的三角形。另一方面，为消除三角形网格对四面体剖分单元质量的影响，并且考虑到后续 3DGIS 中各种属性空间插值结果的合理性，有必要针对初始 PLSG 进行限定 Delaunay 三角形网格剖分 (CDT)，并使其满足面积、角度等约束条件，形成优质的三角形网格 (Optimal_TriMesh)，如图 6 中红色线段是在初始三角形网格基础上进一步剖分生成的新的线段，绿色与蓝色节点分别表示在此过程中新插入的位于初始线段上与初始三角形内部的节点。

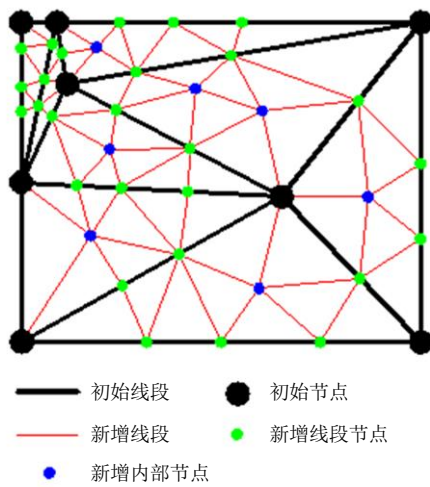


图 6 边坡表面 CDT 网格
Fig.6 CDT meshes of slope surface

3.1.2 新增节点高程值的确定

Origin_TriMesh 中所有初始节点都包含有高程信息，但 Optimal_TriMesh 新增节点高程仍需计算获得。笔者采用克里格、三次样条以及距离反比等插值方法，经过大量编程试验，甚至在设定各种插值限定条件的情况下，获得的部分高程依然会出现突变值，与现场原始的 PLSG 明显不符，虽然通过网格优化算法可以在一定程度上缓减这种现象，但效果依然不明显。面对这一问题，本文针对 Optimal_TriMesh 中新增线段节点与三角形内部节点分别采用线段端点线性与三角形重心坐标插值方法，较好地解决了这一异常现象。其中，三角形重心坐标插值方法认为 ΔIJK 内部 (见图 7) 任意一点 P 的高程与对应节点坐标值满足如下线性关系：

$$Z_p = ax_p + by_p + q \tag{3}$$

式中：系数 a 、 b 、 q 可通过对节点 I 、 J 、 K 依据公式 (3) 所建立的方程组求得。

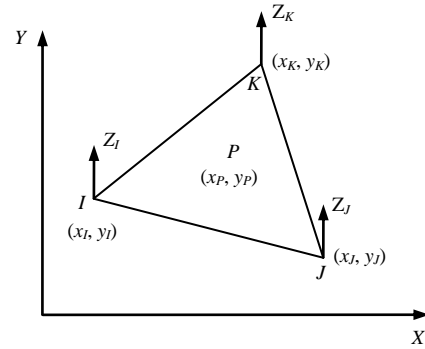


图 7 三角形重心坐标插值方法
Fig.7 Triangle barycenter coordinate interpolation method

根据上述插值方法，结合 vtkPython 提供的模块与算法，给出了图 6 中新增节点高程的计算方法，具体算法流程如图 8 所示。其中， $Q(x, y)$ 为初始 PLSG 或者初始表面三角形网格中包含高程信息的原始节点， $P(x, y)$ 是通过初始 PLSG 获得的 CDT 三角形网格相比原始图形新增的节点。算法通过设定 $Q(x, y)$ 所有邻接三角形作为查找区域的方法有效提高了点在三角形面片的搜索效率，对于个别不在此区域的点则通过不断扩大搜索范围的方式来寻找，并根据点所在位置选择不同方法来确定对应的高程。

4 程序实现

4.1 本构模型

主要选择线弹性与邓肯-张 $E-\mu$ 两种本构模型进行开发，其中，后者是 Duncan 和 Chang 在 1970 年提出的一种非线性弹性模型，弹性矩阵中的弹性系数随应力状态不同而改变，体现土体变形的非线性，而且在工程中应用广泛。

考虑到弹塑性理论与土力学拉、压应力表达方式的不同，对于程序计算中通过单元应力张量获得的 3 个主应力 P_1 、 P_2 以及 P_3 ，在采用邓肯-张 $E-\mu$ 模型进行下一载荷步计算时，按照土力学的表达习惯，对应主应力值 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别设置为 $-P_3$ 、 $-P_2$ 以及 $-P_1$ 。

邓肯-张 $E-\mu$ 模型加载时切线模量 E_t 表达式为

$$E_t = kP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n [1 - R_f s]^2 \tag{4}$$

式中： P_a 为大气压，取值为 0.101 03 MPa； R_f 为破坏比； s 为应力水平； k 、 n 为试验得到的参数。

卸荷时回弹模量 E_{ur} 表达式为

$$E_{ur} = k_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (5)$$

式中： $k_{ur} = ak^{[25]}$ ，本文中 $a = 2.0$ 。

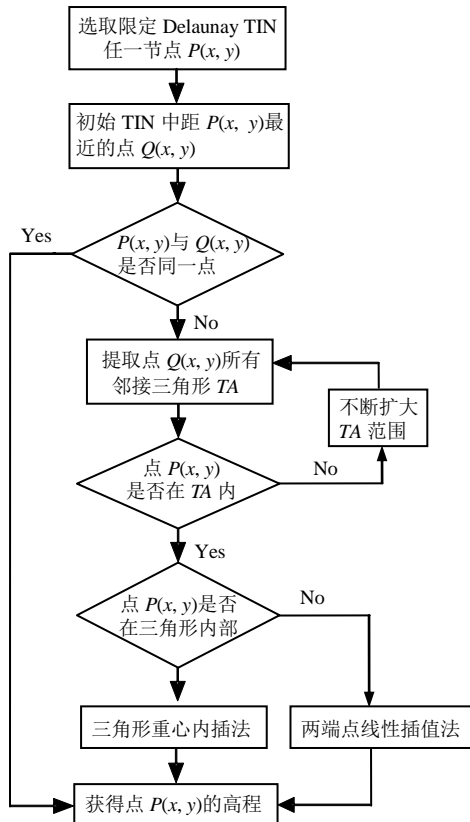


图8 新增节点高程的计算方法流程图
Fig.8 Flowchart of calculation method for new nodes' elevations

切线泊松比 U_t 表达式为

$$U_t = \frac{G - F \lg(\sigma_3 / P_a)}{\left\{ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{k P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n [1 - R_t s]} \right\}^2} \quad (6)$$

式中： D 、 G 、 F 均为试验参数。

式(4)、(6)中应力水平 s 表达式为

$$s = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \quad (7)$$

式中： φ 为内摩擦角； c 为黏聚力。

针对加卸荷判断方法，程序主要采用邓肯等人提出的加载函数：

$$S_{Level} = s \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{0.25} \quad (8)$$

当 S_{Level} 大于历史上最大值 $(S_{Level})_{max}$ 时，判为加载，否则判为卸载或者再加载。

更加详细的理论与方法可查阅相关文献[26-30]，这里不再赘述。

4.2 计算方法

非线性问题的求解方法有迭代法和增量法两种，本文在程序编写时采用中点增量法对邓肯-张 $E-\mu$ 模型进行计算求解。关于中点增量法详细理论可参考相关文献[31-32]，在 3D GIS 程序中实现的主要计算流程如图9所示。首先，需要根据最初一级荷载对模型中各单元的最大、最小主应力进行初始化，具体方法参见文献[25]；然后，计算各单元的切线弹性模量与泊松比，并通过 Numpy 数组运算比较高效地组装整体刚度矩阵；接着，通过 Scipy 求解稀疏矩阵线性方程，获得对应载荷的位移增量，并根据单元刚度矩阵计算相应应力增量；其次，如果是某一载荷步中点荷载，在已有总应力基础上添

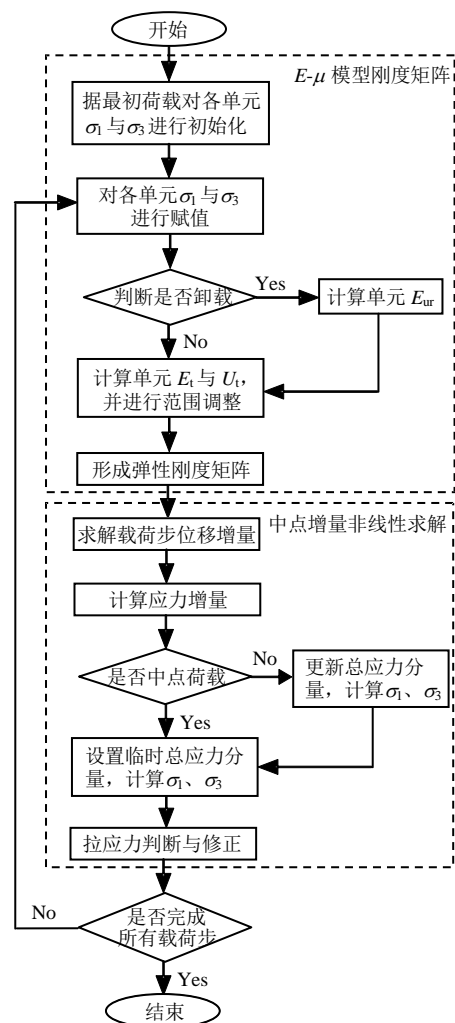


图9 邓肯-张 $E-\mu$ 模型非线性计算流程图
Fig.9 Nonlinear calculation flowchart of Duncan-Chang $E-\mu$ model

加应力增量，但只形成临时总应力分量，而不改变各载荷步对应的总应力状态。利用临时总应力张量计算得到的最大、最小主应力主要用于构建整体载荷步计算时采用的整体刚度矩阵；否则，更改总应力分量，计算各载荷步对应的应力、应变及位移。

4.3 程序验证

对新疆准东露天煤矿外排土场泥岩、砂岩等排弃物料开展室内大型三轴剪切试验，结果如表 1 所示。通过所编写的程序对试验进行模拟，圆柱体试样高为 0.6 m，底面半径为 0.15 m，模型初始 PLCs 轮廓如图 10 中红色节点与蓝色粗线条所示，设置 0.001 8 m³ 的体积约束、22° 的最小二面角以及 1.3 的径边比进行剖分获得的有限元模型节点数与四面体个数分别为 302、1118（图 10 中黑色细线条为网格轮廓线）。分别在周围表面设置 0.2、0.3、0.6 MPa 不同围压，施加与室内试验相同的轴压载荷级，对试样变形进行计算，获得的 0.6 MPa 围压下最终轴压对应的垂直方向位移如图 11 所示。同时，采用本程序与 Phase2 商业软件对不同围压下计算的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线与试验数据进行对比（如图 12 所示），三者具有较高的吻合度，进而验证了所开发程序的正确性。

表 1 邓肯-张 $E-\mu$ 模型试验参数

Table 1 Parameters for Duncan-Chang $E-\mu$ model

c/MPa	$\phi/(\text{°})$	R_f	D	k	n	F	G
0.022 504	35.77	0.75	4.00	147.23	0.61	0.11	0.21

注： R_f 、 D 、 k 、 n 、 F 、 G 为邓肯-张 $E-\mu$ 模型试验参数。

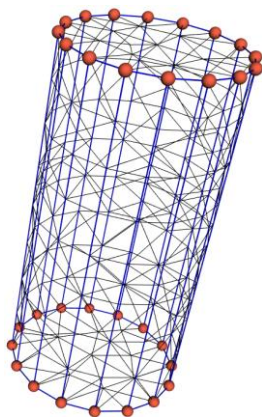


图 10 大三轴试验试样 FEM 模型

Fig.10 FEM model of the sample for triaxial test

5 工程实例

5.1 工程地质概况

神华（集团）新疆吉木萨尔能源有限责任公司准东露天矿距吉木萨尔县 120 km，距乌鲁木齐市

218 km。矿区采掘场开挖揭露主要以侏罗系、白垩系以及第四系等地层为主，主要为灰白色、灰黄色泥岩与灰黑色炭质泥岩、灰褐色细砂岩与粉砂岩、煤层以及地表砂泥层等。

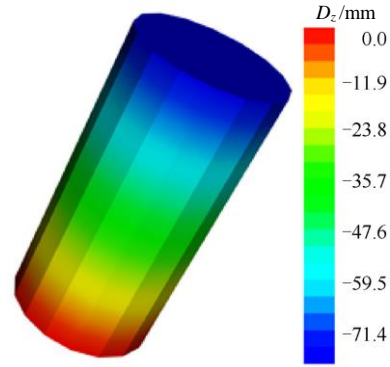


图 11 0.6 MPa 围压对应最终轴压下试样的轴向变形云图

Fig.11 Axial displacement nephogram under confined pressure of 0.6 MPa and corresponding ultimate axial loading

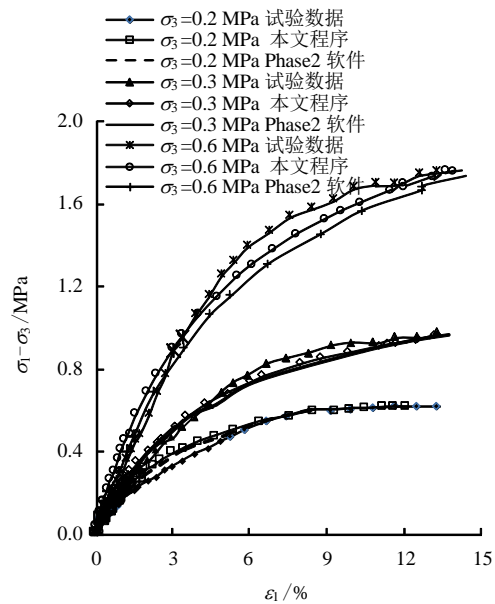


图 12 不同围压下偏应力与轴向应变曲线

Fig.12 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ under different confining pressures

截止 2016 年 4 月底，北部卡车排土场已形成 4 个排土台阶（如图 13 所示），高程分别为 +680、+660、+640、+620 m，排土台阶高度均按 20 m 设置，最终帮坡角为 6°。排土场排弃物料整体强度不高，部分泥岩表现出较强的遇水崩解特征。

5.2 北排土场堆排数值模拟

5.2.1 北排土场三维有限元模型

北排土场计算模型区域如图 13 所示，其中 X 方向宽度为 1 900 m，Y 方向长度为 2 700 m，模型

底面高程为 500 m。读取如图 13 所示的排土场 DXF 文件中三维多线段等图元，采用本文提出的插值方法，生成排土场地表 CDT 网格与表面模型分别如图 14、15 所示，通过 GRASS GIS 模块获得的排弃料不同高程与厚度分区 DEM 分别如图 16、17 所示。在构造基底、底面等基础上，结合 VTK、MeshPy 开源库等生成的三维地质模型与四面体有限元网格如图 18、19 所示。整个北排土场三维模型由排弃料与地层两种材料构成，为模拟堆排过程，根据排土场实际情况，按照高程 640 m 将排弃料分为上、下两层进行堆载。图 18 中蓝色为上层排弃料，黄色为下面一层，红色表示地层，有限元模型中节点个数为 116 834，四面体单元数为 622 848。

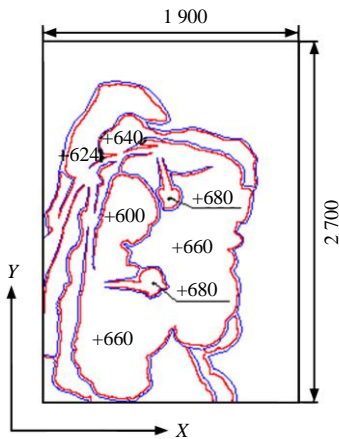


图 13 准东露天煤矿北排土场现状图 (单位: m)
Fig.13 The northern dump present status map of Zhundong open-pit coal mine (unit: m)

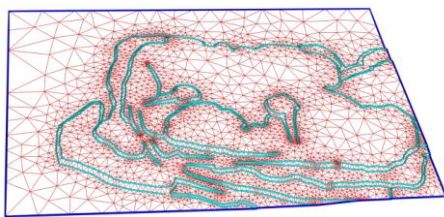


图 14 北排土场地表 CDT 网格
Fig.14 The CDT meshes of northern dump surface

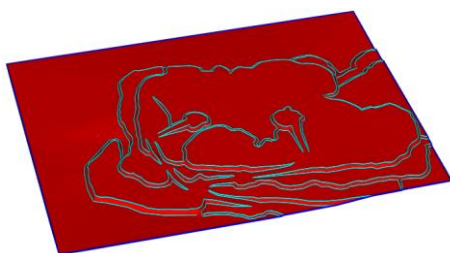


图 15 北排土场地表模型
Fig.15 The northern dump surface model

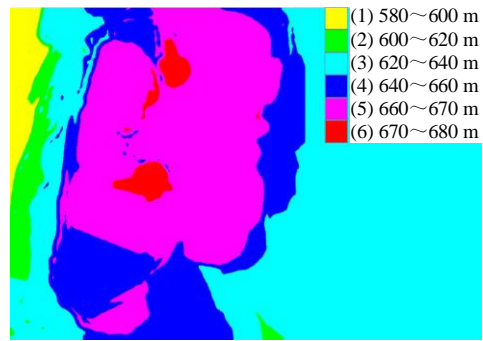


图 16 排土场地表高程分类统计
Fig.16 Classified statistic of dump surface elevation

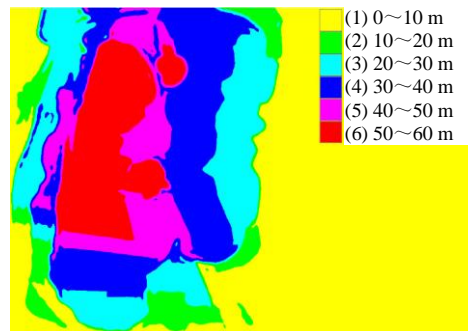


图 17 排弃物料厚度分类统计
Fig.17 Classified statistic of abandoned materials thickness

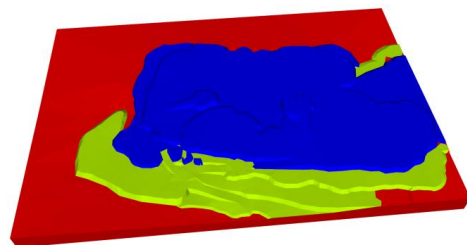


图 18 北排土场三维地质模型
Fig.18 Three-dimensional geological model of northern dump

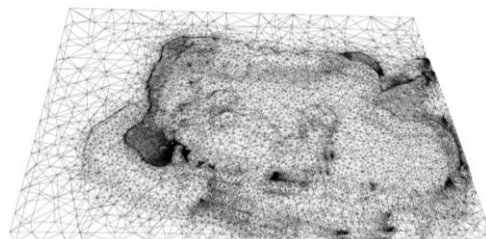


图 19 北排土场三维有限元网格
Fig.19 Three-dimensional finite element model of northern dump

5.2.2 计算参数与模拟方法

排弃物料邓肯-张模型计算参数与表 1 相同,密

度为 $1\ 970\ \text{kg/m}^3$ 。参考相关文献[33]，在主要考虑排弃物料应力、变形的情况下，为简化计算过程，地层采用弹性模型进行模拟，且为同一种材料参数，弹性模量为 $3.8\ \text{GPa}$ ，泊松比 0.28 ，密度为 $2\ 300\ \text{kg/m}^3$ 。

在排土场堆排模拟中，首先，将全部排弃料单元设置为空，仅对地层施加重力；然后，激活下面一层排弃料，并且通过多次尝试，确定分 6 次施加重力荷载；最后，对上面排弃物料重力也分 6 次进行加载。整个模拟过程中，应力不断累积，而地层重力引起的对排弃物料的位移以及下层弃料变形引起的上层弃料的位移不计入各节点总位移中。

5.3 计算结果

排土场堆排完成后，整个模型沉降如图 20 所示，由于计算中排弃物料分层数较少，排土场整体沉降表现出与所处高程或排弃料厚度（见图 16、17）较强的相关性，堆排高或弃料厚的位置沉降较大，最大累计沉降为 $5.10\ \text{m}$ ，出现在 $+680\ \text{m}$ 标高平台。图 21 为两层排弃料沉降切片展布图。图 22 表示下层弃料对应的累积沉降变形，最大沉降值为 $4.80\ \text{m}$ 。图 23 为排土场 Y 方向的位移云图，随着不断堆载，位于排土场坡面上的土体向四周变形的趋势比较明显，对于 Y 方向水平位移则主要集中在模型左、右两侧台阶坡面边缘位置，位移量约 $0.60\ \text{m}$ ，与实际变形情况基本吻合。

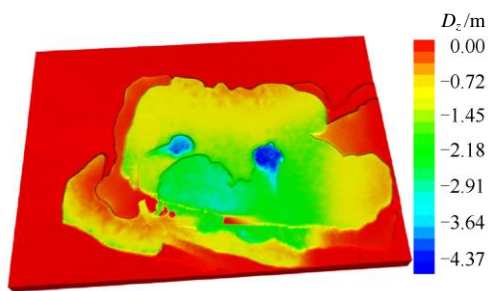


图 20 堆排完成后排土场沉降云图
Fig.20 Vertical displacement nephogram after piling

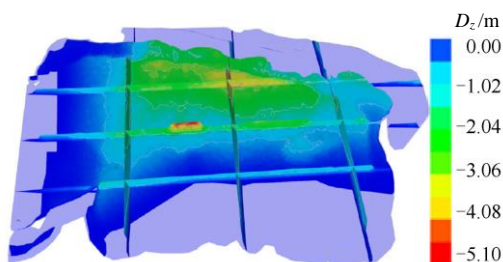


图 21 堆排完成后排土场沉降切片云图
Fig.21 Vertical displacement slice nephogram after piling

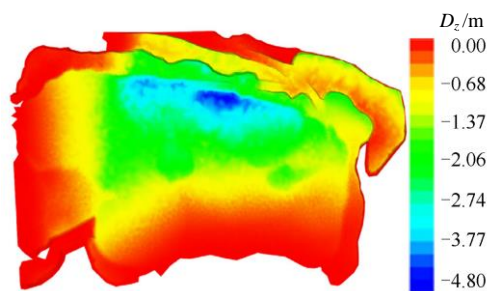


图 22 堆排完成后下层排弃料沉降云图
Fig.22 Settlement nephogram of lower abandoned materials after piling

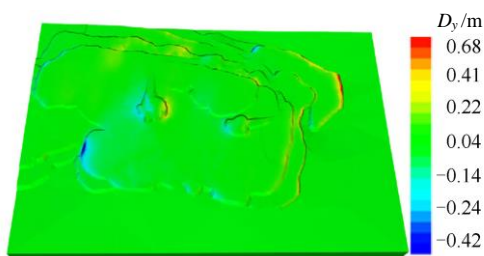


图 23 Y 方向位移云图
Fig.23 Displacement nephogram in direction of Y

6 结 论

(1) 采用 Python 语言将 MeshPy、GRASS GIS、vtkPython 等各种开源库进行“黏合”，能够高效地构建 GIS 与三维有限元无缝耦合平台，避免了大量数据在 GIS 与有限元软件之间的频繁传输。同时，源代码可根据需要直接进行修改，极大提高程序编写的灵活性。

(2) MeshPy 包含了 Triangle 与 TetGen 库，通过设置角度、面积以及体积等约束条件，在生成优质三角形网格表面模型的同时，还可以对由三角形面片组成的 BRep 三维模型进行网格剖分，获得适合于有限元数值计算的四面体网格。

(3) 针对排土场地表建模，根据限定 Delaunay 三角形剖分 (CDT) 网格新增节点在原始 TIN 网格中所处位置的不同，提出综合采用线性与三角形重心坐标的插值算法，有效消除了其他插值方法导致的部分高程畸变与实际不符的现象。

(4) 对神华新疆准东露天煤矿北排土场排弃料室内大型三轴剪切试验与北排土场堆排过程进行三维有限元数值模拟，计算结果与 Phase2 商业软件模拟以及试验情况相符，验证了基于底层开发的邓肯-张 $E-\mu$ 模型与中点增量非线性求解模块的正确性，也进一步表明本文提出的基于 MeshPy 的 3D GIS 与有限元无缝耦合与平台开发方法的可行性。

(5) 在 3D GIS 中植入有限元数值计算功能，将

极大地扩展 GIS 在岩土工程中的应用范围。本文虽然开展了一些探索、实践性的研究工作,获得了一些粗浅的认识,但仍然存在许多需进一步完善的地方,如目前只开发了线弹性与邓肯-张 $E-\mu$ 模型,只包含三角形与四面体线性单元,不能完全满足基础研究与应用的要求,要在今后的工作中不断改进。

参 考 文 献

- [1] 谢谟文, 蔡美峰, 江崎哲郎. 基于 GIS 边坡稳定性三维极限平衡方法的开发及应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 117—123.
XIE Mo-wen, CAI Mei-feng, ESAKI Tetsuro. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 117—123.
- [2] 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 Ri-bo. Slope stability evaluation based on GIS and numerical simulation[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2008, 22(2): 71—75.
- [3] 谷天峰, 王家鼎, 付新平. 基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法[J]. 地理科学, 2013, 22(11): 1400—1406.
GU Tian-feng, WANG Jia-ding, FU Xin-ping. Regional slope stability analysis method based on the slope unit[J]. **Scientia Geographica Sinica**, 2013, 22(11): 1400—1406.
- [4] 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.
- [5] 王涛, 陈晓玲, 杨建. 基于 3D GIS 和 3DEC 的地下洞室围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3476—3482.
WANG Tao, CHEN Xiao-ling, YANG Jian. Study on stability of underground cavern based on 3D GIS and 3DEC[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3476—3482.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] RIENZO F DE, ORESTE P, PELIZZA S. Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning[J]. **Engineering Geology**, 2008, 96(3): 187—204.
- [12] YOO Chungsik, JEON Young-woo, CHOI Byoung-suk. IT-based tunnelling risk management system (IT-TURISK)—Development and implementation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(2): 190—202.
- [13] 吴火珍, 焦玉勇, 李海波, 等. 复杂区域三维有限元四面体网格自动生成研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3479—3487.

- WU Huo-zhen, JIAO Yu-yong, LI Hai-bo, et al. Study of 3D finite element tetrahedral mesh automatic generation for complex regions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3479—3487.
- [14] 徐能雄, 段庆伟, 田红, 等. 岩体结构三维无缝建模与四面体优化剖分[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2811—2817.
- XU Neng-xiong, DUAN Qing-wei, TIAN Hong, et al. 3D seamless modeling of rock-mass structure and its optimizing tetrahedral mesh generation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2811—2817.
- [15] 余淑娟, 郭飞, 李想, 等. 约束 Delaunay 四面体剖分在三维地质建模中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(1): 41—45.
- YU Shu-juan, GUO Fei, LI Xiang, et al. Application of constrained Delaunay tetrahedralization in 3D geological modeling[J]. **Geography and Geo-Information Science**, 2013, 29(1): 41—45.
- [16] 荆永滨, 王李管, 贾明涛, 等. 基于 TetGen 的复杂 FLAC3D 模型可视化建模方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2655—2661.
- JING Yong-bin, WANG Li-guan, JIA Ming-tao, et al. Visual modeling of complex FLAC3D model based on TetGen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2655—2661.
- [17] 孙黎明, 李青元, 谭海, 等. 基于 Netgen 的层状地质体四面体网格划分方法[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(3): 47—53.
- SUN Li-ming, LI Qing-yuan, TAN Hai, et al. Tetrahedral mesh algorithm for stratified geological body based on Netgen[J]. **Computer Aided Engineering**, 2013, 22(3): 47—53.
- [18] MERGILI M, MARCHESINI I, ROSSI M, et al. Spatially distributed three-dimensional slope stability modelling in a raster GIS[J]. **Geomorphology**, 2014, 206(2): 178—195.
- [19] 刘振平, 杨波, 刘建, 等. 基于 GRASS GIS 与 TIN 滑动面的边坡三维极限平衡方法研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 221—228.
- LIU Zhen-ping, YANG Bo, LIU Jian, et al. Three-dimensional limit equilibrium method based on GRASS GIS and TIN sliding surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 221—228.
- [20] SHEWCHUK J R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. **Computational Geometry: Theory and Applications**, 2014, 47(7): 741—778.
- [21] SI H, GAERTNER K. 3D boundary recovery by constrained Delaunay tetrahedralization[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2011, 85(11): 1341—1364.
- [22] SI H, GAERTNER K. Meshing piecewise linear complexes by constrained Delaunay tetrahedralizations[C]//Proceedings of the 14th International Meshing Roundtable. [S. l.]: [s. n.], 2005: 147—163.
- [23] SI H. TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator[J]. **Acm Transactions on Mathematical Software**, 2015, 41(2): 1—36.
- [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: 274—280.
- [25] RUPPERT J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation[J]. **Journal of Algorithms**, 1995, 18(3): 548—585.
- [26] 刘根保. 基于邓肯-张模型的垃圾土强度特性及边坡稳定性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010: 38.
- LIU Gen-bao. Study on municipal solid waste strength characteristic and slope stability analysis based on Duncan-Chang model[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010: 38.
- [27] 冷先伦, 盛谦, 朱泽奇, 等. 邓肯-张模型在 FLAC3D 中的实现及工程应用[J]. 建筑科学, 2009, 25(1): 100—106.
- LENG Xian-lun, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Duncan-Chang model's realization and engineering application in FLAC3D[J]. **Building Science**, 2009, 25(1): 100—106.
- [28] 陈育民, 刘汉龙. 邓肯-张本构模型在 FLAC3D 中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2123—2127.
- CHEN Yu-min, LIU Han-long. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC3D[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2123—2127.
- [29] 田堪良, 张慧莉, 骆亚生. 堆石料的剪切强度与应力-应变特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 657—662.
- TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, LUO Ya-sheng. Shear strength and stress-strain properties of rockfill

- materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 657—662.
- [30] 俞缙, 李天斌, 郑春婷, 等. 滨海相软土延拓邓肯-张模型的数值模拟研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(增刊 2): 4271—4282.
- YU Jin, LI Tian-bin, ZHENG Chun-ting, et al. Numerical simulation research on prolongation Duncan-Chang model for seashore soft soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp. 2): 4271—4282.
- [31] 周小义, 邓安福. 岩土体非线性分析的数值流形方法[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(2): 298—303.
- ZHOU Xiao-yi, DENG An-fu. Numerical manifold method of nonlinear analysis for rock and soil mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(2): 298—303.
- [32] 周小义, 邓安福. 六面体有限覆盖的三维数值流形方法的非线性分析[J]. **岩土力学**, 2010, 31(2): 2276—2283.
- ZHOU Xiao-yi, DENG An-fu. Nonlinear analysis of three-dimensional numerical manifold method with hexahedron finite covers[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 2276—2283.
- [33] 神华新疆吉木萨尔能源有限责任公司. 准东煤矿 2016 年度边坡稳定性分析、评价及验算成果报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2016.
- Shenhua Xinjiang Jimsar Energy Co., Ltd. Slope stability analysis and evaluation and calculation results report of Zhundong coal mine in 2016[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2016.

《岩土力学》2018 年第 1 期被 EI 收录论文 (45 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	重力式挡土墙抗滑稳定容许安全系数取值标准初探	陈祖煜, 黎康平, 李旭, 等	1—10
2	多夹层盐矿地下储气库气体渗漏评价方法	陈祥胜, 李银平, 尹洪武, 等	11—20
3	西部典型矿区风积沙含水层突水溃沙的起动条件与运移特征	杨鑫, 徐曾和, 杨天鸿, 等	21—28
4	CaO 对钙矾石固化/稳定化重金属铅污染土的影响	章定文, 项莲, 曹智国	29—35
5	循环加载方向角对饱和粉土不排水动力特性的影响	周正龙, 陈国兴, 赵凯, 等	36—44
6	高速铁路小变形下陡坡地基路肩桩板墙力学响应	谢涛, 罗强, 周成, 等	45—52
7	张开穿透型单裂隙岩体三轴卸荷蠕变特性试验	杨超, 黄达, 蔡睿, 等	53—62
8	洪水致弯曲河道挡墙稳定性衰变	张瑞刚, 许光祥, 王林峰, 等	63—70
9	考虑超固结效应的不同温度路径下饱和粉质黏土的热固结	杨光昌, 白冰	71—77
10	低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探	黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等	78—84
11	土层锚固体应力传递机制	尤志嘉, 付厚利, 尤春安, 等	85—92
12	含石量对土石混合体剪切特性的影响	唐建一, 徐东升, 刘华北	93—102
13	卸压区不同钻孔长度抽采条件下瓦斯运移特性试验	许江, 苏小鹏, 彭守建, 等	103—111
14	胶结结构性土统一硬化模型	祝恩阳, 李晓强	112—122
15	考虑吸力效应的非饱和黏土回弹模量预估模型	钱劲松, 李嘉洋, 周定, 等	123—128
16	盐溶液饱和黏土的等向压缩特性	颜荣涛, 赵续月, 于明波, 等	129—138
17	无黏性土中筒型基础负压下沉模型试验	祁越, 刘润, 练继建	139—150
18	抗剪强度分项系数的标准差反馈标定法	朱勇, 冯夏庭, 周辉, 等	151—157
19	冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响	刘寒冰, 张互助, 王静	158—164
20	大位移剪切下钙质砂破碎演化特性	何建乔, 魏厚振, 孟庆山, 等	165—172
21	三类边坡失稳判据的统一性	涂义亮, 刘新荣, 钟祖良, 等	173—180
22	双线盾构施工时邻近地下管线安全性判别	魏纲, 林雄, 金睿, 等	181—190
23	复杂应力路径下原煤力学与渗透特性试验	刘超, 黄滚, 赵宏刚, 等	191—198
24	南海钙质砂宏观细观破碎力学特性	汪轶群, 洪义, 国振, 等	199—206
25	川西北茂县群千枚岩各向异性力学特性	吴永胜, 谭忠盛, 喻渝, 等	207—215
26	基于量纲分析的岩石相似材料抗压强度计算模型	岳哲, 叶义成, 王其虎, 等	216—221
27	植被作用下土质覆盖层渗透特性的现场试验	陈晋龙, 李锦辉, 程鹏, 等	222—228
28	水平荷载下纵截面异形桩承载特性试验	孔纲强, 彭怀风, 朱希, 等	229—236

(未完, 见第 3862 页)