

基于 Hovland 改进模型与约束 Delaunay TIN 的三维边坡稳定性分析方法

刘振平, 刘 建, 杜根明, 贺怀建, 卞 康

(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)

摘要: 针对目前三维极限平衡方法研究与应用存在的不足, 在 Hovland 三维模型基础上通过调整 Hovland 模型与修正 Hovland 模型中单元滑动面上垂直压力的表达形式, 提出 Hovland 改进模型与修正 Hovland 改进模型, 并借助 GRASS GIS 软件对某经典三维边坡稳定性分析算题进行验算, 结果表明: 在同一栅格模型与相同分辨率条件下, 改进后的计算模型获得的安全系数精度更高; 通过 Delaunay 网格剖分算法生成满足点、线及三角形面积等约束条件的 TIN, 结合 Hovland 改进模型, 提出基于约束 Delaunay TIN 三棱柱单元的边坡地质模型构建与稳定性分析方法, 获得了比三维栅格模型高的计算精度, 尤其在采用改进后的 Hovland 模型计算时, 精度提升更加明显; 考虑到分析方法在实际工程中的推广应用, 围绕三棱柱边坡地质模型经济性与计算结果准确性两个影响计算效率的主要因素, 研究了三角形个数、稳定性系数随最小三角形约束面积的变化规律, 提出 Delaunay TIN 最优网格剖分面积评判指标, 并给出了 1/412 ~ 1/206 的建议值。黑山露天煤矿工程实例表明, 潜在滑坡体中部与后缘产生的阻滑作用, 是采掘场南帮边坡稳定性系数较高的主要原因。

关键词: 边坡工程; 地理信息系统; 边坡稳定性; Hovland 模型; 约束 Delaunay; 安全系数

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增 1-3214-10

Three-dimensional slope stability analysis method based on Hovland improved model and constraint Delaunay TIN

LIU Zhenping, LIU Jian, DU Genming, HE Huaijian, BIAN Kang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: For the deficiency of research and application of the three-dimensional limit equilibrium method, the Hovland improved model and revised Hovland improved model were put forward after modifying the calculating method of vertical force on the element sliding surface in Hovland model and revised Hovland model, whose force analysis is relatively reasonable. Using the GRASS GIS software for the verification of one three-dimensional slope stability analysis, the results shows that when the resolution of grid model is the same the precision of stability factor calculated by improved Hovland models is higher. The slope geologic model construction and stability analysis method based on constraint Delaunay TIN tri-prism elements were presented by introducing Delaunay mesh generation algorithm which can take points, lines, triangle area constraints into consideration. By

收稿日期: 2016-08-10; **修回日期:** 2016-11-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2016YFC0401802); 国家自然科学基金重点项目(51539002); 国家自然科学基金青年基金项目(51204158) Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2016YFC0401802), Key Program of National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51539002) and National Natural Science Foundation for Young Scientists of China(Grant No. 51204158)

作者简介: 刘振平(1981-), 男, 2010 年于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程专业获博士学位, 现任副研究员, 主要从事岩土工程地质灾害评估与三维可视化技术方面的研究工作。E-mail: liuzhenping_2000@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1031

adopting the tri-prism slope geologic model ,the precision of various calculation models was improved effectively , especially in the case of using Hovland improved calculation models brought up in this paper. Considering the computational efficiency and the balance between calculation accuracy and economy of tri-prism slope geologic model , the research of analyzing the variation of the number of triangles and the stability factor with the minimum triangle area was carried out and the optimal area evaluation index proposed is $1/412 - 1/206$ in Delaunay TIN subdivision. The engineering case study of Heishan open-pit coal mine indicated that the effects of sliding resistance formed in the middle and front of landslide are the main cause leading to high slope safety coefficient in the southern slope.

Key words : slope engineering ; GIS ; slope stability ; Hovland model ; constraint Delaunay ; safety factor

1 引 言

边坡稳定问题一直是岩土工程领域研究的重要课题,而极限平衡方法在边坡稳定性计算中应用最为广泛。尤其是地理信息系统 GIS(geographic information system)的兴起与发展,为三维边坡极限平衡分析中所涉及的复杂空间分布的地形、地层、岩土体参数以及地下水等数据提供了一个强大的空间信息存储、处理、分析以及可视化平台^[1-2],有力地推动了边坡稳定性三维极限平衡方法的研究与平台的开发^[3]。

在基于 GIS 的三维极限平衡方法研究中,大多数学者都采用栅格数据结构,如 M. W. Xie 等^[4-5]结合 GIS 三维栅格数据结构和改进的 Hovland 模型,提出了基于 GIS 的三维边坡稳定分析模型。邱 骋等^[6]采用基于三维 GIS 栅格数据结构与三维极限平衡方法,对某住宅周边区域滑坡稳定性进行评价。王旭春等^[7]在 GIS 中采用栅格数据结构实现了基于力学原理的滑坡稳定性计算的有效途径及方法。谷天峰等^[8]利用 GIS 中的 Grid 模型生成区域斜坡稳定性分区图。然而,在 GIS 中除了栅格数据模型之外,还包含 TIN 模型,在此方面也有一些学者针对具体建模方法开展了相关的研究工作,如徐帮树等^[9]研究了基于 TIN 的边坡三棱柱有限元网格生成方法。刘汉龙等^[10]给出了一种用于地下开挖地表沉陷计算的和岩土体应力分析的有限棱柱法,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。吴江斌和朱合华^[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。刘唱晓等^[12]对基于三棱柱地层单元的桩基可视化方法进行了研究。除此之外,还有很多学者也在这些领域开展了大量的研究工作,这里不一一列举。

采用栅格数据结构开展三维边坡极限平衡方法研究,能够降低程序实现的复杂程度,但是栅格单元在表达滑动面时,一方面,4 个顶点通常不在同

一空间平面上,在计算单元下滑力时只能采用各单元中心点形成的高程梯度来对重力进行分解,这将会在一定程度上影响计算结果的准确性;另一方面,若用栅格模型较精确地表达模拟对象的边界或考虑约束条件,所需的栅格数量将非常庞大,会给问题的求解带来极大的困难。而 TIN 模型将滑动面离散为三角形面片,通过三角形的边可以较准确地描述模型的边界,在三角形剖分中也能够方便地考虑点、线等约束条件,可以弥补栅格单元存在的不足。然而,采用 TIN 模型开展边坡极限平衡方法研究的成果较少,而在 TIN 模型生成过程中通过 Delaunay 网格剖分算法考虑三角形约束条件的就更不多见。

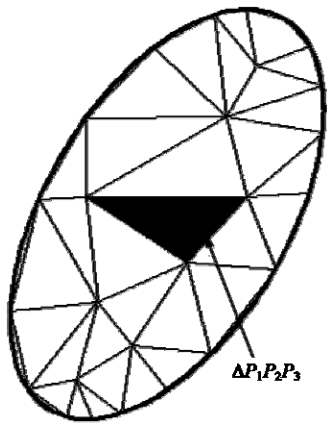
因此,本文将结合所提出的 Hovland 改进模型,考虑三角形网格剖分约束条件,在提出基于约束 Delaunay TIN 的三维边坡地质模型构建方法基础上,开展三维边坡极限平衡方法的相关研究工作,并对影响模型准确性与经济性的评价指标进行探讨。

2 Hovland 改进模型与算例验证

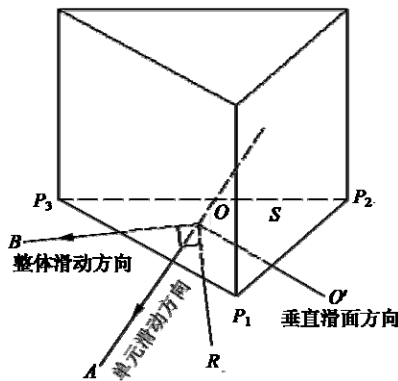
2.1 Hovland 改进模型

在采用 Hovland 三维模型计算边坡稳定性系数时,需要将滑动面剖分成正方形或者三角形网格,再将坡体离散为棱柱单元。常用的棱柱单元为四棱柱,通过栅格单元或者正方形在垂直方向拉伸来生成,也有三棱柱单元,采用 TIN 网格或者三角形在垂直方向拉伸来获得。Hovland 三维模型忽略棱柱之间的相互作用力,只考虑柱体单元抗滑力与下滑力,通过计算滑动面上覆的多个棱柱单元抗滑力与下滑力代数和的比值来获得边坡稳定性系数。但是坡体潜在滑动面通常为一空间曲面,不同柱体单元在滑动面位置对应的三角形倾角、倾向不同,对应的棱柱单元滑动方向与边坡整体滑动方向也不一致,导致每个棱柱单元对边坡整体安全系数贡献也不相同,需要对两者之间的关系进行转换。

图 1(a)为一椭圆滑动面三角形网格分布情况，图 1(b)为某一棱柱在三角形滑动面 $P_1P_2P_3$ 中单元滑动方向 OA 与边坡滑动方向之间的空间位置关系。其中， OA, OB, OR 以及三角形滑动面 $P_1P_2P_3$ 都位于平面 S 上， OA 为平面 S 真倾角方向， OB 为边坡滑动方向在平面 S 上的垂直投影，本文称之为整体滑动方向， OO' 为平面 S 法向， OR 垂直于整体滑动方向 OB 。



(a) 椭圆滑动面 TIN



(b) 三棱柱滑动方向

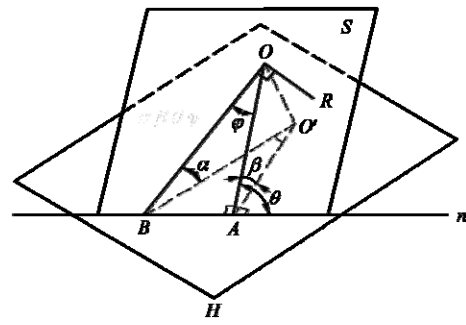
图 1 单元滑动方向与整体滑动方向
Fig.1 Elemental and whole sliding direction

图 2(a)表示平面 S 与水平面之间的空间位置关系。其中， H 为水平面， n 为 H 与平面 S 交线， θ 为单元滑动面 S 的真倾角， α 为整体滑动方向 OB 在单元滑动面 S 上的视倾角， φ 为 OA 与 OB 之间夹角， β 为 $O'A$ 与 $O'B$ 之间夹角， θ, α, φ 以及 β 之间的关系如下式所示：

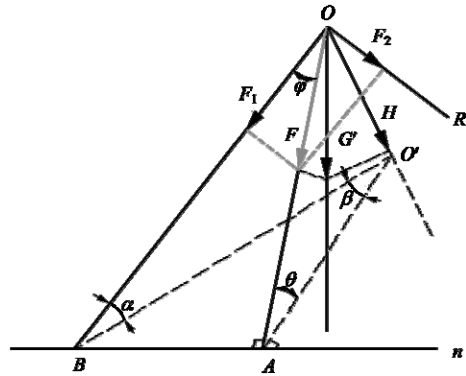
$$\tan \alpha = \tan \theta \tan \beta \tag{1}$$

$$\cos \varphi = OA/OB = \sin \alpha / \sin \theta \tag{2}$$

通过 GIS 获得单元滑动面 S 的坡度、坡向后，利用式(1)可计算 α 。图 2(b)为有效重力 G' 空间分解示意图，其中， F 与 N 分别表示有效重力 G' 在 OA



(a) 三角形滑动面与水平面空间关系示意图



(b) 有效重力 G' 空间分解示意图

图 2 有效重力空间分解示意图

Fig.2 The spatial decomposition diagram of effective gravity

与 OO' 方向分解得到的下滑力与垂直压力， F_1 与 F_2 表示 F 在 OB 与 OR 方向分解得到的下滑力分量。通过计算可知，在 Hovland 的三维模型^[13]中，棱柱单元有效重力 G' 对应的下滑力 F_1 与垂直压力 N 分别如下所示：

$$F_1 = F \cos \varphi = G' \sin \alpha \tag{3}$$

$$N = G' \cos \theta \tag{4}$$

对应 Hovland 的三维模型如下所示：

$$SF_{3D} = \frac{\sum_k (cA + N \tan \varphi)}{\sum_k F_1} = \frac{\sum_k (cA + G' \cos \theta \tan \varphi)}{\sum_k G' \sin \alpha} \tag{5}$$

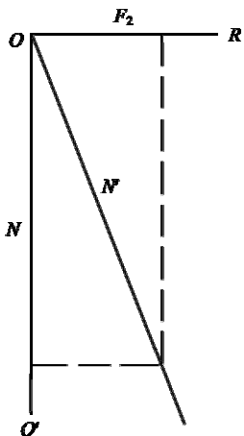
式中： φ 为滑动面内摩擦角， c 为黏聚力， A 为单元滑动面积。

由图 1, 2 与式(3)~(5)可知，为了获得边坡在整体滑动方向上的安全系数，Hovland 三维模型只考虑了单元下滑力 F 的分量 F_1 ，忽略了 F_2 的影响。笔者认为对于单个三角形滑动面而言，由于 F_2 垂直于 F_1 ，在计算单元安全系数时可不考虑 F_2 的作用，但是在分析整体边坡稳定性时， F_2 与垂直压力 N 的共同作用将对坡体滑动产生影响，需要根据 F_2 与 N 的合力对 Hovland 三维模型中垂直压力的大小进行

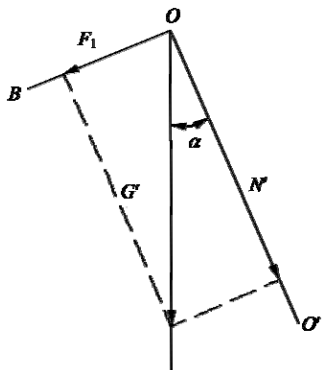
调整。图 3(a)为 F_2 与 N 合力图，调整后获得的 N' 计算过程如下：

$$F_2 = G' \sin \theta \sin \varphi \tag{6}$$

$$N'^2 = F_2^2 + N^2 \tag{7}$$



(a) F_2 与 N 合力图



(b) 有效重力在整体滑动方向上受力分解

图 3 垂直压力 N' 的获取

Fig.3 Calculation of vertical force N'

将式(2)，(4)及(6)代入式(7)，可得到 N' 如下：

$$N' = G' \cos \alpha \tag{8}$$

因此，在 Hovland 三维模型中，当每个单元有效重力 G' 分解得到的下滑力仅考虑分力 F_1 时，对应的垂直压力 N 应调整为 N' 。并且式(8)与有效重力 G' 在整体滑动方向 OB 进行受力分解获得的结果相同(见图 3(b))。

对式(5)按照式(8)进行调整，即为本文提出的 Hovland 改进模型，如下所示：

$$SF_{3D} = \frac{\sum_k (cA + N' \tan \varphi)}{\sum_k F_1} = \frac{\sum_k (cA + G' \cos \alpha \tan \varphi)}{\sum_k G' \sin \alpha} \tag{9}$$

在式(9)中，当 $k = 1$ 时，则表示某一棱柱单元的安全系数。考虑加固、地震等影响因素后，表达式(9)形式如下：

$$SF_{3D} = \frac{\sum_k \{cA + [(G' + P) \cos \alpha - U] \tan \varphi\}}{\sum_k [(G' + P) \sin \alpha + \eta G'] - E} \tag{10}$$

式中： P 为土体棱柱单元上的垂直荷载， η 为地震水平加速度系数， E 为加固效果的水平方向总力。

此前，谢谟文等^[3]提出修正 Hovland 模型，表达式如下：

$$SF_{3D} = \frac{\sum_k \{cA + [(G' + P) \cos \theta - U] \tan \varphi\} \cos \alpha}{\sum_k [(G' + P) \sin \alpha \cos \alpha + \eta G'] - E} \tag{11}$$

按照式(8)对式(11)中垂直压力部分进行调整，获得修正 Hovland 改进模型如下：

$$SF_{3D} = \frac{\sum_k \{cA + [(G' + P) \cos \alpha - U] \tan \varphi\} \cos \alpha}{\sum_k [(G' + P) \sin \alpha \cos \alpha + \eta G'] - E} \tag{12}$$

2.2 算例验证

选择栅格数据结构，采用开源 GRASS GIS 软件^[14-15]与自己编写程序模块，通过图 4 所示的一经典三维边坡稳定性分析算题对本文所提 Hovland 改进模型的正确性进行验证。算例中有效黏聚力 c 与土体重度 γ 比值为 0.116，而有效内摩擦角 φ 设为 15° ，滑动面形态采用半径为 R 球面表达，半径分别为 2.02 与 2.16 m，圆心分别为 $C1$ 与 $C2$ 。将本文提出的 Hovland 改进模型(式 9)、修正 Hovland 改进模型(式(12))与 M. Mergili 等^[15-16]中采用的 Hovland 模型(式(5))、修正 Hovland 模型(式(11))以及 Bishop^{3D} 和 Janbu^{3D} 模型计算的安全系数进行对比(见表 1，其中文献中提供的安全系数只有 2 位小数，其他为本文计算所得)，结果表明：

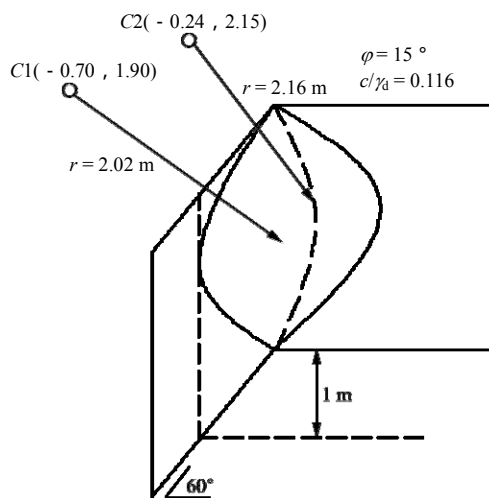


图 4 三维圆弧滑动面边坡算例

Fig.4 Slope example of 3D circular sliding surface

(1) 随着网格单元尺寸的减小或者分辨率的增

表 1 不同模型安全系数对比

Table 1 Comparison of safety factors using different models

模型	圆心	单元尺寸		
		0.10 m	0.05 m	0.02 m
Hovland	C1	1.16	1.18	1.190
	C2	1.26	1.27	1.280
修正 Hovland	C1	-	-	1.180
	C2	-	-	1.270
Bishop ^{3D}	C1	-	-	1.200
	C2	-	-	1.310
Janbu ^{3D}	C1	-	-	1.220
	C2	-	-	1.290
Hovland 改进模型	C1	1.181	1.191	1.195
	C2	1.291	1.298	1.304
修正 Hovland 改进模型	C1	1.181	1.190	1.195
	C2	1.300	1.306	1.312

注：0.10，0.05，0.02 m 表示 Grid 网格单元尺寸。

大，所有计算模型得到的安全系数精度都有所提高；

(2) 在相同网格分辨率条件下，本文提出的 Hovland 改进模型与修正 Hovland 改进模型计算的安全系数精度最高，且在较低网格分辨率条件下即可获得其他计算模型在较高分辨率条件下得到的安全系数；

(3) 本文提出的模型获得的安全系数更加接近 M. W. Xie 等^[16]中 Bishop^{3D} 和 Janbu^{3D} 模型的计算结果。

3 基于 Delaunay TIN 的三维边坡稳定性分析方法

Grid 模型为固定大小且均匀分布的栅格，很难准确表达地层边界或者特征约束点与约束线，这将导致模型在计算边坡稳定性系数时产生一定的误差。通过研究基于 TIN 的边坡三棱柱模型可以弥补这一不足，但由于 TIN 中三角形个数与边坡模型中三棱柱单元一一对应，三角形网格数量与质量的控制对于边坡稳定性系数计算精度与效率都将产生较大的影响，同样需要开展相关研究。

3.1 约束 Delaunay TIN 三棱柱边坡地质模型

3.1.1 构建各地层统一的 Delaunay TIN 模型

通过引入 Delaunay 网格剖分算法^[17-19]，采用 J. R. Shewchuk^[19]提供的 C 语言 Triangle 函数与笔者编写的 Python 接口程序，将边坡开挖轮廓线、地表等

高线、山谷与山脊线、地下水位线等各种特征线与钻孔揭示的地层分界点或者建模中必须考虑的特征点作为约束边界，并设置最大内角或最小三角形面积约束条件，对模型区域进行网格剖分，获得能够充分表达各地层特征并符合 Delaunay 特性的三角形平面网格，形成包括地表在内的所有地层统一的节点位置与拓扑结构信息。图 5 为一约束 Delaunay TIN 剖分实例，整个区域为正方形，边长为 5 m，中间小正方形边长为 2 m，白色粗线条表示各约束边，红色圆点代表特征点。在实例网格剖分过程中，所有三角形的最大内角约束条件为 30°，中间正方形区域内三角形剖分最小面积设为 0.02，其余区域为 0.1。最终 Delaunay TIN 模型的三角形个数为 2 893，顶点数为 1 505。

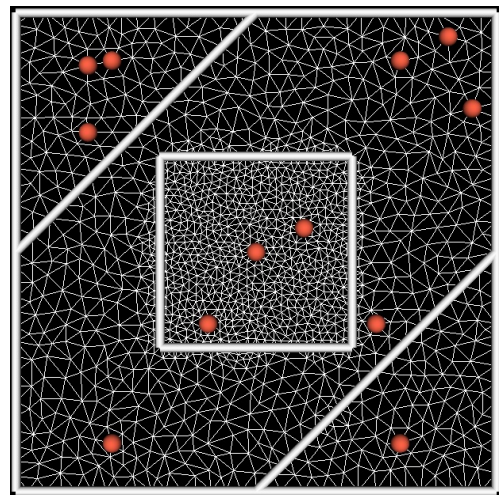


图 5 Delaunay TIN 剖分实例图

Fig.5 Example of Delaunay TIN subdivision

3.1.2 三维边坡地层建模

(1) 地层曲面的构建

在所获得的各地层统一的 Delaunay TIN 中，通过插值手段获得各节点不同地层(包括地表与地下水位面)的高程，形成各地层三维曲面。

(2) 地层层序的调整

插值结果有时会导致某些三维曲面在一些节点上高程值与实际地层层序不符，需要对这部分高程值进行调整，确保下部地层三维曲面任意节点所处位置不高于上部地层对应节点。假设边坡模型某一三棱柱单元中地层 ABC 与 DEF 的正常层序如图 6(a) 所示，对应的 ABCDEF 为三棱柱网格，在插值过程中可能会出现图 6(b)，(c)，(d) 三种错误情况，为保证地层层序的一致性，将地层 DEF 中错误的高程修正为地层 ABC 对应节点的高程。对于图 6(b)，(c)，

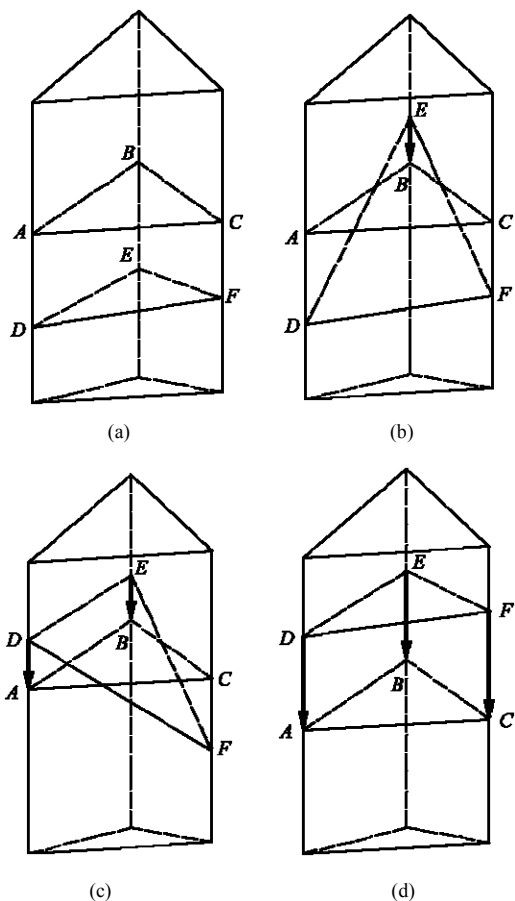


图 6 地层层序调整方法

Fig.6 Adjustment method of stratigraphic sequence

ABCDEF 分别退化为金字塔与四面体网格，图 6(d) 则形成了三角形，表示地层尖灭的情况。

(3) 三维边坡地质模型

在各地层统一的 Delaunay TIN 中，每个三角形对应一个三棱柱单元，根据不同地层各节点几何信息，构建并记录所有三棱柱单元中四面体、金字塔以及三棱柱网格的拓扑信息，设置网格对应的地层属性，建立三维边坡地质模型。

3.2 边坡三维稳定性分析方法

在已建立的三维边坡地质模型中，为实现边坡稳定性计算，需要确定椭球滑动面在各三棱柱单元中所处的位置与空间形态，进而获得滑动面各三角形上覆岩土体的重力，并计算边坡安全系数。下面以单个三棱柱单元为例对其实现方法进行介绍。

在图 7 所示的三棱柱单元中，首先，通过直线与椭球求交公式获得滑动面三角形顶点 P_1, P_2, P_3 以及三角形中心点的高程，具体方法参见 M. Neteler 和 H. Mitasova^[14] 的研究；其次，计算三棱柱单元中各地层(包括地表与地下水水位)三角形中心点(见图 7 中圆点)高程，判断滑动面与各地层的相对位置，保

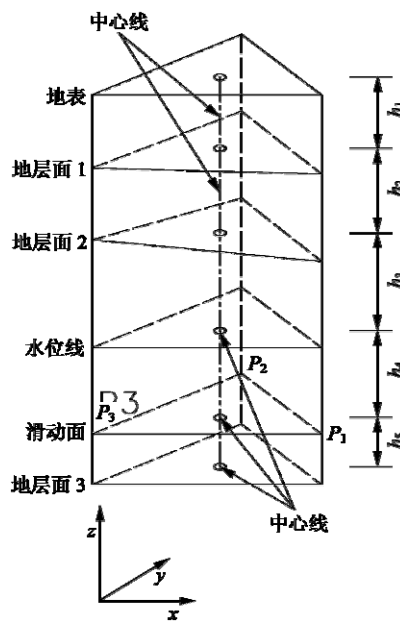


图 7 滑动面在三棱柱单元中的定位

Fig.7 Positioning of sliding surface in tri-prism elements

留中心点低于地表的滑动面三角形，并根据所处的地层确定滑动面的抗剪强度参数；然后，通过各中心点高程得到不同岩层厚度(如图 7 中标注的 h_1, h_2, \dots)，并计算滑动面三角形 $P_1P_2P_3$ 上覆各岩层总重量；最后，根据顶点 P_1, P_2 与 P_3 计算对应滑动面三角形的倾角、倾向，结合相应的计算模型，即可获得该三棱柱单元抗滑力、下滑力以及安全系数。

3.3 算例验证

同样以图 4 所示算题为例，对本文提出的基于 Delaunay TIN 的边坡地质模型与稳定性分析方法的正确性进行验证。考虑到分辨率的一致性，当 Grid 网格单元尺寸分别为 0.1, 0.05 以及 0.02 m 时，对应的 Delaunay 网格中最小三角形面积约束设定为 0.01, 0.002 5 以及 0.000 4 m^2 ，分别采用 Hovland 改进模型(式(9))、修正 Hovland 改进模型(式(12))与 Hovland 模型(式(5))、修正 Hovland 模型(式(11))进行计算，得到的安全系数见表 2，由表 2 可知：

- (1) 在相同分辨率条件下，本文提出的 Hovland 改进模型计算结果精度最高；
- (2) 对比表 1 与 2，在相同分辨率条件下，采用同一计算模型，本文提出的基于 Delaunay TIN 的三棱柱模型比规则栅格柱体模型获得的安全系数精度更高；
- (3) 结合基于 Delaunay TIN 的三棱柱模型，采用 Hovland 改进模型与修正 Hovland 改进模型计算得到的安全系数精度提升效果更加明显，甚至在分

表 2 采用三棱柱模型后不同计算模型安全系数对比
Table 2 Comparison of safety factors by different calculation models using tri-prism model

模型	圆心	单元尺寸		
		0.10 m	0.05 m	0.02 m
Hovland	C1	1.185	1.196	1.197
	C2	1.277	1.279	1.283
修正 Hovland	C1	1.181	1.187	1.190
	C2	1.286	1.286	1.289
Hovland 改进模型	C1	1.195	1.206	1.207
	C2	1.300	1.302	1.307
修正 Hovland 改进模型	C1	1.192	1.197	1.200
	C2	1.310	1.310	1.313

分辨率为 0.1 m 时即可获得其他计算模型在栅格分辨率为 0.02 m 对应的安全系数。

3.4 最优三角形网格剖分面积约束条件

为提高本文提出的基于 Delaunay TIN 的三棱柱边坡地质模型与稳定性分析方法的实用性，有必要对模型中三棱柱单元个数或者 TIN 三角形个数与边坡稳定性系数之间的关系进行探讨，围绕约束 Delaunay TIN 三棱柱边坡地质模型的经济性与计算结果准确性开展研究。

以图 4 所示算题中圆心为 C1 时为例，采用 Hovland 改进模型(式(9))进行计算，获得的三角形个数、安全系数随 Delaunay 网格剖分采用的最小三角形约束面积变化曲线如图 8 所示。可知：

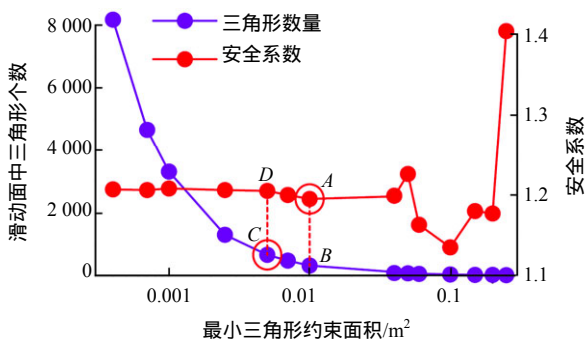


图 8 安全系数与三角形数量随最小约束面积变化曲线
Fig.8 Curve of safety factor and triangle number variation with smallest constrain area

(1) 当最小三角形约束面积较大或者网格分辨率较低时，计算得到的安全系数出现震荡，在约束面积大于 0.01 m²(图 8 中点 A)后，计算得到的安全系数趋于稳定，计算精度能够得到保证；

(2) 随着最小三角形约束面积的不断减小，Delaunay 网格剖分得到的三角形个数也在增多，尤其当数量大于点 C 所对应的 662 个之后，三角形个数增加速率明显变快，而点 C 对应的最小三角形约束面积为 0.005 m²，若继续减小最小三角形约束面积，安全系数几乎不变，获得的网格模型经济性将变差；

(3) 在 AB~CD 区间内，Delaunay TIN 三棱柱模型的经济性与计算精度比较均衡，此时对应的最小三角形约束面积分别为 0.01 与 0.005 m²。

在计算过程中，滑动面三角形面片总面积约为 2.06 m²，可将最小三角形约束面积与滑动面总面积的比值作为最优网格剖分面积约束条件的评判指标。根据上述(1)~(3)分析，当此评价指标为 1/412~1/206 时，计算模型达到最优。

此外，针对 Delaunay 网格剖分算法中最小约束角度进行了敏感性分析，结果表明在约束面积一定的情况下，角度的变化对三角形数量与安全系数几乎没有影响。所以，本文直接采用 Triangle 函数提供的最大的三角形最小内角 30°作为网格剖分角度约束条件，确保得到的 Delaunay 三角形网格质量最优，进而在一定程度上保证生成的三棱柱单元形状更加合理。

4 工程实例

4.1 工程概况

神华新疆托克逊矿业有限责任公司黑山露天矿位于托克逊县西北约 90 km 处，中心地理坐标：东经：87°32'02"，北纬：43°14'05"。截至 2016 年 4 月底，采场地表开采 SN 倾向宽度 1 560~2 003 m，EW 走向长度 1 424~1 914 m，最低剥离水平+2 475，最低采煤水平+2 475，采深 180 m。工作面布置采用“L”型推进方式，南帮、西帮为工作帮，台阶高度均按 10 m 设置。南帮帮坡角为 9°；西帮帮坡角为 9°。东帮为首采区靠界端帮，+2 505 以上台阶已经到界，帮坡角为 20°；北帮为固定帮，最高至+2 655 水平，最低至+2 475 水平，帮坡角为 15°。

采场整体情况如图 9 所示，其中紫色粗线条为采场区域，区域内红色线条为开挖台阶的坡顶线与坡底线，整体采掘方向由北向南。

4.2 地质条件与岩体力学参数

黑山矿区所在区域地层以石炭系、侏罗系以及

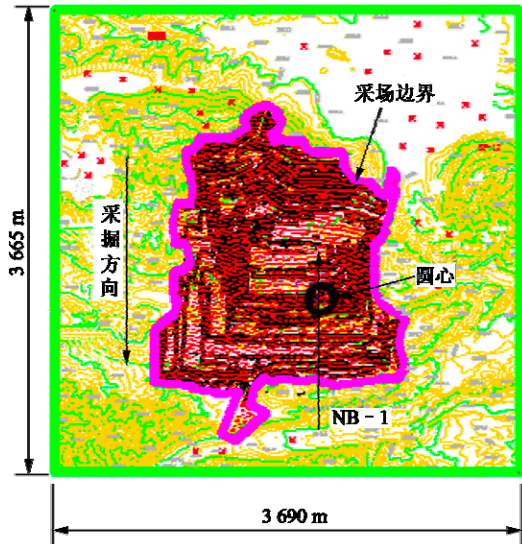


图 9 露天矿采场区域地形图

Fig.9 Topographic map of open pit stope region

第四系地层为主，主要为粗砂岩、中砂岩、煤层以及泥岩等。矿区位于天山纬向构造带之准噶尔~北天山褶皱系的北天山优地槽褶皱带，构造简单，主体特征为一南倾的单斜构造，地层与煤层走向约 95°，倾角为 13°~25°，沿走向倾角变化不大。

考虑到岩层走向以及与二维极限平衡方法对比时地层条件的一致性，选择采场南帮边坡作为对比分析的部位。图 10 为通过钻孔资料概化后获得的图 9 中采场南帮 NB-1 地质剖面图，所涉及的地层主要为粗砂岩、煤以及中砂岩，对应岩体力学参数取值与对应成果报告^[20]相同，具体见表 3。

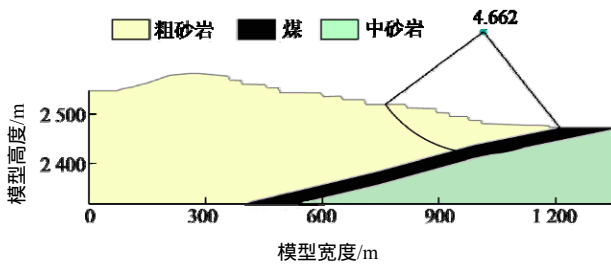


图 10 NB-1 地质剖面模型与稳定系数计算结果示意图

Fig.10 Geologic model of NB-1 section and calculation results of stability factor

表 3 各岩层物理力学参数值

Table 3 Physico-mechanical parameter values

岩层名称	密度 ρ / (kg · m ⁻³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 f / (°)
粗砂岩	2 500	105	38.2
煤	1 320	56	30.5
细砂岩	2 580	110	40.9

4.3 三维地质模型与计算结果

读取图 9 所示采场区域地形图的 DXF 文件，将采场、坡顶以及坡底线等作为约束边界，按照前文提出的最优最小三角形约束面积的确定方法，同时兼顾模型的准确性与经济性，将采场内、外最大网格剖分面积分别设置为 200 与 400 m²，得到的三角形网格如图 11 所示，其中，三角形个数为 115 127，节点数为 57 859。

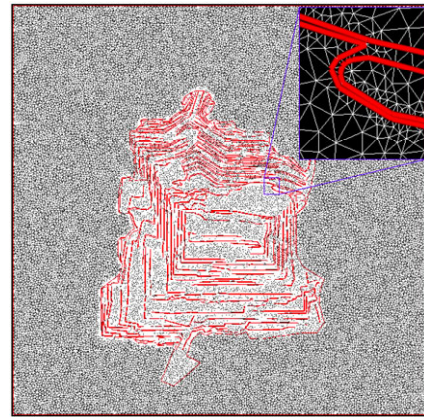


图 11 采场区域 Delaunay 三角形剖分网格

Fig.11 Delaunay triangle mesh subdivision of stope region

与图 10 中 NB-1 地质剖面一致，形成的采场三维地质模型如图 12 所示。其中，灰色圆球与图 10 中搜索圆弧的中心、半径相同，蓝色、绿色与红色分别表示粗砂岩、煤以及中砂岩。模型中四面体、五面体(金字塔)以及三棱柱网格个数分别为 1 377，1 277 与 263 602。

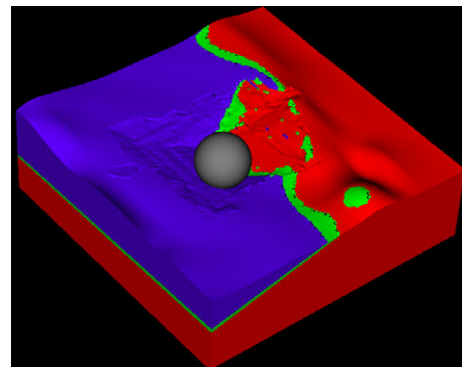


图 12 采场区域三维地质模型

Fig.12 Three dementional geologic model of stope region

图 13 为图 12 中所示圆球与地层割后形成的潜在滑坡体模型，其中四面体、五面体(金字塔)以及三棱柱网格个数分别为 283，282 与 7 246，蓝色为粗砂岩，红色为煤层。通过 Hovand 改进模型计算所得的安全系数为 4.755，较图 10 中 Slide 软件计算

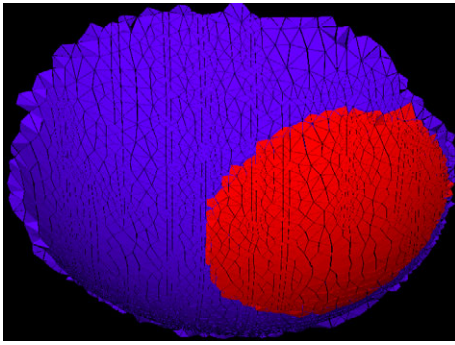


图 13 三维滑坡体模型

Fig.13 Three-dementional landslide model

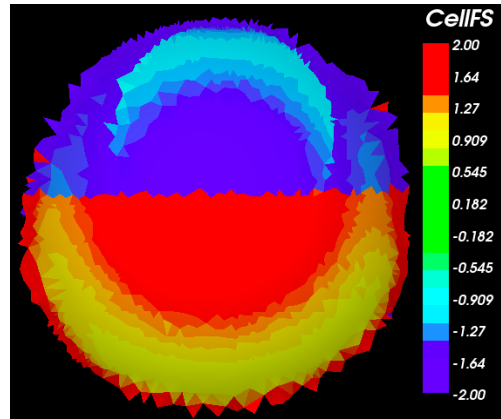


图 16 滑动面各三棱柱单元安全系数分布云图

Fig.16 Stability factor map of tri-prism elements in sliding surface

得到的 4.662 偏大,符合三维边坡计算模型安全系数通常高于平面模型的一般规律。

本文采用以 x 轴为起点顺时针旋转所得角度来表示倾向(这种表达方式与 GRASS GIS 软件默认设置相同),对应的滑动面各三角形倾向分布如图 14 所示,可见倾向几乎均匀分布。图 15 为滑动面各三角形倾角分布图,倾角在滑面前后缘最为陡峭,且后缘倾角大于前缘,而中部较平缓。图 16 为滑坡体模型中各三棱柱单元安全系数分布图,整体而言在倾角较陡峭位置安全系数较低,而在倾角平缓的滑

面中部安全系数一般在 2.0 以上。滑动面下半部分由于倾向与主滑方向相反,形成了明显的阻滑区。因此,滑坡中部与下半部分的阻滑作用导致整个潜在滑体的安全系数达到了 4.755。

5 结 论

(1) 在同一栅格模型与相同网格分辨率条件下,相比 Hovland 模型、修正 Hovland 模型,采用本文提出的 Hovland 改进模型、修正 Hovland 改进模型计算获得的安全系数精度更高,表明本文针对 Hovland 模型中单元垂直压力按照视倾角方向进行调整的计算方法是合理的。

(2) 相比规则栅格柱体模型,本文提出的基于约束 Delaunay TIN 的三棱柱边坡地质模型能够有效提高稳定性系数的计算精度。这主要是因为 TIN 模型能够较准确地表达滑动面的边界,计算结果更接近真实值,而栅格单元在边界位置往往呈锯齿状分布,导致计算结果存在一定的误差,并且 TIN 中每个三角形计算的倾角与倾向都是准确值。

(3) 结合约束 Delaunay TIN 的三棱柱边坡地质模型,采用 Hovland 改进模型计算边坡稳定性时,安全系数精度提升更加明显,当分辨率为 0.1 m 时即可获得其他计算模型在栅格分辨率为 0.02 m 对应的安全系数。说明本文提出的基于 Hovland 改进模型与约束 Delaunay TIN 的三维边坡稳定性分析方法是可行的。

(4) 为便于本文提出的三维边坡稳定性分析方法在实际工程中的推广应用,提出将最小三角形约束面积与滑动面总面积的比值作为最优网格剖分面积约束条件的评判指标,当其取值为 1/412 ~ 1/206

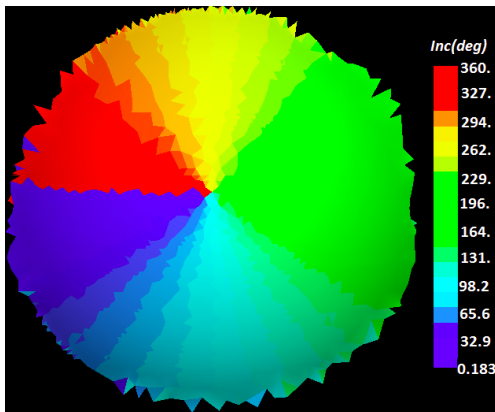


图 14 滑动面各三角形倾向分布云图

Fig.14 Inclination map of triangles in sliding surface

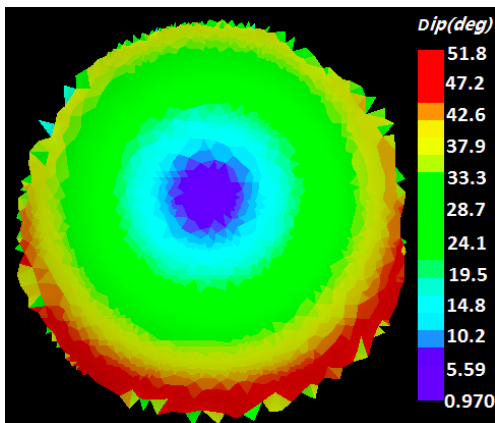


图 15 滑动面各三角形倾角分布云图

Fig.15 Dip map of triangles in sliding surface

时,约束 Delaunay TIN 三棱柱边坡地质模型准确性与经济性达到最优。

(5) Delaunay 剖分算法获得的优质网格,不仅适用于极限平衡方法,而且还能应用于有限元计算。这将为 GIS、三维极限平衡以及有限元方法的系统集成提供一种有效途径。

参考文献(References) :

- [1] 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(6):911-914.(ZHOU Cuiying, LIN Chunxiu, LIU Zuoqiu, et al. Spatial probability analysis of landslides based on GIS technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 911-914.(in Chinese))
- [2] 赵春宏,崔大勇,刘振波,等. GIS 数据用于复杂边坡三维极限平衡稳定分析[J]. 岩土力学,2009,30(3):707-712.(ZHAO Chunhong, CUI Dayong, LIU Zhenbo, et al. GIS data used for stability analysis of 3D limit equilibrium of complex slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 707-712.(in Chinese))
- [3] 谢谟文,蔡美峰,江崎哲郎. 基于 GIS 边坡稳定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 Mowen, CAI Meifeng, ESAKI Tesuro. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 117-123.(in Chinese))
- [4] XIE M W, ESAKI T, ZHOU G, et al. GIS-based 3D critical slope stability analysis and landslide hazard assessment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1109-1118.
- [5] 谢谟文,江崎哲郎,周国云,等. 基于 GIS 空间数据库的三维边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1494-1499.(XIE Mowen, ESAKI Tesuro, ZHOU Guoyun, et al. 3D slope stability analysis based on GIS spatial database[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1494-1499.(in Chinese))
- [6] 邱 骋,谢谟文,江崎哲郎,等. 基于 GIS 的住宅区周边危险边坡三维稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2007,18(2):89-94.(QIU Cheng, XIE Mowen, ESAKI Tetsuro, et al. GIS-based three-dimensional analysis of slope stability around residence area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 89-94.(in Chinese))
- [7] 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 Xuchun, HE Manchao, JIANG Yujing, 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.(in Chinese))
- [8] 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,2013,33(11):1400-1406.(GU Tianfeng, WANG Jiading, FU Xiping. Regional slope stability analysis method based on the slope unit[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(11): 1400-1406.(in Chinese))
- [9] 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 Bangshu, XU Jianhua, RUI Jianxun, et al. The method of automatically generation fem based on GIS for slope[J]. Geography and Geo-Information Science, 2005, 21(3): 23-26.(in Chinese))
- [10] 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 Hanlong, LIU Limin, LI Jianguang. 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.(in Chinese))
- [11] 吴江斌,朱合华. 基于 Delaunay 构网的地质 3D TEN 模型及建模[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(24):4581-4588.(WU Jiangbin, ZHU Hehua. 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.(in Chinese))
- [12] 刘唱晓,贺怀建,张柯军. 基于三棱柱单元地层与桩基的可视化[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(增 2):5961-5964.(LIU Changxiao, HE Huaijian, ZHANG Kejun. Research on visualization of strata and pile foundations based on triangular prism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5961-5964.(in Chinese))
- [13] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1977, 103(GT9): 971-986.
- [14] NETELER M, MITASOVA H. Open Source GIS: A GRASS GIS approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004: 424-425.
- [15] MERGILI M, MARCHESINI I, ROSSI M, et al. Spatially distributed three-dimensional slope stability modeling in a raster GIS[J]. Geomorphology, 2014, 206: 178-195.
- [16] XIE M W, ESAKI T, QIU C. Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(4/5): 260-274.
- [17] RUPPERT J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation[J]. Journal of Algorithms, 1995, 18(3): 548-585.
- [18] CHEW L P. Guaranteed-quality mesh generation for curved surfaces[C]// Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry(San Diego, California). [S.l.]: [s.n.], 1993: 274-280.
- [19] SHEWCHUK J R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 2002, 1(3): 21-74.
- [20] 刘 建. 神华新疆托克逊矿业有限责任公司黑山煤矿 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.(LIU Jian. Slope stability analysis and evaluation and calculation results report of Heishan coal mine of Shenhua Xinjiang Trafigura mining co., Ltd in 2016[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2016.(in Chinese))