

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.01.028

基于 GRASS GIS 与 TIN 滑动面的 边坡三维极限平衡方法研究

刘振平¹, 杨 波², 刘 建¹, 贺怀建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. 湖北省交通投资集团有限公司 襄随高速公路建设指挥部, 湖北 襄阳 441000)

摘 要: 基于开源地理信息系统 (GRASS GIS), 建立三维极限平衡 Hovland 模型, 研究了边坡稳定性计算方法。采用空间平面投影方法对椭球滑动面中各组成单元面积计算方法进行改进, 提高了计算效率。考虑边坡主滑方向与各单元倾向之间的关系, 给出了能反映正负变化的滑动面各单元安全系数表达式。通过引入约束 Delaunay 三角形剖分方法与网格优化算法来生成滑面不规则三角形格网 (简称 TIN) 模型, 弥补了 Grid 模型在滑动面边界准确表达方面的不足。相比 Grid 模型, 在相同网格分辨率条件下, TIN 滑动面获得的边坡整体安全系数更加接近正确解, 能够有效提升计算精度。通过考题与工程实例, 对所提方法与程序模块的正确性进行了验证。结果表明, 通过分析滑动面上各单元的安全系数, 可以进一步划分不稳定区域与阻滑区, 能够为滑坡治理措施的制定提供重要参考。

关 键 词: 开源 GIS ; 边坡稳定性 ; 三维极限平衡方法 ; TIN 滑动面 ; 安全系数

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 01 - 0221 - 08

Three-dimensional limit equilibrium method based on GRASS GIS and TIN sliding surface

LIU Zhen-ping¹, YANG Bo², LIU Jian¹, HE Huai-jian¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Construction Headquarters of Xiang-Sui Expressway, Hubei Provincial Communications Investment Group Co., Ltd., Xiangyang, Hubei 441000, China)

Abstract: The method to calculate the safety factor of slopes was implemented into a three-dimensional (3D) limit equilibrium model in the open source geographical information system (GIS) GRASS GIS. The Hovland method was exploited to evaluate the slope stability of specified or randomly selected ellipsoidal slip surfaces. The spatial plane projection theory was applied to calculate cell areas of the sliding surface, which increased the computational efficiency. By considering the relationship between the main slope sliding direction and the inclinations of cells, the expression of safety factor was proposed for cells in the sliding surface, which was used to distinguish between positive values and negative ones. Furthermore, the sliding surface was expressed by a triangulated irregular network (TIN) model which was obtained by utilizing constrained Delaunay triangulation method and mesh optimization algorithm. Thus, the shortcoming of the Grid model for accurately representing the sliding border was substantially improved. The safety factor calculated by the TIN sliding surface was closer to the exact solution than the Grid model at the same resolution condition, which demonstrated that the computational precision was obviously enhanced. Finally, the proposed method was verified by the modules programmed in Python language, which was further applied to some typical case studies. It was shown that the safety factor of cells lower than 1.0 represented the unstable region and that greater than 1.0 indicated the resistance slide area in the slip surface. The results can provide an essential basis for the development of landslide treatment measures.

Keywords: open source GIS; slope stability; 3D limit equilibrium method; TIN sliding surface; safety factor

1 引 言

边坡稳定性计算是滑坡地质灾害评价与预防的

主要依据。通常采用二维极限平衡方法对边坡稳定性进行分析, 但结果偏于保守, 差值可达 30%^[1]。

于是, 更多基于柱体单元的三维极限平衡方法与相

收稿日期: 2016-02-28

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

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

第一作者简介: 刘振平, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 目前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

应的商业软件应运而生,但这些程序采用不同的数据格式,且数据准备过程繁琐^[2],不易根据各自工作需要二次开发。鉴于此,集多种学科为一体的交叉学科——地理信息系统 GIS (Geographic Information System) 被引入到边坡三维稳定性分析中^[3]。

许多学者对基于 GIS 的三维极限平衡方法开展了一系列的研究工作。谢谟文等^[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。王纯祥等^[7]基于 GIS 和数值计算模型相结合的方法,采用两步骤预测和评价日本熊本县宝川区集地区的滑坡和泥石流灾害。王旭春等^[8]在 GIS 中实现基于力学原理的滑坡稳定性计算的有效途径及方法,为全方位快速进行滑坡稳定性综合评价提供了新的手段。赵春宏等^[9]利用 GIS 三维极限平衡模型对滑动面上滑动力分布矢量图进行了研究。谷天峰等^[10]利用 GIS 中的 Grid 模型生成区域斜坡稳定性分区图。还有很多作者也在这方面开展了大量的研究工作,限于篇幅,这里不一一列举。

虽然基于 GIS 的三维极限平衡方法在边坡稳定性分析应用中得到了长足的发展,但仍然存在一些亟待解决的问题。一方面,系统主要以现有商业 GIS 软件为开发平台,除了需支付高额购置费外,也无法触及系统核心模块程序代码,降低了程序二次开发的灵活性;另一方面,现有三维极限平衡方法主要采用栅格模型,在滑动面边界准确表达方面不够理想。

针对以上问题,本文将基于开源地理信息系统 (GRASS GIS) 与 TIN,采用三维 Hovland 模型研究边坡稳定性分析方法,进一步提高计算效率与精度。

2 基于 GRASS GIS 的三维极限平衡方法

2.1 开源地理信息系统 (GRASS GIS)

GRASS GIS 是开源平台下一个重量级的 GIS 软件。在 1985 - 1995 年间,GRASS (geographic resources analysis support system,即地理资源分析支持系统)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^[11]。直到 1997 年,由 Baylor University 成立的“GRASS Research Group”从 USA/CERL 接过

了 GRASS 的开发工作,1998 年发布了 GRASS 4.2.1,从此 GRASS 在学术界迅速流行起来。截止 2016 年 2 月,最新发布的版本为 GRASS 7.0.3。GRASS GIS 新版本不但继承了旧版本 20 多年的设计经验,还充分借鉴了其他 GIS 开发源代码软件包丰富程序资源和强大功能模块,成为当之无愧的开源 GIS 软件的佼佼者。

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^[12],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 作为其主要开发语言^[13],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^[14]。因此,本文选择 GRASS GIS 对三维极限平衡方法及其应用进行研究。

2.2 GRASS GIS 中三维极限平衡方法实现与改进

2.2.1 边坡稳定性分析 GRASS GIS 模型

GRASS GIS 系统主要包括栅格数据模型(如图 1(a))、矢量数据模型(如图 1(b))两种空间数据表达方式。栅格数据模型由一系列规则矩形单元组成,每个单元位置由对应行列号定义,对应数值为栅格表示内容的属性值。其中,行列号起始点位于图形的左上角,向下、向右逐渐增大,可通过行列格式 (i, j) 实现单元的索引。矢量数据模型主要以三角形网格为主,通过坐标定义相应的点、线、面,并建立对应的拓扑关系。两种数据模型对应的 XOY 坐标系如图 1(a)所示,最小值位于左下角,向上、向右逐渐增大。单元的倾向范围 $0 \sim 360^\circ$,以正东为 0° ,逆时针方向增大。

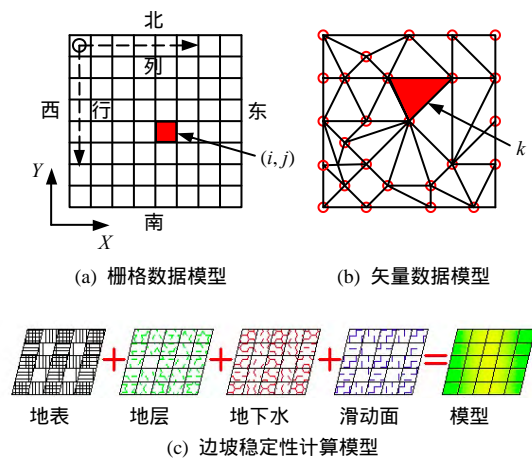


图 1 GRASS GIS 边坡模型表达方法

Fig.1 The representative method of the slope model in GRASS GIS

在边坡稳定性三维极限平衡计算模型构建中，首先，需要建立分辨率与坐标位置统一的矩形或者三角形网格；然后，根据单元高程值的不同，分别构建地表、各地层以及滑动面等多个图层；接着，建立属性数据库，并录入对应地层物理力学参数，并将各图层与数据库中信息表一一对应；最后，根据 Hovland 模型，对各棱柱单元中各地层的几何与属性数据进行叠加、运算，便可获得最终的边坡稳定性计算模型（如图 1(c)），表达如下：

$$M = H(\text{Layer1}, \text{Layer2}, \text{Layer3}, \dots) \quad (1)$$

式中： M 为各图层叠加后的计算结果； H 为各图层属性数据运算模型； $\text{Layer } i$ 表示不同图层。

2.2.2 Hovland 模型

Hovland 三维模型通过计算多个柱体单元抗滑力与下滑力代数比的比值来获得边坡稳定性系数。对于某一柱体（见图 2(a)），单元滑动面倾向为滑动方向 AB ，对应的真倾角为 θ （见图 2(b)），沿单元滑动方向 AB 受力分析如图 3 所示，其中 G' 为柱体单元滑动面上覆土体有效重力，对应下滑力 $F = G' \sin \theta$ ，抗滑力 $R = G' \cos \theta \tan \varphi + cA$ ，柱体单元安全系数为 R/F 。为计算主滑方向 AC 上边坡整体安全系数，需要获得棱柱单元在 AC 方向上的下滑力：

$$F' = G' \sin \alpha \quad (2)$$

式中： α 为主滑方向 AC 在单元滑动面上的视倾角，可通过下式获得

$$\tan \alpha = \tan \theta \cos \beta \quad (3)$$

式中： β 为 OB 与 OC 之间的夹角； θ 为该单元滑动面真倾角。

最终，Hovland 三维力学模型表达如下：

$$SF_{3D} = \frac{\sum_k (cA + G' \cos \theta \tan \varphi)}{\sum_k G' \sin \alpha} \quad (4)$$

式中： φ 为滑动面位置土体内摩擦角； c 为黏聚力； A 为单元滑动面积。

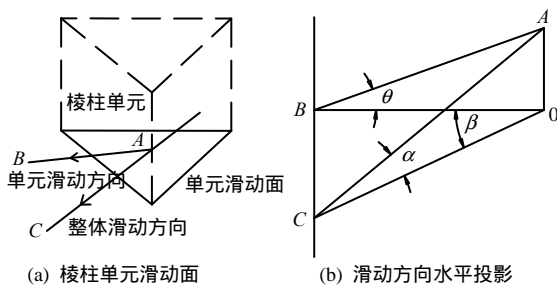


图 2 单元滑动方向与坡体主滑方向的关系
Fig.2 Relationship between cell sliding and landslide directions

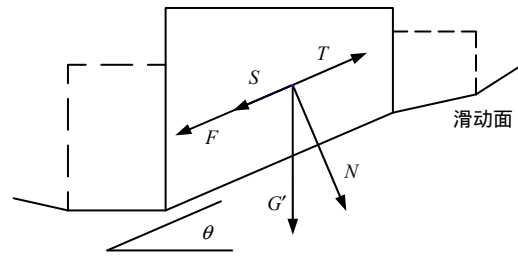


图 3 单元受力示意图
Fig.3 Force diagram of one cell

2.2.3 程序算法改进

(1) 面积计算公式

为了对式 (4) 中 A 的面积进行计算，文献[4]给出了一种方法，计算公式如下：

$$A = dx dy \frac{\sqrt{1 - (\sin \beta_{xz})^2 (\sin \beta_{yz})^2}}{\cos \beta_{xz} \cos \beta_{yz}} \quad (5)$$

式中： β_{xz} 与 β_{yz} 分别表示滑动面在 x 与 y 轴的倾向。但对于任意空间三角形 ABC （以图 2(b)为例），倾角为 θ ，在水平面上投影三角形为 OBC ，根据空间平面投影理论，可得到以下关系式：

$$S_{ABC} / S_{OBC} = BC \cdot AB / (BC \cdot OB) = AB / OB = 1 / \cos \theta \quad (6)$$

$$S_{ABC} = S_{OBC} / \cos \theta \quad (7)$$

对于同一平面上的任意多边形，可将其分解为多个三角形，其面积也可通过式 (7) 来表达，则最终式 (5) 改写成如下形式：

$$A = (dx dy) / \cos \theta \quad (8)$$

相比式 (5)，式 (8) 涉及参数少，过程简单，计算效率较高。

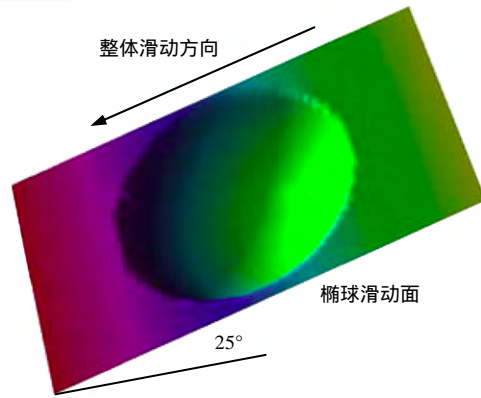
(2) 考虑下滑力的方向

在式 (3) 中，当 β 的绝对值大于 90° 时，计算得到的滑动面上视倾角 $\alpha < 0$ ，表示单元滑动面倾向与主滑方向相反，此时计算获得的下滑力起“阻滑”效果。如图 4(a) 表示一个倾角为 25° ，滑动面为一椭圆面的边坡模型，通过式 (2) 获得的单元下滑力分布规律如图 4(b) 所示，根据各单元下滑力大小与方向，可将滑动面分为滑动区、过渡带以及阻滑 3 个区域，更加符合实际情况。

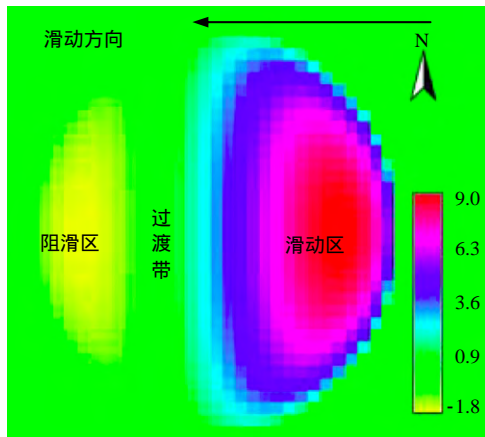
在考虑下滑力方向后，各三棱柱单元安全系数计算方法调整如下：

$$SF_{cell} = \text{Sgn} \alpha \cdot R / F \quad (9)$$

式中： $\text{Sgn} \alpha$ 为正负数标识，取 1 或者 -1； SF_{cell} 为某三棱柱单元安全系数； $\text{Sgn} \alpha$ 通过 α 的数值来控制 SF_{cell} 的正负号。



(a) 边坡模型



(b) 单元下滑力分布 (单位: N)

图4 考虑主滑方向的三棱柱单元下滑力分布图
Fig.4 Sliding forces distribution of Triangular prisms considering the landslide direction

2.3 GRASS GIS 三维 Hovland 模型算题验证

图5为一经典三维黏土边坡稳定性分析算题,其中只考虑有效黏聚力 c' ,而有效内摩擦角 ϕ' 设为0, γ 为土体重度,滑动面形态采用半径为 R 球面表达。将获得的安全系数与文献[15]进行对比,结果一致(见表1),证明了本文基于GRASS GIS开源平台所开发的程序模块正确性。

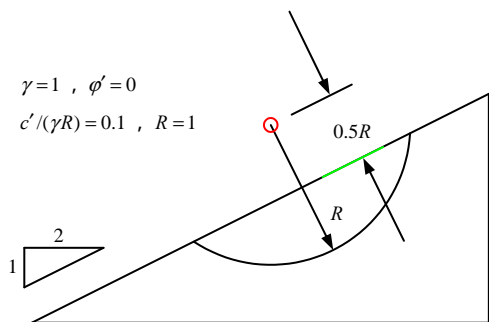


图5 三维圆弧滑动面黏土边坡实例
Fig.5 3D circular sliding surface of a clay slope example

表1 安全系数对比 (Hovland 3D)
Table 1 Comparison of safety factors between 3D Slope GIS and GRASS GIS (Hovland 3D)

| 单元尺寸 (单位: m) | 3DSlopeGIS | GRASS GIS |
|--------------|------------|-----------|
| 0.05 | 1.372 | 1.380 |
| 0.02 | 1.432 | 1.436 |
| 0.01 | 1.443 | 1.448 |

3 基于 TIN 的边坡稳定性计算

3.1 滑动面准确表达

椭球面作为滑动面的一种表达形式,已被许多学者研究并应用,具体实现方法可参考文献[4 - 6],这里不再赘述。通过椭球的数学表达公式,能够精确定位滑动面边界与形态,但由于很多学者都借助于GIS栅格模型来开展相应的研究工作,根据单元中心点位置来判断该单元是否参与边坡稳定性计算,往往导致所确定的滑动面边界呈锯齿状(如图6所示),与实际椭球滑动面边界存在较大差别,而三角形边界或者优化后的三角形边界与椭圆滑动面边界吻合程度更高(见图6)。同时,每个矩形柱状单元与椭球面相交后4个顶点大多情况下并不处于同一个平面,划为一个单元,并采用相同的倾角、倾向分析不太准确,若将一个栅格剖分成2个三角形,更接近实际滑动面形态。除此之外,在滑坡区域边界和滑动面插值点已知情况下,椭球面难以有效地模拟滑面具体形状。鉴于上述考虑,本文拟采用TIN(triangulated irregular network),即不规则三角形格网模型与三棱柱单元实现滑动面的准确表达。

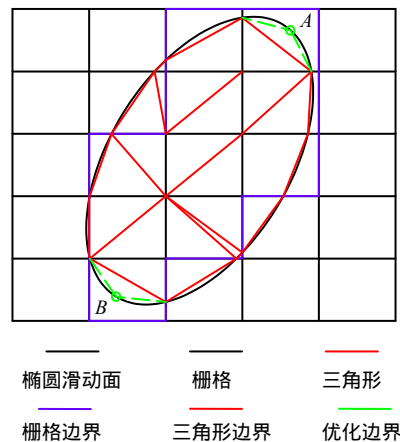


图6 Grid与TIN滑动面边界对比
Fig.6 Comparison of sliding surface borders between Grid and TIN

3.2 TIN 滑动面与边坡安全系数

通过 TIN 模型实现滑动面的准确表达并计算

边/滑坡整体安全系数的方法流程如图 7 所示。为便于分析与提高计算效率，在生成滑动面三角形优化网格后，采用 DEM (discrete element method, 即离散元法) 模型来表达地层和地下水位面等，通过获得的每个三角形单元中心点坐标得到对应位置各地层高程，形成 Hovland 三棱柱模型，并计算边坡稳定性系数。

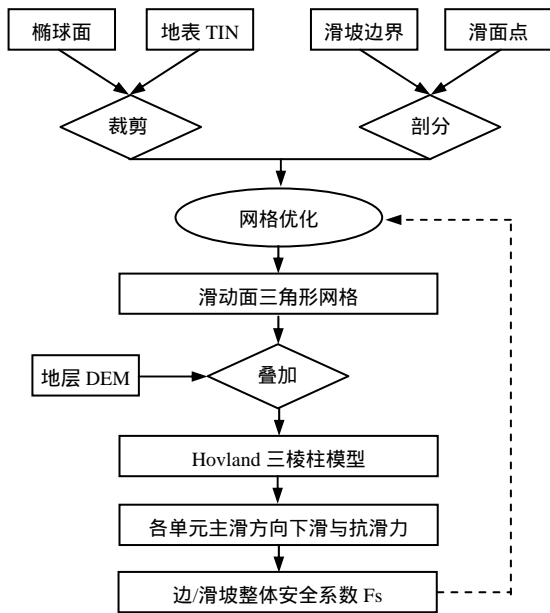


图 7 基于 TIN 的边坡安全系数计算方法流程图
Fig.7 Computational flowchart of the safety factor base on TIN

其中，滑动面可采用两种方法生成，一种是椭圆面与地表 TIN 模型进行面片裁剪运算；另一种通过对勘探获得的滑坡边界线与滑面钻孔点进行约束 Delaunay 三角剖分与插值来获得。但两种方法得到的初始滑面三角形单元密度可能过于稀疏或密集，不一定满足计算精度的要求或者导致计算效率降低。因此，需要对初始滑面三角形网格进行优化，本文主要引入 Loop's 细分算法^[15]对网格进行加密，同时采用 Hugues Hoppe 在 SIGGRAPH'96 上提出的先进的网格简化算法^[17-18]对网格进行简化。具体实现过程参见文献[19]，这里不再叙述。

3.3 TIN 模型计算精度

以图 5 所示算例对 TIN 滑动面边坡稳定性计算方法与精度进行验证，设定不同分辨率的三角形网格 (见图 8)，与采用栅格单元计算的安全系数进行对比，结果如表 2 所示。

随着单元尺寸的减小或者分辨率的提高，无论是栅格单元还是三角形单元，对应的安全系数都在增大，并逐渐接近正确的计算结果。但三角形单元

在较低分辨率时就可以获得比较准确的安全系数，尤其是当单元尺寸为 0.1 m 时获得的安全系数，对应的栅格单元尺寸需要缩小到 0.03 m 时才能取得，分辨率相差近 30 倍。因此，相同分辨率条件下，三角形单元能够显著地提升三维边坡安全系数计算精度。

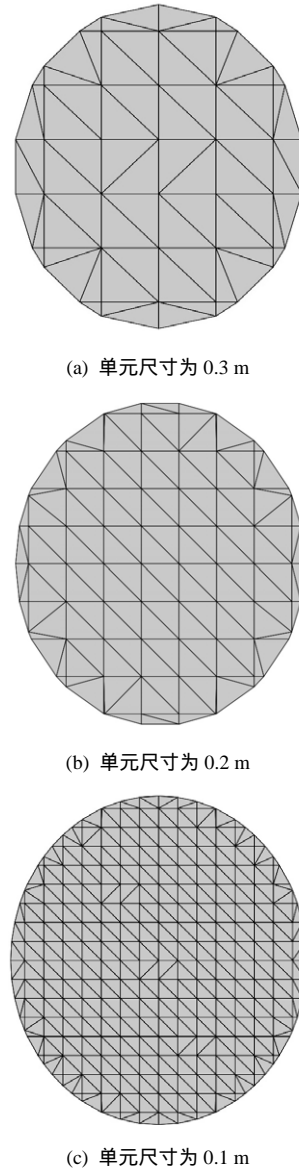


图 8 不同分辨率对应的 TIN 模型
Fig.8 TIN models for different resolutions

表 2 TIN 与 Grid 滑动面边坡安全系数对比
Table 2 Comparison of safety factors of surfaces between TIN and Grid

| 单元尺寸 | 安全系数 | |
|------|-------|-------|
| | 栅格单元 | 三角形单元 |
| 0.30 | 1.036 | 1.250 |
| 0.20 | 1.192 | 1.350 |
| 0.10 | 1.334 | 1.427 |
| 0.05 | 1.380 | 1.457 |
| 0.03 | 1.429 | |

4 工程实例

4.1 工程概况

茨哈峡水电站坝址位于青海省海南州兴海与同德县交界处的班多峡谷内，坝址区有多处不同规模的滑坡及倾倒体。边坡地层岩性主要为灰黑色板岩与灰绿色砂岩互层或灰色板岩夹灰绿色砂岩 (T2-S1+Ss)，其次为第四系松散堆积 (Q₄col + dl)。

4.2 II号滑坡

II号滑坡位于水电站下游黄河左岸，整个滑坡呈现一个不规则的长方形，其前缘高程在 2 765 ~ 2 770 m 之间，后缘高程则在 2 990 m 左右。顺河流方向宽为 256 m，垂直河流方向长为 285 m (见图 9 ~ 11)。滑坡剖面上呈大刀型，中间宽，两头窄。滑面按倾角大小分为 3 段，上部滑面倾角较陡，为 55 ~ 60°，且与后缘陡壁倾角基本一致；中部中陡倾角，为 34 ~ 45°；下部至剪出口，滑面倾角较缓，为 7 ~ 10°。根据勘察钻孔情况，滑动面位于同一地层中，具体力学参数如表 3 所示。

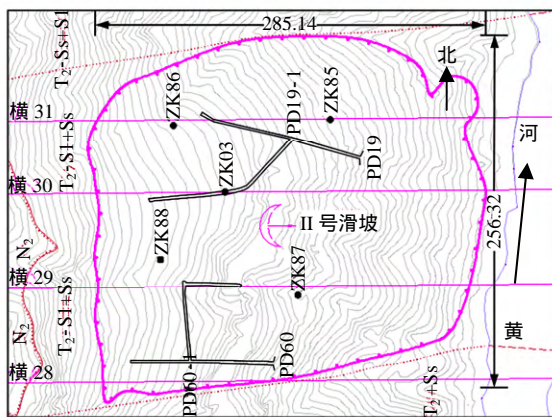


图 9 II号滑坡平面图 (单位: m)
Fig.9 Plane of landslide II (unit: m)

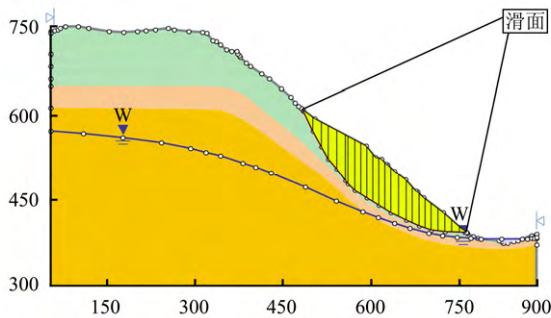


图 10 II号滑坡 30#剖面天然状态下模型 (单位: m)
Fig.10 Model of profile #30 of landslide II under natural condition (unit: m)

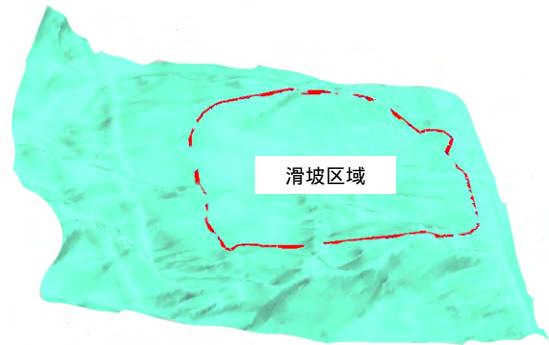


图 11 边坡表面 TIN 模型
Fig.11 TIN model of the slope surface

表 3 II号滑坡岩体力学参数表

Table 3 Mechanical parameters of landslide II

| 密度/(g/cm ³) | | | 天然 | | 暴雨 | | 雾化 | |
|-------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 天然 | 暴雨 | 饱和 | f | c/kPa | f | c/kPa | f | c/kPa |
| 2.30 | 2.35 | 2.40 | 0.650 | 60 | 0.585 | 54 | 0.490 | 45 |

注: f 为摩擦系数; c 为黏聚力。

4.3 计算结果

滑动面 TIN 模型、边坡 DEM 以及滑动面三角形网格分别如图 11 ~ 13 所示，相比文献[20]中对滑坡区域内 29、30 与 31 剖面 (具体见图 9、10) 计算结果，本文通过三维极限平衡方法获得的安全系数与文献[20]中采用摩根斯坦法计算结果更加接近 (见表 4)。另外，在雾化工况下滑动面上各三棱柱单元安全系数分布如图 14 所示，坡体中、上部安全系数小于 1，为坡体中最不稳定的区域；坡体后缘与周边位置虽然滑动面倾角较大，但由于埋深浅，单元所受重力小，在黏聚力 c 作用下，导致安全系数大于 1；坡体下部及剪出口位置，滑动面倾角变缓，安全系数大于 1，为坡体阻滑区；安全系数为负值的单元主要分布于滑坡周边局部位置。通过对滑动面各单元安全系数分布规律的分析，为滑坡后续加固措施的制定提供参考依据。

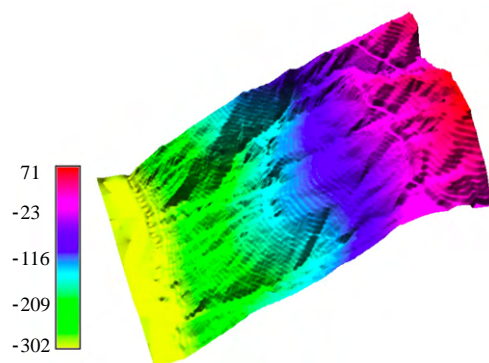


图 12 边坡表面高程 DEM 模型 (单位: m)
Fig.12 DEM model of the slope surface (unit: m)

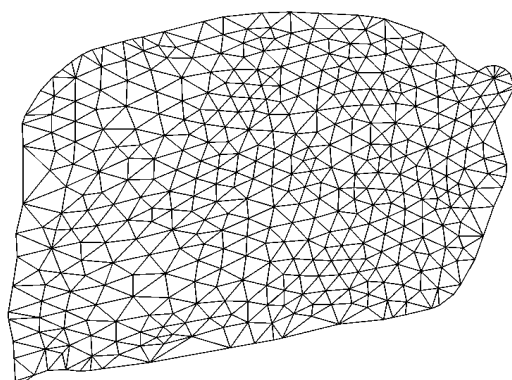


图 13 滑动面三角形网格

Fig.13 Triangular mesh of the sliding surface

表 4 安全系数计算结果对比

Table 4 Comparison of safety factors at different conditions

| 模型 | 方法 | 持久 | 暴雨 | 雾化 |
|-----------|------------|-------|-------|-------|
| 29#剖面 | 詹布法 | 1.019 | 0.915 | 0.825 |
| | 修正-詹布法 | 1.081 | 0.972 | 0.876 |
| | 摩根斯坦法 | 1.169 | 1.049 | 0.948 |
| 30#剖面 | 詹布法 | 0.977 | 0.878 | 0.786 |
| | 修正-詹布法 | 1.038 | 0.932 | 0.835 |
| | 摩根斯坦法 | 1.068 | 0.961 | 0.861 |
| 31#剖面 | 詹布法 | 1.062 | 0.955 | 0.859 |
| | 修正-詹布法 | 1.124 | 1.010 | 0.908 |
| | 摩根斯坦法 | 1.168 | 1.049 | 0.947 |
| GRASS GIS | Hovland 模型 | 1.163 | 1.043 | 0.869 |

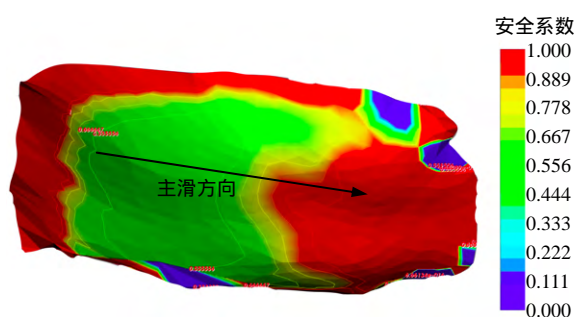


图 14 滑动面上各三棱柱单元安全系数等值线

Fig.14 Contours of triangular prisms' safety factors on sliding surface

5 结 论

(1) 采用开源地理信息系统 (GRASS GIS) 与 Hovland 模型, 实现了边坡安全系数的三维极限平衡计算方法, 并通过算例验证了程序的正确性, 从而避免了商业软件高额购置费, 并极大地提高了二次开发灵活性。

(2) 相比于 Grid 模型, TIN 模型能够更加准确、灵活地表达滑动面的边界与空间形态, 可以采用较低分辨率获得更准确的安全系数, 从而有效提高边坡稳定性计算效率与精度。计算结果表明, 为获得

相同的安全系数, Grid 与 TIN 模型分辨率甚至相差 30 倍。

(3) 考虑边坡主滑方向, 确定滑动面上各单元安全系数的空间分布规律与正负值, 对滑坡治理有较重要指导意义。

(4) 随着 GRASS GIS 功能的不断丰富, 将会在岩土工程中得到更加广泛的应用, 并发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] DUNCAN J M. State of art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1996, 122(7): 577 - 596.
- [2] 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 Mo-wen, CAI Mei-feng, ESAKI Tesuro. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 117 - 123.
- [3] 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 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(6): 911 - 914.
- [4] 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.
- [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 Mo-wen, ESAKI Tesuro, ZHOU Guo-yun, et al. 3D slope stability analysis based on GIS spatial database[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1494 - 1499.
- [6] 邱聘, 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 Mo-wen, 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.
- [7] 王纯详, 蒋宇静, 谢谟文, 等. 基于 GIS 区域边坡失稳灾害预测与评价[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(12): 2449 - 2505.
- WANG Chun-xiang, JIANG Yu-jing, XIE Mo-wen, et al. Prediction and assessment of regional slope-failure hazard based on GIS[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(12): 2449 - 2505.
- [8] 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.
- [9] 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 Chun-hong, CUI Da-yong, LIU Zhen-bo, 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.
- [10] 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 Tian-feng, WANG Jia-ding, FU Xin-ping. Regional slope stability analysis method based on the slope unit[J]. **Scientia Geographica Sinica**, 2013, 33(11): 1400 - 1406.
- [11] NETELER M, MITASOVA H. Open source GIS: A GRASS GIS approach[C]//The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004: 424.
- [12] 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.
- [13] 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. Study of the technology of 3D modeling and visualization system based on Python[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3037 - 3042.
- [14] SCHULTZ G A. Application of GIS and remote sensing in hydrology[C]//In: HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, Proceedings of the Vienna Conference. Wallingford: IAHS Publication, 1993: 127 - 140.
- [15] XIE MOWEN, ESAKI TETSURO, CHENG QIU. 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.
- [16] LOOP CHARLES. Smooth subdivision surfaces based on triangles[D]. Salt Lake City: Department of Mathematics, University of Utah, 1987.
- [17] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al. Piecewise smooth surface reconstruction[C]//Computer Graphics Proceedings, Orlando Florida, Annual Conference Series. [S. l.]: [s. n.], 1994: 295 - 302.
- [18] HOPPE HUGUES. Progressive Meshes[C]//In SIGGRAPH 96 Proc., New Orleans: [s. n.], 1996: 97 - 108.
- [19] 曹勇, 田捷, 张晓鹏, 等. Progressive Meshes 算法在虚拟内窥镜中的应用研究[J]. **软件学报**, 2002, 13(4): 677 - 685.
- CAO Yong, TIAN Jie, ZHANG Xiao-peng, et al. Application of a progressive meshes algorithm to virtual endoscopy[J]. **Journal of Software**, 2002, 13(4): 677 - 685.
- [20] 刘建. 茨哈峡水电站泄洪雾化区边坡稳定分析及支护措施研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.
- LIU Jian. Stability analysis and support measures research for flood discharge atomization slope of Cihaxia Hydropower Station[R]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.