

左健扬, 倪万魁, 景博. 三维可视化滑坡地质模型的研究与应用[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 60-64. [ZUO Jianyang, NI Wankui and JING Bo. Research and application of 3D visualization landslide geological model[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 60-64. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.011.]

三维可视化滑坡地质模型的研究与应用^{*}

左健扬^{1,2}, 倪万魁¹, 景博¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
2. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 三维可视化滑坡地质模型作为离散数据点在三维空间的地质表达, 不仅可以直观地描述和表征滑坡地质信息, 还可以帮助我们研究和分析滑坡地质问题。结合工程控制资料在 Petrel 下实现的三维滑坡地质模型, 不仅具有良好的可视化、尺度化测量效果, 还可以实现剖面切分与数据导出, 便于滑坡研究的分析应用。同时, 通过可视化三维模型滑坡体体积和滑动面表面积的读取, 结合经典算理验证, 还能够为考虑整体滑动的三维滑坡稳定性分析提供较为可靠的参考依据。

关键词: 三维地质模型; 滑坡; 可视化; 稳定性分析

中图分类号: P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)01-0060-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.011

滑坡地质现象因其独特的地貌形态特征, 既有地质灾害的共性表现, 又是力学性质在地表的表征, 其发展与演化同人类工程建设、经济生活发展息息相关^[1]。随着电子计算机应用技术和软件的不断发展, 集数据综合处理、模型表征成像、信息拟合分析为一体^[2]的可视化三维建模技术正广泛应用于各个领域。通过三维可视化技术和滑坡地质理论的有效结合, 实现了含有地质意义的离散数据体在三维空间的表达, 不仅可以直观地描述和表征滑坡地质现象, 还能够为滑坡研究与分析提供参考依据^[3]。

滑坡地质模型的建立, 可以综合利用野外地质调查、工程物探、地形测绘等基础资料, 同时融入专业工程地质人员的经验认识, 能够直观地再现地质单元的空间展布及其相互关系, 模拟实现地质现象, 为分析、理解和重复地质现象以及作用过程提供了很大的帮助。三维滑坡可视化研究大多是利用 GIS 系统中强大的空间分析和数据库整合来实现的^[4-7], 也有通过 OpenGL 图形库^[2], GOCAD^[3], IDL^[8], Google SketchUp^[9], VisualSlope 系统^[10,11]等三维图形处理或建模软件。其基本方法都是通过三维地表模型的构建, 利用钻孔和边界控制的插值模拟或是根据虚拟钻孔加密控制滑动面, 实现三维地质表象模型的剪力, 但在基于三维模型的分析应用上效果较差。

本文基于 Petrel 三维地质建模软件, 结合工程控制建立了三维滑坡地质模型, 并利用三维滑坡模型的尺度化成果输出, 结合经典算理验证并结合工程实例, 对其工程应用的可视化和应用性进行探讨。

1 三维滑坡地质模型构建的基本思路

野外地质调查、工程地质勘察等研究工程地质问题的成果数据, 其资料数据点往往是离散的且在空间上分布不均匀。三维地质数据体的建立需要结合工程地质人员的经验认识, 有机地将离散的数据点联系起来, 形成宏观的表征形态^[3]。

三维滑坡地质建模的数据预处理工作尤为重要, 数据预处理的过程更多是结合工程地质人员的实践认识, 对已获取的地质资料的真实性和可靠性进行甄别, 提取出具有理论依据和地质意义的数据资料。通过数据资料矢量化处理和系统综合研究, 赋予其三维空间地质意义, 以此实现一维、二维数据资料下的三维地质构建。

三维滑坡地质模型的建立主要是结合地质认识、工程控制和边界约束, 对预处理的离散数据按照可控的网格密度进行空间插值。通过对任意

* 收稿日期: 2016-05-27

修回日期: 2016-07-13

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划课题任务书(2012KTDZ03-03)

第一作者简介: 左健扬(1988-), 男, 宁夏银川人, 工程师, 博士研究生, 主要从事岩土体边坡工程方面的研究。

E-mail: zuo_jy@163.com

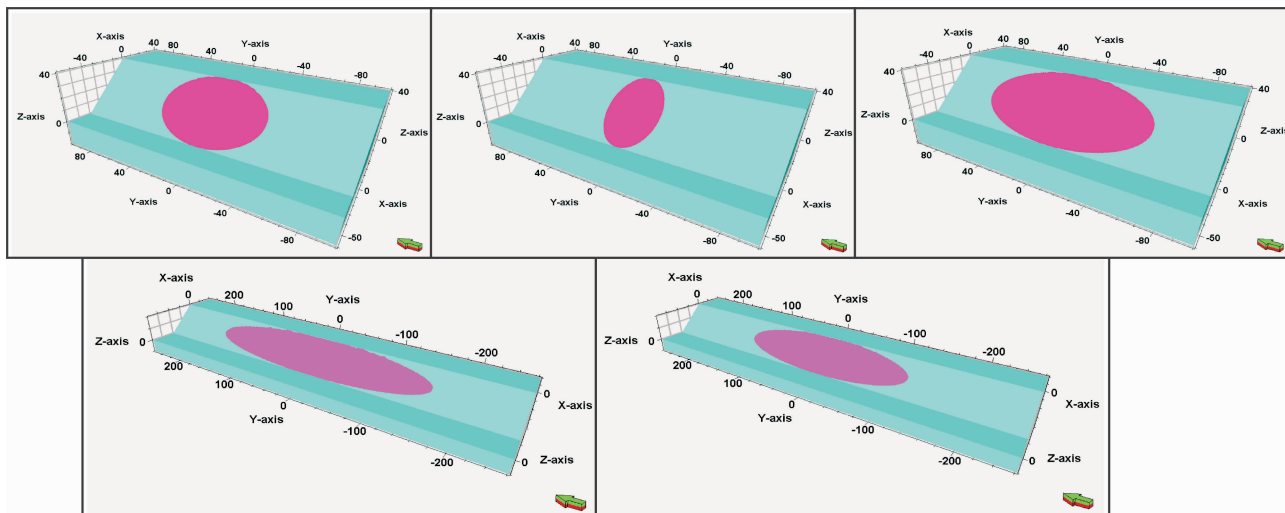


图1 三维地质模型(1, 2, 3, 6, 8 倍坡高)

方向、任意位置的模型切面可视化分析与三维空间形态对比, 可以满足对交互式模型分析和质量控制的需要。

2 基于整体滑动的三维稳定性分析方法及算理验证

假设滑坡体重心位置落在主滑方向线上, 根据转动力矩 M_S 和抗滑力矩 M_R 关系, 这时安全系数有:

$$F_s = \frac{M_R}{M_S} = \frac{(c \times S_{\text{曲面}} + W \times \cos\theta \times \tan\varphi) \times R}{W \times d} = \frac{(c \times S_{\text{曲面}} + W \times \cos\theta \times \tan\varphi)}{W \times \sin\theta} \quad (1)$$

对此, 我们通过经典算理进行可行性验证。假定某均质干燥边坡, 坡高 40 m, 坡度 45° , 土体容重 $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$, 滑面强度指标 $c = 30 \text{ kPa}$, $\varphi = 30^\circ$ 。滑面为三维椭球面, 函数表达为 $\frac{(x+40)^2}{40^2} + \frac{y^2}{0.5w^2} + \frac{(z-40)^2}{40^2} = 1$, 其中 w 为滑体横向最大宽度。分别取 w 为 1, 2, 3, 6, 8 倍的坡高(40 m, 80 m, 120 m, 240 m, 320 m)(图1), 其主滑剖面形态及重心点位置见图2, 图3。本文计算参数及不同方法的计算结果见表1, 表2。

表1 基于三维地质模型的滑动极限平衡法参数

参数/(单位)	w/h				
	1	2	3	6	8
c/kPa	1.15	1.14	1.14	1.15	1.15
$\varphi/^\circ$	1.30	1.22	1.20	1.19	1.19
$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2
$\theta^*/^\circ$	1.25	1.17	1.16	1.14	1.14
S^*/m^2	2201.04	4016.67	5888.6	11547.8	15489.1
V^*/m^3	11013	22026	33027	66093	88181
F	1.27	1.23	1.22	1.21	1.21

注: * 标识参数均为三维地质模型获取。

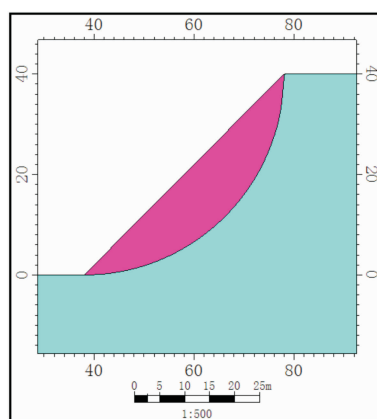


图2 剖面图

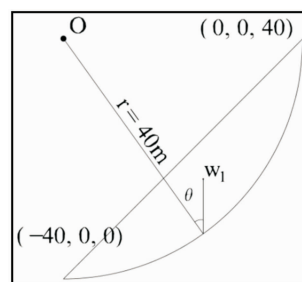
图3 重心点位置及 θ 角

表2 不同三维极限平衡法计算结果

计算方法	w/h				
	1	2	3	6	8
三维普通条分法 ^[12]	1.15	1.14	1.14	1.15	1.15
三维简化 Bishop 法 ^[13]	1.30	1.22	1.20	1.19	1.19
三维简化 Janbu 法 ^[14]	1.25	1.17	1.16	1.14	1.14
三维简化 Janbu 法 ^[15]	1.25	1.16	1.15	1.13	1.13
三维 Spencer 法 ^[16]	1.34	1.24	1.22	1.21	1.21
改进三维安全系数法 ^[17]	1.48	1.34	1.29	1.26	1.26
滑面正应力修正法 ^[18]	1.30	1.22	1.20	1.19	1.18
三维不平衡推力法 ^[19]	1.25	1.19	1.18	1.17	1.17
三维 M-P 法 ^[20]	1.37	1.26	1.23	1.22	1.21
本文方法	1.27	1.23	1.22	1.21	1.21

通过表 2 可以看出, 基于模型的整体滑动稳定性分析方法与其他方法相比较为合理。同时, 当滑体沿坡面走向延伸的宽度远大于滑动方向的长度时, 稳定系数逐渐变小, 也与前人的计算成果较为接近。

3 工程示例

3.1 滑坡概况

某滑坡位于河流凸岸的高陡黄土斜坡上, 滑坡整体形态呈“簸箕”状, 为 1996 年发生的新滑坡。坡滑体坡长约 428 m, 前缘宽约 700 m, 平面面积约 0.19 km², 主滑方向 248°。根据野外调查和工程揭露, 滑坡区出露地层由老到新依次为第三系甘肃群桔红色泥岩 (Ngn)、中更新统黄土 (Qp²) 和晚更新统黄土 (Qp³)。其中, 第三系甘肃群桔红色泥岩具隔水作用, 遇水易软化, 滑床完全落于该新近纪泥岩之上。

3.2 滑坡三维地质建模

3.2.1 数据预处理

(1) 收集本地区滑后大比例尺地形成果资料, 并对文件的信息完整性进行核对检查。

(2) 根据需要圈定工作区范围, 将范围内的地形线进行矢量化处理。

(3) 批量化导出地形线拐带坐标属性信息, 并进行格式整理。

(4) 结合野外综合调查、钻孔工程控制、基础地质资料等成果资料, 提取出反映钻孔位置、滑动控制面深度、滑坡体范围、地层划分等有效地质信息。

3.2.2 框架模型的建立

建立井数据信息库, 通过对钻孔参数、岩心编录等信息进行分项数字化处理, 导入并生成可视化的井数据, 同时确立滑动面深度控制, 见图 4。可以看出钻孔中包含了地层划分、滑坡体厚度形态等空间数据信息。

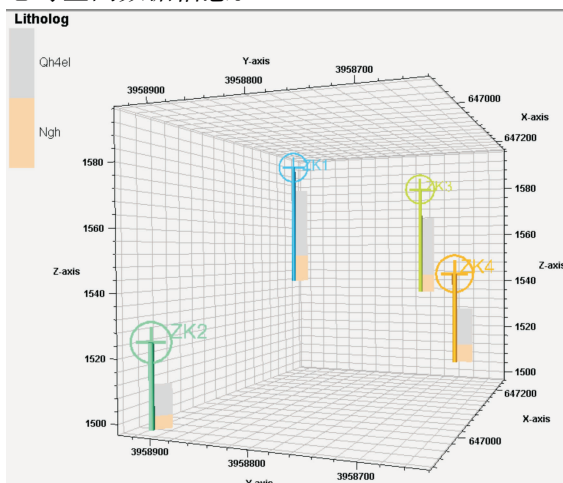


图 4 钻孔空间关系及地质信息表达

导入预处理的地形文件, 在三维空间中生成并显示空间点/线数据, 见图 5。通过在二维平面和三维空间视图下的数据检查, 对缺漏的等高线进行补查或对数字化输入时的无效点或异常点进行修正或删除。

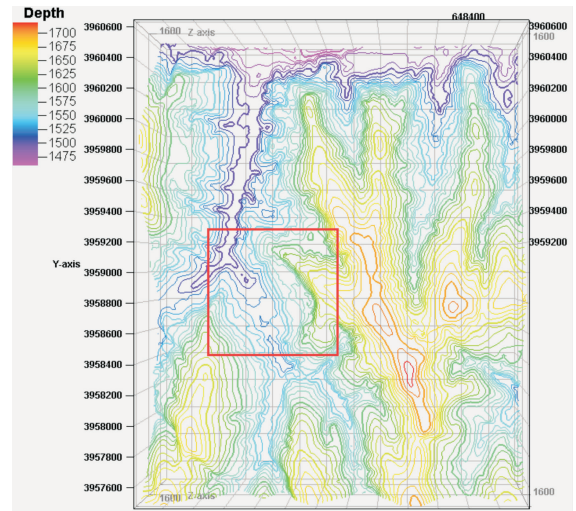


图 5 地形图

根据模型实际需要, 可以调节内插网格的精细化程度, 对修正后的地形线进行等厚线插值计算生成地形框架模型。当精细化程度越高, 所反映的地形结构或地质现象与预处理数据资料越相符, 软件模拟的运算处理速度也相对越慢。

通过离散的空间数据控制构建一个完整的具有地质意义的滑动面是滑坡地质模型的关键, 利用井资料中获取的滑动面信息以及测绘资料或地形结构面上拾取的滑坡体边界作为条件约束, 对数据资料进行曲面插值计算生成三维空间滑动面。对生成的滑动面空间展布进行质量检查, 结合地质认识, 对偏离地质规律的区域进行局部调整, 以获得能够反映客观实际的滑动面空间形态 (图 6)。

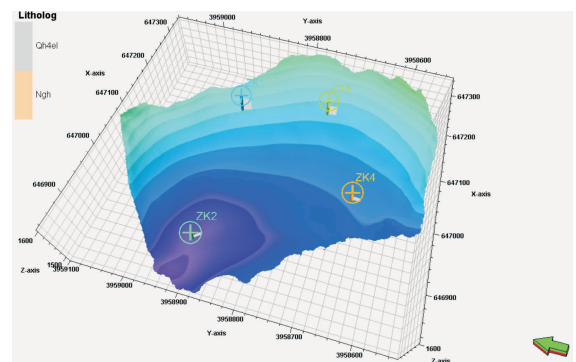


图 6 滑动面形态与钻孔空间控制

3.2.3 三维地质模型

利用地形面、滑动面和底界面的限定 (图 7), 根据模型精度需要, 通过空间插值运算构建三维

可视化滑坡地质模型, 即赋有地质信息的属性模型(图8)。

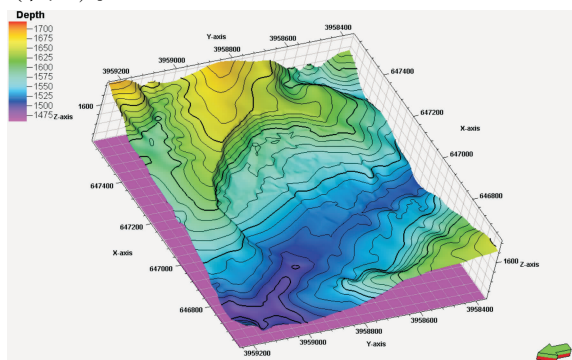


图7 框架模型

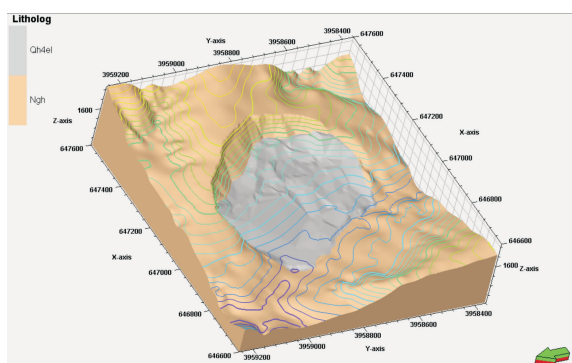


图8 三维滑坡地质模型

为了更好地研究和认识滑坡体地质特征, 可以以任意方向任意位置进行实时切面快速制作(图9, 图10), 同时还可以按照自由设定的步长连续追踪滑坡体切面地质特征。切面显示界面不仅可以进行尺度化测量, 还能够以任意比例尺生成矢量格式文件, 可以直接通过制图软件进行编辑利用。

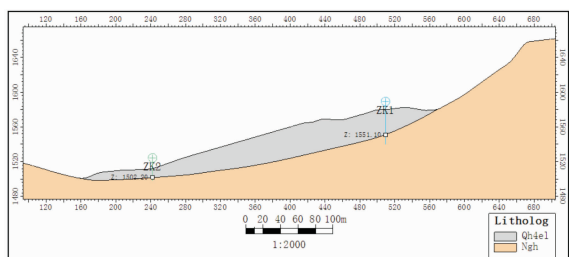


图9 过ZK1, ZK2 钻孔的剖面图

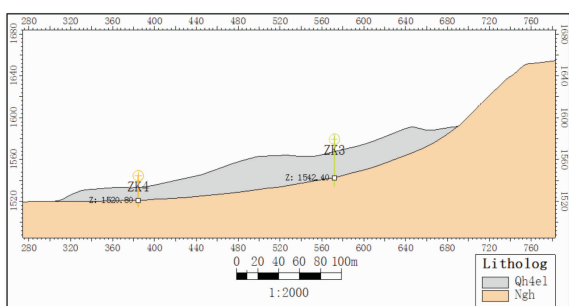


图10 地层控制下的过井剖面

3.3 稳定性分析

结合室内土工试验, 分别计算滑后坡体天然及饱和状态下的滑坡稳定性。结合主滑剖面及过井剖面, 由于滑体前缘的阻滑效应较为微弱, 近似认为无阻滑体的简单滑坡(图11)。利用AUTOCAD 工程制图软件的查询质心, 基于三维整体滑动极限平衡法, 计算得到滑后土体的安全系数为1.57, 属稳定状态, 结合近期坡体的变形破坏迹象, 该滑坡在雨季复活的可能性比较小, 危险性较小。计算结果见表3。

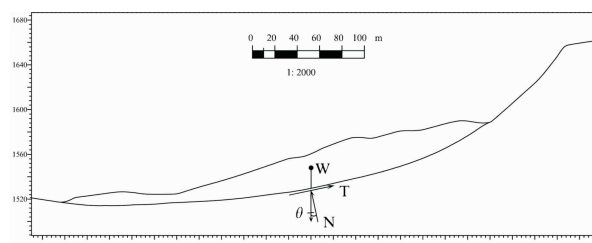


图11 主滑剖面

表3 基于三维地质模型的滑动极限平衡法参数

状态	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\theta^*/(\circ)$	S^*/m^2	V^*/m^3	F
天然	19	14.5	18	11.6	200377	3421278	1.57
饱和	17.14	12.1	20	11.6	200377	3421278	1.29

注: * 标识参数均为三维地质模型获取。

4 结论

相对于传统的二维平面表示方式, 三维地质模型能够完整直观地表达地质现象的空间关系, 便于工程研究及分析处理。本文通过对滑坡地形数字化处理、地质资料分析整理, 基于三维网格化的空间构建, 实现了三维滑坡地质模型的建立。

三维地质模型的建立不仅提供了直观准确的滑坡地质形态, 结合软件强大的数据处理和解析能力, 还可以实现模型剖面的快速制作及成果资料的数据导出, 为成果资料后期处理整饰及滑坡分析提供了有效的参考依据。同时, 通过三维模型上滑坡体体积和滑动面表面积的读取, 利用基于三维模型的整体稳定性分析方法, 不需要像常规的三维极限平衡方法进行冗繁的条柱划分, 即可实现简单边坡的三维稳定性分析解答。在之后的工作中, 需要通过进一步的理论分析与研究, 以便更好地服务于实践应用。

参考文献:

[1] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社

- 社, 2008.
- [2] 谭冬生, 洪政, 袁小龙, 等. 基于 Open GL 的滑坡三维可视化计算及动态模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2013(8): 57 – 61, 114.
- [3] 申健, 徐大伟, 蔡雄翔. 基于钻孔数据的滑坡三维地质建模研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 127 – 130.
- [4] 乔建平, 朱阿兴, 陈永波, 等. GIS 与人工智能结合下的三维可视化滑坡危险度评价[J]. 中国科学 E 辑(技术科学), 2003, 33(S1): 79 – 84.
- [5] 王旭春, 蒋宇静, 赵月, 等. 滑坡 GIS 可视化研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2511 – 2514.
- [6] 纪虹, 司鸽. 基于 GIS 技术的三峡库区滑坡涌浪灾害易损性可视化研究[J]. 中国安全科学学报, 2013(9): 166 – 171.
- [7] 谷天峰, 王家鼎, 王念秦. 吕梁机场黄土滑坡特征及其三维稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013(7): 2009 – 2016.
- [8] 祝文化, 田金华, 池秀文, 等. IDL 支持下的滑坡可视化方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(8): 55 – 56, 61.
- [9] 黄海峰, 易武, 曾怀恩, 等. 利用 Google SketchUp 快速构建滑坡三维模型[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 333 – 338.
- [10] 钟登华, 秦朝霞, 李明超, 等. 三维地质模型支持下的滑坡体稳定性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(1): 65 – 73.
- [11] 李明超, 胡兴娥, 安娜, 等. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. 岩土力学, 2008(5): 1355 – 1360.
- [12] Hovland H J. Three-dimensional slope stability analysis method [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(9): 971 – 986.
- [13] Hungr O. An extension of bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 113 – 117.
- [14] Hungr O, Salgado F M, Byrne P M. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 679 – 686.
- [15] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 657 – 661.
- [16] Zhang X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(6): 658 – 671.
- [17] 李同录, 王艳霞, 邓宏科. 一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 611 – 614.
- [18] 朱大勇, 钱七虎. 三维边坡严格与准严格极限平衡解答及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1513 – 1528.
- [19] 陈胜宏, 万娜. 边坡稳定分析的三维剩余推力法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(3): 69 – 73.
- [20] 陈昌富, 朱剑锋. 基于 Morgenstern-Price 法边坡三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1473 – 1480.

Research and Application of 3D Visualization Landslide Geological Model

ZUO Jianyang^{1, 2}, NI Wankui¹ and JING Bo¹

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 510054, China;

2. Ningxia Institute of Land and Resource Investigation and Monitoring, Yinchuan 750002, China)

Abstract: As geological expression of the discrete data in 3D space, visualization landslide model is not only directly describe and characterize the geological information, but also can help us to research and analyze the geological problems. Combined with the engineering data, the 3D landslide geological model can be made by Petrel, which has good visual and scale effect, also can be used to section segmentation and data export. Through the landslide volume and sliding surface area can be read, the 3D model can provide a reliable reference for the stability analysis method and be verified by classical calculation.

Key words: 3D geological model; landslide; visualization; stability analysis