

# 基于数字摄像测量的开挖空间模型及不稳块体的快速识别

王述红, 杨 勇, 王 洋, 郭牡丹, 张敏思

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 开挖空间模型构建和不稳块体识别是岩体稳定性研究中非常重要的基础性研究课题。采用数字摄像测量技术可快速获取现场围岩结构面信息, 建立围岩开挖空间模型。在此基础上, 提出一种新的块体识别方法, 即将岩体划分为小的块体单元, 然后依次添加结构面, 对块体单元进行切割, 最后去除网格合并块体单元形成形态复杂的空间块体模型。运用该识别方法对丹东一大连高速公路隧道工程的不稳块体进行快速识别, 结果显示: 该方法具有较强的通用性和可靠性, 有助于岩体隧洞开挖过程中超前预报和加固方案的优化。

**关键词:** 岩石力学; 三维空间块体; 结构面网络模拟; 块体切割; 块体理论

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)增 1 - 3432 - 07

## SPATIAL MODELLING AND QUICK IDENTIFICATION OF UNSTABLE ROCK BLOCKS BASED ON DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

WANG Shuhong, YANG Yong, WANG Yang, GUO Mudan, ZHANG Minsi

(School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

**Abstract:** The 3D modelling and the identification of unstable blocks are the crucially basic issues in jointed rock mass stability research. The deterministic structures of rock mass can be measured by adopting digital photogrammetry, and the model can be built by 3D structural network simulation, intersecting lines of surface structure and closed-loop analysis. A new block identification method is proposed: rock mass is divided into mesh and small block units are formed, then structure surfaces are added orderly to cut block into small units, after that mesh is removed and small block units are merged, finally a complex block is formed. An engineering example is analyzed based on this new identification method. The results show that the method is possessed of preferable generality and reliability, and it also could be used for advanced prediction and reinforcing scheme optimization in excavation process of rock tunnel.

**Key words:** rock mechanics; 3D spatial blocks; discontinuities network simulation; block cutting; block theory

## 1 引言

工程岩体开挖过程中, 在一定空间区域内由三维有限长的随机性和确定性结构面切割形成的所有

块体的识别是岩体研究中非常重要的基础性课题。在隧道掘进过程中, 经常要遇到许多不良地质现象, 如断层、节理、裂隙、破碎带等, 这些不良地质构造的存在, 不仅影响掘进速度, 有时甚至还会造成严重的工程事故, 因此, 查明地质条件与岩土工程

**收稿日期:** 2009 - 11 - 30; **修回日期:** 2010 - 05 - 29

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209405); 国家自然科学基金资助项目(10872046); 中央高校基本科研业务专项资金(N090401008); 辽宁省自然科学基金项目(20092011)

**作者简介:** 王述红(1969 -), 男, 博士, 2000年毕业于东北大学结构工程专业, 现任副教授, 主要从事工程岩体稳定性分析方面的教学与研究工作。  
E-mail: shwang@mail.neu.edu.cn

地质特征至关重要。由于隧道工程地质条件的多变性、复杂性,加之手段、工期、经费的限制,在开挖前不可能将地质情况勘探得十分清楚,而必须通过开挖后所揭示的地质情况对围岩结构面进行再认识和再确定,因此,施工前和施工中所获得的地质和支护结构的相关信息的多少、准确程度以及迅速程度将直接影响到设计的优化、潜在灾害的预测预报及施工质量的好坏。国内发生过类似的施工事故,如渝怀铁路圆梁山隧道在施工过程中就因未能及时掌握隧道前方的地质情况,发生过地下水喷涌、施工人员伤亡的事故。

目前,在岩体隧道开挖过程中,对隧道掌子面揭示情况的描述都是由人工来完成。这种情况下,不但现场的工作量很大,而且由于现场技术人员的地质知识水平及工作态度的不同,描述的完整性和准确性不尽相同,数据缺乏一致性和可比性。除此之外,人工分析还有很多缺点,比如为了了解隧道开挖部分和隧道前方的地质结构,需要建立隧道的三维模型,靠人工绘制几乎无法实现,即使绘制出来也只能对准确认识开挖前方岩土体性质起一定的借鉴作用,从工程角度来讲,还远远不能满足工程预测预报的需要,因此,有必要寻找一种快捷、准确地描述隧道掌子面地质构造的方法。本文提出采用数字摄像方法,即采用 ShapeMetriX3D 获取工程岩体三维图像,并将采集数据导入自行开发的不稳块体快速识别和分析系统(GeoSMA - 3D)<sup>[1~3]</sup>,对工程岩体的稳定性实施超前预测预报。

另一方面,有关随机块体几何搜索的研究,通常都是对开挖面上的随机块体进行搜索分析,并且开挖面一般是简单的平面,这与实际工程中的开挖曲面差别很大<sup>[4~7]</sup>。同时,块体理论近年来取得了长足发展,并在岩体工程稳定性分析方面得到了广泛应用,包括块体识别、块体可移动判断和块体力学稳定性分析等<sup>[8~12]</sup>。目前,块体识别是块体理论发展的关键环节,产生了很多方法。全空间赤平投影法只能对简单的凸体进行识别。在赤平投影法的基础上,运用拓扑技术开发三维块体识别方法较为繁琐,且不能识别凹体。一般块体理论把裂隙简化为有限圆盘,比较符合工程实际,但并不能判别凹体的可移动性。在诸多方法中适合计算机程序实现并可以判断出所有块体的分析方法很少。本文在研究工作的基础上,简要介绍自行开发的 GeoSMA -

3D 分析系统<sup>[1~3]</sup>,设计的方法易于计算机程序的实现,并且可以实现凹体的搜索。结合丹东一大连高速公路二道河隧道工程现场地质资料的图像和信息资料,提出采用数字摄像测量技术(3GSM)在隧道掌子面测量岩体结构面产状和搜索块体等,并利用所建立的全空间模型,实现快速识别不稳块体。

## 2 数字摄像测量结构面

数字摄像测量基于数字影像与摄影测量的基本原理,通过摄像手段确定目标的外形(地形以外)和运动状态的摄像测量与遥感的分支学科,它可以瞬间获取被测物体的大量物理和几何信息,是一种基于数字信息和数字影像技术以及自控技术手段的非接触式测量手段。本文采用的 ShapeMetriX3D 是一个能够得到三维图像表面的全新的系统<sup>[13]</sup>,具有下列特点:(1)客观地复写地体现出岩体条件;(2)岩体估计评价软件接口方便,所需时间较短;(3)公制计量(长度、距离、面积等)直接由计算机形式提供;(4)测量方位可通过软件获取;(5)结构面信息(方位角或间距)可以立即获取;(6)3D 图像不仅反映岩体表面信息,而且反映了岩体真三维情况的立体影像;(7)不需要特殊的测量技术以及设备,且均较容易使用掌握。

ShapeMetriX3D 使用一个通过 3G 软件和测量来进行标定高标准的数码相机进行数据的采集。使用这个标定的照相机,从 2 个不同的角度来对指定的区域进行成像。在成像之前,必须将范围杆预先放置好。完整的数据采集过程(设置范围杆,拍两张照片)简便易行:选定测点、树立范围杆、确保自由视角、在左边  $O_1$  处拍摄第 1 张照片,在右边  $O_2$  处拍摄第 2 张照片、移除范围杆。整个岩体信息获取过程仅需 1 min(原理见图 1)。

图 2 为现场隧道掌子面获取的图像,在站点的数据采集完成后,该图像被转到标准的电脑上,并通过 SMX 模型重建软件将其合成为三维图像。使用的原则是在确定范围内的立体摄像测量,例如不需要参照物来确定在它们之间图像的相关方位,保证各种尺寸的表面可以通过将照片重建成三维图像来成像和处理。必要条件是那些表面必须显示出确定(不规则)的结构(质地),三维的图像表现了所记录表面的外形,使用所提供的三维软件可以进行三维

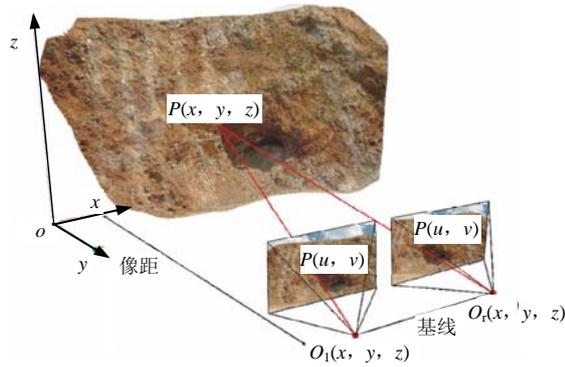


图1 ShapeMetriX3D 图像合成原理

Fig.1 Principle of ShapeMetriX3D image synthesis

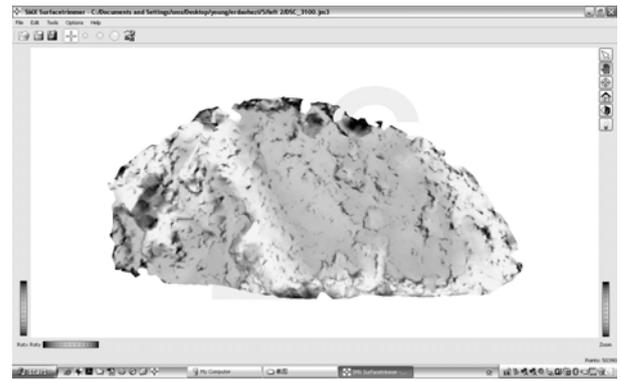


图3 三维影像合成模型

Fig.3 3D photograph model



(a) 左视图



(b) 右视图

图2 影像获取

Fig.2 Photograph capturing

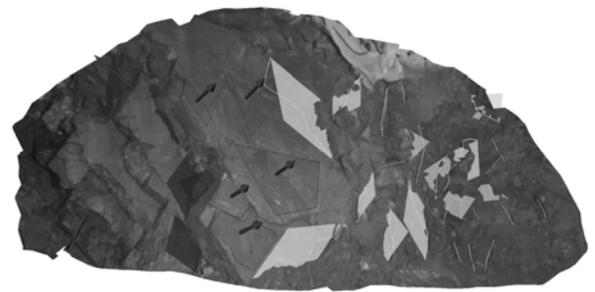


图4 节理裂隙的空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of joint fissures



图5 主要裂隙分布图(AutoCAD 导出)

Fig.5 Distribution map of main fractures(output by AutoCAD)

图像测量和评价。

在结构面信息解译上，尤其是产状信息的解译较为复杂。研究中在一个节理面上获取不在同一直线上的至少 3 个点的物方空间坐标(x, y, z)，用最小二乘法建立节理面的拟合平面方程，求取对应的法向量，再根据法向量结合不同的判据建立节理面产状的计算模型。

图 3 为建立的三维影像合成模型，图 4 为节理裂隙的空间分布图(可由 AutoCAD、Excel 直接导出)，在此基础上可绘制现场工程岩体的主要裂隙分布，如图 5 所示。

### 3 块体识别

利用上述方法现场采集岩体开挖结构面信息之后，可以直接导入作者开发的岩土工程建模与分析系统 GeoSMA - 3D，有关系统的介绍可以参考王述红等<sup>[1~3]</sup>的研究成果，ShapeMetriX3D 的数据可以直接导入模型。需要说明的是，在结构面参数导入之后，模型中形成了块体形状(包括凹形与凸形)，然而在计算机程序中，凹体的表达与识别非常难于实现，这也是块体快速识别的关键所在。一般把裂隙形成块体看作是一种状态，这种方式很难在复杂的岩体环境中识别出所有块体。本文提出的方法把

裂隙形成岩体看作是一种过程, 其实现方法分为两大部分, 即裂隙对岩体的切割和块体的合并。在切割的过程中, 作如下约定: (1) 块体的初始化为已知的凸形块体, 通常为所建的岩体模型; (2) 按照裂隙的顺序逐一地对现有块体进行切割; (3) 只要裂隙与块体相交, 就用裂隙把此块体完全切割。在这 3 条约定下, 块体切割后形成的块体均为凸体, 此时再恢复裂隙, 合并凸形块体为复杂的块体。

### 3.1 切割过程

对块体切割的过程其实就是对块体中每个面的切割, 如图 6 所示, 括号外是切割前的面的编号, 括号内是切割后新形成的面在新块体中的编号。

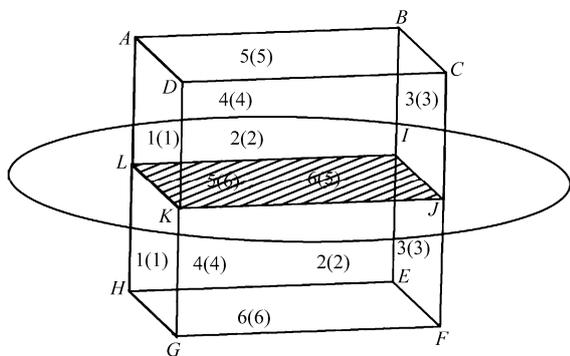


图 6 裂隙面切割块体

Fig.6 Block cut by a fracture surface

按编号遍历此块体中的每个面, 实现裂隙与多边形的切割。裂隙切割多边形, 有以下 3 种情况:

(1) 多边形顶点全在裂隙面的上方, 此时把这个多边形编号后放到上面的块体中。

(2) 多边形顶点全在裂隙面的下方, 此时把这个多边形编号后放到下面的块体中。

(3) 若多边形顶点分布在裂隙面的两侧, 用裂隙平面把这个多边形分成 2 个多边形, 编号后分别放入上下 2 个块体中。

这样模型中就得到了 2 个新形成的块体, 完成了裂隙切割一个块体的过程。接下来用这个裂隙切割其他与其相关的块体, 直到切割完所有与其相关的所有块体, 然后进入下一个裂隙的切割过程。

### 3.2 隧道开挖面的处理

裂隙切割块体的过程中, 裂隙面都是平面, 然而隧道开挖面并非平面, 而是曲面。曲面切割块体的程序实现非常的复杂, 所以考虑对结果影响不

大的条件下, 近似用平面代替曲面<sup>[1]</sup>。

### 3.3 块体的合并过程

在切割过程中, 假设只要裂隙与块体相交, 就用裂隙把此块体完全切割, 但实际上并非如此。系统需要把裂隙还原到原来的状态, 这就导致了原来被分开的块体合并。合并的条件如下: (1) 两个块体必须共同拥有一个裂隙面; (2) 2 个块体分别位于裂隙面的两侧; (3) 处于裂隙面上的两个多边形必须有交集, 且这个交集不属于裂隙圆盘。满足这 3 个条件的 2 个块体其实属于一个复杂的块体, 系统将自动实现对其拼装。

### 3.4 程序流程图

对岩体结构面的调查会产生大量的原始数据, 同时在对这些数据进行处理的过程中, 也会产生大量的中间数据。如何对这些数据进行科学的管理和有效的处理, 以充分利用和挖掘其中的有效信息, 从而保证成果的准确可靠性, 是一个关键问题。工程岩体裂隙发育的特点决定了对裂隙的研究必须建立在大量的统计分析基础之上, 以实现研究区具体工程部位岩体裂隙进行优势方位分析及配套参数提取。

对现场实测的数据管理主要采用了数据库的方式, 包括: (1) 岩体裂隙方位信息库, 该库包含了工程区所有实测到的裂隙方位, 以及每一条裂隙所在的硐号、方位、层位、工程部位、风化带等信息, 主要用于裂隙优势方位分析; (2) 工程岩体裂隙基本信息库, 该库存储了工程普遍测网法获得的万余条裂隙的基本信息, 包括每条裂隙对应的测点号、位置、产状及供绘制裂隙平面展布图的坐标信息等; (3) 岩体裂隙几何模型数据库, 该数据库实际上是由一系列数据文件构成的数据系统。每个测点对应一个文件, 该文件存储了测点的各条裂隙的产状及相对测网原点的局部几何坐标。

在本文研究的技术方法中, 块体搜索流程如图 7 所示。

## 4 可移动性判别

在快速识别块体方法的基础上, 提出了采用经典的块体理论对块体可移动性进行判别, 即块体可移动必须满足 3 个条件: 具有出露面、几何可移动、稳定系数小于规定值。

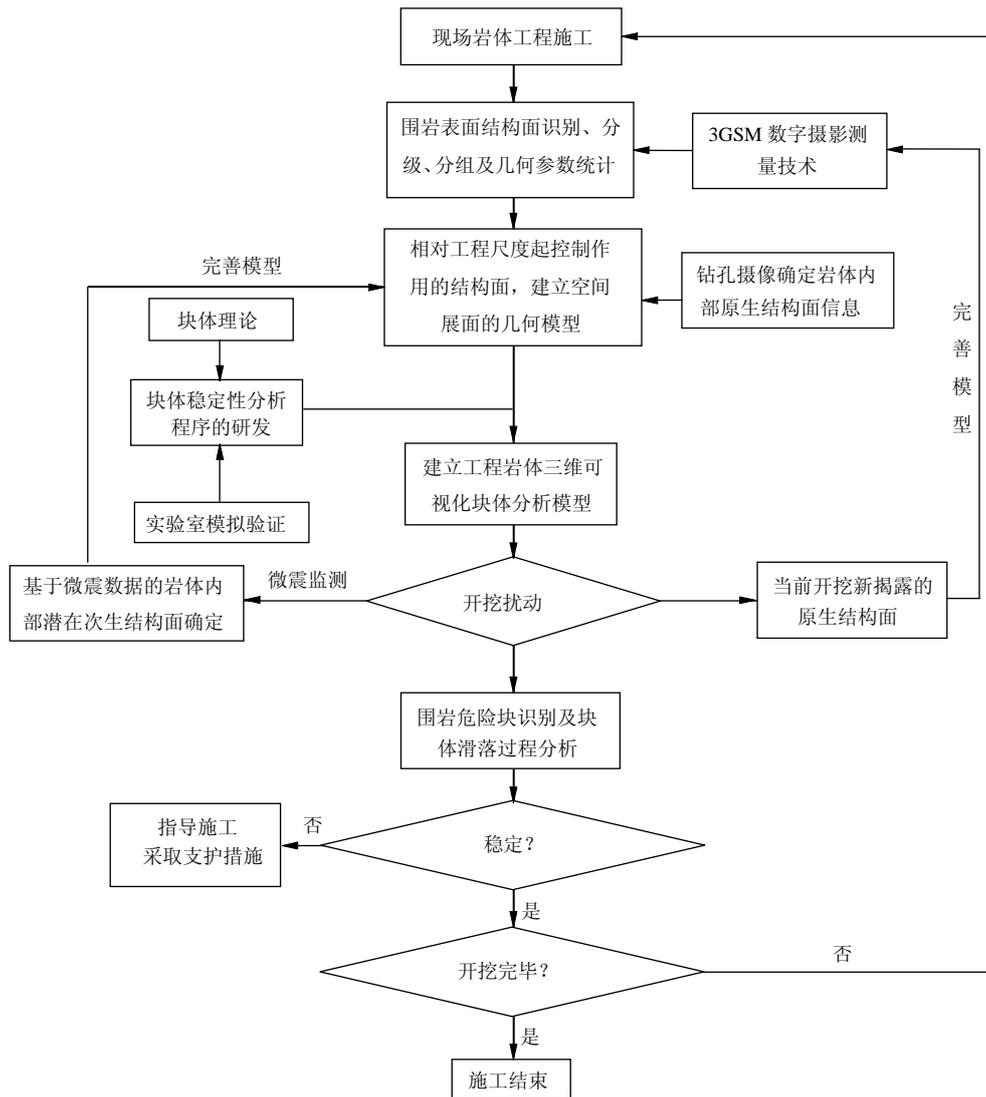


图7 块体搜索流程

Fig.7 Flow chart of block searching process

(1) 几何可移动的判别。  $\bar{w}$  为块体所受驱动力,  $\bar{n}_i$  为块体表面的方向矢量(指向块体内部),  $i$  为多边形在块体内的编号(不包括出露面)。几何可移动表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{S} = \{ \bar{s} | \bar{n}_i \cdot \bar{s} \geq 0, \bar{w} \cdot \bar{s} \geq 0 \} \text{ (非空)} \\ \bar{w} \cdot \bar{s}_0 = \max \{ \bar{w} \cdot \bar{s} \} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\bar{s}_0$  为块体的运动方向。

(2) 稳定性的判别。稳定性系数采用 Mohr-Coulomb 准则计算, 主动力只考虑块体自重, 分以下 2 种情况:

① 当块体沿单面  $i$  滑动时, 按下式计算稳定系数:

$$K = \frac{Q \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i S_i}{Q \sin \alpha_i} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为块体自重,  $\alpha_i$  为滑动面倾角,  $S_i$  为滑动面  $i$  的面积,  $c_i$  和  $\varphi_i$  分别为滑动面上的黏聚力和内摩擦角。

② 当块体沿双面  $i$  和  $j$  滑动时, 按下式计算稳定系数:

$$K = \frac{N_i \tan \varphi_i + N_j \tan \varphi_j + c_i S_i + c_j S_j}{Q \sin \alpha} \quad (3)$$

式中:  $c_i$ ,  $\varphi_i$  和  $c_j$ ,  $\varphi_j$  分别为滑动面  $i$  和  $j$  上的黏聚力及内摩擦角;  $S_i$  和  $S_j$  分别为滑动面  $i$  和  $j$  的面积;  $\alpha$  为滑动面  $i$  和  $j$  交线棱的倾角;  $N_i$  和  $N_j$  为作用在两滑动面上的法向力。

### 5 工程算例

工程算例结合丹东—大连高速公路岫岩地区二道河隧道工程(图 2 给出了在丹东方向出口 20 m 处上台阶开挖时采集的图像)。在前文中已由 ShapeMetriX3D 分析得出二道河隧道掌子面节理分布情况, 并以 AutoCAD 形式给出节理分布信息(见图 5)。开挖扰动区岩体主要有 3 组节理分布(见图 4): 组 1 由 7 条节理组成, 组 2 由 8 条节理组成, 组 3 由 7 条节理组成。现将所获取结构面信息导入 Excel 并进行结构面的分级、分组、几何参数统计。节理分布情况见表 1, 数字摄像所获取岩体节理信息可用表 1 中参数表示。

表 1 岩体结构面模拟采用的参数

Table 1 Calculation parameters of rock structure plane modelling

分组编号	倾角		倾向		迹长 均值 μ/m	间距 均值 /m
	均值 μ/(°)	标准差 σ	均值 μ/(°)	标准差 σ		
1	53	4	202	4	6.5	3.0
2	58	4	330	4	6.0	2.0
3	68	4	105	4	5.0	2.5

根据所输入的岩体节理数据, 可以自动生成赤平投影极点图、等值线图; 利用等值线图进行不连续面数据分组, 通过直方图反映各个分组数据; 自动选择统计分布形式; 以圆盘模型为岩体节理模型, 利用蒙特卡洛方法随机模拟岩体不连续面网络, 最终绘制出三维节理网络图; 在岩体三维节理网络图中任意选定一个剖面, 可以表示出该剖面上存在的模拟不连续面迹线。采用模块化设计方法, 将每部分功能划分成相对立的模块, 然后用可视化图形界面下的菜单或按钮等元素把各个模块有机结合起来, 统一实现程序的目标。图 8 为具有出露面的块体, 图 9 为开挖面失稳块体全空间结构面分

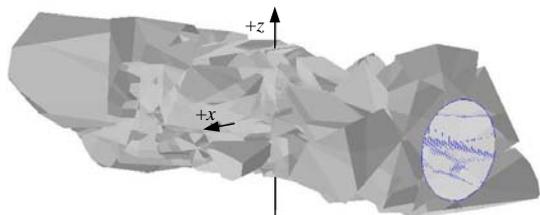


图 8 具有出露面的块体  
Fig.8 Opening block

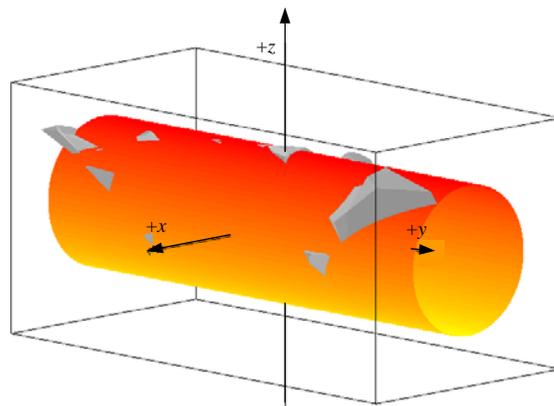


图 9 开挖面失稳块体全空间显示  
Fig.9 Spatial unstable blocks at the excavation face

布情况。

### 6 结 论

本文在作者相关研究基础上<sup>[1~3]</sup>, 提出了采用数字摄像测量技术测量岩体确定性结构面的方法, 并利用所建立的工程岩体开挖全空间模型, 实现不稳块体快速识别。通过研究得出如下结论:

(1) 采用数字摄像方法(即采用 ShapeMetriX3D)获取工程岩体三维图像, 方法简单易行, 不需要参照物来确定它们之间图像的相关方位, 保证各种尺寸的表面可以通过将照片重建成三维图像来成像和处理, 并实现将采集数据导入自行开发的不稳块体快速识别和分析系统(GeoSMA - 3D), 对工程岩体的稳定性实施超前预测预报。

(2) 基于隧道掌子面信息快速获取, 导入自行开发的分析系统, 建立了二道河隧道的空间模型, 并实现了不稳块体的快速识别, 该结果与实际观察到的不稳块体分布情况相吻合, 显示出该方法具有较强的通用性和可靠性。

**致谢** 本文在研究过程中得到了东北大学朱万成和杨天鸿两位教授的帮助, 在此表示感谢!

#### 参考文献(References):

[1] 王述红, 杨 勇, 王 洋, 等. 裂隙岩体隧道施工关键块体识别数值方法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 976 - 979.(WANG Shuhong, YANG Yong, WANG Yang, et al. Numerical method of key block identification for jointed rock tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 976 - 979.(in Chinese))

- [2] 王述红, 杨 勇, 郭牡丹, 等. 岩体隧道施工诱发的关键块体三维模型及其验证[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(6): 877 - 880.(WANG Shuhong, YANG Yong, GUO Mudan, et al. Three-dimensional model for key block due to rock tunnel construction and its computerized verification[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(6): 877 - 880.(in Chinese))
- [3] WANG S H, ZHANG Y B, ZHANG N, et al. 3D stability analysis of tunnel structures based on geometric stochastic blocks theory[C]// CAI M F, WANG J A, ed. Proceedings of the International Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. Beijing: [s. n.], 2008: 695 - 699.
- [4] 张奇华, 邬爱清. 边坡及洞室岩体的全空间块体拓扑搜索研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 072 - 2 078.(ZHANG Qihua, WU Aiqing. Study of spatial block topological identification of slope and cavern rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 072 - 2 078.(in Chinese))
- [5] 邬爱清, 任 放, 郭 玉. 节理岩体开挖面上块体随机分布及锚固方式研究[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(4): 27 - 34.(WU Aiqing, REN Fang, GUO Yu. A study on block random distribution and anchor design for joint rock excavation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(4): 27 - 34.(in Chinese))
- [6] 张奇华, 邬爱清. 随机结构面切割下的全空间块体拓扑搜索一般方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 043 - 2 048.(ZHANG Qihua, WU Aiqing. Geeneral methodology of spatial block topological identification with stochastic discontinuities cutting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 043 - 2 048.(in Chinese))
- [7] 邬爱清, 张奇华. 岩石块体理论中三维随机块体几何搜索[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 426 - 432.(WU Aiqing, ZHANG Qihua. Geometric identification of stochastic block in block theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 426 - 432.(in Chinese))
- [8] SHI G H, GOODMAN R E. The key blocks of unrolled joint traces in developed maps of tunnel walls[J]. International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics, 1989, 13(2): 131 - 158.
- [9] SHI G H. Single and multiple block limit equilibrium of key block method and discontinuous deformation analysis[C]// HATZER Y H ed. Proceedings of the 5th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation. Rotterdam: A. A. Balkema, 2002: 3 - 43.
- [10] 于青春, 薛果夫, 陈德基, 等. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.(YU Qingchun, XUE Guofu, CHEN Deji, et al. General theory of fractured rock mass[J]. Beijing: China Water Power Press, 2007.(in Chinese))
- [11] 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石块体系统的自动识别方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 51 - 55.(WANG Weiming, CHEN Shenghong. Automatic identification method for three-dimensional rock block systems [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, 31(5): 51 - 55.(in Chinese))
- [12] 邬爱清, 周火明, 任 放. 岩体三维网络模拟技术及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(6): 15 - 18.(WU Aiqing, ZHOU Huoming, REN Fang. Research on 3D rock joint network simulation techniques and its application to TGP[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(6): 15 - 18.(in Chinese))
- [13] 奥地利 Startup 公司. ShapeMetriX3D 系统使用手册[R]. 沈阳: 欧美大地仪器设备中国有限公司, 2008.(Austrian Startup Company. ShapeMetriX3D model merger user manual[R]. Shenyang: Earth Products China Ltd., 2008.(in Chinese))