DOI：10.16285/j.rsm.2017.0101

土石混合体斜坡地质结构精细探测新途径及其应用

夏加国[1, 2, 3]，高 玮[1, 2]，程雅星[1, 2]，胡瑞林[1, 2]，徐佩芬[1, 2]，隋皓月[1, 2]

（1. 中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室，北京 100029；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3.中国核电工程有限公司，北京 100840）

摘 要：土石混合体滑坡具有分布范围广、发生频率高、规律性差等显著特点，是西部山区及其重大工程建设中最为常见的灾害类型之一，其内部复杂的土-石结构是构成该类滑坡防治困难的关键因素。为了获取土石混合体斜坡接近真实的地质结构，提出通过探窗组合法，即采用高分辨的地球物理勘探方法进行地质结构探测，并借助探坑土石结构的图像处理技术予以补充，以初步实现地质结构的精细探测及宏-细观结构模型的统一。应用该方法，对湖南省南岳区拜殿乡土石混合体斜坡进行地质结构探测，获得了该斜坡接近真实的精细地质模型。该研究方法可为揭示滑坡形成演化的结构控制机制提供基础，使滑坡的预测和防治工作更加科学合理。

关 键 词：土石混合体；地质结构；探窗组合法；地球物理探测；图像处理技术；精细探测

中图分类号：TU 42 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018)08－3087－08

A new approach for precise detection of the geological structure of soil-rock mixture deposit and its application

XIA Jia-guo[1, 2, 3], GAO Wei[1, 2], CHENG Ya-xing[1, 2], HU Rui-lin[1, 2], XU Pei-fen[1, 2], SUI Hao-yue[1, 2]

（1. Key Laboratory of Shale Gas and Geo-engineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: Soil-rock mixture landslides present obvious features such as wide distribution, high frequency of occurrence and poor regularity, which have become one of the most common geological disaster types in the western mountainous area and its key construction projects. The complex internal soil-rock structure is the critical factor leading to the difficulty of preventing and controlling the landslides. Hence, a new method by combining the geophysical prospecting and trenching was proposed to acquire the nearly realistic geological structure of soil-rock mixture landslides. The prospecting geological structure was conducted by high-resolution geophysical exploration techniques and supplemented using digital image processing of trench section. Thus, the precise geological structure of soil-rock mixture deposit was obtained, and the integration of macroscopic and mesoscopic geological structure was preliminarily achieved by the method. The proposed combination method was applied to investigate the precise detection of geological structure within the soil-rock mixture landslide in Baidian township of Nanyue district in Hunan province, and then the nearly realistic geological structure was obtained. This study provides a basis for revealing the structural control mechanism of the formation and evolution of landslides and makes the prediction and prevention of landslides more reasonably and scientifically.

Keywords: soil-rock mixture; geological structure; combination method; geophysical prospecting; digital image processing; precise detection

1 引 言

土石混合体是一种土-石混杂、性质特殊的地质体，其在自然界中分布十分广泛，崩坡积物、残坡积物、冲洪积物、冰水堆积物等均属于土石混合体，它是众多山区滑坡的重要载体。土石混合体作

收稿日期：2017-01-17
基金项目：国家自然科学基金重点资助项目（No. 41330643）；中国科学院科技服务网络(STS)计划项目（No.KFJ-EW-STS-094）；中国科学院战略性先导科技专项(B 类)课题项目（No. XDB10030100）。
This work was supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (41330643), the Science and Technology Service Network Initiative (STS) Project Grant (KFJ-EW-STS-094) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences Project (XDB10030100).
第一作者简介：夏加国，男，1989 年生，博士，工程师，主要从事岩土工程等方面的研究工作。E-mail：xia.jiaguo@163.com

为自然作用的产物，其内部结构极其复杂，内部块石的空间分布、形态、级配以及土的成分、粒度组成等具有显著的不均匀性和随机性，导致该类介质物理力学性质及斜坡变形破坏的规律性差、难以把握。因此，获取土石混合体斜坡内部杂乱无章结构的空间几何信息并给予合理的形态描述，是该类型滑坡预测和防治工作摆脱经验判断、走向理论分析的前提条件。

目前，土石混合体滑坡地质结构主要采用坑探、槽探、钻探和地球物理勘探等手段来获得，同时由于该类滑坡的复杂多变性，地球物理方法是探测其内部结构比较经济有效的方法。许胜保[1]利用电测深法对三峡库区滑坡体进行勘察，获取了滑坡体的厚度、岩层结构、滑带土的空间分布等几何信息；Sass 等[2]利用探地雷达对奥地利阿尔卑斯山区 23 处崩坡积成因的土石混合体边坡内部结构特征、块石分布等进行了系统分析；李富等[3]利用探地雷达和电测深勘探手段，准确反映了滑坡体的层位及其相应的深度；张慧颖等[4]综合利用多通道瞬态面波法和微动勘察法在碎石土滑坡上进行勘察，得到该堆积体内部存在大量尺寸不均、形状各异的块石或孤石及软弱构造区的结论。通过以上研究可以看出，现有传统的物探手段可以有效探测滑坡体内部岩层结构和基覆面形态等宏观结构信息，然而其对滑坡内部块石的识别精度仅为米级水平，对于直径在米级以下的块石结构则束手无策。

众所周知，土石混合堆积体的结构可以大致划分为宏观和细观两个层次：宏观层次为地质结构，主要由超径块石（孤石）、不同岩性单元和几何边界（主要为基覆面和岩性界面）构成，其主要控制整个斜坡的变形破坏形式；细观层次为土石结构，为宏观地球物理探测等手段难以探明而主要借助于细观手段才能获得的直径在米级以下的块石结构，其对土石混合体的物理力学性质起控制作用。可以看出，上述两种不同层次的结构均对土石混合体滑坡的形成和演化具有非常直接的影响。

国内学者在土-石细观结构方面亦开展了大量研究工作。油新华等[5-6]通过灰度处理技术对土石混合体数码照片内不同属性材料进行区分，并通过图像识别来生成包含砾石信息的线框模型；徐文杰等[7-9]基于数字图像处理技术对土石混合体进行形态分析，获取其相应的粒度组成及块石含量，并以此作为其细观地质结构建立的基础。廖秋林等[10]利用土石混合体中块石与土体颜色属性的差异性，提出基于数码图像的土石混合体结构模型的自动生成方法；丁秀丽[11]、周剑[12]等编制了图像处理程序，对现场拍摄的土石混合体数码照片进行处理，并基于此直接生成了颗粒流数值计算模型；李长圣等[13]利用数字图像技术对土石混合体的 CT 切片进行处理，并应用逆向工程重新构建了其三维结构模型。可以看出，目前在土石混合体细观结构处理方面，数字图像处理技术已成为其研究的主要途径之一。

通过以上国内外学者对滑坡内部地质结构探测的研究可以发现，现阶段在宏观和细观结构的探测方面确有一些有效的技术和方法，然而其各自在地质结构探测精度和完整性方面均存在不足。为此，在现有条件下，欲提高精度，本文提出通过探窗组合法，即采用高分辨的地球物理勘探方法进行地质结构探测，并借助探坑窗口土石结构的数字图像处理技术来弥补其在块石结构探测精度上的不足，以初步实现地质结构的精细化探测及宏-细观结构模型的统一。

2 探窗组合法原理

土石混合体斜坡的地质模型应综合反映岩土类型的差异、土石结构的空间形态及边界条件（包括基覆面、层面的形态与性质）。鉴于宏观及细观结构探测手段在块石精度和地质模型完整性等方面存在不足，本文采用探窗组合法来克服其障碍并发挥各自优势，进而实现复杂地质模型的确定。

探窗组合法具体原理如图 1 所示，即首先采用高分辨地球物理勘探技术确定斜坡内部超径块石（孤石）的空间位置与形态、岩性变异单元及基覆面位置；然后，为提高岩土结构探测精度，在目标岩性单元上开挖坑槽予以补充探测，并对揭露的土石混合体剖面进行数码照相和图像处理，进而获得不同目标岩性单元内部的土石结构；最后，在统一的坐标系统下，将块石结构和土石结构、基覆面形态进行空间定位与合成，进而得到斜坡精细化的数字地质模型。

3 地质结构精细探测及应用实例

拜殿乡土石混合体斜坡位于湖南省衡阳市南岳区拜殿乡乡政府周围，该斜坡由多期次的崩塌堆积形成，其一旦发生滑动，乡政府及其周边居民地作为最直接的受灾区影响最大，因而有必要对该斜坡稳定性进行研究分析，而该斜坡真实地质结构的确定是该研究的关键。本文通过前述的探窗组合法来获取其内部复杂的土石结构并建立宏-细观结构统一的精细化地质模型。

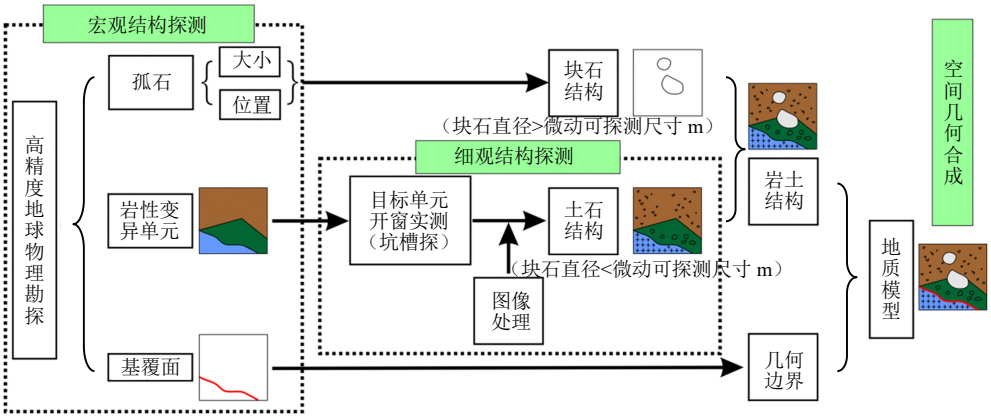


图 1　探窗组合法原理图

Fig.1　Schematic diagram of combination method of geophysical prospecting and trenching

注：块石结构指利用现有物探手段可识别的块石的空间几何结构；土石结构指利用现有物探手段难以辨识但可以借助于坑槽探窗口肉眼可辨块石的空间几何结构；岩土结构是整个斜坡的所有块石的空间几何结构，为块石结构和土石结构的几何合成；地质模型，是综合考虑了斜坡内部结构（即岩土结构）和下覆边界形态的空间几何结构；岩性变异单元是指通过物探手段可以辨识的地球物理特性相对一致的岩土体单元；基覆面是指被研究土石混合堆积体与其下覆岩土体之间的几何界面。

在各种地球物理勘探方法中，微动探测、电测深法、高密度电法、探地雷达法、瞬态面波法等最为常见，本次实例研究工作采用基于三重圆形小台阵观测系统的二维微动剖面探测方法来实现高分辨的地球物理勘探，以获取土石混合体边坡内部超径块石（孤石）、不同岩性单元和几何边界等宏观地质结构信息；在土-石细观结构方面则通过对土石混合体坑槽探测开窗剖面进行数码照相和数字图像处理等手段来获取目标单元的土石结构信息。拜殿乡土石混合体斜坡地质结构微动探测和坑槽探测的测线布置如图 2 所示，其中微动测线长约 70 m，坑槽探测线长度约 50 m。

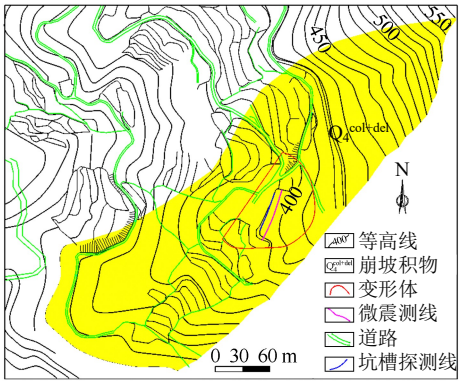


图 2　微动探测及坑槽探测的测线布置图

Fig.2　Line layout of geophysical prospecting and trenching

3.1　高分辨地球物理勘探

微动（microtremor）系指地球表面天然的微弱振动，是由体波和面波组成的复杂振动，且面波（Rayleigh 波和 Love 波）能量约占总能量的 70%以上[14]。微动探测方法是自 Aki[15]提出从微动信号中提取面波相速度频散曲线的方法以来，逐步形成的一种被动源物探方法。该方法是基于台阵观测技术记录地面微弱振动，再采用数据处理方法从微动数据中提取瑞雷波相速度频散曲线，进而反演获得地层横波（S 波）速度结构的地球物理探测方法[16–17]。二维微动剖面探测则是沿勘探线进行多个勘探点数据采集并获得二维微动剖面，以查明地质构造的二维剖面探测方法，该方法在地层结构划分，盆地结构调查，场地稳定性评价等领域得到了广泛的应用[18–19]。

3.1.1　微动探测仪器

本次微动探测采用日本地学数据分析研究所的 MTKV–1C 型微动探测系统进行数据采集。该系统由垂直分量拾振器（速度型，主频 2 Hz）和 24 位 LS–8800 型数据记录仪两部分组成（见图 3），其中数据记录仪的主要性能指标见表 1。

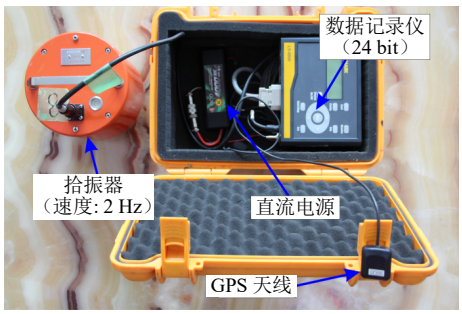


图 3　独立式数据采集系统示意图

Fig.3　Schematic of independent data acquisition system

表 1 数据记录仪主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of data acquisition system

道数/道	输入电压/V	增幅倍数/倍	采样频率/Hz	动态范围	时间校正	数据储存	记录方式	消耗功率/W	电源	适用温度/℃	适用湿度/%	尺寸及重量
3	±5	1、2、4、8、16、OFF	100、200	100 Hz采样率时实际动态范围 128 dB	内部GPS受信模块实时时间校正	SD·SDH卡	连续记录	0.25	DC6.5～16V	−20～50	30～85	170 mm×43 mm×120.5 mm、约 600 g

3.1.2 微动数据采集与处理

微动探测是基于台阵观测技术从现场实测的微动信号中提取瑞雷波频散曲线，进而获得地球物理剖面并在后期进行地质解释的方法，其中提取瑞雷波频散曲线的数据处理方法主要有频率−波数法（F-K 法）和空间自相关法（SPAC 法）。本次研究采用目前常用的空间自相关法（SPAC 法），从台阵微动数据中提取频散曲线并计算获得二维的视 S 波速度剖面[16, 18−19]，该数据处理方法要求观测点在观测台阵中沿圆周布置，且至少在圆周上等间距布置三套、在圆心上布置一套数据采集系统以组成圆形观测台阵。

在圆形观测台阵中，台阵的半径称为观测半径，半径的大小决定勘探的深度[17]。通常情况下，微动台阵的勘探深度大约为观测半径的 3～5 倍，在台阵半径较小情况下，探测深度可达观测半径 10 倍以上[16]，实测中往往需采用多重圆形阵列进行组合观测。为了满足探测深度和精度的要求，本次微动数据采集采用三重圆形小台阵观测系统在图 2 所示微动测线位置进行探测，其观测半径分别为 0.6、1.5、3.0 m（见图 4），各台阵之间勘探点间距为 5 m，剖面勘探线上共调查 15 个勘探点，以组成二维微动剖面观测系统（见图 5）。

在正式观测之前，首先对仪器进行一致性测试，以确保观测数据的有效可靠。在有效的工作频率范围之内，本次各台仪器的一致性优于 97%，满足微动探测对仪器一致性的要求。

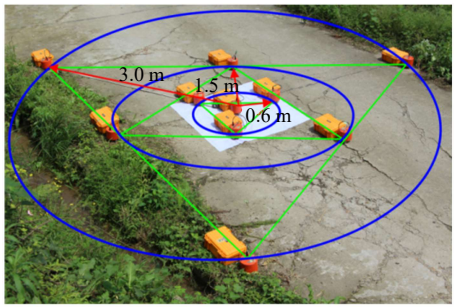


图 4 单点三重圆形观测台阵现场图

Fig.4 Scene diagram of single three-circle observation arrays

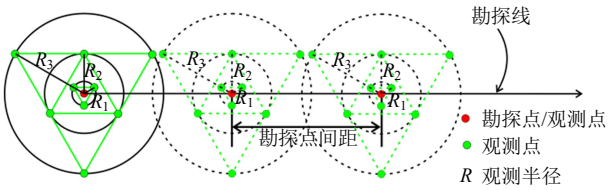


图 5 微动剖面观测系统示意图

Fig.5 Schematic of the microtremor observation array

正式观测时，在每个观测点放置 MTKV−1C 型微动探测系统并对拾振器进行调平，通过 GPS 天线自动进行各测点之间的时间同步和校正。在各观测点进行数据独立采集，每个台阵观测 15 min，结束后将仪器移至下一处继续逐点完成观测。

3.1.3 微动探测结果及地质解释

微动视 S 波速度剖面相对真实地反映岩性变化，是划分岩性层、解释地质构造的基本依据。根据视 S 波速度剖面（见图 6）的特征并结合前期钻孔资料信息，对微动探测结果做出地质解释。

崩塌堆积体：该堆积体位于剖面最浅部，测点 7 处前期钻孔资料标定其底界面深 10.4 m，根据剖面特征追踪可获得该层底界面的形态特征（见图 6）。从整体上看，该层底界面起伏较为平缓。该层中发现多处异常高速体，图中以黑线示意圈出，解释为花岗岩块石，其中近地表处的块石与野外现场所见一致。

全风化花岗岩：该层位于崩塌堆积体之下，层厚 2～3 m 且基本稳定，界面起伏较为平缓。该层顶界面为此崩塌堆积体的潜在滑动面。

强−中风化花岗岩：该层是介于全风化与完整基岩之间的过渡层，其层厚、界面起伏变化大。

完整基岩（弱−未风化花岗岩）：该层岩性完整但呈现较强不均匀性，其界面起伏变化大，局部呈凸起状。

3.2 土石细观结构的图像处理

如前所述，为了提高岩土结构探测精度，在目标岩性单元上开挖长度约 50 m，高度约 3 m 的坑槽，并对揭露的土石混合体剖面进行数码照相和后期图像处理，进而获得不同岩性单元的土石结构。

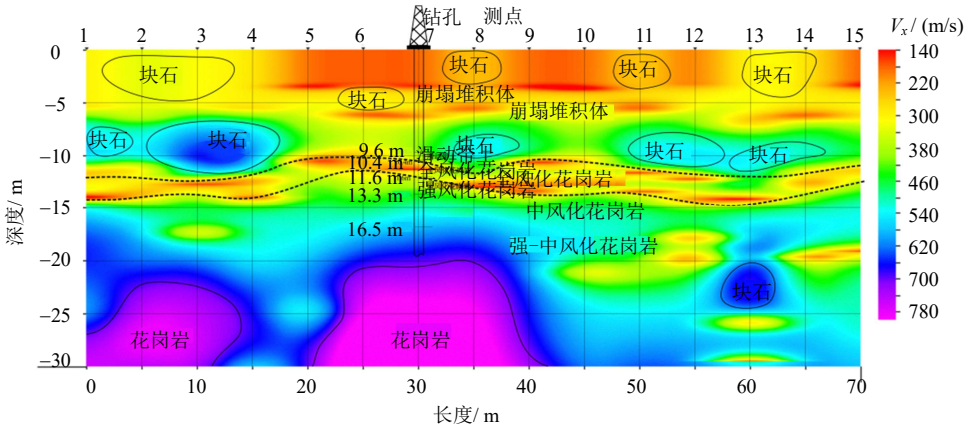


图 6　微动视 S 波速度剖面

Fig.6　Microtremor apparent S-wave velocity section

3.2.1 土石细观结构要素

在细观结构探测过程中，首先使用数码相机获取剖面的数字图像并输入电脑（见图 7），本次共采集了 14 处数字图像，随后采用 MATLAB 软件对土石结构要素信息进行提取与处理，即利用 MATLAB 进行图像识别（见图 8），并对获得的几何结构信息进行统计分析和特征指标提取，最后给出该数字图像的结构要素。



图 7　土石混合体探坑断面数码照片

Fig.7　Digital image of cross-section of soil rock mixture



图 8　土石混合体数字化细观结构模型

Fig.8　Digital mesostructure model of soil rock mixture

含石量：块石含量是影响土石混合体斜坡稳定性的重要因素[20]。通过 MATLAB 计算数字图像内部每个块石所占的面积，将全部块石面积进行累加以获得块石所占的总的面积，然后除以该剖面的面积，进而获得此剖面的含石量，其中图 8 所示该断面块石含量为 16.7%。

定向性：块石排列的差异优势方向（定向性）对剪切破坏过程中产生的挠阻作用显然不同[21]，本次剖面中块石的定向性通过数字图像中颗粒的长轴对设定的直角坐标轴的倾角予以描述。首先对剖面内部每个块石的长轴与单一参比轴（本次采用水平方向）的夹角进行统计，然后做出其玫瑰花图（见图 9），由此描述该剖面中块石的定向性。

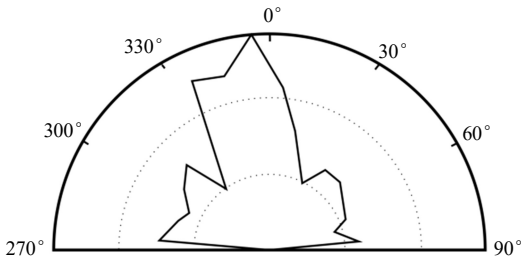


图 9　块石定向玫瑰花图

Fig.9　Rose diagram of block orientation

长短轴比：块石的长短轴比反映了剖面内块石的形态特征及尖锐程度[5]。首先通过 MATLAB 将块石概化成具有相同标准二阶中心矩的椭圆，然后计算其长轴与短轴的比值（见图 10）。

粒径分布：土石混合体内部某粒组块石数量的百分含量是数值模型概化过程中颗粒生成的必要条件，而数字图像得到的块石粒径由像素点构成，为了得到其实际的尺寸，需计算单个像素所对应的尺寸大小，即对其进行一定的比例转换，转换比例[7, 11]为

$$K = L / N \tag{1}$$

式中：K 为单个像素所对应的实际尺寸；L 为图像在某一段所对应的实际尺寸；N 为数字图像上对应该段之间像素点总数。接着统计不同粒组内块石的数量在整个剖面上的百分含量（见图 11）。

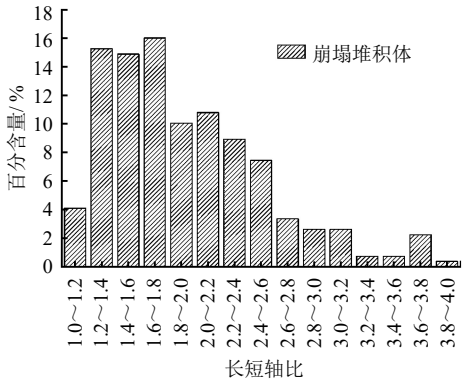


图 10 剖面长短轴比百分含量

Fig.10 Percent content of the ratio between long and short axes in section

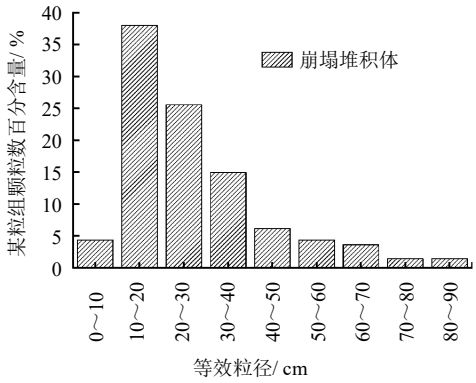


图 11 不同等效粒径块石频率分布

Fig.11 Frequency distribution of different equivalent particle sizes

3.2.2 土石细观结构特征概化

根据 Medley 等[22]对土石混合体斜坡内部块石粒径的研究，发现该类介质在不同研究尺度下的表观形态具有相似性。基于其研究成果将相应的土/石阈值定义为

$$d_{\mathrm{S/RT}} = 0.05 L_{\mathrm{C}} \tag{2}$$

式中：$d_{\mathrm{S/RT}}$ 为土/石阈值；L_{C} 为土石混合体的工程特征尺度，对于边坡其值为坡高，对于三轴试验其值为试样直径。

同时，相应的土体及块石的判据为

$$f = \begin{cases} \text{土体}, & d < d_{\mathrm{S/RT}} \\ \text{块石}, & d \geqslant d_{\mathrm{S/RT}} \end{cases} \tag{3}$$

本次研究对象为土石混合体边坡，则其工程特征尺寸为其坡高。根据宏观地质结构探测成果，该土石混合体边坡的坡高为 10 m 左右，根据式（2）可知，其内部土石阈值为 $d_{\mathrm{S/RT}} = 0.05 \times 10\ \mathrm{m} = 50\ \mathrm{cm}$。

利用以上细观结构要素的图像处理结果，结合本次研究对象的土石阈值，进而可以对该细观土石结构特征进行分析和模式概化。

3.3 宏-细观结构的耦合

在统一的坐标系统下，通过图像的边界校准、比例尺校验，将宏观地质结构要素岩性变异单元、块石结构和基覆面与细观地质结构要素土石结构进行空间定位与合成（见图 12），进而得到数字化的斜坡地质模型（见图 13）。该模型综合考虑了块石结构和土石结构，是一个接近于真实的地质结构，

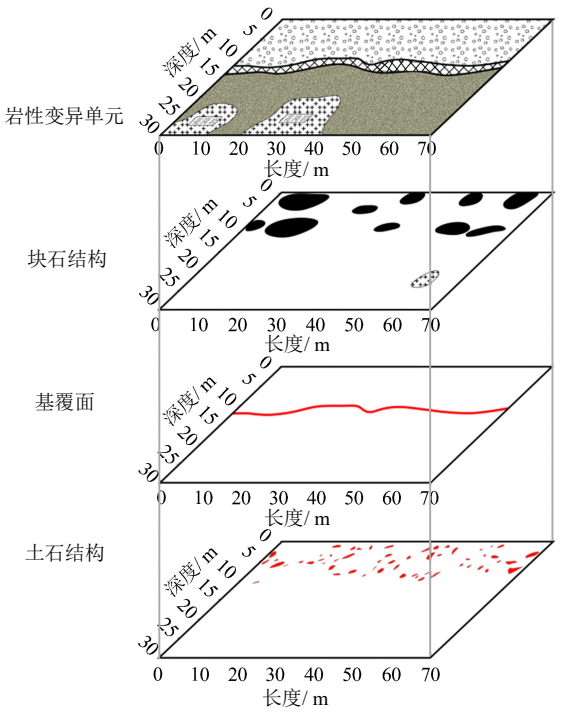


图 12 地质模型定位与合成

Fig.12 Synthesis of the locatable geological model

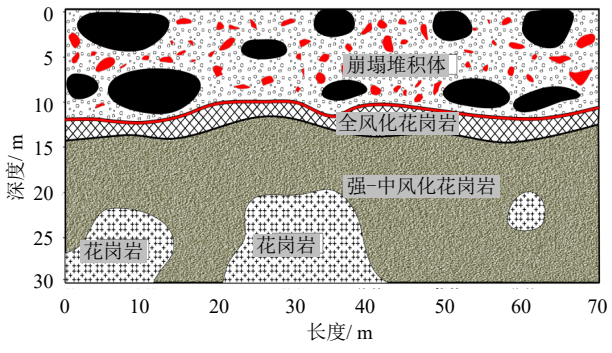


图 13 地质结构精细化模型

Fig.13 Refined model of geological structure

并且由于该模型实现了数字化，因此，可为后期三维地质模型的建立奠定基础。

4 结　论

精细化地质模型的建立对滑坡的预测和防治工作具有重要的现实意义。本文通过探窗组合法对地质结构进行探测，获得了一个完整且能够体现不同层次的精细化的数字地质模型，得到了以下结论：

（1）基于三重圆形小台阵观测系统的二维微动剖面探测方法，实现了高分辨的地球物理勘探，得到了土石混合体边坡内部不同岩性变异单元、超径块石（孤石）和几何边界条件等宏观地质结构信息。

（2）通过对探槽剖面获得的数码照片进行图像处理，并基于 MATLAB 分别对其含石量、定向性、长短轴比和粒径分布等参数进行统计分析，然后进行土石结构特征的模式概化，最后给出了用于地质模型定位与合成的土石结构。

（3）以湖南省南岳区拜殿乡土石混合体斜坡为例，通过采用探窗组合法初步实现了该斜坡内部地质结构的精细化探测，实现了其宏-细观结构模型的统一。与此同时，所获得的地质模型也为后期三维地质模型的建立奠定了基础，这显然是土石混合体斜坡研究工作的一大进步。

本文最终成果剖面为平行于等高线的横剖面，该剖面的建立旨在解释论文中所提出的探窗组合法这一精细探测新途径，如若对边坡进行稳定性分析，则需获取整个斜坡堆积体的纵剖面，并基于纵剖面来进行稳定性分析。

致谢：本项研究的野外工作是在大家协同合作的情况下才得以顺利完成，其中微动探测工作得到了中国科学院地质与地球物理研究所杜亚楠博士的大力支持，坑槽探工作得到了湖南省南岳区拜殿乡居民的全力配合，在此表示衷心的感谢！

参 考 文 献

[1] 许胜保. 物探电测深方法在三峡库区滑坡体勘察中的应用效果[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(10): 209－210.
XU Sheng-bao. Application effect of geophysical sounding method in landslide investigation of Three Gorges Reservoir Area[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2005, 17(10): 209－210.

[2] SASS O, KRAUTBLATTER M. Debris flow-dominated and rockfall-dominated talus slopes: Genetic models derived from GPR measurements[J]. **Geomorphology**, 2007, 86(1): 176－192.

[3] 李富, 吾守艾力, 艾斯卡尔, 等. 综合物探方法在滑坡体勘察中的应用[J]. 人民长江, 2012, 43(增刊 1): 44－47.
LI Fu, WUSHOU Ai-li, AISI Ka-er, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in landslide investigation[J]. **Yangtze River**, 2012, 43(Supp.1): 44－47.

[4] 张慧颖, 徐兴倩, 苏立君, 等. 碎石土滑坡剪切波速度结构分析[J]. 工程勘察, 2016, 44(4): 72－78.
ZHANG Hui-ying, XU Xing-qian, SU Li-jun, et al. Analysis on shear wave velocity of gravel landslide[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2016, 44(4): 72－78.

[5] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京: 北方交通大学, 2001.
YOU Xin-hua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application[D]. Beijing: North China University of Technology, 2001.

[6] 油新华, 何刚, 李晓. 土石混合体边坡的细观处理技术[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(1): 18－21.
YOU Xin-hua, HE Gang, LI Xiao. Meso-handling technology of earth-rock aggregate slope[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2003, 30(1): 18－21.

[7] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996－1007.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 996－1007.

[8] 徐文杰, 胡瑞林, 王艳萍. 基于数字图像的非均质岩土材料细观结构 PFC2D 模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 358－362.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, WANG Yan-ping. PFC2D model for mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(4): 358－362.

[9] 徐文杰, 王玉杰, 陈祖煜, 等. 基于数字图像技术的土石混合体边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊 1): 341－346.
XU Wen-jie, WANG Yu-jie, CHEN Zu-yu, et al. Stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 28(Supp.1): 341－346.

[10] 廖秋林, 李晓, 朱万成. 基于数码图像土石混合体结构建模及其力学结构效应的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 155－162.
LIAO Qiu-lin, LI Xiao, ZHU Wan-cheng. Structure model construction of rock and soil aggregate based on digital image technology and its numerical simulation on mechanical structure effects[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 155－162.

[11] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477－484.
DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 477－484.

[12] 周剑, 张路青, 戴福初, 等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2650－2659.
ZHOU Jian, ZHANG Lu-qing, DAI Fu-chu, et al. Numerical simulation of direct shear tests for rock and soil mixture in a landslide based on bonded-particle model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.1): 2650－2659.

[13] 李长圣, 张丹, 王宏宪, 等. 基于 CT 扫描的土石混合体三维数值网格的建立[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2731－2736.
LI Chang-sheng, ZHANG Dan, WANG Hong-xian, et al. 3D mesh generation for soil-rock mixture based on CT scanning[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2731－2736.

[14] TOKSOZ M N, LACOSS R T. Microseisms: Mode structure and sources[J]. **Science**, 1968, 159(3817): 872－873.

[15] AKI K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. **Bulletin of Earthquake Research Institute**, 1957, 35: 415－456.

[16] LING S Q. Research on the estimation of phase velocities of surface waves in microtremors[D]. Japan: Hokkaido University, 1994.

[17] OKADA H, SUTO K, ASTEN M W. The microtremor survey method[J]. **Society of Exploration Geophysicists**, 2004, 12: 1－135

[18] 徐佩芬, 侍文, 凌苏群, 等. 二维微动剖面探测“孤石”:以深圳地铁 7 号线为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2120－2128.
XU Pei-fen, SHI Wen, LING Su-qun, et al. Mapping spherically weathered "boulders" using 2d microtremor profiling method: A case study along subway line 7 in Shenzhen.[J] **Chinese Journal of Geophysics**, 2012, 55(6): 2120－2128.

[19] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1841－1845.
XU Pei-fen, LI Shi-hao, DU Jian-guo, et al. Microtremor survey method: A new geophysical method fordividing strata and detecting the buried fault structures[J]. **Acta Petrologica Sinica**, 2013, 29(5): 1841－1845.

[20] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 93－102.
TANG Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 93－102.

[21] LINDQUIST E S.The strength and deformation properties of mélange[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.

[22] MEDLEY E, LINDQUIST E S. The engineering significance of the scale-independence of some Franciscan melanges in California, USA[C]//Proceedings of the 35th US Rock Mechanics Symposium. Rotterdam: Balkema A A, 1995: 907－914.