

文章编号: 1008-2786-(2015)3-348-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000044

堆积层滑坡土石混合物细观结构特征研究综述

刘超^{1,2} 苏立君^{1,3*} 刘文静^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要: 堆积层滑坡在我国分布广泛, 危害严重, 其稳定性问题已经引起了各国学者的高度重视。堆积层滑坡的物质是由土与石混合体组成的, 其成因以坡积、冲洪积为主, 极其复杂。堆积层滑坡物质的结构性特征不同于单一的土质或岩质滑坡, 这种结构特征对坡体的变形和破坏影响极为显著, 因此对堆积层滑坡结构特征的研究是研究堆积层滑坡滑动机理的关键所在。首先对堆积层滑坡物质的成因、分类等基本特征进行了分析, 归纳和总结了目前国内外学者对这种结构特征的描述和分析的方法。这些方法可以划分为四大类: 经验方法、基于分形理论的方法、数学地质方法和数字图像处理的方法。然后, 在此基础上, 阐述了每类研究方法的代表性特征, 进一步剖析了现有的这四大类研究方法的优势和各自的局限性, 提出了在此研究方向上亟待解决的问题以及针对解决这些问题的研究方法。

关键词: 堆积层滑坡; 土石混合体; 结构性; 数字图像处理

中图分类号: P642.1, TU44

文献标志码: A

自 20 世纪中期以来, 随着世界人口数量的激增, 人类的活动范围不断的扩展, 加之全球气候变化的影响, 滑坡灾害发生的数量和频率也在不断增加, 每年都给人类造成严重的生命和财产损失^[1-2]。

目前, 滑坡灾害已经成为了仅次于地震的第二大地质灾害, 它几乎遍及了有人类居住和工程活动的所有山岭地区。

按照坡体物质组成分类, 滑坡可分为土质滑坡和岩质滑坡两大类^[3]。堆积层滑坡属于土质滑坡, 它是指第四系地层中除了黄土、粘土以及其他软土层以外的松散堆积层(包括人工堆积物)的滑坡, 而且重点是指河谷两岸缓坡地带的坡积、洪积成因的堆积层滑坡^[4]。如 1985 年发生在湖北新滩镇的巨型滑坡——新滩滑坡和 1993 年发生在意大利的

Sesa 滑坡都是典型的堆积层滑坡。堆积层滑坡在我国滑坡灾害中占有很大的比例。据相关调查, 秦巴山区堆积层滑坡发育 481 处, 占该地区滑坡总数的 92.68%^[5]。长江上游地区 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的范围内, 发现滑坡 1 736 个, 其中 64% 为堆积层滑坡^[6]。王洲平统计了浙江省 946 处滑坡, 堆积层滑坡占 78.1%^[7]。

人类的工程活动, 如公路铁路交通建设、矿产开采、水利水电开发等, 都面临着堆积层滑坡滑动的问题。堆积层滑坡的变形和破坏直接影响到了人民生命财产安全, 严重制约了社会经济的发展。堆积层滑坡的稳定性问题已经受到了国内外相关学者的广泛重视。

收稿日期(Received date): 2014-07-02; 改回日期(Accepted): 2014-07-30。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2013CB733201); 中科院重点部署项目(KZZD-EW-05-01)。

[Supported by the National Basic Research Program of China(973 Program) (2013CB733201) and Key Program of the Chinese Academy of Sciences (KZZD-EW-05-01).]

作者简介(Biography): 刘超(1986-), 男, 博士研究生, 专业方向: 岩土工程。[Liu Chao(1986-), male, doctor student, majoring in geotechnical engineering.] E-mail: liuchao198608@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 苏立君(1976-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 滑坡形成机理和破坏特征。[Su Lijun(1976-), male, doctor, Professor, majoring in formation mechanism and failure characteristics of landslides.] E-mail: sulijun1976@163.com

1 堆积层滑坡基本特征

堆积层滑坡发育于第四系近代松散堆积层中, 滑体物质是一种土石混合物。土石混合体的叫法在不同的地质报告和学术期刊中不尽相同, 主要有碎块石土、碎石土、块石土、混合土碎石、碎石混合土、混合土碎石块、碎块石混合土、堆石体、角砾土、碎石角砾土、宽级配砾质土等, 在《岩土工程勘察规范》中被称之为碎石土。对土石地质体而言, 常见的分类方法通常只是针对岩石或者土的, 比如铁路部门制定的铁道围岩稳定性分类法、煤炭工业部制定的岩石分类方法、Q 分类法、RMR 分类法、Casa-grande 分类法等, 对于土和岩石统一分类的方法很少。粒度通常是作为分类的重要指标, 构成土的颗粒的大小及比例决定着土的结构特征。土颗粒的大小不同, 比表面积也就不同, 其性质将会有很大差别。我国的建筑地基基础设计规范根据土的粒径级配和颗粒形状对碎石土进行了分类。但这些分类方法在分类体系、分类依据等方面存在一定程度的局限性。油新华在大量工程地质调查的基础上, 提出

了土石混合体的概念^[8], 并根据土石混合物中含石量的比例对其进行了统一的工程地质分类^[9], 见表 1。

表 1 土石混合体的工程地质分类^[9]

Table 1 Engineering geological classification for soil-rock mixtures^[9]

含石量 Soil-rock content	定名 Name
< 10%	土体
10% ~ 25%	石质土
25% ~ 70%	混合土
70% ~ 90%	土质石
> 90%	岩体

注: 石质土、混合土、土质石统称为土石混合物

堆积层滑坡是由滑坡堆积、残坡堆积、崩塌堆积、冲洪堆积等作用形成的一种非均质滑坡。贺可强等在文献^[10]中阐述了堆积层滑坡的各形态要素, 并从坡体组成、滑移面、地下水作用、岩相构成、解体“碎屑流”特征、剪出口和张裂缝 7 个方面描述了堆积层滑坡的基本特征。

下面总结了国内典型的堆积层滑坡各要素的基本特征^[10-12], 见表 2。

表 2 国内典型堆积层滑坡的基本特征

Table 2 Features of typical accumulation landslides in China

名称 Name	地点 Location	滑体 Landslide	滑带、滑床 Sliding belt and bed	几何条件 Geometry condition
新滩滑坡	湖北省秭归县新滩镇北	崩塌积、碎块石夹粘土	粘土层, 厚 0.5 ~ 0.8 m。下部基岩为砂、页岩	长 1 900 m, 宽 710 m, 平均坡度为 23°, 堆积层厚度为 30 ~ 40 m
黄腊石滑坡	湖北省巴东县城下游 1.5 km	崩塌积、滑坡堆积碎石及粘土	粘土及碎石, 厚 0.45 ~ 2 m。下基岩为粉砂岩、砂岩	长约 1 500 m, 最大宽度 840 m, 滑体厚 10 ~ 102 m, 地表坡度 25° ~ 42°
鸡扒子滑坡	云阳县城东 1 km 处	松动破碎岩石	滑面倾角 25° ~ 30°, 滑带粉质粘土夹砂岩、泥岩和碎块石, 厚 1 ~ 6.87 m	长 1.4 ~ 1.6 km, 宽 350 m, 方量约 1 500 × 10 ⁴ m ³ , 地表坡角山顶 45° 到江边仅为 6° ~ 10°
八字门滑坡	湖北省秭归县新滩镇	松散堆积层	滑带为岩土界面, 富集粘性土。滑床为砂页岩、砂岩及燧石砾石	长 580 m, 宽 100 ~ 500 m, 滑体厚 10 ~ 35 m, 地表坡度 10° ~ 30°
马头嘴滑坡	四川省马鞍山附近的马头嘴崖下	亚粘土、亚砂土夹碎石, 其中土占 60% 以上	基岩为砂质粘土岩夹中薄层粉砂岩, 倾角 12°。滑面沿粉砂岩层面发育	长约 600 m, 平均宽 200 m, 平均厚 20 m, 原始地形前缘坡度 15°, 后缘 30°
嘿社滑坡	贵州盘县境内的嘿社	砂、泥岩夹多层软弱砂质泥岩	滑面为砂质泥岩, 滑面倾角很缓(老滑坡滑面)	长 1 000 m, 宽 300 ~ 350 m, 平均厚度 30 m, 上部坡度约 10°, 下部 > 10°
新华乡滑坡群	大渡河下游铜街子电站坝下游	由块碎石加粘土、亚粘土组成	泥岩、页岩富含粘粒, 遇水极易软化、泥化, 条件适合时逐步发育成滑面	长约 1 km, 坡度 20° ~ 40°, 厚 20 ~ 50 m
天宝滑坡	四川省云阳县天宝村	老滑坡堆积物	基岩上的堆积层滑坡, 滑床为块状长石砂岩。堆积物沿砂岩、泥岩层面滑动	长 600 m, 宽 500 m, 平均厚度 25 m, 坡度总体 8°
沙岭滑坡	四川省石柱县境内	崩塌积物	滑床为砂岩夹薄层泥岩, 泥岩层面形成滑移面	长 800 m, 宽 700 m, 厚 20 ~ 40 m, 坡度 15° ~ 31°

2 土石混合体的细观结构特征

岩土材料的研究尺度可以分为三种:宏观、细观和微观。细观结构是介于微观和宏观之间的一种研究尺度,它比分子、原子的微观尺度足够大,而比研究对象的宏观尺度足够小^[13]。堆积层滑坡的物质形式是土石混合体,在细观尺度上研究它能更好的反映其结构性特点。如果将土石混合体作为一种材料来进行研究,它要比单一的土质或岩质材料更加复杂,那么把这种材料假定为均质的或者是分片均质的,显然得到其物理力学性质与实际情况相比会有较大的误差。由于堆积层滑坡特定的成因,因此在分析这类滑坡的稳定性时,坡体土石混合体物质的结构性的影响作用尤为重要。目前,对土石混合体结构特性的研究大体上有四种思路:一是基于经验的方法,二是基于分形理论的方法,三是数学地质方法,四是数字图像处理方法^[8]。下面分别阐述每种方法的特点和代表性的研究。

3 经验方法

国内外学者在大量工程实践的基础上,提出了很多经验性的方法来描述和分析土石混合体的内部结构。Medley 根据体视学原理,提出了一种利用钻孔岩芯所揭露块石的弦长来估计其内部含石量的方法,并分析了估计误差,认为误差主要受块石形状、含石量、块石排列方向及研究尺度大小等因素的制约,当块石的形状为球形时,从二维断面上获取的含石量应与实际值相等^[14]。Coli 等应用统计学方法根据页岩-石灰岩混合体的断面露头图像描述内部块石的形态和空间分布,并建立其强度参数与块石形态、空间尺寸分布图像参数间的统计关系^[15]。

4 分形方法

目前分形理论已经应用到了各个学科,它可以将不能定量描述的或难以定量描述的对象用一种较为简捷的定量方法表述出来^[16]。在该方面取得的成果很多。冯志刚和周宏伟基于计算机图像的存储原理,研究了分形维数的计算方法,提出了计算图像分形维数的像素点覆盖法^[17]。毛灵涛等根据分形理论,提出了孔隙度分维、孔隙分布分维及孔隙边缘

形状分维,用以描述软土微结构 SEM 图像中孔隙的变化情况^[18]。郭飞等分别采用了面积法和周长法计算了土壤样本图像的孔隙分形维数和多重孔隙轮廓线分形维数,结果表明,土壤孔隙空间在一定尺度范围内才存在明显的分形特征,粘粒含量越高,分形维数就越大^[19]。徐文杰等通过筛分及数字图像处理技术对崩坡积型土石混合体的粒度进行了分析,结果表明,粒度组成具有明显的分维特征,内部块石在形态、空间分布等细观结构上呈现明显的自相似性^[20-21]。陶高梁和张季如以 Sierpinski 垫片和 Menger 海绵模型为基础,提出了由孔隙体积分形模型、颗粒体积分形模型及孔径或粒径分布分形模型组成的两大类岩土体分形模型,并发现了两类岩土体分形模型能将国内外岩土体分形模型统一起来,从而形成了两类统一的模型^[22]。

5 数学地质方法

数学地质是由地质学、数学和计算机科学相结合而形成的一门学科,它包括了地质统计学、地质多元统计分析等内容。20 世纪初,科研人员的研究大多都是描述性的,得到的结果是定性的。自 1960 年代地质统计学创立以来,最初是用来研究矿石品位的空间结构的,随后其理论内涵不断向深度、广度发展。它以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具,研究在空间分布上既有随机性又有结构性的自然现象。这些数学地质的方法在定量描述土石混合体结构性方面也取得了许多的成果。油新华等根据野外地质调查以及典型试样的粒组分析和含石量统计,假定砾石的空间位置服从均匀分布,砾石大小和方位服从对数正态分布。在研究区域内,均匀生成一个位置点,并赋予其大小、方向两个随机参数,通过 AutoCAD 或 Ansys 绘图功能,建立模型^[23],图 1 为该方法随机生成的以不同形状块体混合分布、大小方位均服从对数正态分布的模型。李晓等基于统计分析得出了土石混合体是一种非均质、非连续体,其性质的变化主要受控于土体内部结构,并运用蒙特卡洛法模拟了块石在土石混合体中的分布特征,建立了土石混合体的随机结构模型^[24]。

李世海和汪远年提出了一种基于三维离散元的土石混合体随机计算模型^[25]。该模型是在 NURBM (Northwestern University Rigid Block Model) 基础上,引入块体密度、弹性模量、刚度、节理刚度、粘聚力、

最大内摩擦角等随机分布特征参数。图 2 显示了该方法得到的混合比为 1: 4 的块体单元随机分布后在某一断面上岩石块体单元形心分布情况。

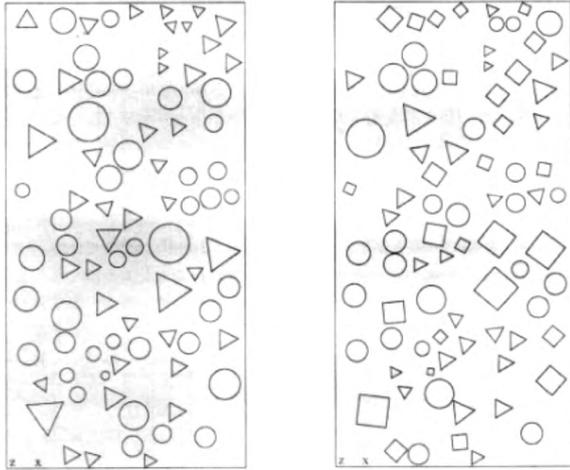


图 1 土石混合物随机结构模型^[23]

Fig. 1 Stochastic structural model of soil-rock mixtures^[23]

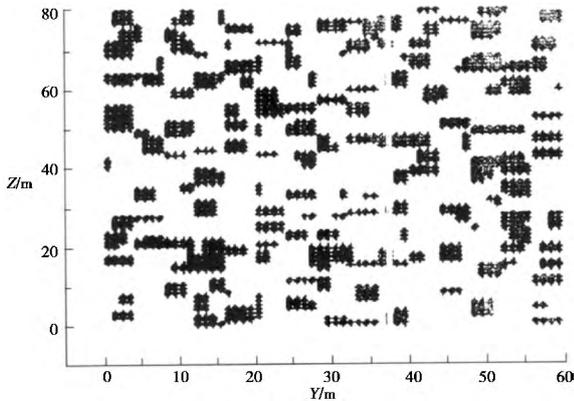


图 2 岩石块体单元形心分布^[25]

Fig. 2 Centroid distribution of rock block unit^[25]

郝建明等采用 PFC3D 颗粒流离散元计算程序, 建立了简化的土石混合物二维颗粒流随机结构模型^[26] 模型结构如图 3 所示。

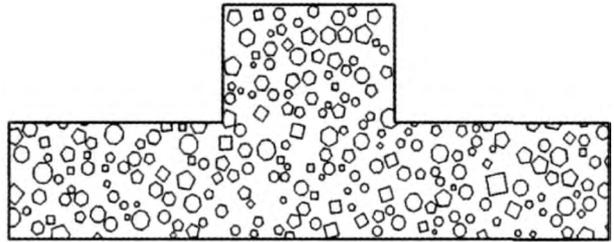


图 3 土石混合物线框模型^[26]

Fig. 3 Stochastic structural model of soil-rock mixtures^[26]

狄圣杰等基于随机集合体构造方法构建了土石混合体的随机模型, 在生成域边界之后, 按照块体粒度分布特征排列, 给定块体最大和最小边数, 以随机生成的半径、初始角度、角度增量构造颗粒轮廓^[27]。该模型中能够反映块体形状、边界及含石量等。图 4 显示了 1 m × 1 m 的范围内, 随机生成的 3 个模型, 含石量均为 50%, 其中粒径 0.03 ~ 0.05 m 的石块占石块总量的 20%, 0.05 ~ 0.2 m 占 70%, 0.2 ~ 0.3 m 占 10%。

6 数字图像处理方法

数字图像处理是一种研究岩土材料结构性的新途径。油新华等提出了利用数码照相及计算机数值仿真技术, 建立土石混合体的微观结构的力学模型^[8, 13]。他们通过数码相机拍摄剖面照片, 经灰度处理, 生成包括点、线的线框模型, 并将之输入 ANSYS, 提取砾石块体的面积、周长、面积级配等结构信

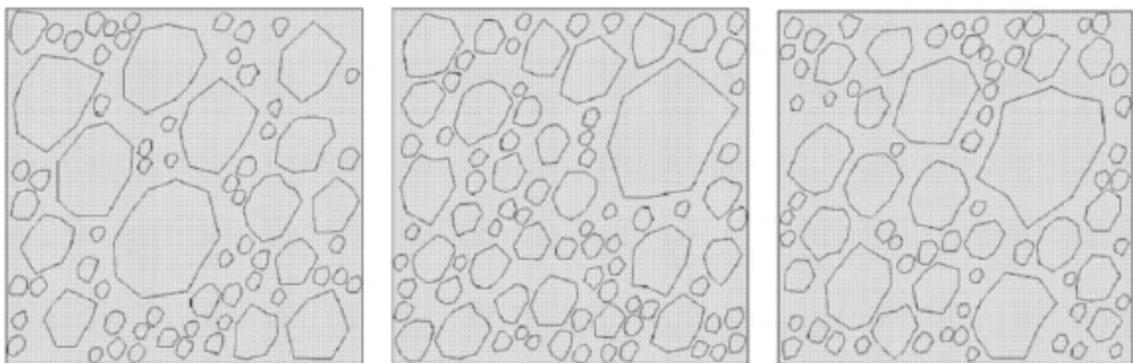


图 4 土石混合物随机结构模型^[27]

Fig. 4 Stochastic structural model of soil-rock mixtures^[27]

息。利用 ANSYS 和 FLAC 接口程序将模型的单元信息、节点信息和结构信息输入 FLAC3D 中,建立可用于数值计算的力学模型^[28]。

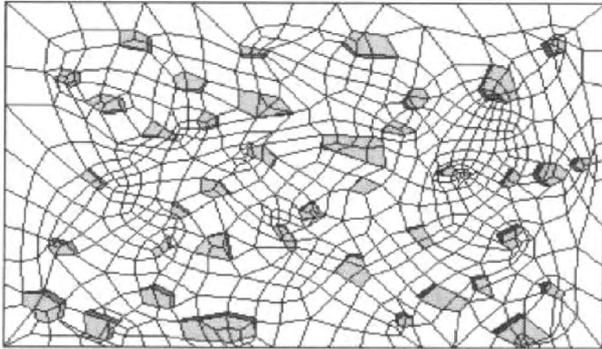


图5 土石混合物结构模型^[28]

Fig.5 structural model of soil-rock mixtures^[28]

岳中琦等通过灰度处理等技术处理数码照片,建立了土石混合体的平面几何模型^[21, 29],图6显示了土石混合物照片的数字图像处理效果。岳中琦在文献[30]中介绍和总结了研究岩土细观介质空间分布的方法,以及基于实际细观介质空间分布数学表述而建立的力学数值计算网格自动生成的方法和应用。他的研究表明,数字图像技术可用来准确量测和表述岩土内部各种介质的实际空间分布特征,这些空间分布数据可以用来建立岩土体内部不同细观介质的空间分布和相应的数值计算网格,并通过与现有的数值计算方法相结合,来实现考虑真实岩土材料不同种细观介质及其空间分布的力学数值分析和预测^[30]。廖秋林等利用土石混合物中块石与

土体颜色属性的巨大差异,提出了基于数码图像的土石混合体结构模型自动生成方法,并利用有限元数值模拟分析了单轴压缩条件下土石混合体应力场的特征^[31]。

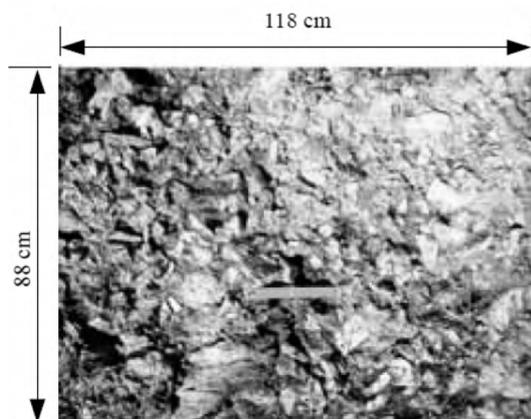
F. Lanaro 和 P. Tolppanen 通过激光扫描技术对砾石土进行扫描,得到了砾石的三维图像,并对其采用傅里叶和几何分析的方法进行分析,从而获得了砾石的尺寸、形状等参数^[32]。

7 讨论与结语

堆积层滑坡是一种常见的滑坡类型,其物质并不是单纯的均质土体或岩体物质,而是一种由土和岩石共同组成的土石混合体,它反映出的宏观物理力学性质受到其自身结构性的影响极强。土和石所占的比例,块石的形状、空间分布状态,以及土和石各自的物理力学性质都对整个混合体的稳定性产生强烈的影响。近年来,随着计算机、数码照相等技术的发展,对土石混合体的结构性的研究也更为深入了,这些研究主要可以归纳为以下几个大的方面:

第一,在对土石混合体的野外工程地质调查中,发现土石混合物中块石的含量和分布是有一定统计规律性的,通过对野外露头剖面或钻孔岩芯面等出露的块石数量和分布进行观察、测量和统计分析,采用一些简单的经验公式可以粗略的估计在一定体积范围内土石混合物中块石的含量和总体分布情况。

第二,随着分形理论的发展,很多学者已将其应用于岩土工程中解决岩土性质的问题。采用分形理论对土石混合体的结构特性的研究也在逐渐的发展,



(a) 土石混合物照片



(b) 处理后的数字图像

图6 土石混合物试样的数字图像处理^[21]

Fig.6 Digital image processing for sample of soil-rock mixtures^[21]

分形的方法是在假设岩土材料结构具有自相关性的前提下进行的,采用分维值等参数可以对结构特征进行量化的描述,使复杂的结构特征得以简化定量处理。

第三,基于随机场的理论,采用概率统计等方法,研究土石混合体内部块石数量所服从的空间分布函数,并计算分布函数相应的特征参数,进而按照其分布规律通过计算机随机自动生成土石混合体内部块石结构,该方法与经验公式相比对分布规律有了量化的考虑,对块石总体数量分布特征控制的较好。

第四,基于数码图像处理技术及激光扫描技术建立的土石混合体的结构模型方法在逐步的发展。这种方法通过数码相机或扫描设备等利用光学成像原理可以直接获取土石混合体的二维或三维的结构影像,经过计算机软件进行解译后,可以比较真实的反映土石混合体内的结构特性。该方法直观、反映结构的真实性较强,但目前的技术水平主要能够满足二维表面图像的获取,对于三维的土体内部的结构特征获取还存在许多局限性。

总之,对土石混合体结构特性的研究已取得了很多可喜的成果。但是,这些研究仍存在着一些亟待解决的问题,需要进一步的开展研究工作。本文就以下几个方面问题进行阐述。

1. 分形理论在数学领域有着深厚的理论基础,将其用来解决某些岩土问题具有简化、易操作等特点,但是对于岩土材料而言,从岩土体自身的成因角度看,成因是复杂多变的,岩土体的物理力学性质往往具有显著的随机性和不确定性,因此采用分形理论解决有关岩土性质的问题时以下两个问题是不可回避的:1) 岩土材料是否具备自相关特性;2) 自相关性存在的证据。这也是分形理论应用的前提,需要进行大量的细观或微观结构的实验,通过统计计算等方法进一步研究。此外,分维值与岩土性质之间的对应关系的唯一性也是一个值得深入研究的问题,也就是说,即使岩土体的性质在某些情况下显示出了分形特征,可以用一个分维值来表示其结构特征,但是反过来是否一个分维值能够代表唯一一种岩土体结构,这仍需要更多的理论研究来回答。

2. 块石的分布特征是基于统计学层次上的虚拟细观结构模型,这些模型能够使生成的细观结构中的各组分在颗粒形状、总体的分布特征参数等方面与真实情况保持一致,但真实的空间结构更多的是

反映各组分颗粒间的相对位置关系,即使总体的分布特征参数相同,颗粒间不同的相对位置关系也会组成不同结构特征的岩土体,在宏观上它们显示出了不同的物理力学性质。如果再考虑不同形状的差异就会使问题更加的复杂。统计学层次上的结构模型尚待需要更进一步发展使其能够反映颗粒间相对位置关系,才能更真实的体现岩土材料的结构特性^[33]。

3. 应加强发展描述土石混合体结构特征的数学理论和模型的研究,使得这种结构特性能够采用有限数量的参数,以数学表达式的形式定量的表示出来,便于计算处理。同时逐渐发展高精度便于操作的细观或微观尺度试验仪器,仪器应能够探测出土石混合体内部结构,并形成清晰地容易解译的图像,或者能够通过试验获得细观或微观尺度上的物理力学参数。

参考文献(References)

- [1] Yin Kunlong, Han Zaisheng, Li Zhizhong. The newest achievement on landslide researches in the world[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000(5): 1-4 [殷坤龙, 韩再生, 李志中. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质工程地质, 2000(5): 1-4]
- [2] Au S W C. Rain-induced Slope Instability in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 1998, 51(1): 1-36
- [3] Liu Guangrun, Yan Echuan, Lian Cao. Discussion on classification of landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 339-342 [刘广润, 晏鄂川, 练操. 论滑坡分类[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 339-342]
- [4] Chen Shanxiang, Xu Xichang, Xu Haibin. Features and stability analysis of rainfall-induced colluvial landslides[J]. Rock and Mechanics, 2005, 26(Suppl.): 6-10 [陈善雄, 许锡昌, 徐海滨. 降雨型堆积层滑坡特征及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 6-10]
- [5] Han Jinliang, Wu Shuren, Li Donglin, et al. Distribution regularities and contributing factor of geological hazards in Qinling Bata Mountains[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(1): 101-108 [韩金良, 吴树仁, 李东林, 等. 秦巴地区地质灾害的分布规律与成因[J]. 地质科技情报, 2007, 26(1): 101-108]
- [6] Xia Jinwu, Guo Houzhen. Discussion on distribution characteristics and major controlling factors of landslides in the upper reaches of Yangtze River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997(1): 19-32 [夏金梧, 郭厚帧. 长江上游地区滑坡分布特征及主要控制因素探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997(1): 19-32]
- [7] Wang Zhouping. Current situation of geological disasters and the prevention measures in Zhejiang Province[J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(4): 63-66 [王洲平. 浙江省地质灾害现状及防治措施[J]. 灾害学, 2001, 16(4): 63-66]

- [8] You Xinhua. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2002(11): 173 [油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报 2002(11): 173]
- [9] You Xinhua, He Gang, Li Xiao. Classification of soil-rock mixture [G]//Forum of major engineering geological problems in the north-west of China. Beijing: Science Press 2002: 448 - 449 [油新华, 何刚, 李晓. 土石混合体的分类建议[G]//2002年中国西北部重大工程地质问题论坛论文集. 北京: 科学出版社 2002: 448 - 449]
- [10] He Keqiang, Yang Jibao, Wang Sijing. Theory and application of displacement dynamics of debris landslides [M]. Beijing: Science Press 2007. [贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层滑坡位移动力学理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社 2007.]
- [11] Huang Runqiu. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press 2008. [黄润秋. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社 2008.]
- [12] Sun Guangzhong, Yao Baokui. Typical landslides of China [M]. Beijing: Science Press 1998. [孙广忠, 姚宝魁. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社 1998.]
- [13] You Xinhua, He Gang, Li Xiao. Meso-handling technology of earth-rock aggregate slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003(1): 20 - 23 [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(1): 20 - 23]
- [14] Sonmez H., Gokceoglu C., Tuncay E., et al. Relationship between volumetric block proportions and overall UCS of a volcanic bimrock [J]. Felsbau-rock Soil Eng 2004 22: 27 - 34
- [15] Coli N., Berry P., Boldini D., et al. The Contribution of Geostatistics to the Characterisation of Some Bimrock Properties [J]. Engineering Geology 2012, 137: 53 - 63
- [16] Lin Peiyuan, Tang Liansheng, Sang Haitao, et al. Fractal geometry in the past, present and future research of rock and soil mechanics [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011 33(Suppl.): 28 - 33 [林沛元, 汤连生, 桑海涛, 等. 分形几何在岩土力学研究中的过去、现在与未来[J]. 西北地震学报 2011 33(增刊): 28 - 33]
- [17] Feng Zhigang, Zhou Hongwei. Computing method of fractal dimension of image and its application [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science 2001 22(6): 94 - 97 [冯志刚, 周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报: 自然科学版 2001 22(6): 94 - 97]
- [18] Mao Lingtao, Xue Ru, An Liqian, et al. Fractal approach on soft soil porosity microstructure [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2005 34(5): 74 - 78 [毛灵涛, 薛茹, 安里千, 等. 软土孔隙微观结构的分形研究[J]. 中国矿业大学学报 2005 34(5): 74 - 78]
- [19] Guo Fei, Xu Shaohui, Liu Jianli. On fractal geometry characteristics of soil sample images [J]. Acta Pedologica Sinica 2005 42(1): 25 - 29 [郭飞, 徐绍辉, 刘建立. 土壤样本分形几何特征的图像分析方法[J]. 土壤学报 2005 42(1): 25 - 29]
- [20] Xu Wenjie, Hu Ruilin. Particle size fractal characteristics of the soil-rock mixtures in the right bank slope of Jinsha River at longpan, Tiger-Leaping Gorge Area [J]. Journal of Engineering Geology 2006 14(4): 496 - 501 [徐文杰, 胡瑞林. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体粒度分形特征研究[J]. 工程地质学报 2006 14(4): 496 - 501]
- [21] Xu Wenjie, Hu Ruilin, Yue Zhongqi. Meso-structure character of soil-rock mixtures based on digital image [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science 2008 27(1): 51 - 53 [徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦. 基于数字图像处理的土石混合体细观结构[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版 2008 27(1): 51 - 53]
- [22] Tao Gaoliang, Zhang Jiru. Two categories of fractal model of rock and soil expressing volume and size-distribution of pores and grains [J]. Chinese Science Bulletin 2009 54(6): 838 - 846 [陶高梁, 张季如. 表征孔隙及颗粒体积与尺度分布的两类岩土体分形模型[J]. 科学通报 2009 54(6): 838 - 846]
- [23] You Xinhua, Li Xiao, He Gang. Soil-rock mixture stochastic structural model and its automatic generation [G]//Paper collection of academic conference for geotechnical and Engineering, Beijing: China Communications Press 2003: 468 - 469 [油新华, 李晓, 何刚. 土石混合体的随机结构模型及其生成技术研究[G]//全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: 人民交通出版社 2003: 468 - 469]
- [24] Li Xiao, Liao Qiulin, He Jianming. In-situ tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2004 41: 702 - 707
- [25] Li Shihai, Wang Yuannian. Stochastic model and numerical simulation of uniaxial loading test for rock and soil blending by 3D - DEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2004 26(2): 172 - 177 [李世海, 汪远年. 三维离散元土石混合体随机计算模型及单向加载试验数值模拟[J]. 岩土工程学报 2004 26(2): 172 - 177]
- [26] He Jianming, Li Xiao, Wu Jianbo, et al. Modeling method of the rock-soil aggregate and its numerical test [J]. Mining and Metallurgical Engineering 2009 29(3): 1 - 4 [赫建明, 李晓, 吴剑波, 等. 土石混合体材料的模型构建及其数值试验[J]. 矿冶工程 2009 29(3): 1 - 4]
- [27] Di Shengjie, Wang Mingyuan, Deng Nansha, et al. Numerical simulation study on REV's measure of soil-rock mixture [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering 2012 32(5): 523 - 527 [狄圣杰, 汪明元, 邓南沙, 等. 土石混合体 REV 尺度数值方法研究[J]. 防灾减灾工程学报 2012 32(5): 523 - 527]
- [28] You Xinhua, Li Xiao, He Changjun. Research on automatic generating technology of measured structure model of soil-rock mixture [J]. Geotechnical Engineering World 2003 6(8): 60 - 62 [油新华, 李晓, 贺长俊. 土石混合体实测结构模型的自动生成技术[J]. 岩土工程界 2003 6(8): 60 - 62]
- [29] Yue Z Q, Chen S. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and geotechnics 2003, 30(5): 375 - 397
- [30] Yue Zhongqi. Digital representation of meso-geomaterial spatial distribution and associated numerical analysis of geomechanics:

- methods applications and developments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(5): 875 – 888 [岳中琦. 岩土细观介质空间分布数字表述和相关力学数值分析的方法、应用和进展[J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(5): 875 – 888]
- [31] Liao Qiulin ,Li Xiao ,Zhu Wancheng ,et al. 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 [廖秋林 李晓 朱万成 等. 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]
- [32] Lanaro F ,Tolppanen P. 3d Characterization of coarse aggregates [J]. Engineering Geology 2002 65(1) : 17 – 30
- [33] Yue Zhongqi ,Chen Sha ,Zheng Hong ,et al. Digital image processing based on finite element method for geomaterials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 23(6) : 889 – 897 [岳中琦 陈沙 郑宏 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报 2004 23(6) : 889 – 897]

Review of Meso – Structure Characteristic of Soil – Rock Mixture in Accumulation Landslides

LIU Chao^{1 2} ,SU Lijun^{1 3} ,LIU Wenjing^{1 2}

- (1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process , Chinese Academy of Sciences / Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu , Sichuan , China 610041;
2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , 100049;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences Beijing , 100101)

Abstract: Accumulation landslides have aroused researchers' great attention with their wide distribution and serious risk at home and abroad. The material in this type of landslides , mainly slope sediments , fluvial and alluvial materials is a kind of soil and rock mixture with complicated causes. Their structural characteristic contributing a lot to deformation or destruction of the landslides is different from normal soil or rock landslides. Therefore , the structure of accumulation landslides is a key point to the study on their slide mechanism. Based on analyses of basic characteristics of the accumulation material in the landslides including causes , categories etc. , the authors in this paper summarized the current methods for analyzing this structural characteristic. These methods can be divided into four kinds , including empirical methods , fractal approaches , mathematical geology methods and digital image processing. Besides , the representative characteristic of every method was detailed introduced and the advantages and limitation of the existing methods are discussed. At the end , further research problems and solutions were suggested and discussed.

Key words: accumulation landslides; soil-rock mixture; structural characteristics; digital image processing