

文章编号: 1108 - 2786 - (2016) 1 - 63 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000101

砾石土分形特征及其与泥石流启动关系试验

贺 拿¹ 曾 梅² 陈宁生³ 李 涛⁴ 陈 容²

(1. 河南理工大学土木工程学院 ,河南 焦作 454000; 2. 河南工业和信息化职业学院 ,河南 焦作 454000;

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

4. 河南省建筑科学研究院有限公司 ,河南 郑州 450053)

摘 要: 对 116 条泥石流沟取样 ,所取土样共 182 个 ,通过室内颗分试验得到其颗粒组成特征 ,以此为基础引入分形理论计算各土样的分维值 ,并分析分维值与级配特征之间的关系。分析发现: 泥石流源区砾石土以一重分形特征为主 ,分维值介于 2. 250 ~ 2. 798 之间 ,分维值大的砾石土颗粒组成较为均匀 ,分维值减小 ,砾石土中的细颗粒含量逐渐降低。基于砾石土分维值分布区间 ,在野外配置土样开展泥石流启动试验 ,综合分析试验现象、孔隙水压力及含水量变化情况得到以下结论: 形成泥石流的砾石土具有临界特征 ,分维值小于 2. 4 的砾石土不易形成泥石流; 分维值介于 2. 4 ~ 2. 6 时 ,以土力类泥石流为主 ,泥石流重度较高且规模较大; 分维值介于 2. 6 ~ 2. 7 时 ,以水力类泥石流为主 ,泥石流的重度较低 ,以稀性泥石流为主 ,并伴有明显的阵性特征。分维值及降雨条件相同时 ,土体变形 (未启动形成泥石流) 或破坏启动形成泥石流的时间与密度呈正相关关系。

关键词: 砾石土; 分形特征; 分维值; 泥石流启动; 试验

中图分类号: P642. 23 ,TU411

文献标志码: A

泥石流是山区较为严重的自然灾害之一。由于泥石流具有暴发突然、破坏力强及防范困难等特点 ,一旦暴发会给当地人民的生命和财产造成严重危害^[1]。泥石流的形成受诸多因素的影响 ,地貌、物源条件、气候类型以及人类活动等都在很大程度上影响泥石流的形成。目前 ,提前发布预警信息是减灾的主要手段 ,准确的泥石流预测预报是减轻泥石流危害的前提 ,在泥石流的预报方面前人开展了较多的研究工作^[2-5] ,但以前的研究主要集中在临界雨量方面 ,预报也是基于雨量阈值展开的 ,雨量阈值大多基于统计结果推算而得到 ,临界雨量的准确性无法保证。此外 ,由于近年来极端天气频繁出现 ,给泥石流的预测预报提出了更高的要求和挑战。不少学者通过试验探讨泥石流启动的模式及

雨量阈值^[2,6-7] ,但试验没有考虑土体级配差异 ,试验结果有一定的局限性。泥石流源区砾石土的颗粒组成特征是土体结构性的基础 ,土体的结构决定了土的渗透性、变形及强度等物理特性。而土体渗透、变形及强度影响甚至决定泥石流启动的难易程度。泥石流启动与土体颗粒组成之间的关系研究 ,可以为后续基于泥石流启动机理的预测预报提供依据 ,为基于下垫面条件的泥石流预测预报服务。基于此 ,本文结合各区域下垫面条件 (地貌特征、物源条件及坡度等) 及区域的降雨类型开展泥石流启动试验 ,探讨泥石流与砾石土颗粒组成特征之间的关系 ,初步分析砾石土颗粒组成对泥石流启动的影响。

泥石流源区砾石土级配是影响泥石流启动的关键因素之一。砾石土的级配特征直接影响其强度及

收稿日期 (Received date) : 2015 - 06 - 03; 改回日期 (Accepted) : 2015 - 08 - 22。

基金项目 (Foundation item) : 灾害风险综合研究计划中国委员会 (IRDR - CHINA) 资助项目“社区山地灾害风险管理机制研究” (IRDR2012 - Y01) ; 河南理工大学博士基金 (B2015 - 58) 。 [This research were financially supported by Project on Risk Management Mechanisms of Community - Based Mountain Hazards (Grant No. IRDR2012 - Y01) supported by Chinese National Committee for Integrated Research on Disaster Risk (IRDR - CHINA) , and Doctoral fund of Henan Polytechnic University (Grant No B2015 - 58) .]

作者简介 (Biography) : 贺 拿 ,男 ,1984 年生 ,博士 ,主要从事山地灾害及其动力过程方面的研究工作。 [He Na , male , (1984 -) , doctor , mainly focused on the research of mountain hazards and its dynamic process.] E - mail: hn61886@163. com

渗透特性,而强度及渗透特性是泥石流启动过程中的两大重要环节^[8],以前的研究对此考虑甚少。通过野外试验探讨不同级配砾石土启动形成泥石流的难易程度、模式及所需的临界雨量鲜有报道。陈中学等^[9-11]分析了黏粒含量对蒋家沟泥石流启动的影响,但该研究没有考虑黏粒含量与整个颗粒级配之间的关系,研究结果普适性有待提高。陈宁生^[12]通过模型试验探讨不同黏粒含量砾石土启动形成泥石流的过程及机理,分析了不同黏粒含量的砾石土启动形成泥石流的模式、启动时间及相应的孔压变化情况,为基于黏粒含量的泥石流启动定量研究奠定了基础。黏粒含量相同但级配差异较大时,土体强度及渗透特性均有明显差异,土体破坏启动形成泥石流的模式及雨量条件也明显不同。

泥石流源区砾石土复杂的物质组成决定了其结构的非确定性和非均质性,很难以传统的、基于线性分析基础之上的方法进行量化描述。而用分维值表征砾石土级配可以直观有效地反映砾石土内部各粒组的含量。在此基础上,结合野外试验探讨不同分维值砾石土启动形成泥石流的难易程度及模式,并分析泥石流启动机理。后续研究可通过泥石流启动试验分析不同分维值砾石土破坏形成泥石流的临界雨量,并建立各区域泥石流启动临界雨量基础数据库,结合气象资料预测泥石流灾害,为泥石流的预测预报提供新的方法。

2 砾石土分形特征

泥石流源区砾石土与破碎的岩石较为接近,其粒度分维值可依据分形理论中的岩石破碎模型通过粒度分析进行求解^[13-19]。假定砾石土颗粒粒径为 R , 粒径大于 R 的颗粒百分含量为 $N(R)$, 则 R 与 $N(R)$ 满足分维的一般定义式:

$$N(R) = R^{-D} \quad (1)$$

对(1)式两边求导可得

$$dN(R) \sim R^{-D-1} dR \quad (2)$$

砾石土中的颗粒大小和频度之间的关系满足 Weibull 分布:

$$\frac{M(<R)}{M_0} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{R}{R_0}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中 $M(<R)$ 为所有尺寸小于 R 的颗粒的质量之和; M_0 为整个砾石土的质量; R_0 为碎块的平均尺寸; k 为常数。当 $R \ll R_0$ 时,将指数函数进行 Taylor 级数展开,并略去二次项后得:

$$\frac{M(<R)}{M_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^k \quad (4)$$

对式(4)两边求导可得:

$$dM(<R) \sim R^{k-1} dR \quad (5)$$

砾石土颗粒数目的增加和颗粒质量之间存在下列关系:

$$dM(<R) \sim R^3 dN(R) \quad (6)$$

联立式(2)、(5)和(6)可得泥石流粒度分维的计算式:

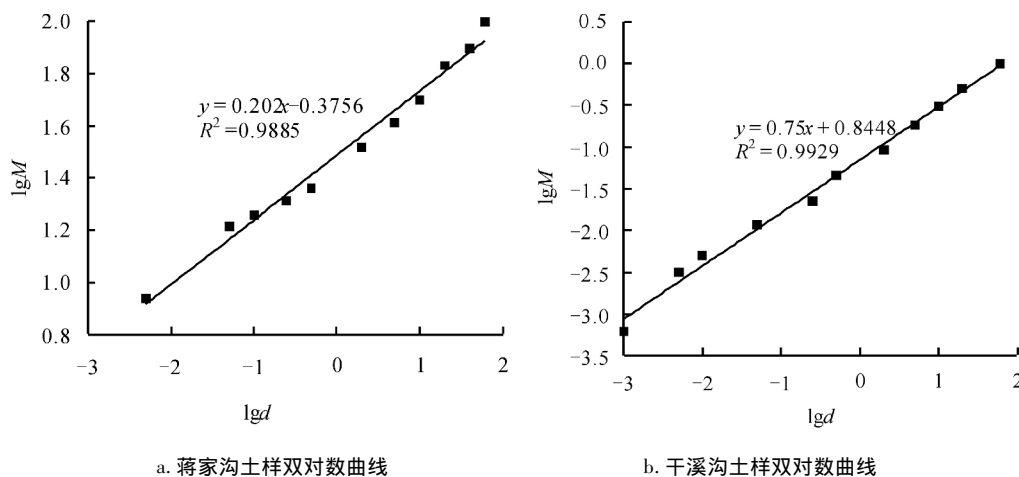
$$D = 3 - k \quad (7)$$

该式即为求解颗粒分维值的常用算式。如果粒径 R 和粒径小于 R 的累积百分含量 $M(<R)/M_0$ 在双对数坐标系中具有很好的线性关系,则说明泥石流砾石土颗粒具有较好的分形特征。

分形现象多是近似自相似或者统计自相似,这种自相似性仅存在于一定的尺度范围内,当对其进行缩小或放大到一定倍数时,其自相似性就不复存在了,无标度性与自相似性有相同之处。自相似性仅存在于具有标度不变性的一段区间范围内,如果超出这个区间就没有自相似性,分形也就不复存在,这就意味着分形的无标度区间是有限的。本文划分无标度区间的依据为拟合曲线的相关系数,当 $R^2 \geq 0.9$ 时,整个尺度范围内具有较好的相关性,无标度区间就是整个尺度范围;若 $R^2 < 0.9$ 时,寻找粒度分布曲线的拐点,在保证相邻两直线各自相关系数 ≥ 0.9 且相邻两直线的斜率不小于 3 倍关系时,确定无标度区间及分界粒径值。如果没有拐点则表示在整个尺度范围内相关性较好,具有一重分形特征;存在一个拐点,即具有两重分形特征;若存在两个拐点,且在相邻的两个区间线性关系均较好,即具有三重分形特征。

2.1 泥石流源区砾石土分形特征

本文以蒋家沟、牛圈沟、文家沟、深溪沟、矮子沟及娃娃沟等 116 条泥石流沟源区的 182 个砾石土土样为基础,基于质量分布确定砾石土颗粒分维数。将野外所取 182 个土样通过筛分计算各粒径范围内的百分含量,在双对数曲线上通过线性拟合求解直线的斜率,并计算土样的分维值。根据公式(7)可知,如需求解砾石土的分维值,只需在以粒径 R 和粒径小于 R 的累积百分含量 $M(<R)/M_0$ 形成的双对数曲线上进行线性拟合,拟合后求解直线的斜率 k ,根据分维值算式 $D = 3 - k$ 即可求解土样的分维值。如图 1 a 所示为蒋家沟土样的双对数曲线,拟合发现相关性大于 0.9,线性拟合得出直线的斜率为



a. Double logarithmic curve of Jiangjia Ravine soil sample b. Double logarithmic curve of Ganxi Ravine soil sample

图1 砾石土双对数曲线图

Fig. 1 Double logarithmic curve of gravelly soil

0.202, 带入 $D = 3 - k$, 得蒋家沟土样的分维值为 2.798。在双对数曲线上拟合出的直线相关系数大于 0.9 的样本 161 个。依据自相似性划分依据可知 182 个土样中具有一重分形的土样 161 个, 占样本总数的 88.46%, 分维值介于 2.25 ~ 2.798 之间, 其中分维值最大的为蒋家沟土样, 其分维值为 2.798; 分维值最小的为干溪沟土样(图 1 b), 其分维值为 2.25, 图 1 中 d 为粒径, M 为小于粒径 d 的百分含量。161 个土样中, 分维值介于 2.4 ~ 2.7 的土样 130 个, 占一重分形总数的 80.75%, 分维值介于 2.4 ~ 2.7 的砾石土是否更易暴发泥石流有待进一步探讨。

依据相似性判据, 182 个土样中相关系数小于 0.9 的土样共 21 个, 占样本总数的 11.54%, 相关系数小于 0.9 的 21 个样本中具有一个拐点的样本 19 个, 具有两个拐点的样本 2 个。通过以上计算可知泥石流源区砾石土以一重分形为主, 分维值介于 2.25 ~ 2.798 之间。因此本文以一重分形土样为基础, 通过野外泥石流启动试验, 探讨不同分维值砾石土启动形成泥石流的难易程度、模式及机理。

2.2 砾石土分维值与级配特征关系

为探讨砾石土分维值与其级配特征之间的关系, 将部分土样的颗分曲线绘制如图 2。图 2 中的曲线从上至下, 其分维值逐渐变小。对比图 1 及图 2 可发现: 分维值较大时, 砾石土内部各粒组含量较接近, 颗粒组成较均匀, 且土体内部细颗粒含量较高; 分维值减小时, 砾石土内部粗颗粒含量逐渐增加, 细颗粒含量逐渐降低。分维值较小时(以干溪沟土样为例) 其内部粒径小于 1 mm 的颗粒含量仅

3%, 而粒径小于 0.1 mm 的颗粒含量近乎为零, 表明分维值较小时, 砾石土以粗大颗粒为主。分维值不同, 土体内部粗细颗粒含量差异较大, 对土体内部结构也有较大影响, 土体结构是其强度及渗透性的基础。降雨过程中, 土体能否破坏启动形成泥石流与土体强度及渗透性密切相关。因此, 本文通过泥石流启动试验, 探讨不同分维值砾石土与泥石流启动之间的关系。

3 泥石流启动试验

以砾石土分形特征为依据, 在野外配置土样, 通过人工降雨装置进行泥石流启动试验。试验前, 在斜坡内部埋设孔压及含水量传感器, 实时监测降雨过程中坡体内部孔压及含水量变化情况, 结合孔压、含水量数据及试验现象综合分析泥石流启动机理,

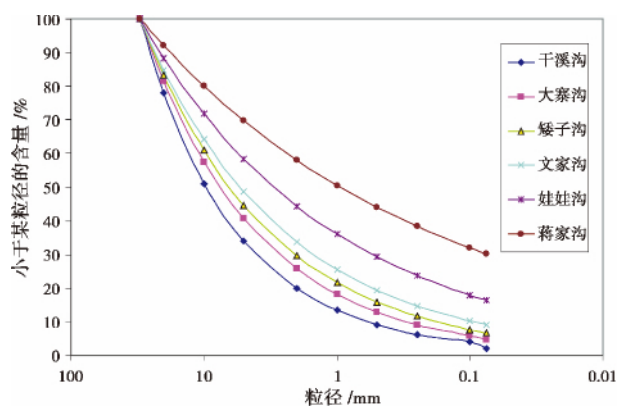


图2 砾石土级配特征曲线

Fig. 2 Particle size distribution curves of gravelly soil

为后续基于下垫面条件的泥石流预测预报做铺垫。

3.1 试验设计及结果描述

试验所用仪器主要包括: 人工降雨系统(水泵、分水箱、喷头、支架、管线和喷水管等)、孔隙水压力采集系统、含水量采集系统、雨量采集系统及摄像机等。试验坡面尺寸为 $1.5\text{ m} \times 2.3\text{ m}$, 斜坡坡度 35° (图3)。孔压传感器及含水量传感器分两层布设, 埋深分别为 0.07 m 、 0.17 m 。1号、2号及3号孔压及含水量传感器埋在上层, 埋设深度为 0.07 m 。4号、5号及6号孔压传感器及含水量传感器埋在下层, 埋设深度为 0.17 m , 埋设方式及距离见图3。

试验前对雨量进行标定, 现场进行3组平行试验。3次试验的降雨量分别为 76.5 、 74.2 及 75.1 mm/h , 取其平均值 75.2 mm/h 作为试验的降雨量。配置的土样其分维值分别为 2.3 、 2.35 、 2.4 、 2.45 、 2.5 、 2.55 、 2.6 及 2.7 , 在干密度分别为 1.65 、 1.7 及 1.8 g/cm^3 等3种条件下进行试验, 为保证土体具有一定的结构性, 配置土样时控制其前期含水量为 10% , 试验过程如下:

1) 修整坡面(坡面的尺寸为 $1.5\text{ m} \times 2.3\text{ m}$)。在距离顶部 0.75 m 及 1.55 m 位置处分两层埋设孔压及含水量传感器, 斜坡上堆积体的厚度为 0.35 m 。土样分3层铺设, 最下面一层土样的厚度为 15 cm , 上面两层土样的厚度均为 10 cm ;

2) 取样后, 将土样晾晒, 然后用烘箱将土烘干, 通过振筛机将烘干后的土样分类备用;

3) 根据砾石土分维值基础数据库计算3种干

密度条件下各分维值砾石土的总质量、需加入水的质量及各粒组的质量, 在此基础上配置土样并将土样混合均匀;

4) 在坡面上分3层成样, 为防止层与层接触的部位成为滑裂面, 每层样品铺好后均刨毛。在每层指定的部位埋设孔压传感器及含水量传感器, 并与数据采集系统相连;

5) 坡面修整以后, 用塑料布将土样盖住, 并静置 24 h , 使土样恢复一定的结构性。在斜坡坡脚处放置雨量筒, 监测试验过程中的实时降雨量;

6) 架设人工降雨装置及摄像机, 以记录试验过程中表面径流情况、斜坡破坏位置、土体启动的深度及泥石流启动的模式等;

7) 仪器布置好后, 打开摄像机及数据采集系统并设置好相应的参数, 随后开始人工降雨试验。

对比试验过程发现: 干密度相同时, 分维值较小的砾石土在降雨过程中有短时间的蠕滑变形, 随着分维值增大, 坡面砾石土蠕滑变形的时间延长、蠕滑的距离增大。相同的降雨条件下, 分维值较小的砾石土未产生表面径流, 水分多以内部径流的形式从坡脚流出, 分维值较小时, 坡体内部的细颗粒流失严重。通过分析孔压数据可以发现, 土体内部的孔隙水压力没有明显的突变, 土体内部的含水量急速提高, 在短时间内达到饱和, 见图4。随着分维值增大, 表面径流量逐渐增大, 且产生径流的时间较短, 表明随分维值增大, 砾石土渗透性降低, 这与已有的研究结果也较吻合^[19]。

通过试验发现: 密度及降雨条件相同时, 分维值

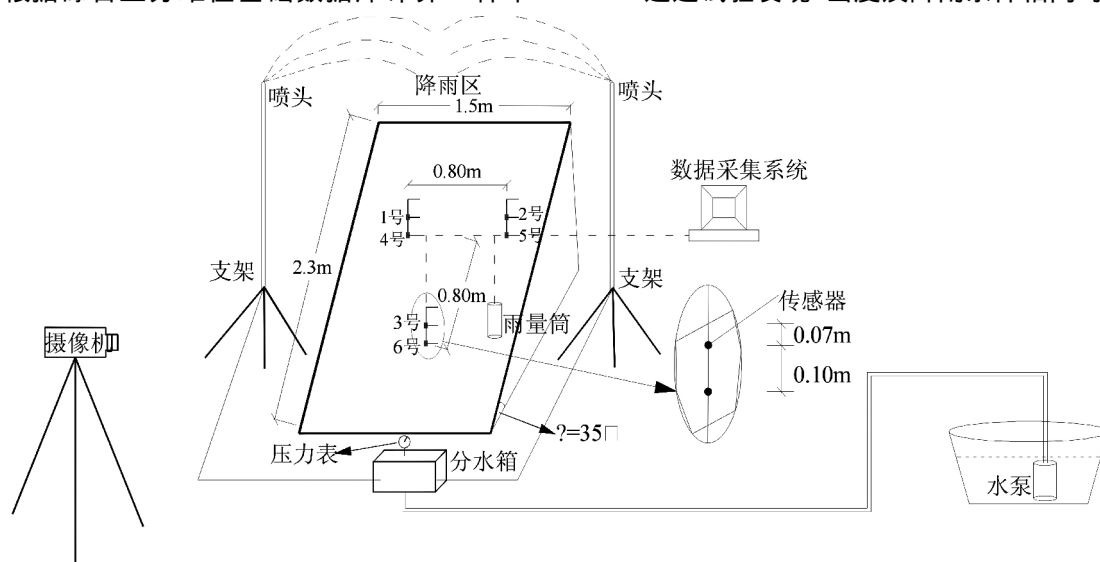


图3 泥石流启动试验布置图

Fig. 3 Experiment arrangement diagram

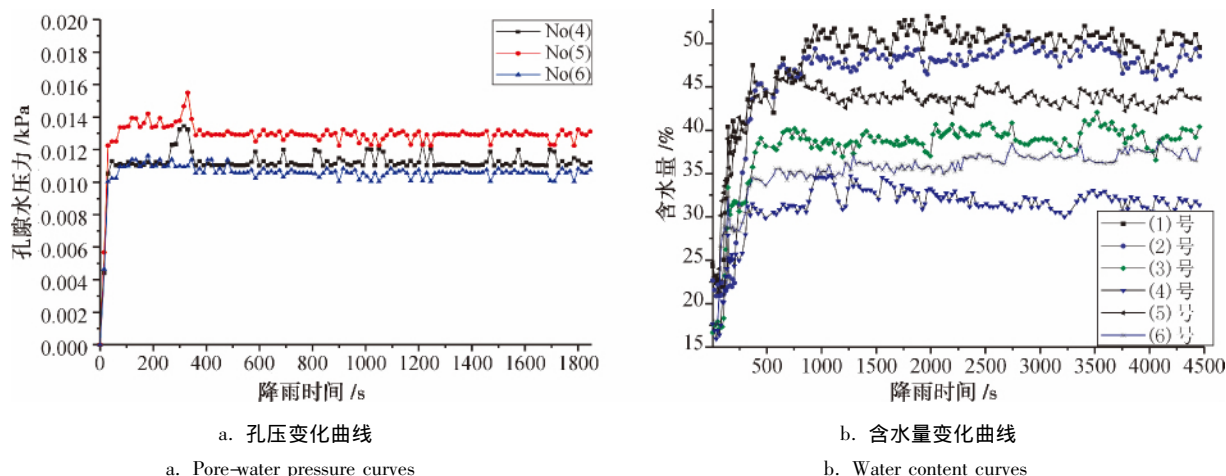


图4 分维值为 2.35 的砾石土降雨过程中孔压及含水量变化曲线

Fig.4 Pore-water pressure curves and water content curves of gravelly soil with fractal dimension 2.35

较小的砾石土不易形成泥石流。随着分维值的增加,砾石土启动形成泥石流的可能性增大。形成泥石流的砾石土具有临界性特征,分维值小于 2.4 的砾石土,在降雨量 75.2 mm/h 的条件下,历时多于 4 h 土体依然保持稳定,雨水以稳定的内部径流运动,且在后续的降雨过程中土体未出现滑动及变形。分维值大于 2.4 时土体容易启动形成泥石流,但土体破坏模式不同,分维值介于 2.4 ~ 2.6 时,泥石流启动的深度及规模均较大,表现为大面积整体下滑。分维值介于 2.6 ~ 2.7 时,降雨过程中,很快形成表面径流,表面径流的冲刷及掏蚀作用导致坡面形成多条小冲沟,随着降雨过程的持续,冲沟的深度及宽度均不断增加,冲沟内的径流量也增大,沟岸两侧的土体不断崩塌汇入冲沟内形成小规模泥石流,分维值介于 2.6 ~ 2.7 时,泥石流的形成具有显著的阵性特征,每次参与泥石流运动的土体深度都较小,泥石流的规模较小,且容重较低。分维值相同的砾石土,在相同的降雨条件下,随着密度的增大,土体变形(未启动形成泥石流)或破坏形成泥石流的时间延长。

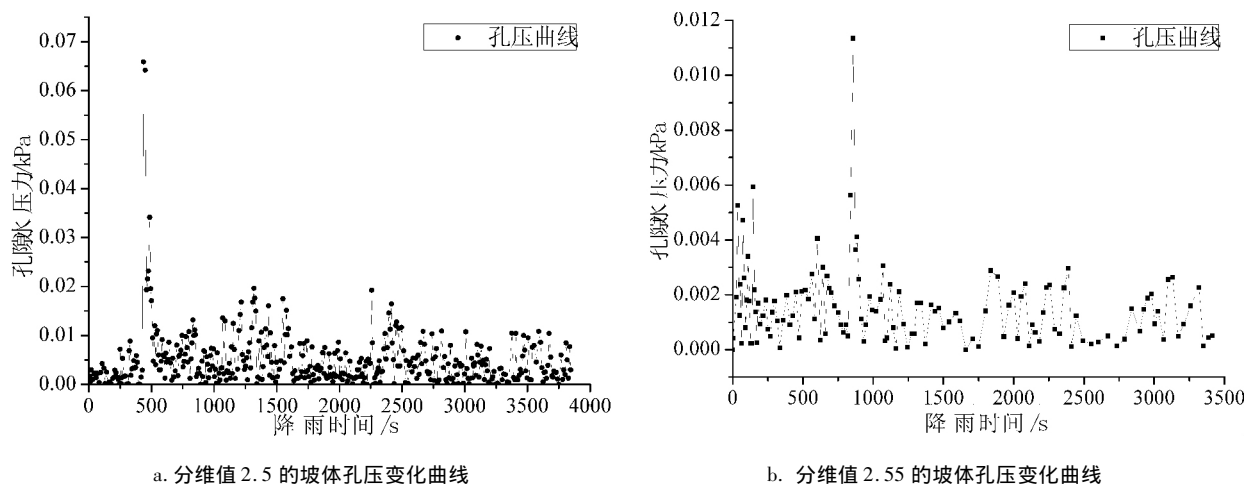
3.2 机理分析

砾石土分维值与其颗粒组成密切相关,分维值较小时(小于 2.4),土体以粗颗粒为主,粗颗粒间的咬合力是土体稳定性的基础。在此条件下,土体内部细颗粒含量较低,土体内部孔隙率高且孔隙连通性好。因此,分维值较小时,土体内部的结构性及渗透性较强。随着分维值增加(分维值介于 2.4 ~ 2.6 时),土体内部各粒组含量逐渐趋于平均,土颗粒之间的咬合力及摩擦力是土体稳定的关键,而此时土体内部的孔隙率及孔隙连通性均低于分维值较小

(小于 2.4)的砾石土。此分维值条件下,降雨过程中水分入渗除与雨强有关外,与其自身的渗透性也有显著的相关性。分维值继续增大(分维值大于 2.6)时,土体以细颗粒含量为主,此时内部细颗粒之间的摩擦力是砾石土的强度基础,由于细颗粒的充填作用导致其孔隙率及孔隙连通性较低,渗透性较差,降雨过程中水分下渗速度及入渗量均较小。

分维值较小时(小于 2.4),土体的强度高且渗透性较强,降雨过程中水分下渗速度较快,在斜坡内部形成内部径流,在内部径流拖拽力的作用下,土体内部细颗粒含量随水分运移,土体内的粗颗粒接触方式发生动态变化。由于此条件下粗颗粒之间的咬合力较强,细颗粒流失后,土体可在短时间内达到新的平衡,从而保持稳定,而内部径流对土体结构的影响表现为一定程度的沉降及蠕滑变形。因此,分维值小于 2.4 的砾石土在降雨过程中不易形成泥石流。

分维值介于 2.4 ~ 2.6 时,土体内部颗粒间的咬合力及摩擦力是其强度基础,此分维值的砾石土渗透性有所降低,降雨过程中,随着水分入渗,土体内部的细颗粒也会发生一定的运移,土体内部结构发生动态变化,颗粒之间的摩擦力逐渐减小,土体的强度主要由咬合力提供,强度有所降低。细颗粒运移会导致坡体内部局部孔隙被堵塞,形成短暂滞水层,导致孔隙水压力短时间内难以消散(图 5),随着孔隙水压力的升高,土体的强度逐渐降低,在外部降雨的激发作用下土体容易失稳破坏形成泥石流。因此,分维值介于 2.4 ~ 2.6 的砾石土破坏形成泥石流主要以土力类为主。



a. 分维值 2.5 的坡体孔压变化曲线 b. 分维值 2.55 的坡体孔压变化曲线

图 5 分维值 2.5 及 2.55 的坡体孔压变化曲线

Fig. 5 Pore-water pressure of gravelly soil with fractal dimension 2.5 and 2.55



a. 试验开始阶段 b. 试验结束阶段
a. At the start of the test b. At the end of the test

图 6 分维值 2.6 的砾石土试验过程图

Fig. 6 Experimental phenomena for gravel soil with fractal dimension 2.6

分维值较大时(大于 2.6),土体以细颗粒为主,细颗粒间的摩擦力较强,此条件下土体的密实性较好,渗透能力较低,降雨过程中水分的入渗深度及下渗速度都较小,因此在降雨过程中斜坡表面很快形成表面径流,在径流的冲刷、掏蚀作用下斜坡表面形成冲沟,随着冲沟深度及宽度的不断增加,冲沟两侧的坡体失稳垮塌,与径流混合形成泥石流,见图 6。因此,此分维值条件下,砾石土形成泥石流以水力类为主,且形成泥石流的时间较短。

4 结论

以砾石土的颗分数据为基础,通过分形理论计算砾石土的分维值,探讨砾石土的分形特征,并对比

分析分维值与级配特征之间的关系。在此基础上,开展泥石流启动试验,分析不同砾石土对降雨的响应形式、变形破坏特征及土体内部各参数的变化情况。经综合分析得到以下结论:

1) 泥石流源区砾石土以一重分形特征为主,分维值介于 2.250 ~ 2.798;分维值越大,土体内部各粒组的含量越均匀(各粒组含量较为接近),分维值越小土体内不的细颗粒含量越低,分维值较低时砾石土主要以粗大颗粒为主。

2) 形成泥石流的砾石土具有临界特征,分维值小于 2.4 时,砾石土不易形成泥石流。

3) 分维值大于 2.4 时,砾石土形成泥石流的可能性增加,分维值介于 2.4 ~ 2.6 时,以土力类泥石流为主,泥石流重度较高,且形成泥石流的规模较

大;分维值介于2.6~2.7时,以水力类泥石流为主,泥石流的重度较低,以稀性泥石流为主,并伴有明显的阵性特征。

4) 分维值相同的砾石土,在相同的降雨条件下,随着密度的增大,土体变形(未启动形成泥石流)或破坏启动形成泥石流的时间延长,土体破坏的深度也较小,土体启动形成泥石流时需要较高的累积降雨量。

参考文献(References)

- [1] 王裕宜,田冰,詹钱登,等. 不同权重的前期和始发日降雨量与泥石流产沙规模的分析——特大型泥石流灾害发生的思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(1): 32-38 [Wang Yuyi, Tian Bing, Zhan Qiangdeng, et al. Analysis of the relationship between different weight of precedent and daily critical rainfall and sediment transport scale in debris flows[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1): 32-38]
- [2] 常鸣,唐川. 基于水动力的典型矿山泥石流运动模式研究[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1318-1326 [Chang Ming, Tang Chuan. Study on typical movement model in mine debris flow based on hydrodynamic force conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1318-1326]
- [3] 江锦红,邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 458-463 [Jiang Jinhong, Shao Liping. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 458-463]
- [4] 张金山,崔鹏. 泥石流预警及其实施方法[J]. 水利学报, 2012, 43(S2): 174-180 [Zhang Jinshan, Cui Peng. Research on and implementation of debris-flow forecast and warning[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S2): 174-180]
- [5] Hu K, Cui P, Wang C, et al. Characteristic rainfall for warning of debris flows[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7: 207-214
- [6] 陈晓清. 滑坡转化泥石流起动机理试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 18-27 [Chen Xiaoqing. Experiment of Initiation Mechanism of Landslide Translation to Debris Flow[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006: 18-27]
- [7] 胡明鉴,汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 824-828 [Hu Mingjian, Wang Ren. Testing study on the correlation among landslide, debris flow and rainfall in Jiangjia valley[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 824-828]
- [8] 周小军,崔鹏,李战鲁. 泥石流源区砾石土渗透沉降综合测试设备研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1281-1289 [Zhou Xiaojun, Cui Peng, Li Zhanlu. Development and application of integrated test equipment for permeability and settlement of gravelly soil in triggering area of debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1281-1289]
- [9] 陈中学,汪稔,胡明鉴,等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2197-2201 [Chen Zhongxue, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Study of content of clay particles for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2197-2201]
- [10] 陈中学,汪稔,胡明鉴,等. 云南东川蒋家沟泥石流形成内因初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3053-3056+3070 [Chen Zhongxue, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Study of internal factors for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine, Dongchun of Yunnan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3053-3056+3070]
- [11] 王志兵,汪稔,胡明鉴,等. 蒋家沟砾石土的特性及其对斜坡失稳的意义[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 206-211 [Wang Zhibing, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Characteristics of gravelly soil and their implications for slope instability in Jiangjia Ravine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 206-211]
- [12] Chen NS, Zhou W, Yang CL, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. Geomorphology, 2010, 121(3-4): 222-230
- [13] 柏春广,王建. 一种新的粒度指标: 沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 234-239 [Bai Chun-guang, Wang Jian. A new grain-size index: grain-size fractal dimension of sediment and its environmental significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 234-239]
- [14] 倪化勇,吕学军,杨德伟. 川藏公路培龙沟路段堆积物的分形特征及其地质意义[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 451-454 [Ni Huayong, Lv Xuejun, Yang Dewei. Fractal feature and geological significance of accumulations at Peilong section along Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 451-454]
- [15] May C L, Gresswell R E. Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA [J]. Geomorphology, 2004, 57(3-4): 135-149
- [16] 吴中如,潘卫平. 分形几何理论在岩土边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利学报, 1996, 4: 79-82 [Wu Zhongru, Pan Weiping. Application of fractal geometry theory in stability analysis of rock and soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 4: 79-82]
- [17] 张季如,祝杰,黄丽,等. 固结条件下软黏土微观孔隙结构的演化及其分形描述[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 394-400 [Zhang Jiru, Zhu Jie, Huang Li, et al. Evolution of micro pore structure of soft clay and its fractal features under consolidation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 394-400]
- [18] 陈颢. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 22-31 [Chen Yu. Fractal geometry[M]. Beijing: Seismological Press, 1998: 22-31]
- [19] 贺拿,陈宁生,朱云华,等. 泥石流源区砾石土分形特征及其与渗透系数关系试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2543-2548 [He Na, Chen Ningsheng, Zhu Yunhua, et al. Experiment study of fractal feature and relationship between fractal dimension and permeability coefficient of gravelly soil in debris flow source area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2543-2548]

Experiment on Fractal Feature of Gravelly Soil and Relationship between Fractal Dimension and Debris Flow Initiation

HE Na¹, ZENG Mei², CHEN Ningsheng³, LI Tao⁴, CHEN Rong²

(1. School of Civil Engineering Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000 Henan, China;

2. Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo 454000 Henan, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;

4. Henan Provincial Academy of Building Research, Zhengzhou 450053, Henan, China)

Abstract: About 182 gravelly soil samples were taken from 116 gullies in debris flow prone area. By means of grain size analysis experiment the feature of gravelly soil is obtained, on the basis of grain size analysis results the fractal theory was introduced to calculate the fractal dimension of each sample, at the same time, the relationship between fractal dimension and particle size distribution was discussed. After comprehensive analysis found that gravelly soil in debris flow prone area is mainly concentrated in one dimension, and the value of one dimension fractal ranges from about 2.250 to 2.798, the larger the dimension fractal the more uniformly the gravelly soil becomes, while the fine particle content decreased along with the value of fractal dimension decreased. Based on distribution scope of fractal dimension, debris flow initiation experiment was conducted in the field, and then by comprehensive analysis of experiment phenomenon, real time pore-water pressure and water-content conditions in the slope the following results has been achieved: the gravelly soil which can transfer into debris flow have prominent critical property, the critical value of fractal dimension is 2.4. When fractal dimension below 2.4, the possibility of gravelly soil transfer into debris flow is extremely low, when fractal dimension value ranges from about 2.4 to 2.6, the soil destruction and form into debris flow can be explained by soil mechanics, under this circumstance, debris flow density is higher and the scale is larger. While fractal dimension value ranges from about 2.6 to 2.7, the soil destruction and form into debris flow can be explained by hydraulics, and debris flow density is lower, at the same time the formation of debris flow possess significant intermittent characteristics. Under the condition of identical fractal dimension and rainfall, the time of soil deformation (debris flow do not initiate) or destruction and transferred into debris flow is significantly positive related with soil density.

Key words: gravelly soil; fractal feature; fractal dimension; debris flow initiation; experiments