

河南省栾川县泥石流源地土大直剪试验

谢 凯 余宏明* 彭祖武 李 科 王硕楠 陈鹏宇

(中国地质大学(武汉) 湖北 武汉 430074)

摘 要: 栾川县泥石流为降雨型泥石流,降水对泥石流源地土的强度影响较大。对栾川县自然泥石流土样(沟谷型、坡面型) 和人为泥石流土样(矿渣) 分别在天然含水量、快速饱和、饱和 3 h 条件下进行大型直接剪切试验,得到抗剪强度指标 c 、 φ 和强度包线与含水量的关系,以及不同含水状态剪应力与位移关系。结果表明,除矿渣粘粒含量太少, ρ 值趋近于 0 外,矿渣 φ 和其他土样 c 、 φ 在天然含水量到饱和状态是明显降低的,饱和状态下剪应力 - 水平位移曲线有明显的波动,并在饱和 3 h 后,土样的抗剪强度进一步小幅度降低。一定条件下的前期降雨对泥石流的发生贡献很大。前期降雨充足,源地土体快速饱水,土体的抗剪强度明显降低,在重力和径流冲刷作用下易破坏被地表水流带走。随着降雨持续,土体抗剪强度进一步降低,泥石流固体物源启动可能性增加。最后对泥石流不同固体物源类型启动难易程度进行了综合分析。

关键词: 泥石流固体物源; 大直剪试验; 饱水情况; 抗剪强度

中图分类号: P642 ,TU41

文献标志码: A

我国最主要的泥石流类型是降雨型泥石流^[1],强烈的暂时性地表径流是泥石流形成的必要条件。研究表明,一定条件下的前期降雨对泥石流的形成贡献很大^[2-3]。泥石流固体物源在降雨作用下逐渐饱水过程中,抗剪强度是变化的,当坡面或沟谷岩土体物源受到的剪切力大于其抗剪强度时,岩土体将破坏^[4]。降雨既是泥石流形成的激发条件,也是液体物质条件。在强降雨条件下,松散土体和降雨易形成泥石流^[5]。

栾川县位于河南省西部,全县山多耕地少,沟谷发育;境内矿产多样,尤以钼矿最为丰富,开采历史悠久;境内部分地区人为改造严重,主要包括破坏森林植被、矿渣堆放、筑路弃渣、陡坡耕作、挤占河道等,导致环境恶化,加重了泥石流的危害程度。据调

查^[6]显示,2010-07-24,栾川县 10 多个乡镇发生了历史上罕见的洪涝灾害,暴雨造成区内地质灾害点上百处,降雨持续了半月之久,引发了多处泥石流(简称“7·24”泥石流),共造成 68 人死亡,21 人失踪,给当地人民群众造成了巨大的经济损失。泥石流区域固体物源土体粗粒含量较多,本文以室内土工试验为基础,通过对泥石流固体物源在不同含水程度下进行大直剪试验,得出固体物源的强度变化规律,从而分析降雨导致的固体物源强度变化对泥石流启动的影响。

1 试验设备及土样

1.1 试验设备

收稿日期(Received date): 2013-05-16; 改回日期(Accepted): 2013-07-09。

基金项目(Foundation item): 河南省国土资源厅 2011 年度“两权价款”地质科研项目(2011-622-23),河南省科技厅科技攻关计划项目(122102310477)。[2011 Geological Sciences Item of He'nan Land and Resources Department's "The Cost of Prospecting Rights and Mining Rights"(2011-622-23); Scientific Brainstorm Project of He'nan Science and Technology Department(122102310477) .]

作者简介(Biography): 谢凯(1990-) 男(汉族) 湖北仙桃人,硕士研究生,研究方向地质工程。[Xie Kai(1990-) , Male (Han Population) , Born in Xiantao city, Hubei Province, master student, research direction: geological engineering.] Tel: 15007169937, E-mail: xiekaicug@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 余宏明(1952-) 男,硕士,教授,博士生导师,主要从事地质灾害分析与防治及岩土工程领域的教学与科研工作。[Yu Hongming(1952-) , male, master, professor, Ph D supervisor, mainly engaged in teaching and research work of geological disasters analysis and prevention and geotechnical engineering.] E-mail: yuhongming55@sohu.com

试验设备为 STJY-5 型土工合成材料直剪仪 (图 1), 采用先进的变频无级调速力值和位移, 法向采用气动加荷, 比手动挂砣精度高, 可详细分析试验过程中各阶段的数据变化过程。试验仪器上盒长宽高尺寸 30 cm × 30 cm × 6 cm, 下盒长宽高尺寸 30 cm × 30 cm × 6 cm, 壁厚 2.5 cm, 剪切面积为 0.09 m²。试验土样采用粒径 ≤ 60 mm 泥石流源地的重塑土样。有关研究表明, 使用这种大型直剪仪比常规直剪仪得出的试验数据具有更好的可靠性, 更接近实际情况^[7-8]。



图 1 STJY-5 型土工合成材料直剪仪
Fig. 1 STJY-5 geosynthetic direct shear apparatus

1.2 试验材料及制备

栾川县泥石流按人类活动的影响大小可以分为自然泥石流 (包括沟谷型和坡面型泥石流) 与人为泥石流 (固相物质为矿渣)。本试验分别对取自栾川县泥石流固体物质源区的三组土样进行试验对比分析, 取样地点分别是柿树沟 (沟谷型泥石流土样)、赤土店镇竹园村西二组 (坡面型泥石流土样) 和干江沟 (矿渣, 主要为钼矿弃渣)。泥石流土样取样地点基本流域参数见表 1。

表 1 泥石流土样取样地点基本流域参数

Table 1 Basic parameters of debris flow basin in different sampling spots

流域参数	主沟长度 /m	松散物储量 /(10 ⁴ m ³)	沟坡坡度 /°	流域面积 /km ²	流域相对 高度/m
柿树沟	2 136	40.0	43	1.174	441
赤土店镇竹园村西二组	431	2.4	55	0.132	263
干江沟	2 700	181.4	50	6.523	700

对图 2 中 3 个地点取的 3 种土样分别采用水洗筛分法和移液管法联合分析其粒度成分, 对粒径 > 0.075 mm 的颗粒依次按粒径从小到大进行水洗筛分, 然后用移液管法分析粒径 < 0.075 mm 的粒度组成。土样的颗粒级配曲线如图 3 所示。

由图 3 可看出, 沟谷型土样中粒径 5 ~ 60 mm 颗粒所占比例明显大于其他土样, 3 种土样粒径 > 2 mm 的砾粒含量相差不大, 都达到了 50% ~ 55%, 按《岩土工程勘察规范》中的分类方法, 3 种土样均称为碎石土。沟谷型土样、坡面型土样、矿渣的粘粒含量分别为 18.43%、11.02%、2.25%。

泥石流源地土在天然工况下为天然含水率土体; 暴雨工况, 土体在地表径流作用下快速饱和, 土体中孔隙很快被雨水渗入, 可溶胶结物等未完全溶解, 土体强度会降低; 过后, 土体经过较长时间雨水的浸泡完全饱和, 土体强度可能还会降低, 此时, 土体还受径流的冲刷携带作用。因此, 可以通过不同工况土体抗剪强度变化来分析泥石流固体物源启动难易程度。根据现实工况, 设计土样含水量分别为初始含水率 (沟谷型土样: 6.1%, 坡面型土样: 15.3%, 矿渣: 3%)、快速饱和含水率、饱和后 3 h 三个等级来进行试验。

将制好的土样分别放入直剪仪剪切盒中, 在土样与剪切盒缝隙间用同种土样填充, 使剪切盒与土样



自然泥石流土样 (沟谷型、坡面型)、人为泥石流土样 (矿渣) (Natural debris flow (Gullies, Hillslopes) and artificial debris flow (Slag))

图 2 泥石流固体物源类型

Fig. 2 Types of debris flow's solid source materials

可以紧密接触。试验中保持剪切盒内壁光滑。采用不固结快剪, 剪切速率为 0.8 mm/min 。在试验过程中, 仪器系统会自动记录水平位移与剪切力的时程数据, 数据精度控制在 30 s/点 , 当剪切位移超过 13 mm 时停止试验。每组土样分别在 50 kPa 、 100 kPa 、 150 kPa 、 200 kPa 的垂直荷载下进行水平剪切。

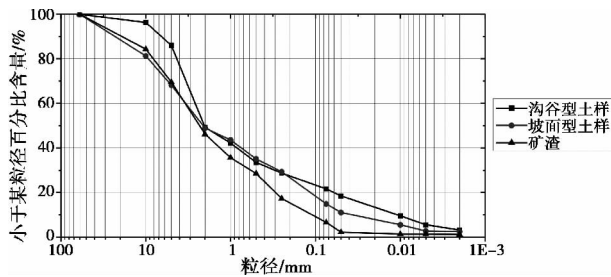


图3 土样颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve of soil samples

2 试验结果分析

2.1 抗剪强度参数 c 、 φ 与含水量的关系

土的抗剪强度主要是由内摩擦角 φ 与粘聚力 c 组成, 由 Mohr - Coulomb 强度准则

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中 τ 是抗剪强度, σ 为正应力。

从图4中粘聚力 - 含水情况关系曲线可以看出, 沟谷型与坡面型泥石流土样的粘聚力从天然含水量到快速饱和过程中减小到趋于0, 这是由于土颗粒在水的作用下, 颗粒之间的可溶胶结物被水溶解, 固化粘聚力减小; 同时, 土颗粒间的空隙被水填充, 颗粒间的引力也变小, 也是土样粘聚力减小的原因。矿渣粘粒含量很少, 胶结作用微弱, 其粘聚力趋近于

0。在饱水作用下变化不大。沟谷型、坡面型土样的粘聚力在饱水3 h后有微小的降低, 变化不大; 矿渣是无粘性土, 在饱水时水的作用下粘聚力暂时略微上升, 不能作为工程粘聚强度。

图4中内摩擦角 - 含水情况关系曲线显示的是内摩擦角在不同含水条件下的变化趋势。同样由于水的作用, 土样的胶结作用失效, 使土颗粒咬合摩擦力减小, 在剪切过程中, 滑动摩擦也减小。随着土样的饱水时间延长, 水在土颗粒间进行充分的润滑, 滑动摩擦力继续减小, 土样内摩擦角还会有小幅度的降低。因此可以看出, 在前期降雨比较充足, 栾川县泥石流源地土样在雨水的充分饱和的情况下, 土样的抗剪强度指标均降低, 源地土可能产生破坏, 并随着长时间充足雨水的浸泡, 源地土发生破坏被雨水带走的可能性增加。

2.2 Mohr - Coulomb 破坏包线与含水情况的关系

试验中, 土样受到的应力水平不是很高, Mohr - Coulomb 包线近似于一条直线, 图5分别是三种源地土样的抗剪强度在不同含水情况下的变化曲线。从图中可以直观的看出, 栾川县泥石流源地土3种土样抗剪强度随含水量变化规律。Mohr - Coulomb 破坏包线随含水量的变化趋势与抗剪强度指标随含水量的变化趋势一致。

栾川县“7·24”泥石流是在强降雨作用下发生的, 并且前期降雨持续了半月之久, 可见泥石流源地土长时间的饱水, 土体强度发生弱化。

2.3 水平剪切力和水平剪切位移的关系

图6~8为泥石流源地3种不同土样剪切应力与水平位移关系图。从图中可以看出, 天然含水状态, 除沟谷型泥石流土样在不同垂直压力下水平位移 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 出现了峰值, 其他两种土样均没有明显

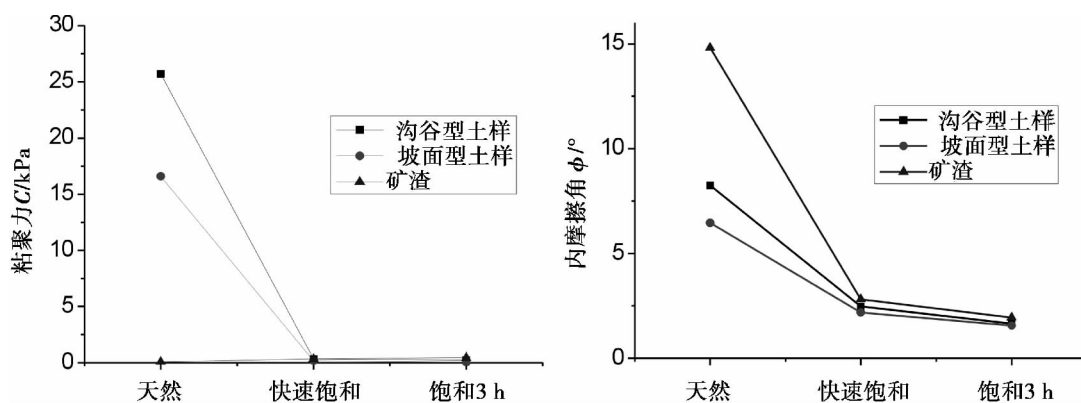


图4 c 、 φ 与含水量的关系

Fig. 4 Relationship between c , φ and water content

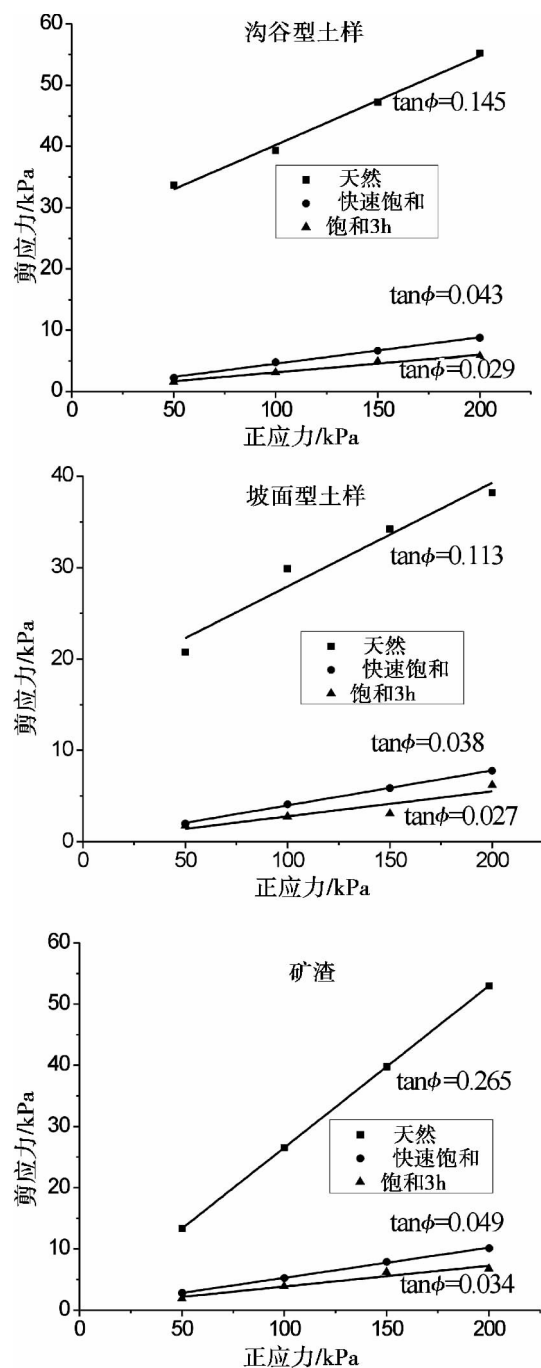


图5 泥石流土样抗剪强度与含水情况关系

Fig. 5 Relationship between shear strength and water content of debris flows samples

的峰值,呈应变硬化型。魏厚振、汪稔^[7]等对蒋家沟地区砾石土在不同的粗粒含量条件下剪应力随位移变化特征的分析中指出,由于试验方法是不固结快剪,垂直压力在土样剪切过程中对土样有压密作用及剪切面上颗粒重新排列,粗粒孔隙被小颗粒填充,导致剪应力随水平位移变大而上升,所以没有峰值。在土样快速饱和状态下,剪应力随水平位移的

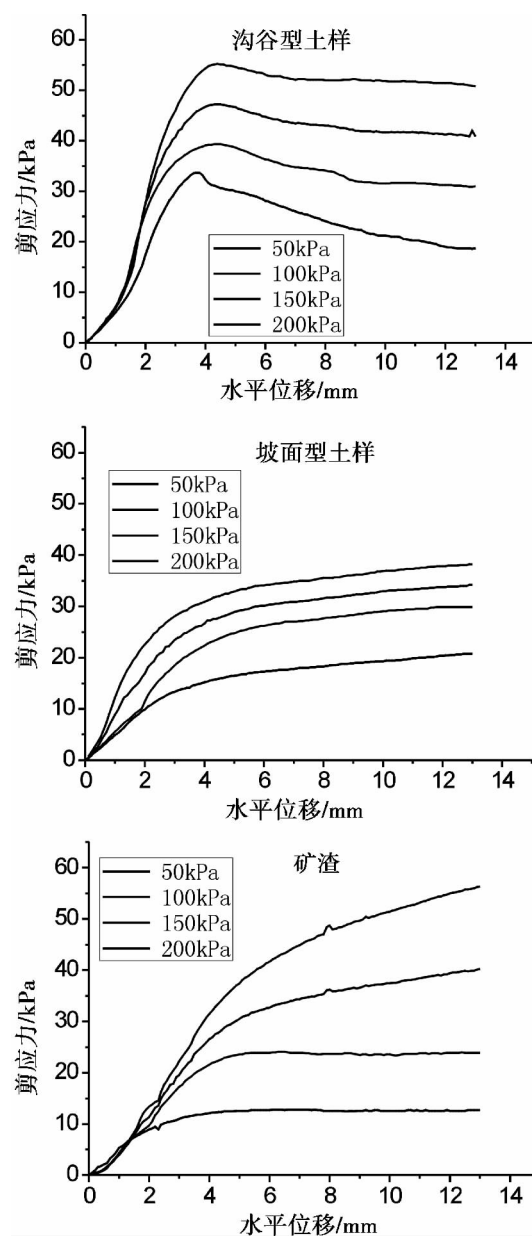


图6 天然含水率剪应力随水平位移的变化

Fig. 6 Relationship between shear stress and horizontal displacement of natural water content

增加,具有明显的波动性,并且相比天然含水状态在相同水平位移和垂直应力时剪应力下降幅度很大,剪应力降到 10 kPa 以内。本试验土样的粗粒含量都占较高的比例,根据徐文杰等^[9]对碎石土不同块石含量与抗剪强度关系方面的研究结果,可以认为,土样中大颗粒在剪切过程中由于颗粒之间相互咬合及滑动摩擦作用,使得大颗粒发生旋转和平移,从而使土样发生剪胀效应;剪切过程中一些大颗粒相互错位移动使相互咬合储存的能量突然释放导致剪应力突然下降,呈现应力的跳跃现象。同时,土颗粒排

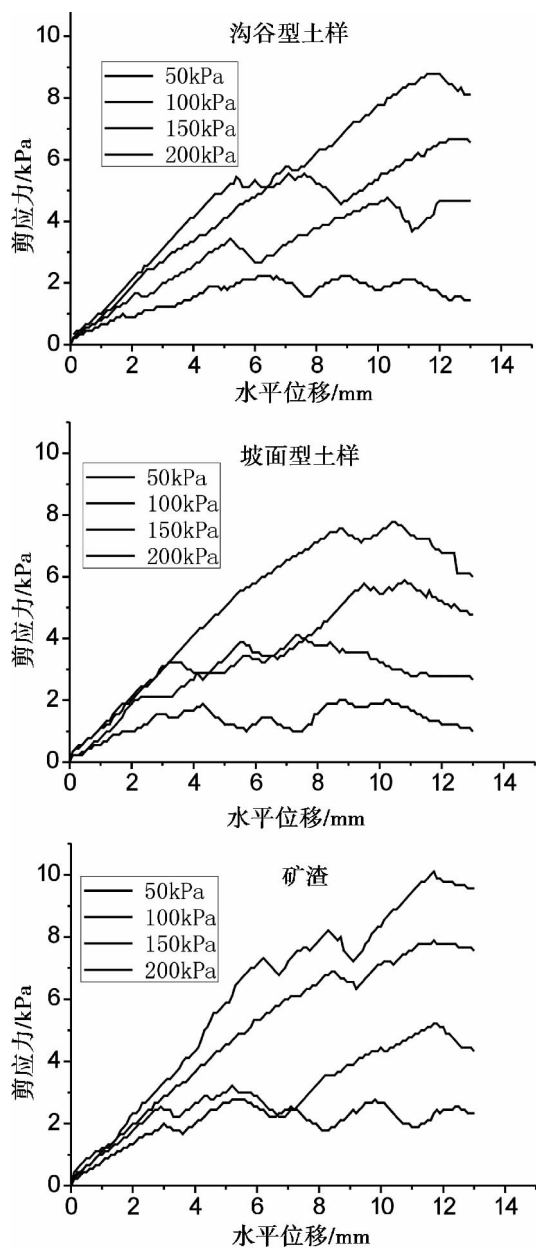


图7 快速饱和剪应力随水平位移的变化

Fig. 7 Relationship between shear stress and horizontal displacement of rapid saturation

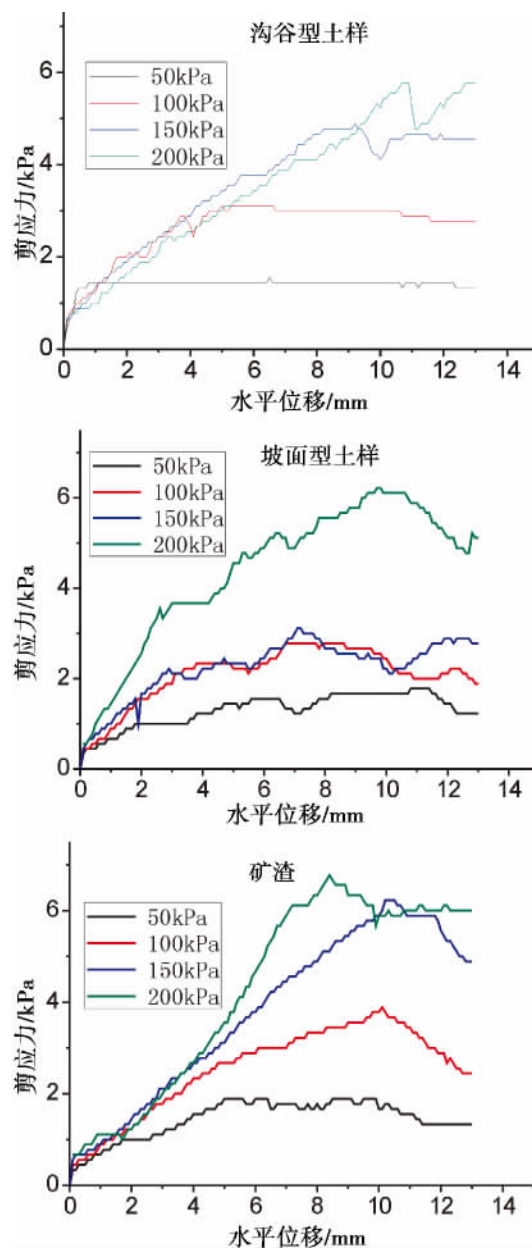


图8 饱和3 h 剪应力随水平位移的变化

Fig. 8 Relationship between shear stress and horizontal displacement of saturation for 3 hours

布调整之后大颗粒间的孔隙在垂直应力作用下会被压密,发生剪缩效应。土样处于快速饱和状态,含水量很高,具有流塑性,在垂直应力和剪切应力作用下,土样也会发生膨胀,部分细粒土会流向上下剪切盒之间的缝隙中,也是造成剪应力随水平位移变化曲线波动的原因^[10]。土样饱水3 h之后,剪应力与水平位移关系波动情况类似于快速饱和状态的变化,相同水平位移下剪应力变得更小。这说明土样饱水随着时间的增加,其抗剪强度是有小幅降低的,土样饱水时间越长,越不稳定,泥石流发生的可

能性越大。

上述分析充分说明栾川县降雨条件对泥石流源地土强度影响很大。据栾川县气象站资料,该地区全年降水的50%都集中在夏季,常有暴雨,6—9月的降雨量占全年64.3%,泥石流多在这一段时间内暴发。

匡乐红^[11]分析了区域暴雨泥石流的特点及预测预报方法,将暴雨条件下水动力模式泥石流按降雨入渗过程变化分为三个阶段。本试验中,土样在天然含水率到快速饱和之前,降雨强度小于土体入

渗率,降雨会都渗入源地土,地表无积水。如图6,土体强度均较高,主要是源地土表面松散堆积物受雨滴打击作用,反映第一阶段降雨入渗过程。随着降雨持续,当降雨强度不小于土体入渗率时,相当于本试验中的快速饱和状态,地表会出现积水,径流冲刷共同作用。此时土体表面松散物质主要受到雨滴打击和径流冲刷共同作用。如图7,土样的强度均降到了10 kPa以内,表层松散堆积物易被径流带走,反映第二阶段降雨入渗过程。此阶段雨滴的打击作用会逐渐减小,但径流的挟沙能力增强。降雨作用进一步加强时,本试验中的土样饱和3 h状态,坡面、沟谷在地表径流作用下对松散物质侵蚀加强。如图8中,土样强度进一步降低,侵蚀作用加强,降雨型泥石流就会形成,反映第三阶段降雨入渗过程。

综上所述,在降雨过程中,土体含水量逐渐增加,土体自重增加,同时土体抗剪强度降低。在同等条件下,土样抗剪强度降幅:矿渣>沟谷型土样>坡面型土样。土体的抗冲蚀作用主要体现在粘聚力的大小^[12],土体在径流加强时,由于矿渣粘聚力很小,最易被带走,其次是径流对沟谷土体的侵蚀带走,坡面土体在植被条件下,最后才被带走。所以若在相同条件下,栾川县泥石流源区固体物源启动先后顺序为:人为泥石流固体物质(矿渣)、沟谷松散固体堆积物、坡面松散固体堆积物。所以,建议加强对该地区降雨、土体含水量的监测,在必要的情况下,进行防、排水,对泥石流进行预测预报,避免泥石流发生造成巨大损失。

3 结论

本文通过对栾川县“7·24”泥石流源地土体进行大型直剪试验,得出以下几点结论:

1. 栾川县泥石流源地土体沟谷型和坡面型土样的粘聚力 c 从天然含水量到快速饱和状态是下降趋于0,矿渣粘粒含量太少,粘聚力接近0。3种土样的内摩擦角 φ 从天然含水量到快速饱和状态减小到 3° 左右的。在饱水3 h后, c 、 φ 都有略微降低。

2. 天然含水量状态,泥石流源地土除沟谷型土样外都没有明显峰值;饱和状态剪应力-水平位移曲线呈波动现象,由土样中粗颗粒多导致剪胀和剪缩交替发生,并在高含水条件下,土样膨胀流向剪切盒缝隙所致。饱水时间变长,同种土样相同垂直应力和水平位移情况下剪应力变小,土样抗剪强度降

低。

3. 试验分析了松散固体物质在不同含水情况下的力学性质,同时降雨是泥石流形成的激发条件和液体物质条件。在充足的前期降雨情况下,土样快速饱和,抗剪强度明显降低,同时地表径流的冲蚀作用和挟沙能力增强,为泥石流的启动提供了充足的物源条件。随着前期降雨持续,泥石流发生的可能性增加,物源区相同条件下固体物源启动先后顺序为:人为泥石流固体物质(矿渣)、沟谷松散固体堆积物、坡面松散固体堆积物。

4. 对栾川县这种固体物源条件的区域,建议加强降雨、土体含水情况的监测以及进行必要的防治措施,对泥石流的暴发预测预警。

参考文献(References)

- [1] Tang Huiming. The basis of engineering geology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 171-175 [唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 171-175]
- [2] Cui Peng, Yang Kun, Chen Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: taking the Jiangjia gully as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(01): 11-15 [崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(01): 11-15.]
- [3] Zhang Guoping, Xu Fengwen, Zhao Linna. Review of the study of rainfall-triggered debris flows [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(02): 81-86 [张国平, 许凤雯, 赵琳娜. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, 2010, 36(02): 81-86]
- [4] Liu Leiji, Zhu Pingyi, Zhang Jun. Relationship between the shear strength indices of φ and C and the moisture content Q [J]. Journal of Mountain Research, 1998, 16(02): 99-102 [刘雷激, 朱平一, 张军. 泥石流源地土抗剪强度指标 φ 、 C 值同含水量 Q 的关系[J]. 山地研究(现山地学报), 1998, 16(02): 99-102]
- [5] Fang Hua. Study on strength behaviour of debris flow source region soil in Wenjiagou ravine [G]//China Geological Association of Engineering Specialty Committee, China Geological Survey, National and Agency in Qinghai Province. 2011 National Engineering Geology Annual. 2011: 146-151 [方华. 文家沟泥石流源地土体直剪强度特征试验研究[G]//中国地质学会工程地质专业委员会, 中国地质调查局, 青海省国土厅. 2011年全国工程地质学术年会论文集. 2011: 146-151]
- [6] The First Geological Engineering Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, the First Geological Investigation Team of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, the Second Geological Survey Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Henan Academy of Land and Resources Sciences, Henan Institute of Geological Survey. Survey report of geological disaster emergency caused by “7.24” heavy rainfall in Luanchuan of Henan

- [R]. 2010. [河南省地矿局第一地质工程院, 河南省地矿局第一地质调查队, 河南省地矿局第二地质勘查院, 河南省国土资源科学研究院, 河南省地质调查院. 河南省栾川县“7. 24”特大暴雨引发地质灾害应急调查报告[R]. 2010.]
- [7] Wei Houzhen, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 48–51, 57 [魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(01): 48–51, 57]
- [8] Liu Xiaoli, Luo Jingtian, Min Hong, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test (II): proof-testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(02): 336–340 [刘小丽, 罗锦添, 闵弘, 等. 大型现场室内两用直剪仪研制(II): 试验测试[J]. 岩土力学, 2006, 27(02): 336–340]
- [9] Xu Wenjie, Hu Ruilin, Yue Zhongqi, 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(05): 996–1007 [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(05): 996–1007]
- [10] Wang Jiacheng. Experimental research on shear parameter of high cut slope gravel soil in Badong and its engineering application [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2011. [王家成. 巴东高切坡碎石土抗剪强度参数试验研究及工程应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.]
- [11] Kuang Lehong. Method for the forecasting of regional rainstorm-induced debris flow [D]. Changsha: Central South University, 2006. [匡乐红. 区域暴雨泥石流预测预报方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.]
- [12] Chen Zhongyi, Zhou Jingxing, Wang Hongjing. Soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. [陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.]

Large Scale Direct Shear Test of Debris Flow Source Soil in Luanchuan of Henan

XIE Kai, YU Hongming, PENG Zuwu, LI Ke, WANG Shuonan, CHEN Pengyu

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Most of debris flows are rainfall induced in Luanchuan of Henan, China. The rainfall has a greater impact on the strength of debris flow source region soil. The soil samples of natural debris flow (Gullies, Hillslopes) and artificial debris flow (Slag) in Luanchuan are tested with large scale direct shear apparatus under the condition of natural water content, rapid saturation and saturation for 3 hours. The relationship between c , φ , strength envelope and water content, and the relationship between shearing stress and horizontal displacement under the condition of different water content are obtained. The results show that, excepting the c of soil sample of slag with little clay tending to be 0, the φ of slag sample and other soil samples' c and φ are decreased under the condition of water content from nature to saturation. The curve of shear stress-horizontal displacement has a obvious fluctuation in saturated condition. After saturated for 3 hours, the shear strength of the soil samples has a slight reduction. A certain condition of antecedent precipitation contributes a lot to the occurrence of debris flow. With the adequate antecedent precipitation, debris flow source region soil saturate rapidly, and shear strength has a significant drop that the soil is damaged by the action of gravity and erosion of runoff, taken away by surface water flow. As the rain continues, the shear strength of soil further reduces, and the risk of debris flow occurrence increases. Finally, debris flow start-up with different types of solid source materials is comprehensive analyzed.

Key words: debris flow solid source materials; large scale direct shear test; water-saturated circumstances; shear strength