

崩滑土体坡面运动过程研究现状与展望

季宪军^{1,2,3} 欧国强^{1*} 杨顺^{1,3} 王钧^{1,3}

(1. 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. 南阳理工学院,河南 南阳 473004; 3. 中科院研究生院,北京 100049)

摘 要: 崩滑土体坡面运动包括刚性块体整体滑动、崩滑泥石流、崩滑破碎 3 种形态; 根据粗颗粒间介质差异,崩滑破碎运动可分为无粘碎屑崩滑运动、粘性碎屑崩滑运动; 根据运动过程不同形态,将崩滑破碎运动分为崩滑破碎、粗颗粒与泥浆混合运动、泥石流 3 个阶段。概述崩滑土体坡面运动过程调查实验研究现状; 分析块体滑动摩擦理论、流体理论、散粒体理论在崩滑土体坡面运动过程应用情况,指出块体滑动摩擦理论、流体理论在描述崩滑破碎运动过程的不足; 分析崩滑破碎后,间隙介质对粗颗粒运动的影响,指出目前散粒体理论描述崩滑土体坡面运动过程的不足,提出通过设定颗粒间的细观力学参数来再现崩滑土体复杂破碎运动过程的思路和重点研究的内容,为下一步研究提供依据。

关键词: 山地灾害; 崩滑土体; 运动过程; 粘滞性

中图分类号: P642.2 ,TU411.99

文献标识码: A

位于斜坡上的岩土体失稳后,根据其运动形式差异,分为崩塌、滑坡等,是山区常见灾种; 根据其物质组成差异可分为多类崩塌或滑坡^[1]。虽然崩塌、滑坡的发生机理、诱发因素等有所不同,但在运动过程中大多数崩滑土体都经历复杂的碰撞、破碎、掺混等过程。因此,本文针对破碎岩土体在坡面运动这一现象,对崩滑土体作如下定义: 将在重力和外动力条件下,沿着坡面向下运动,在运动过程中经破碎、掺混等复杂过程的破碎岩土体统称为崩滑土体。

崩滑土体运动形态多样,崩滑后有着不同的运动阶段,且与泥石流灾害有着密切联系。据统计,约 70% 泥石流灾害是由崩滑土体演化而成。崩滑灾害制约山区经济发展和城镇规划及道路工程建设,影响着国家发展战略实施。如崩滑灾害防治成为国家南水北调西线工程项目必须解决实际问题和能否顺

利实施的关键问题之一。国内外学者开展广泛研究,主要包括崩滑灾害调查实验研究和崩滑土体坡面运动过程理论研究。

1 崩滑土体调查实验研究

野外调查是进行实地的地质、地貌、水文气象、植被、人类活动等考察,并进行崩滑灾害野外要素的测量,调查发生的过程和堆积范围、堆积形态; 野外观测是在野外利用一定手段对崩滑土体运动过程进行观测,为运动过程理论研究和模型实验研究提供宝贵佐证资料; 实验研究主要包括室内外模型试验和室内土工实验,模型试验再现崩滑土体运动过程,并通过仪器监测孔隙水压力等变化过程; 室内土工实验测定不同状态下崩滑土体的物理力学参数,为

收稿日期(Received date): 2011 - 11 - 29; 改回日期(Accepted): 2012 - 03 - 06。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金: 南水北调西线一期工程区山地表层灾变过程与机理研究(No: 40830742) , 泥石流沟道侵蚀实验研究(No: 50979103) , 泥石流坝后坑侵蚀实验研究(No: 40901007) 。 [Process and mechanism study of the catastrophe on surface layer of mountain land of the first phase of the west project of the North Water Diversion Project (Subsidize No. 40830742); National Natural Science Funds: Experimental study of debris flow gully erosion (No: 50979103); Experimental study of erosion behind debris flow dam (No: 40901007) .]

作者简介(Biography): 季宪军(1974 -) ,男(汉族) ,河南信阳人,博士研究生,副教授。主要从事岩土工程的教学与理论研究。 [Ji Xianjun (1974 -) , Male (Ethnic Han Chinese) , Xinyang city, Henan Province, doctoral students, associate professor, engaged in research work of geotechnical engineering.] E - mail: jifeng988@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): Qu Guoqiang, E - mail: ougq@imde. an. cn

崩滑土体运动过程研究提供可信基础资料。

1.1 野外调查与监测

野外调查是崩滑灾害发生以后常用调查方法,为崩滑土体工程治理和灾害防治提供最直接灾害前后地形地貌数据。程思思等^[2]等应用 Cbers-2b 卫星数据对“5·12”汶川地震诱发唐家山至北川县城堵江河道滑坡进行调查;张雪峰等^[3]等对汶川地震大型单体滑坡进行遥感调查;李天池^[4]等实地考察四川省南江县白梅垭滑坡灾害,取得许多宝贵数据;谢洪^[5]等对四川省普格县标水岩沟滑坡型泥石流灾害进行实地考察并对其成因和形成过程做初步分析,此次灾害在形成沟道泥石流前,是典型的粗颗粒与粘性泥浆混合而成的粘性崩滑运动。

野外监测主要有崩滑土体启动过程形变观测、录像等,但主要是滑坡变形观测,为崩滑土体启动、运动等提供最直接监测数据和视频资料。高澜^[6]对碧口水库青崖岭滑坡观测;杨志刚^[7]对个旧卡房老熊洞冲山体滑坡观测。

1.2 室内土工实验

室内实验是获取崩滑土体力学性能参数最为可信的方法。通过崩滑土体野外调查取样,室内分析组成成份,力学性能参数等,为崩滑土体稳定性评判分析以及运动过程形态演变提供可靠参数。

根据崩滑土体组成特点,相关学者在野外调查基础上取样进行室内实验,以测定其相应的物理力学性质。Seed H B(1966)^[8]通过对饱和砂土循环加载液化过程研究发现大剪切变形常常发生在初始液化以后;Castro 等^[9]对饱和砂土液化和循环活动性进行研究。Yasuda 等^[10]基于室内试验提出反映砂土液化后应力应变特性双直线模型。Vaid 和 Thomas^[11]基于室内试验结果讨论砂土液化后不排水单调加载应力应变响应。Shamoto 和张建民等^[12]基于一系列室内试验结果探讨饱和砂土液化后大变形机理。戴福初^[13-14]在 GDS 三轴测试系统上开展低围压下偏压剪切试验。刘汉龙^[15]基于砂土液化后大变形试验结果提出应力应变关系双曲线模型;张建民^[16-17]基于大量试验结果,总结饱和砂土液化后大变形规律,给出机理性解释;王刚^[18]基于该机理建立液化后大变形弹塑性循环本构方程。邢爱国等^[19-20]在不同试验条件下对玄武岩试件进行高速摩擦试验,根据流体动力学机理对大型高速滑坡启程过程进行研究。胡广韬,程谦恭等^[21-22]以岩质边坡崩塌为研究对象,首次推导出滑体“启程弹冲

速度”计算公式。

相关学者开发或改进实验设备,用于分析崩滑土体动力学特性。Sassa(1992)^[23]开发一套实验设备,并成功应用于1995年神户地震诱发Nikawa landslide 灾害分析(Sassa 1996)^[24]。Sassa(2000^[25],2004^[26])设计不排水加载环剪试验仪(DPRI-5,6and7)。Tokimatsu 等(1986)^[27]将电气式闭环试验系统与一台常规循环三轴仪联接使用,消除乳胶膜嵌入对饱和粒状土不排水剪切强度确定不利影响,进行常体积液化实验。实验设备的开发或改进为崩滑土体运动过程理论研究提供更接近灾害实况参数。

1.3 室内外模型实验

国内外相关学者开展了崩滑土体启动和崩滑土体流动化的室外实验研究。实验结果再现了崩滑土体启动或运动过程中某些现象。

国外,Oka H(1972)^[28]开展500 m³崩滑土体运动模型实验;Yagi N 等(1985)^[29]开展因降雨诱发土体斜坡失稳启动野外实验;Yamaguchi I 等(1989)^[30]在日本静冈市进行崩滑土体启动和流动实验;Harp EL 等(1990)^[31]进行边坡失稳孔隙水压力监测实验;Hirota Ochiai 等(2004)^[32]在日本茨城县筑波市小井胡国家森林公园,开展人工降雨条件下土体失稳启动、运动过程相关参数监测实验。

国内,李永益^[33]以马鞍山滑坡-泥石流为原型,设计模型槽实验;徐永年^[34-35]根据崩塌源地统计资料配制实验用砂进行崩滑土体流动化实验;陈晓清等^[36]在滑坡启动和转化为泥石流研究中,开展野外现场人工降雨实验;黄雨等^[37]进行砂土流动模型试验,分析砂土在不同倾角下流动构型特征。

由于崩滑土体的特殊性和实验仪器设备条件限制,实验结果与崩滑土体实际性质上存在着差异,例如目前土动三轴实验,用剔除较大粒径颗粒土体试样;重塑试样与原状土试样在力学性质上存在着不同;模型实验土样与崩滑土体原始状态存在着差异等等。但总的来说,室内外实验为崩滑土体运动过程研究提供可信度较高的物理力学参数。

2 崩滑土体运动过程理论研究

崩滑土体组成复杂,运动形态多样,运动过程存在不同阶段,使崩滑土体运动过程有着较大差异,主要表现为:

1. 崩滑土体坡面运动形态多样。主要有崩滑整体块状运动; 崩滑-泥流运动; 崩滑破碎运动。整体块状运动主要是由结构完整岩体沿着软弱层面岩层滑动和结构性好土体沿破坏面整体运动。整个运动过程中保持较好的整体性^[38]。崩滑-泥流灾害多发生在土质组成相对均匀地区, 如黄土地区泥流^[39]。崩滑破碎运动主要包括两类: 无粘碎屑崩滑运动和粘性碎屑崩滑运动。无粘碎屑崩滑运动主要是在地震作用下, 坡积土或破碎岩体失稳沿着坡面运动, 因碰撞等使岩石块体从岩体分离, 形成碎屑流^[40-41]。汶川地震诱发大量崩滑灾害, 崩滑体沿着坡面运动, 经碰撞-破碎形成大量崩滑碎屑流(图 1)。粘性碎屑崩滑运动主要是因长期降雨或暴雨条件下, 坡积物或破碎岩体发生崩滑, 在坡面运动过程中破碎, 细颗粒土体与雨水混合形成泥浆, 粗颗粒与泥浆混合沿坡面运动, 最终形成泥石流或于坡面堆积^[5, 42]。如 2008-11-02, 云南省楚雄彝族自治州楚雄市发生特大泥石流灾害(图 2)。

2. 崩滑土体有着不同运动阶段。对于粗细颗粒组成的坡积物或破碎岩块和软弱结构面组成的岩体,



图 1 “5.12”地震诱发的罗圈湾破碎岩土体崩滑: 无粘崩滑碎屑流(2011-07-28)

Fig.1 Broken rock-soil slump induced by “5.12” earthquake located at Luoquanwan, Sichuan: No viscous slump fragment flow (Taken this picture in 2011-07-28)



图 2 云南楚雄新华村粘滞性崩滑流动 (照片由柳金峰、黄江成提供 2008-11-07)

Fig.2 Viscous slump flow located at Xinhua thorp of Chuxiong city, Yunnan Province (Liujinfeng Huangjiangcheng provided this picture 2008-11-07)

在暴雨或持续降雨条件下呈整体块状失稳; 失稳后, 因挤压、剪切等作用破碎, 形成粗颗粒与细粒土组成的碎屑物质; 在运动过程中, 细粒土与水快速混合成泥浆, 泥浆与粗颗粒组成的混合体沿坡面运动; 在重力作用下, 粗颗粒与泥浆混合体运动至沟道, 经沟道水混合、稀释形成泥石流。所以, 其运动过程可划分为以下几个阶段: 块状岩土体崩滑碰撞破碎(阶段 1)~粗颗粒与泥浆混合运动(阶段 2)~坡面或沟道堆积或形成沟道泥石流(阶段 3)(图 3 所示)

崩滑土体多样运动形态和不同运动阶段, 使得描述崩滑土体坡面运动过程理论有较大不同, 主要是基于块体滑动摩擦理论、流体理论和散粒体理论。

2.1 块体滑动摩擦理论

块体滑动摩擦理论 根据假定, 分为不可变形块体运动和可变形块体运动两种。

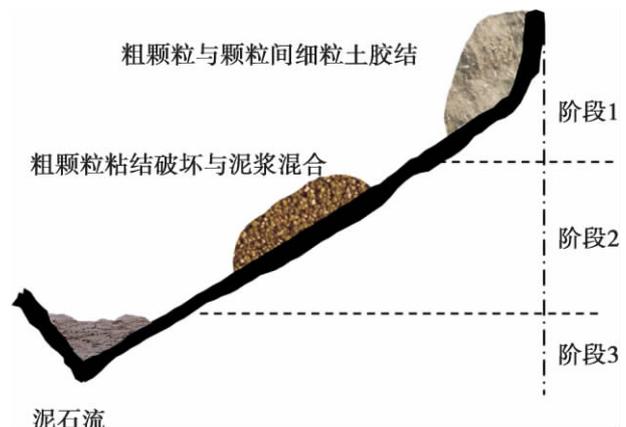


图 3 粘滞性崩滑土体坡面运动过程示意图

Fig.3 The sketch map of motion process of viscous slump rock-soil body along slope

不可变形块体: 假定崩滑土体沿着直线滑动面或曲线滑动面, 在力的作用下向下运动。根据能量守恒建立运动方程。在运动过程中, 崩滑土体保持刚性体特征。Scheidegger A E^[43] 首先根据势能动能转化原理计算滑体速度, 提出滑坡速度预测问题。潘家铮 (1980)^[44] 提出滑坡速度计算公式; 董孝璧等^[45] 根据块体摩擦理论提出复杂条件下滑坡运动计算公式。

可变形块体运动: 将崩滑土体分成若干条块体, 其运动看作是一种连续可变块体运动形式, 运动过程是变形能积累和释放过程。廖小平等^[46] 提出用冲击性弹性碰撞和连续可变块体运动理论来分析高速滑坡滑速与滑程。刘忠玉^[47] 对利用该理论对洒勒山滑坡运动过程进行数值模拟。

2.2 流体理论

假定崩滑土体为连续介质, 具有流体一样形变的特性, 运用流体理论来描述崩滑土体的运动过程。根据描述对象组成, 流体理论分为单项流理论和耦合流理论。

单相流理论: 将崩滑土体看作是单一介质流体, 运动过程中满足质量守恒、动量守恒、能量守恒。胡厚田, 刘涌江等^[48-49] 以云南头寨沟滑坡为例, 运用流体动力学理论, 对高速远程滑坡进行系统研究, 初步构建大型高速远程滑坡流体动力学理论研究体系。Savage S B, Hutter K^[50] 运用流体理论建立碎屑物质坡面无量纲运动方程。鲁晓兵等^[51] 运用以上运动方程对碎屑流沿坡面运动数值模拟。

流固耦合理论由 Biot (1941、1955)^[52-53] 提出, 用于线弹性材料。Zienkiewicz 等 (1980、1990a、1990b、2000)^[54-57] 将这项成果进一步发展。Zienkiewicz 等 (1984)^[58] 应用该理论分析非线性材料和大变形问题。Hutchinson (1986)^[59] 提出滑动固结模型来预测滑坡运动距离。M. Pastor 等 (2008)^[60], 将流固耦合理论用来描述崩滑土体运动过程, 根据质量守恒和动量守恒分别建立颗粒和颗粒间流体运动方程。

2.3 散粒体理论

1979年 Cundall 与 Strack^[61] 提出了适用于颗粒材料的离散单元方案。20世纪80年代, 王泳嘉^[62] 将离散单元法引入国内, 已被广泛应用于岩土工程。

散粒体理论假定崩滑土体是由圆球或块体颗粒组成, 运用牛顿第二定律, 再现崩滑土体运动过程。运动过程中, 允许颗粒或块体滑移、分离、滚动。近

年来, 国内相关学者运用散粒体理论对岩土体崩滑运动过程进行模拟。沈宝堂等^[63] 用模型试验在边坡失稳瞬间连续拍摄相片与离散单元法计算结果对照, 结果表明离散单元法数值模拟可以代替昂贵相似材料模型试验; 王涛等^[64] 采用颗粒流方法对矿岩自然崩落规律进行数值模拟计算; 郑智能等^[65] 介绍边坡落石灾害颗粒流模拟方法; 梁鑫等^[66] 进行土石碎屑体稳定性离散元数值分析, 对土石碎屑体在外界营力作用下稳定性进行数值计算。

3 崩滑土体运动过程理论研究现状讨论

目前, 对崩滑土体的研究大多数集中在崩滑土体实验研究, 通过各种方法获取崩滑土体动态、静态等各方面参数, 为崩滑土体运动过程理论分析提供必要参数。因崩滑土体运动形式多样和运动阶段不同, 只有崩滑体满足假定条件, 计算结果才可能与实际相一致。

1. 块体摩擦理论假定崩滑土体运动过程中只沿着固定滑动面运动, 崩滑土体在运动过程中是刚体, 从能量转化方面计算崩滑土体在某一时段速度及最终运动距离, 忽略崩滑土体在运动过程中解体、形变、碰撞等, 这对坚硬岩块沿着软弱节理面或破碎带运动过程描述是准确的。但用于描述众多存在破碎、大形变崩滑土体运动过程存与实际存在较大差异。

2. 流体理论模型把崩滑土体处理为连续粘性流体, 利用 NS 方程来描述崩滑运动, 方程可通过通用程序来求解。尽管模型千差万别, 但其基本的控制方程都是连续方程、动量方程和能量守恒方程。流体理论基本假定与组成均匀黄土地区崩滑泥流或火山灰泥流的运动过程基本吻合。应用流体理论能再现此类崩滑灾害运动过程。从地形尺度上, 纵多崩滑灾害, 由粗细颗粒土混合物或破碎岩体构成, 将其看作是具有一定粘性的流体, 运用流体理论来描述其运动过程是可行的、合理的。但从土体失稳到堆积要经历不同阶段, 力学性质存在较大差异, 用同一参数描述整个过程是不恰当的。另外, 根据崩滑土体的物质组成, 以颗粒尺度来看, 崩滑土体在运动过程中, 粗颗粒间发生碰撞、破碎、粘连; 粗颗粒与间隙介质在运动过程中相互作用。流体理论不能描述运动过程中不容忽视的现象。

综上所述, 块体滑动理论和流体理论都是假定

崩滑土体在运动过程中具备某种运动形态的前提下建立的运动方程,在宏观尺度上,两者都能较好的描述满足假定条件下的崩滑土体运动过程。因崩滑土体的在运动过程中涉及运动形态的变化,要揭示这一复杂过程,块体摩擦理论、流体理论,甚至是近年来复杂的流固耦合理论,都无法描述崩滑土体复杂运动过程。

3. 散粒体理论是用来研究松散颗粒物质运动过程。无需假定描述对象的属性(刚体或流体),只需通过设定颗粒或块体间的接触模型及其参数,就可再现其运动过程的不同现象。

岩土体是一种高度非连续材料,应用散粒体理论对崩滑土体运动过程进行探讨是一个很好地选择。近年来,国内相关学者运用散粒体理论对岩土体崩滑进行运动过程研究。主要是基于离散单元法介绍和用于无粘颗粒运动过程模拟。相关学者认为崩滑土体都是由无粘颗粒组成,崩滑土体运动过程中颗粒间相互碰撞,在外力作用下运移。这对于地震诱发山体崩滑运动(如图 1 所示)或是完全由粗砂或碎石组成崩滑体(如流砂),假定粗颗粒或块石间无粘作用符合实际的。但作为常见的、在我国乃至世界广泛分布的崩滑灾害,物质组成、结构和构造等具有多样性。对于破碎岩土体,在崩滑运动过程中,粘性间隙介质对粗颗粒粘合作用是不能忽略的,对其运动形态有着重要影响。

崩滑土体坡面运动形态取决于粘结强度。颗粒间作用力超过颗粒间粘结强度,颗粒或块体从崩滑

土体母体分离,这一过程表现为崩滑土体运动过程中破碎现象;颗粒间粘结强度高,崩滑土体在运动过程中表现为块体沿滑动面摩擦滑动;颗粒或块体间粘结全部破坏,崩滑土体运动过程表现为碎屑流;破碎粗颗粒或块体与泥浆相互作用沿坡面运动,崩滑土体在坡面运动过程中则表现为粘性碎屑流动,泥浆粘滞性是影响其运动过程最重要因素。所以,不同间隙介质使崩滑土体展现不同运动形态和不同运动阶段有着不同作用机理。

崩滑土体运动过程理论方法比较见表 1。

4 进一步研究展望

由于自然界崩滑土体及其物理实验材料特性复杂,包含粘性颗粒和无粘颗粒,而现有理论研究(块体理论、流体理论和散粒体理论)对材料特性的概化过多,主要针对无粘颗粒,难以再现实际崩滑土体运动过程。因此,应重点考虑粘性颗粒及其与水混合后形成的粘性介质的作用,开展崩滑土体坡面运动过程理论研究。

研究的基本思路:根据崩滑土体内部物质组成和实验结果,从细观角度出发,运用散粒体理论离散单元法,以 PFC 为平台,分析粘性间隙介质与崩滑土体粗颗粒或岩石块体作用机理,探讨颗粒特征、坡面特征对运动形态和速度时空分布的影响。重点要探讨以下几点:

1. 根据实际崩滑灾害运动过程,划分不同运动

表 1 崩滑土体运动过程理论方法比较

Table 1 Landslip-collapse soil moving process along slope of the theoretical methods

理论	基本原理	基本假定	优点	不足
块体理论	整体块体运动、摩擦耗能	崩滑土体是刚体;沿固定滑动面运动。	方程简单,求解方便,手工计算即可。	不能描述崩滑土体运动过程的破碎和大变形。
流体理论	质量守恒 动量守恒	崩滑土体是具有流动性的连续介质。	设定运动方程参数和边界条件,通过程序化求解模拟运动过程。	方程较复杂,边界条件难确定,崩滑土体运动过程不具有连续性,不满足连续性假定;不能描述崩滑土体运动过程中的破碎、碰撞等现象。
散粒体理论	力-形变 力-位移 强度准则	崩滑土体是由颗粒组成的集合体。	无需假定崩滑土体整体特性,从细观角度,根据崩滑土体内部组成重塑崩滑土体试样;可描述崩滑土体内每个颗粒运动过程;通过设定颗粒间粘结强度,重塑崩滑土体状态;根据强度准则可再现崩滑土体运动过程中破碎、碰撞、不连续变形等;计算机硬件允许条件下,可再现任意规模崩滑土体运动过程。	难以重塑崩滑土体复杂颗粒形状;细观参数标定困难;数值仿真对计算机计算能力要求较高,常用计算机难以满足由大量颗粒组成的崩滑土体运动过程仿真要求。

阶段(如粗细颗粒混合体运动、粗颗粒与泥浆混合运动和泥石流);

2. 不同阶段粗颗粒与粘性间隙介质的作用机理;

3. 探讨粘性间隙介质粘性与粗颗粒间粘结强度的关系;进而探讨粘性间隙介质粘性对崩滑土体运动形态、速度等全过程的影响。

参考文献(References)

- [1] Chang Shibiao, Zhang Sumin. Handbook of engineering geology [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 2 [常士鏢, 张苏民. 工程地质手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 2]
- [2] Cheng Sisi, Gan Fuping, Liu Qinfu et al. The application of CBERS-02B Data to the investigation of beichuan landslide caused by the 5·12 strong earthquake: a case study of the landslide along the blocking river course from Tangjiashan to beichuan county seat [J]. Remote Sensing for Land & Resources. 2009, (1): 93-96 [程思思, 甘甫平, 刘钦甫, 等. Cbers-2b 星数据在“5·12”地震滑坡调查中的应用——以唐家山至北川县城堵江河道滑坡为例 [J]. 国土资源遥感, 2009, (1): 93-96]
- [3] Zhang Xuefeng, He Zhengwei, Xue Dongjian et al. Remote sensing survey and dangerous evaluate of large-scale morph on landslide caused by Whenchuan earthquake. [J] Remote Sensing Information. 2011(03): 50-54 [张雪峰, 何政伟, 薛东剑, 等. 汶川地震大型单体滑坡遥感调查与危险性评价 [J]. 遥感信息, 2011, (3): 50-54]
- [4] Li Tianchi, Zhang Shucheng, Kang Zhicheng. Debris flow of landslide type [C]//Collected papers of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences(No. 4). Beijing: Science Press, 1984: 171-177 [李天池, 章书成, 康志成. 滑坡型泥石流 [C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第四号). 北京: 科学出版社, 1984: 171-177]
- [5] Xie Hong, Wang Chenghua, Lin Lixiang. Landslide-induced debris flow disaster and its characteristics in Biaoshuiyan Gully [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(3): 20-27 [谢洪, 王成华, 林立相. 标水岩沟滑坡型泥石流灾害及特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 20-27]
- [6] Gao Lan. Observation Analysis of Qinyaling landslide of Bikou reservoir [J]. Large Dam and Safety, 1997, (1): 22-26+36 [高澜. 碧口水库青崖岭滑坡观测分析 [J]. 大坝与安全, 1997, (1): 22-26, 36]
- [7] Yang Zhigang. Practice of observation and forecast of Gejiukafang-laixiongdongchong landslide [J]. China Mine Engineering, 2004, (01): 9-12 [杨志刚. 个旧卡房老熊洞冲山体滑坡观测预报实践 [J]. 中国矿山工程, 2004, (1): 9-12]
- [8] Seed H B, Lee K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading [J]. J Soil Mech and Foundation Eng Division, ASCE, 1966, 92(SM6): 105-134
- [9] Castro G. liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. Geotech Eng, Division ASCE, 1975, 101(6): 551-569
- [10] Yasuda S, Yoshida N, Masuda T et al. Stress-strain relationship of liquefaction sands [C]// Earthquake Geotech Eng. Rotterdam: Balkema, 1995: 11-816
- [11] Vaid Y P, Thomas J. Liquefaction and post liquefaction behavior of sand [J]. J Geotech Eng, ASCE, 121(2): 163-173
- [12] Shamoto Y, Zhang Jianmin, Goto S. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sands [J]. Soils and Foundations, 1997, 37(2): 71-80
- [13] Fuchu Dai, C F Lee, Sijing Wang et al. Stress-strain behaviour of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rain-fall-induced fill slope failures [J]. Engineering Geology, 1999, 53: 359-370
- [14] Fuchu Dai, C F Lee, Wang Sijing. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hongkong [J]. Engineering Geology, 1991, 51: 279-290
- [15] Liu Hanlong, Zhou Yundong, Gao Yufeng. Study on the behavior of large ground displacement of sand due to seismic liquefaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 142-146 [刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 142-146]
- [16] Zhang Jianmin, Wang Gang. A constitutive model for evaluating small to large cyclic strains of saturated sand during liquefaction process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 546-552 [张建民, 王刚. 评价饱和砂土液化过程中小应变到大应变的本构方程 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 546-552]
- [17] Zhang Jianmin, Wang Gang. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 835-840 [张建民, 王刚. 砂土液化后大变形的机理 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 835-840]
- [18] Wang Gang, Zhang Jianmin. A cyclic elastic-plastic constitutive model for evaluating large liquefaction-induced deformation of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 51-59 [王刚, 张建民. 砂土液化后大变形的弹塑性循环本构模型 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 51-59]
- [19] Xing Aiguo, Hu Houtian, Yang Ming. Testing study on friction characteristic of large-scale and high-speed landslide during sliding [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 522-525 [邢爱国, 胡厚田, 杨明. 大型高速滑坡滑动过程中摩擦特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 522-525]
- [20] Xing Aiguo, Gao Guangyun. Study on hydrodynamics mechanism of large highspeed landslide in the set-out stage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, (04): 607-613 [邢爱国, 高陈胡. 大型高速滑坡启程流体动力学机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (04): 607-613]
- [21] Hu Guangtao. Landslide dynamics. [M]. Beijing: Geology Press, 1995 [胡广韬. 滑坡动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1995]
- [22] Cheng Qiangong, Hu Houtian. Dynamical analysis on the whole process of acute colliding high speed landslide [M]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, (4): 19-23 [程谦恭, 胡厚田. 剧冲式高速滑坡全程动力学机理分析 [J]. 水文地质工程地质, 1999, (4): 19-23]
- [23] Sassa K. Access to the dynamics of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring-shear apparatus (keynote paper) [C]//6th International Symposium on Landslides, "Landslides". A A Balkema, Christchurch, 1992: 1919-1937
- [24] Sassa K. Prediction of earthquake induced landslides [C]//Pro-

- ceedings of 7th International Symposium on Landslides, A A Balke-ma, Trondheim, 17-21 June, 1996, 1: 115-132
- [25] Sassa K. Mechanism of flows in granular soils [C] // Proceedings of the International Conference of Geotechnical and Geological Engineering, GEOENG2000, Melbourne, 1 2000: 1671-1702
- [26] Sassa K, Fukuoka H, Wang G, et al. Untrained dynamic loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics [J]. Landslides 2004, 1(1): 7-19
- [27] Tokimatsu K, Nakamura K. A liquefaction test without membrane penetration effects [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 127-138
- [28] Oka H. Impacts by the "artificial landslide": reexamine the rage of nature [J]. Kagaku Asahi, January issue, 1972: 152-153 (In Japanese)
- [29] Yagi N, Yatabe R, Enoki A. Laboratory and field experiments on prediction method of occurring time of slope failure due to rainfall [J]. Landslide (J Jpn Landslide Soc), 1985, 22(2): 1-7 (In Japanese)
- [30] Yamaguchi I, Nishio K, Kawabe H, et al. Initiation and fluidization of an artificial landslide—Field experiment in Yui, Shizuoka Prefecture, Japan [J]. Shinrin Kosoku (Areal Survey), 1989: 158: 3-9 (In Japanese)
- [31] Harp E L, Wells W G, Sarmiento J G. Pore pressure response during failure in soils [J]. Geol Soc Am Bull, 1990, 102: 428-438
- [32] Kyoji Sassa. Progress in landslide science [M]. Springer, 2005: 217-226
- [33] Li Yongyi. Study of transformation mechanism and motion character between landslide and debris flow [C] // Paper selection of landslide. Chengdu: Sichuan Science Technology Press, 1989: 69-76 [李永益. 滑坡、泥石流转化机理及其运动特征的研究 [C] // 滑坡论文选集. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 69-76]
- [34] Xu Yongnian, Kuang Shangfu. Experimental study on flow mechanism of avalanche soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 10(10): 87-90 [徐永年, 匡尚富. 崩塌土流动化机理的实验研究 [J]. 水利学报, 2002, 10(10): 87-90]
- [35] Xu Yongnian. Study on flow mechanism for avalanche soils and scour and silting characteristics of debris flows [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2001 [徐永年. 崩塌土流动化机理及泥石流冲淤特性的实验研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2001]
- [36] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Feng Zili, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 1(1): 106-116 [陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 1(1): 106-116]
- [37] Huang Yu, Li Guanghui, Zheng Hu. Model tests on sand flow [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 1(1): 65-69 [黄雨, 李光辉, 郝虎. 砂土流滑运动的模型试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 1(1): 65-69]
- [38] Wu Caixia, Xu Ling, Dai Fuchu. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 6(6): 1767-1773 [武彩霞, 许领, 戴福初, 等. 黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究. 岩土力学, 2011, 6(6): 1767-1773]
- [39] Lei Xiangyi, Huang Yuhua, Wang Wei. Disasters of mud flow and human activities on the Loss Plateau of China [J]. Geology of Shanxi, 2006, 18(1): 28-39 [雷祥义, 黄玉华, 王卫. 黄土高原的泥石流灾害与人类活动 [J]. 陕西地质, 2006, 18(1): 28-39]
- [40] He Keqiang. Debris flow—a new geological disaster. [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1991, 18(5): 21-23 [贺可强. 一种新形式的地质灾害——碎屑流 [J]. 水文地质工程地质, 1991, 18(5): 21-23]
- [41] Yin Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 12(12): 433-444 [殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 12: 433-444]
- [42] Ma Jiande, Xiang Yangqiu. Geological disasters of collapse-debris flows of Matoushangou in Lingyuan City [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(4): 354-357 [马建德, 相阳秋. 凌源市马头山沟崩塌-泥石流地质灾害特征 [J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(4): 354-357]
- [43] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mech D C, 1973, 1(5): 231-236
- [44] Pan Jiazheng. Skid resistance stabilization of building and analysis of landslide [M]. Beijing: Hydraulic Press, 1981 [潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 [M]. 北京: 水利出版社, 1981]
- [45] Dong Xiaobi, Wang Lansheng. Kinematic features of landslide after slope failure [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(1): 31-37 [董孝璧, 王兰生. 斜坡破坏后滑体的运动学研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 31-37]
- [46] Liao Xiaoping, Xu Junling, Zheng Jing. Mechanical analysis and movement simulation for high speed and long distance landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(2): 26-30 [廖小平, 徐峻龄, 郑静. 高速远程滑坡的动力分析和运动模拟 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 4(2): 26-30]
- [47] Liu Zhongyu, Ma Chongwu. Kinematic block model of long run-out prediction for high-speed landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 742-746 [刘忠玉, 马崇武. 高速远程滑坡预测的块体运动模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 742-746]
- [48] Hu Houtian, Liu Yongjiang, Xing Aiguo, et al. Hydrodynamics theory study of high-speed long distance landslide [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003 [胡厚田, 刘涌江, 邢爱国, 等. 高速远程滑坡流体动力学理论的研究 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003]
- [49] Liu Yongjiang. Study on fluidifying theory of large highspeed rockslide [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003 [刘涌江. 大型高速岩质滑坡流体化理论研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2003]
- [50] Savage S B, Hutter K. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout (Part 1): analysis [J]. ACTA Mechanica, 1991, 86: 201-223
- [51] Lu Xiaobing, Zhang Xuhui, Cui Peng, et al. Numerical simulation of elastic grain flow along a slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Suppl. 2): 524-52 [鲁晓兵, 张旭辉, 崔鹏. 碎屑流沿坡面运动的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 524-52]
- [52] Biot, M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. J.

- Appl. Phys. ,1941 (12) : 155 – 164
- [53] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. J. Appl Phys. 1955 (26) : 182 – 185
- [54] Zienkiewicz O C ,Chang C T ,Bettess P. Drained undrained consolidating dynamic behaviour assumptions in soils [J]. Geotechnique ,1980 (30) : 385 – 395
- [55] Zienkiewicz O C Chan A H C Pastor et al. Static and dynamic behaviour of soils: a rational approach to quantitative solutions. I. Fully saturated problems [J]. Proc. R. Soc. Lond. ,1990a , 429: 285 – 309
- [56] Zienkiewicz O C Xie Y M Schrefler et al. Static and dynamic behaviour of soils: a rational approach to quantitative solutions. II. Semi-saturated problems [J]. Proc. R. Soc. Lond. ,1990b ,429: 311 – 321
- [57] Zienkiewicz O C ,Taylor R L. The finite element method[M]. 5th Edition ,Butterworth – Heinemann 2000
- [58] Zienkiewicz O C ,Shimi T. Dynamic behaviour of saturated porous media: the generalised Biot formulation and its numerical solution [J]. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech ,1984 (8) : 71 – 96
- [59] Hutchinson J N. A sliding-consolidation model for flow slides [J]. Can. Geotech. J. ,1986 23: 115 – 126
- [60] M Pastor ,J A Fernández Merodo. Mathematical ,Constitutive and Numerical Modelling of catastrophic landslides and related phenomena [J]. Rock Mech. Rock Engng. 2008) 41(1) : 85 – 132
- [61] Cundall P A ,Straek O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique ,1979 (29) : 47 – 65
- [62] Wang Yongjia. Discrete element method—a numerical method apply to joint rock mechanics analysis [C] // Collected Papers of the First Seminar of Rock Mechanics Numerical Calculation and Model Test ,1986: 32 – 37 [王泳嘉. 离散单元法一种适用于节理岩石力学分析的数值方法 [C] // 第一届全国岩石力学数值计算及模型试验讨论会论文集 ,1986: 32 – 37]
- [63] Shen Baotang ,Wang Yongjia. Discrete Element Method for slope failure mechanism [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science ,1989 ,10(4) : 349 – 354 [沈宝堂 ,王泳嘉. 边坡破坏机制的离散单元法研究 [J]. 东北大学学报: 自然科学版 ,1989 , 10(4) : 349 – 354]
- [64] Wang Tao ,Sheng Qian ,Xiong Jiang. Research on numerical simulation of natural caving method based on particle flow method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2007 ,26 (Suppl. 2) : 4202 – 4207 [王涛 ,盛谦 ,熊将. 基于颗粒流方法自然崩落法数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2007 ,26 (增刊 2) : 4202 – 4207]
- [65] Zheng Zhineng ,Zhang Yongxing. Visual simulation of rock-fall of slope based on particle flow theory [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2008 ,19(3) : 46 – 49 [郑智能 ,张永兴. 边坡落石灾害的颗粒流模拟方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报 ,2008 ,19(3) : 46 – 49]
- [66] Liang Xin ,Zheng Lining. Stability UDEC numerical analysis of soil-rock elastic body [J]. Railway Engineering 2011 (2) : 91 – 93 [梁鑫 ,郑立宁. 土石碎屑体稳定性离散元数值分析 [J]. 铁道建筑 ,2011 (2) : 91 – 93]

Research Status and Prospect on Moving Process of Landslip-collapse Soil along Slope

JI Xianjun^{1 2 3} ,OU Guoqiang¹ ,YANG Shun^{1 3} ,WANG Jun^{1 3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610041 , China;

2. Nanyan Institute of Technology Nanyang 473004 , Henan , China;

3. Graduated University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

Abstract: There are three forms of landslide-collapse soil motion along slope , which include sliding of Rigid block , landslide-collapse mud flow , landslide-collapse soil broken. According to the difference of medium among coarse particles , motion of broken-landslide-collapse soil can be divided into un-adhesiveness broken-landslide-collapse motion and adhesiveness broken-landslide-collapse motion; according to the difference form during motion progress of broken-landslide-collapse soil , it can be divided into three stages: landslide-collapse soil broken , motion of mixture of coarse particles with mud and motion of debris flow. Summarizing the currently situation of motion process of landslide-collapse soil along slope , analysis the application situation of the theory of block sliding friction , fluid theory , particulate theory , point out their shortages applied to analysis the motion progress of landslide-collapse soil broken particles. Analysis influence of interval medium to coarse particles' movement , indicate the shortage of application particulate theory to represent the movement process of landslide-collapse soil after broken. Put forward method to reproduction the complication movement process of landslide-collapse soil along slope , through setting micromechanics parameter among particles , and point out key point of it , provide support for the next step research.

Key words: mountain hazards; landslide-collapse soil; process of motion; viscosity