

滑坡转化泥石流起动研究现状

陈晓清^{1,2}, 李 泳¹, 崔 鹏¹

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学土木学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 滑坡转化泥石流起动研究是基础前沿性研究, 直接关系到泥石流其他方面研究的进展, 特别是预测预报。分析了国内外在滑坡转化泥石流起动研究方面的进展, 分别从野外观测研究、实验设计和理论分析三个方面进行了阐述。重点介绍了目前国内外在理论上的进展, 并进行了初步评价。通过讨论, 提出了深入研究的思路与急需解决的问题, 为下一步研究提供依据。

关键词: 滑坡; 泥石流; 滑坡转化泥石流; 起动

中图分类号: P64

文献标识码: A

泥石流、滑坡是山区的主要灾害。在我国, 由暴雨引发的泥石流、滑坡灾害在数量上和造成的损失分别要占这类灾害总数的 90% 和 95% 以上^[1]。野外考察与观测发现泥石流活动与滑坡息息相关, 一般暴雨成因的泥石流几乎都与滑坡相关^[1, 2]。由此, 对暴雨引发的泥石流、滑坡研究显得特别重要。

泥石流起动是泥石流研究的核心问题, 是泥石流灾害防治的基础。而滑坡转化泥石流研究是泥石流起动研究的重点之一。滑坡转化泥石流是近年才提出的新课题, 它虽然包含了以前的滑坡型泥石流的范畴^[3, 4], 而又有所发展, 更强调滑坡向泥石流的转化过程。

目前的滑坡转化泥石流起动研究主要包括野外考察与观测研究、实验研究和理论研究三个方面。野外考察是进行实地的地质、地貌、水文气象、植被、人类活动等考察, 并进行滑坡、泥石流野外要素的测量, 调查发生的过程; 野外观测是在野外利用一定的手段(例如照相、录像、测定野外土体特征参数的传感器等)对滑坡转化泥石流进行观测; 实验研究主要是针对其中某一方面进行野外或室内实验, 有模型槽实验, 也有三轴试验等; 理论研究有基于定性的, 也有基于定量的。这些研究积累了大量素材, 就滑

坡转化泥石流的某一特征进行了研究, 取得了一些能反映客观现象的结论。

1 野外考察与观测研究

野外考察与观测是滑坡转化泥石流研究的基础。初期的研究主要是流域考察^[5- 7]; 逐渐到定点观察, 从定性上认识泥石流起动的过程^[8]; 再到定点观测测量, 针对泥石流起动相关的某些参数进行实时测量, 把泥石流现象与土体物理参数变化联系^[2]。

1.1 野外考察

国内报道典型的滑坡转化泥石流, 是 1974- 09- 14 在四川南江县的白梅垭由于连续大量降雨引发的滑坡转化泥石流, 发生后李天池等进行了实地考察^[3], 做了大量的测量, 取得了许多宝贵的数据。其次如 1999- 06- 22 四川普格县因暴雨引发的标水岩滑坡转化泥石流, 谢洪等通过野外考察对成因和形成过程做了初步分析^[6]。

国内外其他的还很多, 如 1974- 04- 25 秘鲁迈农马卡发生的 20 世纪全球最大的泥石流就是滑坡转化泥石流^[7]。

收稿日期(Received date): 2004- 01- 03; 改回日期(Accepted): 2004- 04- 10。

基金项目(Foundation item): 国家杰出青年科学基金(40025103)和中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年基金资助。[This research is supported by the National Science Foundation Project for Outstanding Youth(40025103), and the Foundation for Youth of Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS.]

作者简介(Biography): 陈晓清(1974-), 男, 四川遂宁人, 助理研究员, 在职博士研究生。主要从事滑坡泥石流防治理论研究和工程设计以及地理信息系统的应用研究。[Author: Chen Xiaoqing(1974-), male, born in Suining, Sichuan, Candidate P. H. D., majoring on landslide & debris flow prevention engineering and application of GIS.]

综合目前的考察, 滑坡转化泥石流有两类, 一类是先发生滑坡, 滑坡在向下滑动过程中出现破坏解体, 再在水的作用下发生流态化, 演变成泥石流^[3, 6, 31, 32], 如白梅垭、标水岩滑坡转化泥石流, 这类泥石流一般规模较大, 发生频率低; 一类是滑坡滑动与泥石流形成在现象上很难区分, 二者几乎同时^[8], 如云南东川蒋家沟泥石流源地的滑坡转化泥石流, 这类泥石流一般规模小, 发生频率大。

野外考察从现象描述、环境背景分析到泥石流特征参数的测量, 利用先进的照相、录像和测量设备目前已做到较为完善了。

1.2 观测实验

在国内, 中国科学院东川泥石流观测研究站自建立以来对泥石流的形成、运动和堆积进行了长期的、系统的观测, 获取了大量的野外观测资料。对滑坡转化泥石流的认识较其他同行有深入的认识。

通过蒋家沟泥石流源地观测, 将泥石流形成分为两类: 土力类和水力类^[8]。依据泥石流起动的源地分为坡面泥石流和沟道泥石流。坡面泥石流又分为纹沟泥石流、细沟泥石流、滑坡源地泥石流和崩塌坡源地泥石流等 4 类。对于滑坡源地泥石流又依据滑坡体的稳定性作如下划分: 稳定性弱者, 大多为土力类形成过程; 稳定性强者, 为水力类泥石流形成过程^[9]。蒋家沟泥石流源地内, 有的滑坡活动性强, 年位移量达 5~11 m, 地面裂缝纵横, 土体松散, 暴雨、大暴雨等雨水均可大量进入滑坡体内, 地表径流小, 在地下水的作用下, 土体强度降低, 斜坡破坏演变为土力类泥石流。有的滑坡的稳定性较强, 侵入土体的水量小, 地表就易出现地表径流, 并易于在后壁和左右两侧汇集成沟槽径流。沟槽径流冲刷滑坡, 含沙量增加。超过挟沙水流而演变成水力类泥石流。遭强烈侵蚀的切沟, 因有沟岸次生崩塌体补给, 可转化为土力类泥石流过程。滑坡源地一旦出现泥石流, 泥石流又会反过来对滑坡产生影响。在趋向稳定或稳定初期, 滑坡的细沟、纹沟泥石流可充填土体裂缝, 削弱滑坡体的透水性, 降低滑坡体的水位, 增大滑坡稳定性; 切沟泥石流可加速冲刷沟床, 为地下水排泄提供有利条件, 但使滑坡的临空面增加, 为滑坡转化泥石流提供有利条件。此外, 在蒋家沟中, 滑坡体通过前缘崩塌补给下方沟床土体, 演化为泥石流。由此可见, 在蒋家沟内影响滑坡转化成泥石流的因素多样, 有正面的也有负面的。

鉴于所阅读国外文献量, 还没有发现国外在泥

石流野外观测方面对滑坡转化泥石流有更深入的研究。

目前, 野外观测研究主要还处于定性化阶段, 没有系统采用定量化仪器进行监测。比较多的是对降雨进行了系列观测^[2, 9]。将滑坡泥石流的发生与降雨强度进行统计分析, 用降雨预报来对滑坡泥石流进行预测预报。

2 实验研究

滑坡转化泥石流起动涉及多学科问题, 可以用不同的理论指导, 使用不同的实验方法和手段来研究。有通过概化模型实验来研究的^[10, 30], 有通过具体研究点来研究的^[11]; 有通过野外实验来研究的^[10, 12], 有通过室内试验来研究的, 方法多种多样。下面介绍几个有代表性的试验。

2.1 Iverson 的模型槽实验

Iverson 的项目组在美国圣海伦斯火山观测站设计了一个二维坡体的实验槽, 进行滑坡转化泥石流的起动实验^[10]。实验主要考虑了控制泥石流起动的三种水力条件: 即局地地下水水流、中强度降雨和高强度降雨。在实验中分别实时测量土体表面位移、土体内部的孔隙水压力以及孔隙水含量, 并进行了全程录像。

通过实验证实了滑坡转化为泥石流存在三个过程: (1) 在斜坡体内大部分土体发生剪切破坏, (2) 由于高孔隙水压作用土体部分或完全液化, (3) 滑坡平动能量转化为土体内震动能, 这三方面或独立作用、或协同作用。

Anderson 提出在没有充分排水的情况下, 由高强度降雨引起的不排水加载会激发土体破坏^[15], 这从实验现象上得到验证。高强度降雨产生一个扰动水压力, 经张力饱和的土体向下传播, 当达到一定深度后产生正孔隙水压力, 然后再向上传播, 从而激发土体破坏。

该实验对目前一些理论提供了支持, 可解释一些野外现象, 但由于土样级配太窄, 不能充分反映泥石流土体的特征。

2.2 崔鹏的泥石流起动实验

崔鹏于 1989 年在九寨沟开展了泥石流起动机理的实验研究^[12, 13]。研究方法采用了当时颇为流行的小型槽, 选择九寨沟内树正寨背后的树正支沟(该沟是一条泥石流活动强烈的沟)作为模拟原型,

从该沟内取土样进行实验。影响泥石流起动考虑了底床坡度、颗粒级配、水分条件三个主要因素。对次要因素,考虑了散粒和浆体状态下堆积厚度对泥石流起动的影响。共进行了 102 场实验。

通过实验提出了准泥石流的概念,并根据实验现象提出了泥石流的加速效应、分离效应和连接效应,制定出量化的和非量化的指标,初步将泥石流起动分为加速起动、常速起动和缓慢起动三类^[13]。

该实验充分利用了泥石流源地土体的特性,得出了能客观反映实际的理论,但实验的测试手段还需要进一步改进。如果能同步测量泥石流起动中土体特征参数的变化,对理论进一步将有很大帮助。

2.3 戴福初的实验研究

戴福初认为斜坡土体的初始应力具有偏固结的特点,由此可以假设斜坡为无限平面型坡,且在与坡面平行的平面无线形应变^[11, 16]。为了揭示土体在低有效围压条件下的应力应变特性,开展了低围压下偏压固结不排水剪和偏压固结常剪应力排水剪试验。试验在 GDS 三轴测试系统上完成。分析 $e \sim \log P^*$ 和 $q \sim P^*$ 曲线,可知要预测暴雨导致土体破坏的起动过程是不难的,对于收缩土体由于降雨入渗引起的孔隙水压增加,结果排水收缩破坏,并增加超孔隙水压力。超孔隙水压力不能立即消散使土体抗剪强度降低,土体迅速破坏。由于含水量高及表面径流和雨水作用,破坏的土体易于流动,对于膨胀土体,由于水入渗引起孔隙水压增加导致土体膨胀,膨胀后孔隙水压减小,土体抗剪强度增加。由于持续降雨入渗可以平衡掉由膨胀引起的孔隙水压的减小。这样膨胀和位移得以持续。滑坡启动并转化形成泥石流。

该研究通过野外对滑坡转化泥石流的认识,抓住土体特征的其中重要的一点深入研究,分析了滑坡转化泥石流与研究点的关系,取得了较为满意的结论。

2.4 李永益的模型槽实验

李永益以马鞍山滑坡型泥石流为原型,设计了模型槽实验^[30]。实验把物质分为滑动和流动,对应设计了装有滑轮的有机玻璃盒和为流动的有机玻璃槽。原型与模型之间的几何相似比 $K_l = 1:500$,进而可推算出在重力场中,原型与模型运动加速度相同,则加速度、速度和时间的相似比相应为: $K_a = 1$; $K_v = 22.4$; $K_t = 22.4$ 。

通过实验,再现了滑坡转化泥石流的过程,而且

实验结果与模型计算符合得很好。

总的来说,上述这些实验解决了滑坡转化泥石流的其中一方面,但要揭示滑坡转化泥石流的物理、力学、化学行为、土体微观结构变化等机理还不够,需要更深入研究,同时引入大量先进的实验技术和实验方法。同时,鉴于滑坡泥石流区土体的特殊性,对现有一些设备应做改进,以满足实验的需要。例如目前的土动三轴仪,其测量土体的直径就偏小了,对宽级配土体只有剔除较大粒径的颗粒而改变土体的特征,要客观测量出土体的真实特征,就应加大砾径,同时增加轴的液压力。

3 理论研究

目前在滑坡转化泥石流方面还没有一套完善的理论体系,现有文献提出的理论多是对滑坡或泥石流的某个方面。Sassa^[17]、Fleming 和 Ellen^[18]、Vaughan^[19]、Mshann 等^[20]提出了静态液化机制。Ching 等^[21]、Krahn 等^[22]及 Nisto 和 Barany^[23]则认为这是由于暴雨入渗导致土体基质吸力减小而造成土体强度降低所致;Sitar 等^[24]、Anderson^[15]通过对土体三轴应力路径试验的结果提出其形成机制;陈守义^[25]亦认为土的应变模式与滑坡发育过程的特点有非常密切的关系。这些理论为滑坡转化泥石流理论研究奠定了基础。

下面几个是能为今后滑坡转化泥石流起动研究提供重要指导的理论。

3.1 泥石流化机理

李永益通过对大量滑坡转化泥石流的调查及模型试验,提出泥石流化机理^[30]。提出滑坡泥石流化过程主要包括滑坡碎屑化、滑坡液化、空气包裹等过程。

滑坡碎屑化是滑体向碎屑直至土粒转化的过程,在相对干燥可转化为碎屑流,碎屑流往往已具备连续流动变形或流动性。由于滑坡滑动过程中各部位破坏形式不同,液化的方式和程度有各自的特点,主要有两种形式:滑带液化和膨胀压缩液化。此外,震动液化也是一种重要的方式。

3.2 泥石流起动机理

崔鹏通过泥石流起动试验给出了泥石流起动的定义^[12]。概括泥石流起动的过程包括两个阶段:侵蚀搬运形成准泥石流体和准泥石流体起动转变为泥石流。将泥石流起动的条件定义为^[12]

$$f(\theta, S_r, C, k) = 0$$

式中 θ 为底床坡度; S_r 为土体的饱和度, 反映土体水分含量; C 表示颗粒级配; k 是由边界条件所确定的参数。

并建立了泥石流起动模型^[12]

$$\theta - 8.0062S_r - 2.4859S_r^2 - 3.4896/(C - 0.0996) + 7.0195 = 0$$

在此基础上, 推导了泥石流起动条件曲面 $Sc^{[12]}$ 。泥石流起动模型就是一种尖点突变模型, 泥石流起动具有突变、渐变和中间状态三条路径, 分别对应加速起动、缓慢起动和常速起动。

3.3 滑坡塑性流模型

William Z. Savage 和 William K. Smith 提出滑坡塑性流模型^[27]。该模型是基于二维、倾斜、半无限空间, 在孔隙压力和重力增加时库仑材料的应力和速度的双曲型微分方程, 可以预测一般的观测特征值, 如在一定纵向应变率下的压缩流 (compressive flow)、约束流 (plug flow) 及扩展流 (extending flow), 也可预测纵向应力随基底滑动面深度呈椭圆型增加, 应力和速度特征及沿其传播应力和速度间断面。说明在压缩和扩展流作用下, 滑面上的断层是如何发展的。

该模型预测膨胀是关联流动假设的结果。这样假设的优点在于: 速度与应力同一、简单实用的法则应用于同一材料。但是还存在不足之处: 对库仑塑性材料会出现不理想的大膨胀, 例如在滑面处出现无限大的膨胀率, 而与客观实际矛盾。

3.4 库仑颗粒流模型

通过野外观测、室内实验及理论分析, Richard M. Iverson 等^[14]提出了滑坡转化为泥石流的三个过程: a. 在斜坡体内大部分土体发生剪切破坏, b. 由于高孔隙水压作用土体部分或完全液化, c. 滑坡平动能量转化为土体内震动能, 这三方面或独立作用、或协同作用。由基本定义的库仑破坏、有效应力、孔隙应力、液化、临界状态及颗粒粒温, 基于此定义了提出泥石流起动假设。

起动假设一般都假定斜坡土体包含或需要足够的水饱和所有的孔隙。这一假设的发展经历了很长的历史。其一由 Johnson 提出的泥石流起动 Bingham 模型; 后由 Takahashi 提出类似于准静态库仑规则 ($C = 0$); Iverson 和 Major 提出泥石流起动是由于未液化的无内聚力饱和土体发生大部分库仑破坏所至; 后 Takahashi 又提出由于坡体突加表面径流

导致管道、沟堵塞引发泥石流。另一假设强调土力学机制 (如 Anderson & Siter 1995^[15]), 强调泥石流起动是由于孔隙水压部分增加超过流体静力值导致至少部分土体液化, 而不是由于剪切应力增加超过某一屈服值。一些泥石流由于紧密土体破坏发生膨胀而形成, 但有些在客观应力状态下在破坏过程中紧密土体会收缩。

基于上述理论基础, Iverson 提出了库仑颗粒流模型^[14], 土体破坏的判别为

$$\tau = (\sigma - p) \tan \phi + C$$

定义颗粒内能

$$T = (v')^2 = \langle (\vec{v} - v_x)^2 \rangle$$

式中 v' 为波动速度, \vec{v} 为瞬时颗粒速度, v_x 为平均速度。

T 越高, 减小了颗粒的胶结性, 加强了泥石流的流动性。沿滑动面, T 足够转移到相邻的颗粒, 那么局部滑动就会演变为整体滑动, 从而导致滑坡启动演变为泥石流。

为了判别土体稳定性, 应用无限坡理论, 以稳定系数 $F_s = T_f + T_w + T_c$ 表达斜坡状态^[14]。

3.5 偏应力理论分析

戴福初根据三轴偏应力试验结果可以对暴雨滑坡泥石流的形成机理与过程进行分析, 提出滑坡发生机理与土的应力应变特征的关系^[26]。

可以由偏应力分析雨水入渗后滑坡发育的过程。解释雨水作用、土体特征参数的改变、裂隙的发展的关系, 由此得出, 暴雨自然滑坡泥石流的破坏机理是由常剪应力排水剪造成的剪胀破坏和其后的应变软化造成剪应力转移、破坏扩展两个过程的复合机制^[11]。

这样暴雨自然滑坡泥石流的形成过程可分为如下几个阶段: (1)降雨入渗饱和阶段; (2)排水剪胀阶段; (3)剪胀破坏阶段; (4)破裂扩展阶段; (5)应变软化滑动阶段; (6)滑动加速解体阶段; (7)流动阶段; (8)堆积阶段。

其他, 李树德根据前人的研究成果提出了自己的滑坡型泥石流定义^[28, 29]。在定义基础上提出一些定性化的指标, 基于这些指标对滑坡型泥石流进行了分类。通过分析土体强度及影响土体强度的因素的分析, 提出滑坡型泥石流形成机理的程序可能是: 底层滑移蠕动、滑移蠕动—扰动、滑移蠕动—扰动—崩塌、崩塌—滑塌—扰动、快速流动。并进而探讨了滑坡型泥石流的临界结构。

李焯芬等^[5]分析了对香港地区滑坡泥石流流的成因的控制因素,即地形条件、土体结构和强度、暴雨入渗特征、植被覆盖以及人为干扰等,提出香港暴雨滑坡泥石流破坏有4类机制,即由于暴雨入渗形成浅层地下水而造成的破坏、暴雨入渗导致天然地下水水位升高而造成的破坏、土层内地下水的渗透破坏、由于土体残余节理切割组合等造成的破坏。

目前的理论对滑坡转化泥石流的许多方面进行了较为深入的研究,但是所进行的整体研究的深度还较浅。特别是这些理论基本上是基于滑坡转化泥石流起动的某一方面观测或实验而提出的,要用于直接指导泥石流减灾还存在一定的差距。

4 讨论

综合分析前面研究内容,目前滑坡转化泥石流的起动研究取得的研究成果主要有:

1) 在野外考察方面已经积累了大量的素材,在野外观测方面,对泥石流起动和滑坡滑动做了大量的工作,并对一些参数进行了测量,积累数据;

2) 在野外实验和室内试验方面取得了显著的成果,有的考虑主要影响因子对土样进行了概化,采用一些新的实验手段与方法;

3) 理论上分别从不同的角度进行了研究,得到了能反映滑坡转化泥石流起动的一方面的特征。

但是还存在一些不足之处。总的来说,定性研究多,定量研究少;宏观研究多,微观方面的实验和机理研究少;多数实验采用土体的级配范围较窄,不能充分反映泥石流源地土体特性等。

由于形成滑坡泥石流的土体是一个复杂体,研究应宏观与微观结合、线形与非线形结合、逐步由黑箱向白箱转变。宏观上,可以从大范围的地理相关性来分析;中等尺度上,可以通过野外原型观测和试验来研究;微观上,可以通过土体特征传感器来测量滑坡转化泥石流土体特征参数的变化,以及土体微观结构测定来研究。随着试验设备的改进和新测试手段的发展,可望通过加强野外原型监测推动理论研究的进步。

目前需要解决的问题有:滑坡转化泥石流中滑坡破坏的力学计算模式、滑坡向泥石流转化的分界点、泥石流起动的力学机理等等。这些问题的解决将有助于泥石流灾害预测预报精度的提高。

参考文献(References):

- [1] Tian Wanpei, Wang Chenghua, et al. Zonal Forecast of Rainfall induced Debris Flow and Landslide. Sichuan Sciences and Technique Press, 1994. [谭万沛,王成华,等.暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报[M].成都:四川科学技术出版社,1994.]
- [2] C. F. Lee, Chen Hong. Landslide in Hong Kong-Causes and Prevention[J]. *ACTA Geographica Sinica*, 1997, 52(s): 114~ 122. [李焯芬,陈虹.香港滑坡泥石流成因及治理[J].地理学报,1997, 52(增刊): 114~ 122.]
- [3] Li Tianchi, Zhang Shucheng, Kang Zhicheng. Sliding Debris Flow [A]. In: Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Chinese Academy of Sciences(No. 4) [C], The Sciences Press, 1984, 171~ 177. [李天池,章书成,康志成.滑坡型泥石流[A].见:中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第四号)[C],北京:科学出版社,1984, 171~ 177.]
- [4] 池谷浩(日),钟敦伦译.泥石流的分类[J].水文工程地质(第三辑),重庆:科学技术出版社重庆分社,1978.
- [5] Curry R. R.. Observation of alpine mudflows in the Ten mile range, central Colorado [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1966, 77: 771~ 776.
- [6] 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.]
- [7] Xu Junming. Characteristics and Prevention of landslide-debris flow [J]. *Mountain World*, 1989, No. 9: 9~ 14. [徐俊名.滑坡型泥石流特征与防治[J].山地世界,1989. No. 9, 9~ 14.]
- [8] Tian Lianquan, Zhang Xinbao, Wu Jishan. Formation Process of Debris Flow [A]. In: Debris Flow (3) [C]. Chongqing: Sciences and Technique Press, 1981, 54~ 57. [田连权,张信宝,吴积善.试论泥石流的形成过程[A].见:泥石流论文集(1)[C].重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981, 54~ 57.]
- [9] Tian Lianquan, Hu Fade, Li Jing. Formation Process of Jiangjiagou Ravine Debris Flow [A]. In: Observation of Debris Flow in Jiangjiagou Ravine [C]. Beijing: Sciences Press, 16~ 52. [田连权,胡发德,李静.蒋家沟泥石流形成过程[A].见:云南蒋家沟泥石流观测研究[C],北京:科学出版社,1990: 16~ 52.]
- [10] Mark E. Reid, Richard G. LaHusen, Richard M. Iverson. Debris flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers [A]. In: Cheng-Lung Chen, (Ed) *Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* [C]. ASCE. 1-11.
- [11] Fuchu Dai, C. F. Lee, Sijing Wang, et stress-strain behaviour of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-induced fill slope failures [J]. *Engineering Geology* (1999), 53 359~ 370.
- [12] Cui Peng. The Mechanism of debris flow initiation [D]. The Peking Linze University. [崔鹏.泥石流起动机理的研究[D].北京林业大学,1990. 5.]
- [13] Cui Peng. Studies on Condition and Mechanism of Debris Flow Initiation by Means of Experiment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992. 37(9), 759~ 763.
- [14] Richard M. Iverson, Mark E. Reid, Richard G. LaHusen. Debris flow Mobilization from landslides [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1997, 25: 85~ 138.

- [15] Anderson, S. A., Sitar, N., Analysis of rain-induced debris flows [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1995, **121** (7), 544~ 553.
- [16] Fuchu Dai, C. F. Lee, Wang Sijing, Analysis of rainstorm-induced slide debris flows on natural terrain of Lantau Island, HongKong [J]. *Engineering Geology* 51(1991): 279~ 290.
- [17] Sassa, K., The mechanism starting liquefied landslides and debris flows [A]. *Proc. 4th Int. Symp. Landslide*, 1984, 349~ 354.
- [18] Fleming, R. W., Johnson, A. M., Landslide in Colluvium [J]. U. S. Geological Survey Bulletin. 1994, 2059- B, 24p.
- [19] Vaughan, P. V., Oral contribution and discussion [A]. *Tropical* 85, 1985, Vol 3, 370~ 374.
- [20] Mshann, N. S., Suzuki, A., Kitazono, Y., Effects of weathering on stability of natural slopes in northcentral Kumamoto [J]. *Soils and Foundations*, 1993, **33**(4), 74~ 87.
- [21] Ching, R. K. H., Sweeney, D. G., Increase in factor of safety due to soil suction for two Hong Kong slopes [J]. *Proc. Int. Symp. Landslides*, 1998, 617~ 623.
- [22] Krahn, J., Fredlund, D. G., Klassen, M. J., Effects of soil suction on slope stability at North Hill Can [J]. *Geotech. J.*, 1989, 26: 269~ 278.
- [23] Nieto, A. S., Brarany, I., Catastrophic rain-induced landslides in Rio de Janier, Brazil: Mechanisms and contributing factors [J]. *Geo. Soc. Am. Abstracts with Programs*, 1988, **20** (7), PA144.
- [24] Sitar, N., Anderson, S. A., Johnson, K. A., Conditions for initiation of rainfall induced debris flows [A]. *Stability and Performance of Slopes and Embankments II* [C], *Geotechnical Special Publication No. 31*, 1992, Vol 1, 834~ 849.
- [25] Chen Shouyi, Relationship between Stress-strain Models of Soils and Growing Processes of Landslides [J]. *Rock and Soil Mechanism*, 1996, **17**(3): 21~ 26. [陈守义. 试论土的应力应变模式与滑坡发育过程的关系 [J]. 岩土力学, 1996, **17**(3): 21~ 26.]
- [26] Dai Fuchu, C. F. Lee, Huang Zhiquan, et al., Mechanism for Rainstorm-induced soil Slide-Debris Flows in Area with Volcanic Rock-derived soils [J]. *J. of Eng. Geo.*, 1999, **7**(2): 147~ 153. [戴福初, 李焯芬, 黄志全, 等. 火山岩坡残积土地区暴雨滑坡泥石流的形成机理 [J]. 工程地质学报, 1999, **7**(2): 147~ 153.]
- [27] William Z. Savage, William K. Smith, A Model for the plastic flow landslide. U. S. Geological survey professional paper 1385, 1992.
- [28] Li Shude. Other type of debris flow—landslide-type debris flow [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, **2**(4): 66~ 71. [李树德. 论泥石流的另一类型——滑坡型泥石流 [J]. 水土保持学报, 1988, **2**(4): 66~ 71.]
- [29] Li Shude. Formation Mechanism of the landslide-type Debris flow. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, **34**(4): 519~ 522. [李树德. 滑坡型泥石流形成机理 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, **34**(4): 519~ 522.]
- [30] Li Yongyi. Study on the landslides change into debris flows [A]. In: *Selected papers on landslide* [C]. Chengdu: Sichuan Science and Technique 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 [A]. 见: 滑坡论文选集 [C]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989, 69~ 76.]
- [31] Shreve, R. L., Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1968, 79: 653~ 658.
- [32] Cui Peng, Zhong Dunlun, Li Yong. Landslide and Debris Flow in Zezu, Meigu county, Sichuan Province [J]. *Mountain Research*. 1997, **15**(4): 282~ 287. [崔鹏, 钟敦伦, 李泳. 四川美姑则租滑坡泥石流 [J]. 山地研究, 1997, **15**(4): 282~ 287.]

An Overview of Transformation of Landslide into Debris Flow

CHEN Xiaqing^{1,2}, LI Yong¹, CUI Pen¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, C A S, Chengdu, 610041;

2. Civil Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

Abstract: The research of transformation of landslide into debris flow is fundamental in debris flow study, especially for the prediction of debris flow disasters. This paper provides an overview of the recent studies both at home and abroad in this very topic. Main achievements include: 1) A great collection of first-hand data of field investigation; 2) parameters acquired by field observation and measuring; 3) Field and indoor experiments that have employed new technical ways and generalized some primary factors of soil samples. 4) Some aspects revealed regarding the realization of transformation from landslide to debris flow. Despite these, long-term monitoring of characteristic parameters concerning soil strength is wanted and experiments should be emphasized on wide grain-size composition and the limitation of theories derived from sand test. Because of the complexity of soil an integrated technical way is needed, combining methods both microscopic and macroscopic, linear and nonlinear, black-box and white-box. At present, there are many problems to be solved, such as how to ascertain the critical point of the transition from landslide to debris flow. Answers to these problems will be helpful for improving the precision of debris flow prediction.

Key words: debris flow; landslide; transformation