

# 降雨型堆积体滑坡大尺寸模型试验

陈宇龙<sup>1</sup>, 黄 栋<sup>2</sup>  
(1. 东京大学 土木工程系, 日本 东京 113-8656; 2. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 以堆积体坡为研究对象,进行了大尺寸模型边坡试验,研究了降雨条件下堆积体边坡渗流、变形、破坏的规律,探讨了声发射作为预警的判据.结果表明:浸润面到达后水的体积分数持续增加,增加到峰值后,地下水水位才开始增高.坡顶的位移较大,坡趾的位移较小,位移的增大有一个加速过程.在滑坡启动的瞬间,倾斜角突然增大,加速过程极短.边坡失稳过程中声发射撞击数先缓慢上升再急剧上升.边坡失稳与坡面径流和细粒迁移密切相关.

**关 键 词:** 大尺寸;模型试验;滑坡;降雨入渗;堆积体

中图分类号: P 642.22      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2017)04-0576-05

## Large-Scale Model Test on Rainfall Induced Colluvium Slope Failure

CHEN Yu-long<sup>1</sup>, HUANG Dong<sup>2</sup>  
(1. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China. Corresponding author: CHEN Yu-long, E-mail: 673054399@qq.com)

**Abstract:** A large-scale colluvium model test was conducted on rainfall induced slope failure to investigate the laws of the seepage, deformation and failure of colluvium slope under rainfall conditions. Acoustic emission as a criterion of warning was discussed. Results showed that after the wetting front has reached the corresponding measuring point, the volume fraction of water increases continually, and the water level begins to increase until the volume fraction of water reaches its peak value. The displacement at the top of the slope is large and is small at the toe, and the increase of the displacement of the slope has an acceleration process before failure occurs. The tilt angle increases suddenly when failure occurs. The acoustic emission accounts increase slowly at first and sharply afterwards. Slope failure is strongly linked to surface runoff and fine particle migration.

**Key words:** large-scale; model test; slope failure; rainfall infiltration; colluvium

降雨型滑坡是世界上最危险的地质灾害之一<sup>[1-4]</sup>.普遍认为,滑坡的原因是地下水位的上升.随着雨水的渗入,地下水位逐渐形成并上升,基质吸力丧失,抗剪强度降低,最终导致滑坡的产生.虽然广大学者对滑坡进行了大量研究,但至今尚未能全面认识滑坡的发生、发展机制.物理模型试验具有良好的直观性,能综合考虑多种因素,模拟复杂边界条件,在基本满足相似原理条件下能反映滑坡的内在相互作用.国内外学者对降雨型滑坡进行了大量的模型试验<sup>[5-9]</sup>,但模型尺寸较小,不能反映三维效应.本文以松散堆积体坡为研究对象,选择初始含水较高的场景即滑坡失稳前有较多的前期降雨模拟滑坡失稳的场景,借助一高5 m宽9 m的大尺寸模型边坡,通过降雨触发堆积体边坡失稳破坏,研究降雨条件下堆积体边坡的渗流、变形、破坏规律,分析三维形态下边坡失稳的发生、发展及最终形态,探讨声发射作为预警的判据.研究有助于了解边坡失稳破坏过程及

破坏形态,为边坡治理提供科学依据.

## 1 模型试验

堆积体边坡物理模型如图 1 所示,坡高 5 m,宽 9 m,坡角 40°,坡面为平面. 监测系统包括地下水水位计(WL)、水分计(SW)、声发射仪(AE)、位移计(SD)和倾斜计(T). 制作模型堆积体土样

为强风化花岗岩土,按粒径分为砾砂,其级配曲线见图 2,土水特征曲线见图 3,土的密度为 1.8 g/cm<sup>3</sup>. 降雨系统均匀布置在建筑物的屋顶. 降雨强度被认为是影响滑坡失稳时间最重要的因素,为了缩短滑坡发生的时间,试验前一天已对该边坡进行了 3 h 强度为 50 mm/h 的预先降雨. 试验当天用时 330 min,降雨强度为 70 mm/h.

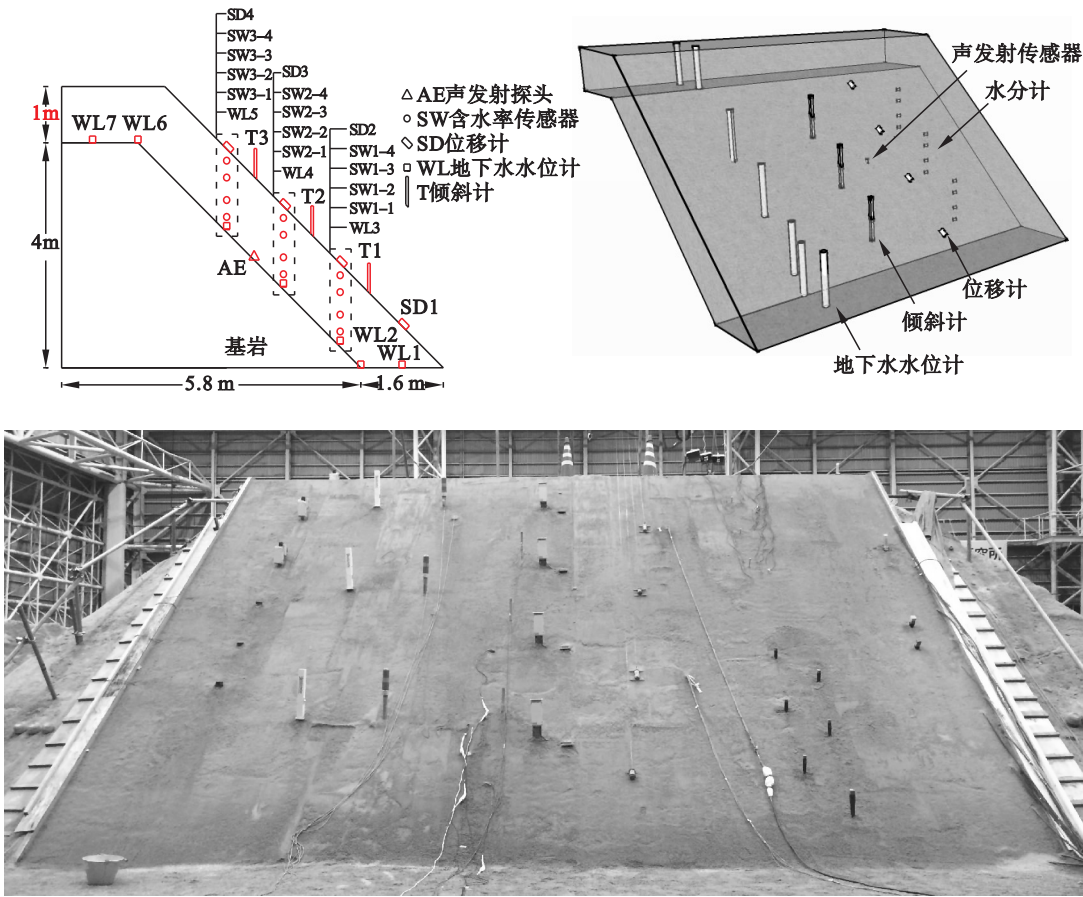


图 1 模型试验示意图  
Fig. 1 Sketch of model test

## 2 结果与讨论

### 2.1 水的体积分数

图 4 为水的体积分数随着降雨时间的变化曲线. 由图可知,降雨初期历时 20 min 内各测点的水的体积分数保持不变,持续一定时间后,浸润面到达测点,水的体积分数急剧增加,最后达到饱和状态并趋于稳定. 且越靠近基岩的位置水的体积分数越早升高. 这说明降雨入渗,在基岩表面聚集,形成地下水水位,水位逐渐抬高,所以位置相对较低处土的水体积分数增长最快,而较高处土的水体积分数增加较为滞后. 土体受地下水作用发生软化,且有效应力减小,抗剪强度降低,最终

导致边坡失稳. 从图 4 可知,水的体积分数随监测位置变化显著,即使在高水体积分数状态,滑坡并未产生,且滑动面的深度难以判断,所以仅靠水的体积分数不足以作为滑坡的判据.

### 2.2 地下水水位

图 5 为地下水水位随着降雨时间的变化曲线. 在前 90 min,即降雨入渗浸润面到达测点之前,地下水水位保持不变;90 min 之后地下水水位随时间持续增加. 结合图 4 可知,90 min 以后,水的体积分数达到峰值并趋于稳定. 说明水的体积分数增大到峰值后,地下水水位才开始增高. 这是由于水的体积分数达到峰值后,渗透率增大,水分迅速迁移聚集,导致地下水水位加速上升. 孔隙水压增大,有效应力降低,抗剪强度减小,促使坡体

发生滑动.

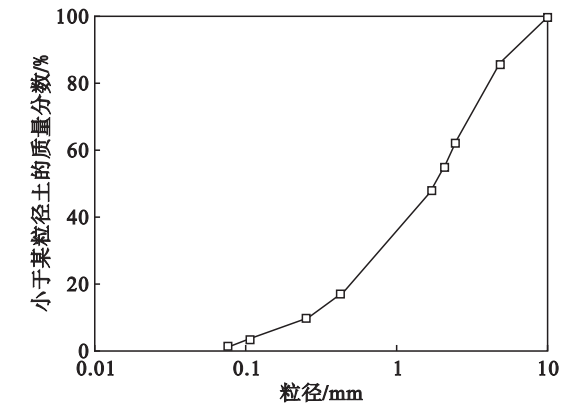


图2 堆积体土样的级配曲线  
Fig. 2 Grading curve of colluvium soil

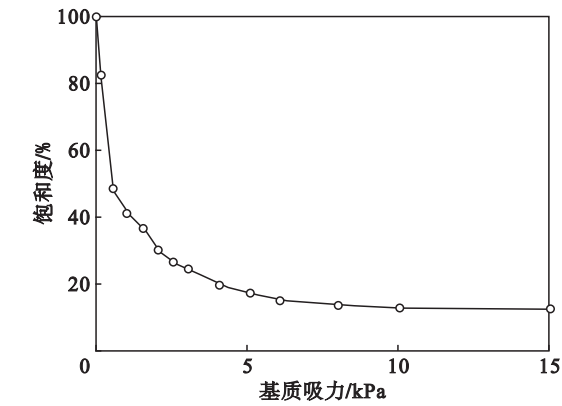


图3 堆积体土样的土水特征曲线  
Fig. 3 SWCC for colluvium soil

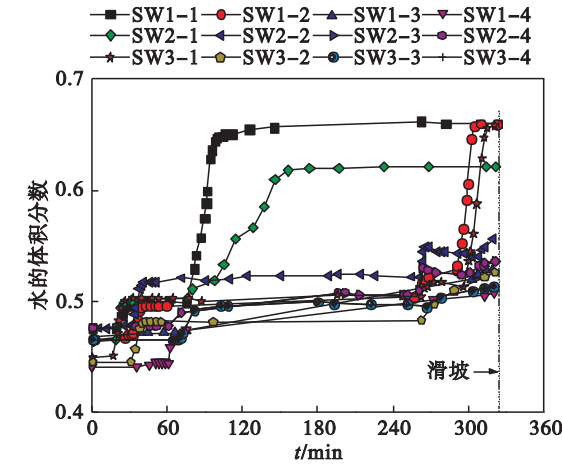


图4 水的体积分数随降雨时间的变化曲线  
Fig. 4 Volume fraction of water vs. raining time

2.3 位移

图6为滑坡发展过程中位移的变化曲线. 可见,坡顶的位移较大,坡趾的位移较小. 各测点的位移均在120 min时开始增大,270 min时边坡出现大规模的滑移,位移的增大有一个加速过程. 最大滑坡速率为0.024 mm/s. 按照 Anderson 等<sup>[10]</sup>对滑坡速率进行了分类,该滑坡速率属于中等

(0.005 ~0.5 mm/s).

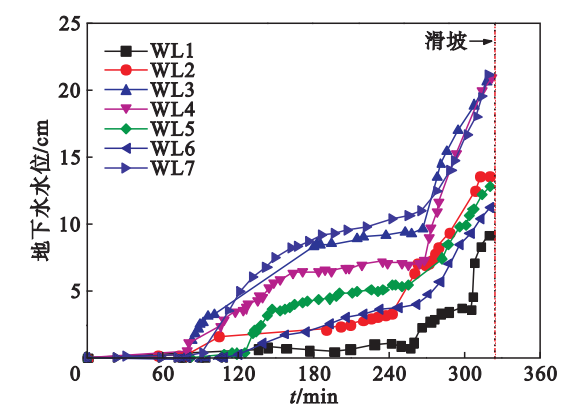


图5 地下水水位随着降雨时间的变化曲线  
Fig. 5 Water level vs. raining time

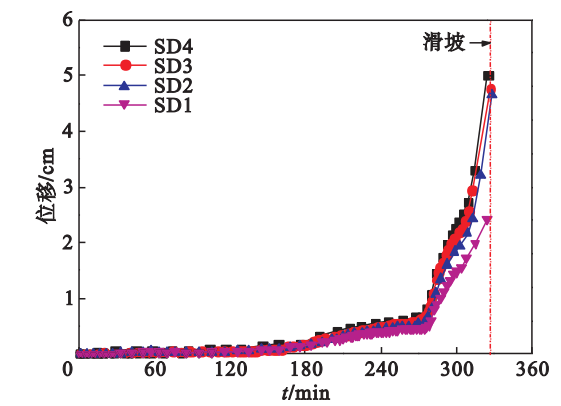


图6 位移随着降雨时间的变化曲线  
Fig. 6 Displacements vs. raining time

2.4 倾斜角

图7为倾斜角随着降雨时间的变化曲线. 在滑坡发生前,T2处的倾斜角在竖直方向逐渐减小,呈负增长,说明倾斜计向后倾斜. 而T1和T3的倾斜角保持不变,只在滑坡启动的瞬间突然增

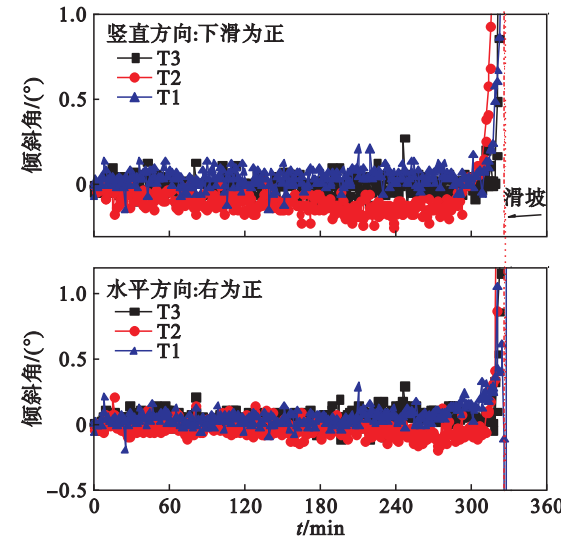


图7 倾斜角随着降雨时间的变化曲线  
Fig. 7 Tilt angle vs. raining time

大,加速过程较为短暂. 因此,利用倾斜角不能够作为边坡失稳的判据. 图 8 给出了距离滑坡发生时间与倾斜速率的关系曲线. 可见,倾斜速率越大,滑坡发生越快,距离滑坡时间越短.

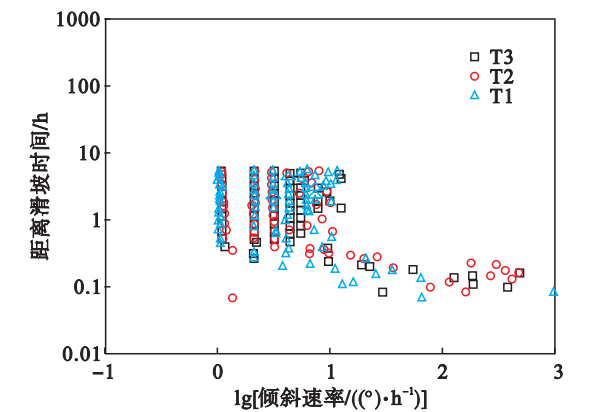


图 8 距离滑坡发生时间与倾斜速率的变化曲线  
Fig. 8 Time before slope failure vs. tilting rate

### 2.5 声发射

堆积体颗粒的摩擦和错动会产生声发射现象,基于此,声发射特征可用于监测堆积体边坡的失稳. 文献[11-13]通过对边坡进行现场声发射监测,发现声发射率与位移速率成正比. 本试验不考虑声发射定位,因此只用一个声发射探头,主要通过分析撞击率和累积撞击数来研究滑坡过程的声发射特性和规律.

图 9 为声发射累积撞击数和撞击率随时间的变化规律. 在连续降雨的作用下边坡底部发生滑移破坏,逐渐加剧并最终导致边坡的失稳. 可将失稳过程中的声发射特征划分为缓慢上升期和急剧上升期 2 个阶段. 在缓慢上升期,边坡内部出现局部滑移,并逐渐累积. 到达急剧上升期时,说明内部失稳急剧增加. 可见,声发射特征可以用作滑坡发生的预测指标.

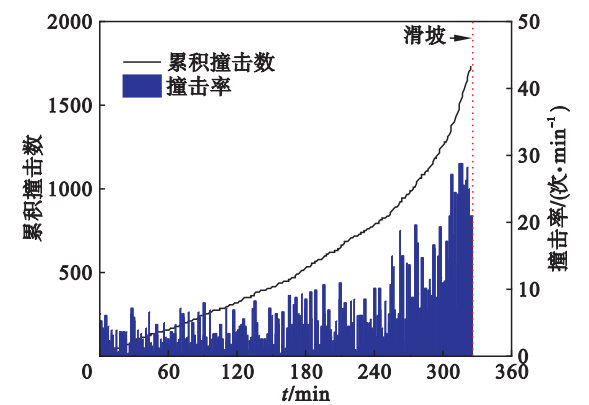


图 9 声发射累积撞击数和撞击率随降雨时间的变化规律  
Fig. 9 AE accounts and accumulative accounts vs. raining time

### 2.6 破坏模式

图 10 给出了边坡的失稳模式:①随着持续降雨,坡面发生冲蚀破坏,冲蚀程度不均匀,左侧区域形成冲蚀沟. ②在第一条冲蚀沟旁又形成一条冲蚀沟,冲蚀沟两侧的土体逐渐崩塌,冲蚀沟向两侧发展,逐渐变宽. ③在边坡右侧形成一条冲蚀沟,冲蚀沟沟体向两侧和坡顶发展,后期靠近坡顶的坡面出现浅层滑坡. ④随着降雨的进行,坡面被冲蚀,冲蚀程度从坡顶至坡趾逐级增大,坡趾土体塌落,发生冲蚀破坏. 随着坡趾冲蚀的加重,使坡趾产生多条冲蚀沟. 冲蚀沟向两侧和坡顶发展,上部土体出现孤面,由于弧面前侧土体临空,拉裂面的发展,促使拉裂面附近小型滑坡的产生. ⑤随着累积降雨量的增加,滑动面圆弧面缓慢加深;随着拉裂面的发展,促使不断产生小型滑坡,如此重复,边坡逐级形成一系列的拉裂面,逐步形成滑坡,滑坡规模逐渐变大,直至边坡形成大的拉裂面,最终发展成有明显滑动面的大规模滑坡,促使边坡最终完全破坏.

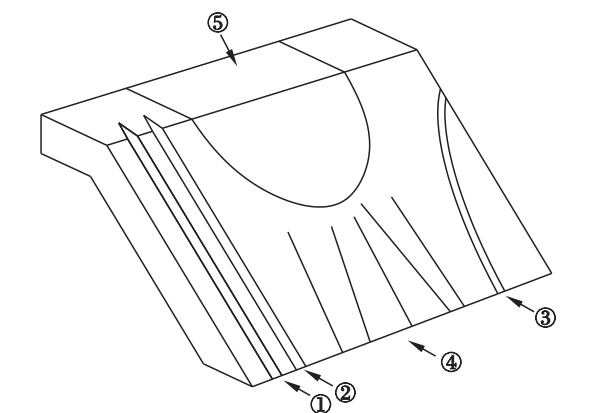


图 10 边坡失稳模式  
Fig. 10 Slope failure modes

## 3 讨 论

Cui 等<sup>[7]</sup>认为边坡失稳与坡面径流和细粒迁移密切相关. 随着降雨的持续,坡顶的细粒随之流失,使得边坡坡顶粗粒和坡趾细粒的比例增大. 在坡顶处,细粒流失,粗颗粒间的咬合力减小,容易导致失稳的发生. 而在坡趾处,在细粒随雨水迁移的过程中,边坡堆积体的非均匀结构和随机分布的孔隙结构促进了细粒的聚集,导致部分孔隙被细粒堵塞,雨水的渗流通道受到抑制,所以孔隙水压升高,有效应力减小,堆积体强度降低. 径流的流速达到  $1\text{ m/s}$ <sup>[7]</sup>,可以在坡面产生冲蚀作用,带动浅层堆积体一起向下滑动,不利于边坡的稳定. 径流经过坡趾的时候会带走部分堆积体颗粒,出

现临空面,导致后退式滑坡的产生. 另外, Lu 等<sup>[14]</sup>发现细粒在迁移过程中会产生具有润滑作用的水膜,降低了颗粒之间的咬合力,导致土体强度降低. 坡面径流和细粒迁移之间相互耦合作用,共同导致堆积体强度降低,边坡失稳.

4 结 论

浸润面到达后水的体积分数持续增加直至饱和,地下水水位才开始增高. 坡顶的位移较大,坡趾处的位移较小,位移的增大有一个加速过程. 在滑坡启动的瞬间,倾斜角突然增大,加速过程极短. 边坡失稳过程中声发射撞击数先缓慢上升再急剧上升,急剧上升期预示着滑坡的即将来临,可作为边坡失稳的预警. 边坡失稳与坡面径流和细粒迁移密切相关.

参考文献:

[ 1 ] Iverson R M. Landslide triggering by rain infiltration [ J ]. *Water Resources Research*,2000,36(7) :1897 – 1910.

[ 2 ] Hong Y,Adler R,Huffman G. Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment [ J ]. *Geophysical Research Letters*,2006,33(22) :1 – 5.

[ 3 ] Sharma R H, Nakagawa H. Numerical model and flume experiments of single-and two-layered hillslope flow related to slope failure [ J ]. *Landslides*,2010,7(4) :425 – 432.

[ 4 ] Tsuchida T, Athapaththu A, Kawabata S, et al. Individual landslide hazard assessment of natural valleys and slopes

based on geotechnical investigation and analysis [ J ]. *Soils and Foundations*,2014,54(4) :806 – 819.

[ 5 ] Orense R,Shimoma S,Maeda K, et al. Instrumented model slope failure due to water seepage [ J ]. *Journal of Natural Disaster Science*,2004,26(1) :15 – 26.

[ 6 ] Regmi R K,Jung K,Nakagawa H, et al. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall [ J ]. *Catena*,2014,122:27 – 41.

[ 7 ] Cui P,Guo C,Zhou J, et al. The mechanisms behind shallow failures in slopes comprised of landslide deposits [ J ]. *Engineering Geology*,2014,180:34 – 44.

[ 8 ] Fang H, Cui P, Pei L Z, et al. Model testing on rainfall-induced landslide of loose soil in Wenchuan earthquake region [ J ]. *Natural Hazards and Earth System Science*,2012,12(3) :527 – 533.

[ 9 ] Wu L Z, Huang R Q, Xu Q, et al. Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures [ J ]. *Environmental Earth Sciences*,2015,73(12) :8519 – 8531.

[ 10 ] Anderson M G,Holcombe E. Community-based landslide risk reduction:managing disasters in small steps [ M ]. Washington D C:World Bank Publications,2013.

[ 11 ] Dixon N, Spriggs M P, Smith A, et al. Quantification of reactivated landslide behaviour using acoustic emission monitoring [ J ]. *Landslides*,2014,12(3) :1 – 12.

[ 12 ] Dixon N,Smith A,Spriggs M P, et al. Stability monitoring of a rail slope using acoustic emission [ J ]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2015,168(5) :373 – 384.

[ 13 ] Smith A, Dixon N, Meldrum P, et al. Acoustic emission monitoring of a soil slope: comparisons with continuous deformation measurements [ J ]. *Géotechnique Letters*,2014,4(4) :255 – 261.

[ 14 ] Lu X, Ye T, Cui P, et al. Numerical investigation on the initiation mechanism of debris-flow under rainfall [ J ]. *Journal of Mountain Science*,2011,8(4) :619 – 628.