

DOI: 10.11779/CJGE201410004

# 降雨诱发粉土边坡失稳的离心模型试验及雨强—历时警戒曲线的验证

詹良通, 刘小川, 泰培, 陈云敏

(软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 中国东南沿海山地丘陵地区气候湿润, 每年梅雨季和台风侵袭时都伴随有大量土质滑坡, 研究降雨诱发土质滑坡的失稳模式和机理对该类滑坡预警预报及防治具有重要意义。笔者自行研制了离心机机载降雨模拟装置, 在 50g 条件下模拟和再现了非饱和粉土边坡在不同强度降雨条件下的失稳破坏过程, 揭示了降雨诱发粉土边坡的失稳模式为坡脚局部失稳—向上扩展—整体浅层滑动, 滑动面深度介于 1~3 m。3 组试验获得了降雨强度与边坡失稳时降雨历时关系数据, 与李鹤等针对东南沿海地区残积土边坡提出的雨强—历时警戒曲线(I-D 曲线)最为接近, 验证了该降雨量警戒曲线的有效性。对离心模型试验结果进行反分析表明: 非饱和土渗流分析能有效模拟边坡降雨入渗过程, 而现有极限平衡分析方法难以准确捕捉降雨诱发边坡由局部向整体发展的失稳过程。基于所揭示的失稳模式, 指出了该类降雨诱发滑坡的有效防治措施主要包括坡脚加强排水和支护、坡面防渗和防护。

**关键词:** 降雨诱发滑坡; 失稳模式; 降雨强度; 降雨历时; 离心模型试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)10-1784-07

**作者简介:** 詹良通(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程等方面的教学和科研工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

## Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in silty soils and validation of intensity-duration curves

ZHAN Liang-tong, LIU Xiao-chuan, TAI Pei, CHEN Yun-min

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** As the southeastern coastal area in China has a humid climate, lots of landslides in soil slopes are induced by rainfall during the rainy season and typhoons every year. It is of great importance to investigate the failure modes and mechanism of rainfall-induced slope instability. A rainfall simulator installed on the centrifuge model box is developed, and the failure process of the silty slope subjected to different rainfall intensities is reproduced. The observed failure mode starts from local failure at the slope toe, extends upward and finishes with a global shallow landslide. The depth of the slip surface is 1 to 3 m. It is found that the data points of relationship between rainfall intensity and rainfall duration from the three centrifugal model tests are close to the intensity-duration curve proposed by Li et al. (2012) for the early warning of landslides in a residual soil slope in the southeastern coastal area of China. The back analyses of the experimental results indicate that unsaturated seepage analysis is able to simulate the rainfall infiltration processes into the slope, but it is difficult for the existing limit equilibrium methods to capture the local to global failure process induced by rainfall accurately. Based on the observed failure modes, the mitigation measures for this kind of rainfall-induced instability mainly include draining and retaining at the toe of slopes as well as reducing infiltration on the slope surface.

**Key words:** rain-induced slope failure; failure mode; rainfall intensity; rainfall duration; centrifuge modelling

## 0 引言

中国东南沿海地区山地丘陵发育, 滑坡是该地区最主要的地质灾害, 且以土质浅层滑坡为主<sup>[1-2]</sup>, 加之该地区雨量充沛, 连续阴雨的梅雨期及暴雨频繁的台风期都是该地区滑坡易发的时段。由降雨引发的滑坡

灾害不仅给居民的生命和财产造成了巨大损失, 也严

**基金项目:** 国家自然科学基金仪器专项项目(51127005); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2012CB719800); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金项目

**收稿日期:** 2014-01-02

重影响了交通及其它基础设施的安全运营。在全球变暖的大环境下, 极端气候越发频繁, 滑坡灾害有愈演愈烈之势, 因此研究降雨诱发滑坡的失稳模式和机理及其预警预报方法具有重要意义。

关于降雨诱发滑坡的失稳模式及机理的研究, 早期是通过理论分析及 1g 下的模型试验进行的。离心机模拟技术具有“缩时”与“缩尺”效应, 可以用小尺寸模型还原实际边坡的重力场, 完整的重现边坡失稳过程。在国外已有一些学者开始利用离心模拟技术来研究降雨诱发滑坡的问题。Kimura 等<sup>[3]</sup>在 1991 年研究了材料为粉土与细砂的混合物和碎煤渣的松散堆积边坡在强降雨条件下的失稳机制。Take 等<sup>[4]</sup>在 2002 年研究了黏性土路堤边坡在干湿循环条件下含水率周期变化引起的渐进累积破坏过程。在国内, 姚裕春等<sup>[5]</sup>在 2004 年研究了红黏土边坡在降雨条件下的破坏机理, 强调了含水率是导致不同破坏形式的重要因素。钱纪芸等<sup>[6]</sup>在 2010 年研究了黏性土坡在中雨强度下的变形机制。现有研究加深了对降雨诱发滑坡失稳机理的认识, 但目前的工作大多偏于定性研究, 定量的研究较少。Ling 等<sup>[7]</sup>在 2009 年利用土工离心机研究了 3 种不同掺量高岭土的砂土边坡在不同雨强条件下的失稳过程, 通过不同工况条件(土性、坡角, 坡高等)的 26 组离心模拟试验获得了降雨强度及边坡失稳时降雨历时的关系, 并与现有的雨强-历时(I-D)警戒曲线进行了对比分析。

关于降雨诱发滑坡的预警预报, 关键就是确定降雨量警戒值, Intensity-Duration 曲线是目前国内外常用的降雨量警戒值曲线, 其以平均雨强为纵坐标, 边坡失稳所需经历的降雨历时为横坐标, 在双对数坐标系内绘制而成。常用的 I-D 曲线一般是下限曲线, 即只有当边坡经受的雨强及降雨历时超过该曲线时, 才有可能发生滑坡。Campbell<sup>[8]</sup>、Caine<sup>[9]</sup>、Guzzetti 等<sup>[10]</sup>通过对已有滑坡、泥石流的现场调查数据进行统计或对已有的 I-D 曲线进行归纳总结, 分别提出了针对所研究地区的 I-D 曲线。I-D 曲线一般是区域性的经验曲线, 存在局地性问题。李鹤, 詹良通等<sup>[1-2]</sup>根据东南沿海地区残积土边坡地形、地质条件和气候条件的调查统计数据, 应用非饱和-饱和渗流数值模拟和边坡极限平衡分析方法确定了适合于东南沿海地区的降雨量警戒值 I-D 曲线, 但其曲线的正确性有待试验及现场数据的进一步验证。

笔者自行研制了降雨模拟装置, 在 50g 条件下模拟和再现了非饱和粉土边坡在不同降雨强度作用下的失稳过程, 揭示了粉土边坡的失稳模式和机理, 得出降雨强度与边坡失稳时降雨历时组成的若干数据点,

与李鹤, 詹良通等<sup>[1-2]</sup>针对东南沿海地区残积土边坡提出的 I-D 曲线进行比较, 验证了该警戒曲线的有效性。

1 试验原理及设备

关于离心机模拟土体渗流的相似比尺问题, Goodings<sup>[11]</sup>在 1984 年就已得出结论, 当模型与原型材料一致时, 则 Ng 下模型的渗流速度是原型的 N 倍, 这也被后来的研究者普遍接受。Kimura<sup>[3]</sup>、张敏等<sup>[12]</sup>、Satoshi 等<sup>[13]</sup>、Askarinejad 等<sup>[14]</sup>、Caicedo 等<sup>[15]</sup>均在各自的文章中指出降雨入渗的相似比尺, 与 Goodings 的结论类似, 即降雨入渗可以作为边坡的流量边界, 降雨强度与渗流速度又有着相同的量纲, 即 LT<sup>-1</sup>, 根据相似理论, 量纲一致, 降雨入渗的比尺与渗流的比尺也是一致的。本文涉及到各物理量相似比尺总结见表 1。

表 1 降雨相关各物理量的相似比尺

Table 1 Similarity relationship of rainfall between centrifugal model and prototype

物理量	量纲	原型	模型
长度	L	1	1/N
渗流速度	L/T	1	N
渗透系数	L/T	1	N
渗流时间	T	1	1/N <sup>2</sup>
降雨总量	L	1	1/N
降雨历时	T	1	1/N <sup>2</sup>
降雨强度	L/T	1	N

本次试验在浙大 ZJU-400 土工离心机上进行, 自行研制了机载降雨模拟装置(如图 1), 主要由 Y 型过滤器, 减压阀, 管道水压传感器, 用于控制降雨开闭的电磁阀和模拟降雨用的 Hago 牌雾化喷嘴组成。该装置可模拟 1~30 mm/h 的雨强范围, 覆盖小雨到大暴雨, 见图 2。装置在试验前进行了 Ng 下降雨的均匀性测试, 结果表明该装置工作性能稳定, 均匀度可达 85%。



图 1 降雨模拟装置实物图

Fig. 1 Photo of rainfall simulator

试验总体布置如图 3 所示。模型边坡由粉土填筑而成, 长 950 mm, 宽 400 mm, 50g 下分别对应原型为 47.5 m 和 20 m。喷头与边坡距离为 16.3 cm。坡底设置有挡板及泄水孔, 将水流引至模型箱下部的预留

蓄水层。

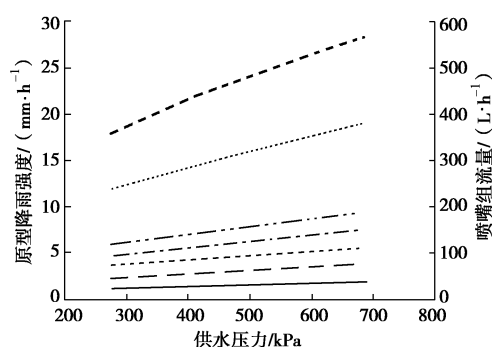


图2 降雨装置所能模拟雨量范围

Fig. 2 Range of rainfall intensity simulated by rainfall simulator

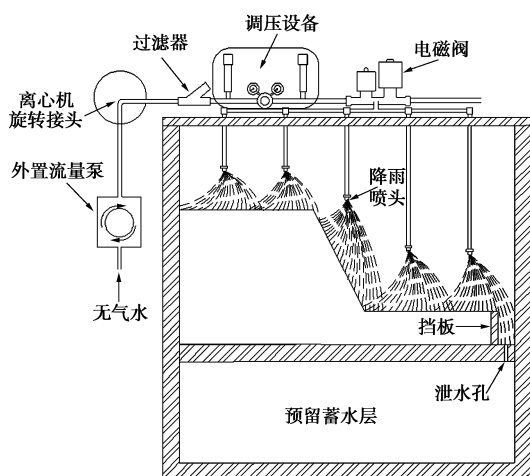


图3 试验总体布置示意图

Fig. 3 Layout of tests

## 2 试验方案

本试验模拟的对象为钱塘江砂质粉土组成的边坡,坡高 400 mm, 50g 下对应原型为 20 m 高的边坡,坡底以下的地基土高 100 mm, 对应原型 5 m 高;坡角  $63^\circ$ , 按边坡分类属陡坡。共开展了 3 组试验(试验 1, 试验 2 和试验 3), 试验工况如表 2 所示, 3 组试验制备相同的边坡模型, 在 50g 下施加不同降雨强度, 分别为 90, 140, 270 mm/h, 对应原型雨强分别为 1.8, 2.8, 5.4 mm/h, 分别属于中雨、大雨、暴雨。试验过程中观测降雨诱发粉土边坡失稳模式, 测定边坡失稳时的降雨历时, 获得降雨强度与边坡失稳时降雨历时组成的数据点, 与李鹤、詹良通等<sup>[1-2]</sup>提出的 I-D 曲线进行比较, 验证曲线的有效性。

## 3 试验用土及模型制备

### 3.1 模型土料

试验用土为钱塘江砂质粉土, 其颗粒级配曲线如图 4 所示, 粉土比重  $G_s$  为 2.69, 塑限 22.6%, 液限 31.7%, 压实最优含水率为 18%。

试验用粉土的土水特征曲线(即质量含水率-基质吸力关系曲线)如图 5 所示, 其进气值约为 25 kPa, 残余质量含水率约为 5.5%。由变水头法(SL237—1999)测得的粉土饱和渗透系数为  $5.3 \times 10^{-6}$  m/s, 根据 Van<sup>[16]</sup>在 1980 年提出的计算模型与吸湿曲线可计算得到该粉土渗透系数-基质吸力关系曲线。

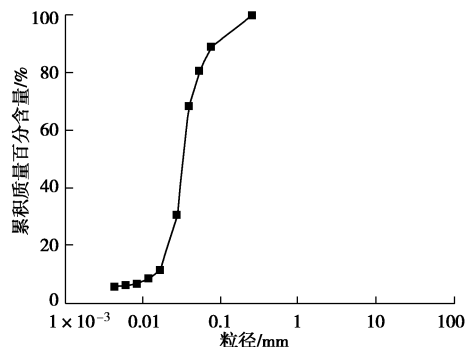


图4 钱塘江砂质粉土颗分曲线

Fig. 4 Particle-size distribution curve of silty soils

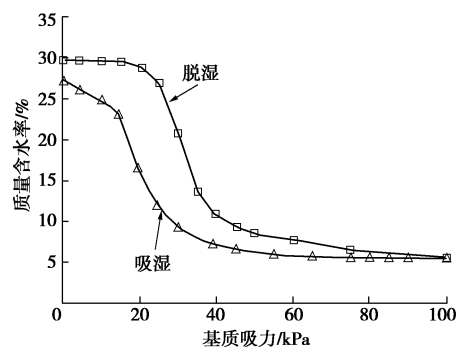


图5 钱塘江砂质粉土 SWCC 曲线

Fig. 5 SWCC curves of silty soils

该粉土的凝聚力 and 有效内摩擦角分别为 0 kPa 和  $33.5^\circ$ 。峰值抗剪强度对应的内摩擦角为  $36^\circ$ 。根据前人研究的成果可知, 降雨诱发的滑坡一般为浅层滑坡, 滑动面上的应力较小, 因此下文稳定性分析采用粉土的峰值强度参数。

### 3.2 模型制备

首先将模型土料过 2 mm 筛, 去掉一些大颗粒, 之后平摊到事先铺好的塑料布上, 将结块敲碎, 洒水后包裹一晚待其水分充分扩散后搅拌均匀, 装箱备用。之后采取分层填筑(分 8 层填筑, 每层 50 mm)、人工击实、人工削坡的方法制作模型, 其中坡顶与坡底均有较小的倾斜角度, 约为  $1.4^\circ$ , 防止坡顶和坡底产生积水, 便于排水。3 组试验模型填筑干密度均为  $1.5 \text{ g/cm}^3$ 。为了使边坡破坏的现象更加直观, 在坡高 0, 5, 10, 15 cm 处铺设了事先染成蓝色的福建标准砂, 在 20, 25 cm 处铺设了事先染成红色的福建标准砂(图 7), 彩砂层厚度约为 1 mm。

在预试验中发现大雨及暴雨两种雨强下降雨对坡面的冲刷侵蚀较为严重, 因此在这两次试验中采用医

用薄纱布保护坡面,即在坡面贴满尺寸  $8\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  的纱布片,所用纱布透水性能好,不会阻滞降雨的入渗,同时纱布沾湿后可紧密贴牢坡面,从而有效的减小冲刷侵蚀造成的水土流失。

## 4 试验过程及监测

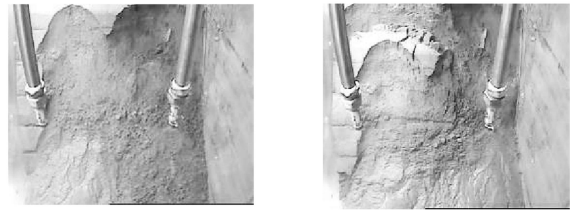
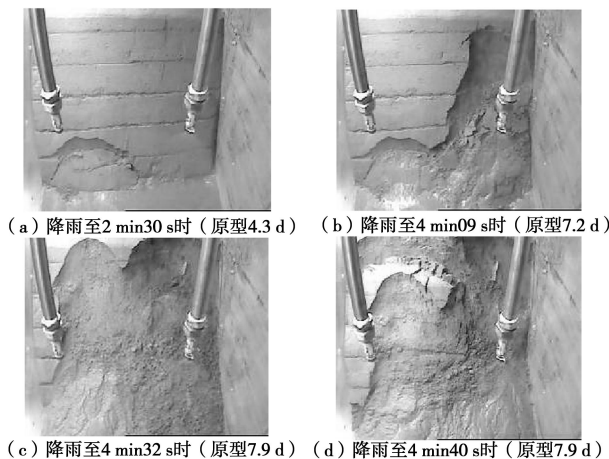
将模型箱装备好后,启动离心机,在  $10g$ ,  $20g$ ,  $30g$ ,  $40g$  下分别稳定运行  $5\text{ min}$ ,在  $50g$  下稳定运行  $10\text{ min}$  后开始模拟降雨,持续降雨至边坡发生整体失稳破坏之后停止降雨,离心机减速运行至停机。

安装了 2 个摄像头分别从模型箱外部和内部记录边坡破坏过程,通过摄像记录下边坡失稳的准确时间;试验前后在坡顶距边坡后缘  $120\text{ mm}$  处分别钻 2 个孔取样测试含水率剖面,见图 9 (a)。

## 5 试验结果分析及数值模拟

### 5.1 边坡破坏过程及失稳模式

图 6 显示了试验 1 中等强度降雨后几个失稳破坏时间点的摄像画面,边坡整体破坏后的最终形态及其滑面位置如图 7 所示。降雨开始后,由于水分入渗,土体饱和度逐渐增加,抗剪强度降低,重度增加,出现软化破坏现象。降雨至  $2\text{ min}30\text{ s}$  时首先在坡脚处发生局部破坏,对应原型滑坡体高  $4.5\text{ m}$ ,宽  $9.5\text{ m}$ ,滑面深度约  $1.0\text{ m}$ 。降雨至  $4\text{ min}09\text{ s}$  时在坡脚破坏处的右方又发生了更大范围的局部破坏,对应原型滑坡体高  $12.5\text{ m}$ ,宽  $8\text{ m}$ ,滑面深度约  $1.5\text{ m}$ 。在此之后的  $23\text{ s}$ 、 $31\text{ s}$ 、 $57\text{ s}$  时在第二次破坏的左侧又相继发生了 3 次类似的浅层局部滑动破坏,破坏面继续扩展,此时下部浅层土体已基本全部塌落,坡角增加到近  $70^\circ$ ,稳定性进一步降低。当降雨至  $9\text{ min}58\text{ s}$  时,湿润锋进一步向坡内推进,此时发生了整体的大范围滑动破坏(整体大范围滑动破坏本文以单次滑坡体高度或宽度大于坡体总高度或宽度的  $3/4$  为判据),对应原型滑坡体高  $15\text{ m}$ ,宽  $15.4\text{ m}$ ,滑面深度约  $3.2\text{ m}$ 。



(e) 降雨至  $5\text{ min}06\text{ s}$  时 (原型  $8.8\text{ d}$ ) (f) 降雨至  $9\text{ min}58\text{ s}$  时 (原型  $17.3\text{ d}$ )

图 6 内部观测的边坡失稳过程

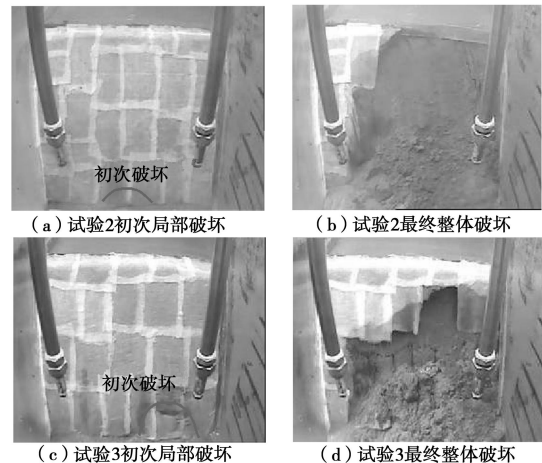
Fig. 6 Failure process of model slope

图 8 显示了试验 2 和试验 3 (大雨和暴雨强度) 试验中观测到的初次局部和最后整体破坏情况,由于坡面被纱布所遮盖,试验中观察到的初次破坏没有试验 1 那么直观。试验 2 初次局部破坏发生在  $1\text{ min}47\text{ s}$ ,对应原型时间约  $3\text{ d}$ ,滑坡体高  $2.5\text{ m}$ ,宽  $6\text{ m}$ 。整体滑动发生在  $6\text{ min}06\text{ s}$ ,原型时间约  $10.6\text{ d}$ ,滑坡体高  $20\text{ m}$ ,宽  $10\text{ m}$ 。试验 3 初次局部破坏发生在  $1\text{ min}07\text{ s}$ ,对应原型时间约  $2\text{ d}$ ,滑坡体高  $4\text{ m}$ ,宽  $7\text{ m}$ ,整体滑动发生在  $5\text{ min}14\text{ s}$ ,原型时间约  $9\text{ d}$ ,滑坡体高  $11\text{ m}$ ,宽  $18\text{ m}$ 。



图 7 边坡破坏后的最终形态及其滑面位置

Fig. 7 Final shape and location of sliding surface after last failure



(a) 试验 2 初次局部破坏 (b) 试验 2 最终整体破坏

(c) 试验 3 初次局部破坏 (d) 试验 3 最终整体破坏

图 8 试验 2 和试验 3 的初次及整体破坏形态

Fig. 8 Front view of first and global slope failures in tests No. 2 and 3

可见, 3 组不同雨强模拟试验中粉土边坡失稳模式基本一致, 均经历了由局部向整体发展的过程, 即首先在近坡脚处发生局部失稳, 然后失稳范围逐步扩展, 边坡整体坡度逐步增加, 最后发生浅层整体滑动。

### 5.2 降雨前后坡体含水率的变化

如前所述, 试验前后均在采样点 1 和 2 处钻孔取

样, 测试降雨入渗造成的含水率 - 深度剖面变化, 两个取样点的测试结果基本一致。图 9 显示了 3 次试验前后在采样点 1 获得的含水率剖面的比较。试验前获得的 3 剖面非常接近, 均在 16% 左右, 稍低于土料目标含水率 18%, 这是由于模型制备过程中蒸发等因素造成的。3 剖面的一致性说明模型制备的可重复性和模型内部含水率的空间分布是比较均一的。

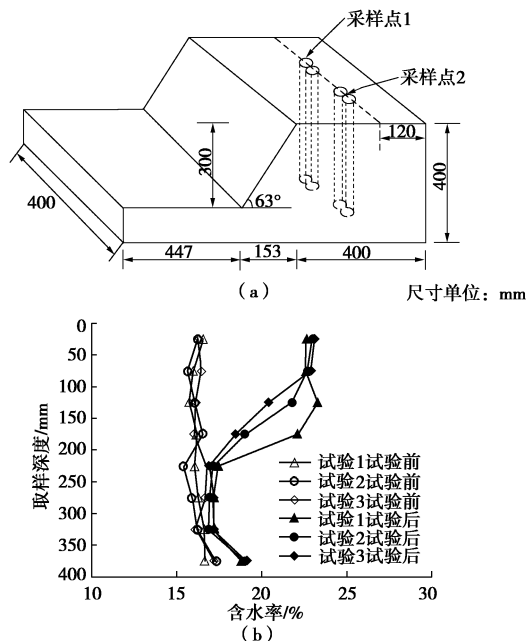


图 9 3 次试验前后含水率剖面比较

Fig. 9 Comparison of moisture content profiles before and after tests No. 1~3

如图 9 所示, 停机后钻孔取样测得的浅层含水率明显增加, 3 次试验浅层土体的含水率均由初始的约 16% 增加到 22% 左右。但随着深度的增加含水率剖面变化的拐点 (即湿润锋深度) 有所差别, 雨强越小, 降雨历时越长, 湿润锋深度越深。

5.3 I-D 曲线的验证

表 2 显示了 3 次试验施加的雨强及初次破坏和整体失稳时的降雨历时, 可见, 随着雨强的增大, 边坡初次破坏和整体失稳时降雨历时均减少。将这 3 组试验获得的雨强-历时数据点与现有的 I-D 曲线进行比较, 如图 10 所示, 3 次试验所得的初次破坏数据点均与李鹤、詹良通等<sup>[1-2]</sup>针对东南沿海地区残积土边坡提出的 I-D 曲线最为接近。虽然试验 2 和试验 3 的初次破坏数据点分别与 Caine<sup>[9]</sup>和 Chien-Yuan (2005)

提出的曲线接近, 但 3 个数据点形成直线的斜率均明显大于其它 3 篇文献报道的 I-D 曲线斜率, 而与李鹤、詹良通等<sup>[1-2]</sup>提出的 I-D 曲线斜率基本一致。其中 Caine<sup>[9]</sup>提出的曲线是统计了全球 73 起滑坡与泥石流历史资料总结出的, 属于全球性 I-D 曲线; Chien-Yuan (2005) 和 Jibson (1989) 的曲线则分别针对台湾地区 and 香港地区的滑坡灾害, 均属于区域性 I-D 曲线。作为下限曲线, I-D 曲线中的降雨历时一般是以首次破坏的为准, 这也是出于预警预报的安全保守考虑。另外 3 个对应于边坡整体破坏的数据点位于所有的 I-D 曲线之上。本次试验结果对李鹤、詹良通等<sup>[1-2]</sup>提出的 I-D 曲线进行了有效验证。必须指出, 在特大暴雨强度范围今后还有待于补充一些数据点。

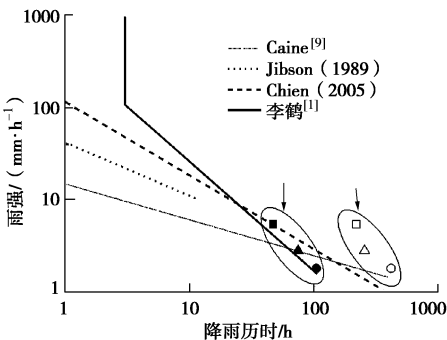


图 10 本次试验数据点与前人 I-D 曲线的比较

Fig. 10 Comparison between data points from this paper and known curves

5.4 数值模拟

利用 Geostudio 软件中的 SEEP/W 模块模拟了试验 1 对应的原型 20 m 高粉土边坡的降雨入渗过程。非饱和土边坡中初始吸力场由转机前实测的含水率剖面根据土水特征曲线推算得到, 初始吸力值为 33.1 kPa, 边坡内均匀分布。在 SEEP/W 的瞬态分析中输入降雨边界条件, 坡顶与坡底的雨强为  $5.0 \times 10^{-7}$  m/s, 坡面上的雨强需乘以坡角的余弦  $\cos 63^\circ$  为  $2.3 \times 10^{-7}$  m/s, 之后按照原型降雨时间 (17.3 d) 模拟了整个降雨过程。

通过瞬态渗流分析可以得到不同降雨历时对应的边坡内部孔压分布。图 11 显示了不同降雨历时 A-A' 剖面 (如图 12 所示) 的孔压随深度分布曲线, A-A' 剖面对应于含水率剖面取样位置。该图中孔压分布曲线变化反映了湿润锋的发展规律, 可见, 随着降雨历

表 2 试验项目及结果

Table 2 Conditions and results for three tests

试验项目	初始状态		试验雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )		初次局部破坏时间		整体失稳时间	
	平均干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	平均含水率/%	模型	原型	模型/s	原型/h	模型/s	原型/h
试验 1	1.5	16.40	90	1.8	150	104.2	598	415.3
试验 2	1.5	16.15	140	2.8	107	74.3	366	254.2
试验 3	1.5	16.44	270	5.4	67	46.5	314	218.1



时增加, 湿润锋向边坡内部逐渐推进, 从图 11 可大致得出各次破坏时间点对应的湿润锋深度。4.3 d 时湿润锋到达深度为 0.85 m (原型), 此时观测得到滑面深度为 1.0 m; 7.9 d 时湿润锋到达深度为 1.6 m (原型), 滑面深度 1.5 m; 17.3 d 时湿润锋到达深度为 3.5 m (原型), 滑面深度为 3.2 m。从以上数据看出, 湿润锋的到达深度略大于滑面深度。

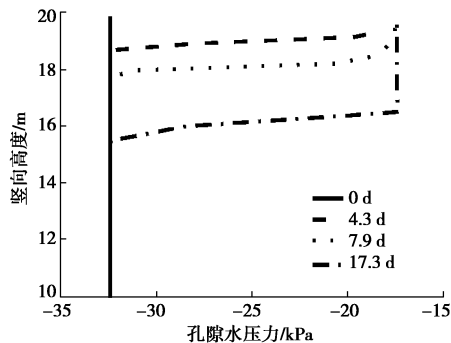


图 11 A-A' 剖面不同破坏历时孔压曲线

Fig. 11 Different failure time of pore water pressure section of A-A' section

根据渗流分析得到的各时间点孔压分布, 利用 Geostudio 软件中的 SLOPE/W 模块计算了试验 1 降雨过程中不同破坏时间点原型边坡的稳定安全系数。

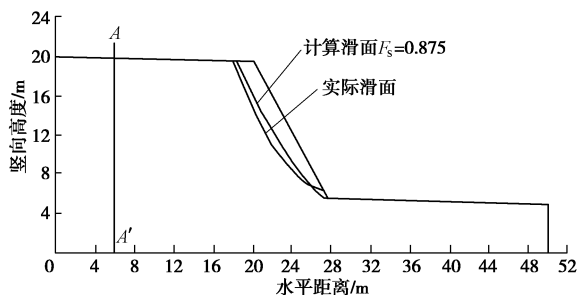


图 12 降雨 17.3 d 后的计算滑面与实际滑面的比较

Fig. 12 Comparison between simulated sliding surface and observed ones after 17.3 days' rainfall

模拟的结果表明, 边坡未降雨时的安全系数为 1.108, 与模型边坡稳定情况相符。4.3 d 时边坡的安全系数为 1.002, 模型边坡此时在坡脚处发生了局部破坏, 中间几次局部破坏时间点对应的安全系数在 0.979 到 0.987 之间, 说明这个时候段内边坡安全系数已较低。在 17.3 d 时的安全系数为 0.875, 此时模型边坡发生了整体滑动破坏。如图 12 所示, 降雨 17.3 d 后计算滑面与试验观测到滑面的深度基本一致, 但形状有所不同, 计算的结果为近直线形滑面, 观测得到的为圆弧形滑面, 该差别可能与此时边坡下部已多次发生局部破坏导致整体坡度发生变化有关。从整个稳定性模拟的结果来看, SLOPE/W 软件是无法模拟粉土边坡这种先局部然后发展为整体的破坏模式的, 这种降雨诱发的渐进式破坏的稳定分析方法还需进一步研究。

将渗流模拟得到的试验前后取样位置处的含水率

剖面与实测值进行比较, 见图 13。可以看出试验后实测含水率曲线的拐点比计算所得的低 6.5 m (原型), 而且试验后坡高 16.5 m 以上的土体实测含水率比计算值平均小 6% 左右。这可能是由于降雨停止时到离心机完全停机 (完全停机后便立即测量试验后含水率剖面) 这一时间段边坡内含水率的重新分布所致。模型试验中降雨停止到离心机完全停机的时间间隔约为 10 min, 在这 10 min 内离心加速度从 50g 降低到 1g, 因此仍处于加速渗流状态。这段时间内边坡内部水分发生重分布, 坡体上部入渗的水分在此段时间内继续下渗, 造成实测的湿润锋下移, 浅层土体含水率降低。由此可知, 试验前后取含水率剖面的方法并不能真实的反映湿润锋的运移过程, 后续试验中应在边坡内部不同高度处理设微型张力计或 TDR 来实时监测湿润锋的发展及孔压变化。

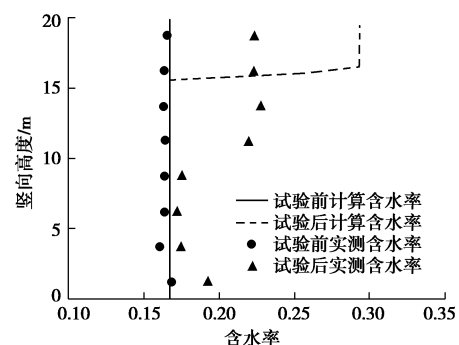


图 13 试验前后实测含水率与计算含水率的比较

Fig. 13 Comparison between experimental moisture contents and theoretical ones before and after tests

降雨诱发粉土边坡由坡脚局部坍塌向整体发展的失稳模式表明坡脚防护是该类滑坡的防治关键, 可有效降低边坡渐进累积破坏的可能性。坡脚防护措施包括加强排水以降低浸润线和适当支护, 如在坡脚处修建顺坡向排水盲沟及挡土结构。在此基础上, 对坡面进行防渗处理, 可有效减少降雨入渗, 保持非饱和土边坡的吸力和整体稳定性。坡面防渗措施包括浅层土体再压实, 坡面喷射混凝土护面等。

## 6 结论及建议

本文介绍了降雨诱发非饱和粉土边坡失稳破坏的 3 组离心模型试验, 通过对试验结果的分析 and 讨论得出了如下结论:

(1) 利用离心模型试验有效地揭示了降雨诱发粉土边坡由局部向整体发展的失稳模式, 即随着降雨的持续, 边坡首先在近坡脚处发生局部失稳, 然后失稳范围逐步扩展, 边坡整体坡度逐步增加, 最后发生浅层整体滑动, 滑动面深度介于 1~3 m。

(2) 3 组不同降雨强度的试验中初次滑动观测结果表明: 施加的雨强越大, 初次破坏所需降雨历时越

短, 3 个数据点与李鹤、詹良通等针对东南沿海地区残积土边坡提出的 I-D 曲线最为接近, 验证了该警戒曲线的有效性。

(3) 非饱和土渗流分析得到的不同破坏时间点湿润锋到达深度略大于观测所得的滑面深度, 有效模拟了边坡降雨入渗过程。而现有极限平衡分析方法难以准确捕捉降雨诱发粉土边坡由局部向整体发展的失稳过程。

(4) 上述失稳模式表明坡脚防护是该类降雨诱发滑坡的防治关键, 坡脚防护有效措施包括坡脚加强排水和适当支护, 另外坡面防渗也将有助于保持非饱和土边坡的吸力和整体稳定性。

### 参考文献:

- [1] 李 鹤. 东南沿海残积土地区降雨型滑坡预警预报体系的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 32 - 34. (LI He. Study on early warning system for rain-induced slope failure in residual soils in southeast coastal region of China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 32 - 34. (in Chinese))
- [2] 詹良通, 李 鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报 Intensity-Duration 曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 872 - 886. (ZHAN Liang-tong, LI He, CHEN Yun-min, et al. Parametric analyses of Intensity-Duration curve for predicting rain-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 872 - 886. (in Chinese))
- [3] KIMURA T, TAKEMURA J, SUEMASA N, et al. Failure of fills due to rainfall[C]// Centrifuge 91. The Netherlands, 1991: 509 - 516.
- [4] TAKE W A, BOLTON M D. An atmospheric chamber for the investigation of the effect of seasonal moisture changes on clay slopes[C]// Proc Int Conf on Physical Modeling in Geotechnics. Rotterdam Netherlands: Balkema, 2002: 765 - 770.
- [5] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机制离心模型研究[J]. 中国铁道科学, 2004, **25**(4): 64 - 68. (YAO Yu-chun, YAO Ling-kan, YUAN Bi-yu. Analysis of a centrifugal model of slope damage mechanism during rainfall[J]. China Railway Science, 2004, **25**(4): 64 - 68. (in Chinese))
- [6] 钱纪芸, 张 嘎, 张建民. 降雨条件下土坡变形机制的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**: 398 - 402. (QIAN Ji-yun, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge model tests for deformation mechanism of soil slope during rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**: 398 - 402. (in Chinese))
- [7] LING H I, WU M H, LESHCHINSKY D, et al. Centrifuge modeling of slope instability[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2009, **135**(6): 758 - 767.
- [8] CAMPBELL R H. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountain and vicinity, southern California[M]. Washington D C: U S Government Printing Office, 1975: 851.
- [9] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. Geografiska Annalar, 1980, **A62**: 23 - 27.
- [10] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, **98**: 239 - 267.
- [11] GOODINGS D J. Relationships for modeling water effects in geotechnical centrifuge models[C]// Proc of Symposium on Application of Centrifuge Modeling to Geotechnical Design, 1984: 1 - 24.
- [12] 张 敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊): 53 - 57. (ZHANG Min, WU Hong-wei. Rainfall simulation techniques in centrifuge modelling of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 53 - 57. (in Chinese))
- [13] SATOSHI T, NAOYUKI I, AKIRA E. Experimental analysis on shallow failure of slope in consideration of relationship between ground permeability and precipitation intensity[R]. Tokyo, 2007, **35**: 33 - 58.
- [14] ASKARINEJAD A, LAUE J, ZWEIDLER A, et al. Physical modelling of rainfall induced landslides under controlled climatic conditions[C]// The 2nd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Delft, 2012: 23 - 24.
- [15] CAICEDO B, TRISTANCHO J. Centrifuge modeling of soil atmosphere interaction[M]// Unsaturated Soils. Alonso Gens, ed. London: Taylor & Francis Group, 2011: 627 - 632.
- [16] VAN G. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [17] DZ/T 0219—2006 滑坡防治工程设计与施工技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. (DZ/T 0219—2006 Specification of design and construction for landslide stabilization[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2006. (in Chinese))