DOI：10.16285/j.rsm.2017.12.020

土坡前端推力对降雨入渗响应的试验研究

许旭堂[1, 2, 3]，简文彬[2, 3]

（1. 福建农林大学 交通与土木工程学院，福建 福州 350002；2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所，福建 福州 350108；
3. 福建省地质灾害重点实验室，福建 福州 350002）

摘　要：降雨入渗可引起坡体前端推力发生显著改变，影响土坡的稳定和安全。利用构建好的降雨模拟和监测系统，对降雨诱发非饱和残积土坡失稳过程进行全方位、多参量的实时监测，着重分析不同位置、坡度、密实度和不同降雨条件下坡体前端推力的时变规律。结果表明：边坡上部土体含水率、吸力、坡体变形和下滑推力变化幅度较大，速度较快，而下部土体变化幅度较小，速度较慢；坡体前端推力变化可分为缓慢增加、加速上升和雨后衰减 3 个阶段，降雨过程中陡坡和高密实度边坡反映较为强烈，下滑推力峰值大于缓坡和低密实度边坡；降雨作用下新边坡坡体应力状态变化明显，较易失稳，而老边坡则相对比较稳定；高密实度和陡坡坡体内部的高应力区域在二次或多次降雨后可完全释放，边坡具有高水平的雨后剩余下滑力和更显著的土体软化效应。研究成果对进一步揭示闽东南地区降雨入渗对非饱和土坡的影响机制及对非饱和土强度与稳定性的弱化作用具有重要的理论及实际意义。

关　键　词：前端推力；非饱和残积土坡；时变规律；剩余下滑力；土体软化效应

中图分类号：TU 42　　**文献识别码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2017) 12－3547－08

Experimental study on rainfall infiltration of slope under thrust at front end

XU Xu-tang[1, 2, 3]，JIAN Wen-bin[2, 3]

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;
2. Institute of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Geological Hazards, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: The stability and safety of the soil slope will be threatened when the thrust at front end of slope change due to rainfall infiltration. Rainfall simulation system and monitoring system are used to make a comprehensive and real-time monitoring of rainfall-induced slope failure process of unsaturated residual soil. The real-time response of thrust at front end of slope with different locations, slope angles, densities and rainfall conditions are analyzed. Results show that the changing of water content, matric suction, body strain and thrust at front end of slope in the upper part of slope is with great range and speed, while the bottom part of slope with less range and speed. The change of thrust at front end of slope can be divided into slow increase, rise accelerate and attenuation three stages, compared with less angle and lower density slope, the changing of residual thrust in larger angle and higher density slope is more strong and with a higher peal value. The new slope is easier to fail than the old one under rainfall since a greater growth force in a new slope. The internal high stresses of larger angle and higher density slope inside can be fully released after repeated rain, i.e., a high level of residual slide force will be happened, and the effect of soil softening will be even more significant. The results are useful and meaningful for further revealing the influence mechanism of unsaturated soil slope under rainfall infiltration in Southeast of Fujian, to further understand the weakening effect of unsaturated soil strength and stability.

Keywords: thrust at front end of slope; unsaturated residual soil slope; real-time response; residual slide force; effect of soil softening

收稿日期：2016-01-29
基金项目：国家自然科学基金（No.41702288）；福建省教育厅中青年教师教育科研项目（No.JAT170173）；福建省自然科学基金（No.2015J0116）；交通土建师资队伍博士化国际化工程（No.113-612014051）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41702288), the Youth Teacher-Education Research Project of Fujian Education Department (JAT170173), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2015J01164) and the Project of Building Doctorial and International Transportation and Civil Engineering Faculty (113-612014051).
第一作者简介：许旭堂，男，1986 年生，博士，讲师，主要从事岩土工程与工程地质方面的研究工作。E-mail: xxtmdd@163.com
通讯作者：简文彬，男，1963 年生，博士，教授，主要从事岩土工程与工程地质方面的研究工作。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

1 引 言

滑坡的发生与地形地貌、岩土类型密切相关，受降雨、人工活动、地震和地下水变化等的诱发，主导滑坡诱发因素依次所占比例为[1]：降雨因素45%、人工活动 26%、地震 11%。降雨通过降低土体基质吸力、软化土体、冲刷坡面和抬升地下水位等来影响边坡稳定性[2–6]。降雨诱发滑坡是一个动态过程，降雨期间或雨后一段时间内，雨水入渗会导致非饱和土体吸力下降，降低土体的抗剪强度；未能入渗雨水会冲刷坡面、侵蚀坡脚，改变坡体原有结构；降雨引起地下水位上升的过程中，组成潜在滑体的土体有效自重应力减小，增加其侧向动水压力，导致边坡失稳。

降雨诱发滑坡成灾机制、风险评估与防灾、减灾方法的研究中应以机制研究为重点[7]，滑坡模拟的物理模型试验可有效揭示滑坡机制。在现场试验方面：Ochiai 等[8]开展现场模拟降雨条件下滑坡的流动性试验研究，结果表明，滑坡是先滑后流，最后发展成泥石流，并在 17 s 内流动 50 m；Tu 等[9]在实际研究场地上进行人工降雨模拟试验和原位综合监测，指出雨入渗造成 2 m 深度内土层孔压和含水率大幅增加，有效应力的减少和膨胀土吸水膨胀软化而导致土体的抗剪强度降低。在室内试验方面：王维早等[10]利用离心模型试验，再现强降雨引起红层地区堆积层边坡滑动失稳的全过程，根据边坡变形破裂特征参量，阐明边坡滑动失稳机制，通过模型和原型的综合对比分析，指出该边坡滑动失稳机制为推移式蠕滑－拉裂－整体滑动。孔维伟等[11]以物理模型试验再现台风滑坡演化过程，指出暴雨冲蚀引起土体软化是滑坡形成的首要因素，台风作用使坡上植被摇曳、土体松动，引起边坡裂缝发展和前缘土体失稳形成滑坡。詹良通等[12]借助自行研制的离心机机载降雨模拟装置，研究不同降雨条件下非饱和粉土边坡的失稳破坏过程，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。

上述研究更多集中于坡体内吸力、含水率变化及边坡失稳过程演变的研究，但重点开展针对闽东南残积土边坡应力性状变化的模型试验研究还较少。因此，本文以闽东南台风暴雨型非饱和残积土坡病害为基点，建立人工降雨和监测系统，研究不同降雨过程、不同坡度和密实度土坡前端推力对降雨入渗的响应，结合坡体内吸力、含水率和坡体变形实时变化规律，分析边坡应力性状变化，揭示降雨引起边坡应力状态改变机制，探讨降雨入渗对非饱和土强度与稳定性的影响。

2 试验概况

2.1 试验方案和步骤

试验用土取自福州大学南门残积土边坡，土体颗粒级配曲线见表 1。模型边坡填筑前通过击实试验确定所用土体的最大干密度为 1.57 g/cm^3，最优含水率为 23%。为研究不同密实度、坡度边坡的坡体前端推力与坡体变形、吸力和含水率的关系，本文设计 3 组无限边坡试验，试验方案见表 2。图 1 为边坡监测件埋设示意图，监测件的数量、编号、埋设深度、平面布置等基本信息，详见表 2。边坡成型过程中，为便于进行量化控制击实次数，采用木锤进行击实，击实详细过程见文献[13]。无限边坡坡体前端填筑 10 cm 细砂（见图 1），为便于安装土压力盒测试前缘土压力，前端设刚度较小的挡板，底部采用开孔模板以利于排水；同时，为不影响坡前推力测定，将土压力盒设置于竖向加劲肋上（见图 1）。

表 1 残积土颗分试验结果

Table 1 Residual soil size distribution testing results

土层	不同粒径(mm)颗粒组成/ %				
	>2	2～0.5	0.5～0.25	0.25～0.075	<0.075
残积黏性土	1	5	6.8	25.8	61.4

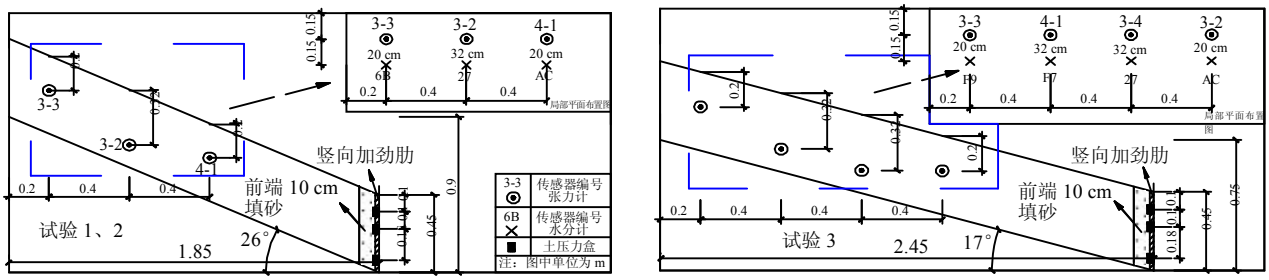
表 2 模型试验方案及监测件编号

Table 2 Scheme of experiments and monitoring sensors number

试验	监测点号	编号		埋深/cm	相对密实度/ %	坡角/(°)	监测件编号
		水分计	张力计				
1、2	1	6B	3-3	32	试验 1：84 试验 2：77	26	HS/XL-A-B-1/2 含义为：HS 指含水率、XL 指吸力、A 代表监测点号、B 表示测点埋深、1/2 表示第 1 次/第 2 次降雨
	2	27	3-2	20			
	3	AC	4-1	20			
3	1	F9	3-3	20	77	17	
	2	F7	4-2	32			
	3	27	3-4	32			
	4	AC	3-2	20			

2.2 监测系统及试验元器件

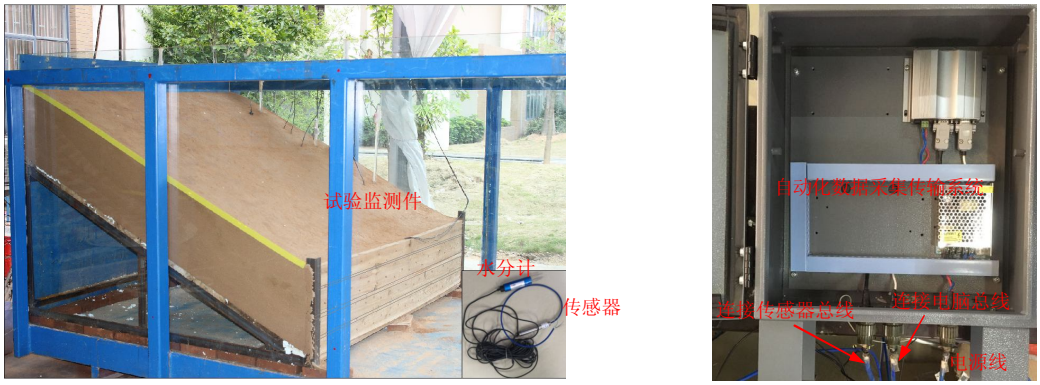
数据采集监测系统立足于 Windows 平台，全中文图形化界面，使用简便、直观，数据库采用 Paradox7，稳定可靠，便于维护、备份。拟埋设监测件在并入系统前（见图 2(a)），应保证其正常工作，并与各自对应传感器相连接，接入图 2(b)左侧总线。在正确设置好串行口参数后，需要设置数据记录文件，同时应将传感器编号及命名等信息录入和保存系统（见图 2(c)）。经调试后选择：降雨中



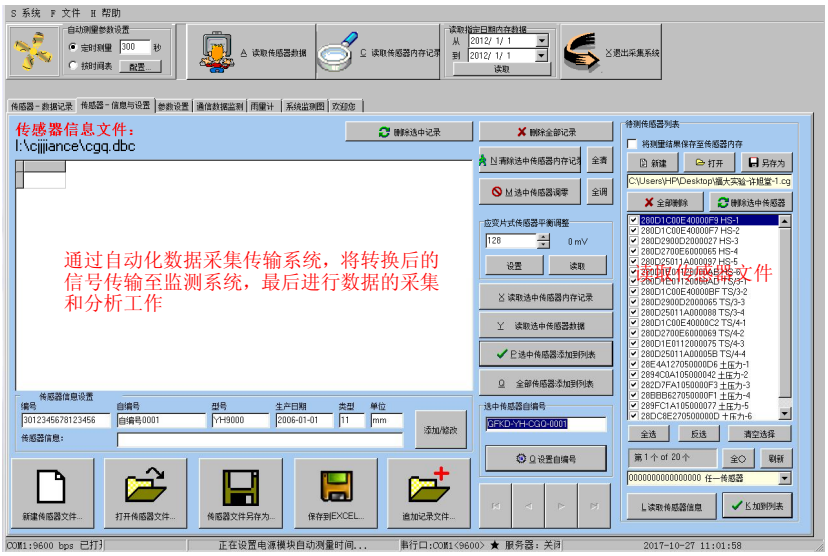
(a) 26° 无限边坡　　(b) 17° 无限边坡

图 1　边坡监测件埋设示意图（单位：m）

Fig.1　Schematic diagram of slope monitoring embedding (unit: m)



(a) 模型边坡　　(b) 数据采集传输系统



(c) 数据采集系统

图 2　自动化数据传输和采集系统示意图

Fig.2　Schematic diagram of automatic data transmission and acquisition system

采集时间每隔 12 min，初次降雨停止每隔 30 min，直至雨停 3 h，随后雨停 11 h 每隔 60 min 采集数据；二次降雨停止每隔 12 min 至雨停 5 h，随后雨停期间每隔 60 min 采集数据。

模型箱为固定式钢槽，通过设置大的模型箱（长×宽×高为 3 m×2 m×1.5 m）尽可能消除尺度效应带来的影响，经力学分析，主体结构采用 160 型槽钢和 80 型方钢焊接而成，前后为 5 mm 厚钢板，其中一个面可拆卸；两侧采用 15 mm 厚钢化玻璃。根据模型箱面积和多次现场率定，喷头布设采用 1、2、3 号喷头（直径分别为 9、11、13 mm）为一组，共 3 组，喷洒均匀度为 0.82，降雨强度范围为 17～170 mm/h。

实时坡体前端水平推力采用微型土压力传感器测量，其量程为 0～0.1 MPa，型号为 Φ 34 mm×7 mm，安装时应将传感器承压面朝拟测应力方向，

并与之垂直，同时必须保证安放平稳，确保传感器在量测过程中承压面不偏转。土压力盒间距为 10、28 cm，皆大于传感器间最小净距 5*r*（*r* 为传感器半径），土压力盒所测数据包含了土压力和水压力，即为总压力值。

2.3 降雨条件

闽东南地区 5、6 月的梅雨季，具有雨时长、雨量多、强度大、范围广的特点，伴有大雨到暴雨；而 7～9 月的台风、雷雨季降雨时空分布不均，受台风影响，常出现暴雨，炎热天气时常有雨后雷阵雨发生。考虑雨季强降雨工况和人工模拟降雨设备的特点，最后选择持时 6 h、雨强 30 mm/h 和持时 3 h、雨强 60 mm/h 做为模拟降雨的输入条件，第 1 次降雨过程：持时 6 h、雨强 30 mm/h，随后雨停 14 h；第 2 次降雨过程：持时 3 h、雨强 60 mm/h，随后雨停 12 h 两次累积降雨量一致，为 180 mm。

3 土坡前端推力对降雨入渗的响应

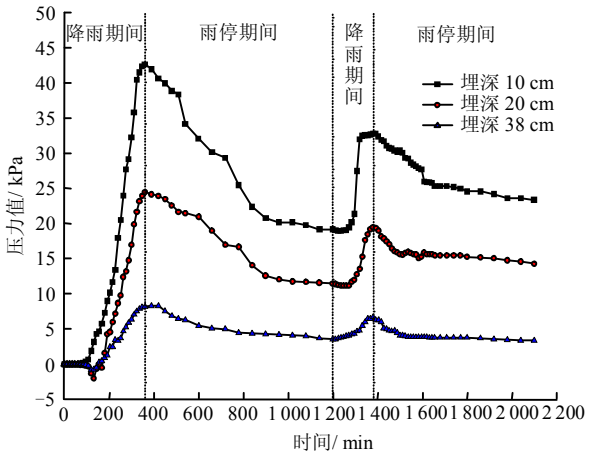
为了分析坡体内不同位置的水平推力在完整降雨期间的相对变化趋势，在模型边坡前沿埋设 3 组土压力传感器进行实时监测，并将降雨前的坡体各位置下滑推力值作为零参考点。试验结果见图 3。

3.1 不同降雨历程的实时变化

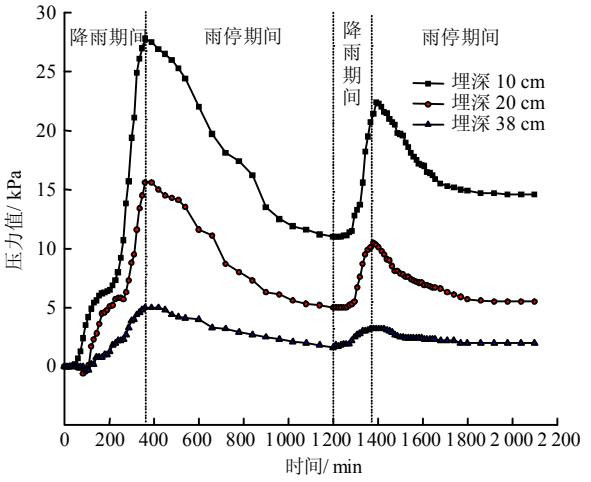
3 类无限边坡模型试验结果规律性比较一致。第 1 次降雨历程中，随着累积降雨量的增加，坡体前端下滑推力在降雨初期具有一定滞后性，随后快速增加，雨停后 10 cm 和 20 cm 处土体下滑推力减小速度由快到慢，而 38 cm 出下滑推力在雨停期内缓慢减小，可以预见，一旦停雨期加长，下滑推力可进一步降低直至一稳定数值;第 2 次降雨过程中，坡体继续下滑，坡体下滑力在原有剩余应力的基础上进一步增加。边坡前端下滑推力在降雨的作用下可达到峰值，降雨会引起土体软化，使土体强度降低，在某个时刻可能出现土体的下滑推力（降雨期间在增大）大于土体抗滑力（降雨期间强度减小）的情况，从而导致边坡失稳。

3.2 不同深度坡体前端推力变化

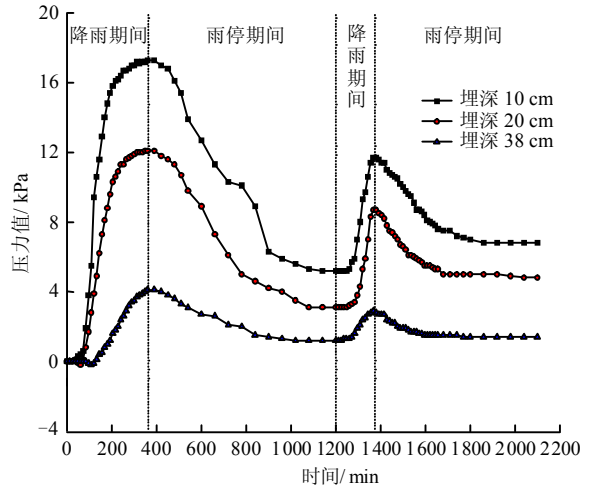
完整降雨过程中，埋设 10 cm 处的土压力盒读数增量最大，其次是 20 cm 和 38 cm 的压力盒，由上而下逐渐减小。坡体上部下滑力在雨停后显著变小，下降幅度和速度也最快，其他两层下滑力变化情况也基本与坡体上部相似。坡体上部土体上覆应力、应力水平都小于坡体下部，且约束也较小，土体状态易发生变化；坡表附近土体含水率、基质吸力受降雨影响显著，图 4 为降雨条件下土体含水率



(a) 试验 1



(b) 试验 2



(c) 试验 3

图 3 坡前推力与时间关系曲线

Fig.3 Relationships between thrust at front end of slope and real time

和吸力的实时变化规律，降雨期间坡面附近土体含水率（如 HS-2-20-1）、基质吸力（如 XL-2-20-1）变化速度快，变化幅度大；而坡底附近的含水率、基质吸力变化速度慢，变化幅度相对较小，这表明

坡表土体因降雨产生的附加荷载作用和软化效应最明显，根据毕肖普有效应力原理，土体骨架应力可由外部荷载和基质吸力作用引起，外部荷载不变情况下，土体吸水导致其吸力降低，吸力对土颗粒间应力的贡献程度下降，土体有效应力减小，土颗粒间的联接作用下降，应力释放，此时边坡的抗滑力易处于谷值，而坡体前端下滑力易处于峰值。

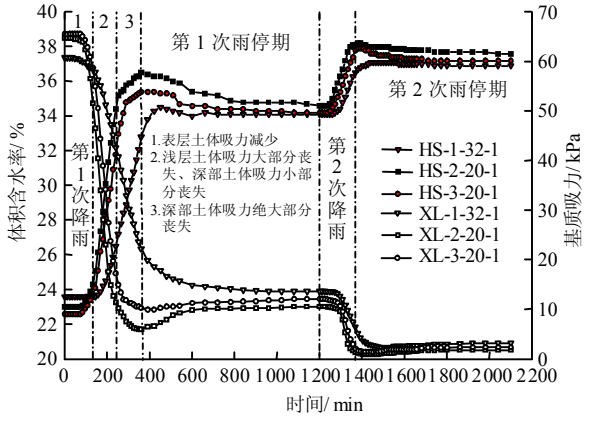


图 4　土体含水率和吸力的时变曲线

Fig.4　Real-time change curves of soil volumetric moisture content and matric suction

总之，越靠近坡面的位置，因降雨而产生边坡坡前推力峰值越大，同时，坡体含水率的迅速增加引起边坡土体强度处于谷值，此时边坡处于极不稳定状态，一旦坡体前端下滑力峰值超过其不断减小的抗滑力时，边坡就会发生失稳破坏，这也是土质边坡在降雨条件下易发生浅层破坏的原因；雨停后坡体下滑力会随着时间的推迟而逐渐减小，边坡会慢慢过渡至相对稳定的状态。

3.3　不同坡度坡体前端推力变化

坡度为 26° 和 17° 的模型边坡试验规律基本一致，但也有些差别。如图 3(a)、3(b)所示，初次降雨对陡坡影响明显，规律性较强，坡体下滑推力的峰值也较大，响应稍晚，并具有较快的变化速度；而降雨对 17° 边坡的影响规律不同于陡坡，坡体中、上部下滑力峰值变化有小平台出现，下滑力对降雨的响应较快，峰值相对较小，而坡体下部下滑力变化趋势与陡坡一致。后续降雨过程中，两者在各个深度的坡体下滑力皆再次在累积降雨量达最大时出现峰值，并在随后的停雨期缓慢回落。

高应力水平边坡（陡坡）需要足够的雨水入渗才会出现明显的变化，表现为响应晚，变化速度快；低应力水平边坡（缓坡）在降雨初期就可出现变化，表现为响应早，早期变化速度缓慢，随着降雨作用的持续，后期变化速度有所加快，但仍不如陡坡来得显著。二次降雨期间，第 1 次降雨过程中未完全释放的应力会在二次降雨进行释放，两者表现出的变化特性相同。

3.4　不同密实度坡体前端推力变化

如图 3(b)、3(c)所示，不同密实度模型边坡坡体中、上部下滑力具有降雨后期快速增大、雨后减小的特点，而坡体下部下滑力在降雨过程中缓慢增加，并在雨停后小幅下降。坡体上、中、下部下滑力峰值依次减小，二次降雨后下滑力峰值皆有所下降。高密实度边坡土体结构性强，土颗粒胶结作用强烈，土骨架稳定性好，降雨初期因雨水入渗不足，导致其无法出现变化；直至降雨入渗累积到一定程度后，坡体下滑力出现快速响应，在较短时间内迅速达到峰值。低密实度边坡土体结构性差、孔隙大，土颗粒间的胶结能力不足，降雨初期，土骨架较易因降雨形成的附加荷载和软化作用而破坏，继而边坡出现较早变化，但变化速度缓慢。

二次降雨过程中，无论是高密实度边坡，还是低密实度边坡，各部位坡体下滑力响应皆较为迅速，直至二次达到峰值，降雨停止后，坡体剩余下滑力仍具有较高水平，这表明高应力区域土体应力的释放过程并不一定会在一次降雨过程中就得到完全释放，如果边坡自身排水性能不足，短期内的二次降雨或是多次降雨会促使剩余应力得以完全释放，这也是自然界中一些边坡在多次降雨后发生失稳破坏的原因。

4　土坡应力性状对降雨过程的响应

降雨诱发残积土滑坡在亚热带和热带地区非常普遍，此类滑坡深度一般较浅（1～3 m），滑面通常是平行或近于平行斜坡表面[14–17]，根据 Fredlund 等[18]提出的非饱和土抗剪强度理论，无限边坡安全系数可表示为[19–20]

$$F_s=\frac{\text{抗滑力}}{\text{下滑力}}=\frac{c'+(\sigma_n-u_a)\tan\varphi'+(u_a-u_w)\tan\varphi^b}{\gamma_t z_w\sin\beta\cos\beta} \tag{1}$$

式中：c' 和 φ' 分别为有效黏聚力（kPa）和有效内摩擦角（°）；σ_n 为法向应力（kPa）；u_w、u_a 分别为孔隙水压力（kPa）和孔隙气压力（kPa）；γ_t 为土体重度（kN/m^3）；β 为坡角（°）；z_w 为边坡坡体深度（m）；φ^b 为吸力摩擦角。边坡稳定性分析所需参数由非饱和土室内试验成果和已有工程案例综合确定，取值如下：残积黏性土的重度 γ_t 为 18 kN/m^3，c' 和 φ' 分别为 24 kPa、18°，φ^b 为 12°。根据实时监测资料，即可做出试验 1 坡体上

部总水平推力（结合不同位置坡体前端水平推力，将坡体上部水平推力近似为线性分布后换算所得）和平均含水率与时间的关系（见图 5）以及不同深度边坡坡前推力和安全系数、坡体变形随时间的变化趋势图（见图 6、7）。

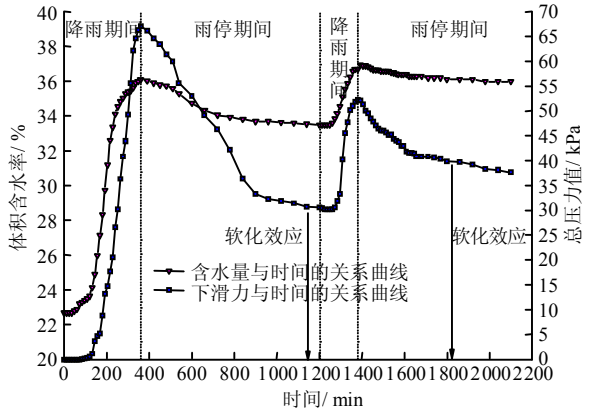


图 5 坡体总下滑推力和含水率的时变曲线

Fig.5 Real-time change curves of slope body total sliding force and water content

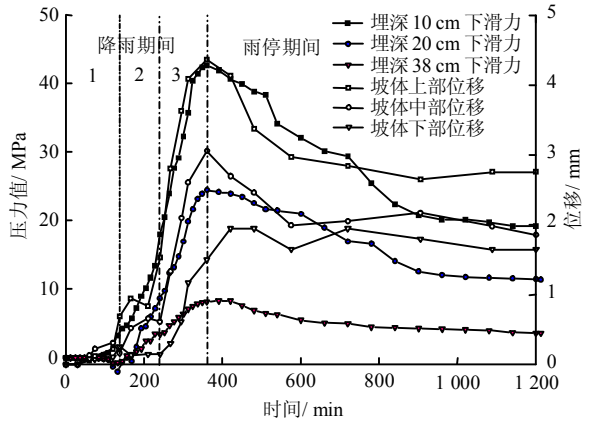


图 6 降雨条件下坡体位移和下滑推力的时变规律

Fig.6 Real-time change curves of slope body total sliding force and slope deformation

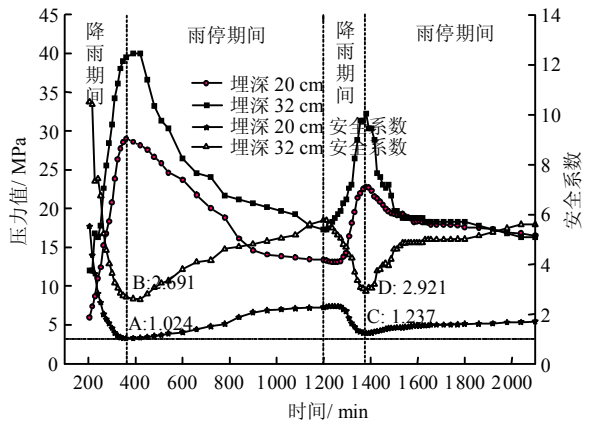


图 7 坡体总下滑推力和安全系数的时变曲线

Fig.7 Real-time change curves of slope body total sliding force and safety factor

降雨入渗对边坡稳定性产生的不利影响主要有：① 降雨期间，土体含水率因雨水入渗而增大，重度增加，边坡下滑力变大；② 雨水入渗可引起地下水位上升，土体有效自重应力减小，坡体内部产生一定的渗透力，土体抗滑力减小而下滑力增大，上述两个方面是降雨对边坡产生附加荷载作用，即增加坡体下滑力，提高边坡内部的应力水平；③ 土体含水率的增加，导致非饱和土吸力下降，吸力对土体强度的贡献减弱，土体强度降低，即降雨对土体的强度起软化作用。

图 5 表明：坡体含水率因雨水入渗而增大，坡体上部总水平推力的变化较含水率变化来得迟，边坡上部总水平滑力变化可分为 3 个阶段：缓慢增加、加速上升和雨后衰减阶段。降雨初期下滑力对降雨响应并不敏感，随着降雨入渗的累积，边坡含水率可在短时间内剧烈上升，降雨对边坡的时空影响加大，边坡因降雨而产生的附加荷载作用明显，土体软化，此时赋存于坡体内的应力开始释放，坡体上部会具有高水平的下滑力；雨停后，雨水入渗停止，坡体上部土体含水率开始缓慢减小，降雨形成的附加荷载作用降低，导致下滑力从峰值开始减小。降雨产生的附加荷载可提高坡体内部的应力水平，降雨对土体的强度的软化导致其有效屈服面范围变小，从而使边坡原有高应力水平区域易达到屈服状态，降雨停止后，这部分区域的应力水平会低于初始状态，即：降雨引起部分区域应力得以释放，释放出的应力会传递给边坡前沿的阻挡或支撑结构，亦或是周边土体，所以，坡体下滑力会在雨停后减小。因此，一旦已有支撑结构无法提供足够的抵抗边坡下滑的抗力，边坡就可在雨中产生破坏式的变形，直至失稳。

由图 4、6、7 可知：第 1 次降雨大概经过 200 min 后，20 cm 和 38 cm 深度处边坡安全系数随坡前推力的快速增加而迅速减小，降雨初期（0～2.5 h），坡体上、中部土体仍有足够的刚度来抵御吸力损失引起的变形（见图 6），此时上、中部土体吸力已经开始部分下降（见图 4），坡体前端推力缓慢增加，而深部土体吸力仍然保留，坡体前端推力仍未有明显变化，边坡安全系数处于高水平状态（见图 7）；降雨 2.5～3.5 h 各部位土体变形开始缓慢上升，此时浅层土体吸力基本丧失，坡体前端推力逐渐上升，坡体上部土体安全系数降低，而深部土体吸力部分下降，前端推力小幅上升；降雨后期（3.5～6 h），坡体上、中部土体变形急剧增加直至最大值，而坡体下部土体位移响应较慢，坡前端推力由上而

下增加幅度依次减小，位移峰值与坡前推力峰值相对应。总之，边坡坡体变形随土体深度的增加而减小，降雨入渗对深部土体的影响逐渐减弱，坡体上、中部土体变形显然较下部变化来得快，坡体变形与坡前推力变化规律基本一致。

第 1 次雨停后，坡体上、下部安全系数分别为 1.024、2.691（图 7 中 *A*、*B* 两点），埋深为 20 cm 以上土体基本破坏，现场量测失稳土层厚度约为 15 cm；雨停 14 h 后，坡表水分逐渐排出，土体基质吸力慢慢恢复，土体抗滑力缓慢增强，因降雨加载作用产生的坡体前端下滑推力会迅速减小，导致边坡安全系数逐步上升。第 2 次降雨条件下边坡安全系数和坡前推力与时间的变化趋势与第 1 降雨过程基本一致，值得注意的是：二次降雨结束后边坡安全系数（图 7 中 *C*、*D* 两点）比初次降雨来得大，尽管施加的累积降雨量一致，但新边坡经历一次降雨后，后续降雨对边坡稳定性的影响并没有初次降雨的影响明显，安全系数在后续降雨过程中的波动也没有第 1 次降雨的波动明显。上述分析表明，新边坡对降雨比较敏感，在降雨条件下比较容易失稳，而老边坡则相对比较稳定。

第 1 次完整降雨过程中因边坡吸收的水分未有效排除，导致降雨对边坡产生的附加荷载和软化效应无法完全消除，因此，此时边坡会留有一定的剩余下滑推力，随着时间的持续推移，边坡会产生一定程度的不可逆变形，即：下滑力会最终稳定至一个值，但回不到初始的应力水平。第 2 次降雨时，因第 1 次雨停的时间有限和所研究土体的细粒含量高，此时边坡仍有较充裕水分，边坡自身排水能力不足，导致剩余下滑力仍具有较高水平。虽然第 2 次降雨雨强大，但坡前总下滑力的实时变化曲线与第 1 次试验基本一致，且二次下滑力峰值在 50 kPa 附近，小于第 1 次试验的 70 kPa（见图 5）；此外，注意到雨后坡体含水率因监测时间周期短，而导致其下降幅度很小，但坡体下滑力仍小幅下降，这表明，后续降雨对边坡应力状态的影响没有第 1 次明显，高应力水平区域在第 1 次降雨中未完全释放的应力会在第 2 次降雨中释放出来。第 2 次降雨结束后，坡体上部剩余总下滑力值会比第 1 次降雨的剩余总下滑力值来得大些，降雨的软化作用始终贯穿于整个降雨期间，并具有较长的时效性。

一般情况下，对于排水条件较好的边坡，一次降雨引起的下滑力峰值会大于二次降雨，一旦边坡经历长时间的雨停期，即坡体含水率稳定，降雨引起的应力重分布也完成，此时边坡会具有较低的应力水平，再次降雨后可产生的下滑力不如第 1 降雨来得大，也就是说，降雨作用下的初始边坡或新边坡易失稳，而老边坡（经历第 1 降雨的边坡）在后续同一降雨条件下则会相对比较稳定。而对于自身排水能力不足的边坡，第 1 降雨引起的加荷和软化效应可维持较长时间，高应力区域的应力释放需要很长时间才可以完成，一旦快速经历连续的二次降雨，边坡上部总下滑力峰值虽有下降，但其雨后的剩余下滑力值有增大的趋势（土体强度持续下降），即边坡在雨后的二次软化效应更显著，一旦坡体内部水分无法及时有效地排出，会加剧边坡发生失稳的可能性。

5　结　论

（1）降雨对非饱和土体的软化作用始终贯穿于整个降雨期间，并具有较长的时效性。边坡上部土体含水率、吸力、坡体变形和下滑推力变化幅度较大，速度较快，下部土体变化幅度较小，速度较慢。

（2）土坡坡体总下滑力的变化可分为 3 个阶段：缓慢增加、加速上升和雨后衰减阶段，降雨过程中陡坡和高密实度土坡响应较为强烈，下滑推力峰值大于缓坡和低密实度土坡。

（3）安全系数时变规律与水平推力和坡体变形变化趋势相反，降雨作用下新边坡坡体应力状态变化明显、较易失稳，而老边坡则相对比较稳定。

（4）土体内高应力区域须经历多次降雨过程才可完全释放，边坡具有高水平的雨后剩余下滑力和更显著的土体软化效应。

参 考 文 献

[1] 王继华. 降雨入渗条件下土坡水土作用机制及其稳定性分析与预测预报研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
WANG Ji-hua. Research the principle of water-soil interaction in soil-slope and analyze and predict its stability in condition of rain infiltration[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[2] 丁继新, 尚彦军, 杨志法, 等. 降雨型滑坡预报新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3738－3743.
DING Ji-xin, SHANG Yan-jun, YANG Zhi-fa, et al. New method of predicting rainfall-induced landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3738－3743.

[3] 张桂荣, 殷坤龙, 刘礼领, 等. 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1312－1317.

ZHANG Gui-rong, YIN Kun-long, LIU Li-ling, et al. A real-time regional geological hazard warning system in terms of WEBGIS and rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1312－1317.

[4] OH S, LU N. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes[J]. **Engineering Geology**, 2014, 184: 96－103.

[5] ALI A, HUANG J, LYAMIN A V, et al. Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes[J]. **Engineering Geology**, 2014, 179: 102－116.

[6] BORDONI M, MEISINA C, ZIZIOLI D, et al. Rainfall-induced landslides: Slope stability analysis through field monitoring[M]//Landslide Science for a Safer Geo-environment. [S. l.]: Springer International Publishing, 2014: 273－279.

[7] 周创兵, 李典庆. 暴雨诱发滑坡致灾机制与减灾方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(5): 477－487.
ZHOU Chuang-bing, LI Dian-qing. Advances in rainfall-induced landslides mechanism and risk mitigation[J]. **Advances in earth science**, 2009, 24(5): 477－487.

[8] OCHIAI H, OKADA Y, FURUYA G, et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. **Landslides**, 2004, 1(3): 211－219.

[9] TU X B, KWONG A K L, DAI F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. **Engineering Geology**, 2009, 105(1): 134－150.

[10] 王维早, 许强, 郑光, 等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 87－95.
WANG Wei-zao, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 87－95.

[11] 孔维伟, 赵其华, 韩俊, 等. 台风滑坡变形破坏机制模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 297－303.
KONG Wei-wei, ZHAO Qi-hua, HAN Jun, et al. Model experiments for deformation and failure mechanism of typhoon induced landslide[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(2): 297－303.

[12] 詹良通, 刘小川, 泰培, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1784－1790.
ZHAN Liang-tong, LIU Xiao-chuan, TAI Pei, et al. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in silty soils and validation of intensity-duration curves[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(10): 1784－1790.

[13] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.

[14] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1391－1396.
ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Artificial rainfall tests on a well-instrumented soil-rock-mixture slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1391－1396.

[15] CHEN C Y, CHEN T C, YU F C, et al. Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide[J]. **Environmental Geology**, 2005, 48: 466－479.

[16] 李典庆, 祁小辉, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的无限长边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1799－1806.
LI Dian-qing, QI Xiao-hui, ZHOU Chuang-bing, et al. Reliability analysis of infinite soil slopes considering spatial variability of soil parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1799－1806.

[17] 詹良通, 贾官伟, 陈云敏, 等. 考虑土体非饱和特性的无限长斜坡降雨入渗解析解[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1214－1220.
ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, CHEN Yun-min, et al. Analytical solution for rainfall infiltration into infinite long slopes considering properties of unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1214－1220.

[18] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.

[19] 李宁, 许建聪, 钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1485－1490.
LI Ning, XU Jian-cong, QIN Ya-zhou. Research on calculation model for stability evaluation of rainfall-induced shallow landslides[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1485－1490.

[20] CHO SUNGEUN, LEE SEUNGRAE. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes consideration rainfall characteristics[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(9): 756－763.