

人工降雨模型试验研究降雨入渗对滑坡类型之影响

陈天健, 蔡和伦, 黄彦荣, 颜宏益, 张佑舜

(屏東科技大学 水土保持系, 台湾 屏東 91201)

摘要:台湾属海岛型气候,因而年雨量丰沛,降雨时间与空间的不均匀,对台湾大量的山坡地造成威胁。该研究系利用人工降雨系统,配合土壤模型试体探讨强降雨下滑坡破坏型态与坡体饱和度之关系,以对各种边坡稳定、边坡破坏获得更进一步的了解。研究结果得知边坡滑动主要发生在坡体趋近稳定饱和时,而坡面冲蚀则受土壤饱和度影响较小。土壤渗透率与降雨强度之关系亦影响着坡面破坏型态,降雨强度远大于土壤渗透系数时,其破坏型态以浅层滑动为主;降雨强度近似于土壤渗透系数时,则主要为较深层滑动;若降雨强度小于土壤临界入渗率时,则主要为表面冲蚀破坏。

关键词:强降雨; 土壤渗透率; 滑坡类型; 模式试验

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)01-0254-04

Slope Failure Mode Related to Soil Infiltration—Laboratory Rainfall Model Test

CHEN Tien-chien, CAI He-lun, HUANG Yan-rong, YAN Hong-yi, JHANG You-shun

(Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung

University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan 91201, China)

Abstract: Taiwan, an island climate with abundant annual rainfall, hillside resident is threaten by inducing landslide from the violent variation of rainfall on time and spatial distribution. This study performs the landslide model test to study the landslide mode related to slope saturation increased by high intensity rainfall. Results showed that slope sliding occurred mainly in the period of the soil closer to high saturation, oppositely, slope erosion is less affected by soil saturation. Soil permeability and rainfall intensity also affect the slope failure mode, the failure mode is mainly shallow sliding as the rainfall intensity much greater than soil permeability; the deeper sliding is mainly for the case of rainfall intensity much greater than soil permeability; last, the surface runoff erosion is usually for the rainfall intensity much lower than soil permeability.

Key words: high intensity rainfall; soil permeability; slope failure mode; model test

台湾位于太平洋西侧,为板块运动所形成之岛屿,南北狭长,东西短窄,山势险峻且平原狭窄,山坡地占全岛的 $\frac{2}{3}$,由海平面拔升至 4 000 m 的玉山,地形海拔变化大。百姓居住地紧邻山坡地,各种坡地灾害即为保全生命及财产的重要课题。

水是各种坡地问题的主要原因之一。台湾为海岛型气候,南、北部属不同季风气候,水的来源主要来自降雨,冬季主要为东北季风季节,夏季除梅雨带来丰沛雨量,亦受台风之影响而产生剧烈降雨。台湾虽年降雨量丰沛,但随季节、位置、海拔的不同,降雨量亦随之有显著变化,降雨时间及空间极不均匀。

降雨对台湾山坡地所造成之影响相当大,降雨所

产生的入渗,会造成地下水位上升、土壤饱和、土壤抗剪强度下降等,进而造成各种的滑坡型态,而降雨为其重要之诱因之一^[2-3,5-9]。基于此,本文通过室内人工降雨之模型实验来观察降雨入渗行为及其对滑坡形态的影响。

1 试验设备

1.1 人工模拟降雨实验室

人工仿真降雨实验室位于屏東科技大学校区。建筑物总面积达 210.27 m²,共四层楼高。人工模拟降雨实验室设于建筑物内部,包含降雨设备及仪器等。考虑在无风的条件下,雨滴在降落 9.5 m 后达

到终端速度,藉此可进行在不同降雨条件下土体或土层受雨滴撞击之冲蚀、径流、入渗、破坏等相关行为研究。

1.2 实验设备

试验所使用的人工仿真降雨系统位于屏东科技大学降雨模拟实验室,此降雨设备共有 4 个降雨板,其有效降雨面积为 12 m²,此降雨设备附有雨滴剪动网将雨滴剪散,藉此可更加模拟实际降雨之情形,室内人工模拟降雨设备在无风的条件下,雨滴在降落



照片 1 雨滴产生器与雨滴剪动网

2 试验方法

2.1 研究土样

研究所采用之土砂为高屏溪之里港河砂及壤土做为研究用试验土样,本研究依不同配比将试验土砂分类为 10 种。

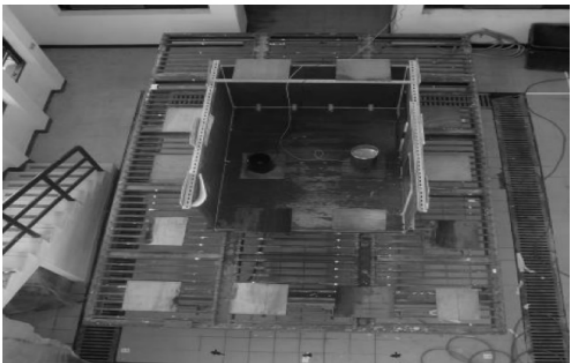
2.2 土壤物理性质试验

本研究首先针对土砂之基本物理性质进行试验,以了解土壤基本特性及行为,作为分析工作之基本资料。试验包含比重试验、筛分析试验、相对密度试验、定水头试验、直接剪力试验等。

(1) 比重试验。土粒单位重与 4℃ 水的单位重比

9.5 m 后,即可达到所谓的终端速度^[4]。雨滴产生器如照片 1 所示,其降雨量均匀度可达 93% 以上^[1]。

实验平台长 5 m,宽 3 m,如照片 2 所示。采用钢架制成,实验平台下设油压千斤顶,可以电动驱使油压方式,使实验平台可抬升倾斜,最大倾斜角度为 60°。人工仿真降雨系统还包括数字化中央控制台、伺服加压马达、大型水箱、流量计、雨滴产生板、雨滴剪动板、降雨定时器等设备,可依不同实验需求改变降雨强度、降雨延时、降雨面积、雨滴剪动板剪动速率。



照片 2 油压式实验平台

值,此值与颗粒所属的矿物有关,该高屏溪河砂的土粒比重试验结果为 2.70~2.72。

(2) 相对密度试验。依标准试验程序,求出试验土砂之在最密实与最疏松状态的干土单位重,进而求得现场砂土的相对密度试验。本文土体密度均采用相对密度 D_r 为 50%,其干土单位重如表 1 所示。

(3) 定水头试验。试验目的是为求出试验土砂之土壤有效入渗 k 值,土壤渗透性系数之因次与流速相同,为流体流经孔隙介质之流速大小的量度,其实验结果如表 1 所示。

(4) 直接剪力试验。为求出试验土砂之临界摩擦角,用摩擦角来设计室内模拟边坡试验边坡坡度(表 1)。

表 1 试验土砂物理性质

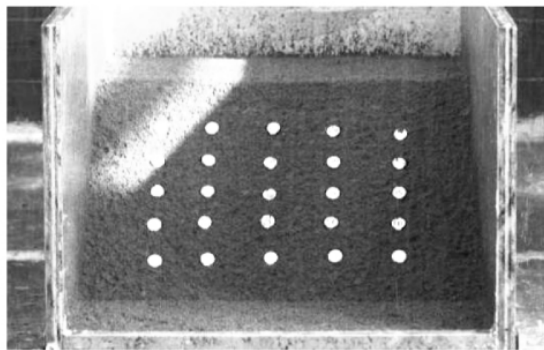
编号	# 4—50/%	# 50—200/%	< # 200/%	渗透系数 k / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	内摩擦角 Φ / ($^\circ$)	土壤单位重 γ_d / ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	0	100	0	0.0062	33	1.383
2	85	0	15	0.0041	46	1.540
3	60	30	10	0.0027	44	1.646
4	23	37	10	0.0021	36	1.538
5	55	30	15	0.0018	40	1.657
6	0	95	5	0.0015	32	1.403
7	20	65	15	0.0014	34	1.549
8	55	25	20	0.0007	45	1.556
9	18	62	20	0.0002	31	1.565

2.3 室内模拟试验

(1) 滑坡试体模型。首先于砂箱底部铺设不织布,并竖立土壤水分计于砂箱内,控制土壤相对密度

D_r 为 50%,分五层加至砂箱内,进行夯实并整平,控制一层为 5 cm,共五层。边坡坡面采用该土壤摩擦角为其坡角,以控制边坡稳定性趋近于临界状态。最后

设置 25 个含编号之图钉,均匀分布至整个坡面,即完成模型试体如照片 3 所示。



照片 3 边坡试体示意图

(2) 模拟降雨。降雨强度采用 100 mm/h 进行试验,以模拟 2009 年 8 月莫拉克台风之豪雨状态,试验时程采至土体大规模滑动或降雨延时 1 h 后试验停止,而后量测坡面之图钉移动量及量测坡面破坏情形,以进行分析及探讨。

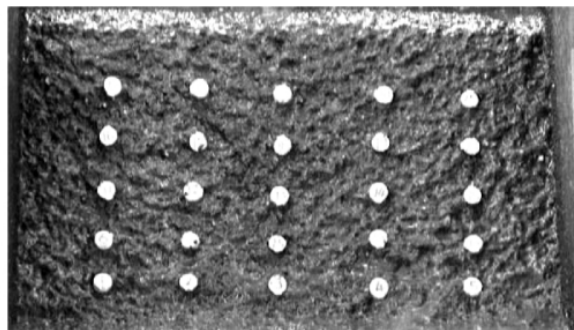
3 结果与分析

针对边坡入渗促使饱和度上升而产生崩塌破坏情形进行说明。本文挑选 3 组代表性滑坡型态说明,分别为降雨强度(100 mm/h)低于土壤渗透系数(223 mm/h)之 1 号土壤,以及降雨强度大于土壤渗透系数之 3 号与 7 号土壤(97 与 50 mm/h)。

3.1 边坡崩塌试验

(1) 1 号边坡试体试验(土壤渗透系数 223 mm/h)。1 号土壤边坡破坏于降雨延时 40 min 土体表面水分增高,且因高强度降雨撞击动量下,表层土壤逐步产生粒料移动。至降雨延时约 60 min,坡面明显呈现飞溅侵蚀状态,如照片 4 所示,表层土壤随降雨水分湿润状况,产生小起伏与缓慢下移。1 号土壤边坡饱和度与降雨延时关系,如图 1 所示。图中上所显现的两条曲线,分别为顶部 5 cm 及 15 cm 之记录值。图中显示坡体之饱和度均不高,最高仅达 45% 附近。14 分时坡面冲蚀发生在饱和度上升前,因其临界降雨强度远小于降雨强度,在水未入渗到土体之前已经流向坡面,导致坡面冲蚀产生,其冲蚀破坏结果随降雨延时增加而提升,饱和度于 24 min 时快速上升,并于 30 min 时饱和度逐渐稳定至降雨结束。

(2) 3 号边坡试体试验(土壤渗透系数 97 mm/h)。3 号土壤边坡先于降雨延时 20 min 左右时土体右方坡腹产生裂缝,而于第 40 min 时裂缝发展成深层滑动,土体缓慢下移,坡趾部分亦逐渐渗水,最后滑动体缓慢堆积至坡趾,如照片 5 所示。



照片 4 1号边坡试体之飞溅侵蚀状况

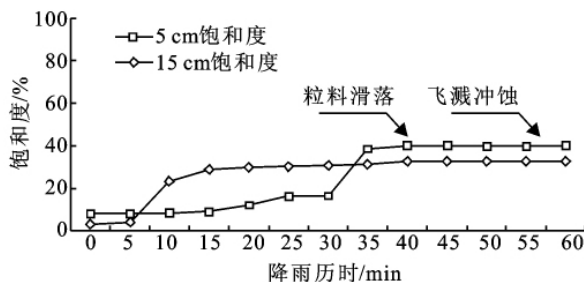
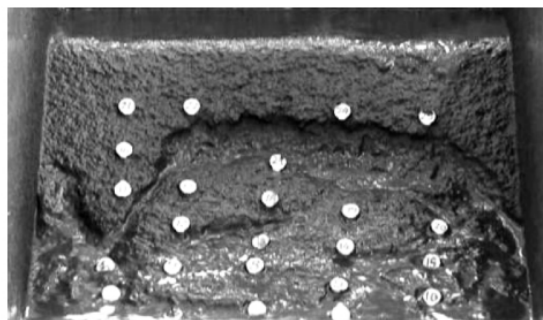


图 1 1号土壤边坡试体之饱和历时曲线图



照片 5 三号边坡试体深层滑动状况

3 号土壤边坡饱和度与降雨延时关系如图 2 所示。图中显示,坡体之饱和度呈现明显上升之曲线,最高达 70%。边坡试体之起始饱和度攀升时,坡面无任何反应;当边坡试体表层达高饱和度时,此时坡面出现粒料滑落,随之坡面开始出现飞溅冲蚀;坡体于第 20 分钟饱和度曲线将达到稳定时,边坡试体高饱和度区域深入,坡腹出现明显裂缝;直至第 40 分钟时边坡试体高饱和区域甚厚时,如图 3 所示,大规模滑动启动,当即产生深层滑坡。

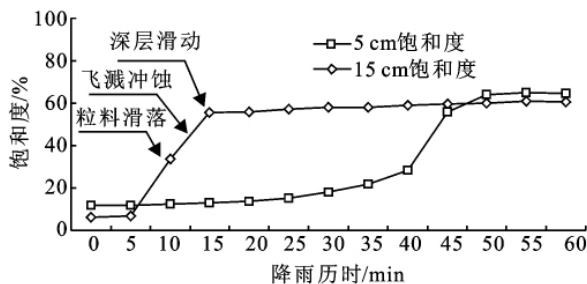


图 2 3号土壤边坡试体之饱和历时曲线

(3) 7 号试体崩塌试验(土壤渗透系数 50 mm/h)。7 号土壤边坡先于降雨延时 30 min 左右时土体右方坡腹产生裂缝,而于第 52 分钟时裂缝下方土体平行滑动发展成浅层滑动,如图 3 所示。

7 号土壤边坡饱和度与降雨延时关系如图 4 所示。图中显示,坡体上层土壤之饱和度呈现明显上升之曲线,最高达 60%。边坡坡面起始饱和度攀升时,坡面无任何反应;当试体表层达高饱和度时,此时坡面出现粒料滑落,随之坡面开始出现飞溅冲蚀;坡体于第 30 分钟饱和度曲线将达到稳定时,边坡试体高饱和度区域深入,坡腹出现 1 cm 裂缝;直至第 52 分钟时边坡试体高饱和和区域深入后,土体滑动启动,形成浅层滑坡。浅层滑坡时,高饱和区域深度相对于深层滑坡之状况,深度较浅许多。

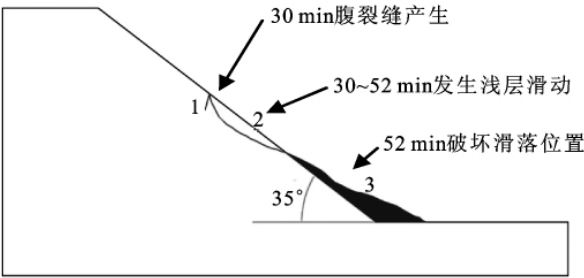


图 3 7 号边坡试体之崩塌面积示意

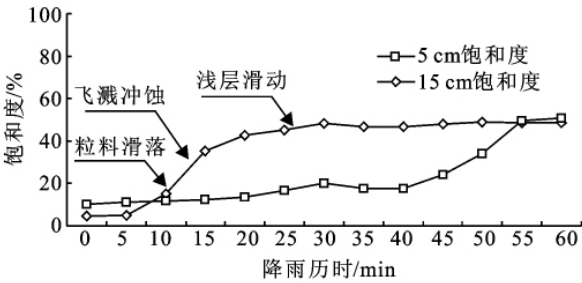


图 4 7 号土壤边坡试体之饱和历时曲线

3.2 土壤渗透率与降雨强度与滑坡形态

9 种土壤模型试验之滑坡形态结果如表 2 所示。综合归纳结果显示,降雨强度远大于土壤渗透系数时,其破坏形态以浅层滑动为主;降雨强度近似于土壤渗透系数时,则主要为较深层滑动;若降雨强度小于土壤临界入渗率时,则主要为表面冲蚀破坏,由此显示土壤渗透率与降雨强度之关系亦影响着坡面破坏形态。

表 2 边坡模型试验滑坡类型结果

编号	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	渗透系数/ (mm · h ⁻¹)	坡角/ (°)	破坏形态
1	100	223	33	飞溅冲蚀
2	100	148	46	飞溅冲蚀
3	100	97	44	深层滑动
4	100	75	36	深层滑动
5	100	65	40	深层滑动
6	100	54	32	浅层滑动
7	100	50	35	浅层滑动
8	100	25	45	地表冲蚀
9	100	8	32	土砂流动

4 结论

降雨强度远大于土壤渗透系数时,其破坏形态以浅层滑动为主;降雨强度近似于土壤渗透系数时,则主要为较深层滑动;若降雨强度小于土壤临界入渗率时,则主要为表面冲蚀破坏;降雨之冲蚀作用受土壤渗透系数的影响较大,但受土壤饱和度之影响则较低;滑坡主要发生于土体内饱和度趋近稳定时,边坡土体高饱和度深度较浅时,较可能产生浅层滑坡;若土体高饱和度深度较深时,则较易形成深层滑坡。由此可知土壤入渗行为会显著影响滑坡形态。

参考文献:

[1] 王振宇,姜亘,赖建璋. 人工降雨系统性能及校准研究[D]. 台湾屏东:国立屏东科技大学,2010.

[2] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.

[3] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(12):2569-2576.

[4] 吴嘉俊. 大型户外人工降雨模拟机之研发[R]//行政院农业委员会八十三年度研究报告,1994:83 科技-2. 10-林-23.

[5] 范正成. 田间降雨机之回顾、研究及比较[J]. 中华水土保持学报,1991,22(1):9-20.

[6] 陈荣河. 土石流之发生机制[J]. 地工技术,1999,74:21-28.

[7] 蓝少村. 降雨导致浅层边坡破坏之模型试验与分析[D]. 台湾台南:国立成功大学土木工程研究所,2008.

[8] Peter L. Slope failures in Hong Kong[J]. Q. J. Engng. Geol.,1975,8:31-65.

[9] Varnes D J. Slope movement types and processes[C]//Schuster R L, Krizek R J. Landslides, analysis and control, National Academy of Sciences, Special Report 176. Washington D C,1978.