

# 降雨前、后夯实填土边坡破坏模式试验研究

文高原<sup>1</sup>, 姚鹏运<sup>2</sup>, 曾宪明<sup>1,3</sup>, 汪剑辉<sup>1</sup>, 肖玲<sup>1</sup>, 赵强<sup>1</sup>, 赵健<sup>1</sup>

(1. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023; 2. 查尔姆斯科技大学 流体与热力学系, 哥德堡 瑞典;

3. 华东交通大学, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 依据相似模型原理, 通过室内大型试验箱试验模拟了 7 d 持续降雨及随后 2 h 强降雨条件下夯实填土边坡的变形、破坏特性, 并与非降雨条件下的结果作了对比分析, 探讨了此类边坡在降雨前、后的破坏模式, 指出夯实填土边坡在降雨前取平面-凸弧面组合破坏模式, 降雨后取平面-悬链面(一支)组合破坏模式, 它们均为复杂破坏模式, 以往近似地沿用圆弧破坏模式对其进行稳定性分析和支护参数的计算是不尽合理的。

**关键词:** 土力学; 夯实填土; 边坡; 降雨; 破坏特性; 试验研究

**中图分类号:** TU 411.93; P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)05-0747-08

## TESTING STUDY ON FAILURE MODE OF FILLED-SOIL SLOPE BEFORE AND AFTER RAINFALL

WEN Gao-yuan<sup>1</sup>, YAO Peng-yun<sup>2</sup>, ZENG Xian-ming<sup>1,3</sup>, WANG Jian-hui<sup>1</sup>, XIAO Ling<sup>1</sup>, ZHAO Qiang<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>

(1. *The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China;*

*2. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden;*

*3. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)*

**Abstract:** According to the principles of similar models, the failure characteristics of a tamped filled-soil slope under continual rainfall of 7 days and strong rainfall of 2 hours later are studied by indoor experiments in a large experiment box, and the result is compared with that without rainfall. The failure modes of the slope before and after rainfall are discussed. It is pointed out that the tamped filled-soil slope takes the combined failure mode of plane and convex camber before rainfall and takes the combined failure mode of plane and catenoid after rainfall, and both of them are complicated failure modes. So it is unreasonable to analyze the stability and design the support parameters with the arc failure mode.

**Key words:** soil mechanics; tamped filled-soil; slope; rainfall; failure characteristics; testing study

## 1 概述

边坡破坏模式是边坡稳定性分析和支护参数设计计算的基本依据。人类对边坡破坏模式的研究有据可查的历史已有 80 多年, 所建立的经典破坏模式多达数十个, 但是没有一个是针对夯实填土边坡的。

以往夯实填土边坡的稳定性分析大都是近似地沿用圆弧破坏模式进行的。随着国家经济建设的发展, 夯实填土边坡工程愈来愈多, 有的已高达 16 m 之多, 工程问题随之增加, 遇到降雨特别是持续降雨及强降雨, 问题就变得更为复杂<sup>[1-5]</sup>, 致使工程险情及事故频发<sup>[6]</sup>。工程实践表明, 夯实填土边坡的破坏并不一定取圆弧破坏模式, 它究竟取何种破坏

**收稿日期:** 2003-08-12; **修回日期:** 2003-11-08

**作者简介:** 文高原(1981-), 男, 2002 年毕业于济南大学材料科学与工程学院, 现任总参工程兵科研三所助理工程师, 主要从事岩土工程与防护工程方面的研究工作。E-mail: gaoyuan\_567@163.com.

模式尚待探索。关于降雨条件对边坡稳定性的影响，国内研究者已做过许多工作<sup>[7-12]</sup>，但是关于降雨条件下夯实填土边坡破坏模式的研究成果国内外均未见发表。为探讨夯实填土边坡在降雨前、后的破坏特性，笔者依据相似模型原理所建立的相似法则<sup>[13-15]</sup>，进行了降雨、不降雨、夯实、不夯实、无支护及土钉支护条件下填土边坡相似模型的试验研究。这里给出的是人工夯实填土边坡在降雨前、后的试验成果及结论。

## 2 试验原理

夯实填土边坡的成分及其堆填过程较为复杂，其应力-应变关系也不清楚，用解析法分析其边坡变形、破坏性能较为困难。为此，依据相似模型原理，建立并验证了相似法则  $t/t' = \sqrt{l/l'}$  (其中， $t, l$  分别为原型的时间与长度； $t', l'$  分别为模型的时间与长度，这里，模型的时间指每次开挖至下次开挖之间的时间间隔)，并据此进行了夯实填土边坡系列相似模型与自模拟原型的设计、制作和控制开挖，开挖的系列时间见表 1。在此基础上，进行了持续降雨和强降雨条件下的相似模型试验。

表 1 开挖的系列时间

Table 1 The series time of the model

开挖序号	$l'/m$	$t'/h$	开挖序号	$l'/m$	$t'/h$
1	0.3	16.61	7	1.5	37.20
2	0.5	21.46	8	1.7	39.60
3	0.7	25.39	9	1.9	41.86
4	0.9	28.80	10	2.1	44.02
5	1.1	31.82	11	2.3	46.03
6	1.3	34.61	12	2.5*	48.00

注：\*为自模拟条件；试验总时间  $\sum_{i=1}^{12} t' = 415.4 \text{ h} = 17.3 \text{ d}$ 。

## 3 试验方法

### 3.1 试验设备

试验模型在大型试验箱(图 1)内制作，试验箱长、宽、高分别为 315, 60, 250 cm。试验箱一侧是厚度为 1 cm 的玻璃制成的透明板，用于观察试验箱内土体的变化。为减少侧限对土体的影响，试验箱另一侧设了三道减摩措施。拆卸式降雨装置设于试验箱上部(图 2)。

### 3.2 测点布置

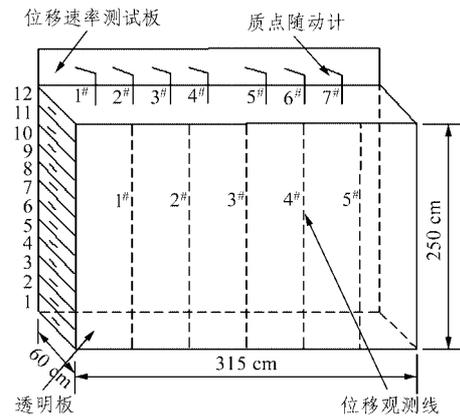


图 1 试验设备示意图

Fig.1 The schematic plot of the test device

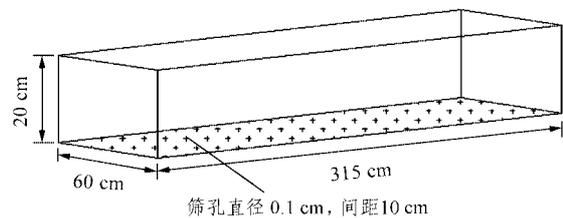


图 2 降雨装置示意图

Fig.2 The schematic plot of the rainfall equipment

在试验箱透明板的内侧布置了 5 条位移观测线，位移观测线由彼此无连接约束的直径为 2 mm、长度为 20 mm 的微型塑料管段构成，用于观测土体断面质点的变化规律。试验箱的一端为开挖面，由 12 块钢板(其中大多数的长、宽、厚分别为 60, 20, 0.2 cm)构成。在每块钢板外侧面的中心点处均贴有应变片，用以测量开挖面在开挖过程中应变的变化情况。在试验箱与降雨装置之间的地表一侧的上部布置了位移速率测试板，可自动记录地表 7 个质点(图 1)随动计的变化轨迹。此外，利用透明板，对开挖时土体变形破坏情况及降雨时的渗水和沉降特性进行了观测。

### 3.3 试验程序

制模材料介质采用真实的素填土(洛阳 Q<sub>2</sub> 黄土)，填筑前过筛，筛孔尺寸为 2 cm×2 cm。试验时将黄土分层填入后刮平，每层厚约 30 cm，人工夯实，夯实压力为  $(1.48 \sim 2.22) \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

试验时，首先严格按表 1 给定的时间间隔控制自上而下进行开挖；开挖完毕且变形停止之后装上全部挡板，进行降雨试验。试验于 2003 年 1 月 14 日准时开始。12 块挡板全部拆除完毕，48 h 之后进行 7 d 持续降雨和 2 h 强降雨。持续降雨用每天 2 次的 82 mm/d 的平均降雨速度来模拟，共降 14 次；

2 h 的强降雨速度为 72 mm/h, 见表 2。降雨前重新装上挡板, 全部降雨完毕后一次性地予以全部拆除。试验中对上述全过程进行观察测试。

表 2 分次降雨时间及降雨速度  
Table 2 The time and rate of rainfalls

降雨序号	时间 /月.日.时	降雨速度 /mm · d <sup>-1</sup>	降雨序号	时间 /月.日.时	降雨速度 /mm · d <sup>-1</sup>
1	2.28.09	37	9	3.04.09	37
2	2.28.16	45	10	3.04.16	45
3	3.01.09	37	11	3.05.09	37
4	3.01.16	45	12	3.05.16	45
5	3.02.09	37	13	3.06.09	37
6	3.02.16	45	14	3.06.16	45
7	3.03.09	37	15	3.07.09	*
8	3.03.16	45			

注: \* 2 h 的强降雨, 降雨速度为 72 mm/h。

### 4 试验结果

#### 4.1 非降雨条件下的试验结果

开挖过程中共发生了 2 次较大规模的滑塌, 相应的滑塌线形状如图 3 所示。挡板应变沿高度的分布形态如图 4 所示。

#### 4.2 降雨条件下的试验结果

降雨过程中, 原滑坡崖及水平地面的变形破坏过程见图 5。地表 1# ~ 7# 质点随动计记录的随动位移轨迹见图 6, 其中 1# 随动计测点在降雨前已随土体滑塌而滑落。图 6 所示的最大位移量及平均位移速率见表 3。降雨过程中从透明板上观察到的裂缝的发展变化过程如图 7 所示。本次降雨后下次降雨前测得的渗水线如图 8 所示。降雨期间渗水速率与

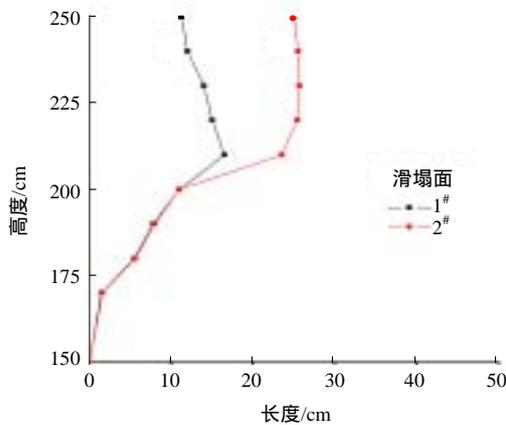


图 3 降雨前滑塌崖形态

Fig.3 The shape of the main slumping surface before rainfall

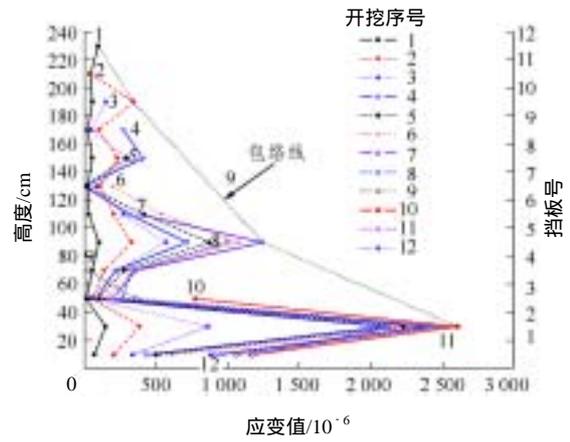


图 4 挡板应变沿高度的分布形态

Fig.4 The distribution of strain of baffle plate with the height

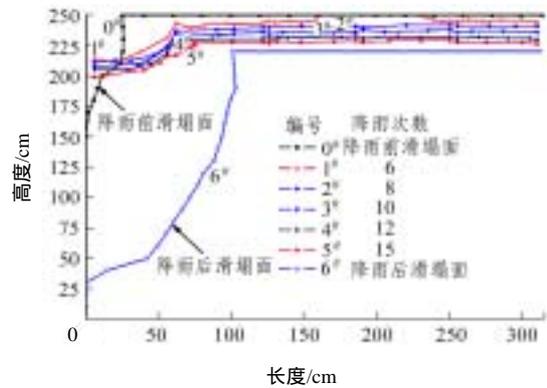
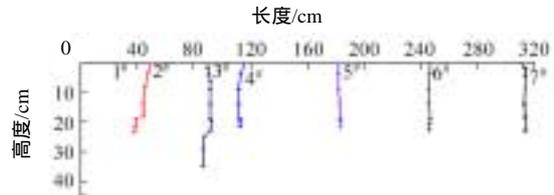


图 5 降雨过程中原滑坡崖与地面变形破坏的演变过程

Fig.5 The deformation process of the original slumping surface and ground in the course of raining



其中 1# ~ 7# 为质点随动计编号

图 6 质点随动计的位移轨迹

Fig.6 The displacement track of the mass-point movement meter

沉降速率(透明板测)的比较如图 9 和表 4 所示。从试验箱透明板上观察到的位移观测线的变化如图 10 所示。降雨期间及降雨后测得的挡板应变值随降雨期的变化曲线如图 11 所示。

### 5 试验结果分析

#### 5.1 非降雨试验结果分析

##### 5.1.1 夯实填土边坡的破坏模式

表 3 质点随动计量测的最大位移量及平均位移速率

Table 3 The maximal displacement and average velocity by the mass-point movement meter

质点随动计编号	最大水平位移 /cm	最大垂直位移 /cm	$\bar{V}_x$ /cm · d <sup>-1</sup>	$\bar{V}_y$ /cm · d <sup>-1</sup>
1 <sup>#</sup>				
2 <sup>#</sup>	11.8	23.6	1.68	3.37
3 <sup>#</sup>	3.2	35.0	0.46	5.00
4 <sup>#</sup>	3.0	21.5	0.43	3.70
5 <sup>#</sup>	1.3	21.9	0.18	3.13
6 <sup>#</sup>	0.8	22.8	0.11	3.26
7 <sup>#</sup>	- 3.0	23.0	- 0.43	3.28

注： $\bar{V}_x$  为水平方向的平均速率， $\bar{V}_y$  为垂直方向的平均速率。

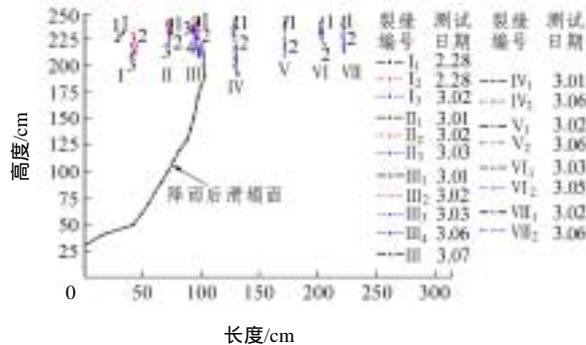


图 7 7 条裂缝的发展变化轨迹

Fig.7 The development track of 7 cracks

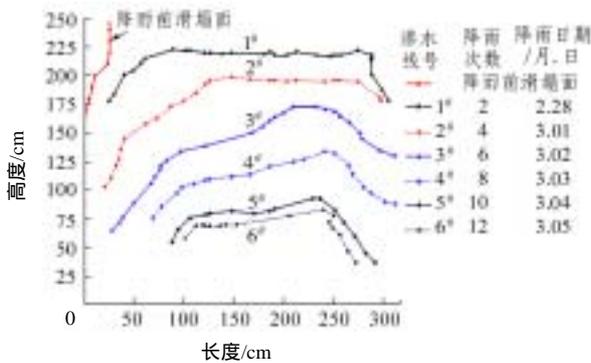


图 8 逐次降雨条件下的渗水曲线

Fig.8 Osmotic curves of rainfall of every time

(1) 由图 3 可知，人工夯实填土条件下，边坡滑塌面的空间形态既不是圆弧面也不是平面，而是平面与凸弧面的组合形式，即上部为直立平面，下部为凸弧面，上部为倒塌破坏，下部为滑移破坏。

(2) 造成上述破坏形态的机理为：开挖后，土体侧向约束被解除，于是产生侧向变形，并在土体内部产生侧向拉应力。在该拉应力超过介质抗拉强

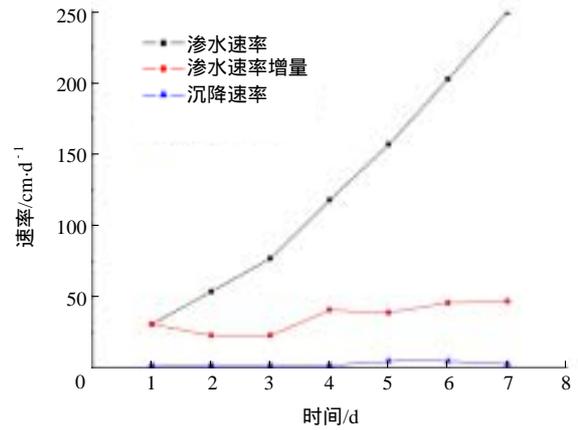


图 9 渗水速率与沉降速率的比较

Fig.9 Comparison of the osmotic velocity and settlement velocity

表 4 逐日的渗水速率与沉降速率

Table 4 The osmotic velocity and daily sedimentation velocity

测试日期 /月·日	渗水速率 /cm · d <sup>-1</sup>	渗水速率增量 /cm · d <sup>-1</sup>	沉降速率 /cm · d <sup>-1</sup>
2.28	31	31	2
3.01	54	23	2
3.02	77	23	2
3.03	118	41	2
3.04	157	39	5
3.05	203	46	5
3.06	250	46	3

注：为消除端面效应的影响，取试验箱中部为研究对象。

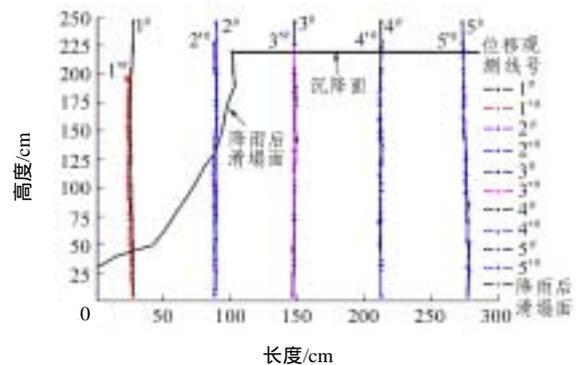


图 10 降雨过程中 5 条位移观测线的变化轨迹

Fig.10 The track of the 5 observation lines in course of raining

度点处，土体产生裂缝，同时使不稳定土体成为相对孤立体。此孤立体连同其下部土体的自重荷载在下部潜在滑移面引起的剪应力超过其抗剪强度时，

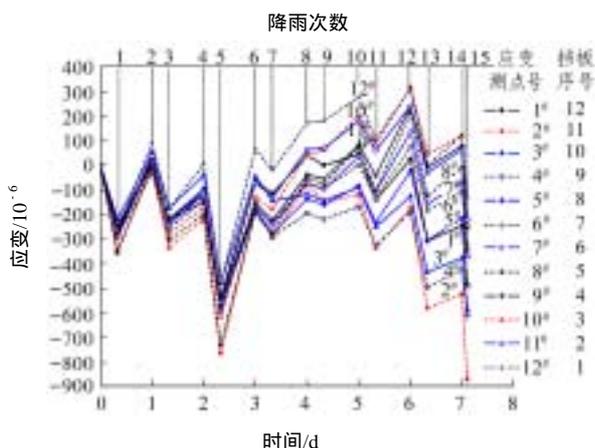


图 11 实测挡板应变值随持续降雨期的变化曲线

Fig.11 the metabolic curve of baffle strain with rainfall period

土体即产生滑移；此时上述相对孤立体即成为完全孤立体，并在滑动过程中伴随部分倒塌。

(3) 综上所述可知，人工夯实填土边坡的破坏模式可概括为平面-凸弧面组合破坏模式，即复杂破坏模式。

### 5.1.2 开挖面挡板应变变化规律

(1) 从图 4 可看出，随着开挖次数的增加，各测点的应变值均有所增加。这是因为上部挡板拆除后，土体并没有立即滑塌，土体的侧压力部分为余下的挡板所分担，因此剩余挡板测点的应变值均增大。

(2) 不同高程处挡板测点的应变值相差较大，且规律性不强，这主要与试验夯填过程中各处土体夯填压力不甚均匀有关。不过，随着高度下降，挡板应变值有增大趋势这一规律仍很明显。试验开挖是在仪器调平至零时开始的。各挡板的最后一次读数是在开挖完毕之后挡板处于自由状态下测得的，其所反映的是试验条件下土体侧压力作用于挡板的效应，其应变沿高度的分布形态近似为上小下大的三角形，与库仑和朗肯土压力形态非常相近。

### 5.1.3 位移观测线及质点随动计的变形特点

非降雨条件下位移观测线及质点随动计无明显变化，3#随动计测最大沉降量约为 2 mm；1#位移观测线最大水平位移约为 1 mm。

## 5.2 降雨试验结果分析

### 5.2.1 降雨过程中原滑坡崖与地面的变形破坏特点

(1) 图 5 中，编号为 0#的是降雨前已有滑塌面。在降雨过程中，该滑塌面经多次变形破坏，已不复存在，原较陡峻的边坡滑塌崖已变得十分平缓。随着降雨的持续进行，该滑塌面逐渐发生转移。这种转移既有朝向原滑塌崖的水平位移，表现为雨水冲

刷、汇流并裹挟表层土壤介质向滑塌崖下淤积，又有垂直沉降。前期以水平位移为主，后期以沉降为主，反映为第 2, 3 条曲线最低点的高程均高于原滑塌崖最低点的高程，而第 4~6 条曲线最低点的高程较规律地低于第 3 条曲线对应点的高程。

(2) 端面效应明显。在模型的开挖端及其对应端，由于钢板与介质之间的渗水通道极易形成，且开挖端在降雨前已有的部分滑塌面同新设挡板形成汇水(土)坑，使得两端尤其是开挖面一端的沉降明显增大。

(3) 持续降雨及强降雨后，沉降量和沉降速率均较大，其平均值分别约为非降雨条件下的 21 倍和 51 倍。且沉降不甚均匀，即使在模型上表面之中部(该部位无端面效应影响)，其沉降也是很不均匀的。

(4) 雨水汇流冲刷作用。由于上述汇水(土)坑的存在及端面效应，降雨过程中未及下渗的雨水在地表汇集并向两端流动和冲刷，使地表产生小的沟槽，其上过水痕迹明显。其结果是使已有滑塌部位出现一定的淤集现象，并使原滑塌面不复存在。

### 5.2.2 质点随动位移特性

(1) 由图 6 可知，质点随动位移曲线是质点随动计自动记录的随动位移轨迹。轨迹曲线所反映的是质点垂直下沉和倾向开挖面的水平位移的综合量。

(2) 质点随动位移的变化规律为：垂直位移和位移速率均大于相对应的水平位移和位移速率；愈靠近开挖面，水平位移及位移速率愈大，愈远离开挖面则愈小，临界速率  $\bar{v}_x$  约为 0.43 cm/d；垂直沉降及沉降速率大体为一常数，唯有 3#质点产生突变，该点恰位于主滑塌面近傍，突变现象直接与边坡滑塌有关。

(3) 7#质点因受端面效应影响而有与开挖面方向相反的位移，前述“端面效应”再次得到印证。

### 5.2.3 裂缝发生、发展规律和滑塌面形态

(1) 如图 7 所示，裂缝随时间延长普遍具有加宽、延长、下移、平移、转动的特性。裂缝 ~ 的平移和转动倾向开挖面，而裂缝 ~，则倾向试验箱的另一端。在端面部位，由于降雨形成了较有利的渗水通道，无论是渗水速率还是沉降速率，均较其他部位大，由此造成地面高程在两端部位较低的结果。另一方面，在降雨之前，开挖面一侧已发生过小规模滑塌，降雨的冲刷、流动作用使得靠近开挖面的地势更低一些。在降雨过程中，表层饱水土层朝向两端(主要是开挖端)变形、移动，由此

造成了上述的破坏现象。

(2) 降雨结束后,进行了全断面开挖。开挖后上述的裂缝进一步发展,并形成了最终的滑塌面。此后,剩余的裂缝~再无明显变化,土体基本趋于稳定。

(3) 最终滑塌面有一个萌生、发展和形成的过程(参见图 5)。每条裂缝都是一个未贯通的张裂面,也是潜在滑移面。它能否成为优势滑移面,试验条件下主要取决于边坡高度。该高度进一步加大,主滑塌面将向深部进一步转移,但其空间形态不会有大的改变。在本试验条件下,边坡内土壤介质被扰动的范围约为  $1.0H$  ( $H$  为试验箱高度)。

(4) 最终滑塌面的形态不是圆弧面,它由 2 个面连接而成:一个是上部张裂面,另一个是下部滑移面。张裂面首先产生,使可能不稳定体成为相对孤立体,相对孤立体与基体的联接部分丧失,从而加剧其失稳的可能性,增大了潜在滑移面上的剪应力。滑移面随后产生,它产生在潜在滑移面上剪应力超过其抗剪强度之时。但是上述 2 个面是自然而然发生连接的。由于上部开裂面的平移、转动和交错,致使该面有一定曲率,并使得整个滑塌面是一个连续性较好的曲面,其形态类似于悬链面的一支。

#### 5.2.4 降雨条件下渗水线变化形态

(1) 由图 8 可知,在持续降雨期间,试验模型中部雨水的渗透速率为  $23 \sim 41 \text{ cm/d}$ ,其分布曲线大体均匀。

(2) 在持续降雨期间,试验模型两端雨水的渗透距离及渗透速率均比中部的大,具有较明显的“端部效应”。值得注意的是,降雨前开挖面一侧已有部分滑塌和开裂,降雨时部分雨水在重力作用下流向开挖面,并不纯粹是“端部效应”所致。两端渗水线分布不对称,开挖面一侧渗水线梯度及范围比中部更大即说明了这一点。由此可知挡板上应变值增大有水压力作用因素存在的分析是合理的。

(3) 渗水曲线是不均匀、不规则的。这与土壤介质不均匀、人工夯填力度不均匀、雨滴分布也不是理想均匀的等有关。渗水线不规则是导致沉降不均匀的主要原因之一。

(4) 第 1~5 d,渗水曲线分布密度大体相当。从第 6 d 开始,渗水线明显变密。这可能与土的饱和度较高、渗透距离增加以及渗透性变差等因素有关。

#### 5.2.5 渗水速率与沉降速率的比较

由图 9 可见,在相同降雨条件下,渗水速率急

剧增大,沉降速率相对较小。二者似无明显的相关关系。但沉降速率与渗水速率增量显著相关:前 4 d 二者均较小,后 3 d 二者均较大。由此可知,沉降速率受控于渗水速率的增量。

#### 5.2.6 降雨条件下边坡土壤质点的变形特点

(1) 分析图 10 可知,从位移观测线上可看出地面发生的沉降情况,其结果和规律与质点随动计的观测是吻合的。

(2) 3<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>位移观测线及 2<sup>#</sup>位移观测线下部具有明显的“褶皱”现象(构成位移观测线的细短塑料管段随机地发生向基准线两侧倾斜的现象),这是不均匀沉降所致。

(3) 雨后大规模滑塌涉及 1, 2<sup>#</sup>位移观测线。1<sup>#</sup>位移观测线之 1' 的上部已滑走,残存部分的上部和中下部有较明显的移位;2<sup>#</sup>位移观测线的 2' 附近也有移位现象发生,其中、下部基本无影响;3<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>位移观测线无倾向开挖面的明显水平位移。

(4) 上述情况表明,人工夯实填土条件下,在 7 d 持续降雨和随后 2 h 强降雨后,大规模滑塌所涉及的范围只限于滑塌体本身及其邻近部位,对其他部位的影响不明显。这是一个很重要的特性。

#### 5.2.7 降雨条件下夯实填土边坡的破坏模式

综上所述,人工夯实填土在承受 7 d 持续降雨和随后 2 h 强降雨之后滑塌面的破坏形态由上部张裂面和下部滑动曲面的悬链面构成。张裂面产生在前,滑动面在张裂面基础上发生。其破坏机理为夯实填土在自重和降雨渗透浸泡作用下,上部土体的侧向拉应力超过土体抗拉强度,导致张拉面产生;相对孤立体在自重作用下使潜在滑移面上剪应力超过土体抗剪强度,导致剪切滑移产生。故此,人工夯实填土边坡持续降雨及强降雨条件下的破坏模式,可概括为张裂面与悬链面(一支)的组合破坏模式,即复杂破坏模式。

#### 5.2.8 降雨条件下挡板应变随时间的变化规律

(1) 由图 11 可见,由于夯实填土降雨试验的挡板是降雨前安装的(此时挡板不受力),测出的应变值均是降雨引起的,它反映了随着降雨期的增加端面各处挡板的受力变化特点,并具有很强的规律性。

(2) 其规律为,序号为奇数的降雨使挡板应变值明显增加,序号为偶数的降雨使其在原基础上有所减少。主要原因在于:序号为奇数的降雨的时间间隔较短(7 h),序号为偶数的降雨的时间间隔较长(17 h),前者未形成相对固结,而后者已形成相对固结。

(3) 特别有趣的是, 在第 5 次(第 3 d 的第 1 次降雨)和第 15 次(7 d 持续降雨后的 2 h 强降雨), 挡板应变均出现突变。这种突变是边坡内介质发生复杂变化的反映, 并与降雨第 4 d 沉降发生突变, 降雨第 5 d 渗水线发生突变密切相关。实际上, 产生突变的最大值点不是最下边的挡板 1, 而是挡板 2, 它正是最终滑塌面的前沿部位。

## 6 结 论

(1) 人工夯实填土边坡在降雨前后的破坏模式均为复杂破坏模式。在非降雨条件下可概括为平面-凸弧面组合破坏模式, 在持续降雨及强降雨条件下可概括为张裂面与悬链面(一支)的组合破坏模式。以往近似地沿用圆弧破坏模式对其进行稳定性分析和支护参数设计是不妥当的。

(2) 人工夯实填土边坡在非降雨与降雨条件下上部开挖对下部挡板测点的应变影响一般都是增大的。持续降雨及强降雨过程中, 挡板应变分别在第 3 d 和 7 d 后 2 h 强降雨中分别发生 2 次突变, 并最终滑塌面部位相对应。这 2 次突变表明土体内部主滑塌面已经形成, 在无挡板约束情况下, 它或者发生在第 3 d, 或者发生在 7 d 后 2 h 强降雨之中和之后。

(3) 人工夯实填土条件下, 在 7 d 持续降雨和其后 2 h 强降雨后, 大规模滑塌所涉及的变形影响范围只限于滑塌体本身及地表部位, 对其他部位的影响不明显。土体因开挖、降雨所引起的最大扰动范围(主要为地表张裂缝)约为  $1.0 H$ 。

(4) 在夯实填土边坡的横断面上, 土壤介质质点的位移矢量处处不相等, 愈靠近开挖面, 位移矢量愈大, 愈远离开挖面愈小。最终滑塌面有一个萌生、发展和形成的过程。每个张裂面均有可能发展成为优势滑移面, 能否形成主要取决于无约束边坡的高度, 本试验条件下约为  $0.44 H$ 。

(5) 降雨对人工夯实素填土边坡的破坏模式具有十分显著的影响, 它是实际工程中诱发滑坡的主要原因。

(6) 降雨条件下填土边坡的沉降速率受控于渗水速率的增量, 沉降量约为非降雨条件下的 21 倍。

## 参考文献(References) :

[1] Ng C W W, Shi Q. Importance of antecedent rainfall duration on slope stability[A]. In : Proceedings of the Second International Symposium

on Structures and Foundations in Civil Engineering[C]. Hong Kong : [s. n.], 1997, 243-250.

[2] Fourie A B. Predicting rainfall-induced slope instability[J]. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng., 1996, 119(2) : 211-218.

[3] Lam C C, Leung Y K. Extreme rainfall statistics and design rainstorm profiles at selected locations in Hong Kong[R]. Hong Kong : Technical Note No.86, Royal Observatory, 1995.

[4] Ng C W W, Shi Q. Influence of transient seepage on slope stability in unsaturated soils[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(3) : 250-262.

[5] Wong H N, Ho K K S. General report on landslips on 5 November 1993 at manmade features in Lantau[R]. GEO Report No. 44, Civil Engineering Department, Hong Kong Government, 1993.

[6] 曾宪明, 林润德, 易平. 基坑与边坡事故警示录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(Zeng Xianming, Lin Runde, Yi Ping. Caution Records of Accidents Caused by Base Dent and Border Slope[M]. Beijing : China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[7] 龙辉, 秦四清, 万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4) : 502-508.(Long Hui, Qin Siqing, Wan Zhiqing. Catastrophe analysis of rainfall-induced landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4) : 502-508.(in Chinese))

[8] 朱文斌, 刘宝琛. 降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4) : 509-512.(Zhu Wenbin, Liu Baochen. Forming and development process of soil landslide during rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4) : 509-512.(in Chinese))

[9] 郑顾团, 殷有泉. 有渗透作用的断裂带破裂机理的研究[J]. 科学通报, 1990, 35(15) : 1167-1170.(Zheng Gutuan, Yin Youquan. Research on rupture belt fracture mechanism of osmosis[J]. Science Communications, 1990, 35(15) : 1167-1170.(in Chinese))

[10] 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4) : 486-492.(Qin Siqing. Nonlinear catastrophe model of slope instability and chaotic dynamics mechanism of slope evolution process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4) : 486-492.(in Chinese))

[11] 姚琦, 黄理兴, 吴玉山. 福建白琳大嶂山滑坡机制与诱发因素[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增) : 952-955.(Yao Qi, Huang Lixing, Wu Yushan. Sliding slope mechanism and inducement factors of Bailin Dazhang Mountain in Fujian[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(Supp.) : 952-955.(in Chinese))

[12] 朱文斌. 降雨引起土体滑坡的机理研究[博士学位论文][D]. 长沙: 长沙铁道学院, 1998.(Zhu Wenbin. Research on the mechanics of soil body sliding slope caused by rainfall[Ph. D. Thesis][D]. Changsha : Changsha Railway College, 1998.(in Chinese))

[13] (日)江守一郎. 模型试验的理论与应用[M]. 郭廷玮, 李安定译. 北京: 科学出版社, 1984.(Emori I. Theories and Applications of Model

- Experiments[M]. Translated by Guo Tingwei, Li Anding. Beijing : Science Press, 1984.(in Chinese)
- [14] 曾宪明, 林润德. 软土土钉支护作用机理相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4) : 534 - 538.(Zeng Xianming, Lin Runde. Testing study on support mechanism of soil nails in soft clay side walls(slopes) using similar models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4) : 534 - 538.(in Chinese))
- [15] 曾宪明, 林润德. 软土边坡流鼓破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3) : 336 - 341.(Zeng Xianming, Lin Runde. Study on the flow-convex failure pattern of soft clay side walls and slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3) : 336 - 341.(in Chinese))

## 国际边坡柔性防护技术研讨会

### 第 1 号通知

**会议时间：**2005 年 8 月 7 ~ 12 日

**会议地点：**中国成都

**主办单位：**中国岩石力学与工程学会

**承办单位：**布鲁克(成都)工程有限公司 四川省岩石力学与工程学会

**会议专题：** 边坡柔性防护技术的历史与发展； 边坡柔性防护技术的理论与研究；  
柔性防护技术的室内与现场试验； 边坡柔性防护技术的数值模拟研究；  
柔性防护技术在其他领域的应用； 边坡柔性防护技术的工程实践。

本次会议是全球范围内就“柔性防护技术”进行的首次专题讨论与交流。届时将有来自瑞士、美国、德国、日本、韩国等十余个国家的专家与学者参加会议，它必将促进国际间就该领域的技术交流与合作，推动柔性防护技术的进一步发展，并有助于国内专家学者了解国外目前的边坡柔性防护技术研究和应用现状及其未来发展趋势，为我国边坡柔性防护技术的研究开发、应用推广奠定更为坚实的基础，对我国正在进行的大规模基础设施建设所面临的大量边坡防护工程具有重要的现实意义。

#### 组织机构

##### 1 大会组织委员会

主 任：姜瑞琪

副主任：宋胜武 Stephan Wartmann 杨志法

委 员：雷承第 熊 颖 张佳璐 郭丽艳 刘晓波

##### 2 大会学术委员会

主 任：钱七虎

副主任：阳友奎 Urs Brechbühl

委 员：贺咏梅 王恭先 李海光 方祖烈 周德培 丰明海 陈飞捷 王广和 姚栓喜 彭 力 彭 伟 李 念

#### 论文征集通知

本次研讨会是柔性防护技术应用于工程施工 50 余年来首次举办的国际会议，是一次高质量、高规格的学术盛会。因此，希望国内外从事边坡柔性防护技术研究、应用的岩土工程界的专家、学者以及工程技术人员，能够踊跃的投稿。投稿截止时间为 4 月 30 日。

投稿的范围应紧紧围绕本次大会的 6 个专题进行，论文格式应参照《岩石力学与工程学报》版面格式撰写，字数(含图)一般不超过 1 万字，会议录用的部分较高水平论文拟由《岩石力学与工程学报》以专刊的形式出版。论文提交请邮寄或发电子邮件到大会秘书处。

#### 会议秘书处

成都高新西区天朗路 3 号 布鲁克(成都)工程有限公司 611731

联系人：雷承第 刘晓波 郭丽艳

电 话：(028)87371456, (028)87843721 - 217, 212

传 真：(028)87843722

E-mail：geobrugg@chinagcc1.com, ssrme@vip.sina.com