

滑坡触发因素及其影响的原位试验

傅鹤林, 李昌友, 郭峰, 周中

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 在相同地质条件下, 采用人工降雨模拟试验和机械开挖模拟原位试验, 研究滑坡触发因素及其对滑坡的影响。研究表明: 堆积层边坡在降雨入渗影响下多为浅层松弛型破坏, 降雨入渗造成土体中孔隙水压力增加, 致使边坡土体的抗剪强度由于有效应力减少及土体吸水软化而降低; 堆积层边坡在切坡开挖影响下多为浅层牵引式破坏, 变形形态为从坡面到坡面以下逐渐减小的松弛形变形; 降雨和入渗双重效应可能是降雨诱发堆积层边坡失稳的主要原因之一, 在强降雨影响下, 易发生滑塌事故。该研究结果可为滑坡的时间、空间和强度预报提供理论依据。

关键词: 降雨; 人工开挖; 触发因素; 滑坡

中图分类号: TU398

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)03-0781-05

Situ-test of abduction elements of landslide and its influence

FU He-lin, LI Chang-you, GUO Feng, ZHOU Zhong

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In the same geological situation, the rainfall and excavating tests were simulated. The test results show that most accumulation landslides caused by rainfall infiltration are shallow relaxation failure. Rainfall infiltration leads to the increase of pore-water pressure, which may result in the reduction of shear strength due to the decrease of effective stress and wetting-induced softening, the double effects of rainfall and infiltration may be the main reason of rainfall infiltration induced landslides in accumulation landslide. Most of accumulation landslides caused by excavation are shallow draught slope failures. The form of its deformation is relaxation failure, which reduces from dome to the deep part of slope gradually. Due to the influence of strong rainfall, the uncovered accumulation slope after excavation easily leads to collapse accident. The research results can provide some useful informations to forecast occurring time, space and strength of landslide.

Key words: rainfall; artificial excavating; abduction element; landslide

滑坡、崩塌作为一种自然地质灾害, 常常会造成巨大的生命财产损失, 其危害性已经成为仅次于地震的第二大自然灾害。为了研究降雨诱发滑坡的机理和过程, 并为滑坡预报信息的收集、预报模型的建立和应用提供充足的依据, 国内外研究者相继开展了一些现场斜坡人工降雨试验^[1-3]。Lim等^[4]在新加坡南洋理

工大学校园内进行了残积土斜坡人工降雨试验, 获得了土中基质吸力变化过程的详细资料, 并对比了有、无植被保护及人工防渗盖布的影响。包承纲^[5]在湖北枣阳1处膨胀土渠坡对其在人工降雨前、后性状的变化过程开展了长期监测。陈善雄等^[6]在湖北襄荆高速公路膨胀土路堑边坡试验段开展了人工降雨诱发滑坡

收稿日期: 2008-07-10; 修回日期: 2008-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878213); 国家交通部科研基金资助项目(2003-318-802-01); 湖南省交通厅科技项目(200506)

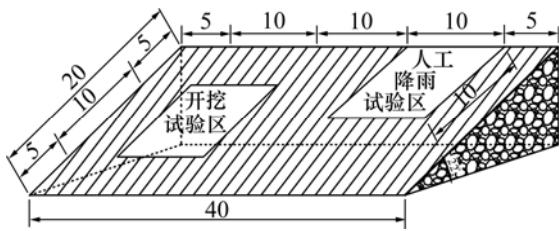
通信作者: 傅鹤林(1965-), 男, 江西高安人, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程与地下工程教学与科研工作; 电话: 13517401653; E-mail: fuhelin100@yahoo.com.cn

试验,用数码相机记录了降雨诱发土坡浅层滑动的过程。目前,人们虽进行了人工降雨试验,但研究的主要内容并不是降雨诱发滑坡的机理和过程,对有关机械开挖实验的研究很少,特别是对在相同地质条件和同一地点同时进行大型人工降雨和机械开挖触发滑坡原位试验研究很少^[7-13]。为此,本文作者在同一地点进行大型人工降雨和机械开挖原位试验,研究降雨型滑坡和开挖型滑坡机理。

1 试验场地的选择

贵州省镇宁至胜境关高速公路是国家高速公路网上海至瑞丽高速公路中的一段,全长 198 km,于 2003 年开工建设^[14]。人工降雨试验、机械开挖试验的场地均选在镇胜公路晴隆滑坡,两者相距约 10 m(图 1)。

试验区即为高速公路路基通过的区域,上覆地层主要为第四系残坡积层(Q^{dl+cl}),厚度为 10~30 m、平均深度为 20 m 的碎石土层,局部夹亚黏土,结构松散、稍湿。基岩为上二迭系龙潭组(P_{2l})煤系地层,由泥质粉砂岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩组成。试验区位于一山体中部,水文地质条件简单,主要靠大气降水补给,受季节影响较大。试验区内地下水主要为基岩裂隙水,地下水埋藏较深,在勘察期间,钻孔内未见地下水。



单位: m
图 1 现场试验布置图
Fig.1 Arrangement of situ-test

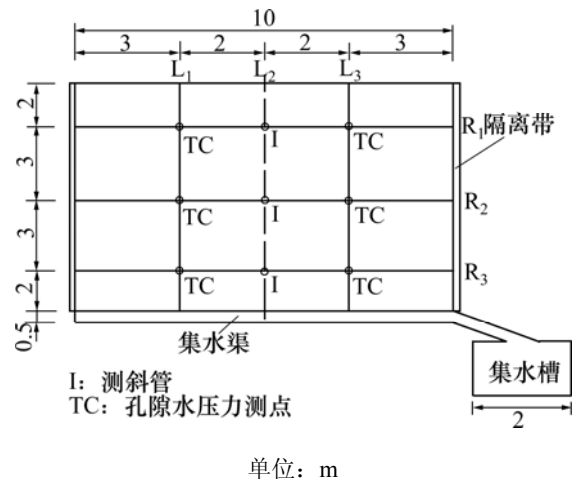
2 人工降雨模拟试验

2.1 试验设计

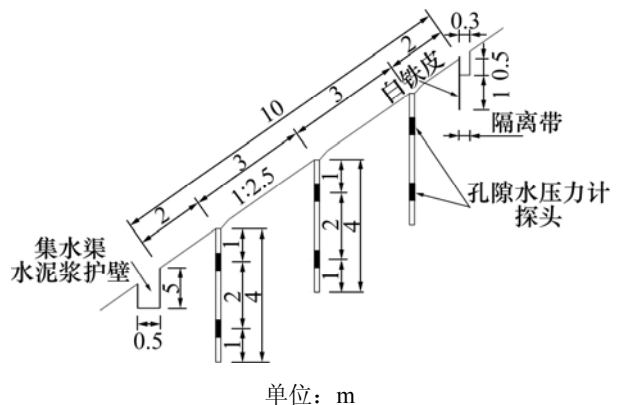
在试验区的上、左、右三面开挖宽度为 0.3 m、深度为 0.5 m 的隔离带,并用宽度为 1.5 m 的白铁皮将试验区与周围土体隔离,以免雨水渗入周围土体,将白铁皮压入土中,坡面上所留高度为 5 cm。试验区的下部修建宽度为 0.5 m、深度为 1 m 的集水渠,并引

出可能的滑动区域外与集水槽相连。集水渠除靠近坡体的一面外,其余各面采用水泥护面,以免雨水流失。集水槽是长度和宽度各为 1 m、深度为 1.5 m 的方形槽,为防止雨水渗漏集水槽,需用水泥护壁。试验区附近选一合适位置开挖 1 个长度为 5 m、宽度为 4 m、深度为 2 m 的蓄水池,先用砖砌,并用水泥护壁。

试验区总共安装 12 个孔隙水压力计、3 个测斜管及 1 个简易降雨量观测装置。试验区共钻孔 9 个,其中,3 个钻孔内安装测斜管,6 个钻孔内安装孔隙水压力计。测斜管和测水管的埋深为 8 m。L₁ 列孔隙水压力测孔的深度为 4 m,孔隙水压力探头的埋深为 1 m 和 3 m。L₃ 列孔隙水压力测孔的深度为 5 m,孔隙水压力探头的埋深为 2 m 和 4 m。图 2 所示为监测点平面布置图,图 3 所示为纵断面 L₁ 测点布置图。测斜孔编号从坡顶到坡脚依次为 ZK₇, ZK₈ 和 ZK₉, R₁, R₂ 和 R₃ 横断面处孔隙水压力的编号依次为 A, B 和 C,埋深为 1, 2, 3 和 4 m 的孔隙水压力计分别编为 A₁, A₂, A₃ 和 A₄。



单位: m
图 2 监测点平面布置图
Fig.2 Monitoring sites in situ-plane



单位: m
图 3 纵断面 L₁ 测点布置图
Fig.3 Arrangement of L₁ monitoring sites in column plane

参照中科院水利部水土保持研究所研制的 SR 型野外人工降雨模拟装置, 自制 1 个专门的人工降雨模拟装置^[6-9]。本装置由水泵、水表、控制阀、水压表、喷头、主管、支管、两通管、三通管及四通管组成。主管和支管由长度为 1 m 或 2 m 的短管经两通管、三通管或四通管组装而成。通过调节控制阀可以产生多级降雨强度。在人工降雨试验开始之前, 用拉水车将蓄水池蓄满水。本试验采用的降雨强度尽可能模拟该工点历史上的最大暴雨强度, 为 60 mm/h, 在停雨期间, 监测降雨强度及地表径流量。

2.2 滑动面形状抗剪强度

测斜监测的深度为从测斜管管口至边坡内部 11 m, 所监测的滑面深度也是由管口起到滑面处的距离, 而管口距坡面也有一定距离, 故实际滑面深度应当减去测斜管露出地面的部分。ZK₇~ZK₉ 滑动面位置分别为坡面以下 4.2, 3.2 和 2.2 m 处。将测斜监测到的滑面位置同滑坡前缘错开裂隙和后缘张拉裂隙结合起来即可确定滑面位置。L₂ 断面滑面位置及形状如图 4 所示, 其中, R 为半径。可以看出, 堆积层滑坡的滑动面角度总体较小, 深度较小, 在地表以下 3~4 m 的范围内, 属浅层滑坡。由图 4 滑动面反算凝聚力 *c* 和内摩擦角 φ : $c=12.5\text{ kPa}$; $\varphi=9.2^\circ$ ^[15]。

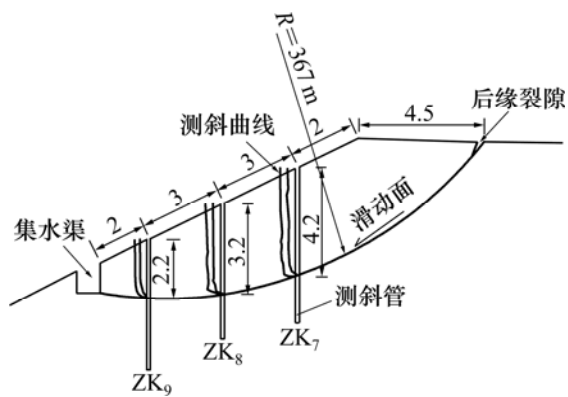


图 4 人工降雨的情况下 L₂ 断面滑动面位置

Fig.4 Landslide site in L₂ column plane by artificial rain

2.3 稳定性分析

基于强度折减法, 采用数值分析手段, 考虑流固耦合作用, 计算分析不同工况(表 1)时边坡的稳定系数, 计算结果见表 2。对边坡中水的作用的计算方法分为常规计算方法及流-固耦合计算方法。常规计算方法中仅计算静水压力(通过对材料取浮容重的方式来实现), 不考虑动水压力(即渗透力)的作用; 流-固

耦合计算方式则考虑静水压力与动水压力的共同作用。从表 2 可以看出, 随着地下水位的升高, 边坡稳定系数逐渐降低, 工况⑤的边坡稳定系数降低到 1.0 以下, 表明连续性降雨 28 h 后, 边坡达到失稳状态。在流-固耦合作用下, 地下水位到达坡脚之前, 水位的上升对边坡的稳定性没有影响; 随着地下水位的持续抬升, 边坡稳定系数与采用常规计算方法所得系数相比降低 6%左右。

表 1 不同工况时的降雨强度及降雨时间

Table 1 Rain strength and raining time of different conditions

参数	工况				
	①	②	③	④	⑤
水位/m	0	6	10	12	14
降雨持时/h	0	12	20	24	28
累计降雨量/mm	0	480	800	960	1120
累计入渗量/mm	0	240	400	480	560

表 2 不同水位时的稳定系数

Table 2 Slope stability under different water tables

计算方式	工况				
	①	②	③	④	⑤
常规	1.72	1.72	1.37	1.07	0.94
流-固耦合	1.72	1.72	1.31	1.02	0.89

3 机械开挖模拟试验

3.1 试验设计

地点在人工降雨试验区的左侧 10 m 处; 面积为 10 m×10 m; 监测坡体深部位移、坡面裂隙; 仪器为美产 Sinco 测斜仪(与降雨试验相同); 监测断面为 2 个; 监测点为 6 个; 监测频率为 6 h/次。

3.2 开挖顺序及滑坡过程

开挖历程及监测情况见表 3, 监测到的各测斜管滑面深度见表 4。将测斜监测到的滑面位置同滑坡前缘错开裂隙与后缘张拉裂隙结合起来即可确定滑面位置, L₁ 滑面位置及形状如图 6 所示。由图 6 可以看出, 堆积层滑坡的滑动面深度很小, 均在地表以下 3~4 m 的范围内, 属浅层滑坡; 滑动变形区的纵向坡面长度与边坡前缘临空面的横向宽度相当, 滑动变形区的坡面形状近似为半圆形, 滑动变形区的三维空间形状近

表 3 滑坡历程表

Table 3 History of landslide

序列	时间(2005—04)	事件描述
1	16 号 13:30~14:00	首次开挖
2	17 号 13:30~14:00	继续开挖
	16:30	发现滑坡后缘裂隙, 宽 1~3 mm, 长 6 m
3	18 号 13:30~14:00	继续开挖
	22:00	发现横跨临空面的边坡前缘错开裂隙, 错开宽度 5~8 mm, 长 9 m
4	19 号 10:00	ZK ₆ 号测斜管在 4 m 处受挤压变形错位, 探头受阻, 无法监测
	16:00	ZK ₃ 号孔变形错位, 无法监测
	22:00	ZK ₂ 号孔变形错位, 无法监测
5	20 号 4:00	ZK ₄ 号孔变形错位, 无法监测
	10:00	ZK ₁ 和 ZK ₅ 号孔发生完全滑动

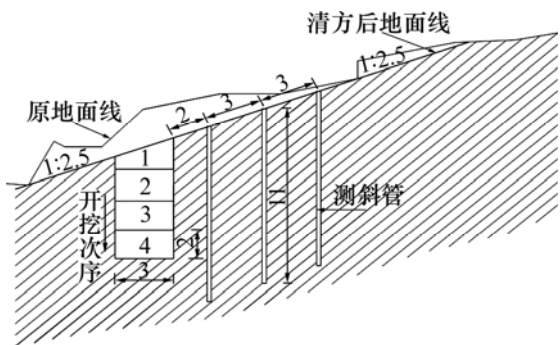
表 4 测斜管监测到的滑面位置

Table 4 Site of slide plane of by inclined monitoring

距离/m	钻孔号					
	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK6
滑面距管口	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0
管口距坡面	0.5	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
滑面距坡面	3.0	3.3	3.7	3.8	3.8	3.7

04—25, 边坡滑塌, 滑坡前缘开挖槽被掩埋, 测斜管被折断。采用图 6 所示滑动面反算 c 和 φ : $c=8.3$ kPa, $\varphi=17.7^\circ$ 。

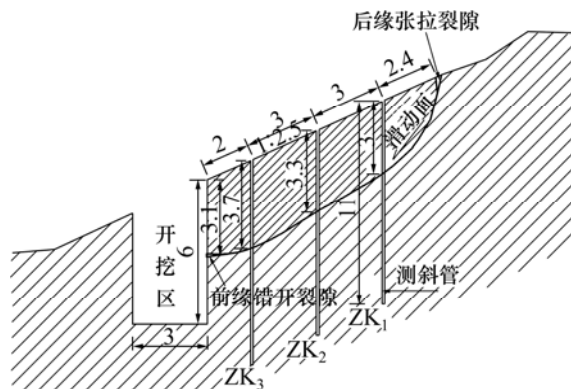
对 5 种工况进行数值模拟分析, 模拟应力场、渗流场、位移场发展变化情况, 发现模拟结果与人工降雨致滑的现场监测成果基本相符。边坡在动水压力作用下, 其稳定系数比常规情况降低 6% 左右。



单位: m

图 5 L₁ 断面的开挖顺序

Fig.5 Digging schedule of L₁ section



单位: m

图 6 L₁ 断面滑动面位置

Fig.6 Site of slide plane of L₁ section

似为簸箕形; 滑坡前缘的错开裂隙均在坡面之下约 3 m 处, 也就是说, 当此类边坡临空高度超过 3 m 时可能引起滑坡, 故在此类边坡的切坡开挖过程中, 应以 3 m 作为警界临空高度, 对临空高度超过 3 m 的边坡应采取适当的防范措施。于 2008—04—20 下午停止测斜监测, 试验区不再用彩条布覆盖。在 2008—04—23 和 2008—04—24, 试验点处连降大雨; 在 2008—

4 结 论

a. 降雨型滑坡的机理为: 降雨使土体的含水量增加, 并向坡脚汇集, 大大降低滑面的抗剪强度, 同时, 在静水压力与动水压力作用下, 触发了滑坡。开挖诱发滑坡的机理为: 自然山体在各种应力的长期作用下,

保持一定程度的平衡被破坏,由于开挖临空,这种平衡、应力随之进行重新分布。若岩体抗滑指标小于应力调整过程中产生综合效应的致滑指标,由于重力的影响,则会产生滑坡。

b. 人工降雨时,凝聚力 $c=12.5$ kPa,内摩擦角 $\varphi=9.2^\circ$;开挖时, $c=8.3$ kPa, $\varphi=17.7^\circ$ 。这说明堆积层干燥时,呈现松散状态,土、骨料之间黏聚力小,但摩擦因数较大;而水入渗后,堆积层中土吸水,土粒间的基质吸力发挥功效,黏性增大,土、骨料之间润滑,摩擦因数减小。

c. 人工降雨滑坡的滑动面是滑面较缓的圆弧;开挖诱发滑坡的滑动面基本呈直线,滑面较陡。

参考文献:

- [1] 贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层边坡位移矢量角的形成作用机制及其与稳定性演化关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 185-192.
HE Ke-qiang, YANG Ji-bao, WANG Si-jing. Study of formation mechanism and stability change connection of accumulation slope deformation vector[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 185-192.
- [2] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[D]. 北京: 北方交通大学土木建筑工程学院, 2001: 66-72.
YOU Xin-hua. Probability structure model of mixture of soil and stone and its application[D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2001: 66-72.
- [3] 吴景坤, 方 祁, 蔡军刚, 等. 堆积层滑坡稳定性评价专家系统方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(2): 8-16.
WU Jing-kun, FANG Qi, CAI Jun-gang, et al. Evaluation system of accumulation landslide stability[J]. Journal of Geological Catastrophe and Prevention, 1994, 5(2): 8-16.
- [4] Lim H. Chaos, transport and convergence for fluid mixing[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2008(3): 355-368.
- [5] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡问题[J]. 岩土工程学报, 2004(1): 1-15.
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(1): 1-15.
- [6] 陈善雄, 余 颂, 孔令伟, 等. 膨胀土路堤包边方案及其试验论证[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1778-1783.
CHEN Shan-xiong, YU Song, KONG Ling-wei, et al. Wrapping method for middle expansive soil embankment and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1778-1783.
- [7] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 香港某边坡自动监测系统的设计和安装[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 790-796.
LI Ai-guo, YUE Zhong-qi, TAN Guo-huan, et al. Design and arrangement of automatic monitoring system in a Hongkong slope[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 790-796.
- [8] 詹良通, 吴宏伟, 包承刚, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003(4): 151-158.
ZHAN Liang-tong, WU Hong-wei, BAO Cheng-gang, et al. Situ monitoring of an unsaturated expansive soil slope[J]. Soil Mechanics, 2003(4): 151-158.
- [9] Lumb P. Effect of rainstorms on slope stability[C]//Proc Sym on Hong Kong Soils. Hongkong: Hongkong University Press, 1962: 73-87.
- [10] Finlay P J, Fell R, Maguire P K. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall[J]. Can Geotech J, 1997, 34(6): 811-824.
- [11] Feuring T, Lippe W. The fuzzy neural network approximation lemma[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 114(2): 227-236.
- [12] Hayashi Y, Buckley J J, Czogala E. Fuzzy neural network with fuzzy signals and weights[J]. Int J Intell Stat, 1993, 78(8): 527-537.
- [13] Ostermark R. A fuzzy neural network algorithm for multi-group classification[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 105(5): 113-122.
- [14] 傅鹤林, 周 宁, 罗 强, 等. 板裂介质理论在牟珠洞滑坡机理分析中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(1): 188-192.
FU He-lin, ZHOU Ning, LUO Qiang, et al. Application of sheet crack theory to analyze the mechanics of Mouzhudong landslide[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 188-192.
- [15] 谢忠球, 温佩琳, 丁 科. 高边坡岩体各向异性检测与稳定性评价[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(1): 160-165.
XIE Zhong-qiu, WEN Pei-lin, DING Ke. Anisotropy characteristics testing for structure plane of slope rock mass and its stability[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 160-165.