

# 降雨入渗对邱家梁滑坡稳定性的影响研究

冯卫, 王佳运, 张成航, 高波

(国土资源部黄土地质灾害重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:**以西安市周至县邱家梁滑坡为研究对象,通过详细分析该滑坡形态特征、地层岩性、滑体物质结构以及变形特征,采用边坡稳定性分析软件 Geostudio 中的 SEEP/W 模块和 SLOPE/W 模块进行耦合计算,对降雨入渗情况下坡体内非饱和渗流场的变化进行研究,探讨了不同降雨强度条件下滑坡体的稳定性变化情况。研究表明,影响滑坡稳定性的因素除地形、岩性等地质条件外,降雨为主要诱发因素,并且探讨了降雨强度、降雨持续时间与滑坡稳定性之间的相互关系。研究成果为客观评价该滑坡在降雨条件下的稳定性提供了科学依据。

**关键词:**降雨入渗; 渗流场; 滑坡稳定性; 数值分析

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1009-6248(2013)02-0195-06

## Analysis on the Influence of the Rainfall Infiltration on the Stability of Qiujieliang Landslide

FENG Wei, WANG Jia-yun, ZHANG Cheng-hang, GAO Bo

(Key Laboratory for Geo-hazards in Loess area, MLR, Xi'an Center of Geological Survey, China Geology Survey, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Qiujieliang landslide of Zhouzhi county in Xi'an city is selected as the research object in this paper. In the detailed analysis of morphological characteristics, stratum lithology, material structure of landslide body and deformation features, the SEEP/W module and SLOPE/W module of the slope stability analysis software Geostudio are used for coupled calculation. The change of unsaturated seepage field in the slope body under the condition of rain infiltration is studied. The change of landslide stability under different rainfall intensity is discussed. The results show that besides topography, lithology and other geologic conditions, rainfall is the main inducing factors affecting landslide stability. The relationship among rainfall intensity, rainfall duration and landslide stability is also studied. The research results can provide a scientific basis for objectively evaluating the landslide stability under the condition of rainfall.

**Key words:** rainfall infiltration; seepage field; landslide stability; numerical analysis

## 1 引言

随着国家经济建设的发展,西部大开发的持续深入,地质环境与自然生态环境日益脆弱,加之滥砍乱挖、人类工程活动等不合理的人为作用,使得

陕西省中部的秦岭北坡滑坡地质灾害频发。其中,堆积层滑坡,因其分布广泛,爆发频率高,突发性强,持续危害性大等特点(贺可强等,2004),严重制约着该地区的经济发展,给人类的生命和财产造成极大损害。

收稿日期: 2012-08-31; 修回日期: 2013-03-15

基金项目: 国土资源大调查项目“陕西省特大型滑坡调查与风险评价”(1212010814027)

作者简介: 冯卫(1983-),男,硕士,主要从事地质灾害等方面研究工作。E-mail: feng2wei4@163.com

堆积层滑坡体通常为第四系松散或相对松散的岩土体。例如,由残积物、崩坡堆积物、洪积物等构成,其结构松散,透水性较强(陈善雄等,2005),一旦遭遇降雨,特别是强度大、历时长的暴雨,更容易促发坡体失稳。近年来的研究表明,降雨入渗导致了坡体内形成暂态饱和区,暂态水压力以及非饱和基质吸力逐渐降低(黄润秋等,2002;陈善雄等,2001;郑俊等,2008),从而导致滑坡体强度降低,水压力升高,最终降低滑坡的稳定性乃至出现滑坡。实际上,降雨入渗过程是边坡土体饱和-非饱和共同作用的过程,许多学者都在降雨对边坡稳定性的影响方面进行了研究。例如,Ng和Shi(1998)用有限元法研究了各种降雨情况和初始条件对暂态渗流场和斜坡稳定性的影响;Nieto和Brarany(1988)对暴雨入渗作用下浅层土质滑坡中非饱和土的基质吸力对滑坡稳定性的影响做了研究;吴火珍等(2010)对降雨条件下堆积层滑坡的滑动机制进行了分析;李汝成等(2008)研究了降雨入渗对泥岩-土混填路堤稳定性的影响;朱文彬等(2002)采用有限元法对降雨条件下的土体滑坡进行了数值分析;吴宏伟等(1999)进行了雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究。

尽管前人在降雨入渗与边坡稳定性方面的研究已经开展了大量的工作,但在秦岭北坡地区,该方面的分析与应用尚不多见。因此,笔者针对秦岭北坡的堆积层滑坡——邱家梁滑坡进行分析,从饱和-非饱和渗流理论出发,探讨了降雨强度、降雨持续时间对该滑坡稳定性的影响。

## 2 滑坡基本特征

### 2.1 滑坡形态特征

邱家梁滑坡位于西安市周至县南部陈河乡共兴村二组,南与前老庄村隔山梁相邻。滑坡区在地貌类型上属于秦岭北坡基岩山区,地质构造上位于秦岭北坡山前断裂南盘,是典型的堆积层滑坡。

该滑坡在形态上处于山梁之间的凹部,后缘以山梁顶部为边界,呈不规则状,左翼以山梁为界,右翼以冲沟为界,前缘延伸至谷底(图1)。滑坡体长约600 m,宽约600 m,面积为 $36 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

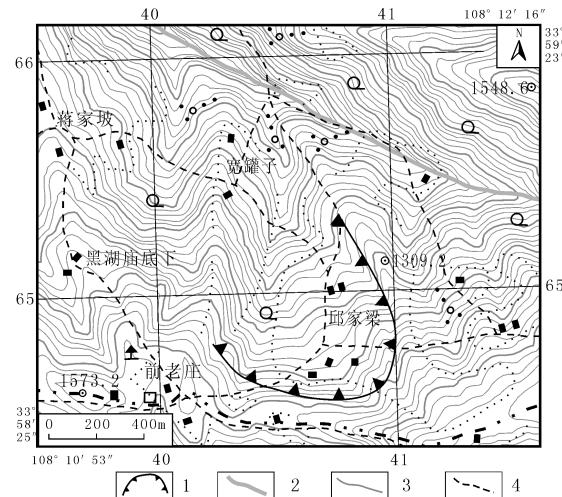


图1 邱家梁滑坡平面分布图

Fig. 1 The plane distribution map of Qiujieliang landslide  
1. 滑坡边界; 2. 河流; 3. 等高线; 4. 小路

平面形态近似半圆形,滑体平均厚度50 m,体积约 $1800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

滑坡体整体坡度21°,剖面呈凹凸相间的复合形态,滑坡呈前后陡峭、中部略显平缓的地形特征,剖面见图2。后壁坡度40°,高差近百米,地形高陡。坡顶滑体发育多条拉张裂缝;中部滑体由于多次滑动形成多个次级滑动面,形成凹凸相间地形,整体呈下降趋势,有溢出泉点,地下水位较高;滑体前部毗邻深谷,由于多次滑动、垮塌,地形陡峭,向深谷蠕变滑动的趋势明显。

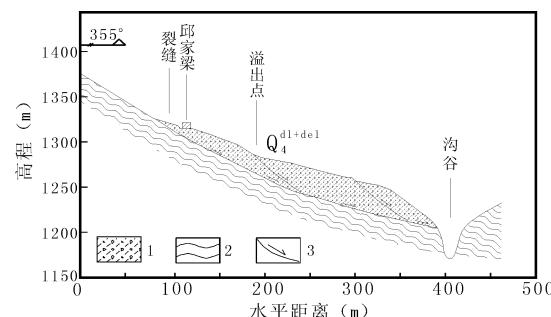


图2 邱家梁滑坡纵剖面图

Fig. 2 The longitudinal profile of Qiujieliang landslide  
1. 断裂带; 2. 石英片岩; 3. 推测滑动面

### 2.2 地层岩性与滑体物质结构特征

滑坡区的地层岩性为震旦系石英片岩,主要由石英、酸性斜长石、绢云母、绿泥石或白云母、黑云母等组成。其中,石英和长石的含量大于50%

(长石含量小于25%), 产状为 $355^{\circ}/25^{\circ}$ 。上部被第四系松散残坡积层覆盖。滑体物质由石英片岩的风化剥蚀物、钙质胶结的角砾岩以及部分粉质黏土组成, 碎石含量较高, 约占80%, 结构松散, 由于邱家梁滑坡地处山梁间的凹部, 三面环山, 利于地下水与雨水的富集, 地下水位较高, 滑体中部有地下水溢出成泉, 整个滑体饱和度较大。

滑坡的滑动面沿松散层与下伏石英片岩的接触面发育。后部滑面出露, 地形陡峭, 坡度 $40^{\circ}$ , 高差近百米, 滑面表部光滑, 可观察到滑动擦痕; 中前部滑动面沿基岩表面呈直线状延伸发育, 中部有多条次级滑动面发育, 前部滑面沿陡坎延伸发育至沟底, 滑动面整体呈复合形态。

### 2.3 变形特征

2002年“6.9”洪灾中, 由于连阴雨和暴雨引起坡体失稳, 产生滑坡。坡体后缘、侧壁发育裂缝, 每逢降雨都会产生滑动。2005年8月, 连续降雨10余天, 引发滑体左部、中部发生滑动, 毁坏房屋5间, 未造成人员伤亡。由于滑坡的多次滑动, 在滑坡的后缘形成多达十余条的拉张裂缝, 最长的一条出现于2005年, 裂缝贯穿于整个滑坡后缘, 下错1.5 m, 缝宽约30 cm。同时, 滑坡的多次滑动造成滑体内产生多条次级滑面, 滑体结构更加松散, 滑体前部毗邻深谷地段, 崩塌现象十分频繁。

## 3 滑坡渗流场分析及稳定性计算

### 3.1 模型网格划分及边界条件

根据邱家梁滑坡工程地质条件, 通过Geostudio的渗流模块SEEP/W, 选取滑坡主滑方向上一典型剖面建立滑坡渗流场数值模型。依据该

滑坡具体边界条件及精度要求考虑网格的疏密程度, 具体有限元网格剖分见图3, 网格中共有1346个节点和1292个单元。

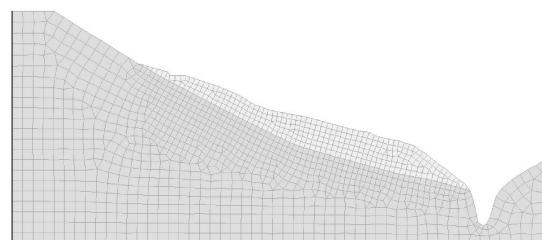


图3 有限元计算模型图

Fig. 3 The finite element model

降雨入渗引起坡体内渗流场的变化, 边界条件如下。

(1) 模型两侧: 地下水位以上边界按零流量边界处理, 地下水位以下为第一类边界条件(Dirichlet边界条件), 即给定水头边界。

(2) 入渗边界: 滑坡表面即入渗边界, 取为第二类边界条件(Neumann边界条件), 即流量边界。当孔隙水压力小于零时为流量边界, 反之则变为水头边界。如果降雨强度小于表层土体渗透性, 按流量边界处理, 其数值等于降雨强度。如果降雨强度大于表层土体渗透性, 一部分雨水沿坡面流失, 会在坡面形成一薄层水膜, 此时可按给定水头边界处理。由于水膜很薄, 计算中取水头值等于地表高程。

(3) 模型底面: 定义为不透水边界。

### 3.2 模型参数选取

模型参数选取主要包括岩土体的力学参数以及渗流相关参数的选取。相关物理力学参数取值见表1。

表1 岩土体参数取值表

Tab. 1 Parameters of soil masses for numeric simulation

岩土体类型	重度 ( $\text{kN/m}^3$ )	黏聚力 ( $\text{kPa}$ )	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )	吸力内摩擦角 ( $^{\circ}$ )
残坡积层	21.3	22	26	10
石英片岩	21.6	2200	45	12

渗流相关参数的选取, 首先采用工程类比法得到土水特征曲线特征值, 并根据Fredlund & Xing方程估计出完整的土水特征曲线(图4), 再利用饱和渗透系数推导出渗透性函数, 最后根据土水特

征曲线推导出渗透性函数特征曲线(图5)。

### 3.3 计算工况

为了综合分析降雨强度、降雨持续时间对滑坡稳定性的影响, 首先分析在降雨入渗情况下滑坡瞬

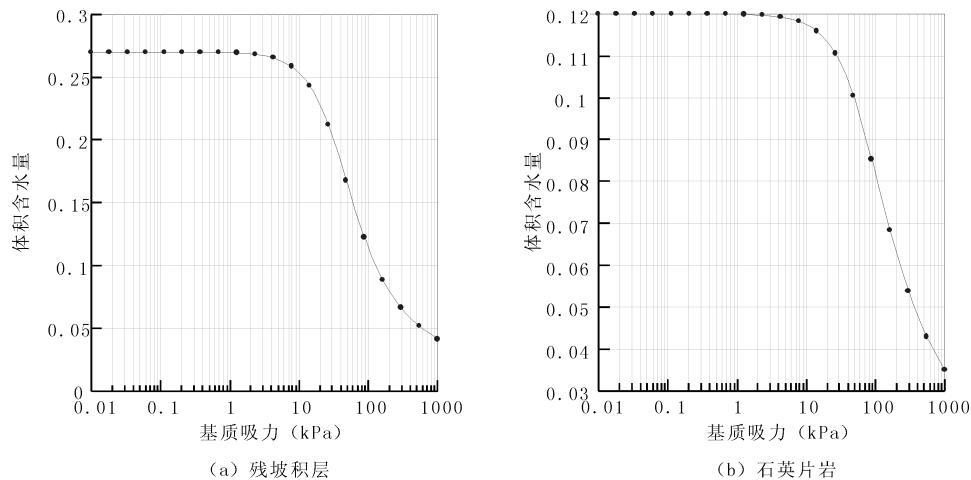


图4 残坡积层和石英片岩的土水特征曲线图

Fig. 4 The soil-water characteristic curves of eluvial layer and quartz schist

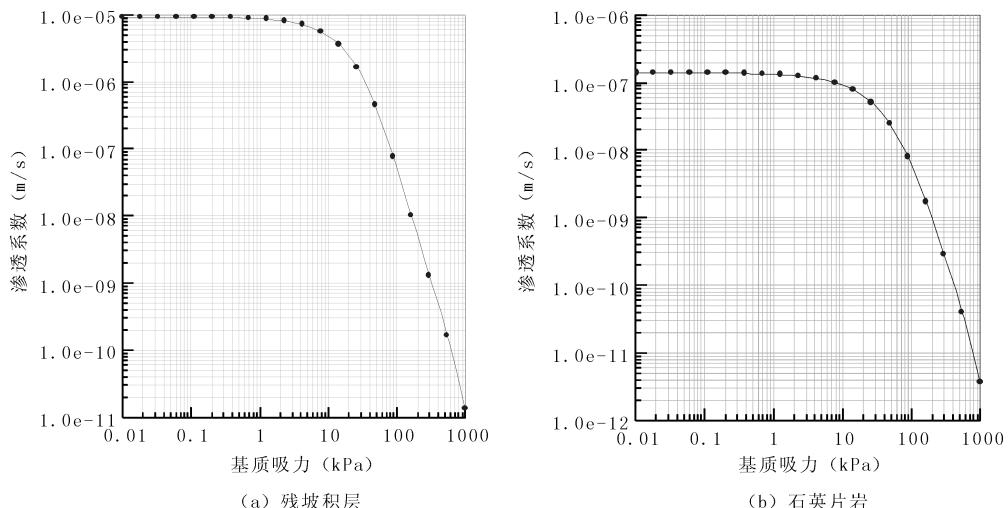


图5 残坡积层和石英片岩的渗透性函数特征曲线图

Fig. 5 The hydraulic conductivity function characteristic curves of eluvial layer and quartz schist

态渗流场的分布。

根据该地区历年统计的降雨资料,确定降雨强度为100 mm/d和300 mm/d(极端工况)两个等级,降雨持续时间设置为5 d(120 h)。每种降雨强度历经10个时间步长,降雨时长分别为(12、24、36、48、60、72、84、96、108、120) h,计算的初始状态对应初始地下水位情形。

### 3.4 计算结果分析

(1) 渗流场分析。通过SEEP/W有限元程序进行非稳态非饱和渗流分析,限于篇幅限制,笔者仅列出初始状态的孔隙水压力等值线图和降雨强度为300 mm/d条件下持续24 h、48 h、72 h坡体内

的孔隙水压力等值线图(图6—图9)。孔隙水压力等于0的等值线表示暂态滞水面,即通常所说的浸润线。浸润线以下为饱和区,该区域孔隙水压力为正值。浸润线以上为非饱和区,相应的区域中孔隙水压力为负值。

在降雨强度为300 mm/d工况下,连续降雨24 h后,浸润线前缘出现略微抬升,浸润线后缘基本没有变化;达到48 h后(即降雨2 d),坡体内浸润线前缘上升幅度较为明显。同时,滑坡体后缘因处于2种岩土体的交界地带。渗透系数的差异以及后缘发育的大量地表裂缝导致雨水沿着滑带土顶面大量入渗,使得滑体后缘附近非饱和区含水量

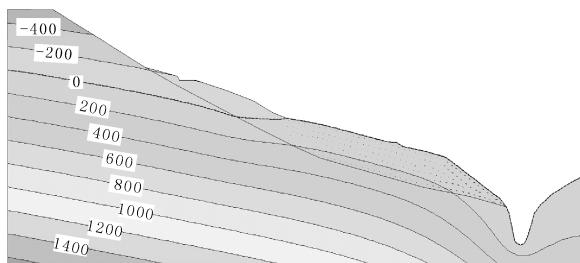


图 6 初始状态的孔隙水压力等值线图

孔隙水压力 (kPa)

Fig. 6 The contour map of pore water pressure in initial state

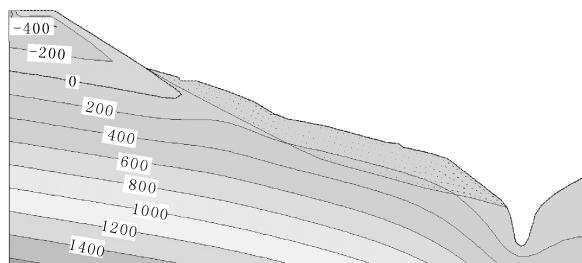


图 9 降雨持时 72 h 的孔隙水压力等值线图

孔隙水压力 (kPa)

Fig. 9 The contour map of pore water pressure in 72 hours of rainfall duration

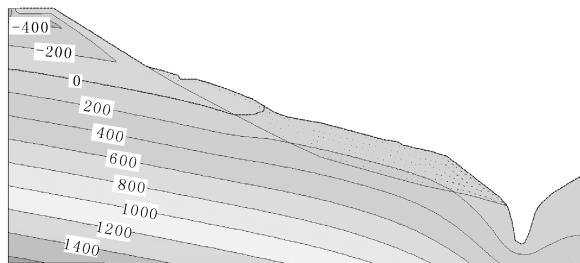


图 7 降雨持时 24 h 的孔隙水压力等值线图

孔隙水压力 (kPa)

Fig. 7 The contour map of pore water pressure in 24 hours of rainfall duration

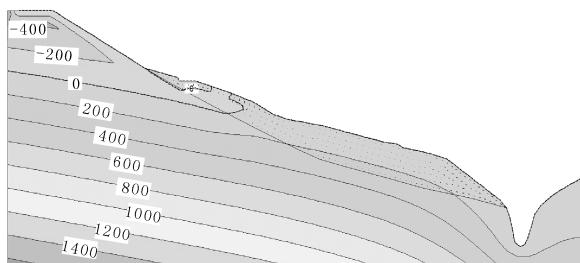


图 8 降雨持时 48 h 的孔隙水压力等值线图

孔隙水压力 (kPa)

Fig. 8 The contour map of pore water pressure in 48 hours of rainfall duration

增大，逐渐出现局部饱和带。随着降雨持续进行，负孔隙水压力分布区进一步缩小，基质吸力逐渐降低。当上部局部饱和带与坡体内的饱和带汇合贯通后，浸润线开始整体向坡体内侧后移；72 h 以后，滑坡体基本处于饱和状态。同样，当降雨强度为 100 mm/d 时，渗流场分布情形与上述情况类似，只是在时间上相应提前 12 h 左右。

(2) 稳定性分析。采用非饱和土抗剪强度理论，将 SEEP/W 的分析结果代入 SLOPE/W 中进

行耦合计算，用 Morgenstern-Price 法分析降雨时滑坡的瞬态稳定性，发现滑坡的稳定性明显地受到降雨过程的影响，即随着降雨持时的增加，坡体的稳定性逐渐降低。降雨强度、降雨持继时间与滑坡稳定性之间的关系见图 10。

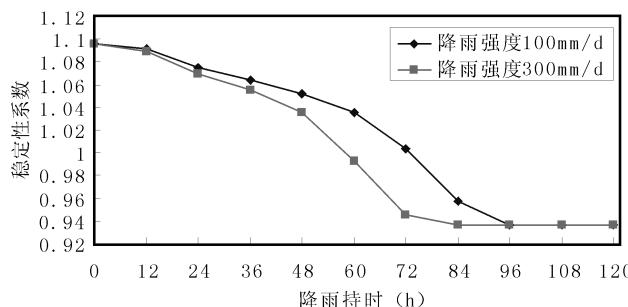


图 10 降雨强度、降雨持时与滑坡稳定性关系图

Fig. 10 The relationship among rainfall intensity, rainfall duration and landslide stability

从图 10 可以看出，在降雨之前，滑坡体稳定性系数为 1.096，处于基本稳定状态。当降雨强度为 100 mm/d 时，降雨 1~48 h 内，稳定性系数由 1.096 降到 1.052，尚处于基本稳定状态。持续降雨 48 h 后，滑坡体处于欠稳定状态，这主要是由于雨水通过坡面土体渗入地下，尤其是在滑体后缘，雨水通过地表裂隙大量入渗，在残坡积层与石英片岩接触面上形成滞水，使得残坡积层饱和度越来越大，抗剪强度大幅降低。同时，坡体内部形成了渗流，产生渗透力，从而使得边坡稳定性大为降低。持续降雨 72 h 后，稳定性系数小于 1，坡体整体失稳。当降雨强度为 300 mm/d 时，降雨 1~36 h 内，稳定性系数尚大于 1.05，坡体处于基本稳定状态，但是安全储备不高。当降雨 36 h 后，坡体

就进入了欠稳定状态，一旦降雨时长超过 56 h，坡体将整体失稳。

## 4 结论

利用 Geostudio 中的 SEEP/W 模块和 SLOPE/W 模块进行耦合分析，采取饱和-非饱和渗流理论，考虑基质吸力的贡献，对邱家梁滑坡在不同降雨强度下进行了渗流场分析和稳定性计算。通过对模拟结果的分析，可以得出如下结论。

(1) 降雨入渗对邱家梁滑坡的稳定性影响显著。降雨入渗使得滑坡体非饱和区的含水量增大，黏聚力降低，孔隙水压力上升，基质吸力降低，出现暂态饱和区及暂态水压力，基质吸力的降低使得滑坡土体非饱和区抗剪强度降低，从而导致滑坡体强度降低，水压力升高，最终降低了滑坡的稳定性。

(2) 降雨持续时间对滑坡稳定性的影响程度与降雨强度的大小有关。当降雨强度为 100 mm/d 时，持续降雨 48 h 后，滑坡进入欠稳定状态；降雨 72 h 后，滑坡整体失稳；当降雨强度为 300 mm/d 时，持续降雨 36 h 即进入欠稳定状态；降雨超过 56 h，滑坡整体失稳。

(3) 在相同的降雨强度下，随着降雨持续时间的增加，坡体内浸润线不断上升和移动。随着浸润线上升和后移，滑坡土体内非饱和区越来越小，基质吸力越来越小，滑坡越来越不稳定。

## 参考文献 (References):

贺可强, 周敦云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (16): 2665-2670.

He Keqiang, Zhou Dunyun, Wang Sijing. Features of load-unload response ratio and its significance in predication of colluvial landslide induced by rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (16): 2665-2670.

陈善雄, 许锡昌, 徐海滨. 降雨型堆积层滑坡特征及稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (增刊): 6-10.

Chen Shanxiong, Xu Xichang, Xu Haibin. Features and stability analysis of rainfall-induced colluvial landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (Supplement): 6-10.

黄润秋, 戚国庆. 非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响 [J]. 工程地质学报, 2002, 10 (4): 343-348.

Huang Runqiu, Qi Guoqing. The effect of unsaturated soil suction on slope stability [J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10 (4): 343-348.

陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土坡稳定性分析方法 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (4): 447-450.

Chen Shanxiong, Chen Shouyi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22 (4): 447-450.

郑俊, 张玉灯. 考虑降雨入渗的非饱和边坡稳定分析 [J]. 灾害与防治工程, 2008, 64 (1): 53-57.

Zhen Jun, Zhang Yudeng. Case studies on influence of rainfall infiltration on unsaturated slope stability [J]. Disaster and Control Engineering, 2008, 64 (1): 53-57.

吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析 [J]. 岩土力学, 2010, 8 (增刊): 324-329.

Wu Huozhen, Feng Meiguo, Jiao Yuyong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 8 (Supplement): 324-329.

李汝成, 王复明. 降雨入渗对泥岩-土混填路堤稳定性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (11): 2260-2266.

Li Rucheng, Wang Fuming. Effect of rainfall infiltration on stability of mudstone-soil mixture embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (11): 2260-2266.

朱文彬, 刘宝深. 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 Baoshen. Forming and development process of soil landslide during rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 509-512.

吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究 [J]. 岩土力学, 1999, 20 (1): 1-14.

Wu Hongwei, Chen Shouyi, Pang Yuwei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20 (1): 1-14.

Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for unsaturated soils [M]. China Architecture and Building Press, Beijing, Beijing, 1997.

Ng CWW, Shi Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22 (1): 1-22.

Nieto, A S, Brarany, I. Catastrophic rain-induced landslides in Rio de Janier, Brazil Mechanisms and contributing factors [J]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 1988, 20 (7): 144.