

Stability Analysis and Evaluation of Rainfall Infiltration on Loess Slope

Zhongshe Li¹, Lizhi Peng¹, Run'e Liang²

¹Jiangxi Bureau of Geology and 915 Geological Team, Nanchang

²Geophysical and Geochemical Exploration Party, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanchang
Email: lizhongshe@sina.com

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: Loess with water has hydrolysis and collapsibility, which results in the drastic reduction of intensity. Water has a great influence on the stability of loess slope. Because groundwater is deeply buried in the slope of the loess region, the rainfall becomes one of the main factors inducing loess slope failure. Based on the saturated-unsaturated soil seepage theory, the GeoStudio software SEEP/W and SLOPE/W modules are used to study the stability of Sxiakou landslide in Lanzhou City under rainfall infiltration. The results show that: the landslide is an unstable state in the role of accumulated 15 days, consistent with the actual situation.

Keywords: Rainfall Infiltration; Loess Slope; Saturated-Unsaturated Seepage Theory; Finite Element Analysis

降雨入渗黄土边坡的稳定性分析及评价

李忠社¹, 彭立志¹, 梁润娥²

¹江西省地矿局 915 地质大队, 南昌

²江西省地矿局物化探大队, 南昌
Email: lizhongshe@sina.com

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘要: 黄土遇水具有水解性和湿陷性而使其强度剧减, 水对黄土边坡的稳定性具有很大的影响。因黄土地区边坡的地下水埋藏较深, 故降雨成为诱发黄土边坡失稳的主要因素之一。根以饱和 - 非饱和土的渗流理论为基础, 采用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块对兰州市石峡口滑坡在降雨入渗条件下的稳定性进行了研究, 结果表明: 该滑坡在累计 15 天降雨的作用下处于不稳定状态, 与实际情况基本吻合。

关键词: 降雨入渗; 黄土边坡; 饱和 - 非饱和渗流理论; 有限元分析

1. 引言

降雨入渗对边坡稳定性的影响主要在于降雨使边坡土体内的渗流场产生了变化, 从而导致边坡土体的非饱和区厚度减小、孔隙水压力升高、基质吸力减小、重度增大、抗剪强度降低, 从而使土的稳定性逐

渐降低^[1]。

黄土是一种特殊土体, 干燥时强度虽较高, 但遇水后却表现出明显的水解性和湿陷性, 使强度剧减。降雨入渗对黄土边坡的影响主要表现在^[2]: 1) 冲刷坡面、坡脚; 2) 土体含水量与重量增大; 3) 土体基质吸力减小, 强度降低; 4) 水渗入裂隙和节理而产生静水压力, 促使冲沟、陷穴的发展等; 5) 溶盐类胶结物

作者简介: 李忠社 (1970-), 男, 江西萍乡人, 工程师, 从事水文水资源勘测研究、地质灾害评估、勘查和设计及施工工作。

被淋滤, 使土体更加松散。黄土地区的非饱和土层厚度常达 20~50 m, 其地下水埋藏较深, 降雨分布不均匀但较集中, 大多数滑坡因降雨而发生。因此, 对降雨条件下黄土边坡的稳定性进行研究具有重要的意义。根据降雨入渗对黄土边坡的影响特点, 论文选取加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司开发的 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块对黄土边坡进行孔隙水压力和稳定性系数的计算。

2. 气候特征

黄土地区属于干旱、半干旱气候区, 年平均降雨量较小(为 200~700 mm)^[3]。石峡口滑坡位于兰州市区, 市区属半干旱气候, 多年平均降水量为 300~600mm, 各地的降水量在各年、各月呈现出均匀性: 1) 最大年降水量为 546.7 mm (1978 年), 最少年降水量为 174.6 mm (1964 年), 二者相差 3.1 倍, 即使是降水比较集中的 5~10 月份, 年际变化也很大, 1979 年 8 月份降雨量最多(达 167.4 mm), 1996 年最少(仅 35.7 mm), 两者相差近 5 倍; 2) 多集中在 7~9 月份, 占全年降水量的 60%以上。这种不均匀性为滑坡的发生创造了良好的条件。

3. 软件的适用条件及效果分析

1) SEEP/W 软件

SEEP/W 程序是 GeoStudio 软件的一个子程序, 基于饱和-非饱和渗流理论, 是用来分析多孔介质土体中地下水渗流、超孔隙水压力消散问题的一种有限元软件, 主要用于分析地下水渗流、地表降雨入渗及库岸堤坝渗流问题^[4]。

在实际工程中, 大部分陆地处于半干旱或干旱地带, 遇到的土大多为非饱和土, 因非饱和土中会存在负孔隙水压力(基质吸力), 故产生了独特的土力学问题。在 SEEP/W 软件中, 仅通过建立渗透系数-基质吸力变化曲线(反映土体在非饱和区导水的快慢)与土-水特征曲线(反映土体的持水能力), 就可以定义基质吸力, 从而能够准确、快速地分析降雨条件下边坡内部的渗流问题。

2) SLOPE 软件

SLOPE/W 是 GeoStudio 系列软件中一个非常重要的软件, 是进行边坡稳定性计算与分析的专业软件。该软件以极限平衡理论为基础, 选择不同的土体模

型, 能对不同类型的土体、复杂的滑动面形状和土层以及不同状况下的孔隙水压力建立计算模型, 输入计算参数即可进行稳定性计算与分析^[3]。此外, 在完整边坡稳定性分析中也可应用有限单元法计算应力和孔隙水压力, 克服了纯粹极限平衡理论的一些局限性。

4. 饱和-非饱和渗流理论简介[5]

1) 达西定律

饱和-非饱和土渗流的基本理论是 Darcy 定律(式 1), 该公式最初是从饱和土的研究中得来, 后来研究表明它也可在非饱和土的渗流中应用。两者唯一的不同之处在于非饱和条件下的渗透系数不再是固定的常数, 而是含水量的函数。

$$q = ki \text{ 或 } v = ki \quad (1)$$

式中, q 为单位体积流量, v 为达西流速, k 为渗透系数; i 为水力梯度。

2) 渗流微分方程

二维渗流的一般微分方程的表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式中, H 为总水头, k_x 为 x 方向渗透系数, k_y 为 y 方向渗透系数, Q 为施加的边界流量, θ 为单位体积含水量。

对于稳态情况, 式(2)右边为 0。再根据单位体积含水量与孔隙水压力的关系, 得到式 3:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w r_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

式中, m_w 为体积含水量(储水量)函数的斜率, r_w 为水的容重。

3) 有限元渗流方程

对 3 式采用加权余量伽辽金法, 可以得到有限元格式的二维渗流方程:

$$\tau \int_A \left([B]^T [C] [B] \right) dA \{H\} + \tau \int_A \left(\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle R \right) dA \{H\}, t = q \tau \int_A \left(\langle N \rangle^T R \right) dA \quad (4)$$

式中, $[B]$ 为梯度矩阵; $[C]$ 为单元渗透系数矩阵; $\{H\}$ 为节点水头向量; N 为插值函数向量; q 为穿过单位

边界的单位流量; τ 为单元厚度; t 为时间; λ 为存储项(瞬态渗流等于 $m_w r_w$); A 为在单元面积上的求和符号; L 为在单元边界长度上的求和符号。

5. 实例分析

根据收集到的资料, 以兰州市石峡口滑坡为例, 通过 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块对其进行渗流分析和稳定性系数的计算。

5.1. 滑坡概况及成因

1) 滑坡概况

石峡口滑坡位于兰州市城关区九州开发区内石峡口一带的罗锅沟西侧, 坡体近南东—北西向延伸展布。滑坡体地形高陡, 山体总体高度约 140 m, 平均坡度 35° 左右, 下部 30 m 基岩段坡度达 $44\sim 50^\circ$, 局部直立或倒坡, 上部黄土段坡度 30° , 滑坡后缘以上局部地段为 20° 左右的缓坡。滑坡体平均厚度约 13 m 左右, 总体积约为 $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主滑方向为 55° , 为小型滑坡。

滑坡主要由第四系中上更新统马兰黄土、离石黄土和前寒武系变质片岩组成, 黄土呈披覆状分布于斜坡上部, 下部 5~10 m 为呈强风化状的前寒武系变质片岩。滑动面位于晚更新统黄土、前寒武系皋兰群中, 滑体的主要物质成分是第四系中更新统的黄土及前寒武系皋兰群变质片岩的强风化层。

2) 滑坡成因

滑坡的形成受基础因子(地形地貌、岩土体工程地质性质及地质构造)和诱发因子(降雨、人类工程活动、地震)的共同影响, 其中降雨是最活跃的诱发因子之一。2007 年, 兰州地区降水较多, 到 10 月底, 降水达 402.6 mm, 比多年平均值高 30%, 8 月至 9 月连降几场大雨, 尤其是 9 月 16 日晚(石峡口滑坡于 2007 年 9 月 17 日首次整体滑动)的降水量和降水强度均较大, 降水量达 11.3 mm, 是本次滑坡首次滑动的主要引发因素。

5.2. 计算参数选取

根据黄土的物理力学性质、徐张建等人^[6]对黄土滑坡的研究结果以及穆鹏^[7-9]对石峡口滑坡的研究结果, 此次分析所采取的计算参数如表 1、表 2 所示。

Table 1. Hydraulic parameters
表 1. 水理参数

序号	岩土体类别				
	潜在滑带	滑体	马兰黄土	离石黄土	强风化片岩
饱和体积含水量(m^3/m^3)	/	0.60	0.53	0.47	0.004
饱和渗透系数(m/d)	0.05	0.456	0.294	0.15	0.017

Table 2. Mechanical parameters
表 2. 力学参数

序号	马兰黄土	离石黄土	滑体	强风化片岩	潜在滑带
重度(kN/m^3)	14.7	15.5	15	26.1	16
C(kPa)	20	25	10	110	4
$\varphi(^{\circ})$	28	30	25	38	20

5.3. 计算结果与分析

1) 基于 SEEP/W 的渗流分析

首先, 根据表 1 所给定的参数并基于 SEEP/W 做稳态分析, 得到如图 1 所示天然状态下边坡内的初始孔隙水压力分布情况; 然后, 以 SEEP/W 稳态分析作为父分析, 瞬态为子分析, 并把与石峡口滑坡相邻的雨量站 W3461 在 2007 年 9 月 3 日~17 日 15 天中的降雨量作为上边界条件, 得到降雨入渗边坡的渗流情况, 如图 2 所示。

初始阶段, 边坡表层较干燥, 土体内的基质吸力较大, 雨水入渗速度与降雨强度相等; 随着雨水的不断入渗, 边坡表层基质吸力逐渐降低, 同时因水力梯度的降低使边坡表层的入渗能力不断降低, 最后低于降雨强度; 坡面形成径流之后, 边坡表层的入渗速度逐渐降低, 最后与边坡表层的饱和和渗透系数趋近, 入渗速度开始稳定, 边坡表层形成一个暂态饱和区。

2) 基于 SLOPE/W 的稳定性分析

在 SEEP/W 渗流分析的基础上, 应用表 2 所给参数并基于 SLOPE/W 模块, 得到滑坡滑前处于天然状态下和累计降雨 15 天的稳定性计算结果(图 3、图 4)。对图 3、图 4 进行比较相比较可见, 随着降雨的不断入渗, 雨水停留在黄土孔隙中, 基质吸力减小, 使孔隙水压力不断升高, 土体重度增大, 抗剪强度降低, 坡体抗滑能力降低, 边坡稳定性逐渐减小。

根据稳定性评价标准来判断, 石峡口滑坡在天然

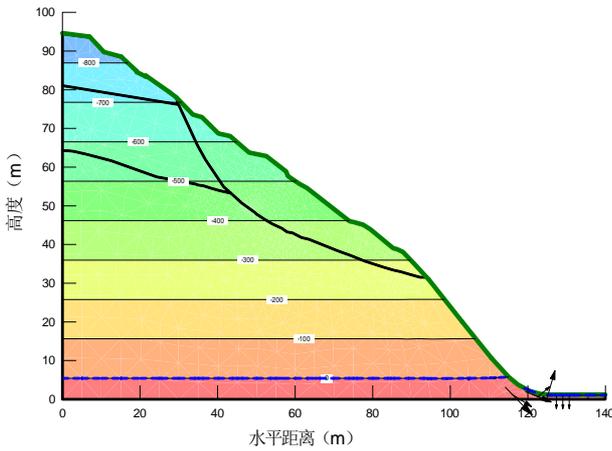


Figure 1. Pore water pressure distribution of slope in a natural state

图 1. 天然状态下边坡内的孔隙水压力分布

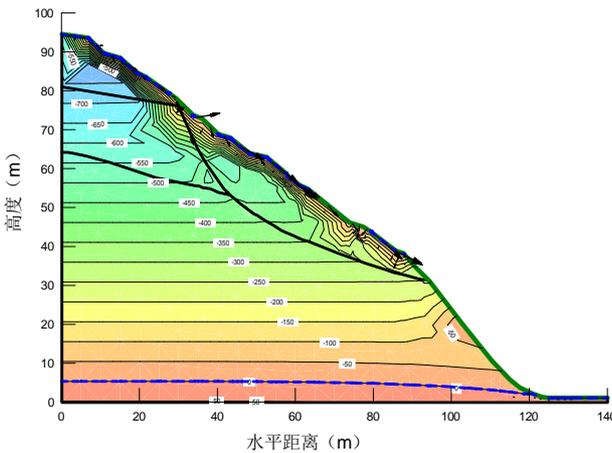


Figure 2. Seepage of landslide under the previous 15-day cumulative rainfall

图 2. 在前 15 天累计降雨作用下的渗流

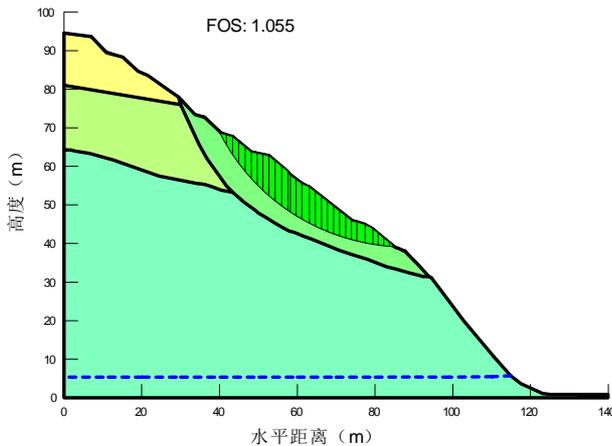


Figure 3. The stability of slope in natural state

图 3. 天然状态下边坡的稳定性

状态下的稳定性系数为 1.055, 为暂时稳定状态;

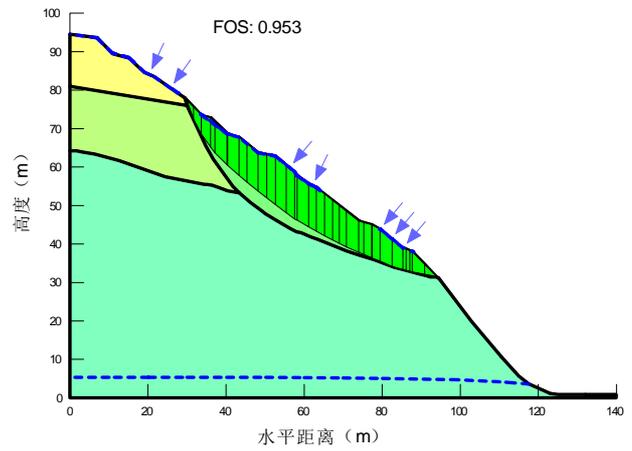


Figure 4. The stability of slope under rainfall infiltration

图 4. 降雨入渗边坡的稳定性

在降雨条件下的稳定性为 0.953, 处于不稳定状态。

3) 可靠性分析

上述结果显示: 石峡口滑坡在 2007 年 9 月 3 日~17 日累计 15 天降雨的作用下的稳定性系数为 0.953, 处于不稳定状态。由于没有考虑地震、人类工程活动等因素的影响, 致使本次计算的滑面比实际的滑面稍浅, 说明滑坡的发生除了受降雨这一主要诱发因素的影响外, 还受到地层岩性、地形地貌、构造断裂以及地震和人类工程活动的共同影响。总体而言, 本次计算结果与实际调查情况基本吻合, 与大多数降雨诱发的滑坡为小型浅层滑坡的规律一致, 说明基于 SEEP/W 和 SLOPE/W 的边坡稳定性评价是具有一定可靠性的。

6. 结论

黄土地区地下水埋藏较深, 非饱和层厚度较大, 降雨是诱发滑坡的主要因素之一。采用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块对兰州市石峡口滑坡进行了渗流分析和稳定性评价, 结果显示: 1) 在连续 15 天降雨后, 边坡表层土体孔隙水压力和含水量不断增大, 基质吸力不断减小, 容重增大, 抗剪强度降低, 最终形成了一个暂态饱和区; 2) 在此基础上, 采用 SLOPE/W 模块得到了降雨入渗该边坡的稳定性系数为 0.953, 为不稳定状态; 3) 由此得到的滑面比实际滑面要浅, 说明滑坡的形成还地层岩性、地形地貌、构造断裂以及地震和人类工程活动的共同影响。

常规的强度折减法考虑降雨对边坡稳定性的影响, 是仅把土体的 C 和 φ 进行折减而采用相关的计算

方法得到边坡的稳定状况, 可见采用降雨量对边坡进行稳定性分析与边坡所处的实际情况更加符合, 可使主观性误差进一步降低。

参考文献 (References)

- [1] 郑贤生, 郑俊. 降雨入渗对非饱和边坡稳定影响的实例分析[J]. 中国水运, 2007, 5(12): 54-55.
ZHENG Xiansheng, ZHENG Jun. Case study on influence of rainfall infiltration on unsaturated slope stability. China Water Transport, 2007, 5(12): 54-55. (in Chinese)
- [2] 颜斌, 倪万魁, 刘海松. 降雨入渗对黄土边坡稳定性的影响[C]. 第二届全国岩土与工程学术大会, 武汉, 2006年10月28日.
YAN Bin, NI wankui and LIU Haisong. Effect of rainfall on stability of loess slope. The Second National Academic Conference of Geotechnical Engineering, Wuhan, 28th October 2006. (in Chinese)
- [3] 贾美亭. 渭-阳二级公路陈坡滑坡稳定性分析与评价[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
JIA Meiting. Stability appraisal research of chenpo landslide in Wei-Yang secondary highway. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] 李守升. 植被护坡水运移及浅层边坡稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
LI Shousheng. Stability analysis on shallow slope and water migration of vegetation slope. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [5] GEO-SLOPE International Ltd. 著. 中仿科技(CnTech)公司译. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
GEO-SLOPE International Ltd. Book, CnTech Translation. Unsaturated soil seepage analysis software SEEP/W user's guide. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [6] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
XU Zhangjian, LIN Zaiguan and ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312. (in Chinese)
- [7] 穆鹏. 兰州石峡口滑坡稳定性分析与治理工程设计研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
MU Peng. Study on stability analysis and control engineering design of Lanzhou Shixiakou landslide. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. (in Chinese)
- [8] 穆鹏, 董兰风, 吴玮江. 兰州市九州石峡口滑坡形成机制与稳定性分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 332-336.
MU Peng, DONG Lanfeng and WU Weijiang. Forming mechanism and stability analysis of Shixiakou landslide at Jiuzhou, Lanzhou. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 332-336. (in Chinese)
- [9] 穆鹏, 吴玮江, 王思长. 兰州石峡口滑坡治理工程效果分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 87-91.
MU Peng, WU Weijiang and WANG Sichang. An analysis of treatment effect for the Shixiakou landslide in Lanzhou. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 87-91. (in Chinese)