

# 降雨对黄土边坡稳定性的影响

张少宏, 康顺祥, 李永红

(西北农林科技大学 水建学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 定性地分析了降雨强度、降雨历时以及土壤渗水性对土壤含水率变化的影响, 定量地分析了含水率变化与黄土抗剪强度的关系, 并通过计算分析了不同入渗深度对黄土边坡稳定性的影响, 得出对某一特定边坡均有一个临界入渗深度值。对于已形成的边坡可以根据临界入渗深度值, 按预报的降雨强度和降雨历时, 计算出可能的入渗深度, 进而判断该边坡是否稳定; 对于将要开挖的黄土边坡, 根据不同的降雨频率, 得出可能的入渗深度, 按此入渗深度确定出合理的边坡型式。

**关键词:** 岩土工程; 黄土边坡; 稳定性; 降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)05-0042-03

中图分类号: U416

## Influence of Rainfall on Loess Slope Stability

ZHANG Shao-hong, KANG Shun-xiang, LI Yong-hong

(College of Water Resources and Architectural Engineering,

Northwest University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Influence of rainfall density, rainfall duration and perviousness of soil on changes of soil moisture are analyzed qualitatively. Relationship between the shear strength of loess and changes of soil moisture is also analyzed quantitatively. After the calculation on influence of different percolation depths on loess slope stability, a decision was gained that a certain slope carried with a certain critical percolation depth. One can estimate the stability of existing slope by compare critical percolation depth with the potential percolation depth that calculated by critical rainfall density and rainfall duration. One also can choose proper slope style by the calculating result.

**Keywords:** geotechnique; loess slope; stability; rainfall

我国北方的黄土地区一般年平均降雨量大多在 800 mm 以下, 但降雨月分布不均, 7—9 月 3 个月的降雨量占全年降雨量的 70% 以上。由于降雨在时间上的分布不均, 相对来说, 单次降雨量较大。黄土地区在自然作用下形成的稳定边坡, 坡比一般大于 1: 1.5<sup>[1]</sup>。而人工边坡和水流冲刷的沟壑边坡坡比一般小于 1: 1.0。由于降雨引起的该类黄土边坡失稳时有发生, 失稳的边坡会使黄土地区的水土流失更加严重。

黄土边坡的稳定性与降雨的关系较为复杂, 有内因和外因两方面。内因为降雨前土壤的含水率、黄土边坡的植被情况、土壤的渗水性。外因是降雨的强度、降雨量、降雨历时等<sup>[2-3]</sup>。大量的黄土力学研究表明, 天然结构的黄土, 当含水率增加时, 其力学性质随之变化, 抗剪强度的两个参数, 即凝聚力和内摩擦角均降低, 导致黄土的抗剪强度降低, 使原本稳定的边坡可能变为不稳定, 发生边坡失稳。

对于特定的边坡, 不是所有的降雨都会引起边坡失稳, 只有当降雨强度一定, 降雨历时达到一定时间

后; 或降雨历时一定, 降雨强度大于某一降雨强度后, 才有可能导致边坡失稳。这两种情况最终归结为降雨入渗深度的临界值问题, 即降雨入渗深度达到某一临界深度后, 边坡才有可能发生失稳。

本文分析了黄土边坡在降雨入渗的情况下天然土的含水率变化, 以及由此引起的天然结构黄土的凝聚力和内摩擦角降低情况, 同时对由于黄土抗剪强度的降低引起黄土边坡安全系数的变化进行了分析, 探索了降雨对黄土边坡的影响规律。

## 1 降雨入渗对黄土含水率的影响

黄土地区的地下水一般埋藏较深, 土壤含水率的变化主要是由于降雨入渗引起, 而降雨对土壤含水率的影响范围主要受以下几方面<sup>[3-4]</sup>的影响。

### 1.1 降雨强度

当降雨强度小于土壤的入渗强度的时候, 降雨量将会全部渗入土壤, 并且引起土壤含水率的变化。此时, 随着降雨强度的增加, 降雨入渗深度也随之不断

增大。当降雨强度大于入渗强度的时候, 会有部分降雨形成地面径流流走。该部分降雨不会引起土壤含水率的变化。降雨入渗深度值只是与土壤的入渗强度有关, 然而与却降雨强度无关。

1.2 降雨历时

在降雨强度一定的情况下, 降雨历时越长, 土壤含水率的变化范围越大, 降雨入渗深度值也越大; 反之, 土壤含水率的变化范围小, 降雨入渗深度值也小。

1.3 土壤的渗水性

土壤的渗水性直接关系到水分的入渗速度, 进一步影响到土壤含水率的变化范围, 当土壤的渗水性差的时候, 即土壤的渗透系数小, 水分的入渗速度慢, 当降雨量和降雨历时一定时, 土壤含水率的变化范围相对要小。

1.4 降雨入渗引起含水率变化的计算

降雨入渗引起含水率变化的计算受到的影响因素较多, 除土壤表面的植被情况外, 还受土壤表面的坡度、糙率等因素影响, 特别是地层的复杂程度影响最大。现在有许多解析的和半解析的方法<sup>[2]</sup>可以用来计算土壤含水率, 如: Green- Ampt, Philip, Smith, Parlange 等公式, 但前提多属一维半无限均质土壤。对于复杂地层情况, 一般多采用有限元计算。但无论何种方法, 均不同程度地做了简化, 是计算结果与实际情况有偏差。因此, 根据实际问题的需要, 可选用一种方法或几种方法计算, 然后进行比较, 选择一个较为合理的结果。

2 含水率对黄土的抗剪强度参数的影响

由于黄土分布在干旱和半干旱地区, 天然含水率较低, 其变化范围约为 10% ~ 25%, 而其饱和含水率一般大于 30%。天然黄土具有较强的结构强度, 当天然结构黄土的含水率增加后, 其土粒间的固化联结键会遭到不同程度的破坏, 土的力学性质就会发生变化<sup>[1]</sup>, 即随着含水率的增加, 天然结构黄土的抗剪强度参数随之降低, 即凝聚力和内摩擦角均降低。根据西北水科所长期对黄土力学的研究和文献[1]介绍的天然黄土力学试验结果, 凝聚力和内摩擦角随含水率变化有如下规律。

2.1 凝聚力 C 与含水率的关系

天然结构黄土的凝聚力 C 在低饱和度情况下对含水率  $\omega$  的变化极为敏感, 当含水率  $\omega$  从 10% 增加到 25% 时, 凝聚力 C 从 130 kPa 降低到 20 kPa, 减少了 6 倍多; 当含水率  $\omega$  大于 25% 后, 凝聚力 C 随含水率  $\omega$  的变化不大, 稳定在 20 kPa 左右, 凝聚力 C 随含水率  $\omega$  变化的情况见图 1。

而天然黄土边坡受降雨影响的含水率变化范围恰好在 10% ~ 25% 之间, 因此, 从边坡稳定角度考虑, 更应注意降雨对边坡稳定性的影响。

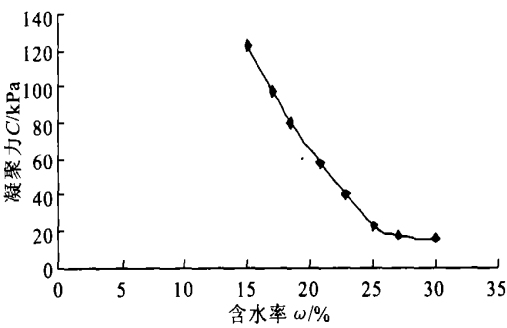


图 1 凝聚力 C 随含水率  $\omega$  变化曲线

2.1 内摩擦角  $\varphi$  与含水率的关系

含水率  $\omega$  对内摩擦角  $\varphi$  的影响规律和含水率  $\omega$  对凝聚力 C 的影响规律基本相同, 即随含水率  $\omega$  的增加, 内摩擦角  $\varphi$  也随之减小, 对于天然结构黄土, 当含水率  $\omega$  从 10% 增加到 30% (即达到饱和) 时, 内摩擦角  $\varphi$  从  $34^\circ$  减小到  $20^\circ$ , 内摩擦角  $\varphi$  随含水率  $\omega$  变化的情况见图 2。

从图 2 看, 含水率  $\omega$  从 10% 增加到 25% 时, 内摩擦角  $\varphi$  对含水率较为敏感, 而大于 25% 后, 曲线相对平缓, 变化较小。

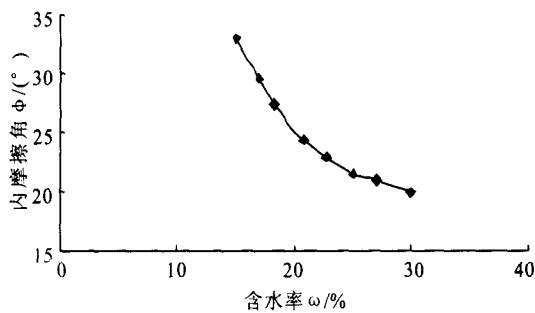


图 2 内摩擦角  $\varphi$  随含水率  $\omega$  变化曲线

3 不同入渗深度对边坡安全系数的影响

由于抗剪强度参数随土壤含水率的增加而降低, 当降雨入渗后, 边坡土壤的含水率在一定范围内会有所增加, 甚至达到饱和, 此时, 该范围内土壤的抗剪强度会降低, 从而导致该边坡抗滑稳定安全系数的降低, 当抗剪强度降低到一定值后, 则会发生滑坡。

以关中某地黄土边坡为例(图 3), 以坡高 40 m, 边坡分 2 级, 单级坡高为 20 m, 中间设置 2.0 m 宽平台一级, 坡比均为 1:0.7 的边坡做为分析对象。

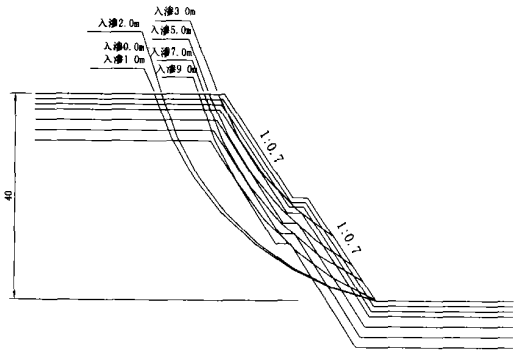


图 3 边坡及不同入渗深度滑弧位置示意图

该处黄土的天然平均含水率为 15%，平均干密度为  $1.49\text{ g/cm}^3$ ，平均天然密度  $1.71\text{ g/cm}^3$ ，平均饱和密度为  $1.94\text{ g/cm}^3$ ；天然状态下的平均抗剪强度值的  $C = 80\text{ kPa}$ ， $\varphi = 27.0^\circ$ ，饱和状态下的平均抗剪强度值的  $C = 20\text{ kPa}$ ， $\varphi = 20.0^\circ$ 。以简化比肖普法<sup>[5]</sup>为例，分析该边坡在不同降雨入渗深度情况下的安全系数变化情况(表 1, 图 4)。

从图 4 可看出，  
对于该边坡，当入渗深度小于 2.0 m 时，  
其最危险滑弧位置基本同无降雨时的情况，当入渗深度超过 2.0 m 后，滑弧位置移向边坡边缘；当入渗深度达到 3.0 m 时，安全系数已降到

序号	入渗深度/m	安全系数
1	0.0	1.452
2	1.0	1.424
3	2.0	1.384
4	3.0	1.044
5	5.0	0.761
6	7.0	0.672
7	9.0	0.627

1.044，有发生局部滑动的可能，随着入渗深度的加深，滑弧深度也随之加深，安全系数进一步降低，发生滑动的可能性也在加大，可能滑动的范围也逐渐变大。

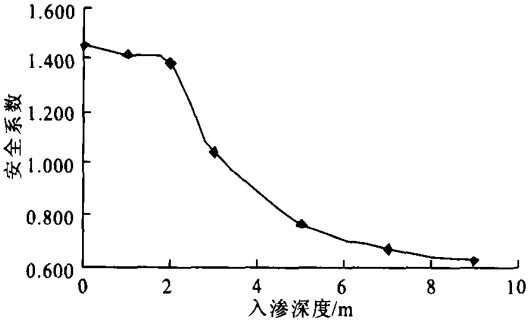


图 4 入渗深度与安全系数的关系曲线

当入渗深度小于 2.0 m 时，安全系数虽有降低，但幅度不大，不会影响边坡稳定。当入渗深度增加到 5.0 m 时，安全系数迅速降低，边坡也从稳定变为不稳定。当入渗深度大于 5.0 m 后，安全系数虽有降低，但降幅减小。

4 降雨对土坡稳定性的影响分析

分析了入渗深度对安全系数的影响情况，说明并非所有的降雨都会引起边坡失稳，对于某一边坡，只有当降雨入渗深度达到某一特定深度时，此时安全系数降低较多，边坡可能发生失稳，该降雨入渗深度，即为该边坡的降雨入渗临界值。

对于某一黄土边坡，边坡土壤入渗率一定，若降雨强度小于土壤入渗率时，随着降雨历时的延长，可据降雨强度和降雨历时确定降雨入渗深度，当入渗深度大于该土坡的临界入渗值时，土坡就可能发生失稳；当降雨强度大于土壤入渗率时，可根据土壤入渗率和降雨历时确定降雨入渗深度，与该土坡临界入渗深度进行比较，判断该边坡是否有可能失稳。

根据以上分析，降雨对边坡稳定性的影响与边坡土壤入渗率有关，而边坡土壤入渗率与边坡的植被情况、土壤密度、含水率等的不同而不同，具体的边坡可根据实际情况合理确定其土壤入渗率。同时边坡稳定性与降雨强度和降雨历时也有密切的关系。

5 结 论

(1) 对于已有边坡，可通过室内或野外的测试，测定该边坡土壤的含水率分布，天然状态和饱和状态的抗剪强度值，以及该边坡的表面渗水系数。对某一降雨强度的降雨，通过计算，可预测出其降雨历时持续多长时间，该边坡可能会发生滑动，以及滑动的位置、范围。

(2) 对于人工新修边坡，可根据当地的水文资料，按照工程等级，确定出设计的降雨频率，确定出在该频率情况下的降雨强度，以及可能的降雨历时，根据边坡的表面渗水系数，计算出可能的入渗深度，再由边坡土壤的物理、力学参数，确定在该频率降雨情况下边坡的合理型式，为工程建设提供依据。

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

[ 2 ] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

[ 3 ] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1034—1039.

[ 4 ] 刘耀儒, 杜广林, 周维垣, 等. 降雨入渗条件下三峡船闸边坡渗流场的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 238—241.

[ 5 ] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.