

文章编号: 1000-7598-(2008) 02-386-06

强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析

吴长富¹, 朱向荣², 尹小涛³, 刘雪梅⁴

(1. 浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 武汉 430071; 4. 杭州市勘测设计研究院, 杭州 310012)

摘 要: 基于实际降雨气象资料, 设计了单峰降雨和 8 个不同时间间隔的双峰降雨计算方案, 利用非饱和土力学理论, 对边坡的瞬态稳定性进行了计算和分析, 研究了水分在坡体内的运移对边坡稳定性的时间空间影响效应, 同时考察了降雨入渗造成的土性渗透特性的改变。分析发现: 一次降雨的影响历时约 12 d, 降雨后约 0.5 d 该类土质边坡最危险; 不同时间间隔的两次降雨对边坡稳定的影响比单峰降雨的最小安全系数滞后约 0.3 d~0.8 d, 影响历时基本保持不变; 土体物理力学性质、边坡最危险滑动面及其对应的安全系数随水分在坡体内渗透运移而变化。

关 键 词: 土坡; 降雨; 非饱和土; 安全系数; 稳定性; 基质吸力

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Analysis of soil slope's transient stability under intensive rainfall

WU Chang-fu¹, ZHU Xiang-rong², YIN Xiao-tao³, LIU Xue-mei⁴

(1. College of Architecture & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Hangzhou Exploration and Surveying Design Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Utilizing actual rainfall data, transient stability of soil slope is computed and analyzed under condition of one peak of rainfall and 8 different kinds of two peak rainfall schemes at different time intervals according to theory of unsaturated soil mechanics. Moreover, the effect of time and space about stability of slope is explored under the infiltration of rainfall into the slope body. In addition, soil hydraulic property changed by rainfall is presented too. It is found that the time effected once by rainfall is about 12 day, the minimum of safety factor appears after 0.5 day of rainfall, that the most dangerous situations of the soil slope effected by different interval time of twice rainfall happen 0.3-0.8 day later than that of once rainfall, the lasting time effected by rainfall being kept, and that the physical and mechanics characteristics of the soil, the most dangerous slip surface of the slope and its relative safety factor is effected and vibrated with water motion in different parts of the slope.

Key words: soil slope; rainfall; unsaturated soil; safety factor; stability; suction matrix

1 引 言

随着国家的发展, 涉及边坡的工程建设越来越多, 关于滑坡、坍塌以及围护结构失稳等自然灾害和工程事故的报道逐渐增多。受气候影响和地理制约, 我国非饱和土边坡分布广泛, 常见的非饱和土有膨胀土、黄土和残积土等, 其共同特性即土体内存在吸力。土的吸力是由土的毛细管特性、吸附特性和孔隙水中溶质的渗透性所决定的, 它可分为基质吸力和溶质吸力。对于一般的黏性土和砂土来

说, 基质吸力通常占据主导位置, 由于其易随外界因素而变化, 故对工程影响较大。溶质吸力随含水率变化较小, 其值也比较稳定, 与工程的关系远比基质吸力小。研究表明, 对于含水率和含盐量均较高的高塑性黏土, 溶质吸力才起主导作用, 因此, 工程中一般只考虑基质吸力, 非饱和土中负孔隙水压力(基质吸力)的存在对土体的稳定性是有利的。其大小与土中含水率的多少和孔隙结构(孔隙的分布、大小及连通情况)有着密切的关系^[1], 这种关系曲线称为土-水特征曲线。

收稿日期: 2006-01-27

作者简介: 吴长富, 男, 1974 年生, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: wucf1974@126.com

当前对非饱和土的研究,主要集中在与土坡稳定性有关的气、水形态在土体中的演化方面。由于技术的制约,水气演化过程的追踪和基质吸力的量测比较困难^[2],这就限制了非饱和土理论的进展及其在工程中的应用。Fredlund 在 1994 年提出了可以用测量、根据颗粒分析曲线的近似性进行估计、根据饱和土的渗透系数方程进行估计等 3 种方法来解决获取非饱和土的计算参数的困难,但该方法对粗粒土远比黏性较强的土更为适用,而且基质吸力的考虑范围也仅为 0.0~106.0 kPa。虽然该方法还有待于细化和完善,但它提供了一种较为灵活的方式和解决问题的思路。

一般土体中的水分源自于降雨补给,土内水的运移受降雨影响较大,其主要原因在于降雨使土体由上到下饱和度逐步提高,基质吸力降低,渗透性降低。土坡内水分的运移引起了物理性质的变化,也造成了土体内力学参数的时空变化,这种状况的最不利组合就会诱发边坡失稳^[3-5]。文献[6]埋设了张力计(量测吸力)、热传导吸力探头、含水率探头、土压力盒、测斜管、雨量计、蒸发计等设备进行了系统的原位监测,文献[7]建立了室内人工降雨控制系统、水库水位控制系统、大型滑坡试验平台起降控制系统和多物理量测试系统、非接触位移量测试系统、 γ 射线透射法水分测试系统等测试系统来对水分运移进行监测,这些试验研究对弄清机制和测定参数很重要。文献[8~11]对考虑基质吸力和降雨入渗的边坡进行了数值模拟和分析,这些对于非饱和土力学理论的发展和应用都起到了极大的促进作用,也引起了人们对研究降雨入渗给土体工程安全性影响的重视。

本文的研究:(1)利用 Fredlund 提出的考虑了负孔隙水压力的非饱和土抗剪强度理论 $\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$, 其中 u_a 、 u_w 分别为空气压力和孔隙水压力; ϕ' 、 ϕ^b 分别材料内摩擦角和由于基质吸力引起的摩擦角对于强度的贡献,计算中空气压力等于 0, ϕ^b 一般在 15~20°变化,本文计算时选用低值 15°。(2)利用相似性估计的方法,确定残积土的体积含水率与基质吸力特征曲线、渗透系数与基质吸力特征曲线,(3)考虑残余含水率(用于控制渗流中止)为饱和含水率的 10%时,在实测强降雨资料的条件下对某公路路堑边坡进行了瞬态稳定性分析。目的是通过计算来研究基质吸力在滑坡中所起的作用、坡体内水分的时空变化、降雨条件下边坡的破坏模式及其空间时间、

演化规律,为滑坡的预测和采取合理措施的提供参考。

2 计算模型和分析方案

2.1 物理模型、初始条件和边界条件

以南方某市的一个典型公路路堑断面为研究对象,上部土层主要为风化残积土,下卧层为泥岩。由于二者透水性能差异较大,因此可以认为下卧层为不透水层。坡体中原先是有地下水的,右边上游面的水位根据勘察资料 36 m 高度处,左边下游面在坡脚处有溢出,总体水量不是很大,由于泥岩的渗透性能很差,所以其对外部补给水的响应很慢,可以不考虑初始水位变化的影响。天然状态坡体吸力的初始分布是根据在物理模型边界处施加勘察所得水位采用稳定渗流计算的结果求取,该结果也是后续非饱和渗流分析的基础,具体结果及断面形态见图 1。

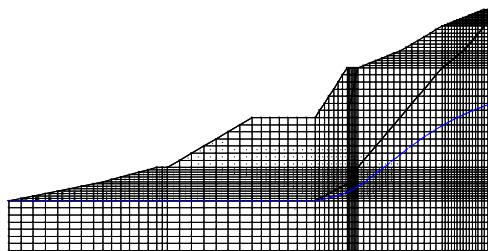


图 1 边坡断面及初始水位

Fig.1 Profile of slope and initial water table in it

2.2 岩土计算参数

计算所用岩土强度及物理参数是查阅大量当地的勘察资料后取同一地层试验值的平均值,具体见表 1,可以看出残积土的黏粒成份较少,凝聚力较小,但内摩擦角为 26.0°,说明粗粒成份较多透性较大。

表 1 岩土计算参数表
Table 1 Geotechnical computing parameters

地层	重度 / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / ($^\circ$)	饱和渗透系数 / $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$
残积土	18.7	7.0	26.0	0.415
泥岩	27.0	1 500.0	46.0	1.51×10^{-7}

由于本文的研究目标是发生滑坡的残积层内水分的运移情况对坡体稳定性的影响,所以只给出了该层的渗透特征曲线。选用的残积土渗透特征曲线是根据颗粒分析曲线的近似性选取的,计算中用到的颗粒曲线及 2 个函数曲线如图 2 所示。

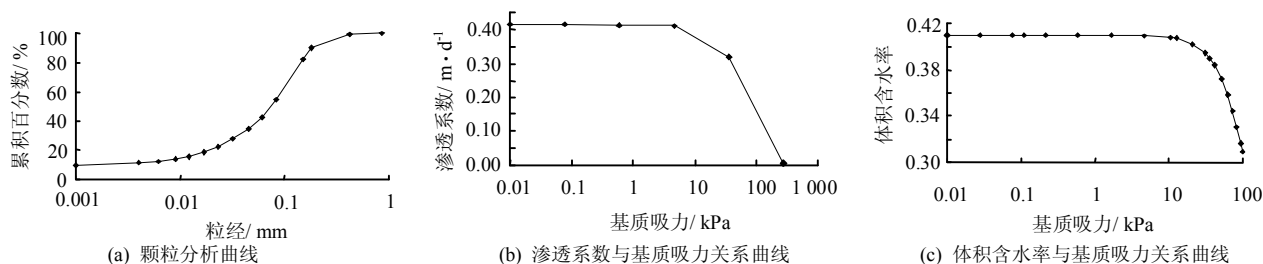


图2 残积土渗透特征曲线
Fig.2 Infiltration property of eluvium

2.3 计算方案

限于篇幅, 本文的研究仅限于不同降雨时间间隔对边坡瞬态稳定性的影响, 这里选用的两个降雨峰值(183.6 mm/d 和 131.2 mm/d)来自于气象实测资料。为研究降雨过程中坡体内可能发生滑坡的部位和规模的演变过程及不同降雨时间间隔对其影响程度, 本文设计了1个单峰降雨计算方案, 主要用来研究一次强降雨的影响时间, 为多次降雨相互影响的研究提供参考, 设计了8个不同时间间隔的双峰降雨计算方案, 研究其相互影响, 见表2。

表2 数值计算模拟方案
Table2 Numerical simulation schemes

参数	单峰	双峰降雨							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
降雨量 / mm·d ⁻¹	183.6	183.6	183.6	183.6	183.6	183.6	183.6	183.6	183.6
时间间隔/d	(1st d)	131.2	131.2	131.2	131.2	131.2	131.2	131.2	131.2
		2 nd	3 rd	4 th	6 th	8 th	10 th	12 th	15 th

本文降雨是通过在坡面施加流量边界的方式模拟的, 当初期降雨量较小时将全部入渗, 当降雨量大于土体入渗能力时大于部分将通过地表径流的方式流走, 不允许降雨边界处出现积水水头。

3 结果分析计算模型和分析方案

3.1 坡体瞬态稳定性分析

3.1.1 瞬态安全系数

为了解单次降雨对边坡的影响时间和大小, 在设计的单峰降雨方案下, 对其瞬态稳定性进行了计算, 绘制成安全系数随时间变化曲线, 如图3所示。

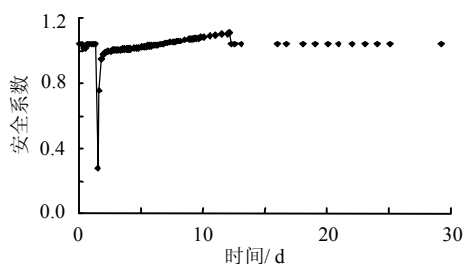
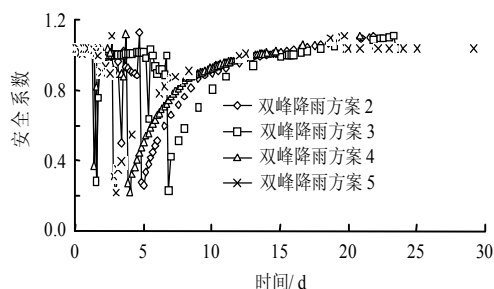


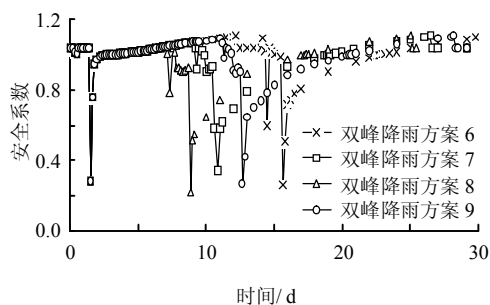
图3 单峰降雨条件下边坡安全系数变化曲线
Fig.3 Curve of slope's safety factor under one peak of rainfall

从图3可以看出, 由于雨水入渗需要一个过程, 所以边坡的最危险时间有一个滞后, 本文的计算条件下比降雨结束时间滞后了0.5 d。随后, 随着入渗水分的继续运移和排出坡体, 边坡又变得安全, 在12.5 d变回起始的安全状态。从上面的分析可以看出, 单次降雨对边坡的影响可以持续到降雨完成有11.5 d, 且可以发现由于坡体内不同部位水分的增减对边坡稳定性有利和不利, 并不完全是不利的。

由于自然界的降雨并不单独出现, 为了考察不同批次降雨之间的相互影响, 计算了在设计的8种双峰降雨方案下该边坡的瞬态安全系数, 并绘制了其随时间的变化曲线, 如图4所示。



(a) 方案2~5



(b) 方案6~9

图4 双峰降雨条件下边坡安全系数变化曲线
Fig.4 Curve of slope's safety factor under two peaks of rainfall

从图4可以看出, 由于雨水入渗需要一个过程, 在第1次降雨完成之后各方案条件下边坡都是在约1.5 d的安全系数第1次降低到最小。随后, 如

果停止降雨,随着雨、水的淋滤及渗出坡体的最敏感部位,边坡又逐渐变得安全。如果继续降雨,由于前次降雨影响了浅部土层的入渗能力,所以边坡第2次最危险时间又随着雨水的再次入渗及运移发生了变化,方案2在第3天安全系数降至最小,比2次降雨结束时间晚了1.0 d;方案3为3.8 d,方案4为4.8 d,方案5为6.8 d,方案6为8.8 d,方案7为10.8 d,方案8为12.8 d,方案9为15.8 d,均比第2次降雨结束时间晚了0.8~1.0 d,说明第1次降雨对入渗能力的影响较大,比没有降雨影响的第1次降雨迟滞效应多0.3~0.5 d,其中由两次降雨时间间隔比较大的方案8和方案9可以看出,在两次安全系数最小值之间有一个明显的增长过程,并且这两个方案与其他方案相比有一个回归初始安全系数的平台阶段,说明两次降雨的时间足够长,已经可以认为是两次独立降雨了,方案8在11.5~12.0 d时安全系数等于1.04,距离第一次降雨结束时间10.5 d;方案9的相应时间为12.~15.0 d,距离第1次降雨结束时间11.0 d。这个与单次降雨的影响时间11.5 d相差不大。可以认为,在本文的计算条件下两次降雨时间超过约11.0 d时为两

次独立降雨。

对两次降雨的相互影响的分析发现,第1次降雨入渗时间不同时,其影响深度不同,而该深度决定了第2次降雨的入渗条件,因为第1次降雨改变了坡体内不同部位的体积含水率,含水率不同时基质吸力亦不一样,最终影响了渗透系数的大小。从各方案条件下土坡最终恢复初始安全系数的先后看出,方案2为19.7 d,方案3为20.8 d,方案4为21.8 d,方案5为23.3 d,方案6为25.0 d,方案7为26.5 d,方案8为28.2 d;方案9为30.0 d,距离降雨结束时间由17.8 d单调递减到15.0 d,说明时间越长,土体的渗透能力又得到了恢复。

3.1.2 最危险滑弧的时空演化

计算多降雨组合的土坡瞬态安全系数后发现,随着雨水的入渗及其在坡体内的运移,安全系数有涨有消,说明除时间效应外,还存在一个空间因素的影响,也就是说同样的水分在坡体的不同部位对稳定性的影响是不一样的。研究亦发现,随着安全系数的变化,最危险滑弧的模式也就以下几种,限于篇幅,仅以方案1为例进行说明。图中展示的仅是发生弧型变化时的潜水位和滑体组合情况,见图5。

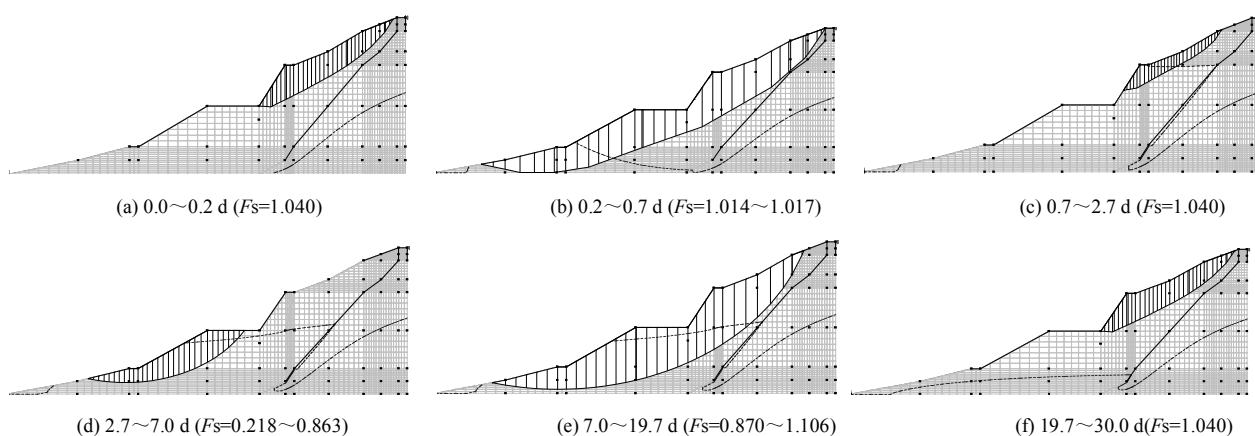


图5 降雨方案2的滑坡空间演化图
Fig.5 Evolutional map of slope of rainfall scheme 2

从图5可以清楚地看出,随着雨水的入渗,在坡体内不同部位时坡体的安全系数是不同的,其中在图5(d)的弧型出现时,安全系数达到最小值,该阶段的出现在两次降雨均结束后的0.7 d,这时的含水率和水压力分布是最不利情况。以下将结合坡体中土性参数的变化对于为什么会出现上述情况进行说明。

3.1.2 降雨对坡体土性的影响

随着时间的变化,雨水开始入渗,基质吸力逐步失去作用,渗透系数增加,这可从图5(d)位于最危险滑弧底面的上中下3个部位的节点渗透系数随

时间的变化过程可以看出。先是增加,随着降雨的完成,水分逐步淋滤丢失,基质吸力再次逐步发挥作用,从而渗透系数再次逐步走低,具体变化幅度在坡体各部位是不一样的,但总体趋势是一样的,如图6所示。

降雨对与渗透性的影响间接导致了压力水头的变化,同样选取了这3个点的水头变化值来说明压力水头的变化过程,随着两次降雨的完成,压力水头在即将丧失外界补给前的时刻达到了最大值,因此顶部峰值较小,中部次之,下部最大。由于下部在没了降雨补给后还有坡体内水分运移的补给,因

而压力水头降为 0 的次序也是上中下顺序, 在 3.7 d 附近有一个明显的水头变化速率的剧变, 说明这个时刻坡体内最容易出现不稳定, 见图 7。

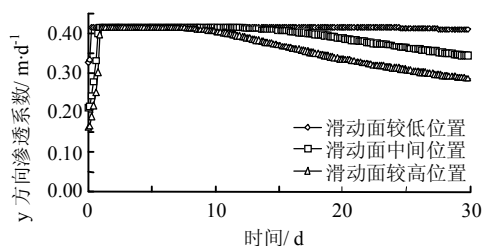


图 6 Y 方向渗透特性随时间变化过程

Fig.6 Curve of Y hydraulic conductivity and time

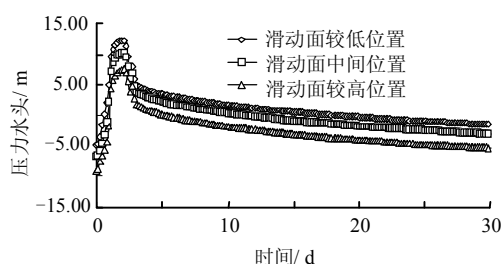


图 7 压力水头随时间变化过程

Fig.7 curve of pressure head and time

整理的这 3 个点的 XY 方向的流速变化图(图 8)可以看出, 上部节点的流速明显要比中下部节点的流速低得多, 在 3.0~4.0 d 之间有一个流速的再次升降脉冲, 这也说明当时坡体内该部位流速的异常变化, 其后流速一直稳定减小, 说明当时坡体内流速场的异常, 也间接表达了当时坡体的不稳定状态。

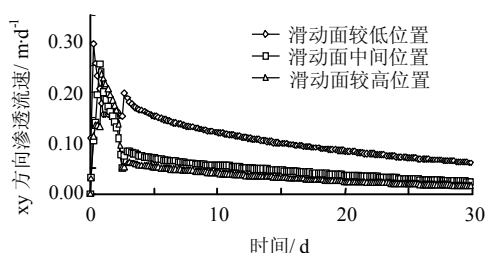


图 8 XY 方向流速随时间变化过程

Fig.8 Curve of XY velocity and time

为更直接地表明图 5(d)在安全系数达到最小时的的孔隙水压力状态, 在此特意绘制了最危险时刻及其上下各一个时间步的滑弧各土条底部的孔压分布图, 如图 9 所示。从图可以看出, 在剪出部位的孔压要比后缘部位的孔压高, 滑弧底部的抗滑段的孔压变化要比中上部急剧得多, 安全系数最小时的孔压要比该时刻前后的孔压高, 都说明孔隙水压力不利于此时的边坡稳定。

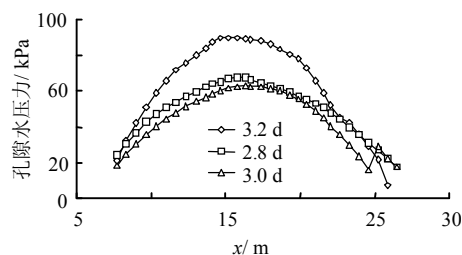


图 9 孔压沿 X 方向分布图

Fig.9 Curve of porous pressure and X coordination

4 结 论

本文在实测强降雨资料条件下, 对某公路路堑边坡进行了瞬态稳定性分析, 研究了基质吸力在滑坡中所起的作用, 坡体内水分的时空变化, 降雨条件下边坡的破坏模式及其空间时间演化规律, 为滑坡的预测和合理措施的采取提供依据, 主要结论如下:

(1) 在本文计算条件下, 经过对单峰降雨的研究发现, 边坡最危险的时间比降雨结束时间滞后了 0.5 d。随着入渗水分的继续运移和排出坡体, 在 12.5 d 后边坡又变回起始的安全状态, 得出单次降雨对边坡的影响可以持续到降雨完成后 11.5 d 的结论。

(2) 经过对两次降雨的不同时间间隔的研究发现, 在第 1 次降雨完成之后, 各方案下边坡都在约 1.5 d 的安全系数第一次降低到最小。边坡第 2 次最危险时间均比第 2 次降雨结束时间晚了 0.8~1.0 d。

(3) 从两次降雨时间间隔比较大的方案 7 和方案 8 可以看出, 在两次安全系数最小值之间有一个明显地增长过程, 并且有一个回归初始安全系数的平台阶段, 说明两次降雨的时间足够长, 已经可以认为是两次独立降雨了。

(4) 对于两次降雨的相互影响的分析发现, 因为第 1 次降雨改变了坡体内不同部位渗透能力, 从各方案条件下土坡最终恢复初始安全系数的早晚可以看出, 时间间隔越长土体的渗透能力得到地恢复就越充分。

(5) 经过对不同降雨组合的研究发现, 坡体内不同部位水分的增减对边坡稳定性有好有坏, 并不完全是不利的, 安全系数有涨有消, 这说明除时间效应外, 还存在一个空间因素的影响。在弄清楚时空效应后, 就可以为合理措施的提出、支护时间、部位的选取和灾害的预报提供参考。本文计算都是在 Geo-slope 下完成。

参 考 文 献

- [1] 李兆平, 张弥. 降雨入渗对基坑工程安全性影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 16—22.
LI Yao-ping, ZHANG Mi. Study on effects of rainfall infiltration on safety of excavation slop[J]. **Chinese Safety Science Journal**, 2000, 10(3): 16—22.
- [2] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15.
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slop[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 1—15.
- [3] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732—736.
WU Jun-ru, WANG Cheng-hua, LI Guang-xin. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 732—736.
- [4] 文高原, 姚鹏运, 曾宪明, 等. 降雨前、后夯实填土边坡破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 747—754.
WEN Gao-yuan, YAO Peng-yun, ZENG Xian-ming, et al. Testing study on failure mode of filled-soil slope before and after rainfall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(5): 747—754.
- [5] 姚海林, 郑少河, 李文斌. 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): 1 034—1 039.
YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, LI Wen-bin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expensive soil slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 1 034—1 039.
- [6] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 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, 24(2): 151—158.
ZHAN Liang-tong, WU Hong-wei, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 151—158.
- [7] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 476—2 483.
LUO Xian-qi, LIU De-fu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2 476—2 483.
- [8] NG C W W, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. **Computers and Geotechnics**, 1998, (22): 1—28.
- [9] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. **Computers and Geotechnics**, 2001, 28: 185—208.
- [10] AU S W C. Rain-induced slope instability in Hong Kong[J]. **Engineering Geology**, 1998, 51: 1—36.
- [11] SHAKOOR A, SMITHMYER A J. An analysis of storm-induced landslides in colluvial soils overlying mudrock sequences, southeastern ohio, USA[J]. **Engineering Geology**, 2005, 78: 257—274.
- [12] JOHN Krahn. Stability Modeling with Slope/W[M]. [s.l.]: Geo-slope/W International Ltd., 2004.

 特长公路隧道建设工程技术——重庆万开山隧道工程

著作者: 李祖伟 袁 勇 书 号: ISBN9787114066412

出版社: 人民交通出版社 出版日期: 2007-11-1 开 本: 16 开 装 帧: 简装

本书全面记述了铁峰山2号隧道相关的地质情况、设计施工、结构长期行为监测和特殊地质的处理。主要包括: 公路隧道设计, 公路隧道洞口开挖、衬砌施工、施工监控量测与分析, 隧道结构行为与健康检测, 特殊地质路段及施工处理方法, 隧道通风与照明。隧道结构长期行文检测是未来以隧道安全控制和预防为目的的科学研究的主要方向; 特殊地质则是我国西部地区的地质状况的典型代表, 其处理方法可为将来西部地区的隧道建设提供有益的借鉴。

(信息来源: 希望书店, 编辑部编辑)