

降雨入渗下残积土坡的失稳机理与加固治理

柯云斌

(台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000)

摘要: 针对典型非饱和花岗岩残积土边坡, 基于饱和-非饱和渗流理论, 分析了降雨入渗条件对残积土边坡渗流场与稳定性的影响, 以及相应的加固治理方案。研究表明, 边坡近坡表处的最大孔隙水压力和体积含水率均随降雨历时和降雨强度的增大而增大, 从坡顶往下呈现大-小-大的变化趋势, 且影响深度均随之增大; 边坡稳定性在降雨初期下降比较显著, 随着降雨历时增大, 边坡稳定性下降趋势变缓并逐渐趋于一稳定值; 当降雨历时较短时, 降雨强度仅改变了近坡表附近的孔隙水压力分布及含水量, 降雨强度对于边坡浅层溜方的影响不容忽视。鉴于基质吸力对边坡稳定影响很大, 建议在工程设计中应考虑基质吸力对边坡稳定性的影响。

关键词: 降雨; 残积土坡; 饱和-非饱和渗流; 加固

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)05-0012-04

中图分类号: P642.22

Instability Mechanisms and Reinforcing Treatment of Granite Residual Soil Slope Under Rainfall Infiltration Condition

KE Yun-bin

(College of Architecture Engineering, Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000 China)

Abstract: Seepage field and stability on typical slope covered by unsaturated granite residual soil under rainfall infiltration condition are analyzed based on saturated-unsaturated seepage theory. Results show that maximum pore water pressure and volumetric moisture content in surface soil on slope increase with increased rainfall intensity and duration and present an increased large-small-large trend down slope. Slope stability significantly declines in initial rainfall stage and the downward trend changes slowly to a stable value with increased rainfall duration. When rainfall duration is short, rainfall intensity only changes pore water pressure distribution and water content in surface soil on slope. So the effect of rainfall intensity on shallow slope slipping can not be ignored. Because matrix suction can greatly influence slope stability, impact of suction on slope stability in engineering design should be considered.

Keywords: rainfall; granite residual soil slope; saturated-unsaturated seepage; reinforcing treatment

在我国东南部, 花岗岩分布相当广泛, 尤其在广东、福建以及桂东南与湘南、赣南一带, 更为集中。花岗岩出露面积, 在闽、粤2省都占其总面积的30%~40%, 桂、湘、赣3省分别占其总而积的10%~20%^[1]。由降雨引起的花岗岩残积土边坡垮塌屡见不鲜, 因此, 近几十年来降雨型滑坡一直是工程界的研究热点, 随着非饱和土力学理论不断发展, 国内外许多学者采用饱和-非饱和渗流方法对降雨入渗下边坡稳定性的影响进行了深入研究, 并取得了许多重要的成果^[2-10], 这些成果对认识降雨诱发边坡失稳的力学机理具有重要意义。但以上多是围绕膨胀土等特殊非饱和土进行研究, 对降

雨条件下强风化花岗岩残积土的研究则相对较少。因此, 以残积土边坡为研究对象, 进行降雨入渗的边坡失稳的研究对于进一步认识花岗岩残积土边坡的失稳机理具有重要的理论意义。鉴于此, 本文针对福建省典型非饱和花岗岩残积土边坡为例, 采用饱和-非饱和渗流理论模拟降雨入渗的过程, 分析降雨条件对边坡渗流场和稳定性的影响, 并提出相应的加固方案。

1 非饱和土强度准则

本文采用的非饱和土抗剪强度按 Fredlund 等 1978 年提出的公式计算^[3]:

收稿日期: 2009-11-19

修回日期: 2010-04-29

资助项目: 福建省自然科学基金“饱和路基土的吸力行为及重载交通荷载下的力学行为研究”(2009J05121); 福建省教育厅科技项目“重载下路面与软土地基动力共同作用及路面破坏机制研究”(JA08016)

作者简介: 柯云斌(1972-), 男(汉族), 浙江省温岭市人, 工程硕士, 讲师, 主要从事土木工程教学和科研工作。E-mail: keyunbin@tzc.edu.cn.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

式中: τ_f ——非饱和土抗剪强度; c' 、 φ' ——有效黏聚力和有效内摩擦角; ϕ^b ——吸力内摩擦角; σ_n ——总应力; $u_a - u_w$ ——土体的基质吸力。

2 数值分析算例

2.1 计算模型及参数

本文以福州大学铜盘校区 1# 边坡为例进行降雨条件下渗流分析, 该段边坡高 42.3 m, 长 147 m, 为 2 级边坡, 由上而下一级边坡高 12.4 m, 坡率为 1 : 1.6, 一级台阶宽 6.0 m, 二级边坡高 19.1 m, 坡率为 1 : 1.45。为了表现强降雨对非饱和土质边坡渗流场的影响, 根据福州市降雨强度特点, 选择了不同日降雨强度进行模拟。因现场勘探深度范围内没有发现稳定性的地下水位, 在模拟时设定初始地下水位在 x 坐标轴上, 其计算模型如图 1 所示。

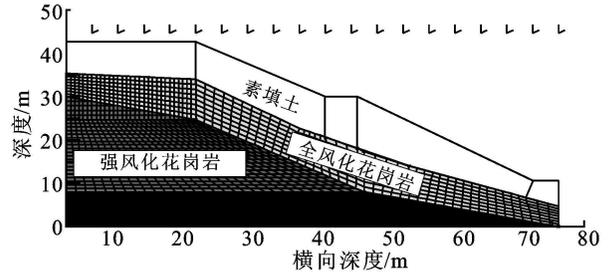


图 1 福州大学铜盘校区 1# 边坡数值计算模型

对于非饱和渗流问题, 非饱和区的孔隙水压力、体积含水量、渗透系数及容水度都是时间的函数。在有限元分析计算中, 土质的物理力学参数见表 1 所示, 土-水特征曲线采用滤纸法得到, 渗透曲线的饱和渗透系数取试验数据, 根据土水特征曲线采用 V-G 模型得到(见图 2)。数值模拟时降雨强度分别采用暴雨强度 50 mm/d, 大暴雨强度 100, 150, 200 mm/d 这 4 种工况。

表 1 计算模型的土质参数

参数	重度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量/ %	饱和度/ %	有效黏聚力/ kPa	有效内摩擦角/ ($^\circ$)	弹性模量/ MPa	饱和渗透系数 ($cm \cdot s^{-1}$)
素填土	1.66	15.9	51.8	21.3	31.2	4.77	$5.0E-4$
全风化花岗岩	1.75	14.0	65.7	30.6	17.0	10.00	$5.18E-5$
强风化花岗岩	1.90	13.9	70.6	31.8	19.1	20.00	$3.15E-5$

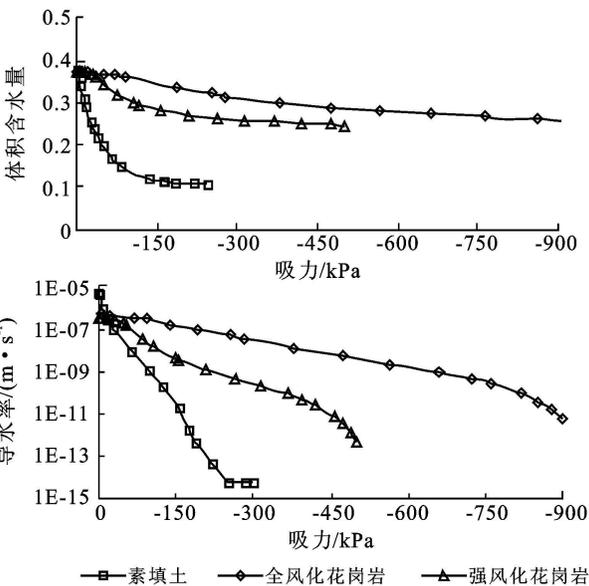


图 2 各土层的土水特征曲线与渗透曲线

2.2 降雨边界的处理

降雨入渗条件下, 雨水的入渗率与土体的渗透性有关。当降雨强度小于土体表面的入渗能力时, 计算入渗速率取为降雨强度, 边界条件为 Neumann 边界:

$$k_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q(x, y, t) \quad (2)$$

当降雨强度大于土体表面的入渗能力时, 入渗的强度等于土体的入渗能力, 边界条件转为 Dirichlet 边界:

$$h(x, y, t) \Big|_{\Gamma} = h_1(x, y, t) \quad (3)$$

3 降雨条件下残积土边坡的渗流场分布特征

3.1 降雨历时的影响

图 3 为边坡在 50 mm/d 降雨强度条件下不同时刻边坡横向 20 m 处孔隙水压力变化情况。无降雨时, 孔隙水压力等值线依据其原始条件分布。降雨过程中, 水分通过边坡表面进入坡体内, 形成竖向渗流, 坡体上部的含水量加大, 孔隙水压力增大; 距离地表的非饱和区的孔隙水压力变化较为明显, 即从坡顶往下, 边坡孔隙水压力经历大—小—大的过程。随着降雨历时的增长, 坡体上部的含水量增加的区域越来越大, 坡体的饱和度也在不断地加大, 孔隙水压力不断地增大, 如在 1 d 时, 近坡表面的孔隙压力梯度比较小, 坡体中间含水量较低的区域比较大, 当降雨历续 6 d 时, 坡表处孔隙水压力梯度减小, 这在降雨历续 10 d 时尤为显著。体现了降雨历时对渗流场的影响变化规律,

同时毛细现象使得坡底附近含水量也略有增加。

图 4 为 50 mm/d 降雨强度不同降雨历时时体积含水率随深度的变化曲线。由图可以看出,降雨作用使得近坡表处体积含水率快速增大,但并未达到饱和状态,较深处仅有微小的增大。

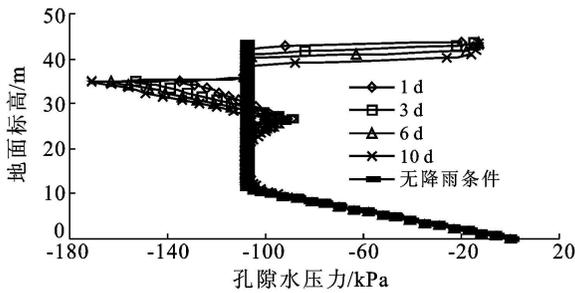


图 3 不同降雨历时的孔隙水压力曲线

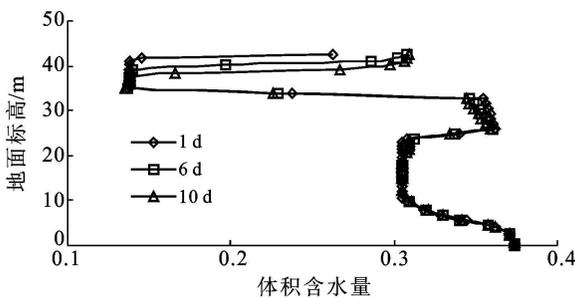


图 4 不同降雨历时的体积含水量曲线

3.2 降雨强度的影响

图 5、6 分别为不同降雨强度持续 3 d 时边坡横断面 20 m 处孔隙水压力和体积含水率随深度的变化曲线。比较图 3 和图 5,可以看出,在相同降雨历时条件下,强降雨使雨水入渗的速度更快。在降雨持续 3 d 时,近坡表处 -20 kPa 的孔隙水压力等值线的深度 200 mm/d 降雨强度时最深, 150 mm/d 次之。从 50~100 mm/d 时其增长速率较快,而后趋势变缓。孔隙水压力的影响深度随降雨强度的增大而增大。可见,降雨强度越大对孔隙水压力分布影响显著。

图 6 表明,降雨强度小于土体的入渗能力时,在相同降雨持时时,其入渗量随降雨强度的增大而增大,因而,上部土层的体积含水率随也呈现出随降雨强度的增大而增大的趋势。

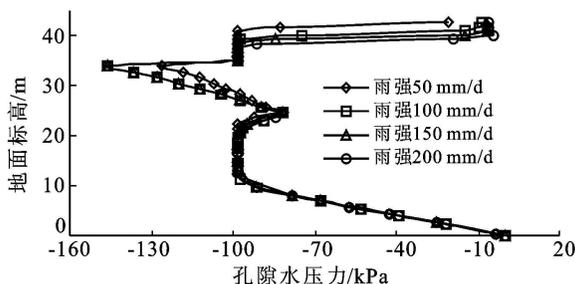


图 5 不同降雨强度下孔隙水压力变化曲线

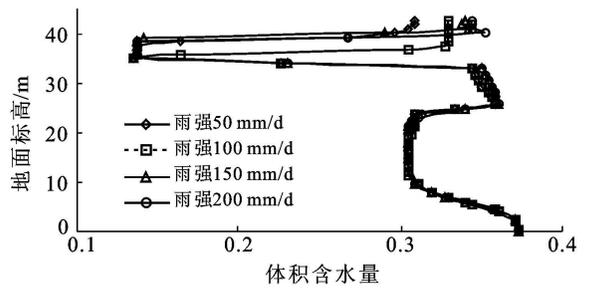


图 6 不同降雨强度下体积含水量变化曲线

4 降雨入渗对花岗岩残积土边坡稳定性的影响

4.1 降雨历时对边坡稳定性的影响

图 7 为该边坡在 50 mm/d 降雨强度下安全系数—降雨历时曲线。由图可见,降雨入渗使得边坡的稳定性降低。在降雨期间,边坡的安全系数随降雨历时的延长而减小。在 50 mm/d 降雨强度作用下,边坡稳定性在降雨初期下降的比较快,降雨历时 1 d 时边坡的安全系数从 1.246 降到 1.220。随着时间的延长,下降趋势变缓,当降雨持续 10 d 时,安全系数下降到 1.202。由此可见,在降雨初期,随着降雨时间的增大,边坡内土体孔隙水压力增大,基质吸力逐渐减少,抗剪强度下降,从而导致边坡稳定性在降雨初期下降比较显著;随着降雨时间的进一步延长,坡内渗流场变化逐渐变小,土体吸力逐渐变化较小,从而导致边坡稳定性下降趋势变缓并逐渐趋于一稳定值,因而在工程设计中应考虑基质吸力对边坡稳定性的影响。

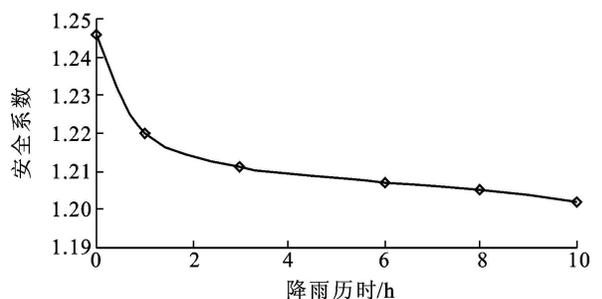


图 7 安全系数—降雨历时关系曲线

4.2 降雨强度对边坡稳定性的影响

图 8 为边坡安全系数—降雨强度关系曲线。边坡在 50 mm/d 降雨强度作用 3 d 时,安全系数为 1.211,而在 200 mm/d 降雨强度作用 3 d 时,安全系数下降到 1.192。边坡在不考虑降雨的条件下其稳定性并不满足建筑边坡安全要求,在降雨强度较小时,边坡稳定性降幅较大,当降雨强度逐渐增大时,边坡稳定性降幅趋于平缓。说明雨水的入渗导致坡体

内负孔隙水压力(基质吸力)大幅下降,小降雨强度对于边坡稳定性的影响不容忽视。同时说明当降雨历时较短时,降雨强度仅仅改变了近坡表附近的孔隙水压力分布及含水量,对深层状态的影响相对较小,因而降雨强度对于边坡浅层溜方影响较大。

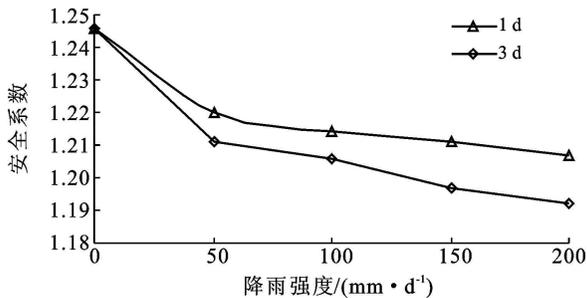


图8 安全系数—降雨强度关系曲线

5 加固方案设计

由前面分析可知,该段边坡无论在未降雨条件下还是降雨条件下稳定性均不能满足安全要求,因此,拟采用C25钢筋混凝土预应力锚索进行加固,锚索分4排,单束设计轴向拉力为500 kN,注浆材料采用水泥浆或1:1水泥砂浆,注浆压力大于0.5 MPa,采用标号不低于32.5 MPa的普通硅酸盐水泥,浆体强度不小于20 MPa。采用预应力锚索加固后边坡的稳定性安全系数达到1.498,大于一级建筑边坡容许安全系数1.3,满足要求。

6 结论

(1) 在降雨入渗过程中,坡体表面含水量增大,水分通过坡体表面进入坡体内,形成竖向渗流,整个坡体上部的饱和程度加大,孔隙水压力增大,从坡顶往下呈现大—小—大的变化趋势。

(2) 近坡表处的最大孔隙水压力和体积含水率随降雨历时的延长和降雨强度的增大而增大,且影响深度均随之增大,体现了降雨对渗流场的影响变化规律。

(3) 在降雨初期,随着降雨时间的增大,边坡土体孔隙水压力增大,基质吸力逐渐减少,抗剪强度下降,从而导致边坡稳定性在降雨初期下降比较显著;随着降雨时间的进一步延长,坡内渗流场变化逐渐变小,土体吸力逐渐变化较小,从而导致边坡稳定性下降趋势变缓并逐渐趋于一稳定值,因而在工程设计中应考虑基质吸力对边坡稳定性的影响。

(4) 雨水的入渗导致坡体内负孔隙水压力(基质吸力)大幅下降,小降雨强度对于边坡稳定性的影响不容忽视。当降雨持时较短时,降雨强度仅仅改变了近坡表附近的孔隙水压力分布及含水量,对深层状态的影响相对较小,因而降雨强度对于边坡浅层溜方影响较大。

[参 考 文 献]

- [1] 中国科学院《中国自然地理》编委会. 中国自然地理地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] Ng C W W, Shi Q A. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. Computer and Geotechnics, 1998, 22(1): 1-28.
- [3] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土路堤稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.
- [4] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1957-1962.
- [5] 魏宁, 茜平一, 傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 778-786.
- [6] 崔激, 杨建, 刘丽. 连续降雨作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2007(3): 55-57.
- [7] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581-1586.
- [8] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 8-12.
- [9] 高润德, 彭良泉, 王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 人民长江, 2001, 32(11): 25-27.
- [10] 平扬, 刘明智, 郑少河. 降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4478-4484.