

短时强降雨作用下土质边坡稳定性分析

赵欣桐

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 基于饱和-非饱和渗流及非饱和抗剪强度理论, 对土质边坡在短时强降雨条件下的渗流场进行数值模拟, 在此基础上计算不同降雨时间的边坡安全系数。结果表明, 降雨入渗将导致边坡内土体基质吸力降低甚至消失, 导致边坡抗剪强度减小; 雨水入渗会增大入渗区域暂态水荷载; 在基质吸力降低与暂态水荷载增大的双重作用下, 边坡安全系数下降。

关键词: 公路; 土质边坡; 短时强降雨; 稳定性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0058-03

根据相关文献资料, 大量土质边坡失稳发生在强降雨之后, 表明土质边坡的失稳与降雨之间存在十分密切的联系。近年来, 随着公路、铁路建设的大力发展, 降雨引起土质边坡失稳破坏的问题越来越受到广大学者的重视。降雨引起土质边坡失稳的主要原因在于降雨入渗导致土体内部基质吸力消失, 暂态饱和区孔隙水压力暂时升高。从有效应力角度分析, 在孔隙水压力升高的条件下, 边坡土体内有效应力降低是导致土体抗剪强度降低的最主要原因。暂态饱和区暂态附加水荷载作用比稳态水荷载量大, 也常成为边坡失稳的控制因素。

目前对降雨作用下土质边坡稳定性的研究主要考虑长时间降雨引起地下水位上升对边坡稳定性的影响, 较少对短时强降雨作用下边坡稳定性进行深入研究。虽然在短时强降雨作用下雨水的入渗深度未达到边坡初始地下水位, 地下水位没有显著提高, 但工程资料显示这种类型的降雨引起的边坡失稳时常发生, 给社会带来巨大损失。鉴于此, 该文基于二维饱和-非饱和渗流理论, 对短时强降雨作用下渗流场进行计算, 分析这种特殊气候条件下边坡暂态水压力分布及变化对土质边坡稳定性的影响, 为工程实践提供参考。

1 饱和-非饱和渗流数学模型

边坡中地下水流动问题可近似概化为剖面二维流动, 边坡潜在滑动面以下视为下部不透水边界, 因大气降雨引起的地下水流成为潜水二维流动问题。降雨条件下雨水的入渗满足达西定律水流均衡原理, 可将渗流方程描述为边坡剖面二维不稳定流动问题的渗流模型, 微分方程及边界条件如下:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$h|_{t=0} = h_0(x, z) \quad (2)$$

$$h|_{B_1} = h_1(x, z) \quad (x, z) \in B_1 \quad (3)$$

$$k \frac{\partial h}{\partial n} |_{B_1} = q(x, z) \quad (x, z) \in B_2 \quad (4)$$

式中: S 为比储水系数; h 为水头; k 为渗透系数; B 为含水饱和度; B_1 、 B_2 分别为第一、二类边界条件, 将两侧取为第一类边界条件, 底部和上部取为第二类边界条件。

2 降雨入渗稳定性分析方法

在考虑非饱和土的稳定性时, 较常采用加拿大学者 Fredlund 提出的线性非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma_a - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b \quad (5)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度; c' 、 φ' 分别为饱和土的有效黏聚力和有效内摩擦角; $(\sigma_a - u_a)_f$ 为破坏面上的静法向应力; $(u_a - u_w)_f$ 为破坏面上的基质吸力; u_a 、 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力; φ^b 为相对于基质吸力的剪切摩擦角。

从式(5)来看, 基质吸力的存在加大了土体的抗剪强度, 计算中假设 φ^b 为常量, 这样抗剪强度是吸力的线性函数, 随着基质吸力的增减呈线性变化。由式(5)推导的边坡安全系数 F_s 为:

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_t z_w \cos^2 \alpha - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b}{\gamma_t z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (6)$$

式中: α 为坡角; z_w 为土条中心线的垂直高度。

3 边坡暂态非饱和渗流分析算例

基于饱和-非饱和渗流理论,利用有限元软件计算短时强降雨入渗条件下边坡饱和-非饱和渗流场及安全系数的变化,图 1 为典型土质边坡有限元网格图。该边坡高 10 m,坡比为 1:1,模型底部设置刚性约束,两侧设置水平约束。模型材料选用莫尔-库仑弹塑性材料,屈服准则采用莫尔-库仑准则,以最大不平衡力趋近于 10^{-5} 为收敛准则。假设边坡土体主要由红黏土组成,边坡体内地下水主要为受大气直接补给的孔隙水且埋藏较深,地表水受大气直接补给且具有明显的季节性变化特点。边坡土体有限元计算参数见表 1,假设参数为固定值,不随外界因素影响而变化。

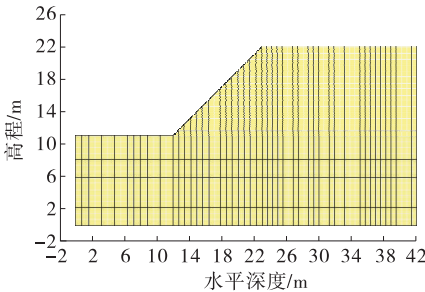


图 1 边坡典型坡面有限元网格图

表 1 边坡红黏土有限元计算参数

项目	参数值
重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	20
内摩擦角/($^{\circ}$)	16
黏聚力/kPa	20
饱和渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5×10^{-7}
含水量	0.1
降雨强度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.16×10^{-5}
降雨时间/h	10

边坡初始时刻的渗流场采用稳定渗流状态下的饱和渗流场(见图 2)。将图 2 所示饱和渗流场代入有限元计算程序,可基于饱和-非饱和渗流计算原理分析算例边坡在降雨过程中渗流场随时间的变化。图 3 为降雨停止时边坡孔隙水压力分布等势线。由图 2 可知:降雨开始前,边坡地下水位以上区域孔隙水压力为负值,在这个区域内土体为非饱和状态,由地下水位线向上,孔隙水负压随着高程的升高逐渐增大。由图 3 可知:降雨 10 h 后,边坡表面孔隙水压力为零,表明边坡表面形成了自由水面,边坡表面以下土体内基质吸力逐渐降低,由降雨前的 -80 kPa 变为 -40 kPa 。说明随着降雨的持续,雨

水入渗到土体中,使处于非饱和状态的土体逐渐趋于饱和,基质吸力逐渐降低甚至消失。同时,由于雨水入渗,地下水位明显升高。根据非饱和抗剪强度理论,基质吸力降低或消失对边坡稳定性极为不利。

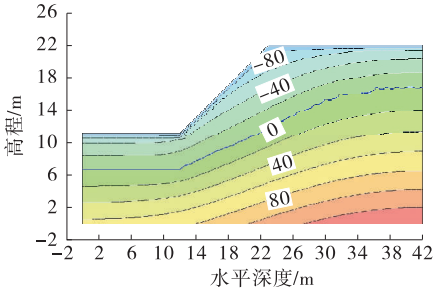


图 2 降雨前边坡孔隙水压力分布(单位:kPa)

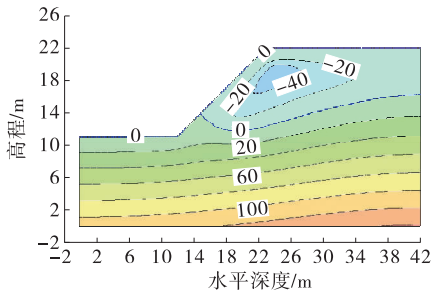


图 3 降雨停止时边坡孔隙水压力分布(单位:kPa)

图 4、图 5 为降雨前后稳定性计算边坡潜在滑动面。由图 4、图 5 可知:降雨前后边坡潜在滑动面有所不同,但变化不大;边坡安全系数由降雨前的 1.178 变为降雨后的 1.023,这是土体在降雨入渗作用下边坡土体荷载增大与基质吸力消失共同作用的结果。

图 6 为降雨过程中边坡安全系数随降雨持续时间的变化。由图 6 可知:随着降雨入渗,边坡安全系数随降雨时间的延长显著降低;降雨刚开始时边坡安全系数降低速率大于降雨后期,说明降雨开始时雨水入渗量较大,边坡土体内水荷载增重较明显。降雨后期安全系数降低主要是由雨水持续入渗导致基质吸力降低与前期雨水入渗所引起。

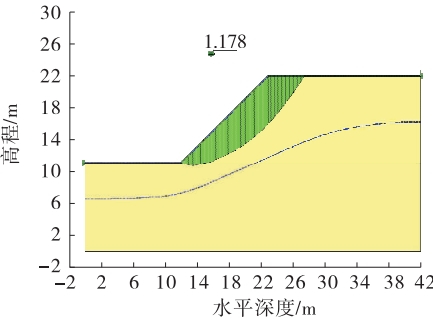


图 4 降雨前边坡潜在滑动面及安全系数

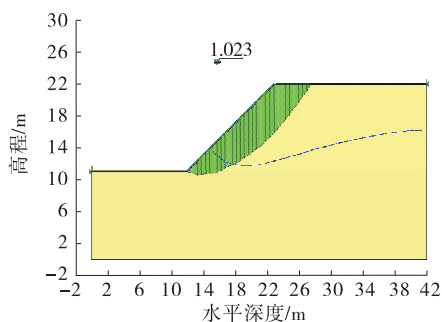


图5 降雨停止时边坡潜在滑动面及安全系数

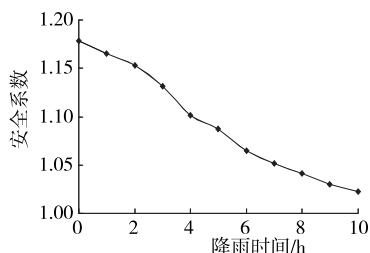


图6 边坡安全系数随时间的变化

4 结论

(1) 降雨入渗将导致边坡内土体基质吸力降低甚至消失,导致边坡抗剪强度减小。同时雨水入渗会增大入渗区域暂态水荷载。

(2) 在基质吸力降低与暂态水荷载增大的双重作用下,土质边坡安全系数明显下降。

(3) 短时强降雨天气下土质边坡容易发生失稳,在这些季节进行边坡施工应特别注意对边坡进行及时支护及监测。

参考文献:

- [1] 孙广忠.中国典型滑坡[M].北京:科学出版社,1998.
- [2] 张有天.岩石高边坡的变形与稳定[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [3] 周桂云,李同春.饱和-非饱和和非稳定渗流作用下岩质边坡稳定性分析[J].水电能源科学,2006,24(5):79-82.
- [4] 毛昶熙.渗流数值分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [5] FREDLUND D G, VANAPALLI S K, XING A, et al. Predicting the shear strength function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve[C]//Proceedings of First International Conference on Unsaturated Soil (I). Paris: International Academic Publishers, 1995:189-193.
- [6] FREDLUND D G. Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction[M]//Slope Stability. New York: Wiley, 1987:113-144.
- [7] 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.

收稿日期:2019-10-15

(上接第57页)

佳。低液限粉土的最佳复掺配比为水泥4%+水玻璃:氯化钙=3:1+石灰4%+聚丙烯纤维0.3%+膨润土9%。

参考文献:

- [1] 殷成胜.低液限粉土路基碾压施工技术研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,32(5):52-55.
- [2] 郑建东,刘典基,肖丽君.不同应力路径下低液限粉土力学特性三轴试验研究[J].工业建筑,2012,42(增刊1):368-373.
- [3] 张燕明,刘怡林,李小旋.基于统计分析的粉土区域变化规律及其物理力学性质研究[J].公路交通科技,2018,35(5):24-33.
- [4] 秦李林.低液限粉土路基填料施工技术研究[J].施工技术,2016,45(10):104-107+112.
- [5] 严筱,冯志超,黄国卿.高速公路低液限粉土路基施工

- 技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019(2):47-49.
- [6] 崔伟,吕高航,刘春阳.低液限粉土的力学性能改善及试验分析[J].科学技术与工程,2018,18(8):302-306.
- [7] 张笑峰,张艳美,刘锦程,等.纤维与粉煤灰改良粉土的正交试验分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(1):36-40.
- [8] 李志涛,吴子龙,邓永锋.江广高速公路低液限粉质黏土路用改性试验研究[J].公路与汽运,2015(1):98-101.
- [9] 姜冲,黄珂,杜伟,等.水玻璃改良低液限粉土的室内试验研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(4):42-46.
- [10] 封喜波.不同无机结合料改良低液限粉土工程特性试验研究[J].交通世界,2018(31):131-133.

收稿日期:2019-12-13