

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.05.018

初始含水率非均匀分布的无限边坡稳定性计算模型研究

吴书晨, 侯超群, 孙志彬

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:降雨入渗模型与边坡稳定性分析相结合是分析降雨诱发浅层滑坡的有效方法。文章考虑初始含水率非均匀分布对稳定性的影响,结合已有文献提出一个初始含水率呈线性分布的无限边坡稳定性简化计算模型,并运用 Mein-Larson 入渗模型及数值模拟方法验证该模型的可行性和计算精度;讨论同一土质和坡度条件下,降雨强度 p 、含水率线性变化率 k 以及地表初始含水率 θ_0 对模型计算精度的影响。结果表明:简化模型能够较为准确地描述恒定降雨入渗过程,并且适用于降雨强度大于土壤入渗能力时的无限边坡稳定性分析计算;采用简化模型进行稳定性计算, p 相同时, k 值的变化对入渗深度 Z_w 的计算精度影响较为显著,而对安全系数 F_s 计算精度的影响总体上不明显;对于给定土质和坡度的无限边坡,当 θ_0 值取 0.15、 k 值取 0.07 时,采用该模型计算 Z_w 的精度最高;与严格的数值模拟方法相比,该文提出的简化模型公式较为简单、计算用时较少,计算效率得以提高。研究结果为降雨型滑坡的稳定性分析提供了借鉴和参考。

关键词:降雨入渗;初始含水率;浅层滑坡;无限边坡;边坡稳定性

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)05-0690-06

Research on infinite slope stability calculation model with non-uniform distribution of initial water content

WU Shuchen, HOU Chaoqun, SUN Zhibin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The rainfall infiltration model in combination with slope stability analysis is an effective approach to analyze rainfall-induced shallow landslides. This paper considered the influence of non-uniform distribution of initial water content on stability, proposed a simplified calculation model of infinite slope stability with linear distribution of initial water content based on the existing literature, and verified the feasibility and calculation accuracy of the model by using Mein-Larson infiltration model and numerical simulation method. The paper discussed the influence of rainfall intensity p , linear rate of change of water content k , and initial surface water content θ_0 on the calculation accuracy of the model under the same soil and slope conditions. The results show that the simplified model can describe the infiltration process of constant rainfall more accurately and is suitable for the stability analysis of infinite slopes when the rainfall intensity is greater than the infiltration capacity of soil; when the simplified model is used for stability calculation, the change of k value has a significant influence on the calculation accuracy of infiltration depth Z_w when p is the same, while the influence on the calculation accuracy of factor of safety F_s is generally insignificant; for an infinite slope with a given soil texture and slope angle, when the value of θ_0 is 0.15 and the value of k is 0.07, the accuracy of Z_w calculated by this model is the highest; compared with strict numerical simulation method, the formula of the simplified model proposed in this paper is simpler and takes less time to calculate, which improves the calculation efficiency to a certain extent. The results provide reference for the stability analysis of rainfall-type landslides.

收稿日期:2022-09-13;修回日期:2022-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108312);安徽省自然科学基金资助项目(2108085QE250)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HGTA0160)

作者简介:吴书晨(1995—),男,安徽萧县人,合肥工业大学硕士生;

孙志彬(1983—),男,安徽黄山人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:sunzb@hfut.edu.cn.

为 151 m、竖直深度为 15 m 的无限边坡进行计算,并与模型解进行对比验证;采用极限平衡 Janbu 法

计算稳定安全系数;采用四边形网格,有限元网格尺寸为 0.5 m,共 7 276 个节点,6 900 个单元。

表 1 土体基本参数

θ_s	θ_i	$k_s/(m/h)$	α/m^{-1}	n	$\gamma/(kN/m^3)$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\varphi^b(^{\circ})$	s_f/m
0.015	0.40	0.02	3.5	1.5	19	3	30	25	0.06

4 计算结果分析与验证

分别采用简化模型和数值模拟计算无限边坡

入渗深度 Z_w 、安全系数 F_s 。

选取降雨 2.0~5.0 h 内的数据进行对比分析,结果如图 3 所示。

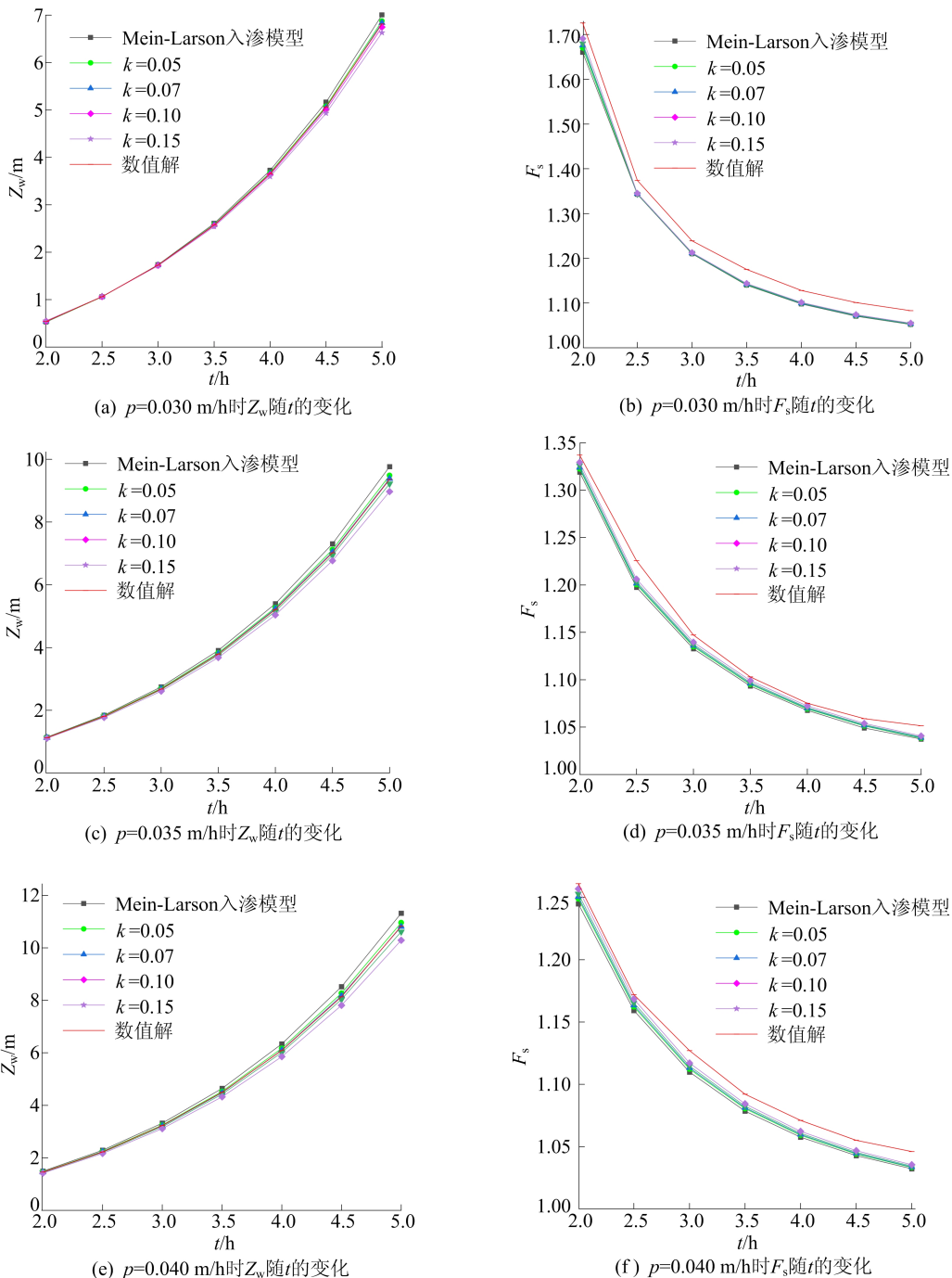


图 3 简化模型和数值模拟计算结果对比

从图 3 可以看出,采用简化模型进行稳定性计算,各工况下入渗深度 Z_w 的计算值均随时间迅速上升,且上升速度逐渐加快,而安全系数 F_s 的计算值则随时间呈现先快后慢的下降趋势。当降雨强度 p 相同时, Z_w 的计算误差随着降雨历时的增加而增大;而当降雨历时相同时,其计算误差随 p 值的增大而增大。采用简化模型计算 F_s 值,其计算结果总是比数值解略低;在不同的工况下,简化模型能够较为准确地计算 Z_w 、 F_s 值,其最大误差分别为 7.1%、2.7%。

因此该模型能够较为准确地描述恒定降雨条件下的降雨入渗过程,并且适用于降雨强度大于土壤入渗能力时的无限边坡稳定性分析计算,其计算结果偏安全。

此外,通过简化模型计算结果可以发现,降雨强度 p 相同时, k 值的变化仅对 Z_w 的计算精度影

响较为显著,而对 F_s 计算精度的影响总体上不明显,仅在降雨 2 h 时影响较为显著;当 k 值取 0.07 时,采用简化模型计算 Z_w 的计算结果与数值解最为接近,这说明与初始含水率均匀分布假设相比,线性分布假设提高了 Z_w 的计算精度,其计算结果更加可靠。

为了进一步验证 θ_0 的取值对模型计算精度的影响,在 $k=0.07$ 、 $p=0.030$ m/h 的前提下,分别取 θ_0 为 0.13、0.15、0.17,采用简化模型进行稳定性分析计算,并与 $p=0.030$ m/h 时的数值解进行对比分析,计算结果见表 4、表 5 所列。从表 4、表 5 可以看出,当 $\theta_0=0.15$ 时,简化模型计算结果与数值解最为接近,其平均误差最小。因此,对于给定土质和坡度的无限边坡,当 $\theta_0=0.15$ 、 $k=0.07$ 时,采用此模型计算 Z_w 的精度最高。

表 4 简化模型和数值模拟计算入渗深度结果对比

单位:m

t/h	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
数值解	0.541	1.060	1.727	2.572	3.656	5.061	6.812
$\theta_0=0.13$	0.407	0.852	1.409	2.110	2.989	4.092	5.478
$\theta_0=0.15$	0.539	1.060	1.725	2.575	3.661	5.049	6.823
$\theta_0=0.17$	0.707	1.329	2.141	3.200	4.582	6.386	8.739

表 5 简化模型和数值模拟计算安全系数结果对比

t/h	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
数值解	1.726	1.374	1.231	1.150	1.113	1.076	1.055
$\theta_0=0.13$	1.896	1.428	1.259	1.173	1.122	1.089	1.067
$\theta_0=0.15$	1.676	1.344	1.211	1.142	1.100	1.072	1.053
$\theta_0=0.17$	1.516	1.274	1.170	1.114	1.080	1.057	1.042

5 计算效率分析

简化计算模型和数值模拟均采用同一机型进行计算。当采用较严格的数值模拟方法进行计算时,首先采用渗流模块 SEEP/W,通过稳态渗流计算得到边坡初始状态下的含水量以及孔压分布;然后通过瞬态渗流计算得到不同工况下各个时刻的入渗深度、含水量以及孔压分布;最后将渗流计算结果导入到稳定性分析模块 SLOPE/W 中,采用极限平衡 Janbu 法得出不同工况下各个时刻的稳定安全系数。瞬态分析时步为 2 min,边坡初始状态计算用时为 0.5 s,在不同工况下的瞬态渗流计算平均用时为 30.0 s,则每种工况下每个时刻的降雨入渗计算过程平均用时为 30.5 s;将渗流计算结果导入到稳定性分析模块

SLOPE/W 中,各个时刻的稳定性分析平均用时为 1.5 s,则不同工况下各个时刻的稳定性计算平均用时为 32.0 s。

采用本文提出的简化计算模型进行计算时,利用第 2 节的公式,采用 MATLAB 编制程序进行计算,即可得到不同工况下各个时刻的入渗深度以及安全系数。采用相同的机型进行计算,不同工况下各个时刻的稳定性计算平均用时仅为 1.0 s 左右。

综上所述,简化计算模型与数值模拟方法相比,其计算用时显著缩短。如果为了保证有限元的精度,将网格划分密一些,时间步取小一些,那么采用数值模拟方法将耗费更多的时间。因此采用本文提出的简化计算模型进行计算,比采用数值模拟方法的计算效率高很多。

6 结 论

本文基于改进的 Mein-Larson 入渗模型及 Fredlund 抗剪强度理论,考虑初始含水率非均匀分布的影响,提出一个初始含水率呈线性分布的无限边坡稳定性简化计算模型,并运用数值模拟方法对该模型的计算精度进行验证,得出如下结论。

1) 简化计算模型能够较为准确地描述恒定降雨条件下的降雨入渗过程,并且适用于雨强大于土壤入渗能力时的无限边坡稳定性分析计算。

2) 降雨强度 p 相同时,含水率线性变化率 k 的变化仅对入渗深度 Z_w 计算精度的影响较为显著,而对安全系数 F_s 计算精度的影响总体上不明显,仅在降雨 2.0 h 时影响较为显著;对于相同土质和坡度的无限边坡,当 θ_0 取 0.15、 k 取 0.07 时,采用此模型计算 Z_w 的精度最高。

3) 与严格的数值模拟方法相比,本文提出的简化计算模型公式简单、便于计算,且所需时间比数值模拟方法短很多,计算效率得以提高。

[参 考 文 献]

- [1] 张泰丽,周爱国,孙强,等. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2354-2362.
- [2] 马世国,韩同春,徐日庆. 强降雨和初始地下水对浅层边坡稳定的综合影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 803-810.
- [3] 郭璇,赵成刚,于威威. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 14-18.
- [4] 刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1705-1709.
- [5] 詹良通,李鹤,陈云敏,等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 872-886.
- [6] 李卓,何勇军,李宏恩,等. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 400-405.
- [7] 林鸿州,于玉贞,李广信,等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198-204.
- [8] 严绍军,唐辉明,项伟. 降雨对滑坡稳定性影响过程分析[J]. 水文地质工程地质, 2007(2): 33-36.
- [9] CHEN X D, GUO H X, SONG E X. Analysis method for slope stability under rainfall action[M]//Anon Landslides and Engineered Slopes. London: Taylor & Francis Group, 2008: 1507-1515.
- [10] YEH H F, LEE C C, LEE C H. A rainfall-infiltration model for unsaturated soil slope stability[J]. Journal of Environmental Engineering and Management, 2008, 18(4): 261-268.
- [11] CHO S E, LEE S R. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes consideration rainfall characteristics [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9): 756-763.
- [12] MUNTOHAR A S, LIAO H J. Rainfall infiltration; infinite slope model for landslides triggering by rainstorm[J]. Natural Hazards, 2010, 54(3): 967-984.
- [13] 李宁,许建聪,钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1485-1490.
- [14] FANG W, ESAKI T. Rapid assessment of regional superficial landslide under heavy rainfall[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2663-2673.
- [15] LIU Z Z, YAN Z X, DUAN J, et al. Infiltration regulation and stability analysis of soil slope under sustained and small intensity rainfall[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2519-2527.
- [16] 唐扬,殷坤龙,汪洋,等. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型[J]. 地球科学, 2017, 42(4): 634-640.
- [17] 唐扬,殷坤龙,夏辉. 前期含水率对浅层滑坡降雨入渗及稳定性影响研究[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 204-208.
- [18] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.
- [19] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [20] 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.

(责任编辑 张 镅)