

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201901122



基于非饱和大孔隙流双重介质模型的浸水边坡水力响应数值模拟

阙云¹, 熊汉¹, 刘慧芬^{2*}, 詹小军¹

(1.福州大学土木工程学院, 福建福州 350116; 2.佛山科学技术学院交通与土木建筑学院, 广东佛山 528000)

摘要:受地形限制,大量公路、铁路沿库与沿河展线,库(河)水位变化是诱发库岸滑坡的重要因素。目前,边坡渗流研究多集中在非饱和均匀流,对大孔隙边坡非平衡流方面研究仍显滞后。为此,以福建省某一典型库区边坡为例,对比水位上升条件下考虑非饱和渗流和非饱和大孔隙流时边坡水分场和稳定系数随时间的变化规律,并分析了水位上升速率(v)、大孔隙域水力传导系数(K_{sf})、两域交界处水力传导系数(K_{sa})、土粒中心至大孔隙边界距离(a)、大孔隙体积占比(w_f)等对大孔隙边坡稳定系数的影响规律及权重。结果表明:水位上升中,非饱和渗流下边坡内部基质域含水率明显小于非饱和大孔隙渗流下边坡内部基质域含水率。非饱和渗流条件下边坡浅层向内的水力坡度明显大于非饱和大孔隙流边坡,且大孔隙边坡中相同位置基质域含水率远大于大孔隙域(最大达18.9倍)。两种渗流工况下,边坡稳定系数随水位上升均呈现先减小后增大的趋势,并于同一水位(在最高蓄水位高程的一半附近)同时达到最小值。相同渗流工况下,考虑非饱和大孔隙渗流边坡稳定系数更小。增加 v 、 K_{sf} 、 a 、 w_f 或减少 K_{sa} ,坡内两域间水分交换减弱,水分将快速运移至坡体深处,引起地下水位上升,促使边坡稳定性最大降幅达17.7%。 v 、 K_{sf} 和 w_f 对边坡稳定影响占权重较大且相当, K_{sa} 和 a 所占权重较小且约为前者一半。

关键词:水位上升;浸水土坡;非平衡流;力学响应;边坡稳定

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)06-0102-09

Numerical Simulation of Hydraulic Response of Immersed Slope Based on Dual-permeability Model of Unsaturated Macropore Flow

QUE Yun¹, XIONG Han¹, LIU Huifen^{2*}, ZHAN Xiaojun¹

(1.College of Civil Eng., Fuzhou Univ., Fuzhou 350116, China; 2.School of Transportation and Civil Eng., Foshan Univ. of Sci. and Technol., Foshan 528000, China)

Abstract: Restricted by terrain, a large number of roads and railways often appear along the reservoir line and along the river line, and water level changes are an important factor causing landslides on the banks. At present, most of the researches on slope seepage focus on the unsaturated uniform flow, and the study on the non-equilibrium flow of macropore slope is still lagging behind. In this study, the stability factor of unsaturated seepage flow and unsaturated macropore flow slope was analyzed, and the influence law of the factors including water level rise rate (v), hydraulic conductivity in macropores (K_{sf}), hydraulic conductivity of the matrix-fracture interface (K_{sa}), the equivalent diffusion distance between two domains (a), and the volumetric fraction of macropore domain (w_f) on the stabilization of slope were analyzed by macropore flow model. The results showed that the water content in the matrix area of the slope was close to saturation in the unsaturated macropore flow, and the water content in the matrix domain was obviously less than that in the matrix domain of the slope under unsaturated macroporous seepage with rise of the water level. The hydraulic gradient of the shallow inward slope was obviously larger than that of the unsaturated large pore flow slope under unsaturated seepage. The moisture content in the matrix domain was much larger than that in the macropore domain (up to 18.9 times) at the same loca-

收稿日期:2019-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41772297);福建省自然科学基金项目(2018J01771);国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金项目(FJKLGH2017K003)

作者简介:阙云(1980—),男,教授,博士。研究方向:路基与边坡工程。E-mail: queyun_2001@fzu.edu.cn

*通信联系人 E-mail: liuhuifen99@163.com

网络出版时间:2020-10-27 15:50:53

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20201027.1127.002.html>

tion because the permeability coefficient of matrix domain is much smaller than that of macroporous domain. The stability factor of reservoir bank slope decreased first and then increased with the increase of reservoir water level, and it reached the minimum at the same water level (close to the height of the highest storage level) at the same time. Under the same seepage conditions, the stability of unsaturated macropore flow was weaker than that of unsaturated seepage. Reducing K_{sf} , a , w_f or increasing K_{sa} made the water exchange between the two regions become slow. As the moisture rapidly migrates to the depth of the slope, it caused the groundwater level to rise and the maximal decrease of slope stability was 17.7%. The influence of v , K_{sf} and w_f slope stability was relatively large and equivalent, while K_{sa} and a were relatively small and they were about half of the former.

Key words: water level rise; immersed slope; non-equilibrium flow; mechanical response; slope stability

山区公路与铁路受地形限制及展线要求,常出现沿河、沿溪线或沿库线。有统计资料表明,库岸失稳破坏发生在库水位上升期约占40%~49%,发生在水位下降期约占30%。2003年,发生在湖北省秭归县的某滑坡,滑坡方量达 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$,死亡24人^[1],其直接原因是三峡水库蓄水后库水位上升,导致边坡稳定性降低^[2]。以上说明水位上升是诱发边坡失稳的重要因素。鉴于此,国内外已有不少学者采用饱和-非饱和渗流理论与非饱和土力学对水位变化诱发边坡失稳机理进行了大量的研究,并取得了丰硕成果。如:刘才华等^[2]分析库水位上升过程中孔隙水压力的变化及边坡稳定性;Griffiths等^[3-4]通过数值模拟得到边坡安全系数随着库水位的增加呈现先变小后变大的趋势;Viratjandr等^[5]运用极限上限法揭示了库水位变动对边坡稳定的影响机制;张琳琳等^[6]采用极限平衡法,分析了临河水位和地下水水位差对河岸边坡稳定性的影响;宗全利等^[7]根据上荆江崩岸发生形式及过程,综合考虑水流冲刷作用和水位变化等因素,计算了两个典型河岸在枯水期、高水期和退水期的岸坡稳定性,得到了不同水位及不同坡脚横向冲刷距离下河岸稳定的安全系数。

与此同时,中国东南沿海地区花岗岩残积土分布十分广泛(如花岗岩残积土大孔隙的比例达2.40%~48.72%),是一种典型的大孔隙材料^[8]。在水位上升过程中,由于土体中大孔隙结构的存在,在库水位上升过程中土壤大孔隙中的水流可在短时间内到达土壤深层,即产生大孔隙流。相比较于非饱和渗流,大孔隙流存在以下特点^[9-12]:1)大孔隙流的土壤水分渗流速度远大于非饱和渗流,不适宜采用单一达西定律描述非均匀流;2)虽然大孔隙体积只占整个土壤体积很小一部分(0.1%~5.0%),但对水及溶质在土壤中的非平衡运移有着深刻影响;3)是否考虑非均匀流对于降雨入渗的湿润峰与含水率等影响很大,如相同时间内,考虑非均匀流的湿润峰位置比未考虑非均匀流的湿润峰位置最大相差超过5倍。以上表明,对非饱和水分运移机理的研究已开始从均质到非均质、非饱和平衡流到非饱和非平衡流的转变。值得注意的是,大孔隙流对边坡失稳机理的研究近年

来已成为国内外学者研究的热点问题之一,Horton等^[13]在研究大孔隙过程中发现,水分入渗存在“集中流动”的现象;Edwards等^[14]通过室外试验,获得了含大孔隙土壤中降雨强度对水份运移的影响规律;牛健植等^[15]以国内外对优先流的研究现状为基础,通过研究指出优先渗流不符合达西定律及对流-弥散方程等,同时还探讨了优先流的发展趋势;阙云等^[16]通过有限元软件Hydrus中的Dual-Permeability模块与SLOPE模块,揭示了短时冻区冰雪消融对残积土斜坡非平衡渗流与稳定性的影响机理;阙云等^[17-18]采用非饱和和优先流模型,分析并总结了降雨强度、持时等因素对水分非平衡运移的影响。由以上分析可知,目前国内外对于大孔隙渗流的研究集中于理论分析、田间溶质运移试验及模拟降雨的影响等,而库水位变化对库岸斜坡影响的研究还仍十分匮乏。因此,针对大孔隙土坡,采用非饱和大孔隙渗流理论分析其水分非平衡运移机理,并在此基础上分析边坡的稳定性,无疑更符合工程实际。

鉴于此,以福建省库区典型大孔隙边坡为例,基于非饱和大孔隙流分析模型,借助Hydrus 2D/3D软件,实现库水位上升情况下残积土坡大孔隙流模拟,并分析水位上升速率及大孔隙参数等对边坡稳定性的影响。研究成果可丰富水位变化诱发滑坡相关研究的理论基础,并支撑灾害防治。

1 非饱和大孔隙流模型

传统非饱和渗流模型及非饱和大孔隙流模型如图1所示,其中,土壤孔隙分为基质域(m)和大孔隙域(f),两域水分进行交换,且水分在两域的渗流速度也不同。

非饱和大孔隙流模型方程如式(1)、(2)所示^[19]:

$$\frac{\partial \theta_f(h_f)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_f(h_f) \left(K_{i,j}^A \frac{\partial h_f}{\partial x_j} + K_{z,f}^A \right) \right] - S_f(h_f) - \frac{\Gamma_\omega}{w_f} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_m(h_m)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_m(h_m) \left(K_{i,j}^A \frac{\partial h_m}{\partial x_j} + K_{z,m}^A \right) \right] - S_m(h_m) + \frac{\Gamma_\omega}{1-w_f} \quad (2)$$

式中: w_f 为大孔隙体积占比; h 为水压, m ; K 为非饱和导水系数, m/s ; θ 为含水率; S 为饱和度; Γ_ω 为基质域

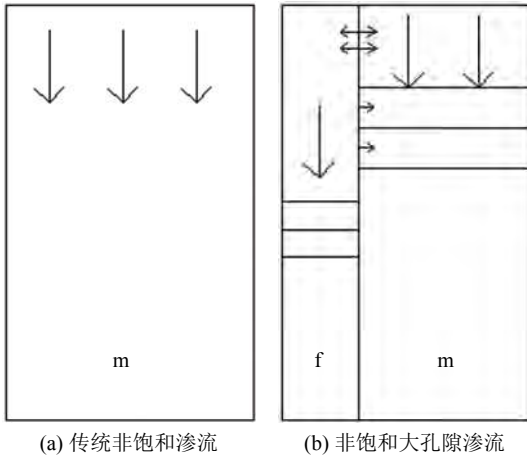


图 1 两种渗流模型

Fig. 1 Two seepage models

与大孔隙域间水分交换项, $1/s$; K_{ij}^A 、 K_{iz}^A 均为无量纲各向异性张量 K^A 的组成部分;下标 m 表示基质域,下标 f 表示大孔隙域。

两域水分交换项可表示为^[19]:

$$\Gamma_{\omega} = \alpha_{\omega} K_a (h_f - h_m) \quad (3)$$

式中, α_{ω} 为1阶水交换系数^[19],可表示为:

$$\alpha_{\omega} = \frac{\beta}{a^2} \gamma_{\omega} \quad (4)$$

式中: β 为土壤团粒几何形状因子,取15; a 为团粒中心至大孔隙边界距离, cm; γ_{ω} 为经验参数,取0.4; K_a 为两域交界面水力传导系数,可表示为^[19]:

$$K_a = \frac{K_f(h_f) + K_m(h_m)}{2} \quad (5)$$

式中, K_f 、 K_m 分别为大孔隙域和基质域导水系数。

2 边坡计算模型

2.1 地质概化模型

以福建省国道316线某水库残积土边坡作为计算模型,共有两级台阶,每级坡率约1.0:1.5,高约17 m。坡体未发现不良地质,两层土体,坡面植被根系发育,土体孔隙较多,大孔隙所占比例大,说明该边坡发生大孔隙流几率大,地质剖面概化模型与网格划分分别如图2、3所示。

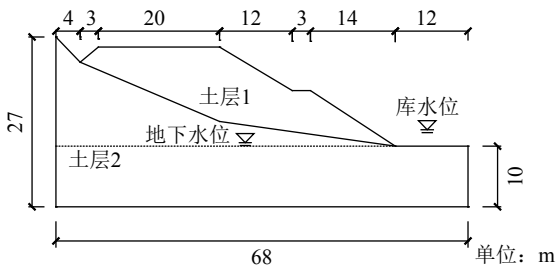


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

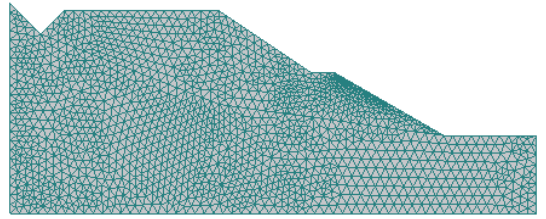


图 3 有限元网格划分

Fig. 3 Finite element mesh division

2.2 初始条件

采用如图4所示的水头分布作为初始条件。其中:地下水位线以上,其压力水头随深度逐渐减小;地下水位线以下,其压力水头随着深度的增加而增加。

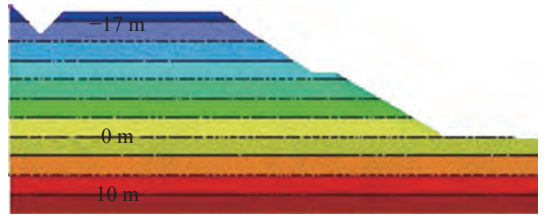


图 4 初始条件

Fig. 4 Initial condition

2.3 边界处理

坡面采用随时间变化的变水头边界,其他边界均采用零通量边界。水位速度边界的水头函数为:

当 $V=1$ m/d时,

$$H(t) = 10 + t, t \in (0 \sim 12 \text{ d}) \quad (6)$$

当 $V=2$ m/d时,

$$H(t) = \begin{cases} 10 + 2t, & t \in (0 \sim 6 \text{ d}); \\ 22, & t \in (6 \sim 12 \text{ d}) \end{cases} \quad (7)$$

当 $V=3$ m/d时,

$$H(t) = \begin{cases} 10 + 3t, & t \in (0 \sim 4 \text{ d}); \\ 22, & t \in (4 \sim 12 \text{ d}) \end{cases} \quad (8)$$

式(6)~(8)中: V 为水位上升速度, m/d; H 为水位高度, m; t 为天数, d。

2.4 计算参数

土样基质域土水特征曲线采用van Genuchten模型(式(10))^[20]表示:

$$\theta(H) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha H|^n]^m}, & H < 0; \\ \theta_s, & H \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ_r 、 θ_s 分别为残余和饱和含水率; H 为基质吸力; α 、 n 、 m 为拟合参数, $m = 1 - 1/n$ 。

土体大孔隙的产生主要是由于干湿循环形成的土体裂缝孔隙及植物根系腐烂所形成的管状大孔隙造成的,其分布特征复杂。由于土体大孔隙域部分参数较难获得,因此,通过现场取土进行筛分获得土体颗粒组成后,参考文献^[17-19]中对应土体类型,得到大孔隙域土层参数见表1。

表 1 土层参数^[17-19]
Tab. 1 Parameters of soil^[17-19]

土层	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	m	$K/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	w_f	A/cm	$K_{sa}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
上层土基质域	0.029	0.37	0.0065	1.40	0.5	2.47	0.05	1	0.01
上层土大孔隙域	0	0.37	0.0300	2.00	0.5	2000.00	0.05	1	0.01
下层土基质域	0.200	0.36	0.0057	1.69	0.5	1.36	0.05	1	0.01
下层土大孔隙域	0	0.36	0.0100	2.00	0.5	2000.00	0.05	1	0.01

3 模型求解精度验证

文献[19]中对大孔隙土柱进行了水分运移试验, 基质域、大孔隙域分别采用风干后的土体及粒径为 2 cm 的粗砂。土体含水率采用 TDR 型湿度传感器测试。图 5 和 6 分别为试验装置与网格划分图, 其尺寸同原试验。图 7 为计算得到土柱顶面下 20 cm 处大孔隙域体积含水率及 50 cm 处基质域体积含水率同原试验实测值对比, 其中计算参数同原文^[19]。由图 7 可见: 20 cm 处大孔隙域体积含水率随时间逐渐增大, 并于

5 min 时趋于饱和状态 (饱和含水率为 0.36); 50 cm 处基质域体积含水率同样随时间逐渐增大, 并于 13 min 时趋于饱和状态 (饱和含水率为 0.35)。综合以上 30 min 内试验与数值模拟结果, 两者最大相差分别约为 4% 和 5%, 说明数值模型的计算精度较高, 可反映大孔隙流特性。

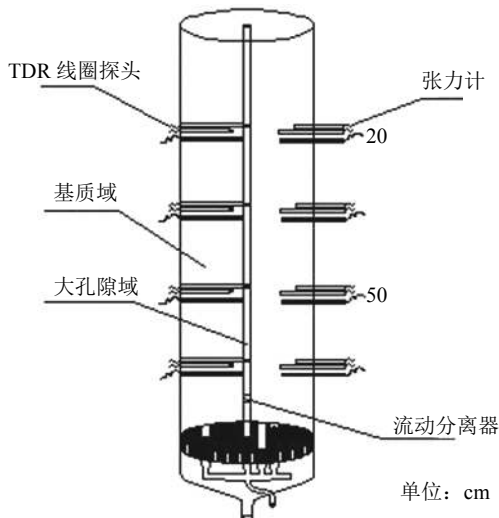


图 5 试验装置^[19]

Fig. 5 Test device^[19]

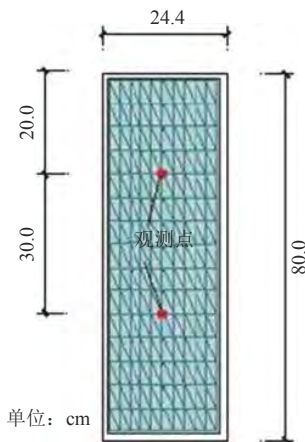
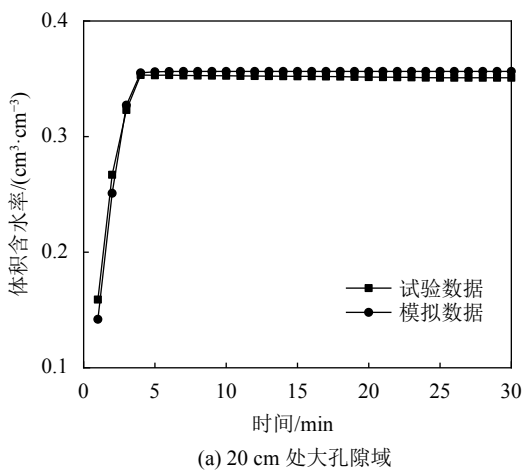
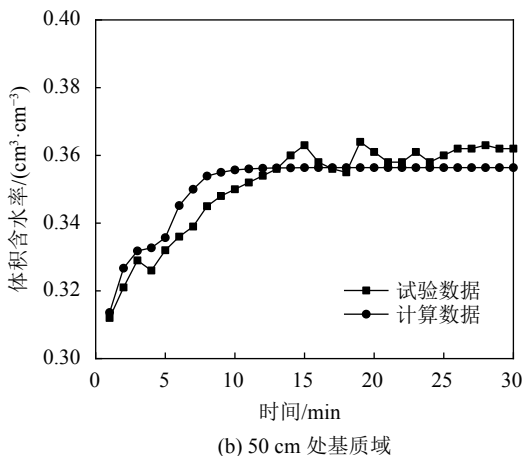


图 6 土柱网格划分

Fig. 6 Mesh of finite elements of soil column



(a) 20 cm 处大孔隙域



(b) 50 cm 处基质域

图 7 不同位置下两域体积含水率实测与计算值

Fig. 7 Comparison of measured and calculated values of volumetric water content in two regions under different locations

4 水位上升对边坡体积含水率与稳定性影响

4.1 考虑非饱和渗流与非饱和大孔隙流条件下边坡含水率对比

图 8 和 9 分别为 2 种渗流条件下水位以 2 m/d 的上

升速率从10 m上升到22 m后边坡含水率分布。从图8和9可见: 1)大孔隙边坡水分渗流更快,能迅速到达土壤深层,饱和浸润线更高。2)非饱和和渗流条件下,边坡内部基质域含水率明显小于非饱和大孔隙渗流条件下边坡内部基质域含水率,其中,非大孔隙边坡基质域含水率稳定在0.28附近,大孔隙边坡基质域含水率接近饱和状态。3)非大孔隙流边坡浅层向内的水力坡度明显大于大孔隙流边坡。4)大孔隙边坡相同位置处的基质域含水率明显大于大孔隙域含水率,原因为大孔隙域水力传导系数大,渗流速度快,因而难以饱和。

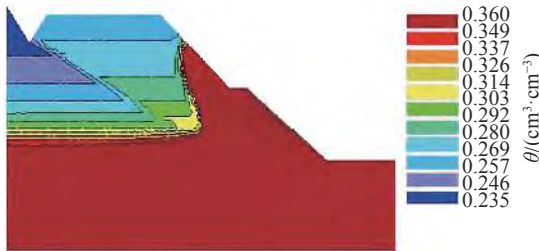
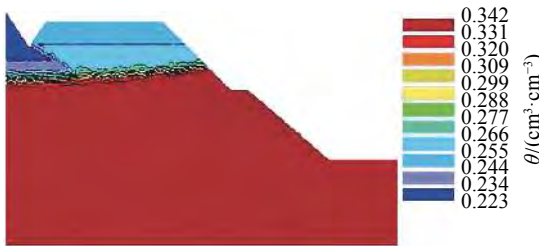
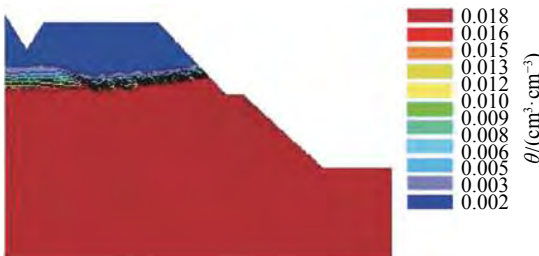


图 8 考虑非饱和渗流条件下边坡基质域含水率分布

Fig. 8 Distribution of water content in matrix domain considering unsaturated seepage slope



(a) 基质域



(b) 大孔隙域

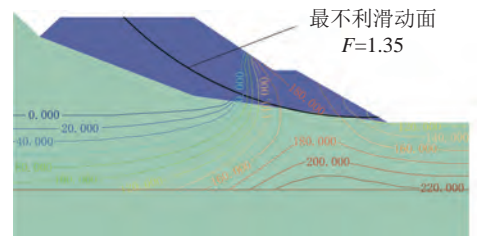
图 9 考虑非饱和大孔隙流条件下边坡两域含水率分布

Fig. 9 Water content distribution in two slope regions considering unsaturated macropore flow

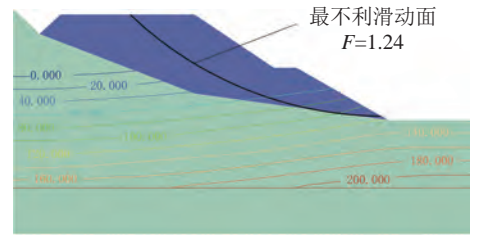
4.2 两种渗流条件下边坡稳定性对比

图10和11分别为水位以2 m/d速率上升至22 m时,边坡最不利滑动面,以及水位稳定在22 m时,2种渗流工况计算得到的边坡稳定系数与时间关系。

从图10和11可见: 1)在水位上升过程中,边坡稳定系数均呈现先降低后升高的趋势。通常在水位上



(a) 非饱和和渗流



(b) 非饱和和大孔隙流

图 10 不同渗流条件下边坡在水位22 m时的最不利滑动面

Fig. 10 Most unfavorable slip surface of slope of different seepage conditions at water level 22 m

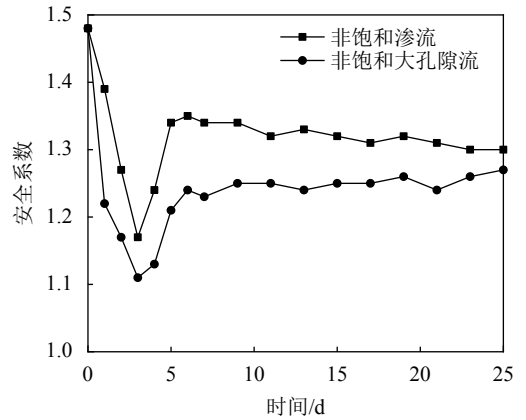


图 11 边坡稳定系数与时间的关系

Fig. 11 Relationship between slope stability coefficient and time

升的过程中,一方面,水渗流进入土体,使土体自重增大,且由于孔隙水压力作用,部分土体强度降低,不利于边坡稳定;另一方面,坡面水压力会对边坡产生一定的抗滑力,同时土体内会产生指向坡内的动水压力,有利于边坡稳定。边坡的稳定性在库水位上升过程中取决于两者之间的相互抗衡,在水位上升初期,前者占优势导致安全系数呈现下降趋势;随着水位的不断上升,后者逐渐优势凸显,导致安全系数增大。2)在水位上升到16 m时,在考虑非饱和和渗流条件下,边坡稳定系数从1.48下降到1.17,降幅达20.9%;在考虑非饱和大孔隙流条件下,边坡稳定系数从1.48下降到1.11,降幅达25%;并且两种工况下边坡安全系数最小值相差5.1%。原因在于:大孔隙流入水更快,土体自重增大,抗剪强度降低且向内动水压力远

小于非饱和渗流情况,故其边坡安全系数更小。3)2种工况下边坡安全系数均在同一位置达到最小值,如两种工况下,边坡安全系数在第3天同时达到最小。4)在水位稳定在22 m后,2种工况的边坡稳定系数随着时间的增加逐渐趋于一致。现场调查发现,水位上升过程中,边坡变形随着水位的上升存在逐渐变大后趋于稳定的趋势,这与水位上升过程中边坡安全系数随时间变化规律基本吻合,也间接表明了非饱和大孔隙流模型模拟的合理性。

5 计算参数敏感性分析

5.1 不同水位上升速率对边坡稳定性的影响

图12为2种渗流工况下不同水位上升速率计算的边坡安全系数与库水位的关系。由图12可见:当水位上升速率从1 m/d增加至3 m/d,且水位上升至16 m时,考虑非饱和渗流条件的边坡安全系数从1.48分别下降至1.30、1.17、1.07,边坡安全系数最小值相差17.7%;考虑非饱和大孔隙渗流条件的边坡安全系数则分别下降至1.14、1.11、1.02,边坡安全系数最小值相差10.5%。由此说明:1)不同水位上升速度时,考虑

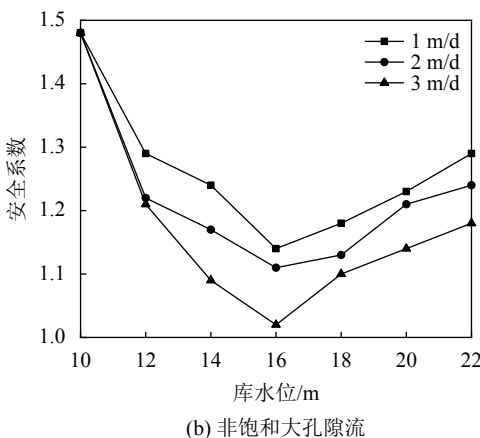
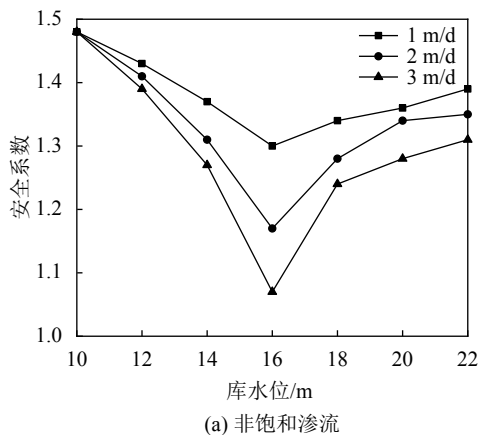


图12 不同渗流条件下边坡安全系数与库水位关系
Fig. 12 Relationship between safety factor and water level under different seepage conditions slope

非饱和大孔隙渗流条件下边坡安全系数均比考虑非饱和渗流条件下边坡安全系数小;2)考虑非饱和渗流条件下边坡安全系数比考虑非饱和大孔隙流条件下边坡安全系数的减幅更大;3)当水位上升至某一高度时(如16 m),2种工况得到的边坡安全系数同时达到最小值。

5.2 大孔隙域水力传导系数(K_{sf})的影响

假定水位上升速率为2 m/d, K_{sf} 分别为1 000、2 000、3 000 cm/d,其他参数不变,计算得到非饱和大孔隙流条件下边坡安全系数与库水位的关系曲线见图13。由图13可见, K_{sf} 从1 000 cm/d增加至3 000 cm/d且水位上升至16 m时,考虑非饱和大孔隙渗流条件的边坡安全系数从1.48分别下降至1.16、1.11、1.00,边坡安全系数最小值相差13.8%。由此表明:1)增大 K_{sf} 值加速了大孔隙域水分渗流,减弱了与基质域水分交换,水分会迅速到达土壤深层,导致地下水位上升,土体自重增大而强度下降,不利于边坡稳定;2)不同 K_{sf} 条件下,考虑大孔隙流的边坡安全系数均随水位上升呈现先减小后增大的趋势,并于同一水位(16 m)同时达到最小值。

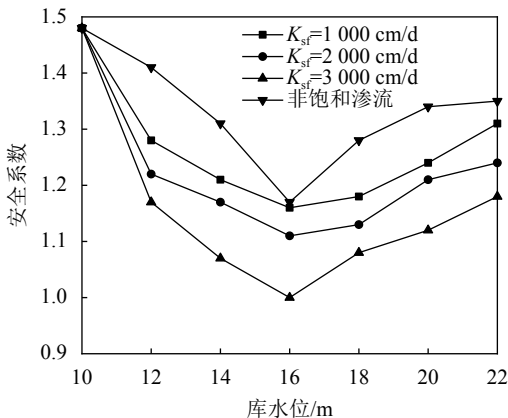


图13 不同 K_{sf} 条件下安全系数与库水位关系

Fig. 13 Relationship between safety factor and water level under different K_{sf} conditions

5.3 两域交界面水力传导系数(K_{sa})的影响

假定水位上升速度为2 m/d, K_{sa} 分别为0.005、0.010、0.020 cm/d,其他参数不变,计算得到非饱和大孔隙流条件下边坡安全系数与库水位的关系曲线见图14。

由图14可见, K_{sa} 从0.005 cm/d增加至0.020 cm/d且水位上升至16 m时,考虑非饱和大孔隙渗流条件的边坡安全系数从1.48分别下降至1.09、1.11、1.15,边坡安全系数最小值相差5.5%。由此说明:1) K_{sa} 越大,两域间水分交换加快,减缓了水分通过大孔隙域到达土壤深层,有利于边坡稳定;2)不同 K_{sa} 条件下,考虑大孔隙流的边坡安全系数随水位上升影响规律类似于 K_{sf} 。

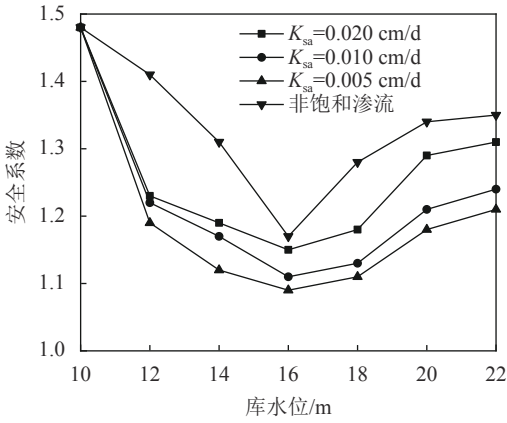


图 14 不同 K_{sa} 条件下安全系数与库水位关系

Fig. 14 Relationship between safety factor and water level under different K_{sa} conditions

5.4 大孔隙域体积比(w_f)的影响

假定水位上升速度为 2 m/d, w_f 分别为 0.05、0.10、0.20, 其他参数不变, 计算得到非饱和大孔隙流条件下边坡安全系数与库水位的关系曲线如图 15 所示。由图 15 可见, w_f 从 0.05 增加至 0.20, 且水位上升至 16 m 时, 考虑非饱和大孔隙渗流条件的边坡安全系数从 1.48 分别下降至 1.11、1.04、0.95, 边坡安全系数最小值相差 14.4%。由此说明: 1) w_f 越大, 大孔隙所占空间越多, 库水位上升后, 水分将更多通过大孔隙域入渗到土壤深层, 引起地下水位上升, 土体自重增大且强度下降, 将不利于边坡稳定。这也说明了虽然大孔隙所占比例仅为小部分, 但对路基整体稳定性有较大影响。2) 不同 w_f 条件下, 考虑大孔隙流的边坡安全系数随水位上升变化呈现的规律同样类似于 K_{sf0} 。

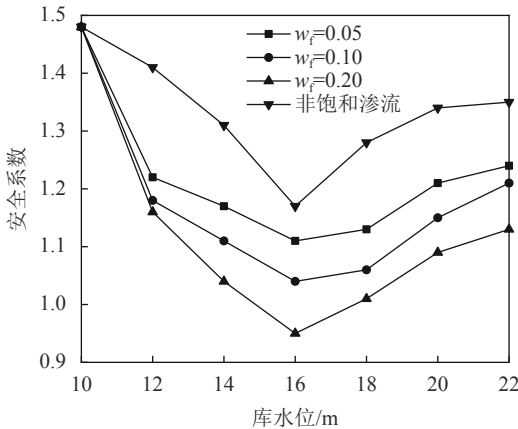


图 15 不同 w_f 条件下安全系数与库水位关系

Fig. 15 Relationship between safety factor and water level under different w_f conditions

5.5 土粒中心至大孔隙边界距离(a)的影响

假定水位上升速度为 2 m/d, a 分别为 0.7、1.0、1.3 cm, 其他参数不变, 计算得到非饱和大孔隙流条件下边坡安全系数与库水位的关系曲线如图 16 所示。由图 16

可见, 当 a 从 0.7 cm 增加至 1.3 cm, 且水位上升至 16 m 时, 考虑非饱和大孔隙渗流条件的边坡安全系数从 1.48 分别下降至 1.12、1.11、1.06, 最小边坡安全系数相差 5.4%。由此说明: 1) a 越大, 使两域水分交换减慢, 水分更易通过大孔隙域到达土壤深层, 引起地下水位上升, 不利于边坡稳定; 2) 不同 a 条件下, 考虑大孔隙流的边坡安全系数随水位上升变化呈现的规律同样同 K_{sf0} 。

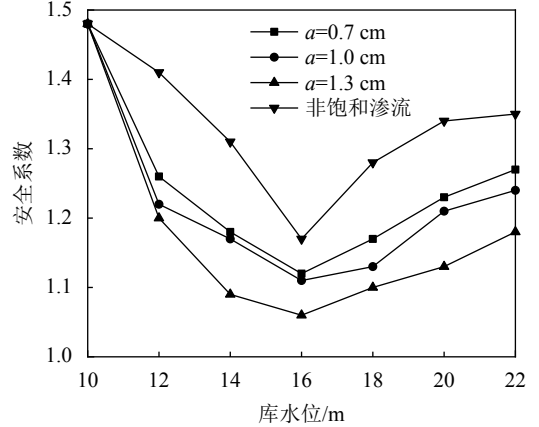


图 16 不同 a 条件下安全系数与库水位关系

Fig. 16 Relationship between safety factor and water level under different a conditions

6 影响因素权重分析

灰色关联分析方法是衡量影响因素之间关联程度的方法^[21]。其关联系数可表示为:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i(\Delta_i(\min)) + 0.5 \max_i(\Delta_i(\max))}{|x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i(\Delta_i(\max))} \quad (10)$$

式中, $\min_i(\Delta_i(\min))$ 、 $\max_i(\Delta_i(\max))$ 分别为两级最小、最大差的绝对值, $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为同一 i 值的参考数列与第 k 个比较数列的元素之差的绝对值。

根据关联系数可以求出关联度, 作为影响因素关联性的比较:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^N \zeta_i(k)}{N} \quad (11)$$

式中, γ_i 为关联度。

根据关联度 γ_i 可求出各因素的权重:

$$\omega_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i} \times 100\% \quad (12)$$

根据灰色关联法可计算出各因素的关联度及权重值, 如表 2 所示。

表2 影响因素的关联度与权重

Tab. 2 Correlation degree and weight of influencing factors

影响因素	关联度	权重/%
v	0.965	26.1
w_f	0.992	26.7
K_{sf}	0.863	23.2
a	0.432	11.6
K_{sa}	0.463	12.4

由表2的结果可得出:

1)各影响因素关联顺序为: $w_f > v > K_{sf} > K_{sa} > a$ 。

2) w_f 、 v 和 K_{sf} 对边坡稳定性影响占权重较大且相当; K_{sa} 、 a 对边坡稳定性影响占权重较小,约为前者一半。

7 结 论

1)水位上升后,非饱和大孔隙渗流边坡基质域含水率接近饱和且显著高于一般边坡基质域含水率。

2)传统非饱和渗流条件下,浅层边坡向内的水力坡度明显大于非饱和大孔隙流边坡。由于非饱和大孔隙流边坡基质域水力传导系数远小于大孔隙域水力传导系数,导致相同位置基质域含水率远大于大孔隙域含水率(最大达18.9倍)。

3)两种渗流工况下,边坡稳定系数随水位上升均呈现先减小后增大的趋势,并于同一水位(约在最高蓄水位高程的一半)同时达到最小值。相同渗流工况下,非饱和大孔隙渗流边坡比非饱和渗流边坡稳定系数最小值更小(约小5.2%)。

4)增加 v 、 K_{sf} 、 a 、 w_f 或减少 K_{sa} ,导致非饱和大孔隙流坡内基质域与大孔隙域间水分交换减弱,水分将快速运移至坡体深处,引起地下水位上升,使边坡稳定性最大降幅达17.7%左右。当库水位稳定后,随着时间的延长,两种理论计算得到的边坡最终安全系数趋于一致。

5) v 、 K_{sf} 和 w_f 对边坡稳定影响占权重较大且相当, K_{sa} 和 a 占权重较小且约为前者一半。

参考文献:

[1] Deng Huafeng, Li Jianlin. Study on the mechanism of influence of reservoir water level change on deformation and stability of reservoir bank slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(Supp2): 45–51. [邓华锋, 李建林. 库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊2): 45–51.]

[2] Liu Caihua, Chen Congxin, Feng Xiating. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 769–773. [刘才华, 陈

从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 769–773.]

[3] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387–403.

[4] Lane P A, Griffiths D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 443–450.

[5] Viratjandr C, Michalowski R L. Limit analysis of slope instability caused by partial submergence and rapid drawdown[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8): 802–814.

[6] Zhang Linlin, Zhang Yaozhe, Zhang Zheng. Analysis of bank slope stability of channel reservoir during stage falling[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(7): 12–20. [张琳琳, 张耀哲, 张政. 落水条件下河道水库岸坡稳定性的分析研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(7): 12–20.]

[7] Zong Quanli, Xia Junqiang, Xu Quanxi, et al. Soil composition analysis and slope stability calculation for riverbanks in the upper Jingjiang reach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 168–178. [宗全利, 夏军强, 许全喜, 等. 上荆江河段河岸土体组成分析及岸坡稳定性计算[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 168–178.]

[8] Wu Nengsen. A study on characteristics and some engineering problems of granite residual soil with structural nature[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005. [吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.]

[9] Gao Zhaoxia, Xu Xuexuan, Zhao Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2801–2811. [高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801–2811.]

[10] Zhu Lei, Zhou Qing, Wang Kang, et al. Analysis of the heterogeneous soil water flow based on the multifractal theory[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 392–397. [朱磊, 周清, 王康, 等. 基于多重分形理论的土壤水非均匀流动分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 392–397.]

[11] Lin Denghui. Study on mechanism of macroporous seepage and water-heat transfer in residual soil slope in humid-hot zone[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013. [林登辉. 湿热区残积土边坡大孔隙渗流与水热迁移机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2013.]

[12] Feng Jie. Study on the transport mechanism of water and solute in macroporous soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2001. [冯杰. 水及溶质在有大孔隙的土壤中运移机制研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.]

[13] Horton, Robert E. Report of advisory committee on soil-con-

- ervation research,1941—1942[J].*Eos Transactions American Geophysical Union*,1942,23(2):371—374.
- [14] Edwards W M,Norton L D,Redmond C E.Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil[J].*Soil Science Society of America Journal*,1988,52:483—487.
- [15] Niu Jianzhi,Yu Xinxiao,Zhang Zhiqiang.The present and future research on preferential flow[J].*Acta Ecologica sinica*,2006,26(1):231—243.[牛健植,余新晓,张志强.优先流研究现状及发展趋势[J].*生态学报*,2006,26(1):231—243.]
- [16] Que Yun,Deng Xiangyu,Chen Jia.Mechanism on the influence of the snowmelt infiltration on the non-equilibrium flow and stability of residual soil slope[J].*Advanced Engineering Sciences*,2017,49(6):73—83.[阙云,邓翔宇,陈嘉.短时冻区冰雪消融对残积土坡非平衡渗流与稳定性作用机理分析[J].*工程科学与技术*,2017,49(6):73—83.]
- [17] Que Yun,Lin Denghui,Chen Jia.Water transport characteristics of non-equilibrium flow on soil column with macropore under heavy rainfall condition[J].*Journal of Tongji University(Natural Science)*,2017,45(4):488—496.[阙云,林登辉,陈嘉.强降雨条件下含大孔隙土柱水分非平衡运移特性[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2017,45(4):488—496.]
- [18] Que Yun,Zhan Xiaojun,Chen Jia.Numerical simulation for preferential flow characteristics of residual soil slope under heavy rainfall condition[J].*Nonferrous Metals(Mining Section)*,2017,69(6):71—77.[阙云,詹小军,陈嘉.强降雨条件下残积土坡优先流特性的数值模拟[J].*有色金属(矿山部分)*,2017,69(6):71—77.]
- [19] Köhne J M,Mohanty B P.Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore:Experiment and hierarchical modeling[J].*Water Resources Research*,2005,41(3):1—17.
- [20] Gerke H H,Genuchten M T.A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J].*Water Resources Research*,1993,29(2):305—319.
- [21] 罗庄成,徐国新.灰色关联分析与应用[M].南京:科学技术出版社,1989.

(编辑 张 琼)

引用格式: Que Yun,Xiong Han,Liu Huifen,et al.Numerical simulation of hydraulic response of immersed slope based on dual-permeability model of unsaturated macropore flow[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(6):102—110.[阙云,熊汉,刘慧芬,等.基于非饱和大孔隙流双重介质模型的浸水边坡水力响应数值模拟[J].*工程科学与技术*,2020,52(6):102—110.]