

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.024

降雨中有植被覆盖土坡大孔隙结构对边坡稳定性的影响

黄月华¹, 周成^{1,2}, 李红梅³

(1. 四川大学 水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024;

3. 深圳市益田集团股份有限公司, 广东 深圳 518053)

摘要: 降雨时, 植被覆盖边坡表层土体中存在的大孔隙结构致使雨水快速入渗到根系底部, 如果下层土体的渗透性较差, 就会造成有植被覆盖土体中的顺层渗流和上层滞水现象。通过具有双进气压力值的SWCC曲线和渗透系数曲线来表征有植被土体中的孔隙结构对土坡水力性能的影响。数值分析结果表明了这一做法的合理性, 同时据此对降雨条件下大孔隙结构的增渗作用对边坡的稳定性进行初步探究; 与无植被覆盖的边坡进行对比, 发现植被根系的力学加固作用被大孔隙结构增渗作用所掩盖的“临界时刻”会随着降雨强度的增加而逐渐趋于某一定值, 而该固定值与边坡表层土体中的大孔隙结构的饱和渗透系数有关; 同时“临界时刻”会随着大孔隙影响深度的增加而线性地增加。计算分析结果可为CBS护坡系统排除降雨滞水的计算与设计提供参考。

关键词: 有植被土坡; 大孔隙结构; SWCC曲线; 根系固土; 降雨滞水; 降雨滑坡

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0132-06

Combined Effects of Trees and Macropores on Slope Stability Subjected to Rainfall

HUANG Yuehua¹, ZHOU Cheng^{1,2}, LI Hongmei³

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower,

Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Key Lab of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China;

3. Shenzhen Yitian Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518053, China)

Abstract: During rainfall, rainwater infiltrates rapidly to the tips of tree root through macropores in the soil. Perched water and subsurface downslope water flow phenomena can be observed in the upper soil stratum, when the permeability of lower soil matrix is low. Such phenomena were simulated by reasonably postulating the bimodal SWCC curves and permeability functions of the soil matrix and soil with macropores. Furthermore, the infiltration increase effects induced by macropores on the slope stabilization were investigated. The critical moment when the reinforcement effect was overridden by that of infiltration increase could become constant with the increase of rainfall density, which was dominantly affected by the saturated coefficient of permeability of the macropores in the soil, and it also varied linearly with the increase of macropore depth. Moreover, the simulation results might act as a reference to the CBS calculation and design in transporting subsurface rainwater.

Keywords: vegetated slope; macropores; SWCC curves; root reinforcement; perched water; rainfall-induced landslide

收稿日期: 2017-12-15

修稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 水利部行业专项项目(201301022); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK913002)

作者简介: 黄月华(1992—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土工程。E-mail: 2416159751@qq.com

通讯作者: 周成(1970—), 男, 江苏赣榆人, 教授, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: czhou@scu.edu.cn

边坡的失稳破坏一直是学者们研究的热点^[1-4]。大部分失稳的边坡表层都有植被覆盖,而且边坡的失稳往往都发生在降雨过程中或是降雨后不久^[5-7]。降雨过程中,有植被覆盖土体的雨水入渗率远远大于无植被覆盖土体的入渗率,入渗的雨水在下渗过程中遇到相对不透水层时,就会有上层滞水和顺层渗流的现象发生^[8-9]。

有植被覆盖的土体中有降雨入渗快速通道的大孔隙结构:动物通道、根土间隙、土中裂隙和原始渗流通道^[10]。降雨时,雨水会率先沿着这些大孔隙结构入渗而形成优势流,进而促使雨水的快速入渗。故在对有植被覆盖的土体和无植被覆盖的土体进行渗透试验时发现,其初始的入渗速率往往会相差3到4个数量级^[11-12]。

土体中的这些大孔隙结构和土壤质地之间的孔隙就构成了有植被覆盖土体中新的孔隙体系。而该孔隙体系具有不连续的特征。当土体中存在不连续的孔隙结构时,其SWCC曲线往往表现出双峰值的特点^[13-16]。第一个峰值为不连续结构中大孔隙的进气压力值,第二个为该结构中相对较小孔隙的进气压力值。由此可选用具有双峰值的SWCC曲线来反映有植被土体的持水能力。

目前,研究植被对坡体的稳定性影响,大都是单纯考虑其力学加固作用^[8-9,17-18],而如何考虑有植被覆盖土体中大孔隙结构在降雨过程中对边坡稳定性的影响却非常少见。本文采用具有双进气压力值的SWCC曲线以反映有植被土体的持水能力,并在此基础上进行有植被坡体在降雨情况下的渗流场和坡体的稳定性分析。同时,文中考虑大孔隙结构对降雨入渗的影响还可以为CBS(Capillary Barrier System, CBS)防护系统的设计提供参考依据。

在渗流分析时,采用SEEP/W软件进行计算,并将由此而得到的渗流场导入SLOPE/W中以进行边坡的稳定分析计算。计算方法采用土条间假定最少的Morgenstern-Price方法。

1 计算方法

1.1 植被根系的加固作用

现有考虑植被根系对坡土加固作用的模型有两类^[19]:宏观模型和土-根系相互作用模型。前者将根系和土简化为一个均匀的土体材料,后者将根系视为嵌入土体中的结构单元。通过宏观模型,Wu T H等^[20]提出用 C_R 来表示根系对土体抗剪强度的增强作用。本文将采用宏观模型对土体 c' 值提高来

反映植被对边坡表层土体的加固作用。

1.2 降雨对坡土抗剪强度的影响

有植被覆盖土体的表层往往处于非饱和状态,在降雨时,由于降雨入渗湿润锋下移,导致边坡表层土体基质吸力下降,致使边坡表层土体抗剪强度降低。

Fredlund D G等^[21]提出了非饱和土的有效应力抗剪强度准则。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\tan\varphi'' \quad (1)$$

式中: c' 为有效黏聚力,kPa; σ 为正应力,kPa; u_a 为孔隙气压力,kPa; u_w 为孔隙水压力,kPa; φ' 是与土体净应力 $(\sigma - u_a)$ 有关的内摩擦角, $(^\circ)$; φ'' 是与土体基质吸力有关的内摩擦角, $(^\circ)$; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力,kPa。

利用上述公式对土体强度进行分析时,就要对非饱和土开展相应的强度试验。而此类试验非常昂贵,且耗时耗力。针对基质吸力在0~500 kPa范围内(在此范围内土体的有效内摩擦角 φ' 将会保持不变),Vanapalli S R等^[22]提出基于土体SWCC曲线对非饱和土体的抗剪强度进行预估,见公式(2)。SLOPE/W软件也采用了该公式以考虑基质吸力对土体稳定性的影响^[23]。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\tan\varphi'\right] \quad (2)$$

式中: θ 为土体内的体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率,其余同式(1)。

2 边坡计算模型与土体参数

2.1 模型尺寸及边界条件

边坡尺寸见图1,其坡比为1:1.875,植被根系的深度影响范围分别假定为1.00 m、1.25 m、1.50 m、1.75 m和2.00 m。同时也认定有植被覆盖土体中的大孔隙结构的影响深度也分别为1.00 m、1.25 m、1.50 m、1.75 m和2.00 m。

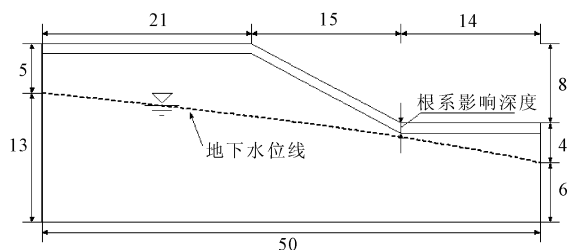


图1 边坡几何尺寸(单位:m)

稳态渗流时,边坡左侧总水头为13 m,边坡右侧总水头为6 m,边坡底部为不透水。降雨时的边

界条件为:边坡的左侧、右侧及底部为不透水边界,而边坡的表面、顶部平面和坡脚平面设置为单位流量边界。

降雨强度选定为 120 mm/d、100 mm/d、86.5 mm/d、80 mm/d 和 70 mm/d;历时均为 3 d。

2.2 土体参数选定

无植被覆盖土体的重度取为 17 kN/m³, φ' 取值为 30°, c' 取为 4 kPa。有植被覆盖的表层土体表观黏聚力提高值都设定为 5 kPa。并将公式(2)纳入对边坡土体的抗剪强度分析当中。

没有植被覆盖土体的土水特征曲线和渗透系数曲线选择依据 SEEP/W 软件中的样本曲线进行预估。其饱和和体积含水率为 0.50,残余含水率为0.05;进气压力值 $S_b = 30$ kPa。

有植被覆盖土体的 SWCC 在低基质吸力段的形状与土体中的大空隙有关,而在高基质吸力段与土壤质地有关^[24]。

假定有植被覆盖土体的体积含水率为 0.60,土体大孔隙结构的进气压力值为 1.0 kPa。由此无植被土体和有植被覆盖土体的 SWCC 曲线见图 2。图例中“ $S_b = 30$ kPa”表示无植被覆盖土体的进气压力值,进而用此标记无植被覆盖土体;而图例“ $S_{b1} = 1.0$ kPa; $S_{b2} = 30$ kPa”中“ $S_b = 1.0$ kPa”表示土体大孔隙的进气压力值为 1.0 kPa;而当基质吸力较高时,就出现第二个进气压力值“ $S_{b2} = 30$ kPa”。

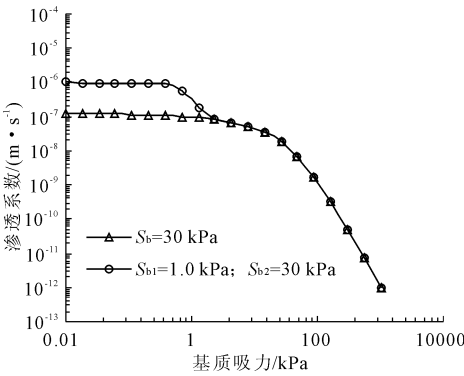


图 2 有、无植被覆盖土体的 SWCC 曲线

通过 Genuchten M T V^[25] 提出的经验公式对土体在不含有植被时的渗透系数随基质吸力的变化进行预估。

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\psi^{(n-1)})(1 + (a\psi^n)^{-m})]^2}{[(1 + a\psi^n)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

式中: k_s 为饱和土的渗透系数; a, m 为拟合参数, $n = 1/(1 - m)$, ψ 为基质吸力范围。

无植被覆盖土体的饱和渗透系数为 1×10^{-7} m/s;

土体大孔隙结构的饱和渗透系数为 1×10^{-6} m/s;进而提出无植被覆盖土体和有植被覆盖土体的渗透系数曲线见图 3。

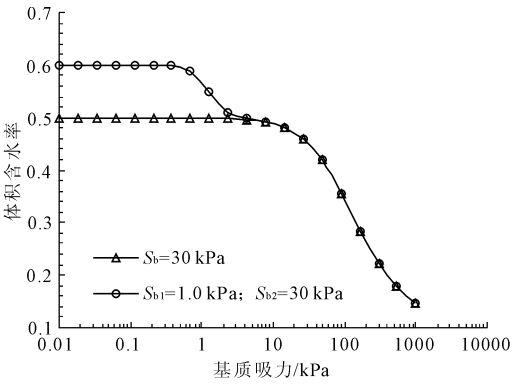


图 3 有、无植被覆盖土体的渗透系数曲线

3 计算结果与分析

3.1 上层滞水和顺层渗流现象

植被根系影响深度为 1 m 的边坡在降雨强度为 100 mm/d 并进行到第 3 d 时,对边坡中的压力水头和总水头值进行分析。无植被覆盖土坡的压力水头分布图和总水头分布图见图 4、图 5。

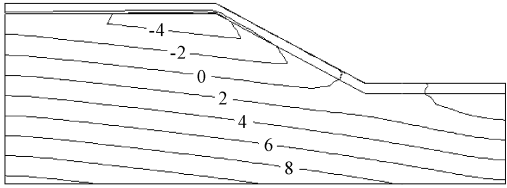


图 4 无植被覆盖土坡压力水头分布图(单位:m)

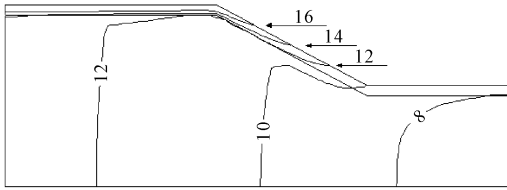


图 5 无植被覆盖土坡总水头分布图(单位:m)

有植被覆盖土坡的压力水头和总水头分布见图 6、图 7。

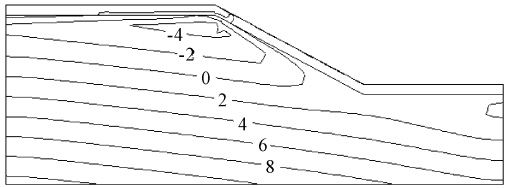


图 6 有植被覆盖土坡压力水头分布图(单位:m)

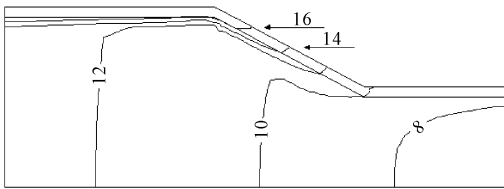


图 7 有植被覆盖土坡总水头分布图(单位:m)

比较图 4 和图 6 中压力水头为 0 m 的等值线与边坡外轮廓线所围区域,可以发现植被覆盖边坡中该区域覆盖的范围从坡脚到了坡顶,而且在它的下面还有非饱和区域。说明有植被覆盖边坡表层出现了上层滞水现象(上层滞水:包气带中局部隔水层上的重力水)。而无植被覆盖的土坡图 4 没有出现该现象。

比较图 5 和图 7,发现有植被覆盖边坡的表层出现了总水头等值线与边坡坡面线垂直的情况,说明都出现了沿边坡表层的顺层渗流,而且有沿着坡脚不断往坡顶发展的趋势,这与现场的实际观测现象符合^[6]。有植被土坡在 2.1 d 和第 3 d 时坡土中的流速矢量图见图 8 和图 9。

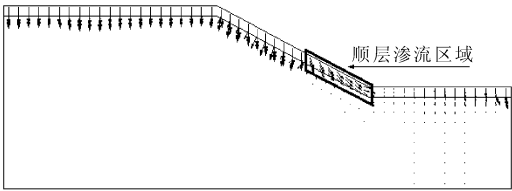


图 8 降雨 2.1 d 时的顺层渗流流速矢量图

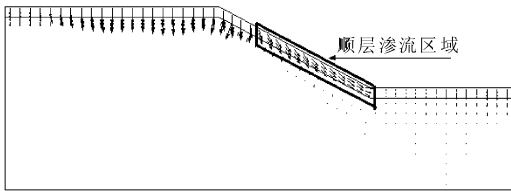


图 9 降雨 3 d 时的顺层渗流流速矢量图

出现上述现象是因为在降雨时,雨水降到边坡表面,使得该处的基质吸力降低,在低基质吸力时,有植被覆盖土体的渗透性就取决于土体中的大孔隙结构。文中有植被根系存在边坡大孔隙结构的饱和渗透系数为 1×10^{-6} m/s,无大孔隙结构的土体各自饱和渗透系数为 1×10^{-7} m/s。由于渗透性的差异性,导致在植被根系底部形成了一个相对不透水层,故而形成了上层滞水和顺层渗流现象。数值模拟的结果也说明了采用双进气压力值来反映有植被覆盖土体中的大孔隙结构的合理性。

3.2 稳定安全系数变化情况

下面用“临界时刻”来描述降雨条件下大孔隙结构对边坡稳定性的影响。在该时刻,植被根系对边坡的力学加固作用将被大孔隙结构的增渗作用所掩盖;超过该时刻,大孔隙的存在对边坡的稳定性将是不利的。该时刻的具体选取见图 10。

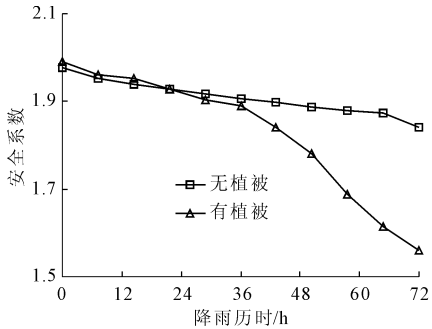


图 10 临界时刻的选取

图 10 表示大空隙结构的影响深度为 1 m、降雨强度为 100 mm/d 时,有植被覆盖边坡的稳定安全系数和无植被的稳定安全系数随时间的变化曲线。在该图中“临界时刻”的选取就为两曲线交点的横坐标,在图中即为 21.77 h。

有了对“临界时刻”的定义,接下来分别对大孔隙影响深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m、1.75 m 和 2.00 m 时,作出各边坡的稳定安全系数随降雨历时变化的曲线图。由于无植被覆盖边坡土体的饱和渗透系数为 1×10^{-7} m/s 小于最小的降雨强度 70 mm/d(8.1×10^{-7} m/s),所以在本文所选定的雨强情况下,无植被覆盖边坡的稳定安全系数随时间的变化基本一致,故在“临界时刻”的确定时,只采用一条无植被覆盖边坡的稳定安全系数随时间的变化曲线作为参考。因此大孔隙影响深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m、1.75 m 和 2.00 m 时,各边坡在各个雨强条件下的临界时刻见图 11 ~ 图 15。

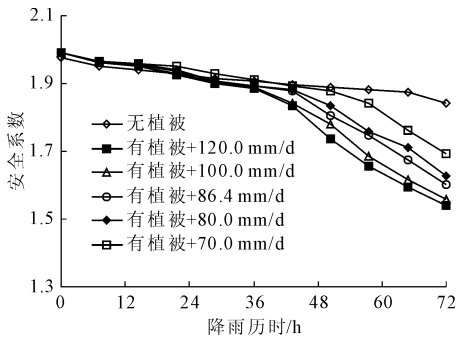


图 11 稳定安全系数随降雨历时的变化
(大孔隙深度为 1 m)

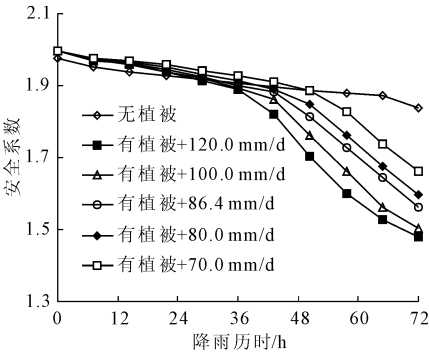


图 12 稳定安全系数随降雨历时的变化
(大孔隙深度为 1.25 m)

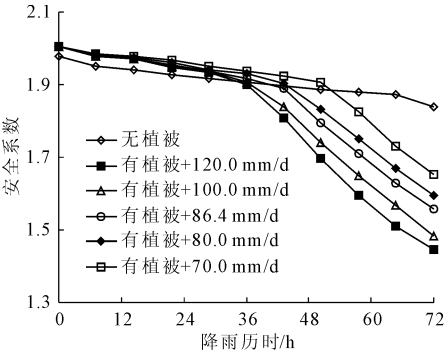


图 13 稳定安全系数随降雨历时的变化
(大孔隙深度为 1.50 m)

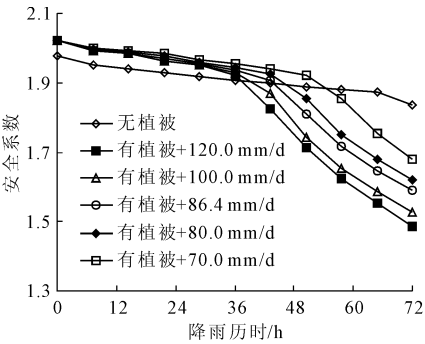


图 14 稳定安全系数随降雨历时的变化
(大孔隙深度为 1.75 m)

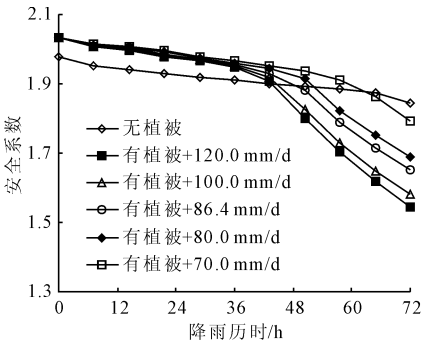


图 15 稳定安全系数随降雨历时的变化
(大孔隙深度为 2.00 m)

从图 11 ~ 图 15 可以看出,在大孔隙影响深度一

定时,“临界时刻”会随着降雨强度的增加而减小;而且同一雨强下,“临界时刻”会随着植被影响深度的增加而增加。为了进一步分析降雨强度和植被根系影响深度对临界时刻的影响。将图 11 ~ 图 15 中不同植被根系影响深度时的临界时刻与降雨强度的关系整理为图 16 所示。

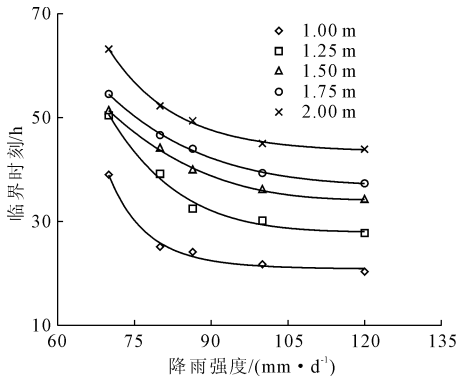


图 16 临界时刻随降雨强度的变化关系曲线

从图 16 中可以更加清晰地看到,在大孔隙的影响深度一定时,“临界时刻”与降雨强度呈现出双曲线关系。雨强较小,临界时刻较大;随着降雨强度的逐渐增加,临界时刻急剧减小并趋近于一个固定值。这是因为当降雨强度超过了表层有植被覆盖土体中的大孔隙的饱和渗透系数时,多余的降雨不会再继续渗入边坡土体,而是形成坡面径流;故而降雨强度虽有所增加,但边坡土体的雨水入渗量基本上不变,所以稳定安全系数变化不大,进而对临界时刻的影响也逐渐减小,并最终趋向于一个固定值。而该固定值的大小是与表层有植被覆盖土体的大孔隙的饱和渗透系数和根系影响深度有关的。但从图中看到,当单位净流量达到 86.4 mm/d(文中设定的大孔隙结构的饱和渗透系数)时,随着雨强的增大,临界时刻同样会发生较小的降低。这是由于软件在计算过程中水量平衡存在一定的误差。同时还可以发现不同的植被根系影响深度,也会使得临界时刻值不同。

由图 11 ~ 图 15,还可以得出一定雨强条件下,临界时刻与根系影响深度的关系,具体见图 17。从图 17 中可以发现,在降雨强度一定的情况下,“临界时刻”会随着大孔隙结构影响深度的增加而线性地增加。

4 结 论

(1) 采用具有双峰值的 SWCC 曲线和渗透系数曲线可以反映出有植被土坡中大孔隙结构的增渗作用,进而模拟出有植被覆盖土体在降雨入渗过程中存在的顺层渗流和上层滞水现象。

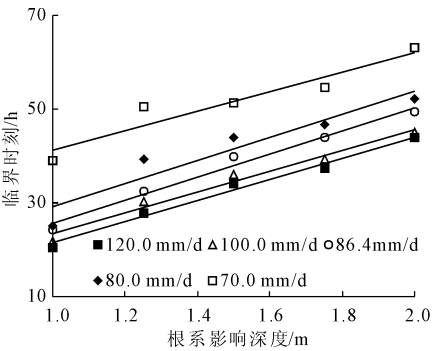


图 17 临界时刻随根系影响深度的变化

(2) 在大孔隙结构影响深度一定时,反映大孔隙结构对边坡稳定性影响的“临界时刻”与雨强表现出双曲线的关系。当雨强较小时,临界时刻较大;随着雨强的增加,临界时刻急剧减小并最终不变;临界时刻的最终值与边坡表层土体大孔隙结构的饱和渗透系数有关。

(3) 在降雨强度一定时,“临界时刻”会随着大孔隙影响深度的增加而线性地增加。

(4) 通过具有双峰值的 SWCC 曲线和渗透系数曲线考虑大孔隙结构对降雨入渗的影响还可以为 CBS 防护系统的计算与设计提供参考。

参考文献:

[1] 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):1-28.

[2] Cai Fei, Ugai Keizo. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. International Journal of Geomechanics, 2004,4(2):69-78.

[3] Rahardjo H, Ong T H, Rezaur R B, et al. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007,133(12):1532-1543.

[4] 冯欣,熊子正,滕志强,等.基于积分法的均质边坡稳定性区间分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):192-196.

[5] Wu T H, Iii M K, Swanston D N. Strength of tree roots and landslide on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979,16(1):19-33.

[6] Chen R H, Chen H P, Chen K S, et al. Simulation of a slope failure induced by rainfall infiltration[J]. Environmental Geology, 2009,58(5):943-952.

[7] Xu G, Li W, Yu Z, et al. The 2 september 2014 shanshucao landslide, three gorges reservoir, China[J]. Landslides, 2015,12(6):1169-1178.

[8] Norris J E, Stokes A, Mickovski S B, et al. Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions [M]. Springer: Netherlands, 2008.

[9] Morgan R P C, Rickson R J. Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach: A Bioengineering Approach[M]. London: Chapman and Hall, 1995:116.

[10] Keith B, Peter G. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982,18(5):1311-1325.

[11] Zhan T L, Ng C W W, Fredlund D G. Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007,44(44):392-408.

[12] 李雄威,孔令伟,郭爱国.气候影响下膨胀土工程性质的原位响应特征试验研究[J].岩土力学,2009,30(7):2069-2074.

[13] Qi Shunchao, Vanapalli Sai K. Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2015,70:68-82.

[14] Shahid Azam, Maki Ito. Unsaturated soil properties of a fissured expansive clay[J]. Asean Economic Bulletin, 2004,21(1):81-93.

[15] Lij H, Zhangl M, Li X. Soil-water characteristic curve and permeability function for unsaturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011,48(7):1010-1031.

[16] Fredlund D G, Rahardjo H, Fredlund M D. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. John Wiley & Sons, 2012,132(3):286-321.

[17] Chok Y H, Kaggwa W S, Jaksa M B, et al. Modelling the effects of vegetation on stability of slopes[C]//Auckland: Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 2004.

[18] Kokutse N K, Temgoua A G T, Kavazovic Z. Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects[J]. Ecological Engineering, 2016,86:146-153.

[19] Wu T H. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013,50(3):259-274.

[20] Wu T H, McKinell W P, Swanston DN. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979,16(1):19-33.

[21] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. John Wiley and Sons, New York, 1993.

[22] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996,33(3):379-392.

[23] Calgary, Alberta. Stability Modelling with SLOPE/W 2007 Version[M]. Canada. GEO - SLOPE International Ltd, 2008.

[24] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[25] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.