

文章编号:1671-6833(2014)02-0010-05

降雨条件下多裂隙膨胀岩渠坡稳定性分析

岑威钧¹, 王蒙², 石从浩³, 冷星火⁴, 王磊⁴

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省水利水电勘测设计院, 贵州 贵阳 550002; 4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 对南水北调工程中线某膨胀岩渠坡进行降雨条件下抗滑稳定计算, 其中细微裂隙尝试采用平面无厚度单元进行模拟。重点分析了降雨条件下裂隙、降雨强度、降雨历时及初始基质吸力对渠坡渗流场及稳定性的影响。结果表明: 表层裂隙能明显增加雨量的入渗, 对渠坡稳定不利; 随着雨强和降雨历时的增大, 渠坡稳定安全系数不断减小; 降雨前越为干燥的渠坡其稳定性相对越好。

关键词: 裂隙; 膨胀岩渠; 降雨入渗; 有限元强度折减法; 渠坡稳定性

中图分类号: TU47 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.003

0 引言

膨胀岩(土)渠道边坡失稳是一类经常遇到的典型工程问题, 特别是南水北调工程中, 膨胀岩(土)渠坡长达 340 km, 搞清膨胀岩(土)的渗流及稳定特性对渠道的合理设计和施工至关重要^[1]。膨胀岩(土)失水干缩, 裂隙发育, 吸水膨胀软化, 抗剪强度降低。现场观测表明, 膨胀岩(土)渠坡大多是在降雨时发生失稳破坏, 因此有必要对降雨条件下膨胀岩(土)渠坡进行渗流分析, 进而计算渠坡的抗滑稳定性。由于膨胀岩(土)体渠坡表层裂隙发育程度不同, 加之降雨过程中裂隙的动态变化, 因此膨胀岩(土)体渠坡渗流和力学特性变化复杂, 共同影响着渠坡的稳定性^[2]。

笔者以南水北调工程中线河南境内某膨胀岩渠坡为例, 考虑渠坡表层裂隙, 采用有限元法计算多种降雨工况下的渠坡瞬态渗流场及抗滑稳定性, 着重对裂隙及降雨要素的影响效应进行分析, 进而了解降雨诱发膨胀岩(土)渠坡失稳的机理与规律。

1 降雨条件下渠坡饱和—非饱和渗流场求解理论

1.1 控制方程与定解条件

将渠坡岩土体视为多孔介质, 在各向异性饱

和—非饱和非恒定条件下的达西渗流控制方程^[3-4]为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] - Q = [C(h_c) + \beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: h_c 为压力水头; k_{ij}^s 为饱和渗透系数张量; k_r 为相对渗透系数; C 为比容水度; β 为饱和—非饱和选择常数; S_s 为弹性贮水率; Q 为源汇项。

上述非线性方程求解时相对渗透系数 k_r 的确定对计算稳定性影响很大。由于 k_r 随压力水头(基质吸力) h_c 或者含水率 θ 的变化而变化, h_c 的求解与 k_r 的不断调整相互交织在一起^[5]。 k_r 的计算采用广泛使用的 VG 模型^[6]。

非恒定渗流场计算时可利用初始基质吸力作为降雨条件下渠坡渗流分析的初始条件, 即

$$h_c(x_i, 0) = h_c(x_i, t_0), \quad i=1, 2, 3. \quad (2)$$

饱和—非饱和渗流场的边界条件为

$$h_c(x_i, t) |_{r_1} = h_{c1}(x_i, t), \quad (3)$$
$$- \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] n_i |_{r_2} = q_n(t). \quad (4)$$

一般情况下, 渠坡表面为入渗边界, 可设定成流量边界或者水头边界。当降雨强度 q 小于渠坡入渗能力时, 降雨完全入渗, 未形成地表径流。此

收稿日期: 2014-01-09; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAB10B02)

作者简介: 岑威钧(1977-), 男, 浙江慈溪人, 河海大学副教授, 博士, 主要从事土石坝工程结构安全分析及水工建筑物渗控研究, E-mail: hhucwj@163.com.

时,按给定流量边界式(4)处理。当降雨强度 q 大于渠坡入渗能力时,部分雨水入渗,部分雨水沿坡面流失,在坡面形成一薄层水膜,此时按给定水头边界处理。由于水膜很薄,水头值可取为地表高程。

1.2 渠坡表层裂隙渗流特性的模拟方法

裂隙是膨胀土的典型特征之一。裂隙使膨胀土的渗流和力学特性变得复杂,导致其工程性质恶化,易引发滑坡问题。裂隙渗流及力学特性的合理模拟对膨胀土渠坡稳定性分析结果影响较大。对于渗流分析,目前较为简便的裂隙考虑方法有“边界法”和“薄层单元等效法”。这两种方法比较适用于裂隙发育,隙宽较大,裂隙分布情况较为明确的情况。对于较小且较为密集的裂隙,有限元网格处理时甚为麻烦。这里建议采用平面无厚度单元法来模拟细微裂隙的分布,渠段三维网格剖分时只需在细微裂隙处直接设置无厚度平面单元即可,不需要进行网格的二次剖分。这些细微裂隙处的局部渗流行为用立方定律来描述^[7],即

$$v_f = k_f J_f = \frac{gb_f^2}{12\mu} J_f, \quad (5)$$

式中: v_f 、 k_f 、 J_f 分别为缝中平均流速,等效渗透系数和水力坡降; b_f 为缝宽; μ 为水的黏滞系数;

2 渠坡稳定分析的强度折减法

目前边坡抗滑稳定分析方法主要有刚体极限平衡法、有限元极限平衡法和有限元强度折减法等。前两种方法主要用于二维土质边坡稳定分析。有限元强度折减法将岩土体的抗剪强度参数折减后进行有限元理想弹塑性计算,岩土边坡恰好达到“失稳破坏”时的折减系数即为安全系数。膨胀岩(土)的非饱和强度 τ_r 采用 Fredlund 提出的双参数模型^[8],相应的折减公式

$$\tau_r = c/F_r + (\sigma - u_a) \tan\varphi/F_r + (u_a - u_w) \tan\varphi^b/F_r, \quad (6)$$

式中: c 为黏聚力; $\sigma - u_a$ 为有效法向应力; φ 为内摩擦角; $u_a - u_w$ 为基质吸力; φ^b 为抗剪强度随基质吸力而增加的速率; F_r 为折减系数。

岩(土)体的强度破坏准则建议采用与 M-C 准则相匹配的 D-P 准则替代。扩展的 D-P 准则考虑了静水压力对岩土材料塑性变形及抗剪强度的影响,其表达式

$$F = \alpha I_1 - \sqrt{J_2} + k = 0, \quad (7)$$

式中: I_1 为应力张量的第一不变量; J_2 为偏应力张量的第二不变量; α 、 k 为与屈服面形状、流动法则等相关的参数。

边坡失稳破坏的判定主要有塑性区是否贯通、迭代计算是否收敛及特征部位变形是否发生突变等标准,各种判断准则所得结果基本吻合^[9]。其中迭代计算是否收敛较易操作,目前用的最为广泛,但迭代容差及最大迭代次数的合理设置对结果有一定影响。

3 实例分析

3.1 工程概况

分析对象为南水北调工程中线河南境内某典型膨胀岩渠坡,渠底以上以泥灰岩为主,中间含弱膨胀性的黏土岩夹层,渠道表层泥灰岩裂隙较发育,裂面平直或略起伏,多光滑、具有蜡状光泽、可见擦痕,充填灰绿色条带,充填厚度较小,呈薄膜状。渠道一级马道以下设有 0.1 m 厚的混凝土衬砌板,渠道中心线一侧典型剖面见图 1。渠坡各地层饱和渗透及主要物理力学参数由试验得到,见表 1。由试验得到的非饱和渗透系数与基质吸力关系仅在较小基质吸力范围少数几点,经 VG 模型拟合得到较为完整的计算曲线,见图 2。砂岩位于渠底以下,处于地下水位以下,按饱和材料处理。根据岩坡裂隙分布特性,渠坡表层除几处大裂隙采用薄层单元模拟外,其余细小裂隙按 2 m 等间距分布的平面无厚度单元来近似模拟。

根据当地气象等资料确定不同初始基质吸力、降雨强度、降雨历时等多个计算工况。限于篇幅,笔者仅给出主要计算成果。

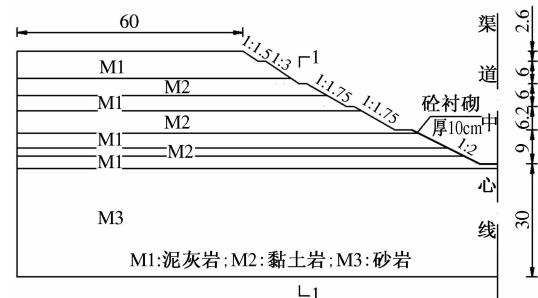


图 1 渠坡典型剖面图

Fig. 1 Typical section of the channel slope

3.2 主要成果分析

3.2.1 裂隙对渠坡渗流及稳定性的影响

选取初始基质吸力 25 kPa,雨强 3 mm/d(小雨),降雨历时 160 h 时的瞬态渗流场进行对比分析,并采用强度折减法计算渠坡稳定性。同一时刻渠坡表层考虑裂隙时的渠坡孔压明显较不考虑时大,且浅层的暂态饱和区出现较早,并随着降雨历时的增加其饱和范围较不考虑裂隙时增加的快。图 3 为降雨 160 h 时渠坡孔压等值线分布。

图4为渠坡纵剖面(图1中的1-1断面)孔隙水压力沿高程分布随整个降雨历时的变化情况。随着降雨入渗历时增加,渠坡内孔隙水压力不断增加,夹逼在渠坡表层暂态饱和区与渠底饱和区之间的非饱和范围逐渐减小。考虑与不考虑裂隙时渠坡岩体内孔隙水压力在深度方向变化规律相似,但考虑裂隙后孔压变化较快。

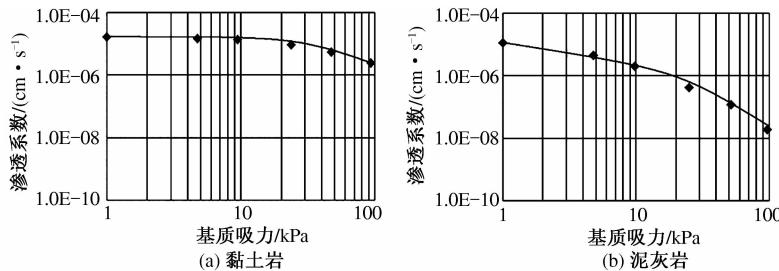


图2 非饱和渗透系数与基质吸力关系曲线

Fig. 2 Relationship between unsaturated permeability and matrix suction

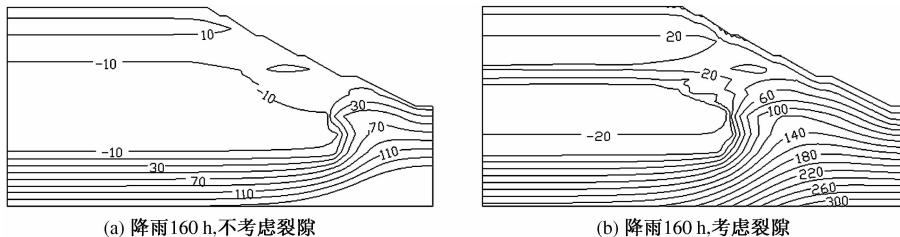


图3 渠坡孔压等值线分布

Fig. 3 PWP distribution of Channel slope

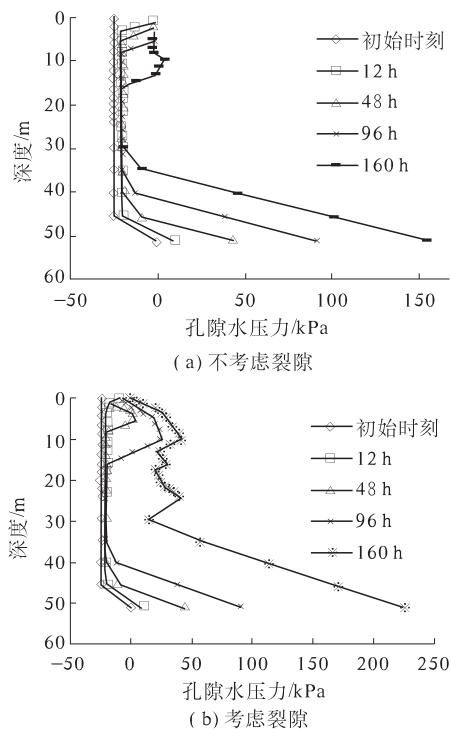


图4 渠坡孔隙水压力随深度分布曲线

Fig. 4 Channel slope PWP distribution curve by depth

图5给出了渠坡稳定安全系数随着降雨历时的变化过程。不论裂隙考虑与否,渠坡稳定安全系

表1 岩体的渗透及物理力学参数

Tab. 1 Parameters for rock

材料	c / kPa	φ / °	γ' / (g · cm⁻³) / MPa	E / MPa	μ	K_s / (cm · s⁻¹)
泥灰岩	50	21	1.97	52	0.35	4.8×10^{-5}
黏土岩	22	19	1.97	46	0.33	2.2×10^{-5}
砂岩	15 000	40	2.26	3 000	0.25	1.0×10^{-8}

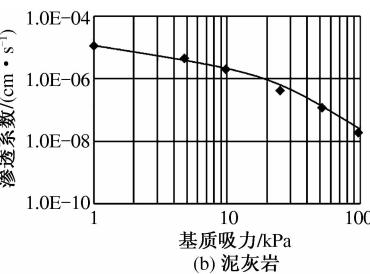


图5 渠坡稳定安全系数随降雨历时变化曲线

Fig. 5 Channel slope safety factor time histories

3.2.2 降雨强度对渠坡渗流及稳定性的影响

图7给出了不同降雨强度下降雨48 h时断面1-1处孔隙水压力沿高程分布曲线,其中降雨强度有3(小雨)、20(中雨)、40(大雨)和80 mm/d(暴雨)等4种。由图可见,降雨结束时小雨条件

下几乎整个渠坡仍处于非饱和状态,其他三种降雨强度条件下渠坡一定深度达到饱和状态。大雨与暴雨条件下断面1-1处孔压随深度变化几乎相同,但在饱和区域内均比相同深度中雨条件下的孔隙水压力大,并且中雨条件下渠坡表层仍未达到饱和状态。

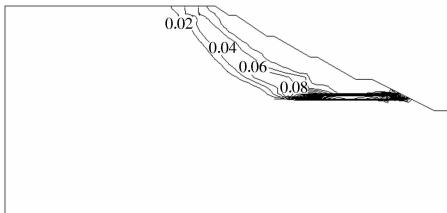


图6 降雨160 h 渠坡等效塑性应变等值线图(考虑裂隙)

Fig. 6 Coutours of equivalent plastic strain at 160 h of the rainfall

图8给出了相同初始条件下渠坡安全系数随降雨历时的变化过程。各降雨强度条件下渠坡稳定安全系数随降雨的延续均有不同程度地减小,雨强越大,减小越明显。大雨与暴雨时稳定安全系数变化几乎相近主要是因为两者雨强均已较大,超过了渠坡的极限入渗能力,在渠坡表面形成汇流,入渗雨量接近之故。

一般情况下,当降雨强度小于渠坡饱和渗透系数时,雨水入渗充分,易进入渠坡深部。当降雨强度大于渠坡土体饱和渗透系数时,雨水不能完全入渗,易在边坡浅层形成饱和带。但对于本次计算,虽然小雨和中雨的降雨强度大于渠坡表层岩土体最大饱和渗透系数,但由于渠坡表层存在裂隙,增加了渗流通道和入渗能力,使得渠坡浅层岩土体实际“等效”渗透系数大于降雨强度,渠坡表层岩土体未达到饱和,降雨依然能很快入渗到渠坡深部。降雨强度为大雨和暴雨时渠坡内部孔隙水压力分布基本相同,渠坡表层及其以下一定深度范围达到饱和。这是因为渠坡表层裂隙虽然加大了浅层土体的“等效”渗透性,但这种加强作用

不是无限增大的。当降雨强度增加超过渠坡表层实际极限渗透能力时,渠坡表层从降雨开始就出现暂态的饱和区,降雨强度的增加将不会带来渠坡内部孔隙水压力的增加,故基本不会影响到渠坡的稳定性。

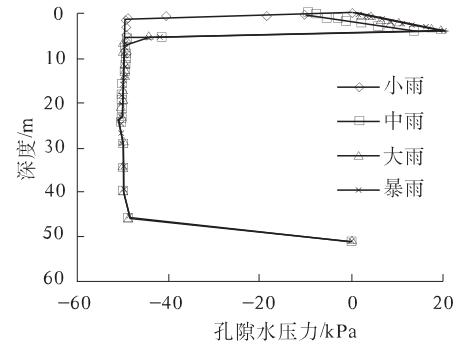


图7 不同降雨强度孔隙水压力随深度分布曲线

Fig. 7 PWP distribution curve by depth

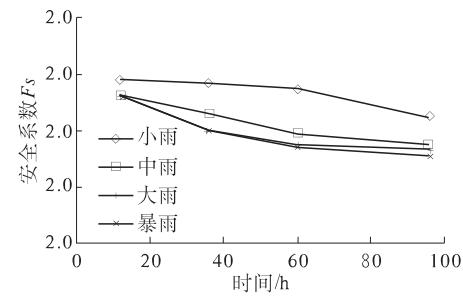


图8 不同降雨强度条件下渠坡稳定安全系数时程曲线

Fig. 8 Channel slope safety factor time histories for different rainfall intensity

3.2.3 降雨初始条件对渠坡渗流及稳定性的影响

选取初始基质吸力分别为25、50和75 kPa,降雨强度为小雨(3 mm/d)的结果进行比较分析。图9为降雨160 h后不同初始基质吸力情况下渠坡孔隙水压力分布图。由图可见,初始基质吸力为25 kPa所对应的渠坡饱和区域最大,随初始基质吸力的增加,渠坡内部饱和区域减小。

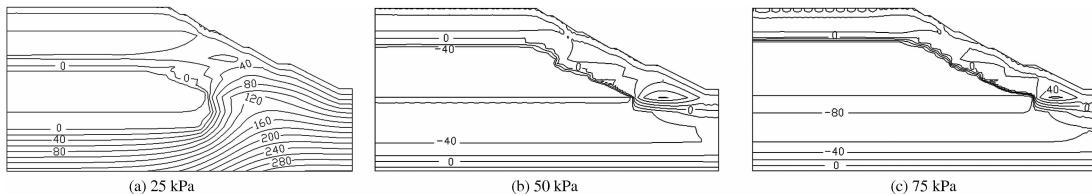


图9 不同初始基质吸力渠坡孔隙水压力分布(kPa)

Fig. 9 Pore water pressure distribution for different initial matric suction

图10给出了不同初始基质吸力情况下计算所得的渠坡稳定安全系数随降雨历时的变化过程。相同降雨历时初始基质吸力75 kPa所对应的

渠坡稳定安全系数最大,且随初始基质吸力减小而减小。这是因为基质吸力较小时渠坡内部含水率最大,最易饱和,故降雨结束时饱和区域最大,

稳定安全系数最小。

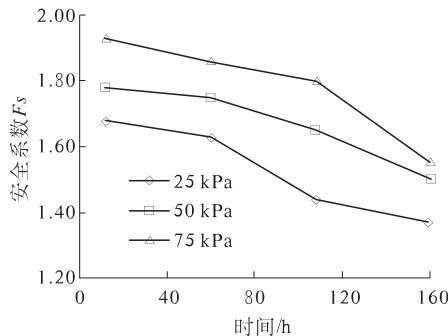


图 10 不同初始基质吸力渠坡稳定安全系数时程曲线

Fig. 10 Channel slope safety factor time histories in different initial matric suction

4 结论

(1) 在一定降雨历时内, 随降雨历时增加, 渠坡抗滑稳定性逐渐降低, 表明降雨是诱发膨胀岩渠坡失稳的主要因素之一。

(2) 裂隙增加了渠坡的降雨入渗能力, 使渠坡更易达到饱和, 削弱了渠坡的抗剪强度, 使渠坡抗滑稳定性降低。

(3) 相同降雨历时下, 随着降雨强度增加, 对渠坡稳定性影响不断加大。当降雨强度到达某极限入渗能力后, 其影响不再明显。极限入渗能力除与降雨历时和渠坡岩土体的渗透特性有关外, 还与渠坡表层裂隙特性有关。

(4) 降雨前渠坡内部初始基质吸力直接影响降

雨对渠坡内部渗流, 进而影响到渠坡抗滑稳定性。

参考文献:

- [1] 徐晗, 饶锡保, 汪明元. 降雨条件下膨胀岩边坡失稳数值模拟研究 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 52–57.
- [2] 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型 [J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581–1586.
- [3] Neuman S. P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements [J]. ASCE, Journal of Hydraulic Division, 1973: 2233–2250.
- [4] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与程序应用 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1999, 22–24.
- [5] 荣冠, 张伟, 周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和非饱和渗流计算 [J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1545–1550.
- [6] VAN G M T. A closed form equation for Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980(44): 892–898.
- [7] 朱岳明, 龚道勇, 章洪, 等. 碾压混凝土坝渗流场分析的缝面渗流平面单元模拟法 [J]. 水利学报, 2003(3): 63–68.
- [8] FREDLUND D. G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for unsaturated soils [M]. New York: A Wiley – Interscience Publication, 1997: 227, 440–447.
- [9] 岑威钧, 邓同春, 石从浩, 等. 复杂渠坡稳定性分析方法比较 [J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 29–34.

Stability Study of an Expensive Channel Slope with Fissures due to Rainfall Infiltration

CEN Wei-jun¹, WANG Meng², SHI Cong-hao³, LENG Xing-huo⁴, WANG Lei⁴

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. HydroChina Guiyang Engineering Corporation Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 3. Guizhou Survey & Design Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guiyang 550002, China; 4. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: The stability of sliding resistance calculation of an expensive rock channel slope due to rainfall infiltration was conducted in the middle route of the South-North Water Transfer Project. The plane element without thickness was proposed to simulate the subtle fissures. The influence of fissures, rainfall intensity, duration of rainfall and initial matric suction on the channel slope seepage field and stability were studied. The results show that the infiltration increases by the surface fissure, which causes worsening of the slope stability. The safety factor will decrease with the increasing of rainfall duration and intensity. The stability is better for the initial lower water content of the channel slope.

Key words: fissure, expensive rock channel, rainfall infiltration, strength reduction method with FEM, channel slope stability