

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<sup>1</sup>, 王 蒙<sup>2</sup>, 石从浩<sup>3</sup>, 冷星火<sup>4</sup>, 王 磊<sup>4</sup>

(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<sup>[1]</sup>. 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<sup>[2]</sup>.

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

和一非饱和-非恒定条件下的达西渗流控制方程<sup>[3-4]</sup>为

∂ / ∂ x\_i [ k\_ij^s k\_r(h\_c) ∂ h\_c / ∂ x\_j + k\_iz^s k\_r(h\_c) ] - Q = [ C(h\_c) + β S\_s ] ∂ h\_c / ∂ t, (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-非饱和和选择常数; θ 为体积含水率; 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<sup>[5]</sup>. k\_r 的计算采用广泛使用的 VG 模型<sup>[6]</sup>.

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), i = 1, 2, 3. (2)

饱和-非饱和渗流场的边界条件为

h\_c(x\_i, t) |\_{Γ\_1} = h\_{ci}(x\_i, t), (3)

- [ k\_ij^s k\_r(h\_c) ∂ h\_c / ∂ x\_j + k\_iz^s k\_r(h\_c) ] n\_i |\_{Γ\_2} = q\_n(t). (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.



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.

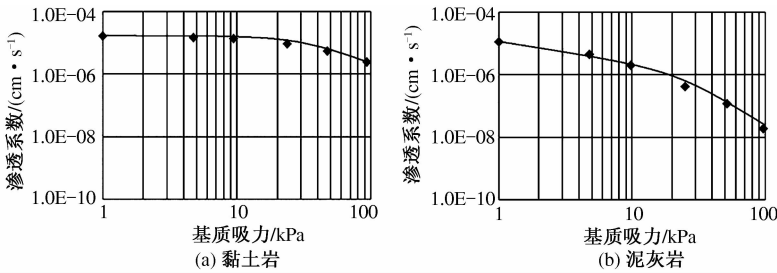


图 2 非饱和渗透系数与基质吸力关系曲线

Fig. 2 Relationship between unsaturated permeability and matrix suction

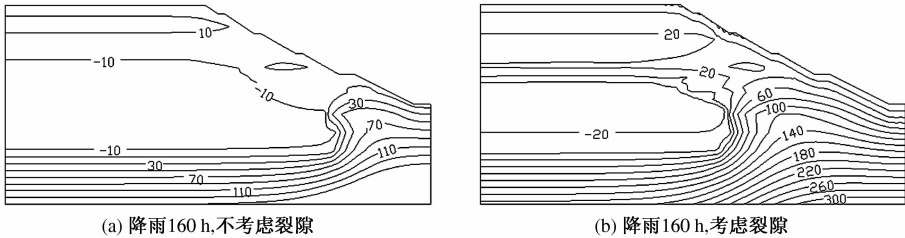


图 3 渠坡孔压等值线分布

Fig. 3 PWP distribution of Channel slope

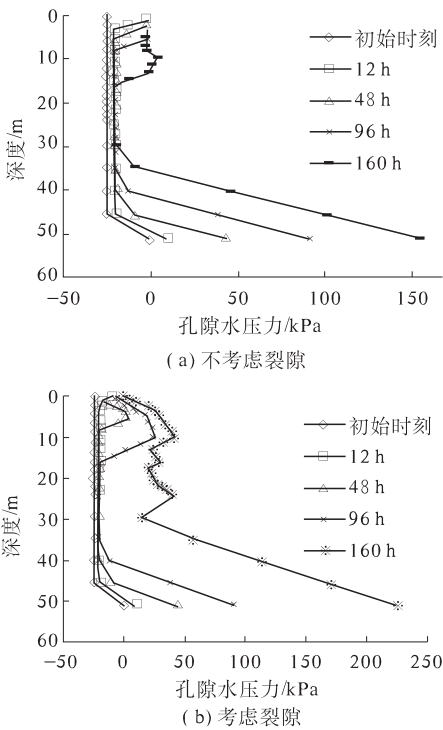


图 4 渠坡孔隙水压力随深度分布曲线

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 岩土体的渗透及物理力学参数

Tab. 1 Parameters for rock						
材料	$c$ /kPa	$\varphi/^{\circ}$	$\gamma/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )/MPa	$E$	$\mu$	$K_s$ /( $cm \cdot s^{-1}$ )
泥灰岩	50	21	1.97	52	0.35	$4.8 \times 10^{-5}$
黏土岩	22	19	1.97	46	0.33	$2.2 \times 10^{-5}$
砂岩	15 000	40	2.26	3 000	0.25	$1.0 \times 10^{-8}$

数随降雨历时不断减小. 由于渠坡表层存在裂隙,较无裂隙渠坡相比入渗快,出现暂态饱和状态较早,相同降雨历时下饱和区域大,部分区域孔压大于同深度无裂隙情况,所以渠坡稳定安全系数较小. 图 6 为降雨 160 h 考虑裂隙时渠坡等效塑性应变等值线图.

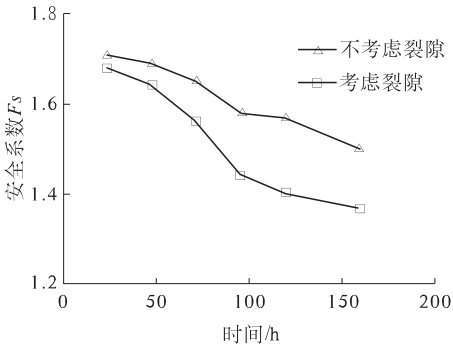


图 5 渠坡稳定安全系数随降雨历时变化曲线

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.

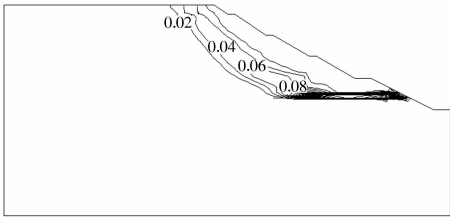


图 6 降雨 160 h 渠坡等效塑性应变等值线图 (考虑裂隙)

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

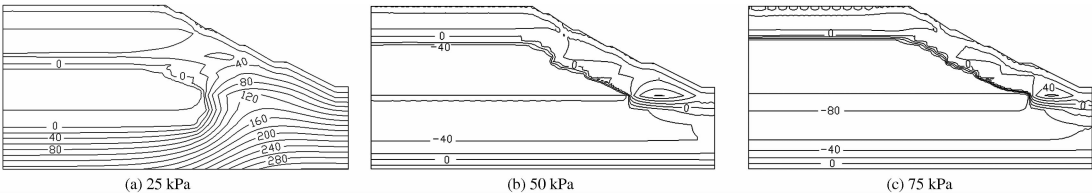


图 9 不同初始基质吸力渠坡孔隙水压力分布 (kPa)

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

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.

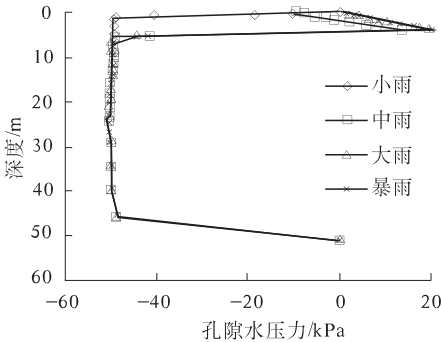


图 7 不同降雨强度孔隙水压力随深度分布曲线

Fig.7 PWP distribution curve by depth

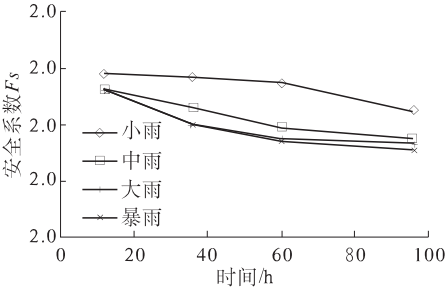


图 8 不同降雨强度条件下渠坡稳定安全系数时程曲线

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.

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。

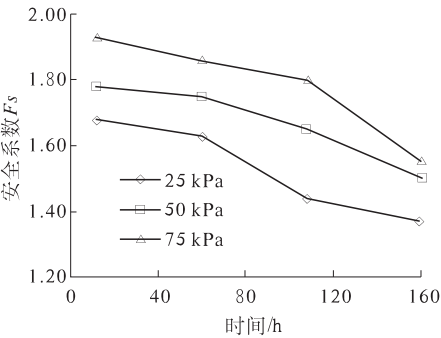


图 10 不同初始基质吸力渠坡稳定安全系数时程曲线

Fig. 10 Channel slope safety factor time histories in different initial matrix 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] 徐哈,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,RAHARDIO 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-jun<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, SHI Cong-hao<sup>3</sup>, LENG Xing-huo<sup>4</sup>, WANG Lei<sup>4</sup>

(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 matrix 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