

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.022

裂隙膨胀土边坡模型降雨变形破坏过程数值分析

杨文琦¹, 周 成^{1,2}, 王 林³, 谭昌明⁴

(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. 上海浦东新区投资咨询公司, 上海 200125;

4. 四川省交通运输厅 公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 为研究多裂隙膨胀土边坡在降雨浸水作用下变形及滑动破坏特征, 对裂隙膨胀土边坡在降雨浸水条件下滑坡的离心模型试验进行计算对比分析; 并利用放大裂隙侧向水压力法近似模拟膨胀力的作用, 分析探讨在不同降雨历时和降雨强度下, 不同的膨胀土边坡裂隙的分布位置和深度、膨胀力的大小等对边坡的变形破坏过程及稳定安全系数变化的影响规律。结果表明: 膨胀土边坡的破坏由坡脚开始, 随着降雨历时的增加逐渐向坡顶发展, 最终表现出坡脚膨胀隆起、坡顶塌陷的破坏特征。同时, 膨胀力是分析膨胀土边坡稳定性问题不可忽略的因素, 不考虑膨胀力时往往会高估膨胀土边坡的稳定性; 膨胀土边坡的安全系数受降雨强度、降雨历时影响较大; 坡中存在裂隙的膨胀土边坡比坡顶存在裂隙的膨胀土边坡更危险。

关键词: 裂隙; 膨胀土边坡; 离心模型试验; 变形特征; 滑动破坏

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0117-06

Numerical Analysis of the Deformation and Failure of a Fissured Expansive Soil Slope Centrifuge Model During Rainfall

YANG Wenqi¹, ZHOU Cheng^{1,2}, WANG Lin³, TAN Changming⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Shanghai Pudong New Area Investment Consulting Company, Shanghai 200125, China;

4. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In order to analyze the characteristics of deformation and sliding failure of expansive soil slopes under rainfall, the centrifugal model test of the fissured expansive soil slope under rainfall was compared and analyzed. The effect of the swelling force is simulated by amplifying the lateral water pressure of the magnified fissure. Based on this method, the change regulation of the safety factors is studied under different position and depth of the fissures, values of the expansion force, and rainfall duration and intensity. The results showed that the damage of the expansive soil slope started from the slope foot, and gradually developed upward with the increase of rainfall duration, eventually showing expansion at the foot of the slope and collapse at the top of the slope. At the same time, the expansive forces cannot be neglected in analysis of expansive soil slope stability, otherwise the stability of expansive soil slope will be overestimated. The safety factor of expansive soil slope is influenced by rainfall intensity and rainfall duration. And the expansive soil slope with fissure in the middle of slope is more dangerous than the expansive soil slope with fissure on the top.

Keywords: fissures; expansive soil slope; centrifuge model test; deformation characteristics; sliding failure

收稿日期: 2018-07-30

修稿日期: 2018-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579167); 水利部行业专项(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(YK915003)

作者简介: 杨文琦(1994—), 女(侗族), 湖南怀化人, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土工程。E-mail: 295687822@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

膨胀土是一种具有“吸水膨胀、失水收缩”特性的特殊土体,而这种性质正是使得自然界中的膨胀土边坡在长期经历季节性气候变化引起的干湿循环后产生各种形态裂隙的内在因素^[1-2],裂隙的存在对边坡的稳定性造成不利影响。根据国内外膨胀土边坡失事案例及相关经验,可将其破坏特征总结为浅层性、逐级牵引性、平缓性及季节性破坏^[3],其中季节性破坏主要缘于降雨的季节性。膨胀土边坡常常在降雨之后发生失稳,那么了解其在降雨工况下的变形破坏失稳特征就显得尤为重要。

人们常常利用模型试验研究膨胀土边坡的降雨失稳机理,例如王国利等^[4]和 Chen 等^[5]利用离心模型试验研究了膨胀土边坡在干湿循环过程中裂隙的发展及其对膨胀土边坡失稳的影响。饶锡宝等^[6]利用离心模型试验对南阳膨胀土渠道边坡进行分析研究,找出了其稳定坡度。程永辉等^[7]也利用离心模型试验研究了膨胀土边坡的牵引式滑坡。其中,程永辉等在试验中利用设置砂井的方法来模拟坡面降雨入渗裂缝。

目前对于膨胀土边坡雨后失稳机理,大部分人从降雨后边坡土体强度衰减的角度进行分析,这类分析多基于饱和土力学理论,对膨胀土的特殊性质和破坏机理缺乏一定的考虑,导致分析结果与实际情况不相符。采取放缓坡角或采用刚性结构对边坡进行处理,效果也不甚理想,许多边坡即使在坡度缓至 1:6 甚至 1:10 的情况下仍发生滑动甚至二次滑动^[8]。因此,对膨胀土边坡失稳研究要结合膨胀土的基本特性、边坡运行特点以及相关环境因素进行考虑。

为了研究膨胀土边坡降雨浸水情况下的变形破坏特征,本文将结合文献[9]膨胀土边坡离心模型试验进行建模和计算,并将计算结果同试验结果进行对比,得出膨胀土边坡在雨水入渗时变形的一般规律。同时,利用该模型,结合放大裂隙侧向水压力法模拟膨胀力作用,研究了不同的边坡裂隙分布、裂隙处膨胀力大小和降雨强度和历时在裂隙膨胀土边坡变形破坏失稳过程产生的影响。

1 裂隙膨胀土边坡降雨变形破坏数值分析

文献[9]中的离心模型试验以南水北调中线工程为背景,确定膨胀土边坡几何尺寸:坡度为 1:1.5,渠坡高度为 33.4 cm,渠底地基土层厚度为 16.7 cm,渠底宽度为 23.3 cm,渠顶宽度为 26.6 cm。为了加

快膨胀土边坡模型中的雨水入渗,边坡上每隔 50 mm 设置一道直径为 8 mm、深度为 100 mm 的砂井。试验用土为南水北调中线渠段的邯郸强膨胀土,根据室内试验得到其基本物理力学参数:液限为 32.9%,塑限为 81.2%,自由膨胀率为 124%; $c = 27.5$ kPa, $\varphi = 17.5^\circ$,饱和渗透系数约为 3×10^{-6} cm/s; $E = 5\ 000$ kPa, $\mu = 0.38$ 。制模时控制初始含水率为 18%,干密度为 1.6 g/cm³。

1.1 离心模型试验建模计算

为了上述离心试验结果进行对比从而得出膨胀土边坡在雨后失稳过程中的变形破坏特征,利用 GeoStudio 软件进行建模计算,模型尺寸与上述离心模型试验中对应的原型相关参数保持一致。试验确定比尺为 1:20,参考离心模型试验物理量换算表^[10],试验边坡尺寸可换算为原型边坡尺寸,即渠坡高度为 6.5 m,渠底地基土层厚度 3.5 m,渠底宽度为 3.5 m,渠顶宽度为 4.5 m,坡度则为 1:1.5。土体基本参数不需要进行换算,可直接用于数值计算。另外,根据相似率,在膨胀土边坡上每隔 1 m 设置一道深度为 2 m 的砂井。根据模型试验条件,设置坡面为入渗边界,模型底面与左右两侧均为不透水边界,且设置位移边界条件限制其位移。膨胀土边坡建模图如图 1 所示。

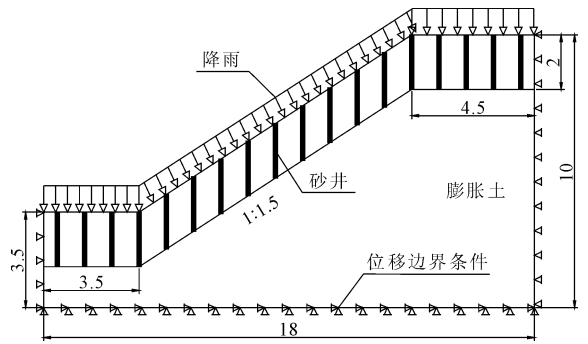


图 1 膨胀土边坡建模图(单位:m)

1.2 计算结果分析

通过计算得出了膨胀土边坡在降雨过程中水平和竖直位移等值线图,分别如图 2、图 3 所示。由图 2、图 3 可以看出,降雨过程中,膨胀土边坡内部土体浸水后在水平方向和竖直方向上均产生了向临空面方向的位移,表现出了整体膨胀趋势。而坡脚位置由于积水,长时间处于饱和状态,最易形成塑性软化区,发生局部剪切破坏,之后滑动逐渐向上发展,表现出逐级牵引的特征,这也是膨胀土边坡的一种典型破坏形式。故而膨胀土边坡在坡脚处出现了水平和竖直位移的最大值。其中,离心模型试验中膨胀

2.2 利用放大裂隙侧向水压力法近似模拟膨胀力作用

当膨胀土中的含水率增加时,土中会产生塑性势,使膨胀土有发生膨胀变形的趋势,当这种趋势受到约束时,就会产生膨胀力。关于如何在膨胀土边坡稳定分析中考虑膨胀力的作用,许多学者做了相关假设和尝试,例如谭波^[12]考虑将膨胀力以面力的形式垂直作用于坡面;秦禄生等^[13]考虑将膨胀力作为吸力的等效外力等等。因此,本文考虑降雨一方面入渗引起坡土膨胀,另一方面会集聚在裂隙。为了方便在 GeoStudio 软件中引入膨胀力的作用,借鉴了路永珍^[14]硕士论文中所使用的方法,通过放大裂隙侧向水压力来近似模拟膨胀力的作用。降雨时,雨水会沿着裂隙入渗,此时,裂隙周围的土体会同时受到水压力 and 膨胀力的作用,水压力为三角分布,此时假设膨胀力沿裂隙均匀分布,如图 5 所示。通过力矩平衡,将膨胀力大小换算成等效水压力数值,相当于通过放大侧向的水压力来模拟膨胀力对裂隙两侧土体的作用效果,因此只需知道膨胀力的大小就可以巧妙的将膨胀力引入到膨胀土边坡稳定性计算过程中,如式(1)^[14]。

$$\overline{\gamma_{\omega}} = \frac{3P_e}{2h}$$

(1)

式中: $\overline{\gamma_{\omega}}$ 即为膨胀力对应的等效水重度, kN/m^3 ; P_e 为膨胀力, kPa ; h 即为膨胀力作用高度或裂隙水的深度, m 。

根据文献[15],邯郸强膨胀土相对应的膨胀力在 40.9 kPa ~ 101 kPa 范围内,根据离心模型试验的制模含水率,下文计算时取膨胀力为 50 kPa。

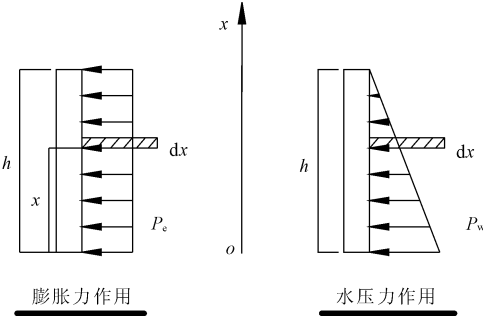


图 5 裂隙膨胀力等效示意图^[14]

2.2.1 膨胀力作用效果分析

为了研究膨胀力施加情况对膨胀土边坡稳定性的影响,对裂隙深 1 m、雨强为 30 mm/d、降雨历时为 6 d 情况下,有($p_e = 50 \text{ kPa}$)无膨胀力($p_e = 0 \text{ kPa}$)时的膨胀土边坡进行了稳定性分析,得出了不同工况下安

全系数随降雨历时的变化规律,结果如表 1 所示。

表 1 不同膨胀力施加工况下安全系数计算表

降雨 历时 /d	安全系数			
	坡顶裂隙		坡中裂隙	
	考虑 膨胀力	不考虑 膨胀力	考虑 膨胀力	不考虑 膨胀力
0.6	2.089	2.246	1.417	2.297
1.2	2.071	2.229	1.261	2.275
1.8	2.052	2.211	1.191	2.265
2.4	2.023	2.190	1.166	2.254
3.0	2.004	2.178	1.155	2.244
3.6	1.986	2.167	1.151	2.233
4.2	1.952	2.155	1.149	2.222
4.8	1.893	2.137	1.148	2.209
5.4	1.857	2.115	1.147	2.196
6.0	1.836	2.094	1.146	2.183

由表 1 可发现考虑膨胀力时的边坡安全系数比未考虑膨胀力时的安全系数小了约 30% ~ 40%。当裂隙位于坡中时,降雨 6 d 后,考虑膨胀力时边坡安全系数已低至 1.146,根据相关规范^[16],连续降雨情况下,路堑边坡稳定性验算安全系数约为 1.100 ~ 1.200。则此时,该膨胀土边坡已存在滑坡的风险,需对其进行加固处理。而未考虑膨胀力时,边坡安全系数仍高达 2.183,说明连续降雨 6 d 后膨胀土边坡仍处于非常稳定的状态,这与实际情况往往不符。显然,膨胀力是分析降雨情况下膨胀土边坡稳定性时一个不可忽略的因素,若不考虑膨胀力的影响,往往会使得计算偏保守,无法反应膨胀土边坡在自然降雨条件下的真实情况,存在较大的风险。

2.2.2 不同位置与深度的裂隙分布影响分析

对于膨胀土边坡而言,裂隙的存在不仅破坏了土体的完整性,还为雨水提供了入渗通道,从而使边坡内部土体遇水产生极大的膨胀力。据 Albrecht 等^[17]研究,黏土在经历过多次干湿循环过程产生裂隙后,其水力传导系数会增加 2 ~ 3 个量级。因此,为了研究不同位置和深度的裂隙分布对膨胀土边坡稳定性的影响程度,本文在计算时分别在坡顶、坡中处设置了竖直裂隙。根据廖世文的研究,膨胀土地区的裂隙深度往往同大气影响深度保持一致^[18],文献[15]中提到膨胀土地区大气影响深度一般为 1.0 m ~ 2.5 m,因此计算时考虑了裂隙深度为 0.5 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m 和 1.5 m 的情况。降雨强度同样为 30 mm/d,降雨历时取为 3 d,计算结果如图 6 所示。

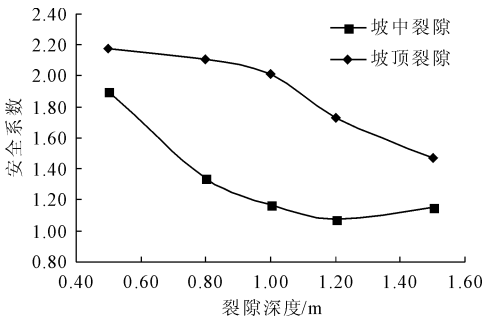


图 6 不同裂隙深度下安全系数计算图

从图 6 可以看出,裂隙位于坡中时膨胀土边坡的安全系数明显小于裂隙位于坡顶时膨胀土边坡的安全系数。在坡顶裂隙中,雨水大多沿着裂隙发展方向做垂直入渗;而在坡中裂隙中,降雨饱和后往往还会出现平行于坡面的顺坡渗流^[19],产生渗流力,不利于边坡稳定,这也导致一些降雨诱导型滑坡往往会出现破坏面与原坡面大致平行的情况。因此,膨胀土边坡滑坡后缘多发生在坡中,而极少出现在坡顶^[20]。

无论裂隙位于哪个位置,边坡安全系数总是随着裂隙深度的增加而较小的。膨胀土边坡在经历干湿循环的过程中不断发生胀缩变形,而由于土体表面和内部含水率不一致导致其胀缩程度不一致,土体胀缩不均,于是产生裂隙。当裂隙底部成为新的蒸发面以后,以上过程又会重复发生,导致裂隙不断扩展、深入。降雨初期,雨水因土体出现的短暂疏水性而在地表累积,一旦形成积水,雨水会优先沿着裂隙侧壁入渗^[21],汇聚在裂隙底部,之后入渗至土体内部。因此,裂隙的深度直接控制了膨胀土边坡内部的饱和区范围。深度越大,降雨后沿着裂隙进入膨胀土边坡的雨水越多,形成的饱和区域越大,对膨胀土边坡的稳定性越不利。

2.2.3 不同降雨强度和降雨历时的影响分析

降雨对膨胀土边坡的稳定性有着直接影响,大部分膨胀土边坡失稳都发生在降雨之后。因此本文对存在不同位置裂隙的膨胀土边坡施加长达 6 d 的降雨,雨强为 30 mm/d,且裂隙深度均为 1 m,以观察边坡安全系数随降雨历时的变化情况。计算结果见表 1 所示。

表 1 展示了不同裂隙位置下膨胀土边坡安全系数随着降雨历时的变化过程,无论裂隙在哪个位置,其安全系数总是随着降雨时间的增加而减小的。在边坡中,地下水位以上的负孔压为非饱和土提供了附加的抗剪强度。降雨后,部分雨水沿着土中孔隙

入渗到地下,抬高地下水位,使土体饱和,一方面增加土体自重从而增加边坡的下滑力,另一方面使得基质吸力减小从而降低其抗剪强度^[22];还有一部分雨水会形成坡面径流,顺着坡面往下流,若是不考虑植被的拦截作用,雨水的流淌带走部分土壤;而雨水到坡脚时可能会在坡脚汇聚,使得坡脚被浸泡软化,易发生局部剪切破坏,这也常常导致膨胀土边坡发生牵引式的滑坡。降雨时间越长,雨水入渗量越大,这种影响也就越明显。

雨水是膨胀土边坡中主要的水分来源,降雨强度也将直接影响边坡的安全系数。为研究降雨强度对膨胀土边坡稳定性的影响,分别设置了 10 mm/d、30 mm/d、50 mm/d、70 mm/d 和 90 mm/d 五组降雨强度,降雨时长为 3 d,裂隙深度取 1 m,计算裂隙分别在坡顶、坡中时膨胀土安全系数的变化趋势,计算结果如图 7 所示。

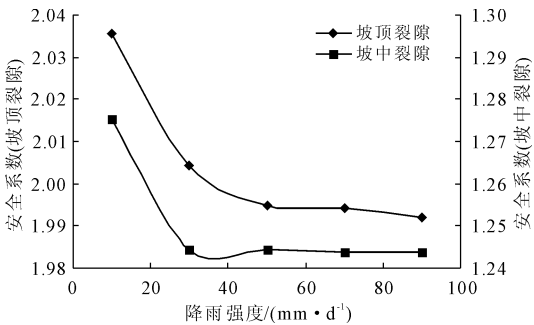


图 7 裂隙位于坡顶或坡中时安全系数随雨强变化图

由图 7 可知膨胀土边坡的安全系数随着雨强的增加而减小,在一定程度上,雨强越大,对边坡的影响越大。这种影响在雨强小于 50 mm/d 时表现较明显,当雨强大于 50 mm/d 时,膨胀土边坡的安全系数不再随雨强的增加而发生较大变化。膨胀土边坡的稳定性与实际入渗雨量有关,在裂隙膨胀土中,裂隙两侧土体吸收沿裂隙入渗的雨水后逐渐饱和,裂隙也会随之闭合。当裂隙深度内土体均达到饱和以后,雨水不再入渗。因此,当雨强增加至大于土体入渗能力时,多余的雨水只能以坡面径流形式流走^[23]。在本文,雨强达 50 mm/d 时,裂隙土层可视为完全饱和,之后再增加雨强,膨胀土边坡的安全系数也不会发生明显变化。除此之外,雨强较大时对边坡表面的冲蚀作用也将一定程度上影响其稳定性。

3 结 论

(1) 膨胀土边坡在降雨时先发生整体膨胀,后坡脚及浸水软化产生局部破坏,并逐渐向上发展,表

现出了牵引式破坏的特征。破坏时出现坡顶凹陷、坡脚隆起的现象。

(2) 降雨条件下,考虑膨胀力作用时膨胀土边坡的安全系数比未考虑膨胀力作用时的边坡安全系数降低了约 30%~40%,与自然界中膨胀土边坡雨后失稳的情况更吻合。说明在进行膨胀土边坡的稳定性分析时,需合理考虑膨胀力的作用,将其与普通黏性土坡区分开来。

(3) 膨胀土边坡的稳定性会随着降雨强度、降雨历时的增加而降低,但这种影响会受到土体入渗能力的限制,一旦坡土接近饱和,雨强等对边坡稳定性的影响将不再明显。同时连接大气与内部稳定土体的裂隙会影响边坡稳定性,裂隙开展深度越大,边坡稳定性越差;且裂隙位于膨胀土边坡中部时比裂隙位于坡顶位置时更危险。这些规律为膨胀土边坡的防护设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 袁俊平,丁巍,蔺彦玲,等.浸水历时对裂隙膨胀土渗透性的影响[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):83-86.
- [2] 黄志全,张茜,吴超,等.膨胀土动力学特性变化规律试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(2):78-82.
- [3] 刘华强,殷宗泽.膨胀土边坡稳定分析方法研究[J].岩土力学,2010,31(5):1545-1549,1554.
- [4] 王国利,陈生水,徐光明,等.干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J].水利水运工程学报,2005(4):6-10.
- [5] Chen T L, Zhou C, Wang G L, et al. Centrifuge model test on unsaturated expansive soil slopes with cyclic wetting-drying and inundation at the slope toe[J]. International Journal of Civil Engineering, 2017(6):1-20.
- [6] 饶锡保,陈云,曾玲,等.膨胀土渠道边坡稳定性离心模型试验及有限元分析[J].长江科学院院报,2002,19(S1):105-107.
- [7] 程永辉,程展林,张元斌.降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(S1):416-421.
- [8] 郑长安.多因素耦合的膨胀土边坡稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2014,11(1):82-86.
- [9] 张元斌.膨胀土边坡降雨入渗稳定性离心模型试验研究[D].广州:华南理工大学,2011:26-38.
- [10] 中国电力企业联合会.土工离心模型试验规程:DLT 5102—1999[S].北京:中国电力出版社,2000:1073.
- [11] Li Y X, Yang X L. Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2016,20(6):2289-2296.
- [12] 谭波.基于 ANSYS 的膨胀土路堑边坡的稳定分析[J].山西科技,2009(5):123-124.
- [13] 秦禄生,郑健龙.膨胀土路基边坡雨季失稳破坏机理的应力应变分析[J].中国公路学报,2001,14(1):25-30.
- [14] 路永珍.浅层非饱和膨胀土边坡在降雨作用下的滑移机理与生态抑制[D].成都:四川大学,2012:39-41.
- [15] 程展林,龚壁卫.膨胀土边坡[M].北京:科学出版社,2015:145-153.
- [16] 中华人民共和国交通运输部.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015:19.
- [17] Albrecht B, Benson C. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001,128(4):67.
- [18] 陈善雄,戴张俊,陆定杰,等.考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J].水利学报,2014,45(12):1442-1449.
- [19] 连继峰,罗强,蒋良淮,等.顺坡渗流条件下土质边坡浅层稳定分析[J].岩土工程学报,2015,37(8):1440-1448.
- [20] 吴礼舟,黄润秋.锚杆框架梁加固膨胀土边坡的数值模拟及优化[J].岩土力学,2006,27(4):605-608.
- [21] Clothier B E, Green S R, Deurer M. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis[J]. European Journal of Soil Science, 2008,59(1):2-13.
- [22] 张旭东.不同地下水位下考虑降雨和蒸发影响的膨胀土路堤稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):212-217.
- [23] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.