

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.014

水位骤降条件下强透水基础岸墙填土渗流分析

吴 博¹,赵坤朋¹,黄岳文²,刘华北¹

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院,湖北 武汉 430074;
2. 广州市水务工程建设管理中心,广东 广州 510640)

摘要: 根据强透水基础岸墙填土渗流的特点,基于饱和、非饱和土渗流理论,编写了水位骤降条件下的一维瞬态渗流差分程序,并用模型试验以及数值模拟验证了程序的可靠性。利用该程序研究了 3 个参数降水速度、渗透系数及土的饱和含水量对渗流过程中水压变化规律的影响。结果表明,降水速度及渗透系数对水位骤降过程水压的变化影响较大,土的饱和含水量则对此影响微弱。
关键词: 水位骤降;强透水基础;岸墙;瞬态渗流;差分程序;模型试验;数值模拟
中图分类号: TV131.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)01-0093-06

Seepage analysis in backfill behind quay wall on highly permeable foundation soil under rapid drawdown of water level

WU Bo¹, ZHAO Kunpeng¹, HUANG Yuewen², LIU Huabei¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Water Service Project Management Center of Guangzhou City, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In this study, according to the seepage characteristics of backfill behind a quay wall on the highly permeable foundation soil, a differential program for the one-dimension transient seepage was built based on the seepage theory of saturated and unsaturated soil under the condition of water-level rapid drawdown. The reliability of the program was verified by the model test and the numerical simulation. Then the program was used to study the influences of the drawdown speed, the permeability coefficient and the water content of saturated soil on the change of water pressure during the seepage. The results show that the drawdown speed and permeability coefficient have a great influence on the change of water pressure during the rapid drawdown of water level, while the water content of saturated soil has negligible influence.
Key words: rapid drawdown of water level; highly permeable foundation; quay wall; transient seepage; difference program; model test; numerical simulation

水利工程中的一些挡土墙在建造和使用期间常常会发生墙前水位骤降现象,这对挡土墙的稳定是不利的,但目前对于水位下降时挡土墙稳定性的研究还比较缺乏。挡土墙的稳定性与作用在挡土墙上的侧压力即土压力与水压力有关,目前水压力往往直接按静水压力处理,而土压力的研究也多基于饱和土和稳定渗流状况,对于非饱和土瞬态渗流的研究甚少^[1]。实际上墙前水位下降过程中墙前后水位降幅是不同的,此时作用在墙上的水压力计算应考虑到墙前、墙后水位差变化问题。

由于当前工程界缺乏简单合理的渗流分析工具,目前挡墙的稳定分析中,墙前水位骤降的条件下,往往对墙后填土的水位采取简化假定来进行稳定性校核,未合理考虑地基的透水性以及填土的渗流。如墙前水位采用设计(校核)洪水位、墙后水位采用平墙顶(或地下最高水位),或取墙前洪水位高度骤降到常水位、墙后水位高度取墙前洪水位下降高度的 60%^[2]。GB 50707—2011《河道整治设计规范》^[3]附录 B 建议挡墙稳定性计算时取水位骤降 1m、设计枯水位以及不利于中水位 3 种情况。SL 379—2007《水工挡土墙设计规

基金项目: 广州市水务科技项目(GZSWKJ2016-04)
作者简介: 吴博(1994—),男,硕士研究生,主要从事挡土墙稳定性研究。E-mail:752999413@qq.com
通信作者: 刘华北,教授。E-mail:hbliu@hust.edu.cn
引用本文: 吴博,赵坤朋,黄岳文,等. 水位骤降条件下强透水基础岸墙填土渗流分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):93-98.
WU Bo, ZHAO Kunpeng, HUANG Yuewen, et al. Seepage analysis in backfill behind quay wall on highly permeable foundation soil under rapid drawdown of water level[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):93-98.

范》^[4]5.2.5 条指出,当挡土墙修建于潮汐河道上时,最不利条件的墙前、墙后水位差取相应最大潮差值的 1/3 ~ 1/2 较为合适;对于在水库或者退水较快的行洪道上的挡土墙,在考虑墙前水位骤降的情况下,挡土墙稳定性的最不利水深取墙前、墙后最大水位差的 0.5 倍;当挡土墙修建于无潮汐影响河道上时,挡土墙在正常运营期间受降雨以及渗流滞后的影响,其墙前、墙后水位差的取值为 0.5 ~ 1 m。欧美相关规范^[5-6]同样对墙后设计水头的规定比较模糊,只是建议根据排水和墙后填土的情况具体问题具体分析。例如,美国桥梁设计规范^[7]中没有明确规定挡土墙后的设计水位,仅提出必须予以考虑。

有限差分法是计算机数值模拟最早采用的方法,至今仍被广泛运用。夏元友等^[8]用有限差分法软件建立了二维边坡非饱和渗流稳定性分析模型,并将该模型用于考虑降雨入渗影响的边坡稳定性计算。蒋中明等^[9]编写了降雨入渗及停雨出渗时的三维边坡边界函数,对基于有限差分法的软件进行了非饱和渗流分析的功能完善,实现了降雨条件下三维边坡非饱和渗流模型的模拟。An 等^[10]利用坐标变换方法建立了一个多轴的有限差分模型来模拟饱和-非饱和渗流,该模型可以处理非正交网格,可用于分析几何形状复杂及各向异性的渗流模型。

对于水利工程常用的岸墙结构,为了保持在水位骤降条件下良好的透水性,往往在岸墙基础设置一定厚度的强透水层。墙前水位骤降时,由于强透水基础的作用,岸墙墙后填土底部的水头与墙前水头差别很小。本研究根据强透水基础岸墙的这一特点,利用一维的渗流微分控制方程建立非饱和土渗流的数学模型,通过有限差分法编写 MATLAB 程序对水位骤降条件下非饱和土的渗流进行研究,并与模型试验和数值模拟的方法所得结果进行对比,验证程序计算结果的可靠性。同时利用所编写的 MATLAB 程序分析模型参数对非饱和土渗流的影响程度,以便更好地分析非饱和土水位骤降过程中孔隙水压力分布的规律。

为了减小墙前后的水位差,通常还在挡土墙上布设排水孔来增加抗渗稳定性和降低墙后水位,进而起到减少静水压力的作用,保障挡土墙抗滑稳定^[11]。由于本文研究中采用的强透水基础已经有较好的排水效果,故不再考虑排水孔的布设。

1 一维瞬态渗流方程差分形式

取单元土体,对于一维渗流情况考虑单位时间内流入和流出微元体的水量差应满足水流连续方程,即

$$\frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{1}$$

式中: v_y —— y 方向的渗流速度; θ ——单位体积含水量; t ——时间。

由达西定律 $v_y = k_y i = k_y \frac{\partial H}{\partial y}$ 可得

$$\frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \tag{2}$$

式中: k_y —— y 方向的渗透系数; H ——总水头。

单位体积含水量随时间变化可用下式表示:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} = m_w \frac{\rho_w g \partial (H - y)}{\partial t} \tag{3}$$

式中: u_w ——水压力; ρ_w ——水的密度; g ——重力加速度。

达西定律最初是由饱和土得来,但之后的研究证明其也能应用于非饱和土渗流^[12-13]。唯一的区别在于非饱和土的渗透系数不再是常数,而是随含水量的变化而变化。储水曲线斜率 m_w 的值同样是随含水量的变化而变化。下文中差分程序计算所用到的渗透系数 k_y 以及储水曲线斜率 m_w 随含水量变化的关系式均由 SEEP/W 软件^[14]中的样本函数获得。

将式(2)(3)代入式(1),由于高程 y 对时间导数为 0,可得一维瞬态渗流控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = m_w \rho_w g \frac{\partial H}{\partial t} \tag{4}$$

对于水位骤降下的一维渗流,边界条件如下:

$$H(y, 0) = H_0 \tag{5}$$

$$H(0,t)=H_0-vt$$

(6)

式中: H_0 ——墙前初始水位; v ——水位下降速度。

将一维长度 n 等分,结点编号 $i=0,1,2,\cdots,n$;时间步长取 Δt ,结点编号 $j=0,1,2,\cdots,t/\Delta t$ 。可将控制方程写成差分格式如下,其中 $k_{i+\frac{1}{2}}^j=(k_{i+1}^j+k_i^j)/2$ 。

$$\frac{k_{i+\frac{1}{2}}^j(H_{i+1}^{j+1}-H_i^{j+1})-k_{i-\frac{1}{2}}^j(H_i^{j+1}-H_{i-1}^{j+1})}{\Delta y^2}=\rho_w g \frac{m_{wi}^j(H_i^{j+1}-H_i^j)}{\Delta t}$$

(7)

边界条件可写为

$$H_i^0=H_0$$

(8)

$$H_0^j=H_0-vj$$

(9)

令 $a=\Delta t/(\rho_w g \Delta y^2)$,式(5)可写为

$$-ak_{i-\frac{1}{2}}^jH_{i-1}^{j+1}+\left[a\left(k_{i-\frac{1}{2}}^j+k_{i+\frac{1}{2}}^j\right)+m_{wi}^j\right]H_i^{j+1}-ak_{i+\frac{1}{2}}^jH_{i+1}^{j+1}=m_{wi}^jH_i^j$$

(10)

2 差分程序验证

根据以上方程编写 MATLAB 差分程序,程序流程如图 1 所示。为确保所编写的 MATLAB 差分程序计算结果的可靠性,利用 SEEP/W 数值模拟软件以及模型试验对程序计算结果进行标定,为后文研究提供分析依据。

2.1 数值模拟简介

本研究中数值模拟用 GeoStudio 系列软件中的 SEEP/W 软件完成。SEEP/W 软件是一款能够全面处理非饱和土体渗流问题的有限元分析软件,具有强大的渗流分析功能,被广泛用于岩土工程相关的渗流问题分析^[14-15]。

2.2 模型试验简介^[16]

模型试验在自制的大型模型箱内进行,模型箱宽 1 m,高 2.1 m,墙前蓄水空间长 0.9 m,墙后填土空间长 2.1 m。试验填土高度为 2 m,并在挡墙前后铺有 20 cm 厚碎石,剖面图如图 2 所示。试验用土采用分层填充、分层击实的方法填入,并每隔 0.2 m 采用环刀法进行密实度检测,保证填入土体的均匀性。

试验用土为中砂,其物理参数依据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[17]室内试验测得,其湿密度为 1.72 g/cm³,平均含水率为 2.79%,最大、最小干密度分别为 1.89 g/cm³、1.45 g/cm³,中砂及铺设的碎石饱和和渗透系数分别为 3.8×10⁻⁵ m/s、0.005 m/s。

填土过程中在填土纵轴面处预埋振弦式通气型渗压计,用于测量墙前水位骤降过程中墙后填土的水压力变化,渗压计分 3 层埋设。

2.3 一维渗流模型验证

利用 SEEP/W 软件建立一维渗流模型,模型为高 2 m 砂层,砂土各参数取值同上,各点初始总水头均为 2 m,底部边界总水头以 1 m/h 的速度降低。用上述 MATLAB 差分程序计算该模型,得到不同水位时压力水头与高程的关系,并将结果与 SEEP/W 计算结果进行对比,如图 3 所示。

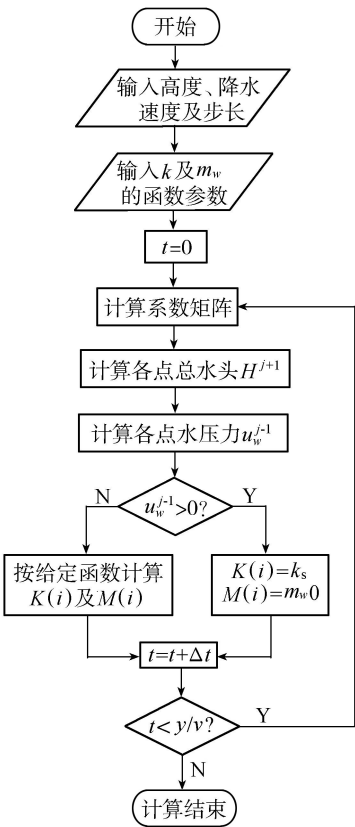


图 1 程序流程

Fig. 1 Flow chart of program

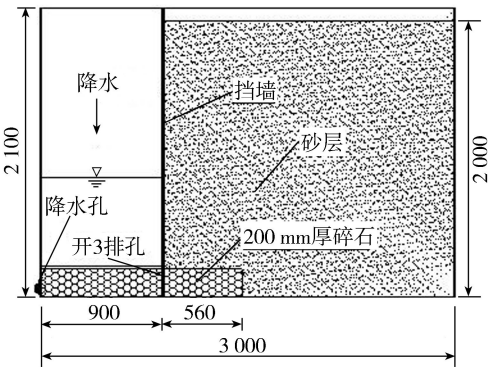


图 2 试验模型剖面图(单位:mm)

Fig. 2 Cross illustration of model tests (units: mm)

2.4 强透水基础二维渗流模型验证

以 0.5 m/h 降水速度进行模型试验,用渗压计测得降水过程中各测点的水压变化。同时利用 SEEP/W 软件模拟试验模型如图 4 所示,模型尺寸、各材料参数和边界条件与模型试验一致,网格尺寸为 0.05 m。图中 A1~A3、B1~B4、C1~C4 表示试验模型中 3 层渗压计埋设的位置。DE、EF 代表模型不透水边界条件,DG 代表模型初始水头边界,GH 代表墙前水位下降初始高度。将模型试验、数值模拟以及 MATLAB 程序求解得到的结果进行分析比较,如图 5 所示。

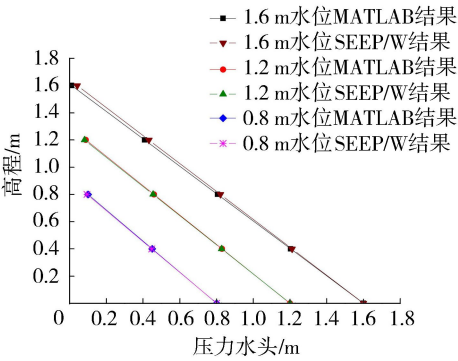


图 3 一维模型压力水头与高程的关系

Fig.3 Relationship between pressure head and elevation of one-dimensional model

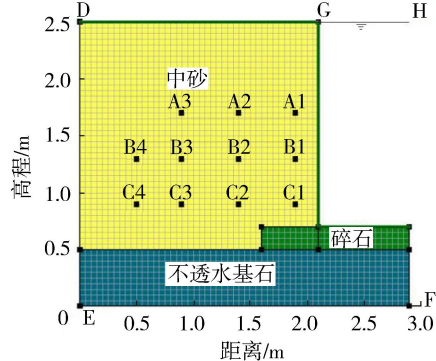


图 4 数值模型

Fig.4 Numerical model

从图 5 可以得出: MATLAB 计算的压力水头与数值模拟和模型试验得到的压力水头基本吻合,因此对于强透水基础的二维渗流模型,可将其简化成一维模型计算,用本研究所编写的程序能对其进行分析。

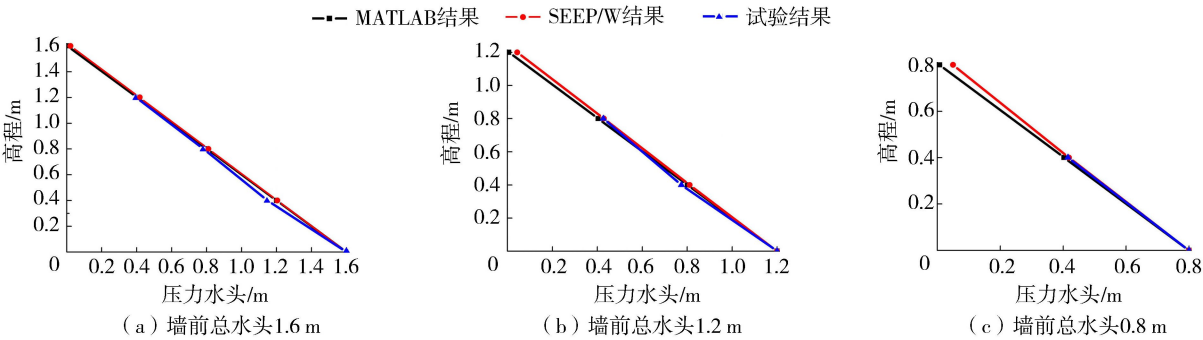


图 5 二维模型压力水头与高程的关系

Fig.5 Relationship between pressure head and elevation of two-dimensional model

3 不同参数对渗流的影响

基于以上研究,利用 MATLAB 程序研究降水速度、渗透系数以及土的饱和含水量对水位骤降条件下渗流的影响。本节建立的 MATLAB 计算基本模型为高 6 m 粉土,渗透系数为 10^{-7} m/s,土的饱和含水量为 $0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$,各点初始水头均为 6 m,底边总水头以 1 m/h 速度减小。

3.1 降水速度对渗流的影响

在基本模型的基础上,分别取降水速度为 0.5 m/h、1 m/h、1.5 m/h、2 m/h 进行计算,将不同降水速度结果进行对比,如图 6 所示。

3.2 渗透系数对渗流的影响

在基本模型的基础上,改变土的渗透系数进行计算,共取了 6 种不同渗透系数 k ,将各组结果进行对比,如图 7 所示。

各类土体渗透系数 k 的量级如下:砾石、粗砂为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ m/s,中砂为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m/s,细砂、粉砂为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/s,粉土为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ m/s,粉质黏土为 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s,黏土为 $10^{-12} \sim 10^{-9}$ m/s^[18]。可以看到本研究中

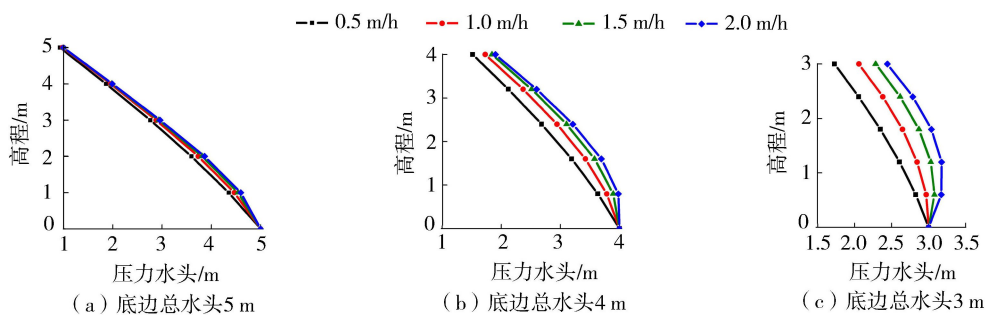


图 6 不同降水速度下压力水头与高程的关系

Fig. 6 Relationship between pressure head and elevation with different drawdown speeds

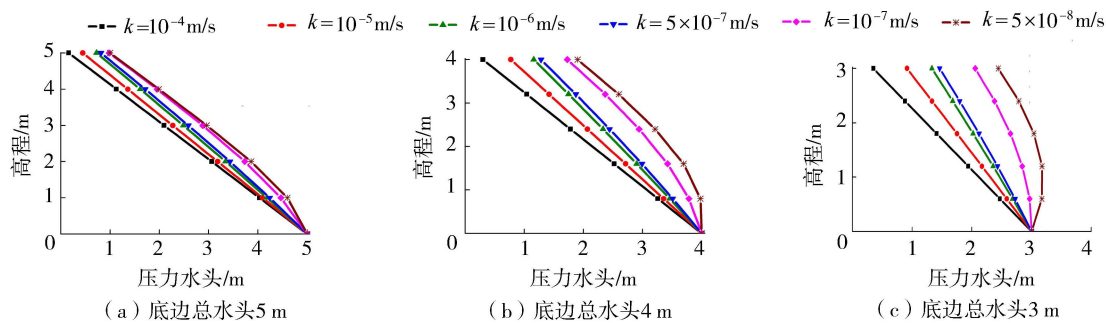


图 7 不同渗透系数下压力水头与高程的关系

Fig. 7 Relationship between pressure head and elevation with different permeability coefficients

讨论的渗透系数范围包含了除渗透性较低的黏土外的各类土体,根据图 7 可以判断各类土体在水位骤降过程中压力水头的变化规律。

3.3 饱和含水量对渗流影响分析

在基本模型的基础上,计算中分别取土的饱和含水量为 $0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.4\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.5\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.6\text{ m}^3/\text{m}^3$,对比不同饱和含水量的计算结果,如图 8 所示。

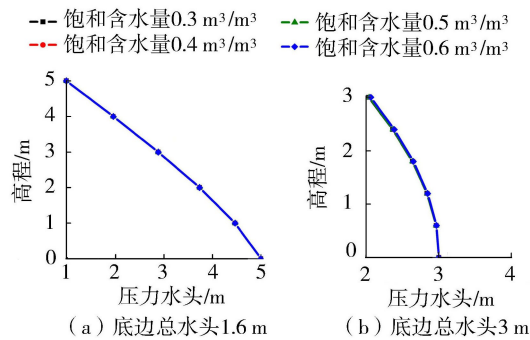


图 8 不同饱和含水量下压力水头与高程的关系

Fig. 8 Relationship between pressure head and elevation with different water content of saturated soil

从以上结果可以看出,降水速度和渗透系数均对降水过程中水压变化有较大影响,不同降水速度和渗透系数得到的压力水头曲线有明显差异,而不同土的饱和含水量得到的压力水头曲线几乎重合,说明其对水位骤降条件下的渗流过程影响不大。

4 结 论

a. MATLAB 计算结果与一维渗流数值模拟结果对比得出,MATLAB 程序可以准确地计算一维渗流模型水位骤降过程中的水压力变化,为水位骤降条件下强透水基础岸墙填土渗流分析提供了分析方法。

b. MATLAB 计算结果与模型试验和二维渗流数值模拟结果对比得出,对于强透水基础的挡土墙水位骤降情况,可将二维渗流模型近似看作一维渗流模型计算,用本文编写的程序仍能计算得到较精确的结果。

c. 在文中研究范围内,土的渗透性对水压力变化的影响较降水速度大,而土的饱和含水量对水压变化几乎无影响。

参考文献:

[1] LU Ning,WILLIAM J L. 非饱和土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2012.

[2] 何善国. 墙前水位骤降挡土墙稳定不利水深取值问题分析研究[J]. 红水河,2012,31(2):34-41. (HE Shanguo. Study on water depth determination for the stability of retaining wall[J]. Hongshui River,2012,31(2):34-41. (in Chinese))

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河道整治设计规范:GB 50707—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

[4] 中华人民共和国水利部. 水工挡土墙设计规范:SL379—2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[5] BSI. BS EN 1997-1; 2004; Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules[S]. London:BSI,2004.

[6] BSI. BS 6349-1;2000. Maritime structures. Part 1: Code of practice for general criteria[S]. London:BSI,2000.

[7] AASHTO. LRFD bridge design specifications, 6th Ed[S]. Washington D. C. 2012.

[8] 夏元友,张亮亮. 考虑降雨入渗影响的边坡稳定性数值分析[J]. 公路交通科技, 2009,26(10):28-32. (XIA Yuanyou, ZHANG Liangliang. Numerical analysis on highway slope stability considering rainfall infiltration[J]. Journal of highway and transportation research and developmen,2009, 26(10):28-32. (in Chinese))

[9] 蒋中明,熊小虎,曾铃. 基于 FLAC3D 平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014,35(3):855-860. (JIANG Zhongming, XIONG Xiaohu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(3):855-860. (in Chinese))

[10] AN H, ICHIKAWA Y, TACHIKAWA Y, et al. Three-dimensional finite difference saturated-unsaturated flow modeling with nonorthogonal grids using a coordinate transformation method[J]. Water Resources Research, 2010, 46(11):2387-2392.

[11] 陈琪. 排水设施在挡土墙中的应用[J]. 城市建设理论研究, 2017(21):193. (CHEN Qi. Application of drainage facilities in retaining wall[J]. Theoretical Research in Urban Construction,2017(21):193. (in Chinese))

[12] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.

[13] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE N. The permeability of porous materials[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201(1066): 392-405.

[14] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 中仿科技公司,译. 北京:冶金工业出版社,2011.

[15] 陈晓伟,雷鹏,杨晓雅. 基于 Geo-Studio 的堤防渗流与稳定分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015,12(1):63-68. (CHEN Xiaowei, LEI Peng, YANG Xiaoya. Seepage and stability analysis of dike based on Geo-Studio[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science),2015, 12(1):63-68. (in Chinese))

[16] 赵坤朋. 强透水基础岸墙稳定与墙前水位骤降关系研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[17] 国家质量技术监督局. 土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S]. 北京:中国计划出版社,2015.

[18] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

(收稿日期:2020 - 01 - 04 编辑:张志琴)