

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.009

船闸闸室灌泄水过程非稳定渗流特性

何良德,王晨晨,张成君,王新宇

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究船闸闸室在非均质成层地基、灌泄水条件下的非稳定渗流特性,根据渗流基本理论,将渗流分为固结渗流与瞬时稳定渗流。以工程实例为依托,利用有限元软件 ABAQUS 建立二维渗流模型,模拟船闸灌泄水过程,考虑流固耦合,分析非稳定渗流特性及影响。结果表明,随着灌泄水的周期性变化,测压管水位存在周期性、衰减性与滞后性;在灌泄水过程中,存在泄水、灌水速度零点;泄水末期,非稳定渗流计算的渗透应力沿高程均大于低水稳定渗流计算值,渗透稳定系数降低,发生渗透破坏的可能性加大。因此,在船闸防渗设计中应充分考虑非稳定渗流场的影响。

关键词: 船闸;灌泄水;非稳定渗流;周期性;滞后性;流速零点;渗透稳定

中图分类号: TV135.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)03-0246-07

Characteristic analysis of unsteady seepage in the filling and emptying process of lock chamber

HE Liangde, WANG Chenchen, ZHANG Chengjun, WANG Xinyu

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the characteristics of unsteady seepage in the filling and emptying process of lock chamber with a non-homogeneous layered ground, according to the theory of basis seepage flow, this study divides the seepage into the consolidation seepage and the instantaneous steady seepage. Based on the finite element software ABAQUS, the two-dimensional seepage model has been built according to a project example, in order to simulate the filling/emptying process of lock chamber considering fluid-solid coupling and analyze the characteristics and effect of unsteady seepage. The result shows that, with the cyclical variations of filling and emptying, the piezometric level has three characteristics: cyclicity, decay and hysteresis. In the filling and emptying process, zero velocity points exist. In addition, in the end of emptying process, the infiltration stress of unsteady seepage is greater than that of steady seepage with a low water level, the stability coefficient decreases and the possibility of seepage failure grows. Therefore, the influence of unsteady seepage field should be taken into account in the anti-seepage design of ship lock.

Key words: ship lock; filling and emptying; unsteady seepage; cyclicity; hysteresis; zero velocity point; seepage stability

渗流问题是岩土工程中一个重要的课题^[1]。在河水位升降、库水位涨落、洪峰、潮汐、闸室灌泄水等过程中都存在非稳定渗流影响岸坡、堤防、土坝、闸基稳定性的问题^[2-6]。河水位、库水位变化速度一般为 m/d 量级,洪峰、潮汐水位变化速度可达 m/h 量级,而船闸灌水或泄水时,闸室内水位升降速度可高达 m/min 量级,闸底透水边界的水压变化远比闸基内渗透压力的改变要快得多^[7]。尤其是泄水时,出口段渗流在泄水

作者简介: 何良德(1964—),男,副教授,主要从事港航结构工程及基础工程研究。E-mail: hldhsy@163.com

引用本文: 何良德,王晨晨,张成君,等. 船闸闸室灌泄水过程非稳定渗流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):246-252.

HE Liangde, WANG Chenchen, ZHANG Chengjun, et al. Characteristic analysis of unsteady seepage in the filling and emptying process of lock chamber[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(3): 246-252.

完成瞬间将会产生较大逸出坡降,此时闸室地基容易发生失稳^[6]。

目前,闸室渗流分析通常采用稳定渗流场^[8-9]的计算方法,对船闸灌泄水时非稳定渗流的特性与影响研究比较少。本文依托具体工程案例对船闸灌泄水过程进行数值模拟,研究船闸闸室灌泄水过程非稳定渗流的特性,并进行非稳定渗流影响分析,判别不同情况下闸室地基发生失稳的可能性,为船闸防渗工程的设计提供理论依据。

1 渗流基本理论

对于均质各向同性材料,由质量守恒原理可得水量连续方程^[10]:

$$\frac{k}{\rho_w g} \nabla^2 u = [n\beta_w + (1 - n)\beta_s] \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \tag{1}$$

式中: k ——渗透系数,m/s; ρ_w ——水的密度,kg/m³; u ——孔隙水压力,Pa; ∇^2 ——拉普拉斯算子; n ——土体孔隙率; β_w ——水的压缩性,1/Pa; β_s ——土颗粒的压缩性,1/Pa; ε_v ——土体有效应力引起孔隙压缩而产生的体积应变。

当假设土体为弹性材料时,由物理方程把体积应变用有效应力表示出来:

$$\varepsilon_v = \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{1 + (m - 2)\nu} \frac{\theta'}{E_s} \tag{2}$$

其中 $\theta' = \theta - mu$

式中: E_s ——土体变形模量,Pa; ν ——泊松比; m ——所研究问题的维数; θ' ——法向有效应力之和,Pa; θ ——法向总应力之和,Pa。

水和土颗粒的压缩性远小于孔隙压缩性,可以只考虑式(1)的第二项。将式(2)代入式(1)得

$$\frac{k}{\rho_w g} \nabla^2 u = - \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{[1 + (m - 2)\nu]E_s} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} - m \frac{\partial u}{\partial t} \right) \tag{3}$$

一般情况下,总应力和 θ 是随时间变化的,需要将水量连续方程与土体力平衡方程联立求解,可得以位移、孔压表达的比奥固结方程:

$$\begin{cases} -\partial^T D \partial w + \partial^T M u = f \\ \frac{\partial}{\partial t} M^T \partial w - \frac{k}{\rho_w g} \nabla^2 u = 0 \end{cases} \tag{4}$$

其中 $w = [w_x, w_y, w_z]^T$

式中: ∂ ——偏微分算子; w ——位移分量; D ——弹塑性矩阵; M ——单位矩阵; f ——外荷载列阵。

当假设总应力和 θ 不随时间变化时,可以将应变或应力项从水量连续方程中消除,并用水头 h 简化表达为常见的非稳定渗流基本方程:

$$\nabla^2 h = \frac{1}{C_v} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \tag{5}$$

其中 $C_v = \frac{E_s k [1 + (m - 2)\nu]}{m \rho_w g (1 - 2\nu)(1 + \nu)}$ $S_s = \frac{k}{C_v}$

式中: h ——测压管水位,m; C_v ——固结系数,m²/s; S_s ——储水系数,1/m,即单位体积的饱和土体内,当下降 1 个单位水头时,由于土体压缩所释放的储存水量。

若土体不变形,单位贮存量为零,式(5)可化为稳定渗流基本方程式(6)。此时,测压管水头的时变规律,仅受边界条件的影响,是一种瞬时稳定的渗流^[11-12]。

$$\nabla^2 h = 0 \tag{6}$$

对于土体而言,渗流场与应力场、位移(应变)场是相互影响和相互制约的,这种关系称为耦合^[13]。渗透力使得土体的应力、应变场发生改变,产生与渗透性有关的变形;应力、应变场的改变又会影响土体的孔隙比,使得渗透系数发生变化,从而影响渗流场。

渗流基本方程式(5)只含有测压管水头 h ,无须和位移项联立求解,通过固结系数 C_v 或储水系数 S_s 间接反映流固耦合。比奥固结方程式(4)更真实地反映了孔隙水压力与土体位移场以及应变场、应力场的相

互影响,可以真实反映流固耦合。据此,可将渗流分为固结渗流与瞬时稳定渗流,前者是由土体产生变形、水量释放而产生的渗流,其测压管水头或孔压消散过程决定了土体的固结过程,而后者仅随边界压力变化而瞬时变化,不受固结变形影响^[12]。

有限元软件 ABAQUS 中,流固耦合问题的控制方程组由应力场平衡方程与渗流场连续方程组成^[14],可以真实反映流固耦合。

2 有限元模型建立

2.1 模型概况

京杭运河苏北段某船闸工程闸室有效尺度为 260 m×23 m×5.0 m(闸室长×口门宽×最小槛上水深)。闸室为分离式结构,采用板桩式闸墙、透水底板,下设由 0.35 m 灌砌块石、0.25 m 碎石和 0.20 m 中粗砂组成的反滤层。闸室顶高程为 12.30 m,底高程为 1.23 m。墙后布置排水管网,中心高程为 6.80 m。钢板桩长 18.30 m,底高程为-6.00 m,厚 0.45 m。地质资料显示,闸室所在地层由上至下主要为①亚黏土混粉砂;②灰黄色黏土、亚黏土;③亚黏土混粉砂;④黏土、亚黏土;⑤亚黏土混粉砂;⑥粉砂混粉性土^[15]。船闸横断面如图 1 所示。

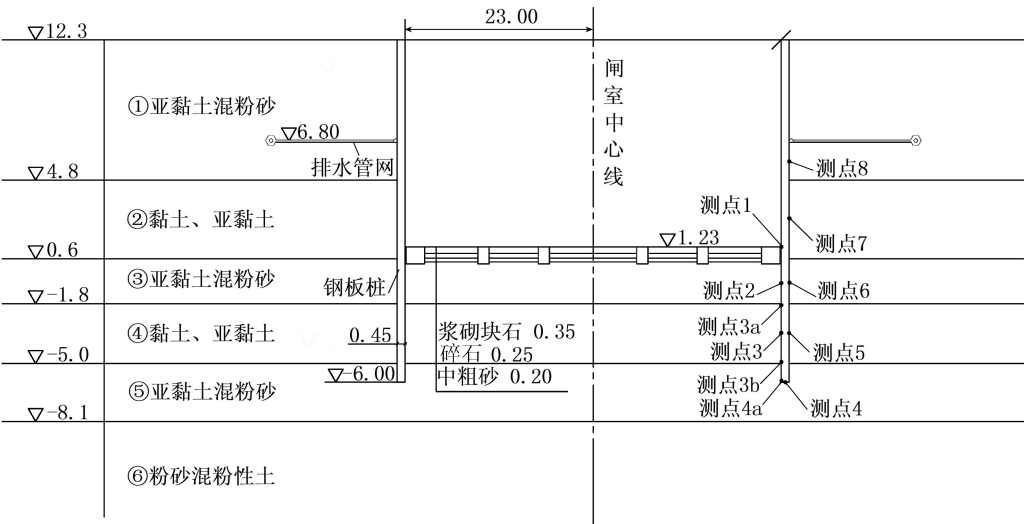


图 1 船闸横断面(单位:m)
Fig.1 Sketch map of the cross section of ship lock(units:m)

以该工程实例为依托,利用 ABAQUS 建立闸室二维有限元模型。因闸室结构具有对称性,故取一半闸室建立模型,考虑流固耦合作用。闸底高程 1.23 m、墙后水位高程 6.80 m 为透水边界,模型底部及两侧均被默认为不透水边界。模型底高程取为-60.0 m。为了减小边界条件对渗流场计算的影响,墙后回填土向外延伸 500 m,使外侧边界渗流速度为桩侧附近渗流速度的 1/100,且不透水边界的水压分布近似呈静水压力分布(相当于透水边界)。采用平面 4 结点四边形孔压单元对模型进行网格划分。

2.2 土层参数

计算近似认为各种材料各向同性,渗透系数及变形模量取值如表 1 所示。

表 1 主要材料的渗透系数与变形模量

Table 1 Permeability coefficient and deformation modulus of primary materials						
地层	材料描述	高程 z/m	层厚/m	渗透系数/(m·s ⁻¹)	变形模量/MPa	干密度/(kg·m ⁻³)
①	亚黏土混粉砂	4.8<z≤12.3	7.5	7.66×10 ⁻⁶	6.8	1420
②	黏土、亚黏土	0.6<z≤4.8	4.2	9.03×10 ⁻⁷	12.8	1670
③	亚黏土混粉砂	-1.8<z≤0.6	2.4	3.94×10 ⁻⁵	16.0	1610
④	黏土、亚黏土	-5<z≤-1.8	3.2	9.03×10 ⁻⁷	14.5	1700
⑤	亚黏土混粉砂	-8.1<z≤-5	3.1	4.20×10 ⁻⁶	12.4	1670
⑥	粉砂混粉性土	z≤-8.1		4.77×10 ⁻⁵	26.3	1710
透水底板	带通水孔混凝土、碎石、中粗砂	0.4≤z≤1.2	0.8	4.00×10 ⁻⁴	80.0	2030

2.3 网格划分

在考虑流固耦合的瞬态分析中,若时间步长过小,则会造成孔压的不正常波动,使得模拟失真或收敛困难。针对达西渗流,假设土颗粒不可压缩,ABAQUS 给出了稳定时间步长临界值为^[16]

$$\Delta t > \frac{\rho_w g}{6E_s k} (\Delta l)^2$$

(7)

式中: Δt ——时间增量步长,s; Δl ——典型单元尺寸,m。

为了便于网格划分,将典型单元尺寸统一取为 0.2 m。根据式(7),将最小时间步长取为 10 s。因竖直方向为渗流主要方向,为了减少网格数量,提高计算效率,可以在水平方向对单元尺寸适当加大。部分区域网格剖分如图 2 所示。

2.4 边界条件与初始条件

该闸上游最高通航水位 10.80 m,下游最低通航水位近期 5.23 m、远期 6.80 m,最大水头差 5.57 m,采用集中输水系统。设定阀门开启时间 500 s,输水时间 600 s。当忽略输水系统惯性水头影响时,可计算得输水系统水头差与时间关系曲线^[17]。船舶双向过闸时间 80 min,灌、泄水间隔时间 30 min,灌水时闸室水位为上游水位与水头差之差,泄水时闸室水位为下游水位与水头差之和,从而得到闸室水位与时间关系曲线,作为透水闸底的边界条件。闸室水位升降速度在灌泄水时最大 0.97 m/min,平均 0.56 m/min,半周期 40 min 内平均速度 0.14 m/min。墙后水位 6.80 m 保持不变,闸墙横向渗流水头差等于墙后水位与墙前水位之差,变化范围为-4.00 ~ +1.57 m,平均水头差-1.22 m。

本文采用线弹性材料模型,流固耦合分析满足线性叠加原理,可将渗流水头差分解为平均水头差-1.22 m 和周期 80 min、振幅 2.79 m 的水头差两部分来分析。为了重点研究闸室水位周期性变化作用下的非稳定渗流特性,以平均水头差-1.22 m、相应闸室水位 8.02 m 为初始边界条件进行地应力平衡($t < 0$),得到初始应力场和渗流场。

3 非稳定渗流特性

板桩闸墙的轮廓线是整个渗流场中的最短的渗流路径,在闸室渗流场中最具有代表性,为了表达方便,沿着桩周从闸底开始向下,绕过桩底到墙后水位的路径,简称为桩周路径。沿桩周路径在渗流边界、土层中点布置监测点,依次为测点 1,2,⋯,8,在土层④顶部、底部布置测点 3a、3b,在闸内侧桩底布置测点 4a,具体分布见图 1。

3.1 周期性与准稳态

测点 1、2、3、4 测压管水位时间曲线,如图 3 所示。边界测点 1 的测压管水位等于闸室水位,测点 5~8 水位均值在 7.0~6.8 m 且振幅极小,未示出。从图 3 中可以看出,测压管水位呈现周期性变化。在第 1 次泄水时,初始平衡场对测压管水位变化有一定的影响,但由于平均水头差较小,经过第 1 个循环周期以后,各测压管水位均值、振幅的大小及其分布基本不变,达到一种准稳态,如图 4 所示。其中,“沿程距离”指沿桩周由内侧到外侧,从测点 1 到墙后排水管的距离,总长 20.48 m。

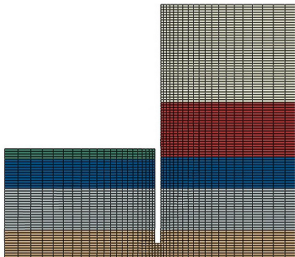


图2 部分区域网格剖分
Fig.2 Mesh of the partial region

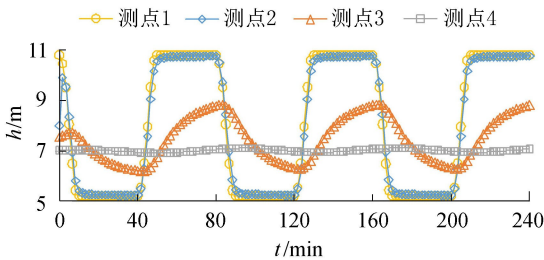


图3 测压管水位-时间曲线

Fig.3 Relationship between piezometric level and time

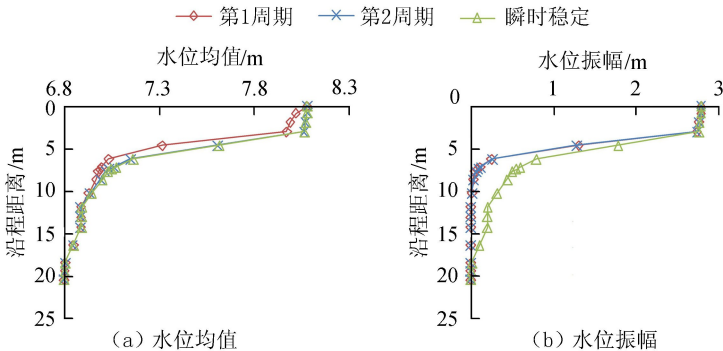


图4 测压管水位均值及振幅沿程分布

Fig.4 Distribution of mean value and amplitude of piezometric level on the way

3.2 衰减性与滞后性

从图4可以看出,测压管水位均值、振幅均沿桩周路径减小。由于受闸室宽度的影响,闸内侧阻力系数大,闸外侧阻力系数小,因此桩前段(测点1~4)水位降低率明显大于桩后段(测点4~8)。流固耦合对测压管水位的均值影响不大,但由于储水系数 S_s 的影响,使得非稳定渗流的振幅小于瞬时稳定渗流的振幅,测点3的差异最大。

瞬时稳定渗流场的测压管水位变化与闸底水位变化完全同步。对非稳定渗流而言,当闸室水位到达最高或最低时,各测压管水位并未达到对应的峰值,存在滞后现象,如图5所示。距离闸底渗流路径越远、土层渗透系数 k 越小、储水系数 S_s 越大,滞后时间越长。测点2土层③为亚黏土混粉砂层,渗透系数较大,渗透压力改变快,滞后较少,几乎和测点1同步;测点3滞后3.3 min,逐渐增大到测点6的61.7 min,而后基本不变。

3.3 渗流速度零点

图6为非稳定渗流在不同时刻的等势线分布。随着泄水开始闸室水位下降,由于测压管水位的滞后性,使得闸基内出现水位极大值,在桩周路径上该点的前段向闸底渗出,后段向墙后渗入。泄水引起的渗流速度零点,沿着桩周路径不断深入,水位极值也逐渐变小,移动速度在泄水期较快,低水平稳期减慢。灌水开始后,闸室水位升高向闸底内渗入,出现灌水速度零点,其移动速度较快,最后与逐渐减慢乃至回头移动的泄水零点会合,灌水结束后8.3 min 零点消失,直到下次泄水开始前,保持为单向向后的渗流状态。流速零点沿着板桩轮廓线的移动轨迹见图7。

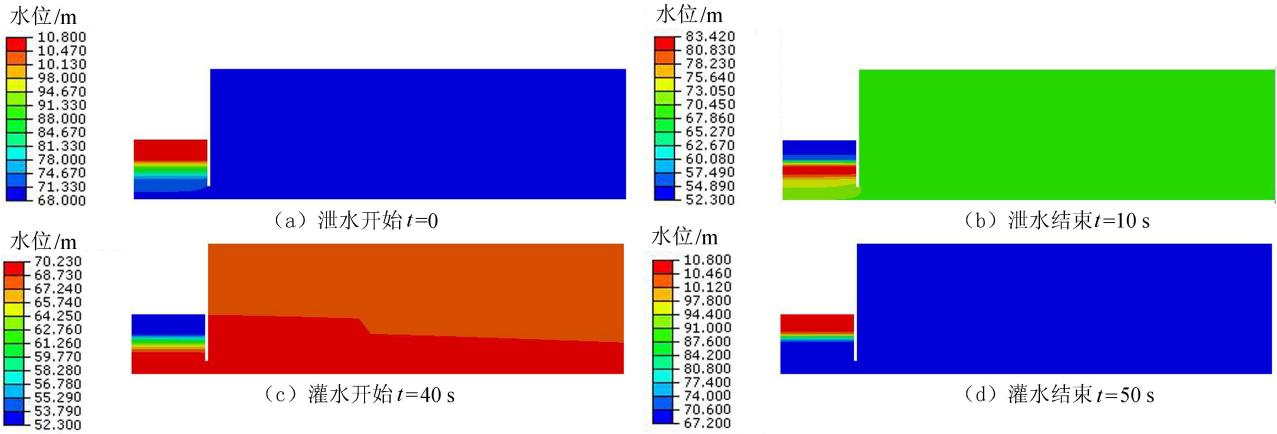


图6 不同时刻等势线分布
Fig.6 Distribution of equipotential lines at different moments

4 非稳定渗流的影响

闸室出口段坡降时间变化如图8所示(竖直向上为正,向下为负)。测点3的黏土、亚黏土层④与其上下的亚黏土混粉砂层③⑤,渗透系数差异大,水头损失集中。对于均质地基,土层顶部坡降最大,对于非均质成层地基,黏性土层水头损失大,顶部坡降大。本例中,由于上部土层透水性好,土层④顶部测点3a坡降明显大于其他测点,且在泄水或灌水末期出现较大峰值。

地基土内产生渗透变形,主要有逸出处的流土和砂性土内部管涌两种^[18]。由于闸底设有反滤层,并且地基内有2层黏土、亚黏土间隔,故可认为不会发生管涌。出口处是否发生流

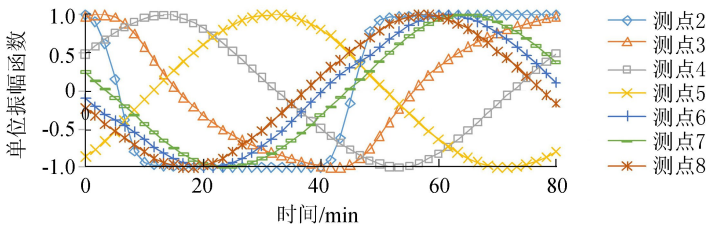


图5 测压管水位的滞后现象
Fig.5 Hysteresis of the piezometric level

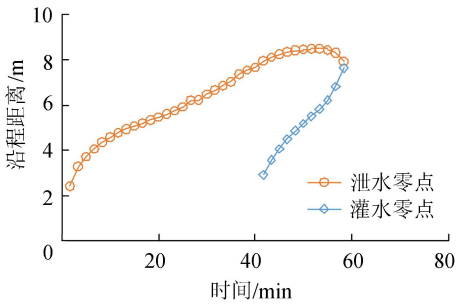


图7 流速零点移动轨迹
Fig.7 Motion track of zero velocity point

土,可以根据出口段某深度内土体向上渗流应力与土体有效重力的相对大小来判断^[19]。

$$\sigma_{s,j} = \sum_{i=1}^j \rho_w g J_i \Delta z_i$$

(8)

$$\sigma_{z,j} = \sum_{i=1}^j \rho'_i g \Delta z_i$$

(9)

$$K = \frac{\sigma_{z,j}}{\sigma_{s,j}} \geq K_{容许}$$

(10)

式中: $\sigma_{s,j}$ 、 $\sigma_{z,j}$ ——出口段第 j 层以上土层的渗透应力、自重应力(有效); J_i 、 ρ'_i 、 Δz_i ——第 i 层土渗透坡降、浮密度、厚度; K ——渗透稳定系数; $K_{容许}$ ——容许渗透稳定系数, $K_{容许}=1.5 \sim 2.0$ 。

透水底板的反滤层及土层相关参数见表 2,泄水末期出口段各土层渗透坡降、渗透应力与有效自重应力,沿深度分布如图 9 所示。

非稳定渗流验算时,泄水末期最小渗透稳定系数 $K=1.52$,位于黏土层顶部以下 1.0 m 处。用闸室低水位进行稳定渗流验算时,最小渗透稳定系数 $K=5.97$,位于黏土层底部。非稳定渗流计算的渗透应力沿高程均大于低水稳定渗流计算值,可见闸室灌泄水过程中非稳定渗流将使得渗透稳定系数降低。因此,在闸室防渗设计中应充分考虑非稳定渗流场的影响。

5 结 论

- a. 渗流基本方程式间接反映流固耦合,比奥固结方程式真实反映流固耦合。有限元软件 ABAQUS 可以较好地反映流固耦合。
- b. 随着灌泄水的周期性变化,测压管水位呈现周期性变化,继而达到一种准稳态。此外,测压管水位还存在衰减性与滞后性,即测压管水位均值、振幅均沿程减小,且当闸室水位到达最高或最低时,各测压管水位并未达到对应的峰值,存在滞后现象。
- c. 泄水时,由于测压管水位的滞后性,出现泄水速度零点,沿着桩周路径不断深入,移动速度在泄水期较快,低水平稳期减慢;灌水时,出现灌水速度零点,移动速度较快,而后与泄水零点汇合、消失。
- d. 黏性土层水头损失大,顶部坡降大,且在泄水或灌水末期出现较大峰值。泄水末期,非稳定渗流计算的渗透应力沿高程均大于低水稳定渗流计算值,渗透稳定系数降低。因此,在闸室防渗设计中应充分考虑非稳定渗流场的影响。

参考文献:

[1] 刘杰,王媛,刘宁. 岩土工程渗流参数反问题[J]. 岩土力学,2002,23(2):152-161. (LIU Jie, WANG Yuan, LIU Ning. Parameter inverse problem in geotechnical engineering seepage[J]. Rock and Soil Mechanics,2002,23(2):152-161. (in Chinese))

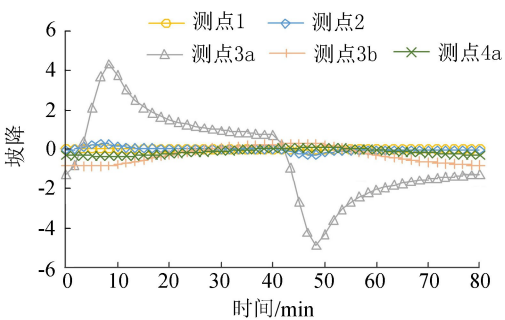


图 8 监测点坡降变化线
Fig.8 Slope change of monitoring points

表 2 闸室出口段材料参数
Table 2 The material parameters of exit section of lock chamber

材料	干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比重	孔隙比	浮密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
反滤层	2030	2.65	0.31	1260
③亚黏土混粉砂	1610	2.71	0.68	1016
④黏土、亚黏土	1700	2.74	0.61	1080
⑤亚黏土混粉砂	1670	2.71	0.62	1054

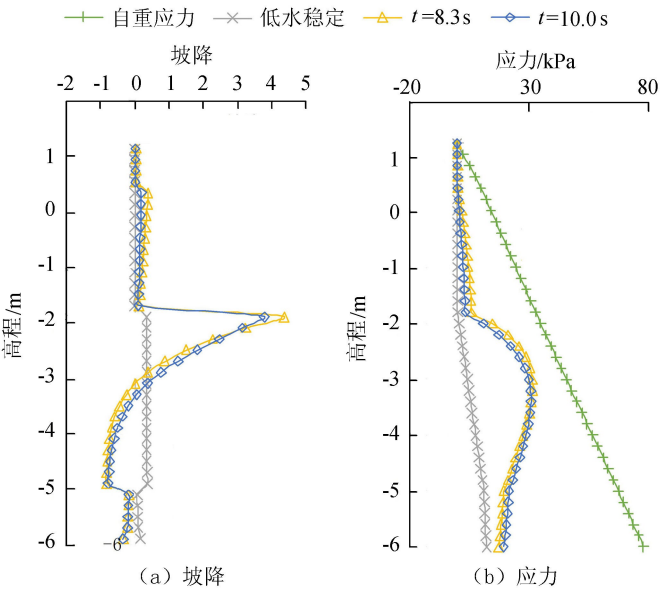


图 9 出口段坡降、应力沿深度分布
Fig.9 Slope and stress of exit section along the depth

- [2] 谭彬政,陶桂兰,庄宁,等. 水位升降对荆江高滩岸坡渗流场影响分析[J]. 人民长江,2015,46(9):36-40. (TAN Binzheng, TAO Guilan, ZHUANG Ning, et al. Influence of water level fluctuations on seepage field of high floodplains bank slope in Jingjiang reach of Yangtze River[J]. Yangtze River,2015,46(9):36-40. (in Chinese))
- [3] 刘川顺,黄站峰. 三峡水库水位泄降速度对库岸防护堤的影响[J]. 水利水运工程学报,2003(4):49-52. (LIU Chuanshun, HUANG Zhanfeng. Influences of stage's drawdown speed of the Three Gorges Reservoir[J]. Hydro-science and Engineering, 2003(4):49-52. (in Chinese))
- [4] 毛昶熙,段祥宝,蔡金傍,等. 洪峰过程非稳定渗流管涌试验研究与理论分析[J]. 水利学报,2005,36(9):1105-1114. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Piping experimental study and theoretical analysis of unsteady seepage flow during flood peak[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(9):1105-1114. (in Chinese))
- [5] 李聪磊,黄铭. 潮汐影响下的海堤渗流场-应力场耦合分析[J]. 人民黄河,2015,37(8):39-42. (LI Conglei, HUANG Ming. The coupling analysis of seawall seepage field stress[J]. Yellow River,2015,37(8):39-42. (in Chinese))
- [6] 周锡祁. 船闸(坞)的渗流和渗流计算[J]. 水运工程,1979(8):36-44. (ZHOU Xiqi. The seepage of lock and seepage calculation[J]. Port and Waterway Engineering,1979(8):36-44. (in Chinese))
- [7] 宋琨,晏鄂川,朱大鹏,等. 基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究[J]. 岩土力学,2011,32(9):2798-2802. (SONG Kun, YAN Echuan, ZHU Dapeng, et al. Base on permeability of landslide and reservoir water change to research variational regularity of landslide stability[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(9):2798-2802. (in Chinese))
- [8] 丁行蕊. 全国船闸概况和船闸水工设计中的若干问题(下)[J]. 水运工程,1985(1):42-50. (DING Xingrui. General situations of locks in China and several problems in hydraulic structure design[J]. Port and Waterway Engineering,1985(1):42-50. (in Chinese))
- [9] 王太固,唐晖,何良德. 邵伯三线船闸空间渗流特性研究[J]. 交通科技,2012,255(6):13-16. (WANG Taigu, TANG Hui, HE Liangde. Research on spatial seepage of the Thind-line Shaobo ship lock[J]. Transportation Science and Technology,2012,255(6):13-16. (in Chinese))
- [10] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [11] 王亦勤. 潮汐河流闸基非恒定渗流解法初探[J]. 江苏水利,1998(3):32-34. (WANG Yiqin. Preliminary study on calculation method of unsteady seepage in tidal river[J]. Jiangsu Water Resources,1998(3):32-34. (in Chinese))
- [12] 何良德,刘全,洪波,等. 真空预压法中渗流体力与压差面力联合作用机理浅析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(2):193-196. (HE Liangde, LIU Quan, HONG Bo, et al. Mechanism of combined action of seepage force and surface pressure difference in vacuum-preloading method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2004,32(2):193-196. (in Chinese))
- [13] 陈丽刚. 基于 ABAQUS 渗流与应力耦合作用的边坡稳定性分析[D]. 郑州:郑州大学,2010.
- [14] 张欣. 基于 ABAQUS 流固耦合理论的库岸滑坡稳定性分析[D]. 济南:山东大学,2005.
- [15] 胡庆华. 京杭运河淮安三线船闸闸室设计介绍[J]. 水运工程,2002(7):10-12. (HU Qinghua. Lock chamber design of Hua'an No.3 Shiplock in the Grand Canal[J]. Port and Waterway Engineering,2002(7):10-12. (in Chinese))
- [16] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [17] 刘晓平,陶桂兰. 渠化工程[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [18] 卢延浩. 土力学[M]. 南京:河海大学出版社,2005.
- [19] 许瑞东,何良德,陆新洋,等. 新夏港双线船闸闸室横向渗流稳定性分析[J]. 水运工程,2017(5):118-124. (XU Ruidong, HE Liangde, LU Xinyang, et al. Analysis of lateral seepage stability on the New Xiangang double-lane shiplock chamber[J]. Port and Waterway Engineering,2017(5):118-124. (in Chinese))

(收稿日期:2017-02-20 编辑:张志琴)