

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.008

考虑船闸闸室宽度影响的横向渗流阻力系数法

何良德,张成君,王晨晨,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:为在船闸闸室的二维横向渗流计算中考虑闸室宽度的影响,基于改进阻力系数法,建立了考虑出流宽度的阻力系数局部计算模型。改变地基深度与防渗深度、出流宽度的比值,运用 ABAQUS 软件计算渗透量,确定流量系数、阻力系数及分配系数,绘制各系数图表。结果表明,闸室宽度越窄、防渗深度越深,对横向出流宽度的影响愈显著。对于等级较低、闸室宽度较小、水头较大的船闸,应充分考虑闸室宽度的影响,防止低估出口段坡降值而不利于渗流稳定性。
关键词:船闸;闸室宽度;横向渗流;闸内段;阻力系数;坡降
中图分类号:TV139.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)02-0146-07

Resistance coefficient method for the transversal seepage considering the width of lock chamber

HE Liangde, ZHANG Chengjun, WANG Chenchen, WANG Xinyu

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

Abstract: For the two-dimensional simulation of transversal seepage of the lock chamber, in order to take the effect of the width of lock chamber into account, the resistance coefficient model of inner section has been built based on the improved resistance coefficient method. By the local model of the ABAQUS software, this study changed the ratio of the foundation depth to the impervious depth and the ratio of the foundation depth to the outflow width, to calculate the discharge coefficient, the resistance coefficient and partition coefficient, based on the infiltration capacity, and then charts of different coefficients have been drawn. The result shows that the narrower the chamber width is, the larger the impervious depth will be, and the effect on the lateral outflow width will be more pronounced. For the lock of a lower level, narrower chamber width and larger water head, the impact of the chamber width should be taken full account to prevent the under estimation of the exit section slope, which is not conducive to the seepage stability. In this paper, the accuracy of the conventional resistance coefficient method has been improved, and the principle can be applied to similar projects, e. g. the effect of outlet width on the infiltration of a foundation pit.
Key words: lock; chamber width; transversal seepage; inner section; resistance coefficient; slope

船闸主要由闸首、闸室和引航道等 3 个基本部分及相应的设备组成,它是一种利用灌泄水系统升降闸室水位^[1],使得船舶克服上、下游水头落差顺利过坝的通航建筑物。船闸又是一种挡水建筑物,在水头差的作用下,船闸的地基和两侧回填土内会产生渗透水流。渗流不仅会对建筑物产生渗透压力,还可能使土体产生管涌、流土等渗透变形^[2],从而影响到船闸的结构安全^[3]。
对于采用透水闸室底的船闸而言,随着闸室的灌泄水,将交替产生从上游(或闸室)经过上(下)闸首底板向闸室(或下游)的纵向渗流,同时还有绕过上(下)闸首边墩向下游的侧向渗流,呈空间渗流状态。闸室长度一般远大于闸首宽度,且可达闸墙底宽的 10 倍以上,除紧靠闸首受其渗流影响的段落外,闸墙以横向渗

作者简介:何良德(1964—),男,副教授,硕士,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,张成君,王晨晨,等. 考虑船闸闸室宽度影响的横向渗流阻力系数法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2): 146-152. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.008.

流为主,呈现出经过透水闸室底、闸墙底、墙后回填土往返双向非稳定渗流的特征^[4],这是船闸与其他水工建筑物相比所独有的渗流特点。

船闸渗流计算分析方法可以归纳为基于经验公式解析解的简化算法、以有限元法^[5-8]为主的数值分析法、室内^[9]或现场^[10]试验分析法等 3 类。简化算法是将闸底纵向渗流、边墩侧向绕流、闸室横向渗流分别作为均质地基的平面恒定渗流问题,采用基于莱恩法 (Lane, 1935) 改进的渗径系数法^[4]、或基于丘也加夫法 (1957) 发展的改进阻力系数法^[11] (1980) 进行近似计算。

渗径系数法,是一种沿着建筑物地下渗流轮廓线,按比例展开换算为等效水平渗径长度,认为渗透水头沿程均匀损失,以此进行渗流计算的简便方法。该法没有考虑地基渗流深度、防渗墙位置^[12]等因素的影响,因此计算精度较低,适合在初步估算渗流时应用。

改进阻力系数法将闸基渗流区域按等势线划分为(进)出口段、水平段、内部垂直段等 3 种基本区段,确定基本段阻力系数,可求得各段水头损失、渗透压力、平均坡降,验算地基渗透稳定性。该法避免了渗径系数法的缺点,计算精度较高,是一种常用的简化算法^[13-14]。水头较高或复杂地基上的重要船闸,宜用平面有限元法分析闸室横向渗流^[5]、或三维有限元法分析整个船闸的空间渗流^[6-7]。

在船闸闸室中,两侧闸墙横向渗流是相互影响的,闸底渗流出口宽度最大为闸室宽度(两侧闸墙间距)。当闸室横向渗流对称时,每侧闸墙渗流的有效出口宽度仅为闸宽的一半(图 1, H_k 为通航时闸室最小水深(门槛水深), H_1 为闸室最高、最低水位差, H_2 为满足船舶空载干舷高度要求的安全超高, b 为闸室半宽, S_1 为墙后水位至桩底的深度, S_2 为板桩入土深度, T_1 为墙后地基透水深度, T_2 为闸室底板下地基透水深度, H_w 为墙后水位在闸地面以下深度, H 为检修期板桩墙渗透水头)。而常用的出口段阻力系数计算公式,隐含了出口无穷宽的假设。因此,

闸室宽度对横向渗流的影响,以及常规阻力系数法适用性值得深入研究。

笔者基于阻力系数法的基本原理,针对船闸横向渗流的特点,提出了改进计算方法的思路,建立了考虑出流宽度的阻力系数局部计算模型,借助 ABAQUS 软件计算结果绘制了闸内出口段阻力系数曲线,通过新夏港船闸工程实例分析,验证了本文方法的合理性和有效性。围绕船闸工程中常见的两类分离式闸墙,深入研究了闸墙埋深、闸室宽度对横向渗流的影响规律。本文计算原理可推广应用于基坑等渗流受出口宽度影响的类似工程。

1 问题的提出

船闸闸室横向渗流可简化为平面问题,由达西定律可知^[15],渗流流量为

$$q = av = akJ = ak \frac{h}{l}$$
 (1)

式中: q ——单宽渗流量, m^2/s ; a ——单宽面积, m ; v ——渗流流速, m/s ; k ——土壤渗透系数, m/s ; J ——水力梯度, 又称坡降; h ——渗透水头, m ; l ——渗径长度, m 。

由式(1)可得

$$h = \frac{l}{a} \frac{q}{k} = \xi \frac{q}{k}$$
 (2)

式中: ξ ——渗流阻力系数,无量纲,只与渗流区域几何形状有关,是边界条件的函数。

设渗流区域可按等势线划分为 n 个典型的区段,则有

$$h_i = \xi_i \frac{q}{k} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n)$$
 (3)

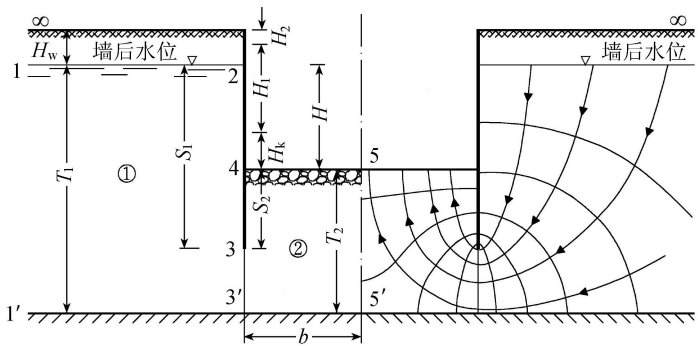


图 1 板桩墙式闸室横向渗流示意图
Fig. 1 Transversal seepage diagram of the lock chamber with sheet pile wall

$$H = \sum h_i = \frac{q}{k} \sum \xi_i = \xi \frac{q}{k}$$
 (4)

式中: h_i ——各区段水头损失,m; ξ_i ——各区段渗流阻力系数; H ——渗流总水头,m。

式(4)可表示为

$$q = \frac{1}{\xi} k H = \mu k H$$
 (5)

式中: μ ——渗流的流量系数,等于总阻力系数的倒数。

式(4)代入式(3)得

$$h_i = \frac{\xi_i}{\sum \xi_i} H = \zeta_i H$$
 (6)

式中: ζ_i ——各区段水头分配系数,与各区段阻力系数成正比。

应用阻力系数法时,通过地下轮廓线角点和尖点的等势线可将地基分为(进)出口段、水平段、内部垂直段等3种基本形式。由于闸室结构的对称性,横向渗流计算常取其一半进行区段划分,以板桩墙式闸室为例,如图1所示。根据新夏港船闸^[5]、淮安三线船闸^[16]及高港二线船闸^[17]等类似工程统计,板桩入土深度系数(板桩入土深度与闸墙高之比)可取为0.8, H_w 通常由排水系统高程确定。

假定板桩底下垂线3-3'为等势线,将半横断面分为2个区段:进口段①与出口段②,无水平段和内部垂直段。出口段无穷宽时,阻力系数 ξ_0 为

$$\xi_0 = 1.5 \left(\frac{S}{T} \right)^{1.5} + 0.441$$
 (7)

式中: ξ_0 ——(进)出口段的阻力系数; S ——垂直防渗设施的深度,m; T ——地基计算深度,m。

图1中,区段①进口线1-2相对于 T_1 可近似认为无穷长,可用式(7)计算 ξ_1 。Ⅰ~Ⅶ级船闸闸室宽度^[18] $B=8\sim34$ m,区段②出口线4-5长度 $b=4\sim17$ m,以平均水位差 $H=5$ m计,板桩入土深度 $S_2=6.4\sim10.8$ m,加上板桩底以下透水层厚度, $b<T_2$,因此直接引用式(7)计算 ξ_2 可能引起较大的误差。

2 闸内段阻力系数

为了考虑闸室宽度的影响,计算闸内段②阻力系数 ξ_2 ,建立如图1所示的②区段二维有限元稳定渗透计算模型,不考虑土体的固结,约束其转角及位移。其中4-5为出渗面,添加孔压为0的边界条件,3-3'为入渗面,添加梯形分布的静水压力边界条件,使得4-5、3-3'各为等势面,且保持势差等于1 m。其余均为不透水边界。

改变不同 S_2/T_2 、 T_2/b ,求出流量 q ,按式(3)换算得一系列的阻力系数值,可绘制成图2或表1,便于闸室横向渗流计算时查用。 $T_2/b>10$ 后,可以利用表1、图2中 $T_2/b=8、10$ 的相应值外推求得。

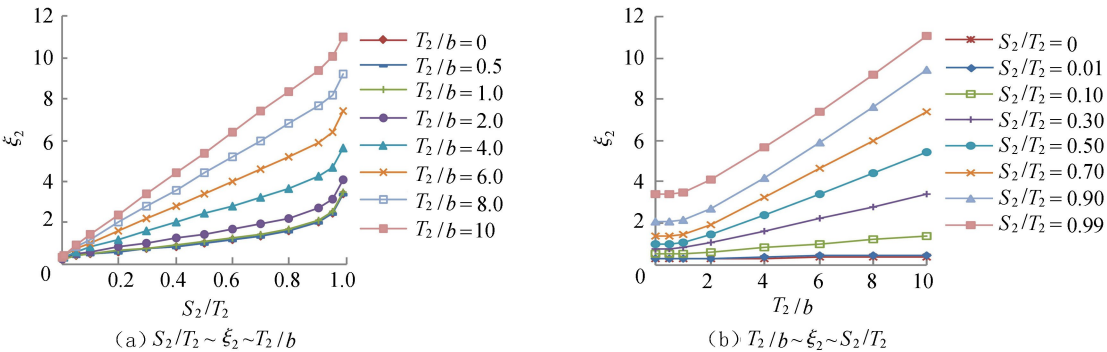


图2 闸内段阻力系数曲线

Fig.2 Resistance coefficients of the inner section

总体来看,当 T_2/b 为定值时,随着 S_2/T_2 的增大,入渗厚度比 $(T_2-S_2)/T_2$ 越小,且埋深越大,渗流路径越长,阻力系数 ξ_2 逐渐增大, $S_2/T_2>0.9$ 后, ξ_2 剧烈增长。当 $T_2/b\leq0.1$,即 $b\geq10T_2$ 时, b 相对 T_2 而言,可近似认为闸室无穷宽, $\xi_2=\xi_0$,验证表明 $0.1<S_2/T_2<0.8$ 时, ξ_2 与式(7)计算值相当接近, ξ_2 即为出口段阻力系数

ξ_0 。因此, ξ_1 可取 $T_2/b=0.1$ 时 ξ_2 值,查表 1 或图 2 即可。

表 1 闸内段阻力系数 ξ_2
Table 1 The resistance coefficient ξ_2 of the inner section

T_2/b	ξ_2											
	$S_2/T_2=0$	$S_2/T_2=0.05$	$S_2/T_2=0.1$	$S_2/T_2=0.2$	$S_2/T_2=0.3$	$S_2/T_2=0.4$	$S_2/T_2=0.5$	$S_2/T_2=0.6$	$S_2/T_2=0.7$	$S_2/T_2=0.8$	$S_2/T_2=0.9$	$S_2/T_2=0.95$
0.1	0.242	0.396	0.483	0.617	0.739	0.863	0.997	1.153	1.345	1.608	2.047	2.476
0.5	0.243	0.396	0.484	0.619	0.741	0.865	1.000	1.156	1.349	1.612	2.051	2.481
1	0.248	0.413	0.505	0.655	0.791	0.929	1.076	1.242	1.443	1.710	2.147	2.591
2	0.269	0.480	0.608	0.830	1.039	1.247	1.460	1.685	1.935	2.240	2.700	3.150
3	0.285	0.546	0.715	1.027	1.330	1.631	1.935	2.243	2.566	2.930	3.428	3.888
4	0.298	0.606	0.818	1.225	1.625	2.026	2.426	2.829	3.239	3.676	4.226	4.700
5	0.308	0.662	0.917	1.421	1.921	2.421	2.921	3.422	3.926	4.447	5.058	5.552
6	0.317	0.715	1.014	1.616	2.216	2.816	3.416	4.017	4.618	5.230	5.912	6.428
8	0.331	0.818	1.207	2.008	2.808	3.608	4.408	5.208	6.008	6.812	7.655	8.226
10	0.340	0.917	1.400	2.400	3.400	4.400	5.400	6.400	7.400	8.401	9.424	10.058

表 1、图 2(b)可以看出, T_2/b 由 0.1 到 0.5 时, ξ_2 变化及其微小。 T_2/b 由 0.5 到 1 时, ξ_2 变化小于 8%。 $T_2/b>1$ 后,宽度 b 的影响逐渐增大,并呈线性增长的关系。但由于 S_2/T_2 越大时,顶面出流越均匀, b 减小时影响越大,图 2(b)的 $T_2/b \sim \xi_2$ 曲线斜率也越大。

3 工程实例验证

新夏港船闸^[5]为 III 级船闸,有效尺寸为 180 m×23 m×4.0 m(闸室长×口门宽×最小槛上水深),闸室顶高程 5.36 m,闸底高程-4.41 m,钢板桩长 19 m,底高程-13.64 m。

运用 ABAQUS 有限元软件^[18-19]建立二维渗流模型,墙后土体顶部取为地下水位高程 2.4 m,模型的桩长 16.04 m,板厚 0.16 m。地基深层的粉质黏土可作为相对不透水层,模型底部取至该层顶高程-41.4 m 处。墙后土体向外延伸透水层深度的 3 倍,宽为 130 m。截取对称闸室的一半建模,使用平面四结点单元划分网格。

二维渗流场的定水头边界为闸底边界,以及墙后地下水位边界,其他边界均被默认为不透水边界。渗透系数近似取各土层的加权平均值, $k=3.27\times10^{-7}$ m/s。本文分析对比渗流最危险的检修工况,闸室内无水,板桩墙渗透水头 6.81 m。

对模型进行渗流分析,输出总水头、渗流量等计算结果,可换算得新夏港模型的流量系数 μ 、阻力系数 ξ 及水头分配系数 ζ_2 。同时可知, $T_1=43.8$ m、 $T_2=36.99$ m、 $S_1=16.04$ m、 $S_2=9.23$ m、 $S_1/T_1=0.366$ 、 $S_2/T_2=0.25$ 、 $T_2/b=3.217$,本文方法由表 1 内插可得 $\xi_1=0.821$ 、 $\xi_2=1.230$,常规方法按式(7)计算得 $\xi_1=0.773$ 、 $\xi_2=0.628$,与有限元法计算结果对比如表 2 所示。常规方法 ξ 误差-32.6%、 ζ_2 误差-18.3%,本文方法 ξ 误差-1.4%、 ζ_2 误差 9.5%,计算精度较高。

该模型的等势线分布如图 3 所示,可见板桩底下垂线并不是一条等势线,但该垂线的势差较小,约占总势差的 10%。进一步分析表明,闸室宽度 B 、或板桩入土深度 S_2 越大时,下垂线是等值线的基本假设越符合实际情况,本文方法的计算误差越小。

根据水头分配系数可得板桩两侧分担的水头损失 h_1 、 h_2 ,分段按直线分布计算渗透压力,还可验算出口段渗透稳定性。板桩两侧水压力包括静水压力和渗透压力,分布如图 4 所示。

由图 4(b)可以看出,净水压力呈三角分布,在低水位高程处达到最大值,略小于渗透流水头差,随后逐渐减小为 0,这与板桩前后仅按静水压力考虑时的梯形分布有很大差异。

表 2 有限元法与阻力系数法计算对比

Table 2 Comparison of the finite element method and the resistance coefficient method				
方法	单宽流量/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	μ	ξ	ζ_2
有限元法	1.048×10^{-6}	0.481	2.080	0.548
本文方法		0.487	2.051	0.600
常规方法		0.714	1.401	0.448



图 3 总水头等势线分布

Fig.3 Distribution of equipotential lines of the total water head

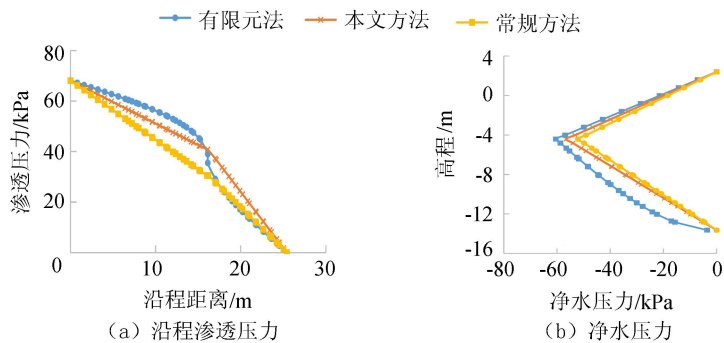


图4 水压力分布对比

Fig.4 Distribution comparison of the water pressure

本文方法与常规方法相比而言,渗透压力分布、净水压力分布更接近有限元法分布。

4 闸室宽度的影响

闸底透水的分离式闸室结构形式有重力式(梯形、L形、空箱式、扶壁式)和板桩式(图1所示)两大类。下设防渗板桩的重力式闸墙如图5所示,(A 为重力式闸墙墙后回填面积, T_3 为闸墙底部至地基不透水层的距离)可忽略闸墙底板以上土体对渗流的影响,假设墙后为直立

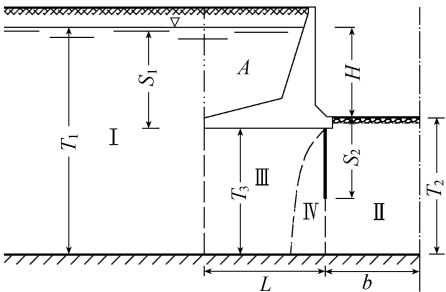


图5 带防渗板桩的重力式闸墙

Fig.5 Gravity type chamber with a seepage control sheet pile

面,划分渗流区域为4个特征段。可按常用简化公式^[11]计算进口段Ⅰ、水平段Ⅲ、内部垂直段Ⅳ的阻力系数,按本文方法确定闸内段Ⅱ的阻力系数,其他渗流计算分析方法与一般阻力系数法相同。

船闸级别按照设计最大船舶吨级分为7个等级^[4]。闸室的宽度,主要受通航的船舶宽度以及要求的通过能力影响,标准宽度系列有34 m、23 m、18 m、16 m、12 m、8 m,分别适用不同等级的船闸。闸室高度 $H_c=H_k+H_1+H_2$,它与水头差大小、船闸等级有关,国内船闸中低水头居多,取 $H_1=10$ m,闸室(凌空)高度 $H_c=11.8\sim17.3$ m。根据经验,板桩式闸墙入土深度约为墙高的0.8倍,重力式闸墙底宽为1倍墙高、前趾宽度为0.15倍墙高、前趾长高比1.25。以板桩墙、无防渗板桩的重力墙渗流计算为例,取Ⅰ、Ⅲ、Ⅶ级船闸相应闸室宽度34 m、16 m、8 m为代表,墙高以及 S_2 、 b 等参数可见表3。

表3 船闸等级、闸室宽度、闸墙主要尺度

Table 3 The level of the lock, the chamber size and wall size

船闸等级	B/m	H_c/m	板桩式				重力式				
			板桩长度/m	入土深度 S_2/m	闸室半宽 b/m	S_2/b	闸墙总高/m	前趾高度 S_2/m	前趾长度/m	闸室半宽 b/m	S_2/b
I	34	17.3	31.14	13.84	17	0.81	19.38	2.08	2.60	14.41	0.14
Ⅲ	16	14.4	25.92	11.52	8	1.44	16.13	1.73	2.16	5.84	0.30
Ⅶ	8	11.8	21.24	9.44	4	2.36	13.22	1.42	1.77	2.23	0.64

设 $S_2 < T_2 \leq 100$,计算 S_2/T_2 、 T_2/b 查表1得闸内段 ξ_2 如图6所示。总体来看,板桩墙的 ξ_2 大于重力墙, S_2 越深、 b 越窄、或 S_2/b 越大,以及 T_2 越浅、或 S_2/T_2 越大时,则 ξ_2 越大。图6(a)中 $b=\infty$ 为不考虑宽度影响的结果,对比表明闸室宽度使得 ξ_2 增大,图6(b)假设 $S_2=0$ 时, ξ_2 曲线平坦,此时闸室宽度影响最小,将不同 S_2/b 与 S_2/T_2 情况下的 ξ_2 与 $b=\infty$ 情况下的 ξ_2 的差值设为 ξ_2 ,图6(c)中以 ξ_2 来衡量 b 对渗流的影响, S_2/b 越大、 S_2/T_2 越小时, ξ_2 越大。综合分析可见 S_2/b 是影响 ξ_2 的重要因素。

由 $T_3=T_2-S_2$ 、 $T_1=T_3+S_1$ 、 S_1/T_1 ,可得墙后段 ξ_1 、墙底段 $\xi_3=L/T_3$, $\xi=\xi_1+\xi_2+\xi_3$,求得流量系数 μ 、水头分配系数 ζ_2 如图7所示(bz表示板桩式闸室结构,zl表示重力式闸室结构)。板桩墙 $S_2/b=0.81\sim2.36$,使得阻力系数增大 $\xi=\xi_2=0.70\sim2.24$,流量系数减小 $\mu=-0.30\sim-0.65$,分配系数增大 $\zeta_2=0.20\sim0.37$,重力墙 $S_2/b=0.14\sim0.64$, $\xi=0.20\sim0.70$, $\mu=-0.15\sim-0.49$, $\zeta_2=0.11\sim0.30$ 。如果不考虑闸室宽度的影响,将会

低估出口段分担的渗透水头差,出口坡降验算值偏低 31.5%~45.3% (板桩墙)、28%~48.2% (重力墙)。

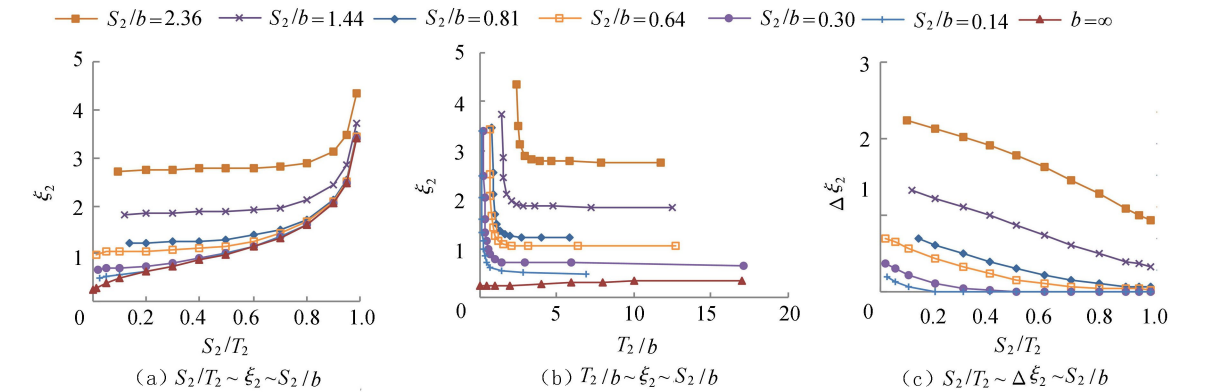


图 6 闸室宽度对 ξ_2 的影响
Fig. 6 Influence of the chamber width to ξ_2

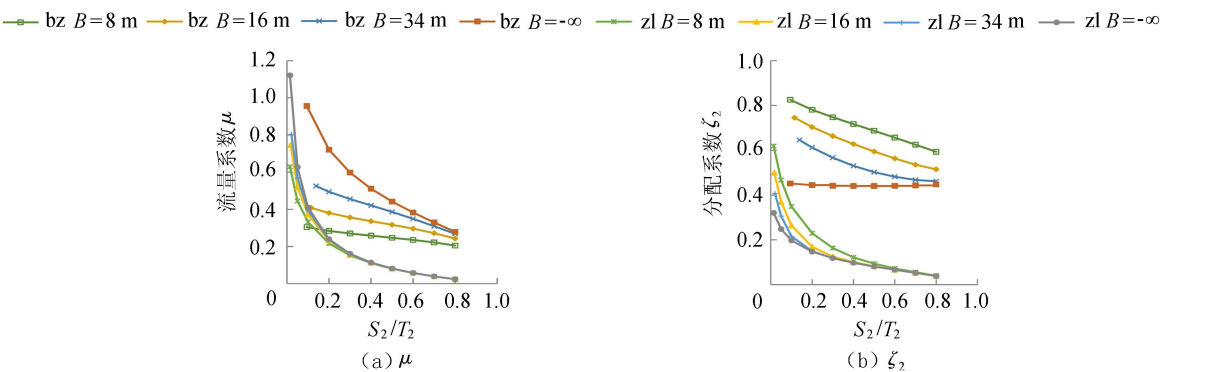


图 7 闸室宽度对 μ 、 ζ_2 的影响
Fig. 7 Influence of the chamber width to μ 、 ζ_2

5 结 论

- a. 基于阻力系数法基本原理和分段原则,针对船闸闸室宽度影响横向渗流的特点,建立了闸内出口段阻力系数的局部计算模型,给出了一系列图表可供查用,可确定相应基本段的阻力系数,计算流量系数、出口段分配系数,用于渗流稳定性验算。
- b. 通过工程实例验证表明,闸内段阻力系数合理考虑了出流宽度的影响,改进了常规阻力系数法,可提高船闸闸室横向渗流计算的精度。
- c. 闸室宽度越窄、闸墙底板或防渗设施深度越大,横向出流宽度的影响愈发显著。对于等级较低、闸室宽度较小、水头较大的船闸,应充分考虑闸室宽度的影响,防止低估出口段坡降值,不利于渗流稳定性。
- d. 本文方法适用于各种透水闸底的闸室横向渗流计算,计算原理可推广应用于基坑等渗流受出口宽度影响的类似工程。
- e. 在静水压力和渗透压力共同作用下,板桩墙两侧净水压力差在高水位、桩底处为零,低水位处略小于渗透水头差,呈三角形分布,与通常梯形分布假设有很大差异,值得注意。

参考文献:

[1] HU Youan, WANG Meng, WANG Miaomiao, et al. Hydraulic calculation and dynamic analysis of columnar reversing gate[J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(3): 294-304.

[2] 詹美礼,辛圆心,唐健,等. 砾石心墙土复杂应力耦合作用下的渗流特性[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 36-41. (ZHAN Meili, XIN Yuanxin, TANG Jian, et al. Permeability of gravel soil for core wall under complex stress coupling effect [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(4): 36-41. (in Chinese))

[3] 杨式诚. 渣滩水电站船闸失事原因分析及其修复[J]. 中南水力发电, 1998(1): 58-60. (YANG Shicheng. Cause analysis and

- repair of ship lock in Zhatan hydropower station[J]. Central and South China Hydroelectric Power, 1998(1): 58-60. (in Chinese))
- [4] 黄伦超,陶桂兰. 渠化工程[M]. 北京:人民交通出版社,2016.
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 侯晓萍,徐青,杨志明. 黄河山坪电站船闸地基渗控措施优化[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(5):584-589. (HOU Xiaoping, XU Qing, YANG Zhiming. Seepage control measure optimization for Shanping ship lock foundation in Yellow River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012,45(5):584-589. (in Chinese))
- [8] 叶祖洋,姜清辉,刘艳章,等. 岩体离散裂隙网络的非饱和渗流数值分析[J]. 岩土力学,2017, 38(11):3332-3340. (YE Zuyang, JIANG Qinghui, LIU Yanzhang, et al. Numerical analysis of unsaturated seepage flow through discrete fracture networks of rock[J]. Rock and Soil Mechanic, 2017, 38(11):3332-3340. (in Chinese))
- [9] 潘建楠,黄兰高. 船坞三向渗流电拟试验中几个有关问题的探索[J]. 水道港口,1982(3):25-32. (PAN Jiannan, HUANG Langao. Exploration on several related problems in three-way seepage electricity test of dock[J]. Journal of Waterway and Harbour, 1982(3):25-32. (in Chinese))
- [10] 余成钢,张志诚,周扬. 三峡阶段蓄水船闸闸首渗流分析[J]. 水利科技与经济,2011,17(2):14-17. (YU Chenggang, ZHANG Zhicheng, ZHOU Yang. Analysis on seepage monitoring in ship lock head of TGP phases impoundment[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011,17(2):14-17. (in Chinese))
- [11] 毛昶熙,周保中. 闸坝地基渗流计算的改进阻力系数法[J]. 水利学报,1980,11(5):51-59. (MAO Changxi, ZHOU Baozhong. Improved resistance coefficient method for seepage calculation of dam foundation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980,11(5):51-59. (in Chinese))
- [12] 马丽. 改进阻力系数法与直线比例法在水闸渗流计算中的结果对比分析[J]. 陕西水利,2016(2):115-117. (MA Li. Contrastive analysis of improved resistance coefficient method and straight line ratio method in sluice seepage calculation[J]. Shanxi Water Resources, 2016(2):115-117. (in Chinese))
- [13] 马锦锦,李凯,阿木尔. 改进阻力系数法在节制闸工程中的运用[J]. 水利建设与管理,2014,34(12):27-29. (MA Jinjin, LI Kai, BAI Amuer. Application of improved drag coefficient method in check sluice project[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2014,34(12):27-29. (in Chinese))
- [14] 魏志洪. 改进阻力系数法在蓬岐水闸工程中的应用[J]. 水利科技,2017(1):23-25. (WEI Zhihong. Application of improved resistance coefficient method in Pengqi Sluice Project[J]. Hydraulic Science and Technology, 2017(1):23-25. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] 胡庆华,陈文辽. 京杭运河淮安三线船闸工程创新技术的运用[J]. 水运工程, 2010(3):117-120. (HU Qinghua, CHEN Wenliao. Application of innovative technologies of Huan'an 3rd-lane lock on Beijing-Hangzhou Canal[J]. Port and Waterway Engineering, 2010(3):117-120. (in Chinese))
- [17] 钱祖宾,马志华,江守燕,等. 高港枢纽二线船闸地连墙板桩结构整体数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):62-67. (QIAN Zubin, MA Zhihua, JIANG Shouyan, et al. Finite element model of sheet-pile structures with underground retaining walls in Gaogang second-line shiplock project and its numerical verification[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(6):62-67. (in Chinese))
- [18] 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.
- [19] 刘伟,李平,赖建英,等. 真空负压软基加固特性三维数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):233-239. (LIU Wei, LI Ping, LAI Jianying, et al. Three-dimensional numerical analysis of soft ground consolidation characteristics under negative pressure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016,44(3):233-239. (in Chinese))

(收稿日期:2017-03-01 编辑:刘晓艳)