

· 航道及通航建筑物 ·



## 模拟船闸底板减压井的等效表孔法\*

叶子豪<sup>1</sup>, 何良德<sup>1</sup>, 凡明杰<sup>2</sup>, 李召辉<sup>2</sup>, 彭阳<sup>1</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 根据流量等效原则及阻力系数法, 提出一种“以表孔代井”的实用简化方法, 将地基上三维减压井等效为同位置二维表面孔, 并给出表孔半径换算估算式。经验证, 该方法在列井、群井问题中等效性良好。依托双线船闸闸室, 通过渗流势分布、渗流量分配和扬压力变化规律的对比分析, 评价等效表孔法计算精度。结果表明, 该方法可有效减少模型单元数与节点数, 极大地节省计算资源。等效表孔与减压井横剖面渗流势相同, 各部位水头线几乎重叠, 出流量横向分布一致, 等效模型与原模型右线出流总流量相对误差仅为1.7%, 平均扬压力相对误差5.4%。建议等效表孔率不宜小于10%, 等效表孔率大于50%时, 扬压力基本等同于完全透水情况, 可直接按闸室完全透水进行渗流分析。

**关键词:** 船闸; 减压井; 以表孔代井法; 等效表孔率; 阻力系数

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0088-09

### Equivalent surface hole method for simulating pressure-reducing wells at bottom of ship lock

YE Zihao<sup>1</sup>, HE Liangde<sup>1</sup>, FAN Mingjie<sup>2</sup>, LI Zhaohui<sup>2</sup>, PENG Yang<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** According to the principle of flow equivalence and the method of resistance coefficient, a practical simplification method of “replacing well with surface hole” is proposed. This method simplifies three-dimensional pressure-reducing wells as two-dimensional surface holes at the same position, and the calculation formula of surface hole radius is given in this paper. It is proved that the method has a promising application in terms of row wells and group wells. Based on the project of double line lock chamber, the calculation accuracy of the practical simplification method is evaluated by the comparative analysis of seepage potential distribution, seepage flow distribution and lifting pressure variation. The results show that the simplified method can effectively reduce the number of model elements and nodes, and greatly save computing resources in numerical simulations (FEM). Moreover, the outcomes illustrate that the seepage potential and the lateral distribution of discharge flow of equivalent surface hole is the same as those of relief well, and the top lines of each part in those two models are almost overlapped. The relative error between the total discharge flow of equivalent model and the right line of original model is only 1.7%, the relative error of the average uplift pressure is 5.4%. It is suggested that the equivalent orifice rate should not be less than 10%, the seepage analysis can be carried out directly according to the fully permeable of the lock chamber when the equivalent orifice rate is greater than 50% owing to the fact that the lifting pressure is basically equivalent to the situation of complete permeability.

**Keywords:** ship lock; pressure-reducing well; method of replacing well with surface hole; equivalent orifice rate; resistance coefficient

收稿日期: 2024-03-19

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3206103)

作者简介: 叶子豪 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事港口与航道工程科研。

岩基上船闸一般优先采用分离式结构, 根据布置要求, 可采用重力式及衡重力式<sup>[1]</sup>、薄壁或重力式衬砌、混合式等闸墙结构, 选择双铰式、独立式、无底板等闸底结构。船闸墙后应布置可靠的排水系统<sup>[2]</sup>, 减小闸墙和底板承受的水荷载。当船闸水头较大、闸底结构轻薄时, 可在闸基内设置排水减压井<sup>[3]</sup>(管、孔)进一步降低扬压力, 布设锚杆<sup>[4]</sup>改善受力特性, 有利于提高底板抗浮稳定性、降低结构内力。

闸底排水竖井的减压(降深)效果受竖井直径、深度、竖井间距、布置方式和数量等因素综合影响<sup>[5]</sup>。假设开孔底板为完全透水底板<sup>[6]</sup>进行船闸渗流分析, 计算简便, 但忽略竖井阻力对闸底、闸墙渗流的影响, 目前尚无完善的估计方法, 尤其在双线互灌互泄船闸、多线紧邻船闸中, 竖井阻力的影响是双重或多重的, 宜用模拟竖井影响的有限元方法分析确定结构的渗流荷载。

由于减压井附近水头梯度变化剧烈, 有限元分析时必须采用密集网格才能精确模拟, 现有的竖井模拟方法可分为 3 种: 1) 竖井直接模拟法。采用排水子结构法<sup>[7-8]</sup>进行凝聚分析以减少解题整体自由度, 但渗流模型中含有大量竖井时, 对每个子结构前后处理复杂。2) 竖井简化模拟法。如基于杆单元法<sup>[9]</sup>改进的汇线单元法<sup>[10]</sup>, 根据解析解建立井流量与节点水头关系, 形成汇线单元渗透矩阵, 对常规软件二次开发后, 将其组装到整体渗透矩阵中直接求解, 计算量相对较少, 且精度较高。3) 竖井宏观等效法。当横向及竖向渗流为主时, 可以缝<sup>[11]</sup>或窄沟<sup>[12]</sup>模拟并列的排水效果, 朱新望等<sup>[13]</sup>根据板桩式闸室内以竖向渗流为主的特征, 提出等效系数法, 研究透水孔直径、间距以及减压管深度对排水效果的影响规律。该方法计算量最小, 有一定的模拟精度, 但应用条件有严格限制。

本文吸取宏观等效法思想, 提出一种“以表孔代井”的实用简化方法。将三维单井比拟为相同位置、流量等效的二维表孔, 验证列孔、群孔对应

列井、群井流量等效性, 结合双线船闸闸室渗流算例, 通过渗流势分布、渗流量分配和扬压力变化规律的对比分析, 评价等效表孔法计算精度, 并对闸底减压井和锚杆设计提出合理化建议。

## 1 流量等效的表孔半径

### 1.1 单井流量

在均质三向渗流定解问题中, 等势(等水头)面间隔数  $m$  一定时, 等势面分布及其形状与渗透系数、水头差大小无关, 渗流垂直通过等势面  $\phi$ , 三向、轴对称<sup>[14]</sup>、球对称渗流量可分别表示为:

$$\begin{cases} Q = \iint_{\phi} K \frac{dh}{dn} dA \\ Q = 2\pi \int_L K \frac{dh}{dn} r dL \\ Q = 4\pi r^2 K \frac{dh}{dr} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $K$  为渗透系数,  $\text{m/s}$ ;  $\frac{dh}{dn}$  为等势面或等势线上某点法向梯度, 即比降  $J$ ;  $r$  为半径,  $\text{m}$ ;  $A$  为渗流体截面积,  $\text{m}^2$ 。

渗流量与水头差关系可表示为:

$$Q = \frac{1}{\xi} KH \quad (2)$$

$$\text{其中: } H = \sum_i H_i = \frac{Q}{K} \sum_i \xi_i \quad (3)$$

$$\xi = \sum_i \xi_i \quad (4)$$

式中:  $H$ 、 $H_i$  分别为总水头差、各分水头差,  $\text{m}$ ;  $\xi$ 、 $\xi_i$  分别为总阻力系数、各分阻力系数,  $\text{m}^{-1}$ , 其只与渗流区域几何形状及尺度有关, 是边界条件的函数。相邻等势面之间区域有  $H_i = H/m$ ,  $\xi_i = \xi/m$ 。

半无限均质体顶部半球形孔或竖井减压渗流产生的降深及渗流量分别为式(5)、(6)及式(7)、(8)。

$$s = \frac{Q}{2\pi Kr} \quad (5)$$

$$\text{其中: } Q = 2\pi Kr_0 s_0 \quad (6)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi Kl} \left( \text{arsh} \frac{l+z}{r} + \text{arsh} \frac{l-z}{r} \right) \quad (7)$$

$$其中: Q = \frac{4\pi K \lambda_l}{\text{arsh}1.75\lambda_l + \text{arsh}0.25\lambda_l} r_0 s_0 \quad (8)$$

式中:  $s$  为半无限体内降深, m;  $s_0$ 、 $r_0$  为半球孔或竖井降深、半径, m;  $l$  为竖井深度, m;  $z$  为地面以下深度, m;  $\lambda_l$  为竖井长细比,  $\lambda_l = l/r_0$ 。

取  $R = 500$  m 建立轴对称  $(r, z)$  问题有限元模型,  $K = 3.6 \times 10^{-8}$  m/s,  $H = 10$  m, 验证表明半球孔、竖井的流量数值解与解析解吻合良好。如图 1 所示, 圆表孔与半球孔流量均与半径成正比关系, 两者流量曲线斜率比为 0.64。阻力系数  $\xi$  变化如图 2 所示, 圆表孔  $\xi$  远大于竖井  $\xi$ , 半径增大  $\xi$  减小, 竖井深度越大  $\xi$  越小, 且对半径的敏感度不断降低。

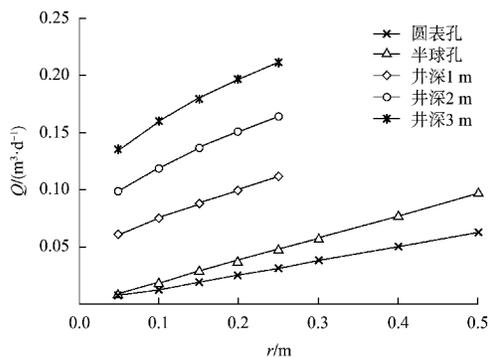


图 1 单井  $Q$  与  $r$  关系

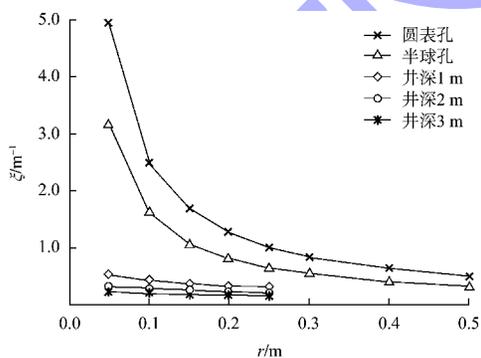


图 2 单井  $\xi$  与  $r$  关系

圆表孔流量可表示为:

$$Q = 4.03 K r_0 s_0 \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得, 圆表孔等效半径  $r_e$  与竖井  $r_0$  流量相等时, 两者换算系数  $\xi_e$  为:

$$\xi_e = \frac{r_e}{r_0} = \frac{3.119\lambda_l}{\text{arsh}1.75\lambda_l + \text{arsh}0.25\lambda_l} \quad (10)$$

$\xi_e$  曲线如图 3 所示, 以竖井  $r_0 = 0.05$  m 为例,  $l = 1, 2, 3$  m 时,  $r_e = 0.475, 0.786, 1.070$  m。井深 1 m 流量等效的圆表孔、半球孔降深曲线对比如图 4 所示, 取  $z = 0.75l$  时降深解析解与有限元地面降深数值解相当接近, 半球孔降深数值解与解析解完全吻合, 在半径 1 m 外圆表孔、半球孔降深曲线几乎重合, 结合图 4、5 可知, 3 种降深曲线在半径 3 m 外差异极小, 圆表孔、竖井等势线接近为与半球孔等势线重合的同心圆。因此, 可将  $\xi$  分为半径 3 m 的内外两部分, 3 种渗流  $\xi$  总体及分部各自相等, 可见流量等效条件下, 总体降压效果接近, 较小的差异仅局限于竖井轴线附近的小范围内。

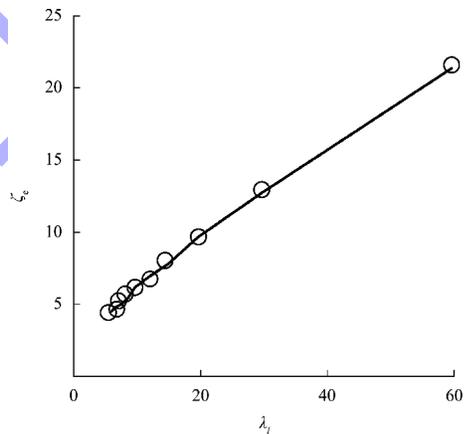


图 3 圆表孔等效半径换算系数

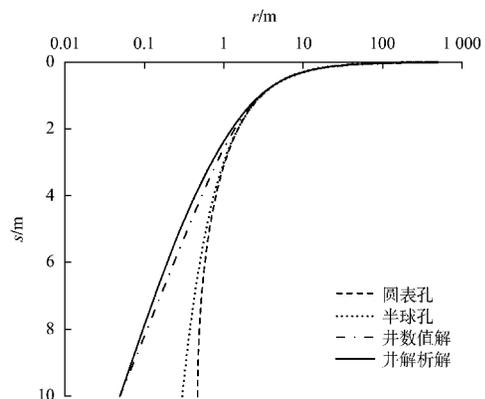


图 4 流量等效的降深曲线

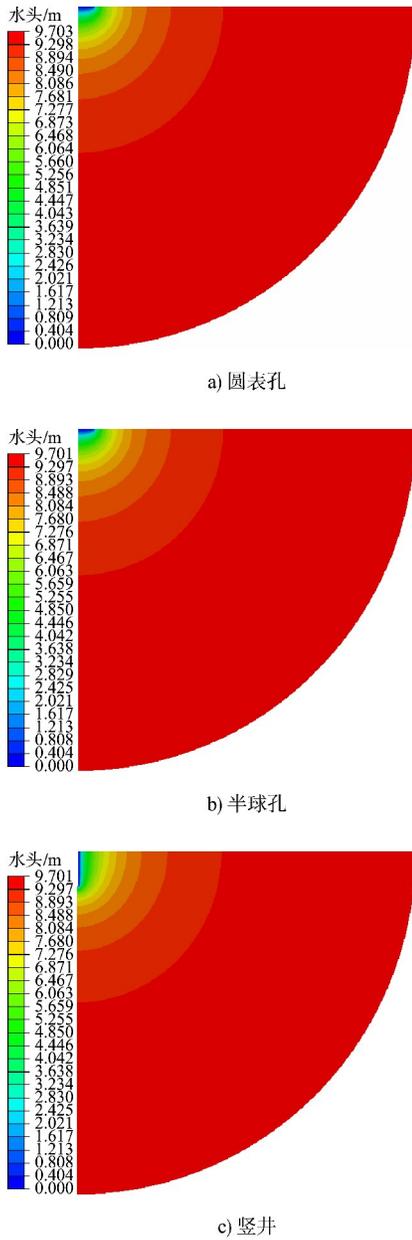


图 5 流量等效条件下等势线比较

1.2 列井与群井流量

等效单井组成群井有总流量及流量分配的对  
比问题, 流量分配将在下文结合算例讨论。

在平面或单宽渗流问题中, 阻力系数  $\xi'$  为无  
量纲参数<sup>[15]</sup>:

$$Q = aq \tag{11}$$

$$\text{其中: } q = \frac{Q}{a} = \frac{1}{a} \iint_{\phi} K \frac{dh}{dn} dA = \frac{1}{\xi'} KH \tag{12}$$

式中:  $q$  为单宽渗流量,  $m^2/s$ ;  $a$  为渗流体厚度,  $m$ ,  
在列井问题中取井距。

列井竖直面以及与其垂直且通过各井轴线、  
井距中点的竖直面, 为无限列井的 3 个无渗流对  
称面。减压列井以垂直于列轴线的双向渗流为主,  
随着井距加大, 各井流量逐渐增大, 最终接近于  
单井流量, 而  $q$  越小,  $\xi'$  越大, 近似与井距成线性  
关系。深度 1 m、半径 0.05 m 减压列井及其等效  
排孔的  $q$  (井孔降深 10 m)、 $\xi'$  变化曲线见图 6。

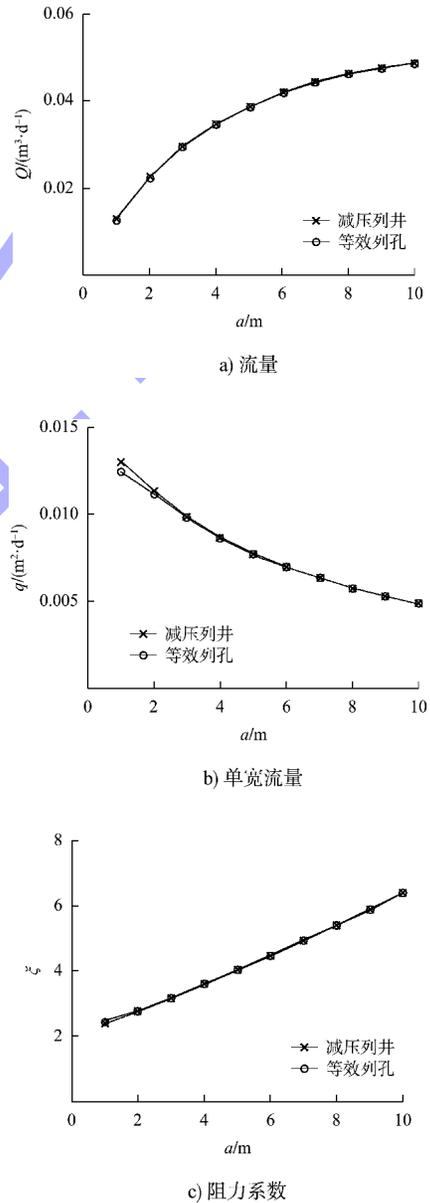


图 6 列井流量与阻力系数

在一维或等截面渗流中:

$$Q = Av \tag{13}$$

$$\text{其中: } v = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \iint_{\phi} K \frac{dh}{dn} dA = \frac{1}{\xi''} KH \tag{14}$$

式中： $v$ 为平均渗流速度，m/s；正方形布置群井问题中 $A=a^2$ ； $\xi''$ 为阻力系数，m。

正方形布置的群井轴线竖直面以及通过井距中点竖直面，为无限群井的4个无渗流对称面。减压群井以一维竖向渗流为主， $Q$ 、 $\xi''$ 变化曲线如

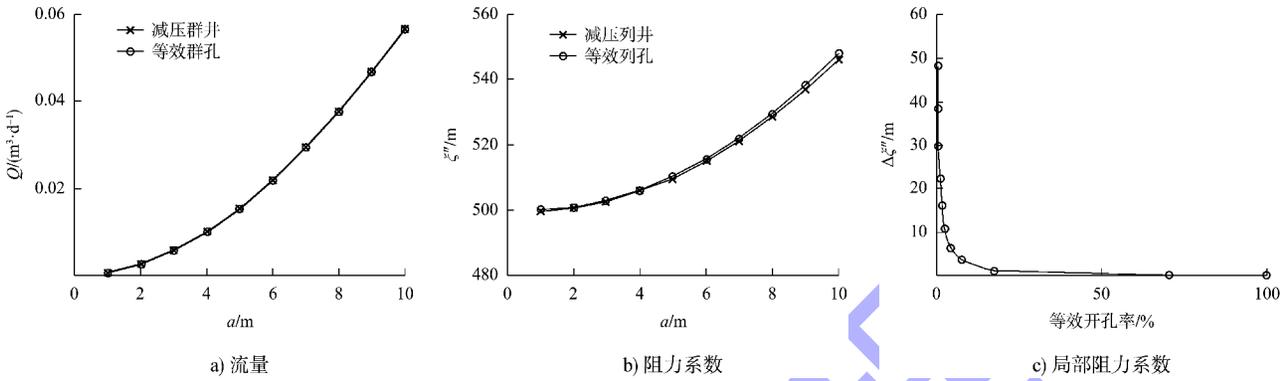


图7 群井流量与阻力系数

## 2 双线船闸闸室渗流模型建立

### 2.1 工程概况

某岩基上双线分离式船闸有效尺度为 300 m×34 m×8 m(长度×宽度×门槛水深)，两线船闸中心间距 63 m。为了减少底板所受的扬压力，在闸首与

闸室的底板施工时预埋 DN110PVC 管，间距 2.0~2.5 m，待底板钢筋混凝土达到设计强度后，再通过 PVC 管钻入岩层 1.0 m，在管井内填 0.5~2.0 cm 卵石。双线闸室底板设有抗浮锚筋，闸墙内趾侧设有 4 道防渗帷幕，闸室结构布置见图 8。

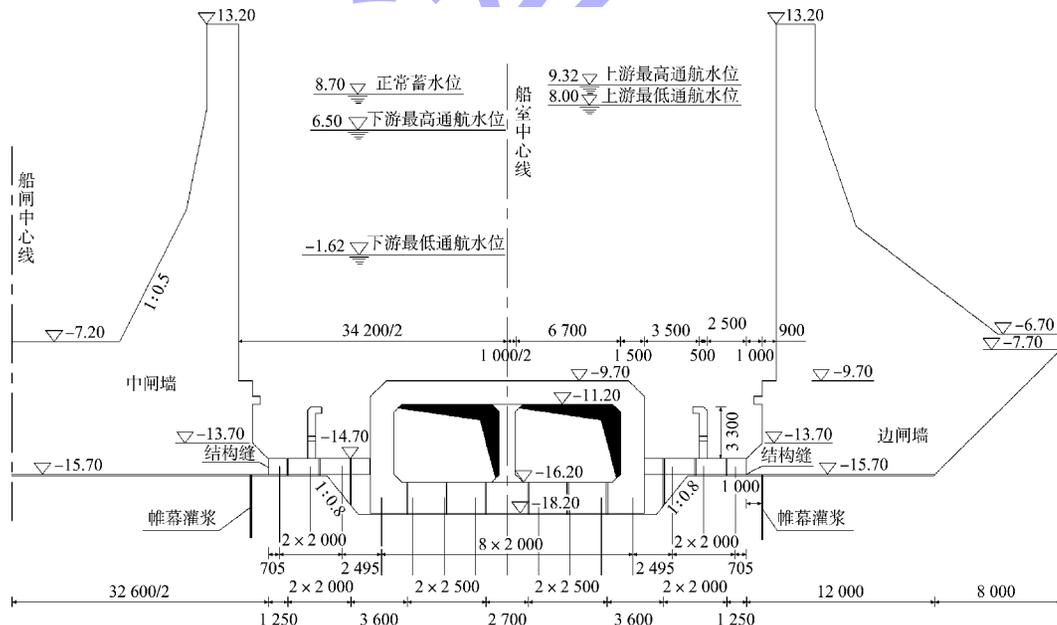


图8 1/2 闸室结构布置 (高程：m；尺寸：mm)

### 2.2 计算模型

双线船闸模型左到右为  $x$  轴向，向下游为  $y$  轴向，向上为  $z$  轴向，坐标原点位于船闸中轴线(中墙墩中心线)上。考虑对称性，地基模型取出水

结构段半长 9 m+结构缝半宽 0.01 m，总长 9.01 m；地基模型总高 241.2 m，基坑深 35.7 m；基坑坡顶外延伸约 200 m，总宽 650 m。

群井渗流模型采用六面体 C3D8P 单元与四面体

C3D10MP 混合单元模拟, 单元总数 79.381 8 万个、节点数 107.997 4 万个。按式(10)计算得等效表孔半径  $r_e=0.475$  m, 群孔模型单元数 13.780 6 万个、节点数 18.790 7 万个, 是群井模型的 1/6, 节约计算时间 70 倍。渗流模型局部见图 9。

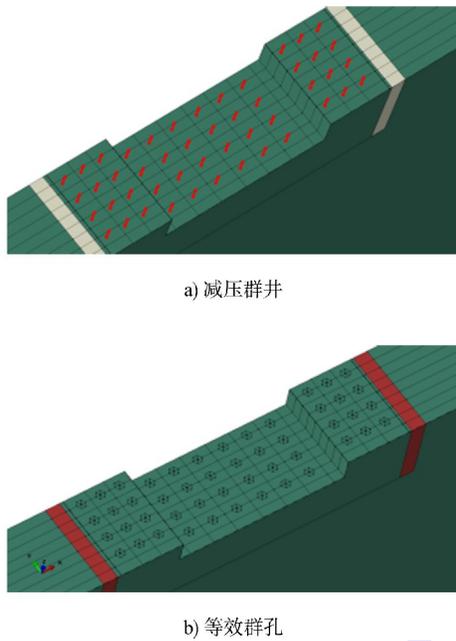


图 9 渗流模型局部

### 2.3 材料参数

闸址地基岩层分布见图 10, 地基参数见表 1。防渗帷幕渗透系数取相应岩层渗透系数的  $10^{-2}$  倍, 其他参数同相应岩层参数。

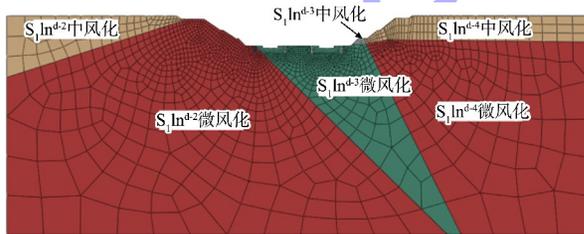


图 10 地基网格划分及岩层分布

表 1 地基计算参数

地层编号及岩性	密度 $\rho_s / (g \cdot cm^{-3})$	孔隙率 $e$	弹性模量 $E_0 / GPa$	泊松比 $\mu$	$K / (10^{-8} m \cdot s^{-1})$
$S_1 ln^{d-2(d-4)}$ 中风化	2.49	0.125	1.2	0.35	36.0
$S_1 ln^{d-3}$ 中风化	2.49	0.125	4.0	0.26	36.0
$S_1 ln^{d-2(d-4)}$ 微风化	2.57	0.091	3.5	0.26	3.6
$S_1 ln^{d-3}$ 微风化	2.57	0.091	6.5	0.22	3.6

### 2.4 计算工况

船闸设计有基本组合的完建、运行、检修工况和特殊组合的洪水、地震等工况。闸室静力分析的水位组合见表 2。本文重点分析左高水右检修工况(组合 3), 此为底板抗浮控制工况。如底板不开孔设置减压井, 锚杆拉力将远大于抗拔力 200 kN。因此, 底板开孔是必要的, 试算表明减压井效果远优于结构缝, 结构横缝减压效果优于纵缝。考虑到结构缝透水的 uncertainty, 安全起见, 入渗处考虑结构缝透水性, 出渗处不考虑结构缝减压效果。中墙结构缝通下游水位, 与右闸底水头差 19.77 m, 远大于左闸室水头差 5.13 m, 中墙结构缝以入渗为主, 考虑透水性计算偏于安全。

表 2 闸室计算工况及各部分水位组合

工况	组合	状态	水位/m		
			边墙外侧、中墙内侧	左线闸内	右线闸内
完建期	1	无水	-	-	-
运行期	2	左高水右低水	-1.62	8.70	-1.62
检修期	3	左高水右检修	3.57	8.70	-
	4	双线检修	3.57	-	-
校核	5	双线挡洪	10.50	10.50	10.50

### 3 计算结果对比分析

#### 3.1 渗流势分布规律

如图 11 左高水右检修渗流势(水头)分布所示, 闸室内 4 道帷幕效果明显, 等势线在帷幕处汇聚, 渗流路径以沿帷幕绕流为主, 右闸内等势气泡衰减剧烈, 呈现良好的减压效果。等效孔与减压井横剖面渗流势分布基本一致, 减压效果大致相同。

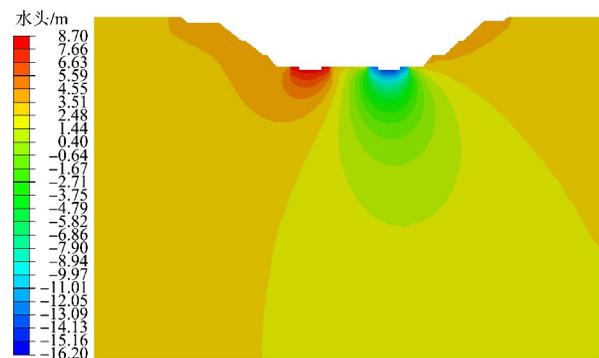


图 11 左高水右检修渗流势分布

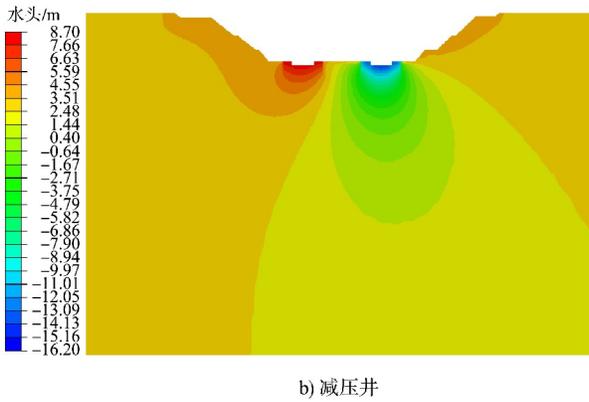
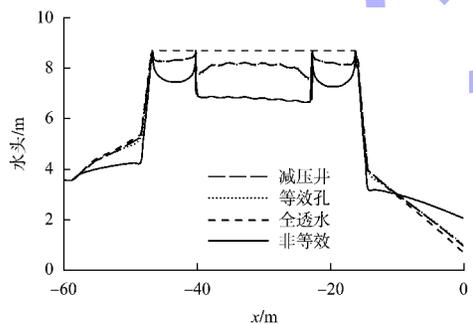
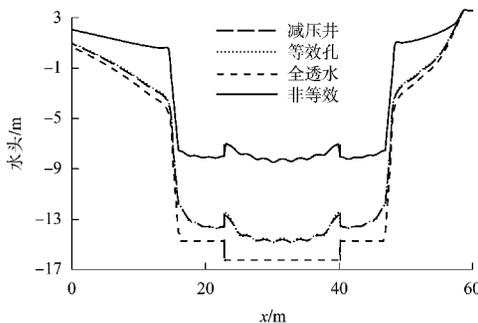


图 11 地基渗流势分布

井距中横断面在闸底及边墙、中墙的水头分布曲线如图 12 所示，其中非等效为半径 0.05 m 表孔、4 道帷幕处均存在水头突降情况。对比全透水闸底水头线可知，减压井效果明显，有效降低了右线水头(如双线闸底不透水，水头均为 3.57 m)；等效孔与减压井相比，边墙、中墙底的水头线几乎重叠，井距中断面闸底水头线吻合一致，井轴线断面闸底水头线整体一致，在井、孔径间存在局部差异。而非等效孔水头线则在全范围内严重偏离实际情况。



a) 左线



b) 右线

图 12 双线船闸井距中横断面水头分布

以左闸室向右闸室渗流路径为例，左线进口段阻力系数为  $\xi'_1$ 、右线出口段阻力系数为  $\xi'_2$ 、其余路径阻力系数为  $\xi'_0$ ，则双线闸底有效水头差  $H_0 = H\xi'_0 / (\xi'_1 + \xi'_2 + \xi'_0)$ 。当闸底完全透水时  $\xi'_1$ 、 $\xi'_2$  为 0， $H_0 = H$ ； $\xi'_1$ 、 $\xi'_2$  越大，在进、出口段水头损失越大，左线水头线越低，右线水头线越高，其降压效果越差，而  $H_0$  越小， $Q$  越小；当闸底完全不透水时， $\xi'_1$ 、 $\xi'_2$  为  $+\infty$ ， $H_0 = 0$ ， $Q = 0$ ，双线闸底水头均为 3.57 m，右线扬压力最大。

### 3.2 渗流量分配规律

双线闸室渗流较为复杂，左墙以来自左闸室的浅层流出为主、向右闸室深层入流为辅，流量比 2.4~3.4；中墙入流向右闸室为主，近左闸侧少量流出，流量比大于 176.3；右墙入流向右闸室为主，来自左墙的出流量极其微小。以减压井计算方案为例，左闸室流向左墙、中墙、右闸室的流量分别为 13.2%、0.2%、86.6%，右闸室来自左墙、左闸室、闸墙、右墙的流量分别为 2.1%、34.9%、15.4%、47.6%，其他方案流量比变化不大。

根据不同路径渗流量及其相应水头差，根据式(7)得出的阻力系数见表 3，右墙-右闸阻力系数最小，其次为左闸-右闸、左闸-左墙、中墙-右闸，阻力系数均较小。

表 3 不同渗流路径的阻力系数

方案	左墙-右闸	左闸-右闸	中墙-右闸	右墙-右闸	左闸-左墙	左闸-中墙
非等效	73.454	4.158	10.247	2.791	5.842	-
等效孔	34.275	2.672	4.752	1.541	3.740	225.432
减压井	33.680	2.623	4.691	1.515	3.649	221.752
全透水	30.399	2.404	4.241	1.380	3.464	221.288

如图 13 所示，右线出流总量为减压井  $-0.742 \text{ m}^3/\text{d}$ ，等效孔  $-0.730 \text{ m}^3/\text{d}$ ，相对误差 1.7%；完全透水  $-0.815 \text{ m}^3/\text{d}$ ，出流量最大。由井(孔)降深计算式可知，流量越大降深越大，减压效果越好，减压井、等效孔出流量横向分布基本一致，表示减压效果的分布一致性。中底板 6 列井出口高程  $-16.2 \text{ m}$ ，边列流量大中列流量小；两侧边底板各 3 列井出口高程  $-14.7 \text{ m}$ ，平均流量小

于中底板, 外侧边列靠近来流, 出流量大于内侧边列。

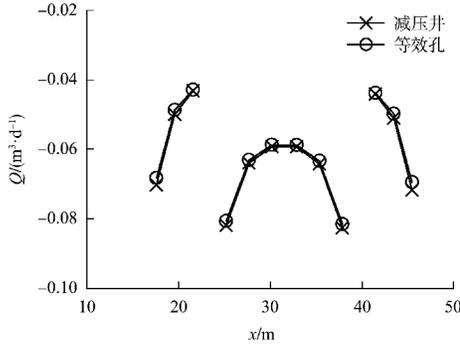


图 13 右线出流横向分布

### 3.3 扬压力变化规律

右线闸底扬压力横向分布见图 14, 纵向 9 m 平均后分析发现, 等效孔、减压井的局部误差要比井轴线断面误差更小, 平均扬压力分别为 32.20、34.04 kPa, 相对误差仅 5.4%。闸底扬压力在完全不透水、完全透水 2 种极限状态之间变化, 近似与闸底流量成线性关系(图 15)。左闸底考虑结构缝透水性, 而右闸底未作考虑, 因此, 左右闸底变化斜率不同, 但相交于完全不透水状态点。

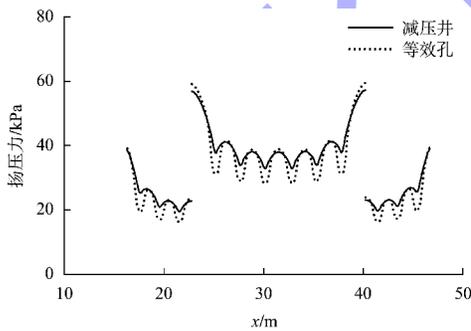


图 14 右线扬压力横向分布

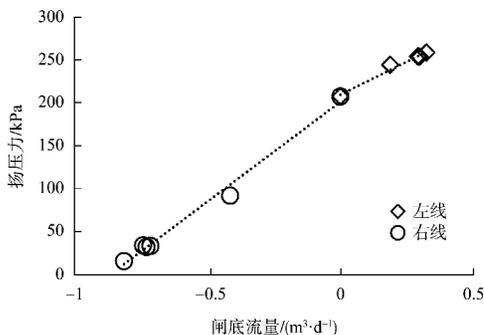


图 15 闸底流量与扬压力

在等效孔模型中, 右线闸底扬压力与开孔率呈双对数二次函数关系(图 16)。闸室边底板自重为 31.9 kPa, 中底板自重为 109.9 kPa, 不计竖井内 0.5~2.0 cm 卵石填料阻力时, 边、中底板扬压力分别 21.6、38.0 kPa, 抗浮稳定系数分别为 1.48、2.89。在船闸使用期, 进出竖井渗流会带入来自闸室或基岩裂隙的细颗粒, 淤积填充在竖井内成为卵石、砂、黏粒混合物, 设其与基岩渗透系数比为 100, 单井流量、圆表孔等效半径应折减 0.58, 等效表孔率需折减 0.33, 边、中底板扬压力分别为 31.3、50.3 kPa, 抗浮稳定系数分别为 1.02、2.19。可见边底板需设置锚杆以提高抗浮稳定性, 中底板则可不设置锚杆。

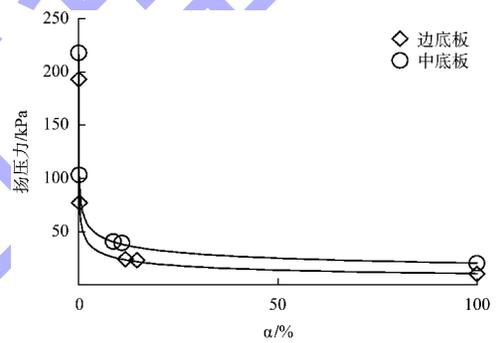


图 16 等效表孔率与扬压力

### 4 结论

1) 等效表孔法既可降低前后处理难度、减小计算工作量、满足工程计算精度要求, 不需要二次开发, 又有根据船闸闸首、闸室减压井布置灵活建模的优点。

2) 建立轴对称  $(r, z)$  坐标系下的单减压井、半球孔和圆表孔数值模型, 验证了减压井、半球孔解析公式, 通过半球孔、圆表孔流量关系与减压井降深公式关联, 给出表孔半径换算估算式。在列井与群井问题中, 列孔与列井、群孔与群井阻力系数相差不大, 整体等效性良好。等效表孔率大于 50%、局部阻力系数小于 0.11 m、等效表孔率小于 10% 后局部阻力系数迅速增大。

3) 针对某双线船闸算例, 应用简化方法将网格、节点数缩减至约原模型的 1/6, 节约计算时间近 70 倍。算例闸室内表孔与减压井横剖面渗流

势分布相似，减压效果相仿，边墙、中墙底的水头线近乎重叠，井距中断面闸底水头线吻合，并轴线断面闸底水头线势同，在井、孔径间存在局部差异。

4) 右闸室流量主要来自于右墙墙后、左侧闸室及中墙结构缝，出流分配比约为 10:7:3。左闸室流量主要向左墙墙后、右闸室溢出，溢流分配比约为 2:13。等效模型与原模型右线出流总流量相对误差仅 1.7%，平均扬压力相对误差 5.4%。等效表孔率小于 10%后扬压力急剧增加，建议等效表孔率不宜小于 10%，而等效表孔率大于 50%时，扬压力基本不再变化且与完全透水情况近似，可直接按底板完全透水进行渗流及结构分析。

**参考文献:**

[1] 谢安丰, 张兰芳. 长洲三、四线船闸高闸墙结构三维有限元分析[J]. 西部交通科技, 2012(8): 124-127.  
 [2] 钮新强, 童迪. 三峡船闸关键技术研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 36-42.  
 [3] 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.  
 [4] 唐明煌. 高边坡衬砌式船闸闸室结构计算方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.

[5] 吴吉春, 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.  
 [6] 王大伟, 卢达聪. 长洲三、四线船闸中间闸室墙结构有限元分析[J]. 西部交通科技, 2012(8): 137-139, 156.  
 [7] 王镭, 刘中, 张有天. 有排水孔幕的渗流场分析[J]. 水利学报, 1992(4): 15-20.  
 [8] 范磊, 姜海霞. 排水子结构统一建模方法及其与 ABAQUS 集成[J]. 水电能源科学, 2010, 28(6): 46-49.  
 [9] 杜延龄, 许国安, 韩连兵. 复杂岩基三维渗流分析方法及其工程应用研究[J]. 水利水电技术, 1991(1): 2-9.  
 [10] 王建, 姜海霞. 排水孔模拟的汇线单元法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 677-684.  
 [11] 毛昶熙, 李祖贻, 陈平. 堤坝渗流以沟代并列的计算方法[J]. 水利学报, 1989(7): 49-55.  
 [12] 王恩志, 王洪涛, 王慧明. “以缝代并列”: 排水孔幕模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 98-101.  
 [13] 朱新望, 何思远, 许瑞东, 等. 船闸闸室透水孔与减压管的排水效果分析[J]. 水道港口, 2020, 41(1): 78-85.  
 [14] 朱璟赫, 何思远, 彭天驰, 等. 空间轴对称渗流的阻力系数法研究[J]. 水道港口, 2020, 41(1): 113-118.  
 [15] 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.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 69 页)

[7] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总平面设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.  
 [8] 李晓楠, 龙翔宇, 高成岩. 平陆运河先导段船舶操纵仿真模拟试验研究[J]. 珠江水运, 2024(3): 92-95.  
 [9] 杨斌, 何俊辉, 闫强. 平陆运河第五标段船舶操纵仿真模拟试验研究[J]. 西部交通科技, 2023(12): 3-6.  
 [10] 付萌, 刘桂云. 宁波舟山港港口能力与功能适应性评价[J]. 中国航海, 2022, 45(4): 87-93, 99.  
 [11] 武汉长江船舶设计院有限公司, 交通运输部珠江航务管理局. 内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列第 3 部分: 西江航运干线: GB 38030. 3—2019[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2019.  
 [12] 殷健, 耿卫宁, 付鹏成, 等. 广州南沙自动化码头与北部湾钦州自动化码头建设方案探讨[J]. 中国水运(下

半月), 2021, 21(2): 88-90.  
 [13] 李小阳, 迟金生, 张亚飞, 等. 门机智能控制系统在黄骅港杂货码头的应用[J]. 港口科技, 2023(12): 15-19.  
 [14] 于文龙, 王正方, 韩冬, 等. 自动化控制技术在门座式起重机上的应用研究[J]. 中国设备工程, 2023(7): 21-23.  
 [15] 叶雅妮, 丁涛. 全自动化与传统集装箱码头投入产出比较研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(5): 981-984.  
 [16] 麦宇雄, 刘洋, 梁浩. 自动化集装箱码头平面与工艺总体布局现状与发展趋势[J]. 水运工程, 2022(10): 1-7.  
 [17] 白鹏鹏. 集装箱铁水联运码头陆域平面布局优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
 [18] 李健. 自动化集装箱码头平面布局多目标仿真优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

(本文编辑 赵娟)