

DOI: 10.11779/CJGE202111004

截排减压抗浮多井系统简化计算及设计方法

朱东风^{1,2}, 曹 洪¹, 骆冠勇^{*1}, 潘 泓¹, 罗赤宇²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 对于截排减压抗浮系统中的减压井群(多井系统), 目前除采用数值法进行渗流分析外, 尚无实用的简化计算方法, 不利于推广使用。鉴于此, 提出了简化计算方法: 对于圆形止水帷幕内侧均匀分布的多井系统, 假定止水帷幕内侧边界水头为常数, 通过共形映射推导得到多井系统的水头分布; 对于非圆形止水帷幕, 可将其等效为圆形近似求解; 采用阻力系数法, 在考虑止水帷幕透水和绕渗的基础上, 将止水帷幕内外侧渗流场串联起来, 求解得到总流量。经算例验证, 简化算法与有限元法相比结果差距较小, 且仅需提供不多的几何参数, 即可求得较精确的结果。在排水减压抗浮设计时, 控制板底水头和井周水力坡降是关键, 为兼顾安全性和经济性, 需对参数 n , r , h_w 及 r_w 反复调整以达到最佳效果。

关键词: 抗浮; 渗流; 多井系统; 止水帷幕; 共形映射

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)11-1986-08

作者简介: 朱东风(1984—), 男, 博士后, 主要从事渗流及岩土工程方面的研究工作。E-mail: dongfengzhu@163.com。

Simplified calculation and design method of multi-well system for anti-uplifting based on intercepting and discharging water

ZHU Dong-feng^{1,2}, CAO Hong¹, LUO Guan-yong¹, PAN Hong¹, LUO Chi-yu²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: For the multi-well system in the anti-uplifting system based on intercepting and discharging water, there is no practical simplified method except the numerical method for seepage analysis, which is not conducive to its application. In view of this, a simplified method is proposed. The idea is as follows: for the multi-well system with even distribution inside the circular cut-off wall, the hydraulic head on the inside boundary of the cut-off wall is assumed to be constant, and the distribution of the hydraulic head of the multi-well system is deduced through conformal mapping. For the non-circular cut-off wall, it can be equivalent to a circle to obtain an approximate solution. The resistance coefficient method is adopted to connect the inner and outer seepage fields of the cut-off wall in series on the basis of considering the water leakage and by-pass seepage of the cut-off wall, and the total flow can be obtained. After verification, a comparison with the finite element method shows that the difference between the simplified algorithm and the finite element method is smaller, and it only needs to provide a few geometric parameters to get more accurate results. The control of the hydraulic head at the bottom of the floor and the hydraulic slope around the well are the key points in the anti-uplifting design process based on drainage decompression. Moreover, in order to give consideration of both safety and economy, parameters n , r , h_w and r_w need to be adjusted repeatedly to achieve the best effect.

Key words: anti-uplifting; seepage; multi-well system; cut-off wall; conformal mapping

0 引言

在截排减压抗浮系统中, 位于止水帷幕内侧的减压井系统是主要的排水通道, 确定井流量和止水帷幕内侧的水头分布是抗浮设计的关键一环, 将为水泵及管路的设计以及验算底板配筋和裂缝宽度提供依据^[1-2]。特别是对于采用了人工疏水层的地下结构, 由于疏水层厚度和透水性较均匀, 非常适合采用简化计算方法。

然而, 目前除了采用渗流分析之外, 尚无实用的简化计算方法来确定多井系统流量和水头分布。

对于多井系统的求解, 在不存在隔水边界的条件

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978282); 广东省自然科学基金项目(2018A030313383, 2020A1515010583)

收稿日期: 2021-01-04

*通信作者(E-mail: luogy@scut.edu.cn)

下, 相互干扰的井群在任意一点处的水位降深等于各单井在这一点的降深的叠加^[3]。基于叠加原理, 毛昶熙给出了任意布置的承压和无压井群在任意一点降深的解^[4]。如果井群沿着闭合边界布置, 井群区域的降漏斗接近圆形, 各井的影响半径接近相等, 各单井的流量也近似相同, 则可以得到将井群等效为圆环分布时的流量和降深结果^[4-5]。近似计算时, 常将沿任一封闭轮廓布置的井群虚拟为一个“大井”, 井群轮廓以内的水位近似与“大井”水位相同, 则井群流量可采用 Dupuit 公式表达, 即“大井公式”^[4]。当存在隔水边界且完全不透水时, 任一点的水位降深可按镜像叠加法求解, 即隔水边界可按照对称布置的两个抽水井来模拟, 线源边界按照对称布置的一个抽水井和一个注水井来模拟。在基坑降水设计过程中, 吴林高^[6]采用该方法对止水帷幕内侧开始抽水至抽水稳定时的非稳定渗流过程进行了求解。

然而, 止水帷幕并不完全隔水, 止水帷幕底部的绕渗问题是存在的, 止水帷幕墙体本身的透水性也不能忽视, 例如板桩接缝渗水、止水帷幕因施工缺陷渗水等^[7]。在截排减压抗浮系统中, 这些绕渗和墙体透水的流量是排水的主要来源。对于止水帷幕的绕渗和墙身透水问题, 毛昶熙^[4]给出了不考虑桩厚度和桩身透水性, 只考虑桩底绕渗的单宽流量计算公式。王仁东^[8]则考虑了止水帷幕厚度, 采用保角变换法求出了桩底绕渗情况下的水头和流量解, 并分析了不考虑止水帷幕厚度对结果的影响。胡瑶^[9]则对考虑墙体透水时的镜像叠加法作了初步的近似计算和数值模拟研究。

本文以止水帷幕内侧呈圆形(或等效为圆形)均匀布置的多井系统为研究对象, 考虑止水帷幕的绕渗和墙身透水问题, 提出止水帷幕内侧多井流量和水头分布的实用简化计算方法, 并给出截排减压抗浮系统设计流程, 为该方法推广应用扫清障碍。

1 简化计算思路及基本假定

1.1 简化计算思路

在抗浮计算和设计时, 首先需要明确抗浮需求, 即根据地下结构自身能提供的抗浮力及周边环境条件, 为地下结构确定一个合理的上限水位, 明确排水抗浮目标。

当采用截排减压抗浮系统时, 需要求解的几个问题是排水总流量、减压后底板下的水头分布以及减压井布置的数量、位置、井径和井口高程参数。

为求解上述问题, 以止水帷幕为界将渗流场分为内侧和外侧两部分(图 1), 两侧的总流量相同, 在止水帷幕处再以恰当的形式联合起来。由于外侧渗流场

较为简单, 关键是要求解内侧渗流场。

1.2 简化计算基本假定

假定止水帷幕为圆形, 减压井沿圆周均匀布置于其内侧。对于其它不规则多边形止水帷幕, 可根据复变函数论中的 Schwarz-Christoffel 变换, 将其共形映射为圆形^[10], 井点坐标及待求点坐标同理可映射到圆形渗流场中。当多边形等边时, 这种映射关系可解析, 不等边时需要采用数值法求解。

设止水帷幕内侧半径为 R , 减压井数为 n , 单井流量为 q , 减压井所在圆周半径为 r , 两井间圆心角为 2β , 见图 1。减压井半径为 r_w , 井口高程为 h_w 。外侧渗流场影响半径为 R_0 , 远场边界水头为 H_0 。

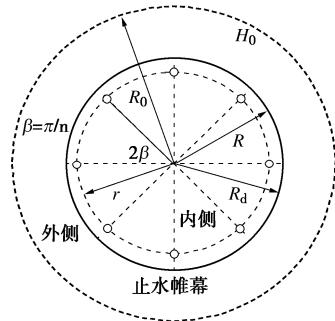


图 1 止水帷幕内外侧渗流场

Fig. 1 Seepage fields inside and outside cut-off wall

根据对称性, 只取两口减压井间的一半区域分析, 即图 2 中的扇形域 OM_1M_2 , 减压井位于 M_3 , 在 OM_2 线上。假定止水帷幕内侧为等水头线, 其水头可与止水帷幕外侧区域相联系(见下节内容)。这里等水头线假定并不完全合理, 例如 M_1 距离减压井比 M_2 更远, 其水头可能比 M_2 点更高, 但差距不大, 且采用 M_1 点作控制水头并不影响抗浮安全性。

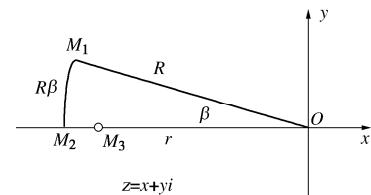


图 2 z 平面

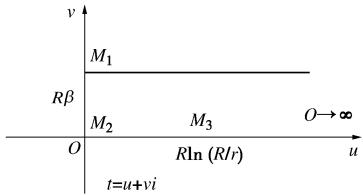
Fig. 2 z plane

2 止水帷幕内侧渗流场求解

2.1 平面映射

(1) z 平面映射到 t 平面

要求解 OM_1M_2 区域的不规则渗流场, 可先将其映射到一个规则平面, 这里可用复变函数中的对数变换将扇形域共形映射(保角变换)到一个带形域^[10], 即将 z 平面映射到 t 平面, 见图 2, 3。

图 3 t 平面Fig. 3 t plane

即作如下对数变换:

$$t = C_1 \ln z + C_2 \quad \circ \quad (1)$$

在 z 平面和 t 平面上, M_1, M_2 点分别有:

$$M_1: z = R \cdot e^{i\pi(1-1/n)}, \quad t = iR\beta = iR\pi/n;$$

$$M_2: z = R \cdot e^{i\pi}, \quad t = 0.$$

将其代入式 (1) 得 $C_1 = -R$, $C_2 = R \ln(e^{i\pi} R)$ 。

即有

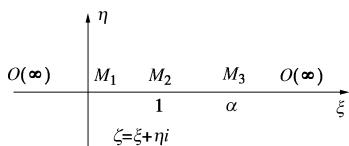
$$t = R \ln \frac{R \cdot e^{i\pi}}{z} \quad \circ \quad (2)$$

(2) ζ 平面映射到 t 平面

继续将图 4 中的上半平面 ζ 平面映射到 t 平面,

这里使用 Schwarz-Christoffel 变换^[10]:

$$t = C_3 \int \frac{d\zeta}{\sqrt{\zeta \cdot \sqrt{\zeta-1}}} + C_4 \quad \circ \quad (3)$$

图 4 ζ 平面Fig. 4 ζ plane

在 M_1, M_2 点分别有:

$$M_1: t = iR\pi/n, \quad \zeta = 0;$$

$$M_2: t = 0, \quad \zeta = 1.$$

将其代入式 (3) 得 $C_3 = R/n$, $C_4 = 0$ 。即有

$$t = \frac{2R}{n} \ln(\sqrt{\zeta} + \sqrt{\zeta-1}) \quad \circ \quad (4)$$

在 M_3 点有: $t = R \ln(R/r)$, $\zeta = \alpha$ 。

将其代入式 (4) 求得 $\alpha = \cosh^2[n \ln(R/r)/2]$ 。

将式 (4) 代入式 (2) 求得 z 平面和 ζ 平面的映射关系:

$$\zeta = \frac{1}{4} [(R e^{i\pi}/z)^{n/2} + (R e^{i\pi}/z)^{-n/2}]^2 \quad \circ \quad (5)$$

(3) ζ 平面映射到 ω 平面

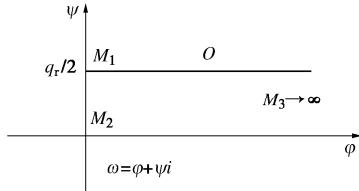
建立图 5 所示的复势平面 ω 平面, 并将 ζ 平面映射到 ω 平面, 以建立 z 平面和复势平面 ω 的关系, 这里继续采用 Schwarz-Christoffel 变换:

$$\omega = C_5 \int \frac{d\zeta}{\frac{1}{\zeta^2} (\zeta-1)^{\frac{1}{2}} (\zeta-\alpha)} + C_6 \quad \circ \quad (6)$$

图 5 中 q_r 为 M_3 点单井在单位厚度的出水量,

$q_r = q/(KT)$, 为研究区域 OM_1M_2 总流量的两倍, K, T 分别为研究区域土层的渗透系数和厚度。

在 M_1, M_2 点分别有:

图 5 ω 平面Fig. 5 ω plane

$$M_1: \omega = i \frac{q_r}{2}, \quad \zeta = 0;$$

$$M_2: \omega = 0, \quad \zeta = 1.$$

将其代入式 (6) 得 $C_5 = -\frac{q_r}{2\pi} \sqrt{\alpha(\alpha-1)}$, $C_6 = -\frac{q_r}{2\pi} (\ln 2 - i\pi)$ 。

即有

$$\omega = -\frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{\alpha-1}\sqrt{\zeta} - \sqrt{\alpha}\sqrt{\zeta-1}}{\sqrt{\alpha-1}\sqrt{\zeta} + \sqrt{\alpha}\sqrt{\zeta-1}} \quad \circ \quad (7)$$

将 $\alpha = \cosh^2[n \ln(R/r)/2]$ 及式 (5) 代入式 (7) 得

$$\omega = -\frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{(R e^{i\pi}/z)^n - 1}{(R/r)^n - (R e^{i\pi}/z)^n} \quad \circ \quad (8)$$

式 (8) 即为复势平面与原渗流场 z 平面的映射关系。

2.2 特征点的势函数

(1) M_1M_2 段

令 $z = R \cdot e^{i\theta}$, $(\pi - \beta) < \theta \leq \pi$, 代入式 (8) 得

$$\omega = -\frac{q_r}{2\pi} n(\pi - \theta) i \quad , \quad (9)$$

$$\psi = -\frac{q_r}{2\pi} n(\pi - \theta) \left(0 \leq \psi \leq \frac{q_r}{2} \right) \quad \circ \quad (10)$$

上式表明, 在 M_1M_2 段, 势函数为常数 0, 流函数呈线性分布, 与计算基本假定相符。

(2) OM_1 段

令 $z = s e^{i\pi(1-1/n)}$, $0 \leq s \leq R$, 代入式 (8) 得

$$\omega = \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{(s/R)^n + (R/r)^n}{1 + (s/r)^n} + i \frac{q_r}{2} \quad \circ \quad (11)$$

在 O 点, 令 $s \rightarrow 0$, 有

$$\omega = \frac{q_r n}{2\pi} \ln \frac{R}{r} + i \frac{q_r}{2} \quad \circ \quad (12)$$

由于 M_1 处位势为 0, 上式表明 O 点位势高于(或水头低于) M_1 点 $\frac{q_r n}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$ 。

(3) OM_2 段

令 $z = s e^{i\pi}$, $0 \leq s \leq R$, 代入式 (8) 得

$$\omega = \begin{cases} \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{(R/r)^n - (s/R)^n}{(s/r)^n - 1} & (r < s < R) \\ \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{(R/r)^n - (s/R)^n}{1 - (s/r)^n} + i \frac{q_r}{2} & (0 < s < r) \end{cases} \quad (13)$$

在 M_3 点, 令 $s=r$, 可见势函数趋于正无穷, 水头则趋于负无穷。

(4) 井边

在 M_3 点附近, 取井边附近的两点 z_1 和 z_2 :

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= (r + r_w) e^{i\pi}, \\ z_2 &= (r - r_w) e^{i\pi} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

代入式 (8) 得求得两点的势函数 φ_1 , φ_2 为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{(R/r)^n - [(r + r_w)/R]^n}{[(r + r_w)/r]^n - 1}, \\ \varphi_2 &= \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{(R/r)^n - [(r - r_w)/R]^n}{1 - [(r - r_w)/r]^n} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

若 $r_w \ll r$, 则两点的势函数值可近似为

$$\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx \varphi_w = \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{2r \operatorname{sh}[n \ln(R/r)]}{nr_w} \quad (16)$$

式中, φ_w 为井边圆周势函数的近似值。对于不在 OM_2 线上的其它井边圆周上各点, 也有同样的特性, 表明井边不同方位的水头近似为常值。

(5) 场地水头换算

令场地水头为 H , 水头与势函数 φ 的关系为 $H = -\varphi$, 由于势函数零点位于圆弧 M_1M_2 上, 现以井口高程 h_w 为基点, 根据势函数算得场地水头为

$$H = -\varphi + \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{2r \operatorname{sh}[n \ln(R/r)]}{nr_w} + h_w \quad (17a)$$

若抗浮设计时以 OM_1 线上的水头值为设计依据, 利用式(11), (17a) 可得该线上距离圆心为 s ($0 \leq s \leq R$) 的点的水头值为

$$H = \frac{q_r}{2\pi} \ln \frac{2r \operatorname{sh}[n \ln(R/r)][1 + (s/r)^n]}{nr_w[(s/R)^n + (R/r)^n]} + h_w \quad (17b)$$

现设置不同条件, 观察 OM_1 线上的水头随井数量 n 的变化, 令 $R=100$ m, $Q=300$ m³/d, $r_w=0.5$ m, $T=0.5$ m。这里 T 取 0.5 m 相当于设置一层人工疏水层。其它条件及 OM_1 线水头分布见图 6。

从图 6 可以看到, 当土层渗透系数较大时 (本算例为 7×10^{-3} cm/s, 但一般可认为渗透系数约大于等于 1×10^{-3} cm/s 即为较大), 设置较少数量的减压井就可以达到较好的降压效果 (平均约为每万平方 3~4 口井), 随着土层渗透系数的降低, 要达到相同的降压效果减压井数量需要迅速增加; 同时, 当井数量达到一定值, 如每万平方米 10 口井, 再增加井数量减压效果亦不明显; 当减压井适当靠近止水帷幕布置, 减压范围较大, 减压效果更明显。

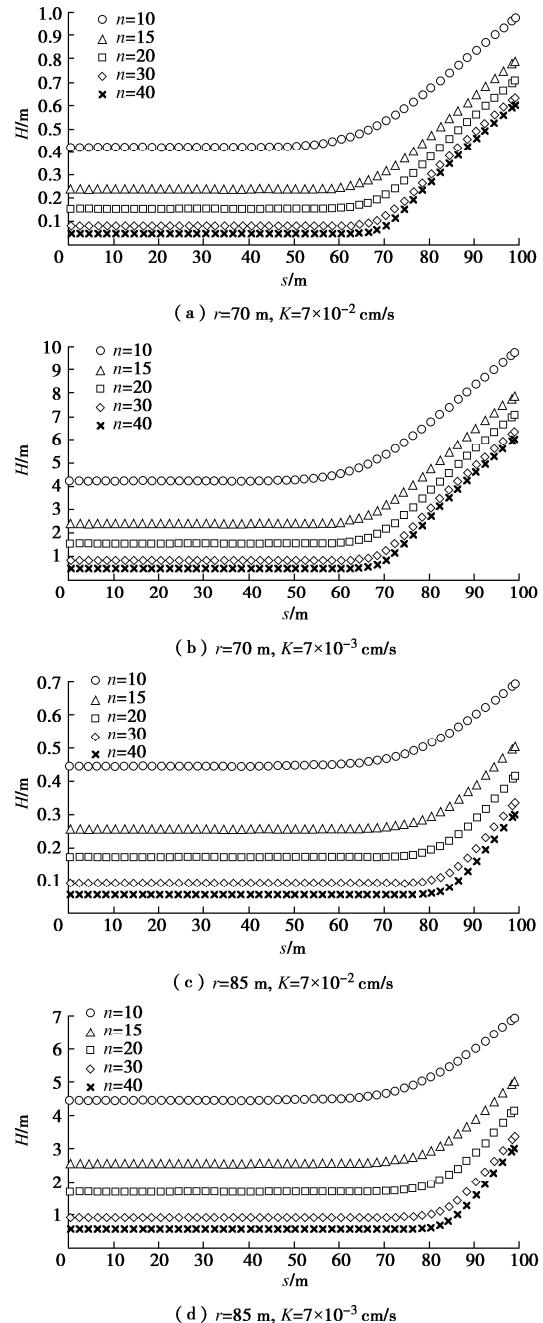


图 6 不同井数量 n 时 OM_1 的水头分布

Fig. 6 Distribution hydraulic head of OM_1 with different numbers of wells

3 止水帷幕内外侧渗流场串联求解

3.1 流量连续性条件

设止水帷幕内侧半径为 R , 外侧半径为 R_d , 内侧水头为 H_R , 外侧水头为 H_d ; 止水帷幕厚度为 b , 渗透系数为 K_w ; 渗流场影响区半径为 R_0 , 影响区边缘水头为 H_0 。减压井总流量 $Q=nq$ 。总流量在止水帷幕外侧按轴对称均匀分布, 向内侧的渗流及通过止水帷幕的水量按质量守恒也为 Q 。止水帷幕厚度 b 相对较小, 在计算中可简化成有阻力的薄墙。

3.2 止水帷幕外侧水头损失

止水帷幕外侧渗流场可分承压和潜水两种模式。取止水帷幕外侧单位宽度圆环流场分析, 根据达西定律, 对主要含水层为承压土层有(图7(a)):

$$H_0 - H_d = \frac{Q}{2\pi K_0 T_0} \ln \frac{R_0}{R_d} , \quad (18a)$$

式中, K_0 为止水帷幕外侧承压强透水层的渗透系数, T_0 为承压强透水层的厚度。如有多层渗透系数相差不大的强透水层, 可采用等效渗透系数。

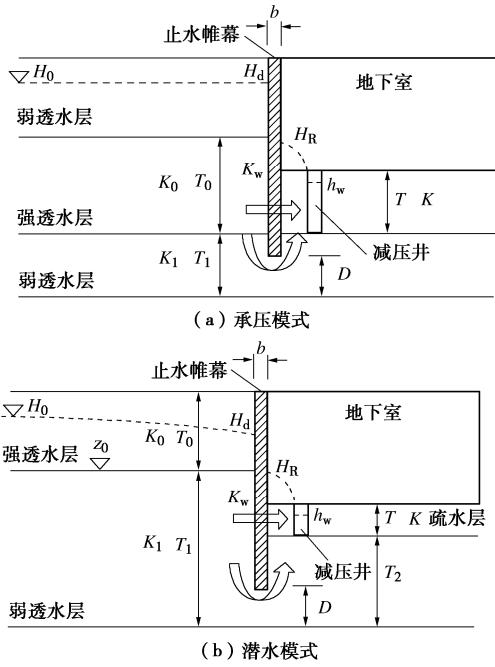


图 7 止水帷幕渗流形态

Fig. 7 Seepage patterns of cut-off wall

式(18a)也可写为

$$\left. \begin{aligned} H_0 - H_d &= \frac{Q}{K_0} \xi_1 , \\ \xi_1 &= \frac{1}{2\pi T_0} \ln \frac{R_0}{R_d} . \end{aligned} \right\} \quad (18b)$$

当止水帷幕外侧主要含水层为潜水层则有(图7(b)):

$$H_0^2 - H_d^2 = \frac{Q}{\pi K_0} \ln \frac{R_0}{R_d} , \quad (19a)$$

式中, K_0 为止水帷幕外侧潜水层的渗透系数。该式设潜水层底面为水头基准面, 若潜水层为多层土, 则最下一层土的底面为基准面, 若取其它基准面, 且潜水层底面高程为 z_0 , 则式(19a)变为

$$H_0 - H_d = \frac{Q}{2\pi K_0 T'_0} \ln \frac{R_0}{R_d} . \quad (19b)$$

式(19b)也可写为

$$\left. \begin{aligned} H_0 - H_d &= \frac{Q}{K_0} \xi_1 , \\ \xi_1 &= \frac{1}{2\pi T'_0} \ln \frac{R_0}{R_d} , \end{aligned} \right\} \quad (19c)$$

$$\left. \begin{aligned} T'_0 &= (h_0 + h_d)/2 , \\ h_0 &= H_0 - z_0; \quad h_d = H_d - z_0 . \end{aligned} \right\} \quad (19d)$$

由于式(19d)中包含未知量 H_d , 使得后续计算需要迭代, 即先赋予 H_d 一个略小于 H_0 的初值代入式(19c), (19d)算得 ξ_1 , 并由后续算得流量 Q , 然后将 Q 值回代式(19c)求得 H_d 的新值, 如此反复迭代 3~4 次即可达到较好的精度。

3.3 止水帷幕处的水头损失

止水帷幕处的渗流包含墙体透水和墙底绕渗两部分^[11], 设墙体透水总流量为 Q_1 , 墙底绕渗总流量为 Q_2 , 即有

$$Q_1 + Q_2 = Q = nq . \quad (20)$$

根据止水帷幕外侧渗流场的不同, 可按两种模式计算。

(1) 承压模式

当止水帷幕外侧渗流场为承压模式时(图7(a)), 对于止水帷幕墙体透水部分, 根据达西定律可以按以下近似公式计算:

$$H_d - H_R = \frac{Q_1}{2\pi R K_w} \cdot \frac{b}{T_0/2 + T/2} . \quad (21a)$$

式(21a)也可写为

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{(H_d - H_R) 2\pi R K_w}{\xi_a} , \\ \xi_a &= \frac{b}{T_0/2 + T/2} . \end{aligned} \right\} \quad (21b)$$

对于止水帷幕墙底绕渗部分, 可根据努麦诺夫提出的“局部水头损失的总和计算法”求得, 具体过程可见文献[11, 12], 见下式:

$$H_d - H_R = \frac{Q_2}{2\pi R K_1} \left[\frac{b}{D} + \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_1}{D} \ln \frac{T_1 + D}{T_1 - D} + \ln \frac{T_1^2 - D^2}{D^2} \right) \right] , \quad (22a)$$

式中, K_1 为止水帷幕底部弱水层的渗透系数, D 为止水帷幕底部弱水层的厚度, 式(22a)也可写为

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= \frac{(H_d - H_R) 2\pi R K_1}{\xi_b} , \\ \xi_b &= \frac{b}{D} + \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_1}{D} \ln \frac{T_1 + D}{T_1 - D} + \ln \frac{T_1^2 - D^2}{D^2} \right) . \end{aligned} \right\} \quad (22b)$$

(2) 潜水模式

当止水帷幕外侧渗流场为潜水模式时(图7(b)), 止水帷幕墙体透水部分的流量计算表达式与式(21b)相同, 但 ξ_a 的形式有所不同, 见下式:

$$\xi_a = \frac{b}{H_d - z_0 + T} . \quad (23)$$

因 H_d 值未知, 也需要先赋予初值并迭代计算。对于止水帷幕墙底绕渗部分, 其流量计算表达式与式

表 1 计算结果比较

Table 1 Comparison of calculated results

n	模型 1								模型 2							
	$Q/(m^3 \cdot d^{-1})$		H_d/m		$H_R/m(M_1)$		$H_R/m(M_2)$		$Q/(m^3 \cdot d^{-1})$		H_d/m		$H_R/m(M_1)$		$H_R/m(M_2)$	
	本文	有限元	本文	有限元	本文	有限元	本文	有限元	本文	有限元	本文	有限元	本文	有限元	本文	有限元
4	606	560	5.3	5.2	2.3	2.9	2.3	2.0	392	368	5.3	5.4	3.0	3.7	3.0	2.7
8	741	717	5.2	4.9	1.5	1.7	1.5	1.5	503	504	5.1	5.2	2.1	2.1	2.1	2.1
16	823	802	5.1	4.9	1.0	1.1	1.0	1.1	574	586	5	5	1.4	1.5	1.4	1.5
24	850	836	5.1	4.8	0.9	0.9	0.9	0.9	597	611	5	5	1.2	1.3	1.2	1.3
32	862	851	5.1	4.8	0.8	0.8	0.8	0.8	607	627	5	4.9	1.1	1.2	1.1	1.2

(22b) 相同, 但 ξ_b 的内容有变化, 见下式:

$$\xi_b = \frac{b}{D} + \frac{1}{\pi} \left(\frac{T_1}{D} \ln \frac{T_1+D}{T_1-D} + \ln \frac{T_1^2 - D^2}{D^2} + \frac{T_2}{D} \ln \frac{T_2+D}{T_2-D} + \ln \frac{T_2^2 - D^2}{D^2} \right) \quad (24)$$

将式 (21b), (22b) 相加并代入式 (20) 可得

$$\left. \begin{aligned} H_d - H_R &= \frac{Q}{2\pi R} \xi_s, \\ \xi_s &= \frac{\xi_a \xi_b}{K_w \xi_b + K_1 \xi_a}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

3.4 止水帷幕内侧水头损失

在式 (17a) 中, 令 $\varphi=0$, $q_r=Q/(nKT)$, 可得

$$H_R - h_w = \frac{Q}{2\pi nKT} \ln \frac{2r \operatorname{sh}[n \ln(R/r)]}{nr_w} \quad (26a)$$

或写为

$$\left. \begin{aligned} H_R - h_w &= \frac{Q}{K} \xi_2, \\ \xi_2 &= \frac{1}{2\pi nT} \ln \frac{2r \operatorname{sh}[n \ln(R/r)]}{nr_w}. \end{aligned} \right\} \quad (26b)$$

将式 (18b) 或 (19b)、(25)、(26b) 相加可得

$$H_0 - h_w = Q \left(\frac{\xi_1}{K_0} + \frac{\xi_2}{K} + \frac{\xi_s}{2\pi R} \right) \quad (27)$$

ξ_1 , ξ_2 , ξ_a , ξ_b 均称为阻力系数, 求得这 4 个系数即可由式 (27) 求得总流量 Q , q_r 。并可由式 (17b) 求出特征点水头, 作为地下结构抗浮设计的依据。这种以求阻力系数的方式联合求解止水帷幕内外侧渗流场的方法也叫阻力系数法。

4 算例验证

为验证本文简化算法, 建立两个计算模型, 分别采用有限元法和本文算法计算。模型 1 为承压模式, 几何参数 $T=1 m$, $T_0=4 m$, $T_1=3 m$, $D=2.5 m$, $R=80 m$, $R_0=200 m$, $r=65 m$, $r_w=0.5 m$, $b=0.8 m$, $h_w=0 m$, $H_0=5.8 m$, 渗透系数 $K=5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, $K_0=5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,

$K_1=5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $K_w=5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。模型 2 为潜水模式, 模拟人工疏水层, 几何参数 $T=0.5 m$, $T_0=3 m$, $T_1=7 m$, $T_2=3.5 m$, $D=2.5 m$, $z_0=3 m$, $R=80 m$, $R_0=200 m$, $r=65 m$, $r_w=0.5 m$, $b=0.8 m$, $h_w=0 m$, $H_0=5.8 m$, 渗透系数 $K=5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, $K_0=5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, $K_1=5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $K_w=5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。有限元模型采用华南理工大学岩土工程研究所开发的《多层透水地层渗流分析程序》建立, 模型 1 中表层弱透水覆盖层渗透系数取为 $5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 将主要计算结果列于表 1。

从表 1 来看, 两种方法计算的总流量值 Q 十分接近, 仅在井数量为 4 时差值略大; 从有限元结果看到, M_1 点的水头在井数为 4 时比 M_2 点高近 1 m, 随着井增多 (两点与井点的间距差逐渐缩小) 而趋近相同。这印证了本文算法基本假定的合理性, 一般在 2 万多平方米的面积上布井数量必多于 8 口。随着井的增加, H_d 值变化不大, 表明外侧渗流场由于止水帷幕的存在而不受内侧布井方式的影响。

图 8 为 OM_1 和 OM_2 线的水头分布结果 ($n=32$ 与 $n=24$ 时结果相比差距较小, 故不显示)。可以看到, 有限元结果始终比本文方法的计算结果略高, 随着井数量的增加差值逐渐减小, 两个模型分别从 35 cm 减小到 7 cm 和从 43 cm 减小到 11 cm, 这是由于有限元计算时考虑了井损的影响 (井损系数 0.1), 这从有限元计算时井口位置的水头值始终无法归零可以看到。

以文献[11]中 5.3 节的工程案例为例, 场地表层粉质黏土为覆盖层, 渗透系数为 $5.8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 止水帷幕外侧渗流场按承压模式考虑, 确定几何参数 $T=1.6 m$, $T_0=9.6 m$, $T_1=5.7 m$, $D=3.7 m$, $R=69.3 m$, $R_0=300 m$, $r=28.3 m$, $r_w=1 m$, $b=0.774 m$, $h_w=0.05 m$, $H_0=9.5 m$, 渗透系数 $K=2.2 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$, $K_0=2.2 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$, $K_1=2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $K_w=5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。求得场地总流量 Q 为 $1479 \text{ m}^3/d$, 止水帷幕内侧水头 H_R 为 $0.87 m$, 实测总流量平均值为 $1563 \text{ m}^3/d$, 地下室侧墙周边平均水头值为 $1.7 m$ 。这里总流量计算偏小是因为止水帷幕存在集中渗漏现象, 计算水头偏低是由于板底砂层厚薄不均, 地下室侧墙附近的板底砂层较薄甚至缺失。

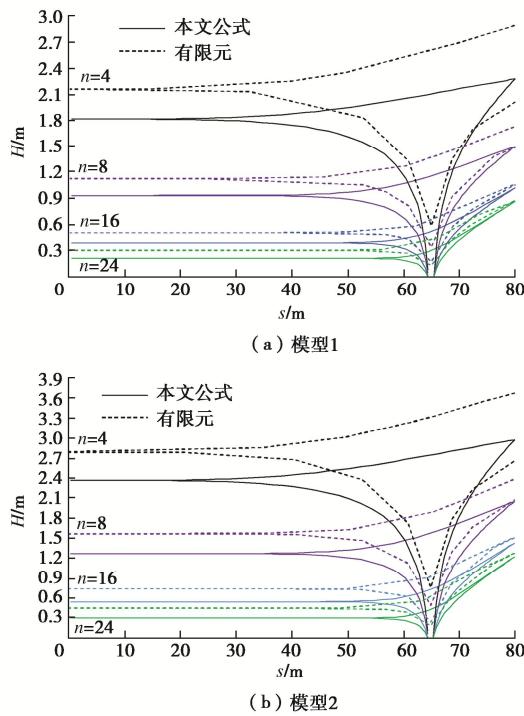
图 8 水头计算结果比较 (OM_1 和 OM_2)

Fig. 8 Comparison of calculated results of hydraulic head

5 截排减压抗浮设计及流程

在排水减压抗浮设计时, 为防止单井流量 q ($q=Q/n$) 过大引起井周土体颗粒启动流失而掏空底板下的土体, 或流失的土颗粒在井壁沉积而产生淤堵, 需要对井周水力坡降作如下限制:

$$i = \frac{Q}{2n\pi r_w K T} \leq i_{cr} \quad . \quad (28)$$

式中 i 为井周计算水力坡降; i_{cr} 为井周土体(滤层以外)的临界水力坡降, 对于级配连续的稳定土体可取 $0.4 \sim 0.5^{[13]}$, 对于级配不稳定的土体(管涌土)可取 $0.1 \sim 0.2^{[14]}$; r_w 为井半径, 当井壁外侧设置滤层时, 应取至滤层外边缘。

此外, 为保证结构抗浮安全性, 对底板水头值也要作一定限制, 为与场地抗浮设防水位区分, 这里采用抗浮控制水位 H_c 表示, 并采用下式计算:

$$H_{max} \cdot \kappa \leq H_c = \frac{G + F_t}{A\gamma_w} \quad . \quad (29)$$

式中 G 为结构自重及荷载; F_t 为被动抗浮措施提供的抗浮力; A 为结构底面积; γ_w 为水的重度; H_c 为抗浮控制水位; H_{max} 为结构底板下的水头最大值; κ 为大于等于 1 的安全系数。

在抗浮设计时, 为达到较好的减压效果并兼顾经济性, 可以对参数 n , r , h_w , r_w 进行调整。对一般工程而言, h_w 可取至底板顶面以下 $20 \sim 30$ cm 的位置为

宜; 若取至底板顶面以上时, 减压井井盖需要采用繁琐的承压防水措施, 因此 h_w 的调整余地不大。参数 r_w 对整个渗流场的影响也很有限。因此, 可确定 4 个参数的调整优先级依次为 $n > r > h_w > r_w$ 。至此, 归纳全文, 可以给出截排减压抗浮系统的设计流程, 见图 9。

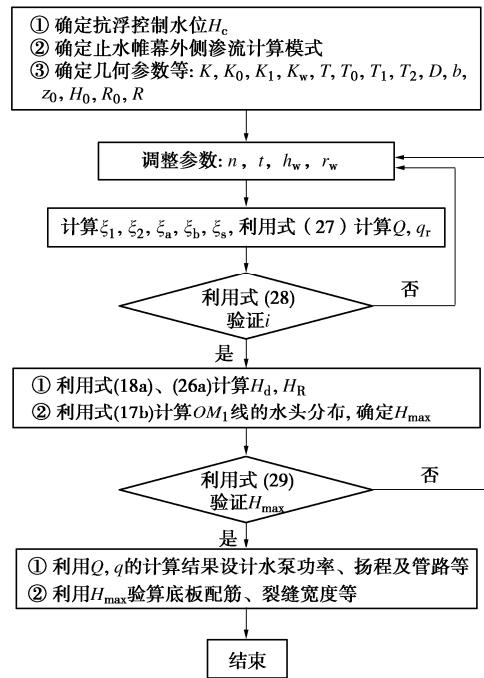


图 9 截排减压抗浮设计流程

Fig. 9 Anti-uplifting design process

6 结 论

(1) 对于圆形止水帷幕内均匀布置的多井系统, 采用共形映射方法, 可以方便求得止水帷幕内侧的水头分布。经计算, 当采用渗透系数较大(约大于等于 1×10^{-3} cm/s)的人工疏水层时, 用较少的井数即可达到良好的降压效果, 约为每万平方米 3~4 口。

(2) 采用阻力系数法, 将止水帷幕内外侧渗流场串联起来, 是求解多井系统总流量的关键。经算例验证, 本文简化计算结果与有限元结果相比差值较小, 且当井数较多时 M_1 , M_2 点的水头趋近相同, 与基本假定相符。

(3) 板底土层厚度和渗透性较均匀时, 采用本文简化算法, 仅需提供不多的几何参数, 即可求得较精确的流量和水头结果, 对采用人工疏水层的场地尤为适用。

(4) 在进行截排减压抗浮设计时, 控制板底水头值和井周水力坡降是关键, 为兼顾安全性和经济性, 需要对参数 n , r , h_w , r_w 进行反复调整以达到最佳效果。

参考文献:

- [1] 朱东风, 曹 洪, 骆冠勇, 等. 截排减压抗浮系统在抗浮事故处理中的应用[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1746 – 1752. (ZHU Dong-feng, CAO Hong, LUO Guan-yong, et al. Application of interception and drainage anti-floating system in treatment of uplift accidents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1746 – 1752. (in Chinese))
- [2] 曹 洪, 潘 泓, 骆冠勇. 地下结构截排减压抗浮概念及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(12): 2542 – 2548. CAO Hong, PAN Hong, LUO Guan-yong. A new anti-flootation method by drainage: concept and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(12): 2542 – 2548. (in Chinese)
- [3] 安徽省水利科学研究所. 多层地基和减压沟井的渗流计算理论[M].北京:水利出版社, 1980. (Anhui Water Resources Research Institute. Theory of Seepage Flow for Calculating Layered Media and Relief Ditches and Relief Wells[M]. Beijing: Water Resources Press, 1980. (in Chinese))
- [4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Seepage Computation Analysis & Control[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [5] U.S. Army Corps of Engineers. Design, Construction, and Maintenance of Relief Wells (Engineer Manual No. 1110-1914)[M]. Washington D.C.: Department of the Army, 1992.
- [6] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (WU Lin-gao. Design and Execution of Dewatering & Theory of Seepage in Deep Excavation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [7] 曹 洪, 朱东风, 范 泽, 等. 止水帷幕缝隙渗漏变化过程试验研究[J]. 水利学报, 2019, **50**(6): 699 – 709. (CAO Hong, ZHU Dong-feng, FAN Ze, et al. Laboratory study of leakage process for cut-off wall with crack[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(6): 699 – 709. (in Chinese))
- [8] 王仁东. 略去流床板桩厚度对滤流(渗流)计算的影响[J].浙江大学学报, 1957(3): 9 – 27. (WANG Ren-dong. The influence on seepage calculation without considering sheet pile thickness[J]. Journal of Zhejiang University, 1957(3): 9 – 27. (in Chinese))
- [9] 胡 瑶. 考虑基坑防渗结构的井的计算方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. (HU Yao. Study on Calculation Method of Well Considering Impervious Structure of Foundation Pit[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [10] 钟玉泉. 复变函数论[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2004. (ZHONG Yu-quan. Complex Function Theory[M]. 3rd ed. Beijing: China Higher Education Press, 2004. (in Chinese))
- [11] 朱东风. 地下结构截排减压抗浮法渗控关键问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. (ZHU Dong-feng. A Study on Seepage Control Issues of Anti-uplift Method for Underground Structures Based on Intercepting and Discharging Water[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [12] 阿拉文, 努麦诺夫. 滤流理论[M]. 王仁东译.北京: 高等教育出版社.1959. (АРАВИН, НУМЕНОВ. Percolation Theory[M]. WANG Ren-dong trans. Beijing: Higher Education Press.1959. (in Chinese))
- [13] ZHU D F, CAO H, PAN H, et al. Laboratory study of retention and clogging performance of no-fines concretes[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, **25**(8): 1471 – 1490.
- [14] 刘 杰. 土的渗透破坏及控制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (LIU Jie. Piping and seepage control of soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2014. (in Chinese))