

# 地下结构排水盲沟减压抗浮简化设计方法

潘泓<sup>1,2</sup>, 刘荣照<sup>1,2</sup>, 骆冠勇<sup>\*1,2</sup>, 彭斯格<sup>1,2</sup>, 曹洪<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 目前, 排水盲沟减压抗浮系统中排水盲沟设计主要采用数值法分析计算, 尚无简单实用的简化计算方法。基于盲沟为等水头边界及入渗量均布于盲沟单元等假定, 建立排水盲沟网格简化模型, 得到平面布置为矩形的盲沟单元水头分布解析解, 给出入渗量、单元几何尺寸等参数即可算得盲沟单元内水头分布。提出均匀入渗和非均匀入渗情况下底板入渗量分布的计算模式。通过算例验证, 简化方法适用前提为盲沟及结构底板底部布置有渗透性远大于土体的疏水层, 简化算法与有限元结果的相对误差较小且结果偏于保守, 可用于盲沟布置的设计。对典型土层算例对比发现: 若底板下部地层为弱透水层中夹有一层强透水层, 底板入渗量会均匀分布, 盲沟可等间距均匀布置; 若下部地层无强透水层, 入渗量大部分集中在距帷幕 1 到 1.5 倍坑底含水层厚度范围内, 盲沟间距应在该范围内减小, 在底板中部增大。

**关键词:** 抗浮; 排水减压; 排水盲沟; 渗流; 简化方法

**中图分类号:** 文献标识码: A

**作者简介:** 潘泓, 男, 1967 年生, 博士, 教授。主要从事岩土方面的教学与研究工作。E-mail: hpan@scut.edu.cn。

## Simplified design method of pressure reduction and anti-floating for blind drain of underground structure

PAN Hong<sup>1,2</sup>, LIU Rong-zhao<sup>1,2</sup>, LUO Guan-yong<sup>1,2</sup>, PENG Si-ge<sup>1,2</sup>, CAO Hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. The State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** At present, the design of drainage blind ditches in pressure reducing and anti floating systems mainly uses numerical analysis and calculation, and there is no simple and practical simplified calculation method. Based on the assumption that the blind ditch has an equal water head boundary and the infiltration amount is uniformly distributed in the blind ditch unit, a simplified model of the drainage blind ditch grid is established. The analytical solution of the water head distribution of the blind ditch unit with a rectangular layout is obtained. The water head distribution within the blind ditch unit can be calculated by providing parameters such as the infiltration amount and the geometric size of the unit. Propose a calculation model for the distribution of bottom plate infiltration under both uniform and non-uniform infiltration conditions. Through numerical examples, it is verified that the simplified method is applicable if there is a hydrophobic layer with permeability much greater than the soil at the bottom of the blind ditch and structural bottom plate. The relative error between the simplified algorithm and the finite element results is minimal and the results tend to be conservative, which can be used for the design of blind ditch layout. Comparing typical soil layers, it was found that if the lower layer of the bottom plate is a weak permeable layer with a layer of strong permeable layer sandwiched between them, the infiltration amount of the bottom plate will be evenly distributed, and blind ditches can be evenly arranged at equal intervals; if there is no strong permeable layer in the lower strata, the infiltration amount is mostly concentrated within the range of 1 to 1.5 times the thickness of the aquifer at the bottom of the pit from the curtain. The distance between blind ditches should be reduced within this range and increased in the middle of the bottom plate.

**Key words:** Anti floating; Drainage pressure reduction; Blind drainage ditch; Seepage; simplified method

## 0 引言

随着地下建筑结构的面积和深度越来越大, 地下结构的抗浮问题显得愈发突出, 在一些大规模地下工

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51978282; 52308353); 广东省自然科学基金项目(2023A1515011571; 2023A1515011683); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目(2022ZB21)

**收稿日期:** 2023-10-07

**\*通信作者** (E-mail: luogy@scut.edu.cn)

程施工或者使用过程中,因抗浮问题导致的结构上浮、底板开裂等案例屡有发生<sup>[1-3]</sup>。

打设抗拔桩、增加堆载等常规抗浮措施过于被动,面对地下水位突增的情况仍有抗浮失效的可能。排水盲沟配合止水帷幕作为一种主动降低地下室底板水位的手段在某些工程中发挥了巨大的作用<sup>[4]</sup>。

Beaven<sup>[6]</sup>等对3条水平导排盲沟进行了600d的抽排试验,结果表明:水平导排盲沟可有效降低盲沟周边环境的水位;液体赋存环境的各向异性影响盲沟排水效果,水平向影响范围明显大于竖向影响范围。

目前,国内外已有一些关于水平导排结构解析研究的报道。胡杰<sup>[7, 8]</sup>建立了城市生活垃圾填埋场渗滤液流向水平井的双孔隙模型,通过拉普拉斯积分变换和变量分离,得到了水平井排水条件下渗滤液水位下降的解析解。Eungyu和Zhan<sup>[9]</sup>利用双孔隙模型,推导了裂缝性浅层含水层(即地下含水层和有漏承压含水层)有限直径水平井的三维半解析解。

ChingSheng Huang<sup>[10]</sup>等提出一种平行于水流方向单口水平井抽水的非承压含水层中的水头分布解析解,在此基础上,结合达西定律,导出了河流枯竭率的表达式。Kawecki<sup>[11, 12]</sup>对有限长度水平井的流动方程提出修正,这种修正扩展了受限流动方程,从而可以在无受限条件下估计井周边水头。Zlotnik和Zhan<sup>[13]</sup>推导出了均匀各向异性无承压含水层中点源产生的压降的拉普拉斯域解后,利用叠加原理,应用数值拉普拉斯逆变换方法通过叠加,将点源解推广到水平井和斜井的情况。魏云杰、许模<sup>[14]</sup>等建立了路基两侧渗沟排水的数学模型及解析解,并与Modflow软件模拟计算结果对比,验证了其解析解的合理性。周华<sup>[15]</sup>综合了渗流计算中水力学法与水动力学法的特点,总结出单排水盲沟和双排水盲沟流量以及设置盲沟后场地内最高水位近似计算方法。叶剑、兰吉武<sup>[16]</sup>等建立垃圾场中水平排水盲沟渗流模型,得出有盲沟排水情况的地下水位浸润线的解析解,并给出水平盲沟间距的设计方法。然而,上述学者给出的水平渗流计算解析解均为一维流的情况,即取一个剖面进行计算,对于平面上纵横交错的排水盲沟网络中任意一点水头计算的解析解研究不足。

目前对于排水盲沟网络的分析计算使用的方法主要为有限元建模等数值模拟方法,赵坚、沈振中<sup>[17]</sup>提出用排水子结构模拟数值计算中的排水体,从单元、节点数量上提高了计算机对排水沟等排水结构渗流计算的效率。韩亚兵、崔旋<sup>[18]</sup>通过相关有限元软件研究了五种排水沟的布置型式对尾矿坝下渗流场的变化情况及其稳定性的影响。路瑞利、孙东坡等<sup>[19]</sup>在有限元中运用子结构法分析了纵横排水盲沟对尾矿库填筑过程中渗流场的影响。可见对于排水盲沟的分析计

算在实际应用中缺少一种简单实用的简化计算方法。基于此本文提出了一种适用于矩形平面布置排水盲沟网络的简化计算方法,用有限元模拟验证简化方法的合理性并分析可能存在的误差,为简化方法的实际应用提供可能。

## 1 排水盲沟单元水头分布解析解

排水减压通常通过在地下结构周围打设一定深度的止水帷幕,在底板底部设置一定厚度的疏水层,然后在底板上布置减压井或在底板周围布置排水廊道、排水盲沟,让底板底部的地下水通过疏水层汇集至减压井、廊道或盲沟,统一排放至集中井后排出,在对帷幕外环境影响尽可能小的情况下达到降低底板水压力的目的。

### 1.1 排水盲沟渗流简化计算假定及模型

本文盲沟排水减压抗浮简化计算采用的假定如下:

- 1) 由于止水帷幕的作用,排水减压的涌水量取决于减压后基坑内外的平均水位差,而与排水盲沟的具体布置无关。
- 2) 盲沟的导水性非常大,各处盲沟的水头相等,即盲沟等效为等水头边界,且无体积。
- 3) 盲沟为完整沟,即盲沟底至疏水层底部(如图2所示),疏水层内的水水平流入排水盲沟。
- 4) 横向排水沟与纵向排水沟相互垂直,底板底部的排水盲沟网格如图1所示将整个底板划分为一个一个小的矩形单元;每个矩形单元内底板受到均匀入渗。
- 5) 地下水位高于盲沟顶部,盲沟承压。

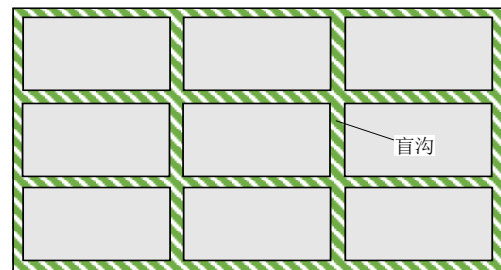


图1 排水盲沟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blind drain

单独拿出盲沟网格中一个矩形单元来看,由于矩形周边被盲沟环绕,盲沟处是地下水出溢的位置,可认为是给定水头边界,为更好发挥盲沟的排水效果,在盲沟以及底板底一般设有渗透性较大的疏水层,可视为地下水压力均匀作用在底板面上<sup>[20]</sup>。根据上述假定,图1排水盲沟系统中的矩形单元可以简化为图2所示的简化模型。

图2中, 单元的长度和宽度分别为  $2a$ 、 $2b$ , 四周边界水头  $h=0$ , 假定在区域内单位面积渗入量  $p$  均匀分布在平面,  $K$  为区域底部疏水层渗透系数,  $D$  为疏水层厚度。

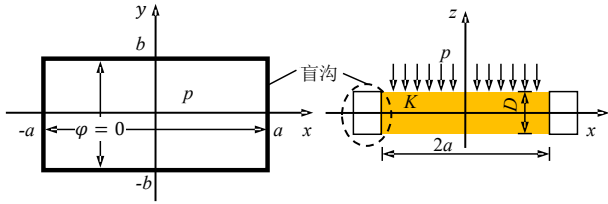


图2 盲沟单元简化模型示意图

Fig. 2 Sketch of simplified model of blind drain unit

### 1.2 排水盲沟单元水头分布解析解及有限元验证

对于一个周边水头为零, 平面内有稳定均匀入渗量的矩形区域, 不考虑随时间变化的稳定状态下, 区域内任意一点水头值可用下式计算:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -KD \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -KD \frac{\partial h}{\partial y} \right) = p \quad 1(1)$$

该式即为在长宽分别为  $2a$  和  $2b$  的矩形区域上求解泊松方程的边值问题:

$$\begin{cases} \Delta_2 h = -\frac{p}{KD} \\ h|_{x=-a} = 0, h|_{x=a} = 0 \\ h|_{y=-b} = 0, h|_{y=b} = 0 \end{cases} \quad 2(2)$$

采用特解法, 令  $h(x, y) = v(x, y) + w(x, y)$

其中  $v(x, y)$  为特解,  $w(x, y)$  为通解。

令特解

$$v(x, y) = \frac{p}{2KD} (a^2 - x^2) \quad 3(3)$$

其满足方程

$$\Delta_2 v = -\frac{p}{KD} \quad 4(4)$$

关于通解  $w(x, y)$  的定解问题如下

$$\Delta_2 w = 0 \quad 5(5)$$

$$w|_{x=-a} = 0, w|_{x=a} = 0 \quad 6(6)$$

$$w|_{y=\pm b} = \frac{p}{2KD} (a^2 - x^2) \quad 7(7)$$

满足式(5)、(6)的解可表示为

$$w(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( A_n e^{\frac{n\pi y}{2a}} + B_n e^{-\frac{n\pi y}{2a}} \right) \cos \frac{n\pi x}{2a} \quad 8(8)$$

式中:  $A_n$  和  $B_n$  为待求解的系数。

式(8)需满足式(6)的条件, 取  $x=a$  代入(8), 则奇数项等于 0, 剩下偶数项应满足(6)定义的边界条件:

$$0 = - \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{n}{2}} \left( A_n e^{\frac{n\pi y}{2a}} + B_n e^{-\frac{n\pi y}{2a}} \right) \quad 9(9)$$

该式对于  $-b \leq y \leq b$  都应成立, 则  $n$  取偶数时系数

$A_n$ 、 $B_n$  都应为 0。

为确定  $n$  取奇数时两个待定系数, 将边界条件(7)代入式(8)得:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left( A_n e^{\frac{n\pi b}{2a}} + B_n e^{-\frac{n\pi b}{2a}} \right) \cos \frac{n\pi x}{2a} &= \frac{p}{2KD} (a^2 - x^2) \\ \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left( A_n e^{-\frac{n\pi b}{2a}} + B_n e^{\frac{n\pi b}{2a}} \right) \cos \frac{n\pi x}{2a} &= \frac{p}{2KD} (a^2 - x^2) \end{aligned} \right\} \quad 10(10)$$

将式(10)等号右边展开为傅里叶余弦级数:

$$\frac{p}{2KD} (a^2 - x^2) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} C_n \cos \frac{n\pi x}{2a} \quad 11(11)$$

式中

$$C_n = \frac{2}{2a} \int_{-a}^a \frac{p}{2KD} (a^2 - x^2) \cos \frac{n\pi x}{2a} dx \quad 12(12)$$

积分得:

$$C_n = -\frac{16a^2 p}{\pi^3 KD} \cdot \left( \rightarrow 1 \right)^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{1}{n^3}, n=1,3,5,\dots \quad 13(13)$$

将式(11)代入式(10)并比较系数可得:

$$\begin{cases} A_n e^{\frac{n\pi b}{2a}} + B_n e^{-\frac{n\pi b}{2a}} = C_n \\ A_n e^{-\frac{n\pi b}{2a}} + B_n e^{\frac{n\pi b}{2a}} = C_n \end{cases} \quad 14(14)$$

解式(14)得:

$$A_n = B_n = \frac{1}{e^{\frac{n\pi b}{2a}} + e^{-\frac{n\pi b}{2a}}} C_n = \frac{C_n}{\cosh \frac{n\pi b}{2a}} \quad 15(15)$$

将式(15)代入式(8)可得通解:

$$w(x, y) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\cosh \frac{n\pi y}{2a}}{\cosh \frac{n\pi b}{2a}} C_n \cos \frac{n\pi x}{2a} \quad 16(16)$$

用  $2m-1$  替换  $n$  则上述简化模型平面内任意一点水头解析解为:

$$h(x,y) = \frac{P}{2KD}(a^2 - x^2) - \frac{16a^2 p}{\pi^3 KD} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^3} \cdot \frac{\cosh \frac{(2m-1)\pi y}{2a}}{\cosh \frac{(2m-1)\pi b}{2a}} \cos \frac{(2m-1)\pi x}{2a}$$

17(17)

令  $a=1, b=1, p/KD=1$ , 计算  $m$  取不同值时  $x=0, y=0$  处函数值 (即  $h_{max}$ ) 与  $m=100$  时  $h_{max}$  的相对误差如表 1。可见该简化计算式收敛速度极快, 从  $m=2$  开始结果已基本稳定, 实际计算中建议取  $m=3$  即可。

表 1 计算结果相对误差

Table 1 Relative errors in calculation results

m	1	2	3	4	5
相对误差/%	$1.15 \times 10^{-2}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$1.68 \times 10^{-6}$	$3.40 \times 10^{-8}$	$8.03 \times 10^{-10}$

用本课题组自主开发的三维渗流有限元计算程序<sup>[21]</sup>建立一个如图 2 所示的矩形区域, 设置疏水层高度为 0.5m; 给定矩形周边水头为零, 以模拟盲沟; 在区域上表面添加一定的入渗量。对简化方法也采用同样的参数条件且控制简化计算方法与有限元法的排水量一致, 分别用两种方法计算后得到一个矩形单元内的水头分布图如图 3 所示, 图中水头单位为 m。取截面 A 上一定点得到两种方法底板水头计算结果的相对误差曲线如图 4。

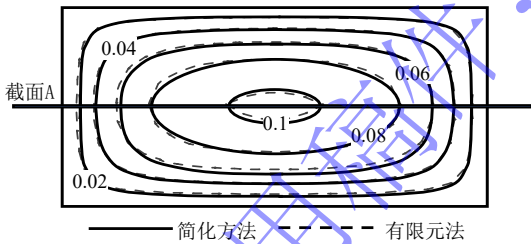


图 3 单个盲沟单元结果对比图

Fig. 3 Comparison of results of single blind drain unit

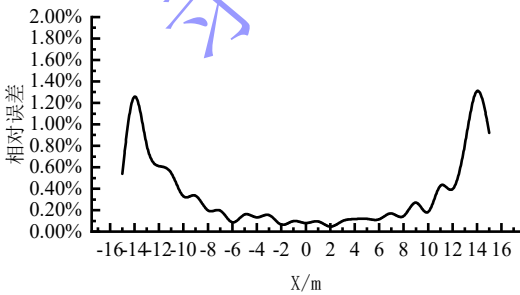


图 4 截面 A 相对误差图

Fig. 4 Relative error diagram of section A

可见该简化计算方法对于单个排水盲沟矩形单元的计算结果与有限元相对误差极小, 可控制在 1.5%

以内, 且越靠近单元中心误差越小, 中心处相对误差仅 0.15%, 可见针对单个排水盲沟单元该简化计算方法的计算精度很高。

## 2 盲沟排水减压抗浮简化分析的步骤

盲沟排水减压设计主要确定以下几个量:

1) 减压排水量  $Q$ 。根据排水减压相关规范<sup>[21]</sup>, 盲沟总排水量  $Q$  由绕过止水帷幕的流量及通过帷幕渗透入另一侧的流量组成, 可按式计算:

$$Q = L \left( \frac{k(h-h_d)}{\zeta_a + \zeta_b + \zeta_c} + \frac{k_s(h-h_d)}{\zeta_w} \right) \quad 18(18)$$

$$\zeta_a = \frac{1}{\pi} \left( \frac{T_1}{T_2} \ln \frac{T_1 + T_2}{T_1 - T_2} + \ln \frac{T_1^2 - T_2^2}{T_2^2} \right) \quad 19(19)$$

$$\zeta_b = \frac{d}{T_2} \quad 20(20)$$

$$\zeta_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{T_1'}{T_2} \ln \frac{T_1' + T_2}{T_1' - T_2} + \ln \frac{T_1'^2 - T_2^2}{T_2^2} \right) \quad 21(21)$$

$$\zeta_w = \frac{d}{l + (h-h_d)/2} \quad 22(22)$$

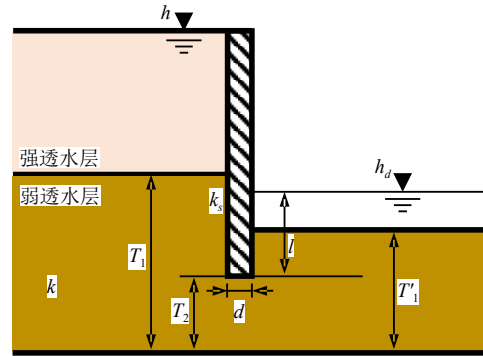


图 5 排水减压排水量计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of discharge calculation

其中,  $Q$  为按照抗浮降水需求, 整个地下室排水减压总排水量;  $k$  为弱透水层的渗透系数;  $k_s$  为止水帷幕渗透系数;  $d$  为截渗墙厚度;  $h_d$  为场地设防地下水位;  $h$  为抗浮设计控制水位;  $T_1$  为非开挖侧弱透水层的厚度;  $T_1'$  为开挖侧弱透水层的厚度;  $T_2$  为截渗墙底部以下土层的厚度;  $l$  为抗浮设计控制水位与墙底的距离;  $L$  为地下室周长。

2) 盲沟单元入渗量  $p$ 。该参数与底板入渗量分布密切相关。

对于图 6 所示的一有限厚度透水层, 不含强透水层时, 沿  $x$  正方向出坡降<sup>[22]</sup>可用下式计算:



$$J = \frac{\pi H}{4KM \sqrt{\operatorname{ch}^2\left(\frac{\pi x}{2M}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi s}{2M}\right)}} \quad 23(23)$$

总单宽流量可用下式计算:

$$q = kH \frac{K'}{2K} \quad 24(24)$$

式中  $H$  为上下游水头差,  $M$  为含水层厚度,  $s$  为止水帷幕嵌固深度,  $k$  为含水层渗透系数,  $K$  为模数

$\lambda = \sin \frac{\pi s}{2M}$  的第一类全椭圆积分,  $K'$  为补模为

$\lambda' = \sqrt{1 - \lambda^2}$  的第一类全椭圆积分。

则原点至  $x$  正方向处单宽流量可由下式求得:

$$\begin{aligned} q_x &= \int kJ dx \\ &= \int \frac{k\pi H}{4KM \sqrt{\operatorname{ch}^2\left(\frac{\pi x}{2M}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi s}{2M}\right)}} dx \\ &= -\frac{iHk \sqrt{\frac{\cos\left(\frac{\pi s}{M}\right) - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi x}{M}\right)}{2 \cos\left(\frac{\pi s}{M}\right) - 2}} F(\phi, \lambda)}{K \sqrt{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x}{M}\right) - \cos\left(\frac{\pi s}{M}\right)}} + C \quad 25(25) \end{aligned}$$

$$\phi = \frac{i\pi x}{2M}$$

$$\lambda = \operatorname{csc}\left(\frac{\pi s}{2M}\right)$$

式中  $F = F(\phi, \lambda)$  为第一类不完全椭圆积分,  $C$  为积分常数。

则非均匀入渗情况下距止水帷幕  $x$  范围内入渗量占总流量的比例  $P$  可由下式求得:

$$P = \frac{q_x}{q} = -\frac{2i \sqrt{\frac{\cos\left(\frac{\pi s}{M}\right) - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi x}{M}\right)}{2 \cos\left(\frac{\pi s}{M}\right) - 2}} F(\phi, \lambda)}{K \sqrt{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi x}{M}\right) - \cos\left(\frac{\pi s}{M}\right)}} + C \quad 26(26)$$

可见在地层参数确定的情况下,  $P$  仅和  $x$  与含水层厚度  $M$  的比值以及止水帷幕嵌固深度  $s$  与含水层厚度  $M$  的比值相关。

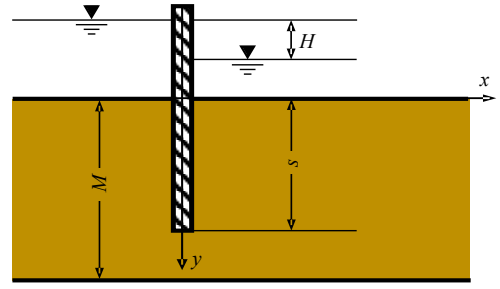


图 6 流量分布计算示意图

Fig. 6 Discharge distribution calculation diagram

表 2 为  $s$  和  $x$  取不同值时  $P$  的计算值。可见底板入渗量基本都分布在距离坑底含水层厚度 1.5 倍范围内。

确定减压排水量  $Q$  后, 单元入渗量  $p$  可由下式计算:

$$p = \frac{\eta Q}{S} \quad 27(27)$$

其中  $\eta$  为单元流量分配系数,  $S$  为部分单元面积之和, 具体取值按下述情况确定:

①当底板底部土体存在图 8 所示强透水层时, 认为入渗量均匀分布于整个底板,  $\eta$  取 1;  $S$  取所有单元面积之和, 即底板总面积。

②当底板底部土体不存在强透水层, 入渗量非均匀分布时, 通过下述示例说明如何确定  $\eta$  和  $S$ : 用  $P(0.1, 0.1)$  表示表 2 中  $x/M=0.1$ ,  $s/M=0.1$  时  $P$  的计算值。假设一基坑  $s/M=0.3$ , 则对于所有位于  $x < 0.5M$  范围内的单元  $\eta = P(0.5, 0.3) = 0.577$ ,  $S$  取这部分单元面积之和, 进而通过式 27 求得  $p$ ; 位于  $0.5M \leq x < M$  范围内的单元  $\eta = P(1, 0.3) - P(0.5, 0.3) = 0.236$ ,  $S$  取这部分单元面积之和, 进而求得  $p$ ; 其余单元的入渗量也可依次求出。

表 2  $x$  方向流量占比参考值表

Table 2 Reference value table for the proportion of flow in the

$s/M$	$x$ -direction				
	$P$				
	$x/M=0.1$	$x/M=0.2$	$x/M=0.5$	$x/M=1$	$x/M=1.5$
0.1	0.271	0.443	0.697	0.870	0.942
0.2	0.188	0.343	0.627	0.838	0.927
0.3	0.151	0.288	0.577	0.813	0.915
0.4	0.131	0.254	0.539	0.793	0.906
0.5	0.119	0.232	0.510	0.776	0.898
0.6	0.111	0.218	0.489	0.762	0.891
0.7	0.105	0.208	0.474	0.752	0.886
0.8	0.102	0.202	0.463	0.745	0.883
0.9	0.100	0.198	0.457	0.740	0.880

3) 盲沟的出口高程  $h_0$ 。出口高程可根据总体的

减压目标值（抗浮设防水位  $h_d$ ），适当降低且使得计算结果满足下式：

$$h_{max} \cdot \kappa \leq h_d \quad 28(28)$$

式中， $h_{max}$  为底板水头最大值， $\kappa$  为大于等于 1 的安全系数， $h_d$  为抗浮设计控制水位。

4) 每个单元所受的最大压力  $h_{max}$  及压力分布通过式 17 按照图 7 所述计算步骤得到；

5) 底板压力分布。在算出每一单元水压力分布后，将各单元结果根据单元位置进行组合，得到整个底板压力分布。

实际计算中几何参数部分都是给定的，出口高程  $h_0$  一般略低于控制水位  $h_d$ ，调整余地有限。参数  $a$ ， $b$  代表了盲沟的平面布置， $\eta$  代表入渗量的分布情况，对算得水头分布及单元最大水头值  $h_{max}$  影响很大，因此主要通过调整  $a$ ， $b$ ， $\eta$  来得到合适的结果。计算基本流程总结如图 7。

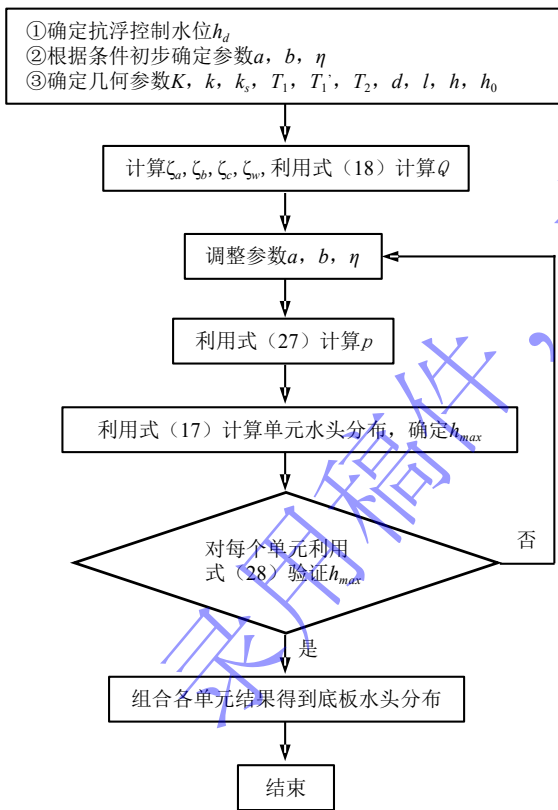


图 7 简化算法流程图

Fig. 7 Simplified algorithm flowchart

### 3 算例验证：两种典型地层情况下算例比较

在实际工程中，地下结构常处于以下两种典型地层环境中：一种是结构处于透水性一般的土层中，但

距离底板一定深度处有一与远处连通的强透水层；一种是单一土层。针对两种典型土层分别用有限元法与简化算法进行盲沟设计计算以验证简化方法的适用性。

#### 3.1 复合土层中的排水盲沟网格

对于一长 100m，宽 50m，深 5m 的基坑，基坑下铺设 0.5m 厚的疏水层，基坑周边设置一圈 1m 厚度的止水帷幕。假设基坑处于图 8 所示土层中，基坑所在土体透水性不强，距坑底 5m 处存在一层一定厚度的强透水层，止水帷幕截穿坑底强透水层。该情况下由于强透水层的存在，流量基本在整个底板区域都有分布，不只集中在基坑边缘一定范围内，可认为水压力在整个底板均布，因此盲沟可采取如图 9 所示的均匀布置方案。

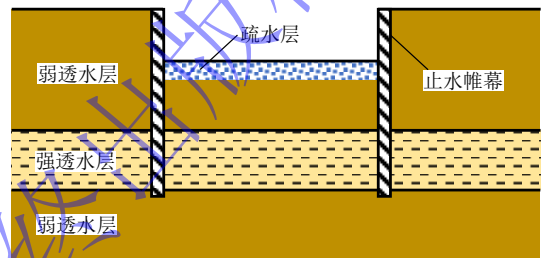


图 8 土层情况示意图

Fig. 8 Schematic diagram of soil condition

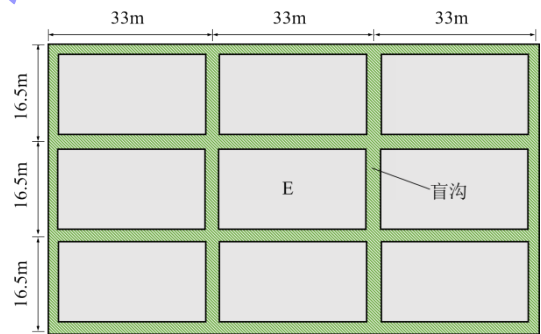


图 9 排水盲沟平面布置及单元位置示意图

Fig. 9 Layout of blind drain and schematic diagram of unit position

在有限元模型中，模型长宽均为 500m，建模范围足够大，模型边界侧面以及底面均可认为是不透水边界（通过敏感性分析模型边界长度大于 400m 后无论侧边是否透水，基坑内部的流场，即水头及出水量变化已经非常小）；基坑侧壁以及底面也设置为不透水边界；地表入流边界为定水头边界，施加暴雨水头，水头值等于地表高程。此外排水盲沟顶部设置为出溢面，以模拟地下水沿盲沟出溢从而减压的情况<sup>[4]</sup>。弱透水层渗透系数  $k_1$  取为  $2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，止水帷幕渗透系数  $k_s$  取为  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，强透水层以及疏水层渗透系数  $k_2$  取为  $2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ （简化算法也采用同样参数计算）。

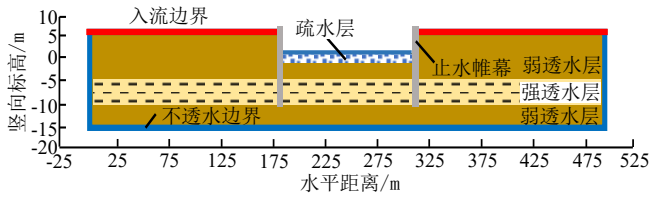
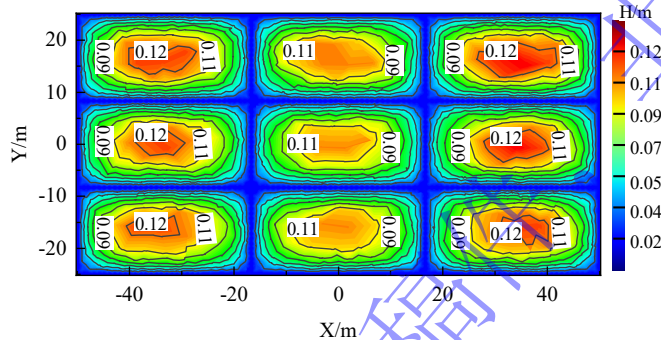


图 10 有限元计算模型

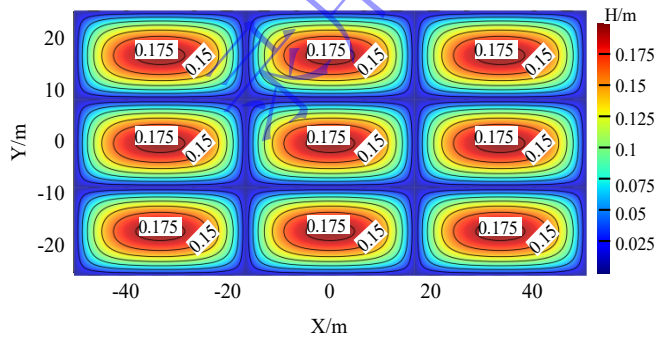
Fig. 10 Schematic diagram of finite element calculation model

两种方法计算所得到的基坑底板水头等值线图如图 11，图中水头单位为 m。

该算例中，简化方法算得总排水量  $Q=23.79\text{m}^3$ ，有限元建模算得总排水量  $Q=24.45\text{m}^3$ ，相对误差 2.69%，可见对于流量简化计算准确度很高。整体上，两种方法算出的水头分布很相近，九个单元水头分布基本一致，符合入渗量均匀分布于整个底板的假定。用减压前单元底板承受的地下水头减去减压后单元底板承受的地下水头最高值得到两种方法对应的各单元底板水头有效降低值。简化方法单元底板水头有效降低值为 4.817m，有限元法九个单元底板水头有效降低值平均值为 4.859m，在该种情况下两者相对误差也非常小，仅 0.87%。同时简化方法算出的底板最大水头偏高，对减压效果的估计角度来说结果偏于安全。



(a) 有限元结果



(b) 简化方法结果

图 11 底板水头等值线结果对比图

Fig. 11 Contrast figure of floor water head contours

### 3.2 单一土层中的排水盲沟网络

#### 3.2.1 非均匀入渗

对于同样一长 100m，宽 50m，深 5m 的基坑，假设基坑处于图 12 示位置，各深度土层渗透系数一致，基坑下铺设 0.5m 厚的疏水层，基坑周边设置一圈 1m 厚度的止水帷幕，帷幕底低于底板底 5m。

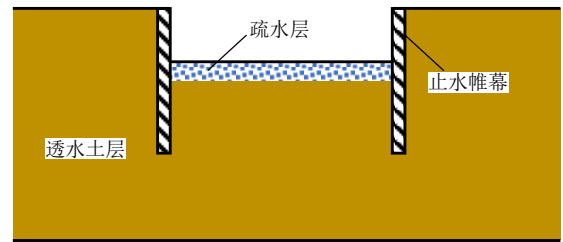


图 12 土层情况示意图

Fig. 12 Schematic diagram of soil condition

由于地层中无强透层，底板入渗量按非均匀入渗计算。在推导式 27 时发现在没有强透层的情况下绝大部分的入渗量都集中在距离止水帷幕 1.5 倍坑底含水层厚度的范围内，而不是均布于整个底板，因此经过多次试算，该情况下盲沟布置方式如图 13 所示，对四种边长不同的单元分别编号为 ABCD。针对上述模型采用简化计算方法计算时，位于基坑周边的单元（单元 A、B、C）总流量分配系数  $\eta$  取 0.85，位于基坑中部的单元（单元 D）流量分配系数  $\eta$  取 0.15，在每个单元内仍认为入渗量均匀分布。

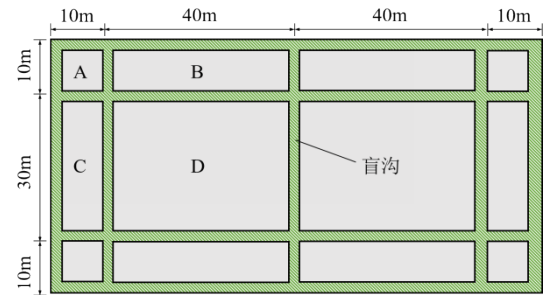
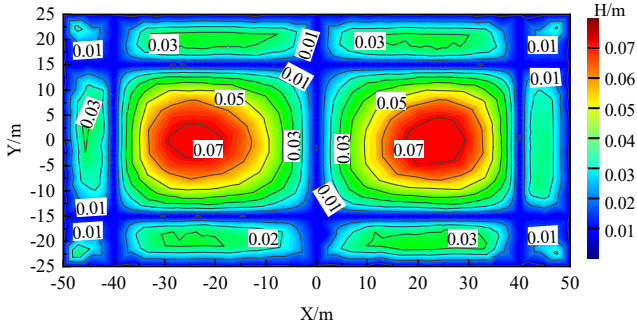


图 13 排水盲沟平面布置及单元位置示意图

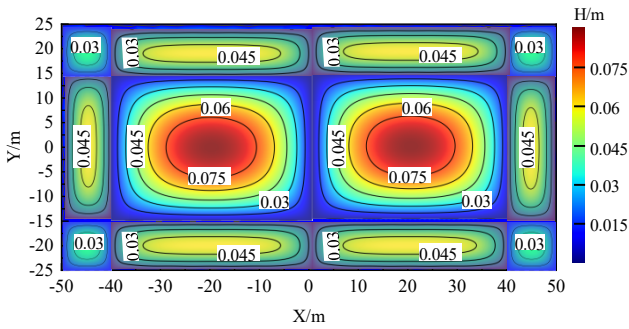
Fig. 13 Layout of blind drain and schematic diagram of unit position

有限元建模范围与上一算例相同，仅改变土层条件与止水帷幕嵌固深度，模型边界侧面及底面、基坑侧壁及底面为不透水边界，暴雨水头加在地表平面，水头值等于地表高程。土层渗透系数  $k$  取  $2 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ ，止水帷幕渗透系数  $k_s$  取  $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ ，疏水层渗透系数  $K$  取  $2 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ （简化算法也采用同样参数计算）。





(a) 有限元结果



(b) 简化方法结果

图 14 底板水头等值线对比图

Fig. 14 Contrast figure of floor water head contours

两种方法计算所得到的基坑底板水头等值线图如图 14, 图中水头单位为 m。

该算例中, 简化方法算得总排水量  $Q=14.58\text{m}^3$ , 有限元建模算得总排水量  $Q=15.635\text{m}^3$ , 相对误差 6.7%。简化算法得到的底板水头分布趋势与有限元结果基本一致, 基坑周边单元盲沟分布密集, 水头降得更低, 中心单元盲沟间距更大, 水头相较于周边单元高些。

两种方法对应的各单元底板水头有效降低值见表 3。

表 3 单元底板水头有效降低值对比表

Table 3 Contrast table for effective reduction of unit floor water head

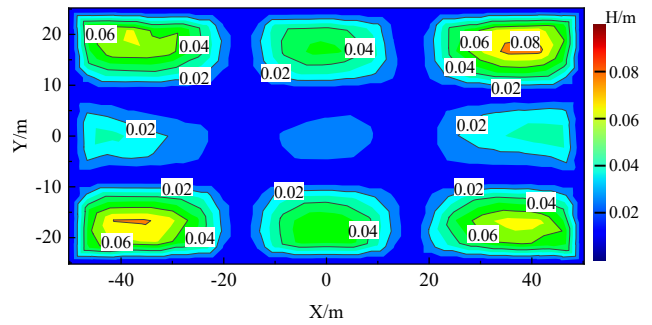
单元位置	水头有效降低值/m		相对误差/%
	简化法	有限元法	
单元 A	4.911	4.925	0.28
单元 B	4.932	4.968	0.69
单元 C	4.931	4.966	0.72
单元 D	4.959	4.973	0.28

由此可见该简化方法计算得到的底板水头有效降低值与有限元方法的结果相差极小, 且减压后底板水头略微高于有限元方法, 计算结果偏于安全。

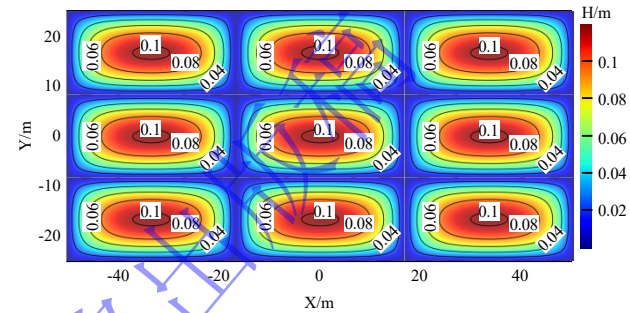
#### 4.2.2 均匀入渗

对于 4.2.1 中的算例, 若按照渗量均布于整个底板计算, 盲沟依旧采取如图 9 所示的均匀布置方案分

别用有限元方法和简化算法计算。



(a) 有限元结果



(b) 简化方法结果

图 15 底板水头等值线对比图

Fig. 15 Contrast figure of floor water head contours

两种方法计算所得到的基坑底板水头等值线图如图 15, 图中水头单位为 m。

由于认为入渗量均布于整个底板, 简化算法结果显示减压后各个盲沟单元的水头分布一致; 有限元结果则显示减压后基坑中心的单元几乎不承受水压力, 周边单元底板水压力明显高于中心单元, 且四种位置的单元内简化算法得出的底板最大水头值都大于有限元方法。可见在该种土层条件下直接按入渗量均布进行计算对于减压设计层面是偏于安全的, 但会过于保守, 不利于设计的经济性。

## 4 讨论——简化方法的适用范围

为探究两种算法相对误差受疏水层渗透系数  $K$  的影响情况, 单元边长  $2a$ 、 $2b$  分别取单元 A-E 几种参数, 疏水层厚度  $D$  取 0.5m, 分别计算疏水层渗透系数与土体渗透系数比值  $K/k$  为  $10^4$ ,  $10^3$ ,  $10^2$ ,  $10$  时解析解与有限元解的底板水头有效降低值相对误差, 结果如图 16 所示。



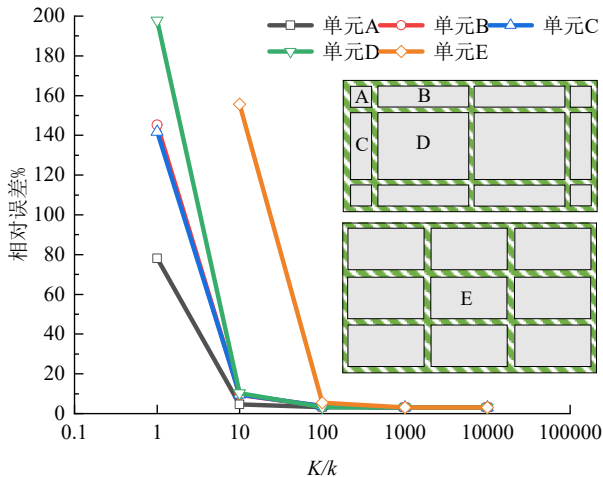


图 16 相对误差与疏水层渗透系数关系

Fig. 16 Relation between relative error and permeability coefficient of drainage layer

结果显示,对于单一土层算例,疏水层渗透系数与土层渗透系数之比大于10时,A,B,C,D四种单元简化算法与有限元结果的相对误差始终能控制在10%以内,且随着该比值量级的增长误差趋近于0,当疏水层渗透系数与土层渗透系数一致,即没有疏水层时,两种算法的相对误差急剧上升至不可接受的程度。对于复杂土层算例,单元E有着相似的结果,该情况下疏水层渗透系数与土层渗透系数之比大于100时,两种算法的相对误差降低至10%以内。可见,该简化方法适用的前提条件是盲沟及底板底部需设置疏水层,且疏水层渗透系数要远大于下部土层。存在疏水层才能使得盲沟单元内的入渗量均匀分布,保证简化算法结果的准确性。

## 5 结 论

排水盲沟能有效降低地下室底板承受的水压力,在目前排水盲沟的设计计算环节基本通过有限元软件模拟计算其降水效果,在初步粗算估计盲沟减压效果时该方法不够简单快捷。本文针对排水盲沟网络提出简化计算方法,在与有限元方法进行算例对比的过程中得出以下几点认识:

(1) 建立了排水盲沟网络简化模型,得到平面布置为矩形的盲沟单元水头分布解析解,通过给出入渗量、单元几何尺寸、土体及疏水层渗透系数等参数可算得布置盲沟后底板的水头分布。简化方法与有限元法误差很小且偏于保守,在排水盲沟初步设计阶段有一定参考意义。

(2) 疏水层渗透系数与土体渗透系数比值  $K/k$  大于100时简化算法与有限元的相对误差始终能控制在10%以内,且随着该比值量级的增长误差趋近于0。因此,该简化方法适用的前提条件是盲沟及底板底部

需设置疏水层,且疏水层渗透系数要远大于下部土层。

(3) 若底板底部地层为弱透水层中夹有一层强透水层,作用于底板的入渗量会均匀分布,此时盲沟可等间距均匀布置;若底板底部仅有弱透水层,即使存在疏水层,底板底部的入渗量也大部分分布底板于边缘一定范围内,此时盲沟布置应在底板边缘处密一些,底板中部疏一些。

(4) 提出均匀入渗和非均匀入渗情况下底板入渗量分布的计算模式。计算发现:对于有限厚度透水层上止水帷幕两侧存在水头差时,出溢侧流量绝大部分都集中在距帷幕1到1.5倍坑底含水层厚度范围内,在布置盲沟时可在该范围内布置密集些。

## 参考文献:

- [1] 曾国机,王贤能,胡岱文.抗浮技术措施应用现状分析[J].地下空间,2004,(01):105-109+142.(ZENG Guoji, WANG Xianneng, HU Daiwen. Analysis on Present Situation of Antifloating Technology Application[J]. Underground Space, 2004, (01): 105-109+142. (in Chinese))
- [2] 高宪民,孔宏.泄水抗浮技术在深圳地铁工程中的应用[C]//中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集,中国云南昆明:中铁西南科学研究院有限公司,2012.(GAO Xianmin, KONG Hong. The Application of Water Release and Anti floating Technology in Shenzhen Metro Engineering[C]//Proceedings of the 15th Annual Meeting of the Chinese Civil Engineering Society and the 17th Annual Meeting of the Tunnel and Underground Engineering Branch. Kunming, Yunnan, China: China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd, 2012 (in Chinese))
- [3] 徐春国.地下室上浮开裂事故的鉴定与加固处理[J].建筑结构,2002,(11):26-28.(XU Chunguo. Identification and reinforcement treatment of basement floating and cracking accidents[J]. Building Structure, 2002, (11): 26-28.(in Chinese))
- [4] 曹洪,骆冠勇,潘泓.采用廊道排水减压解决地下结构抗浮问题的研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(09):1864-1870.(CAO Hong, LUO Guanyong, PAN Hong. Application of drainage corridor in anti-floating of underground structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(09): 1864-1870.(in Chinese))
- [5] 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 Guanyong. A new anti-floatation method by drainage:concept and application[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(12): 2542-2548.(in Chinese))
- [6] R. P. Beaven, S. E. Cox, W. Powrie. Operation and performance of horizontal wells for leachate control in a waste landfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 1040-1047.
- [7] J. Hu, H. Ke, Y. M. Chen, X. B. Xu, H. Xu. Analytical analysis of the leachate flow to a horizontal well in dual-porosity media[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134:104105.
- [8] J. Hu, H. Ke, L. T. Zhan, Z. Y. Chen, J. W. Lan, W. Powrie, Y. M. Chen. Installation and performance of horizontal wells for dewatering at municipal solid waste landfills in China[J]. Waste Management, 2020, 103:159-168.
- [9] E. Park, H. Zhan. Hydraulics of horizontal wells in fractured shallow aquifer systems[J]. Journal of Hydrology, 2003, 281(1): 147-158.
- [10] C. S. Huang, Y. L. Chen, H. D. Yeh. A general analytical solution for flow to a single horizontal well by Fourier and Laplace transforms[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(5): 640-648.
- [11] M. W. Kawecki. Transient Flow to a Horizontal Water Well[J]. Groundwater, 2000, 38(6): 842-850.
- [12] M. W. Kawecki, H. N. Al-Subaikh. Unconfined linear flow to a horizontal well[J]. Ground Water, 2005, 43(4): 606-610.
- [13] H. Zhan, V. A. Zlotnik. Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer[J]. Water Resources Research, 2002, 38(7): 13-1-13-11.
- [14] 魏云杰, 许模, 卢书强, 等. 西部公路路基内部排水效果模拟研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, (01): 34-38. (WEI Yunjie, XU Mo, LU Shuqiang, et al. Simulation study of drainage effect inside roadbed of express way in the west of China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, (01): 34-38.(in Chinese))
- [15] 周华, 王少丽, 瞿兴业, 等. 平原区截渗排水渗流计算方法的研究与探讨[J]. 水利学报, 2007, (08): 991-997.(ZHOU Hua, WANG Shaoli, QU Xingye, et al. Method for calculating seepage flow to draining ditches in plain area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (08): 991-997.(in Chinese))
- [16] 叶剑, 兰吉武, 陈云敏, 等. 垃圾填埋场中水平导排盲沟渗流模型及间距设计[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1923-1929.(YE Jian, LAN Jiwu, CHEN Yunmin, et al. Seepage model and spacing design of horizontal trench in landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1923-1929.(in Chinese))
- [17] 赵坚, 沈振中. 尾矿坝复杂排水系统渗流计算方法的改进[J]. 河海大学学报, 1997, (02): 112-115.(ZHAO Jian, SHEN Zhenzhong. Improvement of seepage calculation method for complex drainage system of tailings dam[J]. Journal of Hohai University, 1997, (02): 112-115.(in Chinese))
- [18] 韩亚兵, 崔旋. 排渗盲沟布置型式对某尾矿坝渗流稳定性影响的模拟分析[J]. 现代矿业, 2019, **35**(09): 68-71.(HAN Yabing, CUI Xuan. Seepage and Stability Simulation Analysis of a Tailings Dam by Blind Drainage Ditch Layout[J]. Modern Mining, 2019, **35**(09): 68-71.(in Chinese))
- [19] 路瑞利, 孙东坡, 位伟. 排渗系统对尾矿库筑坝期渗流场的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, **21**(03): 532-543.(LU Ruili, SUN Dongpo, WEI Wei. Influence on Seepage Field with Drain Seepage System During Filling Period in the Tailing Reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, **21**(03): 532-543.(in Chinese))
- [20] 骆冠勇, 马铭骏, 曹洪, 等. 临江地下结构主被动联合抗浮方法及应用[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3730-3739. (LUO Guanyong, MA Mingjun, CAO Hong, et al. A new anti-float method for riverside underground structures: drainage corridor combined with uplift piles or uplift anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3730-3739.(in Chinese))
- [21] 骆冠勇, 潘泓. 结合 Bathe 算法及 Signorini 条件求解饱和 - 非饱和无压渗流问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(11): 2275-2282. (LUO Guanyong, PAN Hong. Using Bathe algorithm and Signorini condition to solve unconfined saturated-unsaturated seepage problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2275-2282.(in Chinese))
- [22] 地下结构给排水减压抗浮技术规程: T/CECS942-2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.(Technical code for anti-buoyancy design by drainage of building: T/CECS942-2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.(in Chinese))
- [23] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1990. (MAO Changxi. Seepage Computation Analysis & Control[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990. (in Chinese))