

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.045



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 深厚强透水含水层地铁深基坑地下水控制方案 综合比选方法

曹成勇<sup>a,b</sup>, 彭远胜<sup>a,c</sup>

(深圳大学 a. 土木与交通工程学院; b. 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室;  
c. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 针对深厚强透水含水层地铁深基坑地下水控制方案比选问题, 联合运用层次分析法、模糊综合评价法以及数值计算方法, 提出深厚强透水含水层地铁深基坑地下水控制方法定性与量化比选流程框架, 建立了强透水地层地铁深基坑地下水控制方案综合比选方法。以福州地铁水部站深基坑工程为例, 采用建立的比选方法, 对5种不同深基坑地下水控制方案(敞开式降水、落底式止水帷幕、深层水平封底帷幕、悬挂式止水帷幕降水以及水下开挖)进行定性评估分析, 结果表明, 悬挂式帷幕降水方案为该车站深基坑工程地下水控制最优方案。采用数值模拟方法, 分析得到了深基坑降水引发的周边地表沉降值在12~23 mm之间, 表明42 m悬挂式止水帷幕降水方案能有效控制深基坑降水引发的地表沉降。

**关键词:** 深基坑; 地铁; 强透水含水层; 地下水控制; 方案比选

**中图分类号:** TU924 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0082-09

## Comprehensive comparison of various scenarios to groundwater control for a deep metro excavation in highly-permeable aquifers

CAO Chengyong<sup>a,b</sup>, PENG Yuansheng<sup>a,c</sup>

(a. College of Civil and Transportation Engineering; b. Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Underground Metro Station; c. Key Laboratory for Coastal Urban Resilient Infrastructures of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** For comparison and selection of groundwater control scenarios for subway deep foundation pits in deep and high permeable aquifers, this paper presents the qualitative and quantitative comparison and selection framework by using analytic hierarchy process, fuzzy comprehensive evaluation and numerical calculation methods. Comprehensive comparison of various scenarios to groundwater control for a deep metro excavation in highly-permeable aquifers is established. Taking Shuibu metro station in Fuzhou as an example, five different groundwater control scenarios (i.e. open dewatering, fully penetrating curtains, deep horizontal bottom sealing curtain, partially penetrating curtains with dewatering, underwater excavation) are evaluated and analyzed using

**收稿日期:** 2022-01-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51938008); 中国博士后科学基金(2021T140474)

**作者简介:** 曹成勇(1988-), 男, 博士(后), 助理教授, 主要从事地下与隧道工程研究, E-mail: chengyongcao@163.com.

**Received:** 2022-01-11

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51938008); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021T140474)

**Author brief:** CAO Chengyong (1988-), postdoctor, assistant professor, main research interests: underground and tunnel engineering, E-mail: chengyongcao@163.com.

the proposed method. The results show that the scenario of both partially penetrating curtains and dewatering is the best for groundwater control. Then, the numerical simulation is used to analyze the surrounding surface settlement caused by dewatering. The results show that the surface settlement is in the range of 12-23 mm, which shows that the partially penetrating curtains with 42 m length can effectively control the surface settlement caused by dewatering. This method provides a solution for comparison and design of groundwater control scenarios for subway foundation pits in deep and high permeable aquifers.

**Keywords:** deep excavation; metro; high permeable aquifers; groundwater control; comparison and selection of scenarios

城市地下空间开发利用(如地铁、地下商场、地下停车场等)已成为各大、中城市建设的重要方向<sup>[1-3]</sup>。深基坑工程是城市地下空间工程建设的重要组成部分,其开挖难度大、事故危害性大,尤其天津、上海、福州等沿海地区,地下水丰富,含水层厚度大,且隔水层有时分布不连续,造成沿海地区深基坑工程地下水控制困难。目前深基坑工程施工地下水控制方式,主要有敞开式(无帷幕)降水、隔、降水组合(悬挂式止水帷幕、落底式止水帷幕及深层水平封底帷幕),水下开挖等<sup>[4-6]</sup>几种方式。深基坑工程地下水控制方法多种多样,深基坑工程实践中如何选择合适的地下水控制方案是一难点。

目前已有诸多学者针对深基坑工程降、隔水问题进行了相关研究,尤其在竖向止水帷幕对深基坑降水的作用机理方面,研究成果颇多<sup>[7-10]</sup>。Wang等<sup>[11]</sup>采用数值方法,分析了深基坑降水引发的基坑内、外水位变化,并提出采用人工回灌措施补偿地下水。曹树辉等<sup>[12]</sup>探讨了地下连续墙深度、深层水平封底参数与深基坑水位降深、涌水量之间的关系。周念清等<sup>[13]</sup>采用数值模拟方法,分析了徐家汇站深基坑降水过程中周边地层水位变化和沉降。彭戡<sup>[14]</sup>对超厚砂层深大基坑工程降隔水方案选型进行了研究,确定了等厚度水泥搅拌墙(TRD)隔水帷幕与三轴水泥土搅拌桩组合隔水方案。由上述研究成果发现,目前大多数研究是针对深基坑降、隔水问题,而对于深基坑地下水控制方案的比选与决策研究不多。

事实上,深基坑地下水控制方案比选与决策是一个复杂多目标决策的问题,常常需要对不同地下水控制方案进行科学、系统的比选与评价。可是,目前深基坑地下水控制的实际设计与施工中,大多数情况下主要依据深基坑专业技术人员的经验判断与项目管理者们的决策来决定地下水控制方案,因此,急需建立一套有效的深基坑地下水控制方案比选综合评价方法。笔者采用层次分析法、模糊综合评价法以及数值计算方法,提出深厚强透水含水层

地铁深基坑地下水控制方法定性与定量化比选流程框架,建立了强透水含水层地铁深基坑地下水控制综合比选方法,为强透水含水层地铁深基坑地下水控制比选设计提供了思路。

## 1 深基坑地下水控制方案比选思路

图1给出了深基坑地下水控制方案比选流程。

深基坑地下水控制方案比选思路具体为:

1)详细调研深基坑工程水文、地层条件、工程规模以及周围环境等内容,初步拟定出深基坑地下水控制方案;

2)基于层次分析-模糊综合评价法,结合专家经验评估,对不同深基坑地下水控制方案(如敞开式降水、落底式止水帷幕、深层水平封底、悬挂式止水帷幕、水下开挖等(见图2))进行比选,初步确定可操作的地下水控制方案;

3)基于数值模拟或解析计算方法,定量地分析深基坑降水对周围环境的影响,最后确定深基坑地下水控制方案。

## 2 深基坑地下水控制方案比选方法

### 2.1 决策指标体系的构建

#### 2.1.1 指标体系构建原则

城市地铁深厚含水层深基坑地下水控制方案比选应遵循以下几个原则:

1)技术方案应该先进可行。选择的深基坑工程地下水控制方案需具有科学性、可靠性以及施工安全性。

2)城市深基坑周边高层建筑物密集,地下管线众多,基坑降水不可避免地会对深基坑周边环境产生不利影响,需要考虑次生灾害发生的可能性。

3)城市地铁深基坑工程建设成本高,施工工期严格控制,方案比选中必须考虑不同方案施工组织情况,应选择施工快捷的方案。

4)在保证地铁深基坑建设安全的前提下,尽可能使工程造价经济、合理。

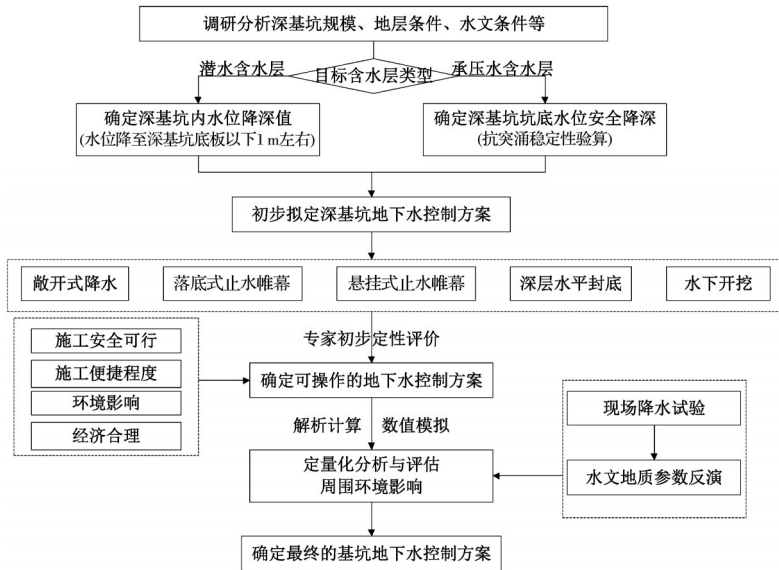


图 1 深基坑地下水控制方案比选流程图

Fig. 1 Comprehensive comparison of various scenarios to groundwater control for a deep excavation

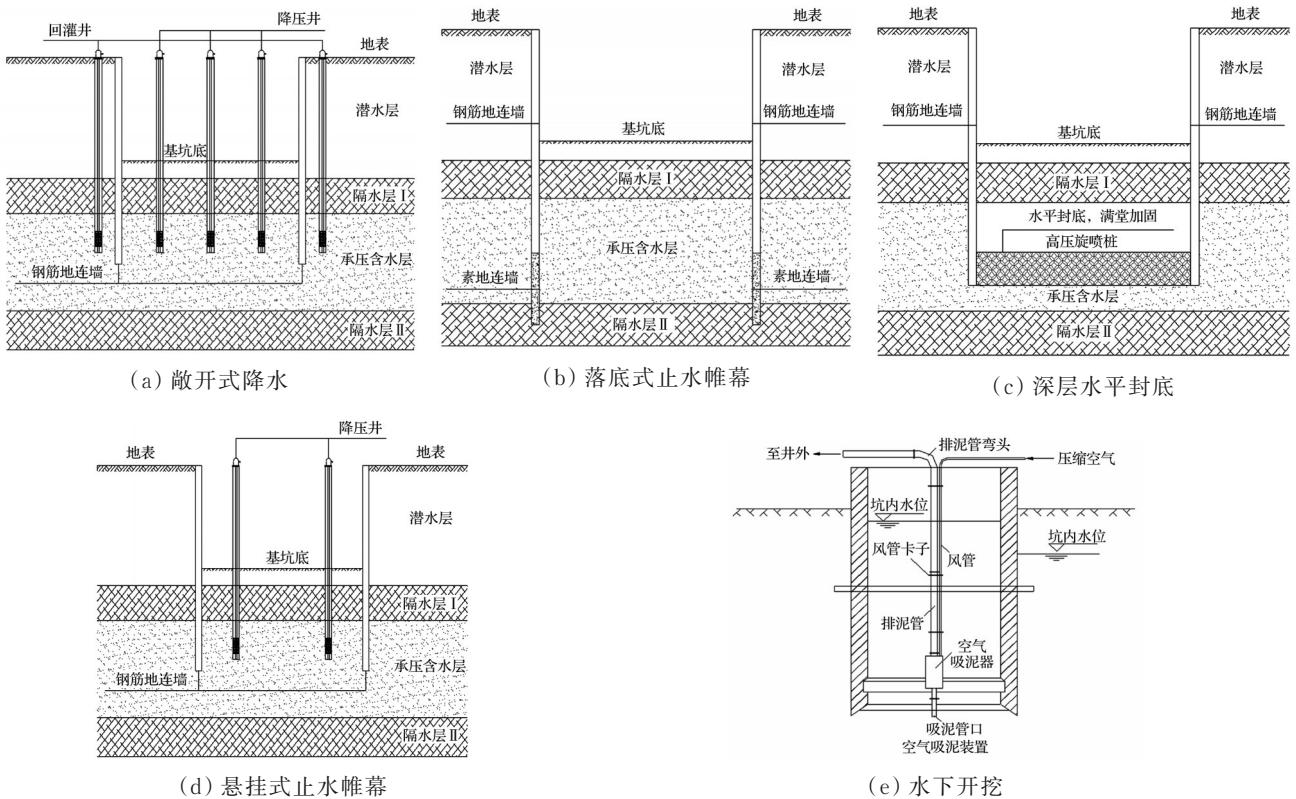


图 2 深基坑地下水控制方式

Fig. 2 Groundwater control scenarios of a foundation pit

2.1.2 建立评价指标体系

深基坑地下水控制方案决策的影响因素众多,在实际评价中不可能做到将所有因素纳入方案决策中,因此,在实际操作中需要提炼出具有代表性的因素来构建决策指标体系。一般来说,城市地铁深基坑周边建筑密集,深厚含水层地下水控制方案的选择需要考虑技术方案的可行性、造价是否经

济、合理、施工便捷与否,以及深基坑工程地下水控制方案实施过程中对周围环境的影响及引发次生灾害的可能性。

因此,根据方案的基本原则以及结合调研众多类似工程案例,最终构建的深基坑地下水控制方案决策指标体系由4个二级指标、10个三级指标组成,见图3。

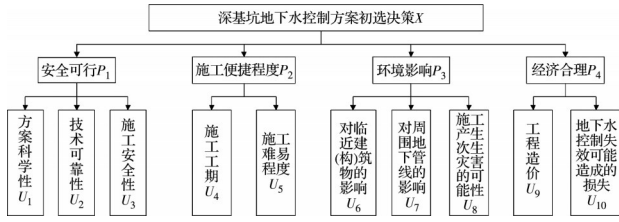


图 3 深基坑地下水控制方案决策指标体系

Fig. 3 Decision-making index system of groundwater control scenarios for a deep foundation pit

2.2 评价因素的权重向量确定

2.2.1 构建判断矩阵

邀请深基坑、水文地质等领域专家对调查问卷打分,根据每一层次各因素对于上一层次某因素的相对重要程度进行两两判断,并采用萨蒂的1~9标度法,得到相应的判断矩阵A。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{ij} > 0$ ;  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ;  $a_{ii} = 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。

2.2.2 权重向量确定方法

权重向量确定方法有“和”法、“方根法”及“特征根法”,这3种方法各有特点<sup>[15]</sup>。主要采用方根法近似计算判断矩阵A的最大特征根 $\lambda_{max}$ 以及特征向量T。

特征向量T计算公式为

$$T_i = \frac{\left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_i \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

再将特征向量T归一化得到标准向量  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,  $t_i$  则为各评价因素的权重系数。

判断矩阵A最大特征根 $\lambda_{max}$ 表达式为

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} T_j}{T_i} \quad (3)$$

2.2.3 检验判断矩阵A的一致性

判断矩阵A的一致性检验指标  $C_1$  为

$$C_1 = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

其值越小,认为矩阵A的一致性就会越好。当随机一致性比率  $C_R = C_1/R_1 < 0.1$  时,则认为判断矩阵满足一致性,否则需要重新构造判断矩阵A。其中, $R_1$ 为随机一致性指标经验值,根据表1确定<sup>[16]</sup>。

表 1 平均随机一致性指标

Table 1 Average random consistency index

矩阵	$R_1$	矩阵	$R_1$	矩阵	$R_1$
1	0	4	0.89	7	1.36
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.26	9	1.45

2.3 层次分析-模糊综合评价模型建立

2.3.1 因素集与评判集建立

深基坑地下水控制方案初选决策时,因素集U记为

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m\} \quad (5)$$

式中: $u_i$ 为第*i*个评价因素指标。

评判集V记为

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_n\} \quad (6)$$

式中: $v_j$ 为某评价因素在*j*等级上的评分数值,既可以是定性的,也可以是定量的。

将评判集V划分为I(好)、II(较好)、III(一般)、IV(较差)、V(差)5个等级,等级分值分别为90、70、50、30、10,记作  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{90, 70, 50, 30, 10\}$ 。

2.3.2 隶属度矩阵R的建立

所有评价因素集U对评判集V的模糊关系向量联合起来,就组成U和V间的模糊关系矩阵R(亦称为隶属度矩阵)

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} \\ \vdots \\ r_{m1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $r_{ij}$ 的值是因素 $u_i$ 对各等级 $v_j$ 的隶属度,其值为介于0到1之间的常数。

深基坑地下水控制方案初选决策时,大多数指标为定性指标,主要靠专家经验进行评判,定性指标的模糊隶属度确定方法如下:设第*i*个因素的单因素评价  $r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}, \dots, r_{i5}\}$ ,其中 $r_{ik} (k = 1, 2, \dots, 5)$ 表示关于第*k*个等级 $v_k$ 的第*i*个因素评价的隶属度。评语集可以从Fuzzy子集中查取,见表2。

表 2 Fuzzy子集表

Table 2 Fuzzy subset table

评语	I级	II级	III级	IV级	V级
好(90)	0.67	0.33	0	0	0
较好(70)	0.25	0.5	0.25	0	0
一般(50)	0	0.25	0.5	0.25	0
较差(30)	0	0	0.25	0.5	0.25
差(10)	0	0	0	0.33	0.67

2.3.3 计算综合评价矩阵B

根据隶属度矩阵R和由层次分析法计算得到的权重向量  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ,可以求解得到模糊综合



评价矩阵  $B$  为

$$B = TR = (t_1, t_2, \dots, t_m) \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 2.3.4 计算综合评价价值 $S$

模糊综合评判结果集  $B$  最终可转化为综合评价价值  $S$ , 模糊综合评价价值  $S$  为

$$S = BV^T \quad (9)$$

当计算得到深基坑各个地下水控制方案的模糊综合评价价值后, 可以对基坑各个地下水控制方案有一个直观量化的评估, 从而便于比较多个方案。

## 3 深基坑地下水控制方案定量化分析

在层次分析-模糊综合评价法初选后的基础上, 需要从环境影响角度对初定的深基坑地下水控制方案进行定量化评估, 从而选择既安全可靠又经济合理的地铁基坑地下水控制方案。

### 3.1 深基坑安全水位降深确定

1) 当地下水类型为潜水时, 深基坑水位需降至基坑底板以下 1 m 左右, 以满足开挖安全要求。

2) 当地下水类型为承压水时, 深基坑安全水位降深可根据深基坑底板抗突涌稳定性验算进行确定。抗突涌稳定性判别条件<sup>[17]</sup>为

$$\sum_i h_i \cdot \gamma_{is} \geq F_s \cdot \gamma_w \cdot H \quad (10)$$

式中:  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度, m;  $\gamma_{is}$  为第  $i$  层土的重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $H$  为承压含水层水头高度, m;  $\gamma_w$  为水的重度, 取  $10 \text{ kN/m}^3$ ;  $F_s$  为安全系数, 取  $1.05 \sim 1.20$ 。

### 3.2 深基坑降水对周围环境的影响定量化分析

深基坑降水引发的地表沉降采用分层总和法

计算<sup>[17]</sup>

$$s = \phi \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_{zi} h_i}{E_{si}} \quad (11)$$

式中:  $s$  为降水引起的地面总附加沉降量, m;  $\phi$  为沉降计算经验系数, 可根据地区工程经验进行取值, 无经验时取 1;  $\Delta\sigma'_{zi}$  为第  $i$  层水位下降引起的土层附加荷载,  $\text{kPa}$ , 可以根据水位降深计算;  $E_{si}$  为第  $i$  层土层的压缩模量,  $\text{MPa}$ 。

## 4 工程实例分析

### 4.1 工程概况

福州地铁水部站为地下两层岛式车站, 总长 170 m 左右, 宽 19.7 m, 车站中心基坑深 16.5 m, 主体围护结构地下连续墙厚 80 cm。深基坑场地各岩土分层由上至下依次为: 杂填土、淤泥、淤泥夹砂、粗中砂(含泥)、粉质黏土、卵石以及花岗岩, 如图 4 所示。场地的地下水主要包含上层滞水和承压水, 上层滞水主要分布于人工填土层中, 承压水则主要分布于淤泥夹砂、粗中砂、卵石中, 各承压含水层之间具有紧密的水力联系。土体物理力学参数见表 3。

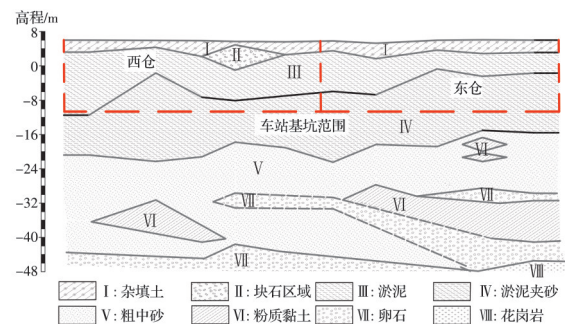


图 4 地质剖面图

Fig. 4 Geological profile

表 3 土体物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of soils

土层	平均层厚/m	天然重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	渗透系数 $k/(\text{m/d})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$
杂填土	4	18.5	8.64	
淤泥	8	15.7	0.005 5	6
淤泥夹砂	12	16.2	0.54	18
粗中砂	18	19.0	19.7	33
粉质黏土	6	19.5	0.003	17.3
卵石	8	17.0	40	45
花岗岩		21.0	0.61	64

### 4.2 深基坑地下水控制方案比选

结合地铁深基坑工程规模、周围环境及水文地质条件, 针对敞开式降水 X1、落底式止水帷幕 X2、深层水平封底 X3、悬挂式止水帷幕 X4、水下开挖方案 X5 等, 应用层次分析-模糊综合评价法, 对各地下水控制方案进行初步比选, 确定出较为适宜的地下水控制方案。

#### 4.2.1 隶属度矩阵确定

根据各地下水控制方案(敞开式降水 X1、落底式止水帷幕 X2、深层水平封底 X3、悬挂式止水帷幕 X4 及水下开挖方案 X5)的决策指标优劣性分析, 结合专家经验, 将决策指标进行量化评判, 得到各方案对应的隶属度矩阵  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  及  $R_5$  分别为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \end{bmatrix}$$

4.2.2 权重向量确定

根据确立的地下水控制方案比选指标体系,邀请多位深基坑工程领域专家针对各因素的相对重要程度给予建议,综合分析各种情况后,构造目标层对于准则层 X-P 因素的判断矩阵,同理可求得各准则层对于指标层 P-U 判断矩阵,如表 4~表 8 所示。同时,通过方根法计算相应权重也列于表中。

表 4 目标层-准则层的判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of target layer

参数	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	权重
$P_1$	1	3	4	2	0.482
$P_2$	1/3	1	1/2	1/2	0.117
$P_3$	1/4	2	1	2	0.218
$P_4$	1/2	2	1/2	1	0.183

表 5 准则层“安全可行参数  $P_1$ ”的判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of rule layer “Safety and feasibility  $P_1$ ”

参数	$U_1$	$U_2$	$U_3$	权重
$U_1$	1	1	1/2	0.25
$U_2$	1	1	1/2	0.25
$U_3$	2	2	1	0.5

表 6 准则层“施工便捷程度参数  $P_2$ ”的判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of rule layer “Construction convenience  $P_2$ ”

参数	$U_4$	$U_5$	权重
$U_4$	1	4	0.8
$U_5$	1/4	1	0.2

表 7 准则层“环境影响参数  $P_3$ ”的判断矩阵

Table 7 Judgment matrix of rule layer “environmental effect  $P_3$ ”

参数	$U_6$	$U_7$	$U_8$	权重
$U_6$	1	1	2	0.4
$U_7$	1	1	2	0.4
$U_8$	1/2	1/2	1	0.2

表 8 准则层“经济合理参数  $P_4$ ”的判断矩阵

Table 8 Judgment matrix of rule layer “Economy and rationality  $P_4$ ”

参数	$U_9$	$U_{10}$	权重
$U_9$	1	5	0.833
$U_{10}$	1/5	1	0.167

经计算,层次总排序计算结果具有较强的一致性,最终得到总层次排序的权重向量为: $T=(0.1205, 0.1205, 0.241, 0.0936, 0.0234, 0.0872, 0.0872, 0.0436, 0.1524, 0.0306)$ 。

4.2.3 综合评价矩阵  $B$  及综合评价价值  $S$  计算

方案①的模糊综合评价矩阵  $B$  与模糊综合评价

值  $S$  分别为

$$B = TR_1 = [0.055 \quad 0.139 \quad 0.236 \quad 0.331 \quad 0.239]$$

$$S = BV^T = 38.77$$

同理,可以得出各方案的综合评价得分,如表 9 所示。

表 9 各方案的综合评价得分

Table 9 Comprehensive evaluation score of each scenario

编号	方案名称	综合评价得分 $S$
方案①	敞开式降水 $X_1$	38.77
方案②	落底式止水帷幕 $X_2$	44.13
方案③	深层水平封底 $X_3$	74.46
方案④	悬挂式止水帷幕 $X_4$	83.09
方案⑤	水下开挖 $X_5$	23.93

由表 9 可知,悬挂式止水帷幕降水方案综合评价得分相对较高,由此可见,该方案理论上可作为该地铁车站深基坑地下水控制优先方案。

然而,当选择悬挂式止水帷幕降水方案时,需要进一步定量评估深基坑降水对基坑外环境的影响,最终合理确定深基坑开挖地下水控制具体方案(如降水井布置、止水帷幕设计等),以最大限度保证深基坑施工安全。

### 4.3 深基坑地下水控制方案量化分析

#### 4.3.1 深基坑安全水位降深计算

根据深基坑底板抗突涌稳定性判别条件,深基坑内安全水位降深计算值如表 10 所示。

#### 4.3.2 深基坑降水引发的地表沉降分析

1) 数值计算模型。有限差分数值计算模型

表 10 抗突涌稳定性验算

Table 10 Stability checking of pit bottom

部位	坑底高程/m	承压水顶托力/kPa	上覆土压力/kPa	安全水位降深/m
东端头井	-10.58	158.50	73.72	7.2
西端头井	-12.24	210.90	138.54	6.1
标准段	-11.92	176.19	117.81	4.7

区域  $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m} \times 60\text{ m}$ , 三维数值计算模型如图 5 所示。模型四周边界采用定水头模拟,承压水头边界为地表以下 3 m,各土层的初始水位设置为相应边界的水位高度。在深基坑竖向止水帷幕设计中,地下连续墙深度为 42 m(图 6),充分利用围护结构地下连续墙下方粉质黏土的弱透水性,以减少深基坑内外、水力联系。基坑内降压抽水井布置方案如图 7 所示。深基坑地下连续墙(止水帷幕)采用渗透系数非常小( $1 \times 10^{-8}\text{ m/d}$ )单元进行模拟。管井滤管处单元设置定流量边界。

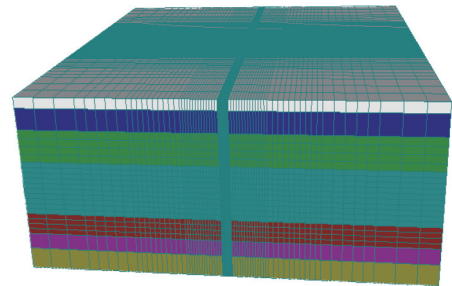


图 5 三维数值计算模型

Fig. 5 Three-dimension numerical model

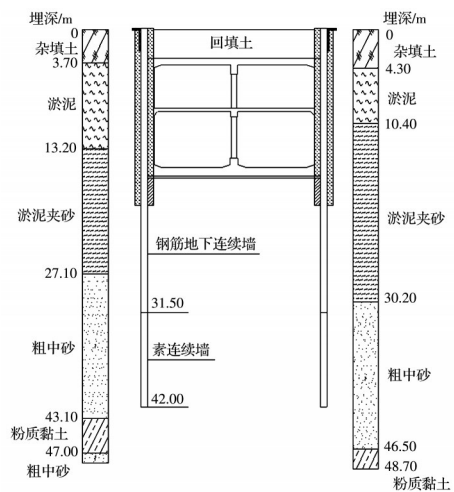


图 6 竖向止水帷幕设计示意图

Fig. 6 Design of vertical waterproof curtain

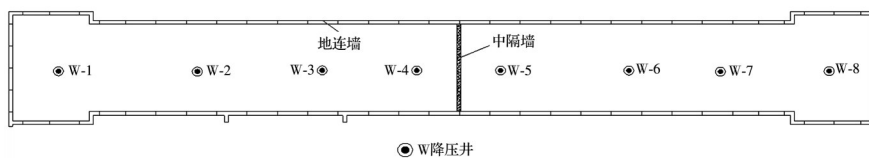


图 7 抽水井布置方案

Fig. 7 Layout scheme of pumping wells

2) 悬挂式止水帷幕深基坑降水预测分析。通过对深基坑各抽水井的抽水量不断调试,设定抽水总时间为 30 d,以表 10 中深基坑内安全水位降深为控制标准,各抽水井抽水流量如表 11 所示,分析得到基坑抽水 30 d 后周边水位降深,如图 8 所示。采用深基坑降水作用引发的地表沉降预测式(11),计

算得到深基坑降水 30 d 后地表沉降预测结果,如图 9 所示。

从图 8 和图 9 中可以看出:

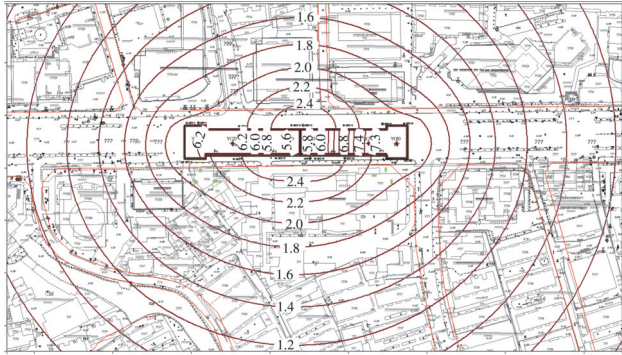
1) 深基坑抽水 30 d 后,基坑东端头井、西端头井以及标准段均基本能满足表 10 要求的安全水位降深。



表 11 抽水井流量

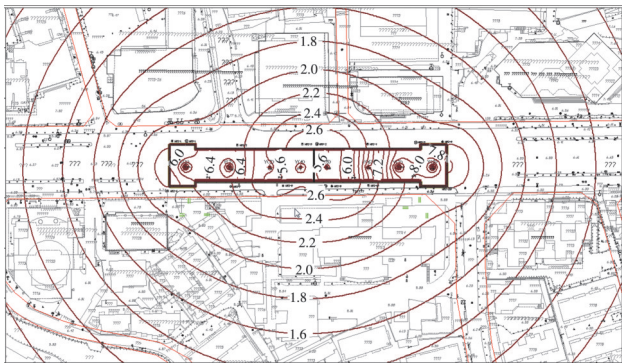
Table 11 Pumping rate of wells

抽水井	抽水流量/(m <sup>3</sup> /d)	抽水井	抽水流量/(m <sup>3</sup> /d)
W-1	500	W-5	150
W-2	450	W-6	150
W-3	150	W-7	500
W-4	150	W-8	550



单位: m

(a) 淤泥夹砂层



单位: m

(b) 粗中砂层

图 8 水位降深预测结果

Fig. 8 Prediction results of water level drawdown

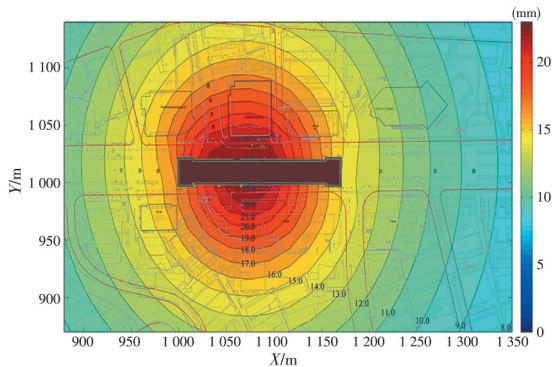


图 9 地表沉降预测结果

Fig.9 Prediction results of surface subsidence

2)深基坑周边建筑的沉降值在 12~23 mm 之间,处于合理范围内(小于 30 mm),表明 42 m 悬挂式止水帷幕方案能有效控制基坑降水引发的地表沉降。

### 5 结论

1)提出了深厚强透水层地铁深基坑地下水控制方法定性与量化比选流程框架,建立了强透水地层地铁深基坑地下水控制方案综合比选方法。

2)采用建立的比选方法,对 5 种不同基坑地下水控制方案(敞开式降水、落底式止水帷幕、深层水平封底、悬挂式止水帷幕及水下开挖)进行评估分析,结果表明,悬挂式止水帷幕方案为该车站基坑地下水控制最优方案。

3)采用数值模拟方法,分析得到基坑降水引发的周边建筑沉降值在 12~23 mm 之间,表明 42 m 悬挂式止水帷幕能有效地控制基坑降水引发的地表沉降。

### 参考文献

[1] 黄强兵, 彭建兵, 王飞永, 等. 特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 85-94.  
 HUANG Q B, PENG J B, WANG F Y, et al. Issues and challenges in the development of urban underground space in adverse geological environment [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 85-94. (in Chinese)

[2] ZENG C F, ZHENG G, XUE X L, et al. Combined recharge: A method to prevent ground settlement induced by redevelopment of recharge wells [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 1-11.

[3] ZHANG W G, WANG W, ZHOU D, et al. Influence of groundwater drawdown on excavation responses - A case history in Bukit Timah granitic residual soils [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 856-864.

[4] 高旭, 郭建波, 晏鄂川. 考虑止水帷幕的深基坑降水预测解析计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1431-1439.  
 GAO X, GUO J B, YAN E C. Dewatering forecast of deep foundation pit considering waterproof curtain using analytic approach [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1431-1439. (in Chinese)

[5] 周铮. 深基坑工程采用 RJP 工法封底加固以取代抽降承压水的方法及工程应用[J]. 建筑结构, 2016, 46(Sup1): 742-745.  
 ZHOU Z. Method and application of using RJP-reinforcement instead of confined water dewatering in deep excavation [J]. Building Structure, 2016, 46(Sup1): 742-745. (in Chinese)

[6] CAO C Y, SHI C H, LIU L H, et al. Novel excavation and construction method for a deep shaft excavation in ultrathick aquifers [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1827479.



- [7] WANG J X, LIU X T, WU Y B, et al. Field experiment and numerical simulation of coupling non-Darcy flow caused by curtain and pumping well in foundation pit dewatering [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 277-293.
- [8] 李方明, 陈国兴, 刘雪珠. 悬挂式帷幕地铁深基坑变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2182-2190.  
LI F M, CHEN G X, LIU X Z. Deformation characteristics of suspended curtain deep foundation pit of metro lines [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2182-2190. (in Chinese)
- [9] WU Y X, SHEN S L, YUAN D J. Characteristics of dewatering induced drawdown curve under blocking effect of retaining wall in aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 554-566.
- [10] XU Y S, SHEN S L, MA L, et al. Evaluation of the blocking effect of retaining walls on groundwater seepage in aquifers with different insertion depths [J]. *Engineering Geology*, 2014, 183: 254-264.
- [11] WANG J X, FENG B, YU H P, et al. Numerical study of dewatering in a large deep foundation pit [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(3): 863-872.
- [12] 曹树辉, 车灿辉, 吉泳安. 深层水平封底在巨厚砂卵石层基坑地下水控制中的应用[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(10): 1657-1665.  
CAO S H, CHE C H, JI Y A. Application of deep horizontal bottom sealing to groundwater control of foundation pit with super-thick sand and pebble layer [J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(10): 1657-1665. (in Chinese)
- [13] 周念清, 唐益群, 姜荣祥, 等. 徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1950-1956.  
ZHOU N Q, TANG Y Q, LOU R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and land subsidence control of Xujiahui Metro Station [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(12): 1950-1956. (in Chinese)
- [14] 彭戡. 超厚砂层的深大基坑工程降隔水方案选型[J]. *土工基础*, 2021, 35(6): 686-689, 731.  
PENG K. Dewatering design comparisons in deep excavations in thick sandy soils [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2021, 35(6): 686-689, 731. (in Chinese)
- [15] 王振宇, 朱太宜, 王星华. 长沙城市地下空间开发利用的适宜性评价体系研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(5): 1274-1281.  
WANG Z Y, ZHU T Y, WANG X H. Study on suitability evaluation system of Changsha's urban underground space for development and utilization [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(5): 1274-1281. (in Chinese)
- [16] 朱立成, 雷明锋, 万旺, 等. 长大隧道施工组织模糊评价方法及应用[J]. *土木工程与管理学报*, 2020, 37(1): 159-164, 172.  
ZHU L C, LEI M F, WAN W, et al. Fuzzy evaluation method and application of large-long tunnel construction organization [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020, 37(1): 159-164, 172. (in Chinese)
- [17] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)