

# 北京市中心城基坑工程地质条件适宜性评价方法研究

王 法<sup>1</sup>, 张亚芹<sup>2</sup>, 王军辉<sup>1</sup>, 叶康军<sup>2</sup>, 周宏磊<sup>1</sup>, 韩 煊<sup>1</sup>

(1. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038, 2. 北京市规划委员会, 北京 100045)

**摘要:** 基于目前北京市中心城地下空间开发的趋势和地下空间开发中常用的基坑工程施工技术特点的基础上, 采用层次分析法建立了一种适用于基坑工程地质条件适宜性评价的新方法。采用该方法计算所得结果可用于评价工程地质条件对基坑工程建设期和竣工后使用期的影响。该方法不仅可用以建立北京市地下空间开发规划中工程地质评价的技术平台, 还可期待为其他类似工程地质适宜性评价工作提供借鉴。

**关键词:** 基坑工程; 工程地质条件; 适宜性评价; 评价体系; 层次分析法

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0739-05

**作者简介:** 王 法(1982-), 男, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事桩基工程、基坑工程、地铁隧道工程咨询等方面的工作。E-mail: wangfa1982@163.com.

## Suitability evaluation method for engineering geology of excavation engineering in Beijing

WANG Fa<sup>1</sup>, ZHANG Ya-qin<sup>2</sup>, WANG Jun-hui<sup>1</sup>, YE Kang-jun<sup>2</sup>, ZHOU Hong-lei<sup>1</sup>, HAN Xuan<sup>1</sup>,

(1. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China; 2. Beijing Municipal Commission of Urban Planning, Beijing 100045, China)

**Abstract:** With the development trend of the underground space in the central area of Beijing's inner city, based on the conventional construction technology of excavation engineering, the analytic hierarchy process is adopted to establish a new suitability evaluation method for engineering geology. The calculated results of this method can be used to estimate the influence of engineering geology condition on the construction and usage of excavation engineering. The proposed method can be used to establish a technological platform of engineering geology suitability evaluation for the development planning of urban underground space in Beijing. It may provide reference for suitability evaluation work of similar engineering geology.

**Key words:** excavation engineering; engineering geology; suitability evaluation; evaluation system; analytic hierarchy process

## 0 引言

针对城市地下空间开发的不断深入, 国内地下空间开发中工程地质评价方法的研究也得到了极大的发展, 并且有些城市已经试探性地把这些研究成果初步应用于地下空间的规划与建设。其中, 北京<sup>[1]</sup>、武汉<sup>[2]</sup>、合肥<sup>[3]</sup>、天津<sup>[4]</sup>、上海<sup>[5]</sup>等城市先后采用了不同的评价方法, 对各自地下空间开发中的工程地质条件进行了评价分级。此外, 如重庆、烟台、青岛、济南、深圳等城市也均已开展了地下空间与地质环境之间的制约关系研究<sup>0</sup>。

依据上述工程地质评价案例发现, 国内现有地质条件适宜性评价方法大体可分为定性评价方法和定量评价方法两大类。其中, 近年来随着应用数学和相关图形软件的发展, 定量评价在实践中得到很好推广, 虽然其评价过程、各种参数的取值以及最终评价结果往往也离不开专家经验的判断与修正, 但定量评价已

成为必然趋势。

在定量评价方法中主要有层次分析法、聚类分析法和神经网络法<sup>[6]</sup>等几大类。其中, 层次分析法在目前行业内应用最为成熟和广泛。基于此, 本文采用层次分析方法为基本方法, 在此基础上考虑北京市中心城地下空间开发的发展趋势和现有基坑工程施工技术的特点, 提出一种适用于基坑工程的地质条件适宜性评价的方法。本方法可用以建立北京市地下空间开发规划中工程地质评价的技术平台, 还期待可为其他类似工程评价工作提供参考。

基金项目: 北京市规划委员会联合研究项目“北京市中心城深部地下空间重大环境工程地质问题研究”; 北京市海淀区科技项目(K20110036)

收稿日期: 2012-08-24

# 1 基于层次分析法的工程地质条件评价体系现状

## 1.1 层次分析法概述

层次分析法可以将一个复杂决策问题的有关元素分解成目标层、准则层及因子层，构建一个层次结构模型，有利于对复杂决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析，并利用一定的定量信息，使决策的思维过程数学化并最终求解问题。目前该方法已成为国内一种常用的多目标多属性决策方法。

城市地下空间由多种因素、多层因子组成的多层次复杂系统，其系统内部各影响因素、影响因子和系统与外部环境之间有着密不可分的联系和相互作用，应采用定性和定量相结合的方法去认识和评估这一复杂系统，故层次分析法是有效的且符合实际的评估方法。

## 1.2 现有基于层次分析法的工程地质适宜性评价方法体系现状

层次分析法虽然目前国内已得到了较多的应用，但针对各工程地质条件评价案例的评价结果，发现采用这些方法体系还不能完全适合基坑工程，主要表现在：①受评价人员专业、经验、能力所限，有些评价指标体系主要从区域宏观地质条件考虑，而对工程本身特点考虑的较少，如城市规划工程地质条件适宜性评价；②现有工程地质条件适宜性评价大多仅针对工程竣工后使用期间的评价，较少考虑不良工程地质条件对工程建设期间的影响。

# 2 基坑工程地质条件适宜性评价体系

本文采用层次分析方法的基本思路，针对北京地区地下空间开发的发展趋势和现有基坑工程施工技术特点，建立了适用于北京市中心城地下空间开发中的基坑工程地质适宜性评价的模型和方法。

## 2.1 基坑工程地质条件适宜性评价体系的层次结构

基坑工程地质条件适宜性评价首先应建立合理的评价体系，并对评价因子进行层次划分。鉴于基坑工程与地质环境相互作用的特点，本文基于以下两点考虑建立了基坑工程地质条件评价体系（见图1）：

（1）以地下空间开发中的建设期和使用期这两个重要阶段来设定地质条件适宜性评价准则层。

（2）针对基坑工程常用施工技术，从地质环境与地下空间相互作用所可能诱发的各类风险角度，结合北京市具体的地质条件选择评价因子。各因子既要充分反映地下空间开发中的主要工程及环境问题，又要尽可能的避免重复和交叉，以保证最终评价成果的客

观性。

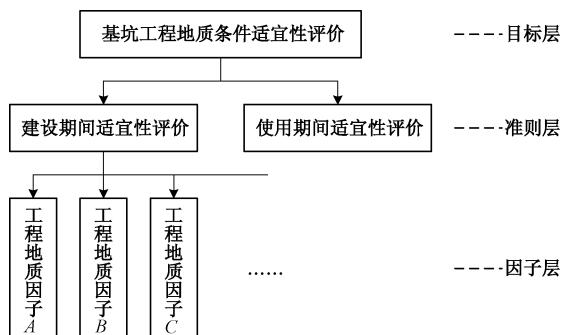


图1 层次划分结构示意图

Fig. 1 Sketch of hierarchical structure

## 2.2 评价数学模型

本文针对上述工程地质条件适宜性评价体系，提出了相应的工程地质条件适宜性评价模型的数学表达式：

（1）由准则层到目标层

$$I_s = \omega'_1 \cdot I_1 + \omega'_2 \cdot I_2 \quad (1)$$

式中  $I_s$  为针对基坑工程的工程地质条件适宜性评价结果；  $I_1$ ， $I_2$  分别为对施工期和使用期的适宜性评价结果；  $\omega'_1$ ， $\omega'_2$  分别为施工期和使用期两个准则层元素的权重。

（2）由因子层到准则层

$$\begin{cases} I_1 = \sum_{j=1}^{m_1} \omega''_{1j} \cdot X_j, \\ I_2 = \sum_{j=1}^{m_2} \omega''_{2j} \cdot X_j. \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\omega''_{1j}$ ， $\omega''_{2j}$  分别为隶属于施工期和使用期下第  $j$  项因子的权重；  $m_1$ ， $m_2$  分别为隶属于施工期和使用期下的因子总数。

## 2.3 评价因子的确定

地下空间开发地质环境与工程活动相互作用较为明显，因子确定相对比较复杂，本文根据基坑工程施工技术的特点与发展趋势、可能存在的风险以及相应的控制措施的技术经济特点的分析与归纳，提炼施工期间和使用期间的主要地质环境因子。

（1）建设期间主要工程风险因子识别

a) 环境影响

基坑工程抽降潜水或承压水会引起相对隔水层的固结下沉。同时，基坑工程开挖时，改变了地层的原始应力状态，引起地层位移。在基坑周边建成环境对变形控制要求较严时，如基坑施工产生过大变形，就可能导致基坑周边建筑物、地下管线因产生过大差异沉降遭到破坏。该风险主要诱发工程环境地质因素包括厚层的潜水或承压水、基坑周边建成环境条件、软弱地层条件等。

## b) 流砂引起的基坑稳定问题

挡土结构未设止水帷幕或虽设置止水帷幕, 但挡土结构或止水帷幕存在缺损, 当坑内降水开挖后在地下水作用下, 水携带淤泥质土、松砂粉土等细粒土从基坑以上的挡土结构的背部流入基坑内。该风险主要诱发工程环境地质因素包括饱和、松散的砂土与粉土层, 以及局部的上层滞水。

## c) 高水头压力的工程风险

在挡土支护结构设计时, 期望通过对基坑底部实施降水来降低挡土结构的背面侧向水压力, 但随着北京地区基坑工程陆续开始限制采用降水方案而采用隔水方案, 由于侧向水压力造成挡土结构产生较大的挠曲变形的案例有逐渐增多的趋势。此外, 由于连降暴

雨或因市政自来水管断裂, 再加上坑周地面没有进行防水渗入处理, 增加了基坑支护结构背后土层的水压力, 对支护结构产生了过大的侧向附加荷载, 破坏了止水帷幕的整体性。该风险主要诱发工程环境地质因素为厚层的潜水或承压水。

当基坑内外侧的地下水位差较大, 并且基坑下部有承压水层时, 如果挡土止水帷幕桩墙未进入透水层或插入深度不够, 当地下水的向上渗流力(动水压力)大于土的浮重密度时, 就会产生坑底突涌问题。该风险主要诱发工程环境地质因素为承压水。

## d) 施工困难

当基坑施工深度范围内分布有较厚大粒径卵石层

表 1 基坑工程地质因子及量化标准表

Table 1 Geological factors and quantitative standards of excavation engineering

序号	准则层	因子层	因子层中各因子评价指标	因子指标量化分级				工程与环境风险
				所属分级 (1≤ $X_1$ <3)	所属分级 (3≤ $X_1$ <6)	所属分级 (6≤ $X_1$ <8)	所属分级 (8≤ $X_1$ ≤10)	
1	厚层填土、新近沉积土、软土等不良土层	厚度 $H/m$	$H>5$	$3 < H \leq 5$	$1 < H \leq 3$	$H \leq 1$		①引起周围建构筑物变形损坏; ②边坡失稳
2	饱和、松散的砂层、粉土层	厚度 $H/m$	$H>5$	$3 < H \leq 5$	$1 < H \leq 3$	$H \leq 1$		①流砂; ②不易降水条件下易发生涌水和突水; ③地面塌陷
3	卵石地层(含超大粒径漂石)	厚度 $H/m$ 和粒径 $D_{\text{大}}/mm$	$H \geq 5$ 且 $D_{\text{大}} \geq 500$	$1 \leq H < 5$ 且 $D_{\text{大}} \geq 500$ 或 $H \geq 5$ 且 $300 \leq D_{\text{大}} < 500$ 或 $D_{\text{大}} < 500$	$H < 1$ 且 $D_{\text{大}} \geq 500$ 或 $1 \leq H < 5$ 且 $300 \leq D_{\text{大}} < 500$ 或 $H \geq 5$ 且 $D_{\text{大}} < 300$	$H < 1$ 且 $D_{\text{大}} < 500$ 或 $1 \leq H < 5$ 且 $D_{\text{大}} < 300$		护坡桩、地下连续墙施工困难
4	局部上层滞水	复杂程度	复杂	较复杂	一般	简单		①渗水; ②侧壁坍塌
5	高渗透性潜水含水层	含水层厚度 $H/m$	$H>5$	$3 < H \leq 5$	$1 < H \leq 3$	$H \leq 1$		①渗水、涌水; ②侧壁坍塌; ③降水易引起水资源消耗
6	承压水	影响程度	严重	较严重	一般	轻微或无		①地下水未有效控制时易发生底鼓、突涌; ②降水易引起地面沉降和水资源消耗
7	基岩	岩性、厚度 $H/m$	$H>5$ 的黏土岩层(或风化层)或 $H>5$ 的砾岩	$3 < H < 5$ 的黏土岩层(或风化层)或 $3 < H < 5$ 的砾岩	$1 < H < 3$ 的黏土岩(或风化层)或 $3 < H < 5$ 的砾岩	$H < 1$ 的黏土岩(或风化层)或 $H < 3$ 的砾岩		①黏土岩在干湿交替情况下易发生膨胀、收缩甚至崩解; ②砾岩遇水易软化或水解
8	建成环境因素	复杂程度	复杂	较复杂	一般	简单		①建构筑物变形过大或破坏; ②遇地下障碍物时护坡桩、地下连续墙施工困难
9	区域地下水位回升	影响程度	严重	较严重	一般	轻微或无		引起地下结构抗浮、水压力问题、渗漏问题
10	较厚的软弱下卧层	厚度 $H/m$	$H>5$	$3 < H \leq 5$	$1 < H \leq 3$	$H \leq 1$		沉降过大引起结构损坏
11	区域地面沉降	沉降速率 $v/(mm/yr)$	$v>80$	$50 < v \leq 80$	$30 < v \leq 50$	$v \leq 30$		引起地下结构破坏
12	活动断裂	活动强度和时间	强烈全新活动断裂	微弱、中等全新活动断裂	非全新活动断裂	无活动断裂		引起地下结构破坏

注: 表中未列入而确需列入的因子, 在不影响评价因子系统性的前提下可建立相应的评价因子体系, 相应评价因子体系定量标准应根据有关国家和行业标准及地区经验比照确定; 1~7准则层为施工期间地质条件适宜性, 8~10为使用期间地质条件适宜性。

表 2 工程建设适宜性判定标准  
Table 2 Index weight of geological factors

准则层	准则层权重	因子层	因子层权重
施工期间地质条件适宜性	0.6	厚层填土、新近沉积土、软土等不良土层	1.0
		饱和、松散的砂层、粉土层	1.5
		卵石地层(含超大粒径漂石)	1.0
		局部上层滞水	1.5
		高渗透性潜水含水层	1.0
		承压水	1.5
		基岩	0.5
		建成环境因素	2.0
		区域地下水位回升	2.0
		较厚的软弱下卧层	0.5
使用期间地质条件适宜性	0.4	区域地面沉降	2.0
		活动断裂	5.5

或含孤石地层时, 可能会造成护坡桩、地下连续墙等结构施工困难。此外, 基坑开挖范围内废弃的桩基、地下结构等也会对基坑工程施工造成困难。该风险主要诱发工程环境地质因素为较厚大粒径卵石层或含孤石地层和地下障碍物。

#### (2) 使用期间主要工程风险因子识别

使用期的工程与环境风险和所采用的施工技术无密切关系, 而主要与其所涉及的地质环境条件有紧密联系。根据北京市地质条件一般特征, 主要风险为结构地下水抗浮问题、区域地面沉降问题、活动断裂错动以及不良地层造成的长期沉降等问题, 因此其地质因子一般为区域地面沉降、区域地下水位回升和活动断裂、以及局部的软弱下卧层等 4 种。

根据上述两方面的探讨, 建立基坑工程地质因子评价体系, 见表 1。

#### 2.4 因子层中各因子权重的确定

为统一目标层评价结果, 令准则层的元素权重满足  $\omega'_1 + \omega'_2 = 1$ , 因子层评价因子权重满足  $\sum \omega''_j = 10$ 。

本文将施工期和运营期的地质环境因子分别取为  $\omega'_1 = 0.6$  和  $\omega'_2 = 0.4$ , 适当突出施工期间地质环境因子影响的重要性。

本文针对基坑工程地质条件适宜性评价层次体系, 结合当前北京市相关资源与环境政策以及技术经济水平, 综合比较各项因子的相对重要性, 并采用 AHP 与专家调查相结合的办法对各指标的权重具体取值, 建立判断矩阵, 经过一致性检验后获得各因子的权重, 见表 2。

### 3 适宜性分级评价标准

通过前述建立的数学模型, 和对因子标准量化、权重取值和深度折减系数等各类参数取值的探讨, 可以实现工程地质条件的分析与评价。根据北京地

区经验以及相关案例反演分析, 确定适宜性指数与适宜性评价分级标准之间的对应关系, 见表 3。

表 3 工程建设适宜性判定标准

Table 3 Standards for suitability evaluation of site engineering construction

编号	适宜性指数	工程建设适宜性分级
①	$I_S \geq 70$	适宜
②	$50 \leq I_S < 70$	较适宜
③	$20 \leq I_S < 50$	适宜性差
④	$I_S < 20$	不适宜

### 4 北京市丽泽金融商务区工程地质适宜性评价

根据规划方案的范围, 丽泽金融商务区范围为西起规划西客站南路以西的中心地区建设用地边缘, 东至现状铁路线, 北起三路居路, 南至现状金中都遗址南侧, 总用地面积约  $2.79 \text{ km}^2$ 。

根据前述地质条件适宜性评价方法和丽泽商务区的地质、环境条件情况, 对评价区进行地下空间开发的适宜性评价。在评价中对采用基坑法进行地下空间开发深度为 10, 20, 30, 40 m 的情况进行了评价分析, 如表 4。

通过对各基坑开挖深度的适宜性评价可知, 在丽泽金融商务区进行基坑开挖工程总体比较适宜, 如表 4, 该区域的地质、环境条件较有利于地下空间的开发和建设。但在进行地下空间的规划和开发时, 还需要对适宜性评价有较大影响的主要地质因素进行重点考虑。这些主要地质影响因素共有 6 个, 包括施工期 5 个和运营期 1 个。施工期的主要地质因素按其影响程度来排序, 分别为: ①厚层填土、新近沉积土等不良土层, ②卵石地层(含孤石), ③高渗透性潜水含水层, ④基岩, ⑤建成环境因素; 运

营期的主要因素为区域地下水位回升。

表 4 丽泽商务区基坑不同开挖深度的地质条件适宜性评价

Table 4 Suitability evaluation of excavation engineering

construction in Lize Financial and Commercial Area

基坑开挖深度/m	$I_s$	适宜性评价
10	82.2	适宜
20	76.2	适宜
30	63.7	较适宜
40	56.2	较适宜

## 5 结 语

本文在行业研究现状基础上, 结合基坑工程施工技术的特点, 建立了基于层次分析法的基坑工程地质条件适宜性评价体系, 并提出了其评价的数学模型。根据评价方法体系, 结合北京市的地质条件, 对评价因子、因子指标量化标准, 进行了深入研究。根据各因子表的分值情况, 以及北京市地方经验, 确定了地质条件适宜性评价标准。根据评价体系进行了工程案例应用尝试, 初步验证了其的科学性、适用性和实用性。

## 参考文献:

- [1] 陈 刚, 李长栓, 朱嘉广, 等. 北京地下空间规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (CHEN Gang, LI Chang-shuan, ZHU Jia-guang, et al. Beijing underground space planning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 陈永才. 合肥市地下空间开发工程地质环境适宜性研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. (CHEN Yong-cai. Study on engineering geological environment adaptability of the development and utilization of underground space in Hefei city[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [3] 祝文君, 李连营. 天津市地下空间总体规划[R]. 北京: 清华大学, 天津: 天津市勘察院, 2009. (ZHU Wen-jun, LI Lian-ying. Tianjin underground space master planning[R]. Beijing: Tsinghua University, Tianjin: Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, 2009. (in Chinese))
- [4] 魏子新, 翟刚毅, 严学新, 等. 上海城市地质[M]. 北京: 地质出版社, 2010. (WEI Zi-xin, ZHAI Gang-yi, YAN Xue-xin, et al. Shanghai urban geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [5] 周楠森, 沈小克. 北京市中心城深部地下空间重大环境工程地质问题研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院有限公司, 2011. (ZHOU Nan-sen, SHEN Xiao-ke. Study on the major engineering geological problems during the development of the deep underground space in the City Center of Beijing[R]. Beijing: BGI Engineering Consultants Ltd., 2011. (in Chinese))
- [6] 沈小克, 周宏磊, 韩 煁, 等. 北京丽泽金融商务区地质与岩土工程条件综合评估研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院有限公司, 2010. (SHEN Xiao-ke, ZHOU Hong-lei, HAN Xuan, et al. Study on the comprehensive evaluation of the engineering geological conditions in Lize financial and commercial area of Beijing[R]. Beijing: BGI Engineering Consultants Ltd., 2011. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)