

深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究

徐杨青

(中煤国际工程集团 武汉设计研究院中汉岩土公司, 湖北 武汉 430064)

摘要: 基于深基坑工程的知识 and 经验, 分析了深基坑工程设计系统的特点, 即是由一个由时间维、逻辑维和方法维组成的三维系统。其中, 方案设计是深基坑工程优化设计中的关键环节。从安全可行、经济合理、环境保护、施工便捷四个方面, 建立了深基坑工程设计方案评价指标体系, 并采用多目标模糊决策理论推导出了深基坑工程设计方案优化决策与评价模型, 并应用于工程实践。

关键词: 深基坑工程; 设计系统; 多目标决策; 评价指标体系; 优化决策与评价模型

中图分类号: TU 470.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)07-0844-05

作者简介: 徐杨青(1965-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事深基坑和地基处理工程设计与研究工作。

Study on the optimum decision-making and evaluation model for the design of deep excavation

XU Yang-qing

(Wuhan Institute of Design and Research, Sinocoal International Engineering Group, Wuhan 430064, China)

Abstract: Based on the knowledge and experience of deep excavation engineering, the characteristics of design system for deep excavation were analyzed, namely three dimensions constituted by time, logic with method dimension. Among them, the project design was a key link. From four aspects of safety, economy, environmental protection and construction promptness, the index system for evaluating the project design was established and the optimum decision-making and evaluation model was deduced from the multi-objectives fuzzy decision-making theory for the project design of deep excavation and its application in the actual engineering was proved to gain superior decision result.

Key words: deep excavation; design system; multi-objective decision-making; evaluating index system; optimum decision-making and evaluation model

0 前言

由于城市建设用地的局限性, 周边环境的严峻性以及深基坑工程在开挖和维护过程中所涉及场地岩土(水)介质的复杂性、不确定性和非均匀性, 深基坑工程仍然是一个极具挑战性、高风险性、高难度的岩土工程技术热点课题^[1]。目前, 在实际工程中, 还大量存在着两种极端的现象, 一是由于设计和施工不当而导致深基坑工程事故, 造成重大经济损失, 特别是引起基坑周边的建筑物、道路以及水、电、煤气管网等生命线工程的破坏; 二是由于支护选型和设计保守而造成投资浪费。在深基坑工程招标中, 各投标单位由于采用设计方案的不同, 报价相差一倍以上的情况并不鲜见。深基坑工程设计, 必须在相关的众多确定性和非确定性因素中, 寻找参数的最佳取值与匹配, 以达到使用较节约的造价, 解决复杂的技术问题, 保障基坑与周边环境的安全和功能使用需要。因此, 正确地评价一个深基坑工程设计方案, 并做出决策是非

常重要的。

1 深基坑工程设计系统

深基坑工程设计系统, 也即深基坑工程设计过程, 就是根据特定深基坑工程的具体要求和周边环境等约束条件, 运用工程地质学、土力学、结构力学等设计知识和设计经验以及工程实例, 求出设计方案和设计结果。从系统的观点分析, 深基坑工程设计系统是一个由时间维、逻辑维和方法维组成的三维系统。时间维反映按时间顺序的设计阶段, 即目标分析与方案设计、技术设计和施工设计三个阶段; 逻辑维是解决深基坑问题的逻辑步骤, 它包括分析、综合、评价和决策; 方法维是列出深基坑工程设计过程中的各种思维方法和计算方法, 例如决策评分法、等值梁法、有限元法等。设计过程中的每个行为都反映为这个三

维空间中的一个点,图1表示出了深基坑工程的设计系统。深基坑工程的优化设计按时间阶段不同,可分为三级优化:方案优化,技术设计优化和施工过程反演分析优化。其中,方案设计是深基坑工程设计中关键一步。从本质上讲,方案设计的过程就是一个决策的过程,它属于概念设计的范畴。由于目前深基坑工程一方面存在着实践超前于理论的现象,如一些新技术新工法的应用以及复杂地质条件下深基坑的开挖和施工;另一方面某些理论和计算方法又不能正确地反映实际施工工序,模拟施工过程。再者,岩土材料具有一定的“不确定性”和“地域性”,故建立在“经验法则”基础上的工程类比方法和基于实例的推理技术是深基坑工程概念设计的主要途径。深基坑工程设计的绝大多数技术经济指标都是在方案设计阶段确定的。因此,深基坑支护体系的优化设计,首先是设计方案的优选,即从深基坑工程定性的概念分析入手,面向特定深基坑工程所要解决的关键问题,着眼于工程判断,方案的筛选和优化^[2]。

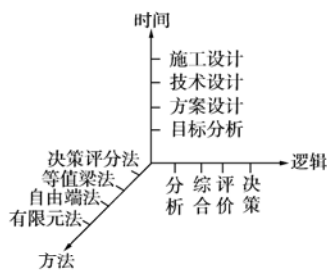


图1 深基坑工程设计系统

Fig. 1 Design system of deep excavation

深基坑工程设计问题往往是多方案设计问题。由于深基坑工程是一个相当复杂的系统工程^[2],影响因素众多,其中有些因素是确定性的,而有些因素是模糊性的。设计对象的属性(如变形控制标准、造价、安全度等)既有定量的,也有定性的。在实际工程中,对于初选出的多个深基坑工程设计方案,往往很难判断哪一个方案更优越,因为每一种方案都有其特点,有的比较省钱,有的施工速度快,有的环境影响小,有的安全度高,很难直接进行定量化(大小)的比较,也很难用费用最低或最安全的单目标优化准则做出最佳决策。因此,必须采用多目标模糊决策理论综合评价深基坑工程设计方案。

2 深基坑工程设计方案评价指标体系

深基坑工程设计是一个相当复杂的过程,除支护结构设计之外,还包括止水降水措施、施工工法、工程监测及应急方案等内容。深基坑工程设计必须满足安全性、经济性和可行性以及环境保护这四项基本要

求。深基坑工程的设计过程是基于实例的过程,通过对数十项实际深基坑工程进行详细分析、归类并遵循系统全面性、简捷科学性、相对独立性和客观性原则,从安全可行、经济合理、环境保护、施工便捷四个方面,选择了13个指标来评价深基坑工程设计方案的优劣,这些指标实质上就是深基坑工程设计的优化目标。很显然,深基坑工程设计方案的评价问题是一个多目标、多层次评价问题,可以采用层次分析法^[3]将所有评价指标整理、分析和综合成一个4层结构(目标层、准则层、指标层和方案层)的综合评价指标体系,如表1所示。引入1~9比率标度方法^[3]构造出判断矩阵,用求解判断矩阵最大特征根及其特征向量的方法得到各指标的相对权重。在构造判断矩阵时应遵循以下原则:①相对于目标层——最佳方案而言,深基坑支护系统方案的安全性、经济性与可行性三者的关系是辩证统一的,不可偏废。即在满足安全要求与可行的前提下,使基坑支护工程的总投资最少,同时注意保护环境,尽量缩短工期。②相对于准则层而言,基坑侧壁止水及坑底降水措施与基坑支护结构密不可分且具有同等的重要性。所以,指标层中各指标应综合反映这两个方面的因素。

3 深基坑工程设计方案模糊优化决策与评价模型

设在某个深基坑工程中有 n 个非劣方案满足约束集形成决策集:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad (1)$$

每个方案有 m 个目标(或属性指标)组成对决策集 D 的评价目标集:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}, \quad (2)$$

所有 n 个方案的属性指标向量组合,构成如下系统目标特征值矩阵(决策矩阵):

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}), \quad (3)$$

式中 x_{ij} 代表支护方案 j 在 i 指标下的目标值; $x_{ij}(i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$ 确定分成两类:

(1) 量化指标,如造价、工期等,可以使用确定的数字来代表,如造价 $x_{21}=200$ 万元,工期 $x_{41}=50$ d。

(2) 定性指标,如可靠度、施工难度等,可以采用直接评分,为便于比较,中间的评1分,最高的评2分,较高的评1.5分,最低的评0分或0.5分。

为了消除各属性指标量纲不同的影响以及由于数量级的差异而可能造成的数量级小的属性指标“淹

表1 深基坑工程设计方案评价指标体系

Table 1 The evaluation index system for the design of deep excavation

目标层	准则层	指标层	方案层
总目标 A 最佳 方案	B ₁ 安全可行	C ₁ 支护效果即稳定安全系数, C ₂ 同类工程经验的成熟性,	D ₁ 方案 1 D ₂ 方案 2 D ₃ 方案 3 D ₄ 方案 4 D ₅ 方案 5
		C ₃ 支护系统的先进性, C ₄ 施工技术的可行性和可靠性,	
	C ₅ 支护系统破坏类型及其危害程度, C ₆ 支护系统应急措施的有效性		
	B ₂ 经济合理	C ₇ 综合造价	
B ₃ 环境保护	C ₈ 支护系统产生的变形及其影响范围, C ₉ 施工对环境的影响,	D ₃ 方案 3 D ₄ 方案 4 D ₅ 方案 5	
	C ₁₀ 环境保护措施的可靠性		
B ₄ 施工便捷	C ₁₁ 施工工期, C ₁₂ 施工的难易程度, C ₁₃ 支护结构对后续工程的影响		

没”的现象,需对原始指标数据进行规一化处理,即用目标优属度公式。归一化后的决策矩阵为:

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}), \quad (4)$$

式中 $r_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 为方案 j 中目标 i 的相对优属度, 它的确定也可分成两类:

(1) 是效益型指标——越大越优目标, 如可靠性, 其特征是数值越大越好, 可按以下关系式求解:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (j=1, 2, \dots, n)。 \quad (5)$$

(2) 是成本型指标——越小越优目标, 如造价、施工难度、工期等, 其特征是数值越小越好, 可按以下关系式求解:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

式中 $\max(x_{ij}), \min(x_{ij})$ 分别表示决策集 D 中目标的特征值取大、取小。

定义1 设系统有目标优属度矩阵 R , 若

$$\vec{g} = (g_1, g_2, \dots, g_m)^T = (1, 1, \dots, 1)^T, \quad (7)$$

则称 g 为系统的优等对象。

定义2 设系统有目标优属度矩阵 R , 若

$$\vec{b} = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T = (0, 0, \dots, 0)^T, \quad (8)$$

则称 \vec{b} 为系统的劣等对象。

通常采用模糊集的隶属度来描述一个元素属于一个模糊概念的程度。隶属度越大, 表明该元素属于该模糊集概念的程度就越大, 反之则越小。设系统中的 n 个选优对象, 其中对象(方案、决策) j 以隶属度 u_j 隶属于优等对象, 以隶属度 u_j^c 隶属于劣等对象, 根据隶属函数的余集定义, 应有

$$u_j^c = 1 - u_j。 \quad (9)$$

表1中各评价指标对深基坑工程设计方案的重要程度是不同的, 亦即不同的评价指标应具有不同的权重。因此, X 中各个指标的权重分配, 即权向量为

$$\vec{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T, \sum_{i=1}^m w_i = 1, \quad (10)$$

式中 w_i 为目标(指标) i 的权重。

为求解决策 j 的隶属度 u_j 的最优值, 需根据一定的优化准则, 为此引入定义:

定义3 系统有目标优属度矩阵 R , 决策 j 的目标优属度向量为

$$\vec{r}_j = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj})^T,$$

$$\text{若 } D(\vec{r}_j, \vec{g}) = u_j \left(\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - 1|^p) \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (11)$$

式中 $D(\vec{r}_j, \vec{g})$ 为系统中决策 j 的权距优距离; P 为距离参数, $P=1$ 为海明(Hamming)距离, $P=2$ 为欧氏(Euclid)距离。

$$\text{若 } D(\vec{r}_j, \vec{b}) = u_j^c \left(\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - 0|^p) \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (12)$$

式中 $D(\vec{r}_j, \vec{b})$ 为系统中对象 j 的权距劣距离。

为解出决策系统中决策 j 的隶属度 u_j 的最优值, 建立优化准则: 决策 j 的权距优距离平方与权距劣距离平方之总和最小。即目标函数为

$$\min \left\{ F(u_j) = u_j^2 \left(\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - 1|^p) \right)^{\frac{2}{p}} + (1 - u_j)^2 \left(\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij}^p) \right)^{\frac{2}{p}} \right\}, \quad (13)$$

求解 $\frac{dF(u_j)}{du_j} = 0$, 可得到隶属度 u_j 的最优值的计算模型,

$$u_j = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - 1|^p)^{\frac{2}{p}}}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij}^p)^{\frac{2}{p}}} \right]^{\frac{p}{2}}}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

式(14)即为深基坑工程设计方案模糊优化决策和评价模型, 由此求得各设计方案的相对优属度。根

表 2 深基坑初步方案比选

Table 2 Comparison and selection for primary project of deep excavation

支护方案	主要设计参数	优点	缺点
喷锚网	3 排 7~12 m 长锚杆, 挂网喷砼, 坡顶和坡脚另设超前锚杆。	造价较省, 施工较简单。	基坑主要在松散杂填土和流塑淤泥质土中开挖, 坑底尚有 2~3 m 厚的淤泥质土。由于箱涵和临近建筑物基础影响, 锚杆成孔难, 无放坡空间, 整体稳定性和变形不易控制。
悬臂桩	支护桩最大弯矩达 1520 kNm/m, 桩长为 14~16.5 m 不等。	开挖前施工完支护桩, 基坑开挖速度快。	由于场地软土层厚, 支护桩要求嵌固很深, 桩顶变形量较大, 达 69~116 mm。东侧支护桩施工受 2 层楼房限制。
支护桩+锚杆	各侧支护桩弯矩为 337~576 kNm/m, 锚杆长度 25~28 m 不等。	变形可控制, 基坑开挖不受影响。	造价最高, 锚杆受东、西两侧已有建筑物桩基础和南侧黄孝河北路下箱涵局限, 难以施工; 而且锚杆也会对西侧未来三期工程地下施工造成一定影响。
支护桩+支撑	弯矩同桩锚结构, 8 根角撑, 分别为 9~18 m 长。	变形可控制, 造价较省。	支撑对挖土有一定影响, 东侧支护桩施工受 2 层楼房限制。

据最大隶属度原则, 由上式可选择一个较满意的设计方案。

4 深基坑工程设计方案评价示例

武汉通信三局职工住宅楼, 地上 18 层, 基坑开挖深度为 6.5 m, 开挖面积约 3000 m²。场地位于汉口闹市区, 东、西、北三侧紧临基坑边线均为天然地基 3~6 层住宅楼; 在北侧坡顶约 5 m 远处还架设有一条煤气主管道。南侧紧贴黄孝河北路, 系交通干道, 其下埋设有黄孝河改造掩埋后的地下箱涵。该基坑开挖虽不很深, 但基坑开挖影响范围内的土层主要由松散的杂填土 (3.5 m 厚) 和饱和流塑淤泥 (6.0 m 厚, 比贯入阻力 P_s 值仅 0.55 MPa) 及软塑粘性土组成, 土性极差; 且建设场地狭窄, 周边环境严峻。特别是本工程基础采用的是埋藏较浅、截面较小的静压预制桩, 对基坑中土体变形比其它桩型敏感。因此, 本深基坑工程设计之重点是控制基坑边坡和坑底土体的变形, 防止深基坑开挖对周边环境和工程桩的影响。初步方案比选参见表 2, 各方案均配以相同的 4 口深井降水的地下水处理措施。

依照上面所建立起来的深基坑工程设计方案评价指标体系, 对本工程构造目标基本元素见表 3。

表 3 方案评价基本指标

Table 3 Basic evaluation indexes

目标	d_1	d_2	d_3	d_4
支护效果 (稳定安全系数)	1.1	1.4	1.9	1.7
同类工程经验的成熟性	0.6	0.9	1.0	1.0
支护系统的先进性和科学性	0.9	0.8	0.9	1.0
施工技术的可行性和可靠性	0.5	1.0	0.7	1.0
支护系统破坏类型及其危害程	1.0	0.9	0.6	0.7
支护系统应急措施的有效性	0.7	0.8	1.0	1.0
总造价/万元	120	180	270	200
支护系统产生的变形/mm	60	116	20	30
施工对环境的影响	1.0	0.5	1.0	0.5
环境保护措施的可靠性	0.5	0.5	1.0	1.0
施工工期/d	40	30	50	40
施天的难易程度	1.0	0.5	1.0	0.5
支护结构对后续工程的影响	1.0	0.6	1.0	0.6

对每个方案均求得 13 个目标值, 可以得到目标特征矩阵, 然后将目标特征值矩阵变换为目标优属度矩阵:

$$R_{13 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.38 & 1.0 & 0.75 \\ 0 & 0.75 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0 & 0.5 & 1.0 \\ 0.5 & 1.0 & 0.5 & 1.0 \\ 0 & 0.25 & 1.0 & 0.75 \\ 1.0 & 0.33 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0.6 & 0 & 0.47 \\ 0.58 & 0 & 1.0 & 0.9 \\ 0 & 1.0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.5 & 1.0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1.0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} = (r_{ij}),$$

方案中 13 个目标的权向量为^[4] $w=(0.126 \quad 0.07 \quad 0.07 \quad 0.042 \quad 0.021 \quad 0.021 \quad 0.35 \quad 0.14 \quad 0.04 \quad 0.02 \quad 0.07 \quad 0.02 \quad 0.01)$ 。

由相对优属度矩阵可知相对优方案和劣方案分别为 $g=(1 \quad 1 \quad 1 \quad 1)$, $b=(0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$ 。

取距离参数 $P=2$, 即欧氏距离, 则由式 (14) 可分别计算得到:

$$u_j = (0.579 \quad 0.504 \quad 0.433 \quad 0.70)$$

根据隶属度最大原则, d_4 方案为相对优方案或满意方案。 D_1 方案次之。实际监测结果表明, 采用支护桩加内支撑设计方案施工后该基坑周边建筑物最大沉降量为 19 mm, 支护桩顶端平均位移量为 15 mm, 垂直沉降量平均 10 mm。在整个基坑开挖和运行过程中, 周边 3 幢天然地基上的住宅楼和 1 幢教学楼以及道路、煤气管道是稳定的, 说明该基坑的支护结构选型合理, 有力保证了基坑和其周围建筑物、地下管线的安全, 也取得了较好的经济效果。

5 结 论

本文基于大量深基坑工程实例, 研究分析了深基坑工程设计系统。并运用模糊决策理论, 建立了深基坑工程设计方案评价指标体系和深基坑工程设计方案评价模型, 使方案决策定量化、科学化。将该决策模型应用于实际工程, 实践证明取得了最优的决策效果, 是方案优选的一条有效途径。

该模型可应用到深基坑工程招标评标中, 能够使专家评标过程更加全面、科学、公正、准确。通过编程, 还可做到决策程序化、自动化。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1):112 - 11.
- [2] 徐杨青. 深基坑工程设计的优化原理与途经[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2):
- [3] 乔伊科奇 A, 等. 多目标决策分析及其在工程和经济中的应用[M]. 王寅初译. 北京: 航空工业出版社, 1987.
- [4] 徐杨青. 深基坑工程设计方案中的模糊理论与技术[A]. 朱瑞庚岩土奥秘探索[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003.
- [5] 樊治平. 多属性决策中权重确定的主客观赋权法[J]. 宇管理科学学报, 1997,(04):89 - 93.

《岩土工程学报》广告业务简介

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。国内外公开发行。

本刊为我国中文核心期刊, 并在同类期刊中排列首位。本刊为中国科协、江苏省和我国水利系统优秀期刊, 多次获中国科协和国家自然科学基金委的择优经费资助。本刊的读者面广, 读者群稳定, 多年来, 发行量均位于同类期刊的前列。

本刊开展广告业务旨在及时传递国内外的新产品、新技术信息, 扩大优质产品和先进技术在国内外的影响, 促进科技进步, 加速科技成果向生产力的转化。

《岩土工程学报》刊登广告注意事项:

(1) 刊登广告前需签订协议。客户应提供营业执照副本复印件; 广告中如含有产品鉴定或检验结论, 上网或获奖情况以及单位通过质量体系认证等内容时, 客户需提供相应结论报

告或证书的复印件。

(2) 客户应于广告刊登前 15 天将广告稿递交本刊广告部。电子信箱: ge@njhri.edu.cn。

(3) 本刊广告部有权根据广告法及新闻出版有关文件规定, 对客户的广告内容进行必要的修改。本刊广告部在规定的时间内未到客户的广告费或广告稿时, 有权将客户所订广告版面转让给其他客户。

(4) 广告一经刊出, 即向刊登广告的客户赠送当期杂志 5 册。

(5) 《岩土工程学报》广告发布业务联系方式。通讯方式: 210024, 南京市虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 电话: 025-85829534; 传真: 025-85829555; 电子信箱: ge@njhri.edu.cn。

(本刊编辑部)