

# 深基坑支护的系统分析及优化设计\*

## System Analysis and Optimum Design of Retaining Structure for Deep Excavation

黄贵珍 杨予\*\* 蓝日彦\*\*

Huang Guizhen Yang Yu Lan Rivan

(广西大学研究生处 南宁西乡塘路10号 530004)

(Dept. of Postgraduate, Guangxi Univ., 10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要** 在归类划分相应研究层次的基础上,从系统优化的理论出发,提出建立深基坑支护设计的优化模型的思路,编制深基坑支护系统优化分析程序,并用工程实例进行了验证分析。

**关键词** 深基坑工程 系统工程 优化设计

中图法分类号 TU 476.4

**Abstract** System analysis method is used to construct the optimum design model of retaining structure for deep excavation. We edit retaining engineering of deep excavation system optimization and analyzed procedure which is based on classifying and compartmentalizing corresponding investigated arrangement, and setting out from system optimization's theory. Meanwhile, we have analyzed the engineering's example.

**Key words** deep excavation, system engineering, optimum design

基坑工程是涉及诸如场地环境因素、施工技术因素、岩土性状的力学因素在内的一项系统工程。因工程的特点决定在基坑工程实施之前难以用较长的时间论证及进行物理模拟试验。况且设计理论尚不完善,往往是经验性的,比较粗糙,所以设计的方案在实施时具有一定盲目性,可靠性较难掌握,同时设计未必是最优的,从而会带来不必要的浪费。因此,完善支护工程设计理论,进行基坑工程优化设计十分必要。利用优化设计可缩短设计周期,提高设计质量,与传统的设计方法相比,优化设计可节约大量投资。同时所提供的最优方案也可作为业主对基坑支护工程决策的依据。目前虽然有不少专家和学者在这方面提出了许多设计理论和方法,但大量工程实践表明,这些方法都与实际情况存在着一定差异,特别是在遇到条件较复杂的基坑时这些差异往往变得更加突出。

2000-05-25 收稿。

\* 国家自然科学基金资助项目(49662010)、(59868001)、广西青年自然科学基金资助项目(9912013)、广西高校跨世纪学科带头人培养专项基金资助课题桂科教1997(第424号)。

\*\* 广西大学土木建筑工程学院,南宁市西乡塘10号,530004 (College of Civil Engi., Guangxi University, 10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi 530004, China)。

## 1 深基坑支护工程的特点

### 1.1 复杂多样性

深基坑支护工程具有高度的复杂性,它受到多种因素的影响和约束且各个因素之间的关系通常不为人们所了解。因此,在优化分析模型中必须对可能影响工程的因素进行筛选和量化。影响深基坑支护工程的有代表性的因素可归类为环境类、工程技术类、地质结构类、工程结构类。

### 1.2 系统性

深基坑支护本身就是一个较大的系统工程问题,而其中又包含了许多子系统,各个子系统之间是相互制约、相互影响的关系,如果只强调对某个子系统的优化是无法达到理想的全局优化效果的。按分项工程性质的不同,我们可以将深基坑支护工程划分为支挡结构体、降排水和土方开挖3个一级子系统。这3个一级子系统还可以进一步划分为二、三级子系统,比如支挡结构可进一步划分为挡土结构、支撑结构、土体补强等子系统。

由于各个子系统性质的差异和自身的复杂性,能够适用于各个子系统的最优化方法通常也是不同的,勉强把多个子系统统一到一个最优化方法中求解的做法往往会导致对实际工程条件不合理的简化,其

优化结果将缺乏真实性。

### 1.3 顺次性

深基坑支护工程的设计和施工都具有顺次性, 比如在桩—内支撑体系中, 只有先确定了支撑力和支撑点才能对内支撑结构体系进行优化设计, 才可以进一步安排土方施工作业。因此在优化过程中可以采用分步逐级优化的办法, 在不同的层次可采用不同的优化方法。

### 1.4 不确定性

在影响深基坑支护方案的选取和设计的众多因素中, 大部分都具有不确定性, 比如在不同地域的土层土质情况、适合的力学计算模型、各种分项工程的市场价等。对于这些因素, 应使用一定的数学方法(如: 数理统计、模糊估计等)对实际情况进行适当的估计, 以保证优化结果有具有较好的准确性。

## 2 深基坑支护工程优化系统模型

### 2.1 优化模型

在实际工作中, 有经验设计人员的往往采用如图 1 所示的方法进行设计。因为主要凭经验用手工进行计算, 这种方法有很大的局限性, 主要原因是由此设计出的方案细节带有很多主观因素, 往往不能正确地反映出实际情况。但是如果将这个分析模型稍加修改, 变成一个计算机优化模型, 如图 2, 优化的效果可能就截然不同。

由此, 我们可得到一个定性(方案初选)——定

量(细部优化)——综合评判(造价选优)的深基坑支护系统优化模型雏形。

### 2.2 方案初选

如前所述, 由于各方案的性质不同, 可以采用的力学解法和优化方法也不同, 所以为了缩小搜索范围和保证问题的可解性, 在进行细部的优化之前对可能采用的支护方案进行初步选择十分必要的。

由于影响因素众多, 想在初选阶段就较精确地判断出哪个方案比较好是不太可能的。但是通过系统环境分析可知, 对于确定的工程场地, 由于有土层性质、地下水、开挖深度等定性工程场地条件的限制, 不是所有的方案都能够适用的, 而用户在选择方案时也往往有一定的要求, 如抢工期、经济性、安全可靠、不影响环境等。由此可见, 对用户而言必然存在这样一个模糊方案集, 其包含的所有方案既能较好地适用于确定的工程场地, 又可较好地满足用户提出的要求。

为了描述方案初步选择的过程, 我们先假定以下这些概念:

(1) 可能方案集——如果在 A 地区中可能应用  $n$  类深基坑支护方案, 则称这  $n$  类方案的集合为 A 地区的可能方案集, 记为  $P_A = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n \in N$ 。

(2) 可行性条件——如果某深基坑施工方案  $p$  适用于  $r$  类工程场地条件  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_r | r \in N\}$ , 而 B 场地的工程场地条件为  $C' = \{c_1, c_2, \dots, c_s | s \in N\}$ , 且有  $C' \subset C$ , 则称方案  $p$  满足 B 场地的可行性条件。

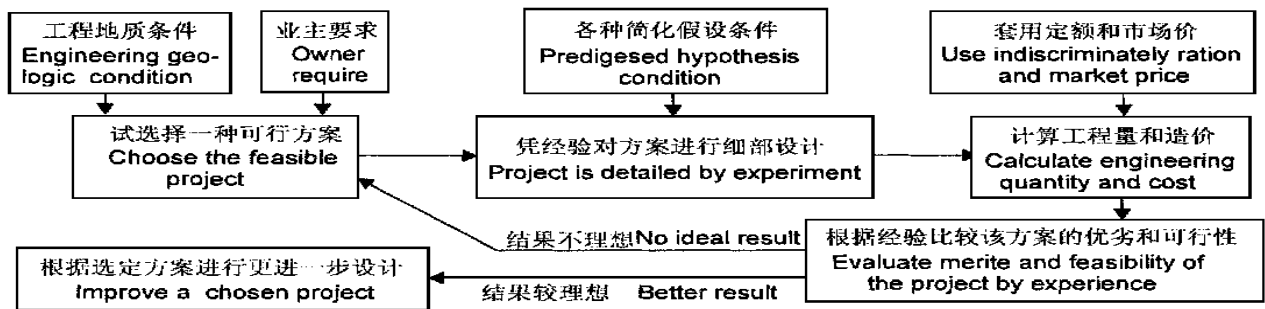


图 1 人工优化设计原理

Fig. 1 Principle of manual optimum design

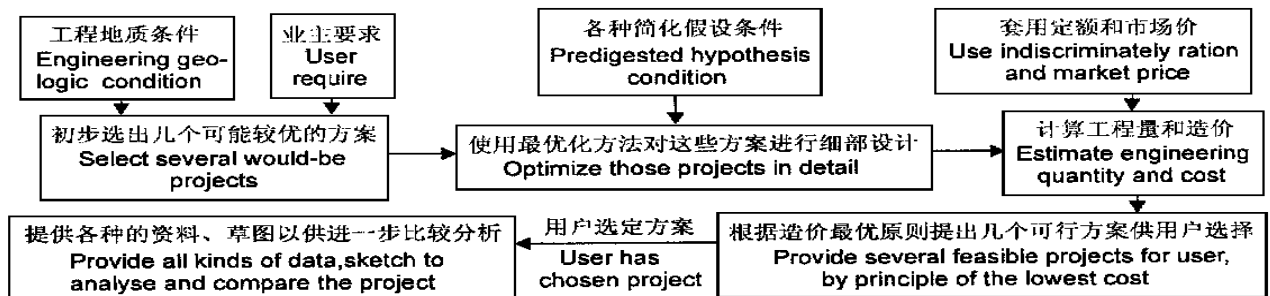


图 2 计算机优化设计原理

Fig. 2 Principle of computer optimum design

(3) 可行方案集——如果对于B场地有m类支护方案满足可行性条件, 则将这m类方案的集合称为B场地的可行方案集, 记为  $P_f = \{p_1, p_2, \dots, p_m | m \in N\}$ 。

(4) 用户意向空间——如果对于k项用户感兴趣的方案性能分级指标  $t_1, t_2, \dots, t_k$ , 将用户要求达到的最低标准记为1, 并以1为对称点将用户对每项指标给出的好和相应的坏模糊评价分别记为a和  $a^{-k}$ ,  $a \geq 2$ , 即令  $a^{1/k} \leq t_1, t_2, \dots, t_k \leq a$ , 将这些指标的积  $T = t_1 \cdot t_2 \cdot \dots \cdot t_k, k \in N$  称为用户意向空间。

(5) 最优方案集——在可行方案集  $P_p = \{p_1, p_2, \dots, p_m | m \in N\}$  中用户使用意向空间最大的前M类方案称为最优方案集, 记为  $P_o = \{p_1, p_2, \dots, p_M | M \in N, M \leq m\}$ , 显然有  $P_o \subset P_p$  和  $P_o \subset P_f$ 。

于是, 方案的初步筛选过程可以表述为: 在可能方案集  $P_p$  中寻找最优方案集  $P_o = \{p_1, p_2, \dots, p_M | M \in N, M \leq m\}$ , 使所有  $p_i \in P_o$  都满足可行性条件即  $p_i \in P_f$ , 且使与  $P_o$  对应的用户意向空间集合  $U_o = \{T_1, T_2, \dots, T_M | M \in N, M \leq m\}$  中的任一T值都不小于  $\bar{U}_o$  (以  $P_f$  为全集) 中的任意T值, 其中  $M \in N$  由用户给定。

### 2.3 方案初选实例分析

工程概况: 某工程拟建建筑物为1幢地下1层, 地上6层, 局部7层的办公楼, 建筑总高度为24.0m。基坑深度7.0m, 局部为7.6m。拟建建筑物东侧的轴线与相邻建筑物的距离仅有1.2m, 在西侧和南侧约50cm处均有上下水管线和地下电缆, 北侧约70cm处有上水管线。场地内地质条件较复杂, 地层主要以砂质粉土和砂类土组成。场地地处古河道中心地带, 地下水含量丰富, 土层渗透性较大。各土层的物理力学性质如表1所示。

表1 土层物理力学性质

Table 1 Character of soil mechanics

| 土层名称<br>Soil layout name        | $\omega$<br>(%) | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $S_r$<br>(%) | $E$   | $I_p$ | $I_l$ | $C$<br>(kPa) | $\varphi$<br>(°) |
|---------------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------|-------|-------|-------|--------------|------------------|
| 人工填土<br>Artificial fill         | 22.1            | 20.5                             |              |       |       |       | 12           | 20               |
| 粉质粘土<br>Silty clay              | 21.3            | 20                               | 97.3         | 0.797 | 12.6  | 0.654 | 12.25        | 16               |
| 砂质粉土<br>Sand clay               | 21              | 20.6                             | 100          | 0.59  | 5.43  | 0.457 | 22.12        | 6.4              |
| 粉质砂土<br>Silty sand              | 21              | 19.5                             |              |       |       |       | 13           | 3.4              |
| 重粉质粘土<br>Weightiness silty clay | 33.7            | 19.8                             | 100          | 0.9   | 15.7  | 0.701 | 17.3         | 12               |

设计者在东侧基坑段预选方案时提出了几类可能的支护方案: (1) 悬臂桩支护; (2) 灌注桩+ 锚杆支护; (3) 对相邻地基土进行置换; (4) 钢管桩+ 锚杆支护。业主对支护工程的基本要求为: (1) 能够有效地控制基坑和相邻建筑物的变形; (2) 工艺简单, 施工难度较低; (3) 成本较低; (4) 便于抢工期。

分析过程: 第一步, 根据各个方案对不同地层、地下水的适应情况, 我们可以列出方案适应性列表(表2), 表2中将各个方案对不同场地情况的适应性分成3个等级即很差(不适应)、一般、较好, 进行模糊评判。

从表2中容易得出, 除灌注桩+ 锚杆方案外其它方案都能够适用于该工程场地, 且钢管桩+ 锚杆方案的适应性较好。

第二步, 根据用户的意向, 分别对各方案在控制变形能力、工艺简单程度、低成本以及抢工期性能4个方面作出模糊评价, 评价分为5级打分: 最好评1.5~2分, 较好评1~1.5分, 满足最低要求评1分, 较差评1.5<sup>-4</sup>~1分, 最差评2<sup>-4</sup>~1.5<sup>-4</sup>分, 见表3。

依次求出各方案的用户意向空间依次分别为0.269、0.525、0.070、0.411, 可见灌注桩+ 锚杆具有最大用户意向空间, 但由于该方案不满足场地适应性条件, 所以最优方案应该是钢管桩+ 锚杆, 这与在基坑东侧在实际工程中采用的方案相同。

表2 方案适用性

Table 2 Applicability of each project

|   | 适用性 Applicability       |                    |                   |                    |                                 |
|---|-------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
|   | 人工填土<br>Artificial fill | 粉质粘土<br>Silty clay | 砂质粉土<br>Sand clay | 粉质砂土<br>Silty sand | 重粉质粘土<br>Weightiness silty clay |
| 悬臂桩支护<br>Cantilevered pile retaining    | 一般<br>Applicable        | 较好<br>Better       | 一般<br>Applicable  | 一般<br>Applicable   | 较好<br>Better                    |
| 灌注桩+ 锚杆<br>Filling pile + anchor rod    | 较好<br>Better            | 较好<br>Better       | 一般<br>Applicable  | 很差<br>Poor         | 较好<br>Better                    |
| 置换地基土<br>Replacement of foundation soil | 较好<br>Better            | 一般<br>Applicable   | 一般<br>Applicable  | 一般<br>Applicable   | 一般<br>Applicable                |
| 钢管桩+ 锚杆<br>Steel pile + anchor rod      | 较好<br>Better            | 较好<br>Better       | 较好<br>Better      | 较好<br>Better       | 较好<br>Better                    |

## 3 支护结构的系统优化分析

### 3.1 目标组合优化分析

结构优化就是对由初选方案得出的支护方案的

具体设计参数,如平立面布局、结构尺寸、施工步骤等进行优化,在结构的优化设计应注意剔除那些不甚合理的假设。从建立和求解某种最优化数学模型的角度来说,简化条件越多,考虑的参数越少就越有利,但是,同时又引发了这样一个矛盾,即越好求解的数学模型其解答的真实性、可靠性往往越差。

为此,可先根据系统工程原理将深基坑方案优化设计这一大系统划分为一些若干工况组合下的子系统及子目标,进而通过求解、组合子系统来达到全局优化目标,如图3所示。

表3 方案性能的评价

Table 3 Capability evaluation of each project

|   | 性能 Capability                    |                                     |                 |   |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---|
|   | 控制变形能力<br>Control strain ability | 工艺简单程度<br>Simple degree of technics | 低成本<br>Low cost | 抢工期性能<br>Catch time limit for a project |
| 悬臂桩支护<br>Cantilevered pile retaining    | 0.12                             | 1.5                                 | 1               | 1.5                                     |
| 灌注桩+锚杆<br>Filling pile + anchor rod     | 1.5                              | 0.35                                | 1               | 1                                       |
| 置换地基土<br>Replacement of foundation soil | 0.20                             | 0.20                                | 1.5             | 1.2                                     |
| 钢管桩+锚杆<br>Steel pile + anchor rod       | 1.6                              | 1                                   | 0.20            | 1.3                                     |

这种做法的好处在于,子系统的优化目标可以仅仅是局部的甚至是近似或模糊的,每个子系统还可以进一步划分为更小的次级子系统以利于建模和精确求解,全局优化工作则由最后的比较和协调来完成。这种做法的缺点就是可能会忽略某些不常用的工况,求出的解答并不是理论上最精确的全局最优解。但由于结构工程的参数选取所具有的特殊性,如桩径、支撑(锚杆)位置一般是某长度的整数倍,材料的选取有固定型号等等,用这种方法求出的解答必然是工程中可用和相对较优的。

为了说明问题,以一个悬臂人工挖孔桩方案的优化为例:某矩形基坑长40m,宽20m,开挖深度7.6

m,地面荷载按20kN/m<sup>2</sup>考虑,地下水位-14.2m,土的分层情况及强度见表4,求使造价最优的桩径、桩间距、及材料型号(钢筋、混凝土标号)等具体设计参数,造价估算参考1990年《广西建筑工程预算定额》。

表4 土分层信息及强度参数

Table 4 Layout and intention of soil

| 土层名称<br>Soil layout name         | 层厚<br>Layout thick (m) | C<br>(kPa) | φ<br>(°) | γ<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|------------------------|------------|----------|---------------------------|
| 素填土<br>Plain fill                | 2                      | 5          | 10       | 17.7                      |
| 粉质粘土<br>Silty clay               | 11.8                   | 32.77      | 14.5     | 18.9                      |
| 含砾粉质粘土<br>Silty clay with gravel | 7.3                    | 23.48      | 16.0     | 19.6                      |

因为要考虑材料的特性和人工、机械等预算价格,所以将这些因素在一个最优化模型中全面考虑并求解具有较大难度。为此按设计的顺次性将整个优化设计分为4个子系统并确定各自的优化目标,见表5。

表5 子系统划分

Table 5 Patition of subsystem

| 设计顺序<br>Design order | 子系统名称<br>Subsystem name  | 优化目标<br>Optimization's target                                     | 主要影响因素<br>Key affect factor                                      |
|----------------------|--|---|--|
| 1                    | 桩长计算<br>Count of pile length                                     | 桩长最小<br>Minimum pile length                                       | 整体稳定性、管涌、隆起<br>Whole stability, piping, upheave                  |
| 2                    | 桩内力计算<br>Count of pile's internal force                          | 桩身最大内力<br>Maximum pile body's internal force                      | 土层性质、选用计算理论、桩布局<br>Soil character, apply theory, pile's position |
| 3                    | 截面配筋计算<br>Count of reinforcing steel bar be qualified in section | 配筋冗余最小<br>Minimum reinforcing steel bar be redundantly in section | 材料选型、构造要求<br>Material type, structure require                    |
| 4                    | 预算造价比较<br>Compare budge of cost                                  | 支护总造价最小<br>Minimum total cost of retaining                        | 预算直接费和间接费<br>Budge's cost of directness and indirectness         |



图3 系统组合优化原理

Fig. 3 Principle of system combined optimization

各子系统之间的组合见图 6。

根据以上原理, 运用编制的“深基坑优化分析系统”软件并通过对各子系统分别进行优化计算得出最优结果为:

当桩长为 14.1 m; 桩径为 900 mm; 桩间距为 1.98 m; 布桩总数为 60 根; 桩身混凝土标号为 C25; 纵向主筋选择为Ⅲ级; 箍筋选择为Ⅰ级; 桩在受拉侧配 14Φ22; 受压侧配 8Φ12; 箍筋配 Φ8@250 时有最小造价约 94.1 万元 (1990 年广西预算定额)。

由例可见组合工况和划分各级子目标在实质上是运用了系统工程概念的一种降维法。而上面举出的只是一个较为简单的例子, 在实际工程计算中需要考虑更为复杂的组合情况并对各个子目标进行具体分析。下面列出一些常见的系统目标组合情况。

### 3.2 整体方案组合

将深基坑支护全局问题分为支护结构设计、降排水设计和土方开挖设计 3 个子系统, 各个系统的优化目标和组合关系见图 4。

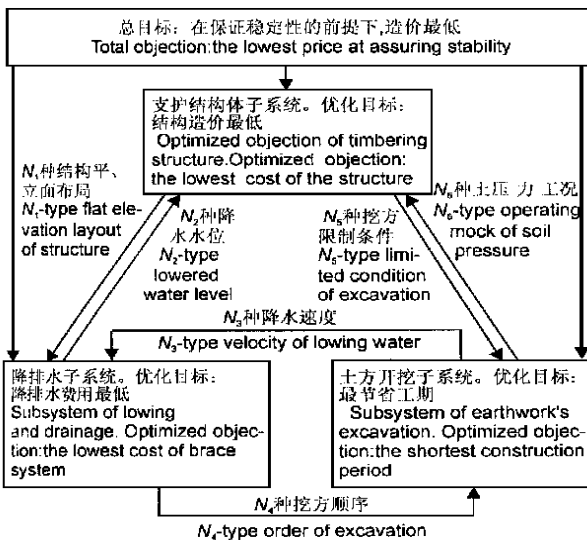


图 4 一级子系统组合

Fig. 4 Combination of first division

图中,  $N_1 \sim N_6 \in N$ , 实际总组合工况数  $\leq N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4 \times N_5 \times N_6$ 。

各子系统设计内容为:

支护结构子系统——包括挡土体的设计、支撑(锚)体系的设计(含各种辅助结构)、土体强度设计;

降排水设计——包括降排水和回灌设施的平、立面布局、各种有关降水机具的选取等;

土方开挖设计——包括土方的开挖次序、范围和机具选取等。

### 3.3 支护结构组合

支护结构体的设计可划分为挡土体结构设计, 支

撑(锚)体系结构设计和土体补强设计 3 个子系统, 各子系统的优化目标和组合关系见图 5。

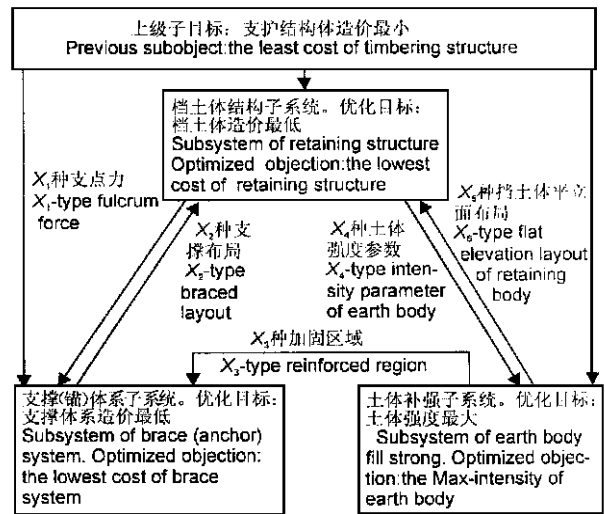


图 5 支护结构体系子系统组合

Fig. 5 Combination of retaining structure system

图中,  $X_1 \sim X_5 \in N$ , 实际总组合工况数  $\leq X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4 \times X_5$ 。

各个子系统所包含的设计内容则应该结合具体方案进行考虑。

### 3.4 降排水组合

降排水设计可划分为降水机具选取和降水设施平、立面布置 2 个子系统, 子系统的优化目标和组合关系见图 6。

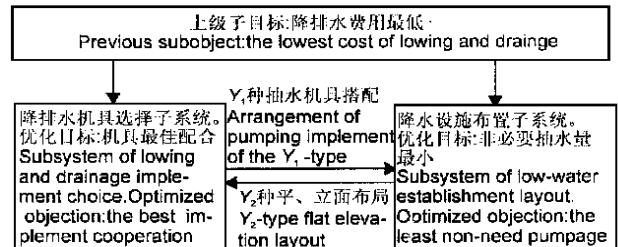


图 6 降排水设计子系统组合

Fig. 6 Combination of dewatering system

图中,  $Y_1, Y_2 \in N$ , 实际总组合工况数  $\leq Y_1 \times Y_2$ 。

各个子系统所包含的设计内容则应该结合具体方案进行考虑。

### 3.5 土方开挖组合

土方开挖设计可划分为挖方机具选取和开挖流水设计 2 个子系统, 子系统的优化目标和组合关系见图 7。图中,  $Z_1, Z_2 \in N$ , 实际总组合工况数  $\leq Z_1 \times Z_2$ 。

各个子系统所包含的设计内容则应该结合具体方案考虑。

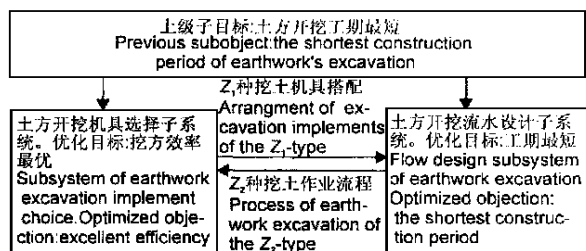


图7 土方开挖设计子系统组合  
Fig. 7 Combination of excavation system

#### 4 造价评估

由于深基坑支护优化设计的目的是在保证稳定性的前提下,从多个互相可以替代的可行方案中选定一个比较经济实用的方案,因此造价的正确评估是影响最终决策的关键性问题之一。进行合理的造价评估有两种思路:

- (1) 在已知市场材料价、工资水平、收费办法的前提下,根据各地编制的预算定额,忽略一些次要因素,对工程量和总造价进行估计,此法较慢且较复杂。
- (2) 对于欲估工程,可以从数目众多的已知造价

工程中找出若干个与欲估工程最相似的工程,以它们的造价作为原始资料,采用模糊预测方法得到欲估工程的造价,此法有较快的估算速度但依赖于丰富的工程资料积累。

#### 5 结语

由于深基坑支护工程本身所具有的系统性和复杂性,必须用系统工程方法对其进行分析和求解。划分子系统并确定子目标集是将系统工程的概念运用于深基坑支护的优化设计中的第一步。鉴于目前在研究领域研究的积累还不够,对由系统化引出的另外一些问题,如何解决各子目标之间的冲突、如何针对每一类具体方案建立全局优化模型、如何更好地考虑各子系统间的联系等,还需通过工程实践总结和修正。

#### 参考文献

- 1 邹开其,徐扬编著.模糊系统与专家系统.成都:西南交通大学出版社,1989.
- 2 刘建行,侯学渊主编.基坑工程手册.北京:中国建筑工业出版社,1997.

(责任编辑:黎贞崇)

### 改变种植方式可提高蔬菜中的“健康因子”

[德新社德国大贝伦7月10日8电]德国IGZ植物种植研究所的研究人员认为,提高某些生物活性物质含量的种植方式可以显著提高蔬菜中所谓的“健康因子”。

他们说,经常摄入这些有益健康的成分有助于降低罹患心脏与其他循环系统疾病、癌症和一些传染病的几率。花椰菜和其他芸苔属植物尤其富含这些成分。

花椰菜含有的大量葡萄糖苷使其拥有特殊的口味,花椰菜消化后的产物具有抗癌作用。研究人员说,花椰菜中所含的大量β-胡萝卜素、叶黄素和维生素C进一步提高了其抗致癌物的特性,而且其所含的多种苯酚酸、类黄酮和叶绿素也可强化这种作用。

他们发现,生物活性成分不仅取决于所种植的蔬菜的品种,而且取决于种植方式。在较冷的秋天种植的花椰菜中活性物质的含量特别高。如果花椰菜生长的平均日间温度较低——12℃至16℃,则胡萝卜素的含量较高,但是如果平均温度超过16.5℃,则所有品种的花椰菜的胡萝卜素含量会下降30%至60%。耕种方式对于花椰菜的葡萄糖苷含量也会产生同样的影响。

向肥料中添加硫磺和正确的灌溉方式也能提高生物活性物质的含量。研究人员伊洛娜·舍恩赫弗说:“从组成成分的角度讲,花椰菜绝不仅仅是花椰菜。”

包括萝卜在内的其他芸苔属植物也有这样的特点。IGZ研究所的科学家发现,胡萝卜和番茄的生物活性成分含量也可通过改进种植方式得到提高。舍恩赫弗说:“不过这些蔬菜所含的生物活性物质没有芸苔属植物多,但它们所含的胡萝卜素也很重要。”