

深基坑工程设计的优化原理与途径

徐杨青

(煤炭部武汉设计研究院 武汉 430070)

摘要 论述了深基坑工程的优化设计原理,提出了面向问题的深基坑工程设计思想及深基坑工程优化设计的主要途径和方法。

关键词 深基坑工程,优化设计,概念设计,面向问题

分类号 TU 433 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2001)02-0248-04

1 前言

随着我国国民经济和城市建设的高速发展,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问题的复杂性和不确定性,使深基坑工程成为一个极具挑战性、高风险性、高难度的岩土工程技术课题。从某种意义上来说,深基坑工程是一个复杂的系统工程,这是因为:

第一,深基坑工程涉及面大、广,影响因素众多。

第二,深基坑工程由挡土、支护、防水、降水和土方开挖等环节连环构成,任何一个环节失控,都可能酿成工程事故。

第三,深基坑工程不仅仅是一个简单的孤立的支护工程,深基坑自开挖之日起,其支护体系、施工过程和维护过程就与周边环境不断地相互影响、相互作用。

目前,在实际工程中,还存在着两种极端的现象:一是由于设计和施工方面的原因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;二是支护选型和设计极为保守,造成浪费。后者往往更加难以引起人们的注意。在深基坑工程招标中,各投标单位由于采用支护和设计方法的不同,报价相差一倍以上的情况并不鲜见。因此,如何使得深基坑工程做到安全、经济,就成为目前一个亟待解决的课题。

一个深基坑工程需要一个真正优秀的方案,即

优化设计。本文着重从深基坑工程的整体设计思路系统上,提出了深基坑工程优化设计的原理和若干途径。

2 优化设计原理

深基坑工程的优化设计主要从以下4个方面进行:(1)技术的可靠性、先进性以及施工的可行性;(2)经济效益;(3)环境影响;(4)工期。

深基坑工程的优化设计按其阶段不同,可分为三级优化:系统优化、设计计算优化和反演分析优化(信息化施工)。系统优化,也即方案优化,是指根据某一深基坑工程所要达到的目标而优选出一个最佳方案。设计计算优化是在支护系统确定后,对具体方案的细部进行优化计算,如锚杆或支撑点的位置和层数、支护桩的桩径和桩距等优选,优化目标是使深基坑工程总体造价为最小,设计计算优化问题是有约束极小化问题,目标函数为整个支护结构的材料总价值函数,约束包括支撑位置的限定、桩顶端或坑壁坡顶位移的要求等等。已有文[1]进行论述,本文不再赘述。

深基坑工程系统优化包括深基坑工程的概念设计、支护结构和地下水处理以及周边环境保护措施等方案的优选。它是整个深基坑工程优化设计的第一步,也是最重要的一步。基坑支护系统设计首先应着眼于概念设计,着眼于可行方案的筛选与优化^[2]。深基坑工程的概念设计是深基坑工程的一种整体设计思想,也是面向问题的方案设计方法。此种方法是从解决问题的关键入手,针对深基坑的几何特征、土

2000年4月30日收到初稿,2000年7月27日收到修改稿。

作者 徐杨青 简介:男,35岁,硕士,1986年毕业于长春地质学院工程地质专业,现任高级工程师,主要从事地基处理、深基坑支护工程的设计、研究和管理工作。

层特征、地下水特征和环境特征,进行方案的优选;从定性的概念出发,确立下一步设计时采用的土压力模式、地下水作用模式和支持结构计算方法。如有的工程主要是渗流破坏,有的则主要是深、厚、软土层的整体失稳或支护结构的大变形对周边环境的不良影响等等。抓住问题的关键,在定性分析的基础上确立具体问题的对策措施。由于深基坑工程是一门实践性很强、比较复杂的综合工程,目前,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”,因此,建立在“经验法则”基础上的工程类比方法和“专家系统”是深基坑工程概念设计的主要途径,信息化施工法是深基坑工程概念设计在施工过程中的必然延伸。

优化设计的流程和内容可用图 1 表示。

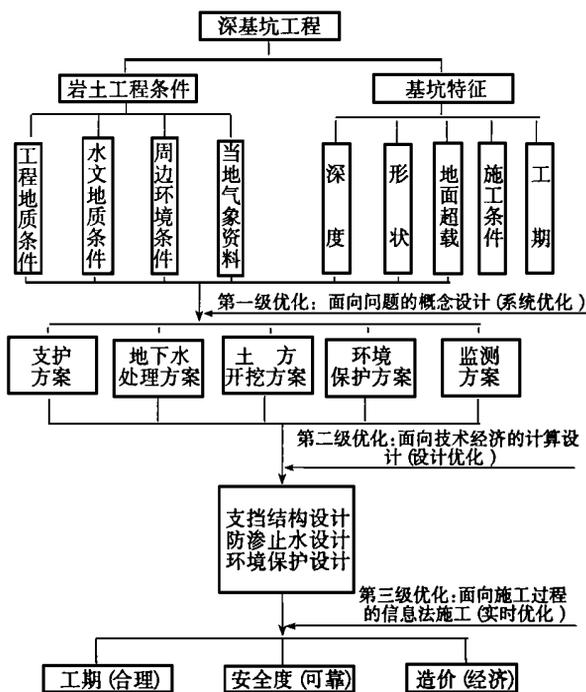


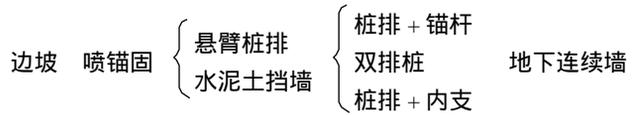
图 1 深基坑工程优化设计流程图

Fig. 1 Flow chart of design-optimization for deep excavation engineering

3 优化设计途径

3.1 根据场地水文、工程地质条件和基坑特点合理选择支护方案

目前国内常用的支护方案主要可归纳为 5 种,如按造价,其选择流程为:



无支护或简单护面的放坡方案最为经济,如果场地空间允许且无深厚软土,应优先考虑。当基坑开挖深度 > 5 m 时,考虑到放坡增加的土方开挖、外运费用以及地下室周边回填费用,有时采用放坡方案反而不一定比喷锚网支护方案经济。这时可考虑采取联合支护型式,如基坑边坡上段适度放坡,下段采用喷锚网支护。喷锚网支护作为一种岩土原位加固技术,近几年来在北京、武汉、深圳等地深基坑工程中得到了广泛的应用,它是由喷射混凝土面层、锚杆、钢筋网等联合组成的支护结构,通过对土体的嵌固、加筋作用,与土体形成共同工作体系。喷锚网支护适合土性较好的地层以及基坑工程抢险。由于各地土层特性不同,适合喷锚网支护的基坑开挖深度在各个地区也不一样。例如,在武汉地区,对于在长江一级阶地上一般至软塑粘性土层中开挖的深基坑,喷锚网最大支护深度可达 7 m 多;而对于长江二、三级阶地上可塑至硬塑老粘性土层(具弱膨胀潜势)中开挖的深基坑,采用喷锚网最大支护深度已达 14 m。在北京和深圳地区,喷锚网支护也已广泛应用于 8~14 m 的深基坑工程。

悬臂桩和水泥搅拌桩挡墙方案也只适用于开挖深度在 6~7 m 以下的深基坑工程。一般来说,悬臂桩的嵌固深度,必须达到悬臂高度的 1~2 倍,由于悬臂桩承受的弯矩很大,因而其侧向位移也很大。因此,当采用悬臂桩支护形式时,应考虑到基坑周边环境对基坑位移的敏感程度。当悬臂桩支护方案不可行时,可采用喷锚支护与排桩联合应用,即基坑边坡上部采用喷锚支护,下部采用护坡桩(或加锚杆、内支撑),以降低基坑工程造价;或者,直接采用桩-锚杆(内支撑)支护结构。当地下连续墙作为地下室外墙时,采用地下连续墙方案也能起到节约资金的作用。

在选择基坑支护方案时,还可充分利用基坑的空间效应达到优化的目的。根据受力和大量工程监测资料,支护桩桩顶位移、桩身变形以及桩身钢筋应力都是中间桩大,在基坑拐角附近(约 1/5 基坑边长处),支护结构受力较小,可适当减小桩长和配筋数量或采用单排桩与双排桩混合形式。对于钢筋笼易控制的人工挖孔桩,可采用单面配筋以减小配筋数量。另外,在基坑拐角处设置斜撑,费用不多,但却可以大大增加支护结构和整体刚度及稳定性,设计时应优先考虑。

3.2 根据基坑周边环境特点选择支护方案

根据基坑周边环境的严峻程度，结合基坑开挖深度、工程地质和水文地质条件来确定支护方案，实际上就是一种面向问题设计方法，它是赋予不同环境条件约束下的基坑或基坑各边不同的“安全度”，显然，可以把有限的建设资金用到“刀刃”上，达到最佳的经济效果。国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-99)就明确划分出了不同安全等级基坑侧壁相应的支护结构选型和重要性系数。

位于武汉市商业中心地带的天一大厦深基坑工程，其基坑开挖面积约 10 000 m²，基坑各片开挖深度不一，分别为 10.3，8.6，8.3 和 6.3 m，整个基坑周边以直径 φ800 mm，间距 1.2 m 的钻孔灌注桩排为主要支护结构。另外，根据各边不同的开挖深度、环境和地层情况，确定是否增设预应力锚杆和锚杆的排数(参见表 1)。

表 1 不同安全等级与支护结构对比表

Table 1 Comparison of different retaining system based on safety level

侧壁位置	开挖深度 / m	安全等级	支护结构	开挖后支护桩顶平均位移 / mm
东侧	6.3	二级: 开挖较浅, 坑壁无淤泥软土层, 距友谊路约 8 m。	悬臂式支护桩排: 支护桩长为 13 m。	50
南侧	8.3	二级: 开挖虽浅, 但坑壁有 4.0 m 厚的淤泥, 距离中山大道约 6 m。	桩锚支护结构: 支护桩长为 13 m, 一排预应力锚杆, 长度为 20 m。	7
北侧	8.6	二级: 开挖较深, 坑壁无软土, 坑顶有超载, 离交通要道距离远。	桩锚支护结构: 支护桩长为 14 m, 一排预应力锚杆, 长度为 20 m。	4
西侧	10.3	二级: 开挖深, 坑壁有 4.5 m 厚的淤泥, 坑顶附近民宅较多。	桩锚支护结构: 支护桩长为 18 m, 两排预应力锚杆长度分别为 20 m 和 18 m。	10

工程监测资料表明，在整个深基坑开挖和基础施工过程中，周边环境没有受到任何大的不良影响，这种设计方法达到既安全又经济的目的。

3.3 采用被动区加固方法

实际工程监测结果表明，对于含有深、厚流塑至软塑粘性土层的深基坑，支护结构体前的主动土压力非常大。另一方面，在基坑开挖过程中和开挖后，由于土体自重应力释放、土体松弛与蠕变以及支护结构向坑内的变形挤压等方面原因，导致坑底隆起变形和坑底下一定范围内土体强度的降低。为了控制支护结构的侧向位移、减少坑底隆起和工程造价，可在基坑开挖前超前一定时间(加固土体的硬结时间)，对支护结构被动区进行加固，加固的形式有格构式暗撑、齿形暗扶壁和暗墙等，加固方法有

水泥搅拌桩、旋喷桩、注浆等。工程经验表明，加固土体的平均强度和基床系数可提高 2~6 倍^[3]，从而大大降低支护工程费用，提高支护体的安全度。

3.4 采取有效的地下水处理措施

如何控制开挖场地的地下水是深基坑工程中的一个难题。在深基坑工程中，处理地下水的方式主要可分为三大类：降水措施、防水措施和降、防联合措施。降水的方式有多种，按降水所处的位置可分为坑外降水和坑内降水；按疏干地下水的方式可分为抽排疏干型和导渗减压型。控制降水深度在基坑开挖面以下 0.5~1.0 m 或承压水头降至基坑开挖到坑底后不至产生坑底突涌现象，并有一定安全储备。过深或过大时容易引起渗流所带来的不利影响。防水措施主要为打竖向防渗围幕和封底(水平防渗围幕)。一般来说，采用降水措施要比采用防水措施经济。但是，由于降水引起的地面沉降不可避免地要对基坑周边的环境造成一定的不利影响，因此，降水方案的优化需要既能满足基坑开挖施工的需要，又能将坑外地下水的水力坡度和压降或水位深度降至最小。实践证明，降水与打防渗围幕或回灌技术相结合的地下水处理措施也能既经济又安全地保护基坑附近的建筑物。

武汉等地长江一级阶地上的土层呈二元结构沉积韵律(即土层自地表而下土的颗粒由细变粗)，在上部杂填土、饱和流塑至可塑的粘性土与下部砂性土之间，普遍存在有一过渡层，土性为粉质粘土与粉土、粉砂互层，厚度大都为 3~7 m。尽管该层以可塑状粉质粘土层为主，但其中的粉土、粉砂夹层中的地下水又具有承压水的特性，且与下伏砂层孔隙承压水属同一地下水系统。由于夹有相对隔水层，削弱了与下伏含水层的水力联系，其水平向透水性远大于垂直向透水性，故称之为过渡层。由于过渡层中的粉土、粉砂层渗透系数仅为 0.2~0.3 m/d，渗透性差，含水质颗粒很细，直接从该层中抽取的地下水量小且含砂量不易控制，如果处理不当，效果适得其反。我们通过多年的工程实践，摸索出一套采用盲井作为疏导井的办法，即用打设砂井来沟通过渡层与下层承压水的水力联系，通过深井从深部强透水层中抽排地下水，将坑底弱透水层中的地下水引入到下部强透水层中，从而达到降低过渡层承压水头和水位的目的是。

3.5 合理确定开挖施工顺序

不适当的开挖方式往往是造成基坑事故的重要原因。一方面，围护结构设计应为土方开挖创造条件；另一方面，合理进行土方开挖也是基坑安全的保障。支护结构的水平位移不仅与支护结构的刚度、

土层性质有关,也同基坑开挖方式和开挖应力释放速率有关。原则上要求每阶段的开挖深度与相应设计工况的计算模型一致。强调分层开挖、先支撑(或锚定)后开挖和每次控制规定深度、及时架设支撑的原则。

大量工程资料表明,开挖顺序不同引起支护结构位移不同,从中间开始向纵深和两侧扩大的中心岛法开挖顺序,比从一定方向向另一个方向顺序推进的开挖方法,对基底隆起和桩后地面沉降有一定程度减少。特别是对于有深、厚流塑状淤泥质土的深基坑,如果采用重型挖土机从基坑一边向另一边挖土推进,很容易造成坑底工程桩向一个方向位移。在大型基坑工程中,可采用分段开挖法,即先开挖一部分,待浇筑底板后再开挖其他部分;或者采用分层盆式开挖法,即在每一层土中先挖中间部分,保留两侧土体并安装或浇筑此范围的支撑,而后将各根支撑两端所留支撑挡墙的土堤,分步、对称地挖除并立即安装或浇筑其间的部分支撑。这些优化后的开挖施工方法,充分运用了深基坑工程的时空效应规律,能可靠而合理地利用土体自身在基坑开挖过程中控制土体位移的潜力而达到控制基坑土体位移,既使基坑工程更安全经济,又使环境得到有效保护。

3.6 注重信息化施工

深基坑工程是土体、支护结构、周边环境相互作用的一个动态变化的复杂系统,由于岩土材料的不确定性和试验数据的离散性、支护结构设计计算模式的简化、周边环境的复杂性以及降雨、施工质量问题的突发或偶然事件的不良影响等等原因,仅仅依靠理论分析和经验估计是难以完全把握基坑支护结构和土体的变形及破坏过程与特征,也难以完成可靠而经济的基坑设计。因此,通过施工时对整个深基坑工程系统的定期监测,直接了解其变化

的势态,利用监测信息的反馈分析,较好地预测系统的变化趋势。当出现险情预兆时,可作出预警,及时采取措施,保证施工和环境的安全;当安全储备过大时,及时修改设计,削减围护措施。还可根据定期监测得到的信息,反演计算参数,根据反演计算参数重新分析计算而进行正分析变形预测,必要时适当修改设计或施工步骤,再继续施工和监测,这就是反分析法或信息化施工。

对于有些支护构件,如锚杆,在正式施工前,先行施工试验锚杆,通过锚杆试验,来优化锚杆施工参数以达到最大的经济效益,这也是信息化施工的一个重要方面。

4 结 论

深基坑工程是一门系统工程,它既要解决复杂的工程技术问题,如土体的强度与稳定问题、支护结构变形问题、支护结构与土的共同作用问题以及周边环境影响问题等,又要达到较高的经济效益,需要运用多种技术手段。同时,深基坑支护结构设计又是一个复杂的、综合性的岩土工程问题,目前还没有一个十分合理的求解围护结构内力的计算方法。因此深基坑工程优化设计的第一步——支护系统优化就显得尤为重要。工程实践证明,概念设计和面向问题的深基坑工程设计方法是必不可少的。

参 考 文 献

- 1 徐杨青. 深基坑支护结构的优化设计计算[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 57~60
- 2 周海龙. 软土地区基坑支护系统的设计思路及要点[A]. 见: 杭州市建筑业管理局, 杭州市土木建筑学会编. 深基坑支护工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996, 28~29
- 3 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997, 29~31

ON THE PRINCIPLE AND METHOD OF DESIGN OPTIMIZATION FOR DEEP EXCAVATION ENGINEERING

Xu Yangqing

(Wuhan Institute of Design & Research, Coal Industry Ministry of PRC, Wuhan 430070 China)

Abstract The principle of design-optimization of deep excavation engineering is expounded. The idea of problem-facing of deep excavation engineering is put forward and the main methods and ways of design-optimization are proposed.

Key words deep excavation engineering, design-optimization, concept design, problem-facing