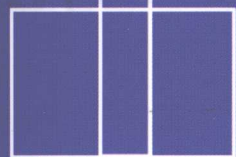


Reliability Analysis and Numerical Simulation of Retaining  
Engineering for Deep Foundation Pit

黄志全 王安明 毕理毅 陈泰霖 李小根 等著

# 深基坑支护工程

## 可靠度分析与数值模拟



黄河水利出版社

# 深基坑支护工程可靠度 分析与数值模拟

黄志全 王安明 毕理毅 陈泰霖 李小根 等著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书系统地论述了深基坑支护工程中的可靠度理论及其应用,结合工程实践对深基坑支护工程开展了数值模拟研究。针对深基坑支护工程的研究现状及工程建设的需要,对基坑工程可靠度分析的基本原理及工程应用、土钉支护结构稳定的可靠性、桩锚土钉联合支护机理、基坑变形性状数值模拟等难点问题进行了较为全面的研究,并把研究成果运用到郑州地区深基坑支护工程的设计、施工中。

本书可作为岩土工程专业本科生、研究生的参考书,也可供从事深基坑支护工程及相关领域的科研人员和从事深基坑支护工程设计、施工、监理与监测等工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

深基坑支护工程可靠度分析与数值模拟/黄志全,王安明,  
毕理毅等著. —郑州:黄河水利出版社,2009. 8

ISBN 978-7-80734-685-2

I. 深… II. ①黄… ②王… ③毕… III. ①深基础-坑壁  
支撑-工程结构-结构可靠性-分析 ②深基础-坑壁支撑-  
工程结构-数值模拟 IV. TU473.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 126497 号

策划组稿:简 群 电话:0371-66026749 E-mail:w\_jq001@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:12.75

字数:295 千字

版次:2009 年 8 月第 1 版

印数:1—2 000

印次:2009 年 8 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

# 前 言

随着城市建设的发展,高层建筑和城市地下空间的利用越来越多,随之而来的深基坑工程也越来越多,深基坑深度更大,周边环境更加复杂,由此带来的设计施工难度也在不断加大,可能导致的深基坑事故也在逐年增多。特别是开挖和支护的应力、变形分析使不可忽视的卸载问题及其引发的土体应力、强度、变形性质等问题越来越受到研究人员、工程技术人员关注和重视,并为我们提出了一系列需要深入研究的课题。不断发展的高层建筑和地下空间工程带动了深基坑工程实践的发展,也对岩土工程和岩土力学理论与技术研究提出了新的要求和指明了研究方向。由于理论研究的滞后,计算方法及参数选取的不合理性以及设计选型和施工措施不当等因素,岩土工程界也受到了不少惨痛的教训。深基坑支护工程的理论研究和工程技术发展,必将成为人们持续不断研究和实践的热点与难点问题。为此,广大岩土工程和岩石力学工作者对该领域的问题进行了长期不懈的探索研究,取得了很多具有重要意义的理论和应用成果,为人类工程建设作出了重大贡献。

与地基工程相比,深基坑工程在支理论、变形机理、支护方法及合理施工等方面还存在很多值得探讨和深入研究的地方。如基坑应力场分布研究方面,现在多采用传统的土压力理论进行设计与施工,但是工程实践证明,该方面的理论研究往往与具体的工程实践需要不很相符。为此,本书系统地总结了近年来深基坑工程理论和工程运用方面的科研成果、基坑工程设计施工方面的工程实践,论述了深基坑支护工程中的可靠度理论及其应用,结合工程实践对深基坑支护工程开展了数值模拟研究。

全书在综合分析已取得的研究成果的基础上,针对近年来深基坑支护工程的研究现状及工程建设的实际需要,首先对基坑工程可靠度分析的基本原理进行了较为系统的论述,并对其具体的工程应用加以探讨;然后研究了可靠度理论在土钉支护结构稳定评价中的具体方法和步骤;在此基础上,作者深入研究了基坑桩锚土钉联合支护的支护机理,并对基坑变形性状开展了数值仿真模拟;最后把研究成果运用到郑州地区深基坑支护工程的设计、施工中。

作为本书的作者,华北水利水电学院吴林峰副教授、崔江利副教授、杨继红博士和安阳工学院姚海慧硕士执笔了相关章节。本书得到河南省高校杰出科研人才创新工程项目(HAIPURT)和河南省高等学校创新人才培养工程项目(2005KYCX015)资助,以及华北水利水电学院高层次人才科研启动项目资助。本书的作者长期从事岩土工程和地质灾害信息系统方面的教学、科研、设计与施工等工作,本书的研究内容是作者及其研究生、同事多年来在长期工程实践积累的基础上对深基坑支护工程持续研究的一次总结。但是,由于专业领域、知识范围等的限制,作者深知自己在岩土力学、数学等方面的知识还有欠缺,本

书在一些方面还存在疏漏、不当或错误之处,敬请同行学者批评指正。在撰写本书的过程中,得到顾金才院士、刘汉东教授、戴福初研究员、路新景教授级高级工程师、姜彤副教授等的大力支持与指正,得到了华北水利水电学院资源与环境学院同事的关心和帮助,部分研究成果是在河南省岩土力学与结构工程重点实验室内取得的,同时,河南大河基础建设工程有限公司杨新洲经理等提供了部分工程实践资料,此外,本书的撰写还基于书后大量的参考文献,其作者的贡献是显而易见的,在此一并致谢!

作 者

2009 年 6 月

# 目 录

## 前 言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第1章 绪 论 .....               | (1) |
| 1.1 引言 .....                | (1) |
| 1.2 深基坑支护工程可靠性分析 .....      | (1) |
| 1.3 深基坑支护工程优化设计与数值模拟 .....  | (2) |
| 1.4 郑州市深基坑支护工程设计与施工概况 ..... | (3) |
| 1.5 本书对深基坑支护工程若干问题的研究 ..... | (4) |

## 第1篇 深基坑支护工程可靠度分析

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 第2章 概 述 .....                | (6)  |
| 2.1 基坑工程可靠度研究的意义及其必要性 .....  | (6)  |
| 2.2 可靠度分析方法的优点 .....         | (7)  |
| 2.3 岩土工程可靠度研究步骤及主要研究内容 ..... | (8)  |
| 第3章 可靠度分析的基本原理 .....         | (10) |
| 3.1 基坑可靠度分析中的基本概念 .....      | (10) |
| 3.2 常用的可靠度分析方法 .....         | (16) |
| 第4章 基坑可靠度的不确定性因素研究 .....     | (24) |
| 4.1 不确定性的分类 .....            | (24) |
| 4.2 土性参数的相关性分析 .....         | (27) |
| 4.3 随机变量概率分布的假设检验 .....      | (33) |
| 第5章 土钉支护及极限状态函数的建立 .....     | (39) |
| 5.1 土钉支护技术概述 .....           | (39) |
| 5.2 土钉支护结构稳定性分析 .....        | (43) |
| 5.3 土钉支护结构体系稳定性可靠度分析 .....   | (55) |
| 第6章 可靠度程序设计及实例分析 .....       | (58) |
| 6.1 可靠度程序设计 .....            | (58) |
| 6.2 工程实例 .....               | (61) |

## 第2篇 深基坑工程优化设计分析与工程实践

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 第7章 桩锚与土钉联合支护优化设计基本理论 ..... | (70) |
| 7.1 系统优化 .....              | (71) |

|     |                         |      |
|-----|-------------------------|------|
| 7.2 | 设计计算优化 .....            | (71) |
| 7.3 | 反演分析优化 .....            | (76) |
| 7.4 | 降水优化设计 .....            | (77) |
| 第8章 | 桩锚与土钉联合支护优化设计实例研究 ..... | (79) |
| 8.1 | 工程概况 .....              | (79) |
| 8.2 | 工程地质与水文地质条件 .....       | (79) |
| 8.3 | 土层参数选取 .....            | (80) |
| 8.4 | 周边环境条件 .....            | (81) |
| 8.5 | 方案的优化设计 .....           | (82) |

### 第3篇 深基坑支护工程数值模拟

|      |                         |       |
|------|-------------------------|-------|
| 第9章  | 桩锚与土钉支护工程实例数值模拟分析 ..... | (90)  |
| 9.1  | 概论 .....                | (90)  |
| 9.2  | FLAC 3D 程序介绍 .....      | (90)  |
| 9.3  | 基本假设 .....              | (91)  |
| 9.4  | 计算模型的建立及有关参数的选取 .....   | (92)  |
| 9.5  | 基坑开挖过程的模拟 .....         | (93)  |
| 9.6  | 数值模拟结果及分析 .....         | (94)  |
| 第10章 | 复合支护结构三维数值模拟分析 .....    | (101) |
| 10.1 | 工程概况 .....              | (101) |
| 10.2 | 基坑支护方案 .....            | (102) |
| 10.3 | 模型的建立和参数选取 .....        | (103) |
| 10.4 | 三维数值模拟结果分析 .....        | (105) |
| 第11章 | 桩锚与土钉支护结构数值模拟分析 .....   | (131) |
| 11.1 | 工程概况 .....              | (131) |
| 11.2 | 工程及水文地质条件 .....         | (131) |
| 11.3 | 基坑支护方案设计 .....          | (132) |
| 11.4 | 模型的建立及参数选取 .....        | (134) |
| 11.5 | 基坑分步开挖过程中土体内力分析 .....   | (136) |
| 11.6 | 支护结构内力的数值分析 .....       | (138) |
| 11.7 | 基坑的安全系数和应变分析 .....      | (142) |
| 第12章 | 土钉支护工程实例数值模拟分析 .....    | (145) |
| 12.1 | 工程概况 .....              | (145) |
| 12.2 | 基坑支护方案 .....            | (146) |
| 12.3 | 基本假定 .....              | (147) |
| 12.4 | 模型的建立和参数选取 .....        | (147) |
| 12.5 | 三维数值模拟结果分析 .....        | (149) |
| 12.6 | 支护结构内力的理论分析 .....       | (155) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 12.7 理论分析与数值分析结果的对比 ..... | (158) |
|---------------------------|-------|

## 第4篇 深基坑支护工程监测技术与设计施工实例

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 第13章 深基坑支护工程信息化监测技术 .....             | (161) |
| 13.1 概述 .....                         | (161) |
| 13.2 监测内容和基本要求 .....                  | (161) |
| 13.3 基坑深层水平位移监测 .....                 | (163) |
| 13.4 土压力的观测 .....                     | (164) |
| 13.5 基坑孔隙水压力的观测 .....                 | (165) |
| 13.6 基坑支护结构内力监测 .....                 | (166) |
| 13.7 基坑开挖过程地下水位监测 .....               | (166) |
| 13.8 地表建筑沉降及裂缝监测 .....                | (167) |
| 13.9 基坑监测结果实时分析与评价 .....              | (168) |
| 第14章 深基坑支护工程设计与施工实例 .....             | (169) |
| 14.1 实例一 郑州小岗刘城中村改造工程基坑支护方案设计 .....   | (169) |
| 14.2 实例二 郑州大上海城商业步行街6区基坑支护方案设计 .....  | (176) |
| 14.3 实例三 河南省地震局物探中心高层住宅工程基坑支护设计 ..... | (185) |
| 参考文献 .....                            | (193) |



# 第1章 绪 论

## 1.1 引言

随着我国国民经济及城市建设的飞速发展,高层建筑日益增多,建筑规模不断扩大,尤其是最近 10 余年来,我国大中城市高层建筑拔地而起;与此同时,对地下空间的开发利用也成为大城市解决城市交通拥挤、土地资源紧张等问题的有效途径,地铁、地下商场和地下停车场等大型建筑物不断增多。

不断发展的高层建筑和地下空间工程带动了深基坑工程实践的发展,这也对岩土工程和岩土力学理论与技术研究提出了新的要求和指明了研究方向。以前大量的浅挖工程和无需支护的实践使人们已经习惯一次性的单调加载过程,随着基坑深度的逐渐加大,开挖和支护的应力、变形分析将使不可忽视的卸载问题及其引发的土体应力、强度、变形性质等问题逐渐受到重视,因此产生了一系列需要深入研究的课题。

再者,由于各种复杂的原因,近年来各地陆续发生了多起深基坑倒塌事故,既拖延了工期,又增加了造价,造成重大的经济损失和不良的社会影响,给深基坑的开挖和支护技术提出了新的问题和挑战。目前,经常使用的基坑支护形式较多,如土钉墙支护、土钉墙与桩锚联合支护、土钉墙与微型桩联合支护、土钉墙与超前锚杆联合支护、排桩与内支撑联合支护和桩锚与防渗墙联合支护等一系列联合支护形式。这些支护形式各有其优缺点,在付诸工程实践后也取得了不少成功经验,但很多都是以大量的经济浪费为代价的,基坑支护技术的优化设计研究也已成为刻不容缓的研究课题。

在计算方法上,应用有限元等数值模拟方法对土压力、基坑稳定性和基坑变形等进行综合分析的方法得到了较大发展,已经成为基坑支护工程安全、高效实施的强有力工具。

总之,基坑工程已成为岩土工程的热点问题,支护技术也成为亟待解决的难点问题。由于理论研究的滞后,计算方法及参数选取的不合理性,以及设计选型和施工措施不当等因素,岩土工程界也受到了不少惨痛的教训。深基坑支护工程的理论研究和技術发展,必将成为人们持续不断研究和实践的热点与难点问题。

## 1.2 深基坑支护工程可靠性分析

岩土工程可靠性问题,因其复杂性和多样性成为工程领域可靠性研究中较为困难的问题,其发展落后于结构可靠性的研究。其中对土性参数的不确定性、土层的概率模型的研究,是岩土工程可靠性研究最重要的部分,也是岩土工程可靠度分析的基础。

国外岩土工程可靠性研究始于 20 世纪 60 年代末,以 A. Casagrande<sup>[1]</sup>、T. H. Wu<sup>[2]</sup>、P. Lumb<sup>[3]</sup>、E. H. Vanmarke<sup>[4]</sup>和 G. G. Meyerhof<sup>[5]</sup>等为代表,他们对诸如地基基础中的

风险问题、土坡稳定、土的统计分析和变异性、自相关性和海洋工程的设计以及总安全系数与失效概率分项系数之间的关系进行了许多积极的研究<sup>[6]</sup>。

我国关于岩土工程可靠度的研究始于 20 世纪 80 年代,虽然起步较晚,但发展较快。研究的内容涉及桩基础、土坡稳定、地基沉降、地基承载力以及土性参数概率统计分析等方面。其中,高大钊编著的《土力学可靠性原理》、包承纲等人编著的《地基工程可靠度分析方法研究》以及冷伍明编著的《基础工程可靠度分析与设计理论》等专著,系统地总结了我国岩土工程可靠度研究的理论与实践,为推动我国岩土工程可靠度深入研究和进一步发展,发挥了很大作用<sup>[6]</sup>。

在基坑工程方面,可靠度的研究成果还不多,主要是因为基坑工程的影响因素众多,积累的资料较少,研究工作较难进行。国外只有 Matsuo 等做过比较细致的工作;国内以同济大学的况龙川、高大钊<sup>[7~10]</sup>为代表的研究成果较为显著,他们不但研究了土性参数空间平均的特性,而且还采用 JC 法分析了水泥土支护结构的稳定性。近年来,国内期刊上相继刊出不少关于基坑可靠度方面的论文,研究范围涉及挡土墙、锚杆、土钉以及板桩等各种支护形式,甚至有人尝试采用可靠度的概念进行基坑结构的优化设计。即便如此,但目前各种研究结果仍较为混乱。总的来看,基坑支护结构的可靠度研究仍然处于起步阶段。

### 1.3 深基坑支护工程优化设计与数值模拟

深基坑优化设计是指在保证基坑安全的前提下,设计经济合理的基坑支护方案。基坑支护优化设计包括四个方面的内容,即方案优化设计、结构优化设计、截水优化设计和信息化施工动态设计<sup>[11]</sup>。

就方案优化设计而言,基坑支护方案选择的具体操作主要有两种方法<sup>[12]</sup>。第一种是定性方法,就是依靠专家的经验 and 工程实践形成的经验来选择方案。在这方面,赵志缙和应惠清、刘建航和侯学渊教授、龚晓南教授、秦四清教授等相继提出了基坑支护方案的基本方法和原则;另外,可以根据基坑安全等级和重要性系数以及开挖深度按照流程进行支护方案的选择,这一点以秦四清教授提出的按顺序选择支护方案<sup>[13]</sup>为代表。第二种是定性分析和定量计算相结合的方法,最具代表性的是利用多目标决策方法来进行方案优选。在基坑支护方案选择决策时,需要考虑安全、造价、工期等目标,这些目标之间相互影响、相互矛盾,属于多目标决策方法问题。

支护结构优化包含结构计算模型和经济性分析两方面。在结构计算方面,杆系有限元土抗力法是公认的支护桩墙结构设计计算方法。孙钧等<sup>[14]</sup>利用有限元、边界元方法分析了基坑开挖等地下工程与围岩介质的静、动态共同作用,在本构关系上引入了弹性、塑性、弹塑性等不同的岩土介质本构模型,在几何关系上从线性分析发展到非线性分析。曾国熙等<sup>[15]</sup>分析了以板桩作为支挡结构的软黏土地区的基坑开挖问题,利用有限元程序对影响基坑性状及工程经济效益的几个重要因素(板桩的插入深度、板桩的刚度以及土质条件等)进行研究。在经济性分析方面,目前的研究成果主要是基于等值梁法计算模型对支护体系的经济性进行优化分析<sup>[16]</sup>。等值梁法计算模型不适用于桩锚与土钉联合支

护形式的计算分析,实际上,对于基坑支护工程,经济指标的衡量也并非由材料用量唯一决定,还含有优化模型中其他要素,比如工期和施工工艺等。优化模型中优化变量和优化目标是根据具体施工工况,结合变形控制来选取更具有现实意义的技术经济变量。

用数值分析方法对基坑支护工程进行模拟与传统的估算法、弹性地基梁法、物理模拟法等方法相比有很大的灵活性。常用的数值分析方法有有限元法(FEM)、连续介质快速拉格朗日差分法(FLAC)和边界元法(BEM)。拉格朗日差分法将转化课题的常微分或偏微分方程为差分方程来处理有限变形问题,计算过程中允许材料发生屈服和塑性流动,适合解决岩土工程中经常遇到的大变形问题。有限元法以研究区域的变形式来离散所研究的区域,使其成为有限数目的单元并列计算出计算公式,不必像拉格朗日差分法把问题归结为微分方程这一中间手段,相比拉格朗日差分法,其节点任意配置,能很好地模拟复杂的边界条件。边界元法化微分方程为边界积分方程,使用类似于有限元法的离散技术来离散边界,有降维作用,但边界元法对变系数或非线性问题的适用性不如有限元法。

数值模拟方法能综合考虑基坑开挖与支护施工过程中的许多因素,如土的非线性、弹塑性、固结效应以及土与支护结构的相互作用等,能将支护对周围环境的影响通过数值模拟的前后处理技术直接显示出来,更能直观地分析问题。目前,数值模拟已经在基坑开挖和支护计算分析中发挥了巨大的作用。Emilios M. Comodromos 等<sup>[17]</sup>用 FLAC 软件分别考虑了桩土相互作用,分析了在不同刚度情况下单桩、群桩的工作状态及其极限承载力。张钦喜等<sup>[18]</sup>用 FLAC 软件对复合土钉支护的土钉内力和支护变形进行了模拟与分析。黄润秋等<sup>[19]</sup>应用 FLAC 3D 软件研究了预应力锚索框架与岩土体的相互作用机理及施加预应力产生的附加应力。朱亚林等<sup>[20]</sup>运用非线性有限元方法,对一种新型的预应力锚杆柔性支护技术的作用机理进行了数值分析。李好等<sup>[21]</sup>采用弹塑性有限元方法,对基坑开挖、支护施工进行了数值模拟,分析了土体的位移和锚杆的受力状态。张春明等<sup>[22]</sup>采用离散元数值分析方法对散体介质锚拉支架的支护和受力作用进行了详细的分析。

## 1.4 郑州市深基坑支护工程设计与施工概况

郑州市地处黄河冲积平原地区,地形较平坦,地貌单一。地层以粉土、粉质黏土、粉细砂为主。郑州东半部的地下水位较高,受季节的影响较大,最高水位多出现在雨季后期(9月),最低水位多出现在干旱季节(5月),地下水的补给主要为大气降水<sup>[23]</sup>。

郑州市在基坑和边坡支护技术方面也得到相当快的发展,形成了一些适合郑州市地质特点的支护形式,包括排桩加预应力锚杆结合止水帷幕技术、水泥土重力式围护结构、拉锚式排桩支护技术、土钉墙支护技术、锚喷支护技术以及组合支护技术等<sup>[23]</sup>。使用较为广泛的支护形式有:土钉墙支护技术、桩锚支护技术、土钉与微型桩联合支护技术以及桩锚与土钉联合支护技术。

### 1.4.1 土钉墙支护技术

土钉墙支护结构包括喷射混凝土、土钉、钢筋网三部分,作为一种先进的支护技术,在高边坡和基坑工程中特别是在不良地质条件下,利用喷射混凝土、土钉、钢筋网与土体共

同作用的主动支护体系,最大限度地利用边壁土体的自承能力,变土体荷载成为支护结构的一部分。土钉支护结构的设计计算主要包括内部稳定性验算和外部稳定性验算。

### 1.4.2 桩锚支护技术

桩锚支护结构由竖向钢筋混凝土灌注桩和斜向预应力锚杆构成,在基坑内外土压力作用下,桩体处于受弯状态,锚杆受拉,通过预应力锚杆给桩体提供一支撑力,使桩体在水平土压力作用下内力分布较为均匀。通过设置预应力锚杆可显著提高支护结构的抗倾覆稳定性,显著地缩短桩体在土中的嵌固深度,降低施工难度和减小工程投资。

### 1.4.3 土钉与微型桩联合支护技术

将土钉与微型桩联合起来使用,两者形成一个整体结构,共同受力,从而使得整个支护体系水平位移小和结构受力合理。两者联合使用时与桩周土体构成一个复合土体,这种复合土体在竖向范围内具有一定刚度,对不均匀土体的变形有限制作用。另外,微型桩结构强度的预先形成,可显著提高土钉支护结构的施工进度,使基坑可以连续地分层开挖,并有效提高土钉结构的内部安全系数。

### 1.4.4 桩锚与土钉联合支护技术

桩锚与土钉联合支护结构通常由上部的桩锚支护和中下部的土钉支护结构共同构成。在基坑边坡土压力作用下,桩锚与土钉作为一个整体结构共同抵抗荷载和变形。当桩锚与土钉构成联合支护结构时,土钉对土体的加强作用使作用于桩锚结构上的土压力得到显著减小,锚杆预应力水平得到显著降低。

## 1.5 本书对深基坑支护工程若干问题的研究

近年来,我国已成功设计和施工了许多技术先进、经济合理的基坑工程,但由于问题的复杂性,基坑工程的理论研究和技术创新仍落后于工程实践,现场施工中的铺张浪费、技术粗糙、技术水平低下,导致实际基坑工程事故并不鲜见。为提高基坑工程的成功率,充实基坑工程支护结构的理论研究水平,使支护结构设计既安全又经济,本书拟开展以下几个方面的研究。

### 1.5.1 基坑支护结构设计可靠度分析<sup>[24]</sup>

首先论述结构可靠度分析的基本原理和岩土介质的不确定性。将实用分析法引入到基坑土钉支护结构中进行可靠度分析,对于土钉支护结构外部整体稳定性,采用类重力式挡墙的分析方法,研究其平移、倾覆和深层滑落破坏;对于结构的内部稳定性,根据王步云法分析了土钉拔出和楔体滑落破坏。最后利用 Visual Basic 6.0 根据实用分析法编写了基坑可靠度计算程序,并与采用 Monte - Carlo 法的计算结果作对比,验证了程序的正确性以及将实用分析法引入基坑支护结构可靠度分析中的可行性。

### 1.5.2 基坑支护结构优化设计与数值模拟分析

以理正深基坑支护结构设计软件为手段,对桩锚与土钉联合支护结构进行优化计算,以工程造价为目标函数优化模型,针对优化后的模型用 Visual Basic 6.0 编制方案优选程序,结合具体工程实例运用优化理论和方法对深基坑支护结构设计方案进行优选和优化设计<sup>[25]</sup>;以深基坑工程桩锚支护形式<sup>[26]</sup>、桩锚与土钉联合支护形式<sup>[27]</sup>、土钉墙支护方法<sup>[28]</sup>为工程背景,采用 FLAC 3D 软件对深基坑的分步开挖及支护过程进行了详细的模拟与分析。研究基坑土体的位移、应力和应变率,复合支护结构体的位移和内力变化,总结其内力和变形的分布规律及其相互作用规律。

### 1.5.3 基坑支护设计施工实例及信息化施工方法

首先给出深基坑工程信息化施工中一些主要监测项目的监测方法和仪器设备的埋设方法等。最后给出郑州市近年来开展的几个典型的基坑支护工程实例,给出其具体的基坑支护设计方案,供类似深基坑支护工程设计施工参考。

# 第 1 篇 深基坑支护工程 可靠度分析

## 第 2 章 概 述

### 2.1 基坑工程可靠度研究的意义及其必要性

20 世纪 80 年代以来,随着我国社会经济的迅速发展,城市建设速度日益加快,各大城市、沿海经济开发区不断涌现出大量高层、超高层建筑,大型的基坑工程也随之日益增多。目前,地下室埋深已达 20 多 m,而基坑最深可达 24 m,国外基坑有的深达 30 ~ 40 m<sup>[29]</sup>。与此同时,密集建筑物,超大、超深的基坑周围复杂的地下设施,不但使得放坡开挖基坑这一传统技术不再能满足现代城镇建设的需要,而且由于建筑场地周围住宅密集、道路交错、管线纵横分布在地面下,对基坑开挖提出了更高、更严的技术要求:不仅要保证基坑边坡和支护结构的稳定,还要满足变形控制的要求,以确保基础施工期间相邻建筑、地下管线、道路等的结构安全和正常使用。因此,基坑工程已呈现出“数量多,深度大,支护技术难度大”的趋势,深基坑开挖与支护已引起了各方面的广泛重视,各种新的支护形式和设计计算方法也不断出现。然而对于支护结构的作用机理以及选型原则、设计计算方法及安全性能等方面的研究,还存在很多有待解决的问题,其中基坑支护边坡的安全性问题正是人们在工程实践中最关心的问题<sup>[30,31]</sup>。

过去在工程中人们常常采用定值法来评价基坑边坡的安全性。该方法以土力学中的极限平衡理论为基础,即在条分法的基础上,结合定值的力学分析求解安全系数。它把土看做具有某种“平均”性质的“均质”材料,因此各种参数是确定的,荷载和计算方法等都是确定的,而把那些未知的、不确定的因素都归结到单一的安全系数  $K$  上,这样所得的结果很明确,易于为人们接受,长期以来得到了广泛的应用。然而,某些工程设计中按此法计算是安全的,实际使用中却发生了破坏,原因是定值分析法存在很大缺陷<sup>[32]</sup>。

首先,岩土介质具有高度的不确定性和变异性,设计中的参数指标,如岩土的物理力学指标、钉土的界面黏结强度等,表现出较强的离散性,因而工程的设计是在大量的不确定性和存在某些未知因素的情况下进行的,不宜用定值对其进行描述。

其次,分析模型的不同以及各种边坡工作环境的变化,包含许多不确定因素。实际

上,根据每个具体问题的不同,应采用的安全系数的大小也就不同。即使是同一工程问题,假如所用的方法不同,由于各种设计方法具有的精度不同,安全系数的大小肯定也不相同。换句话说,由于各种设计方法采用的假设或简化而造成了固有的不确定性,以及不同设计方法造成了工程实践上的差异。

总之,安全系数只是凭经验确定阈值,具有很大的主观随意性。仅凭缺乏可比性的安全系数  $K$ ,难以描述岩土工程本身的高度不确定性的特点,它虽然能对不确定性进行量化处理,但在理论上存在很大弊端<sup>[33~35]</sup>。定值法不能完全考虑设计参数中任何内在的变异性和不确定性,安全系数不能科学、定量地反映工程的安全程度。如安全系数为 1.2,并不意味着 120% 的安全。甚至有时计算出来的安全系数大于 1,实际工程中却发生了破坏的情况。安全系数亦缺乏统一标准,无法互相比,亦无法进行不同问题或同一问题不同计算方法的比较。Lumb(1970)在论及岩土工程时曾指出,传统的安全系数概念的严重不足在于:它未能直接考虑岩土强度的实际变异性,因此某一通用的安全系数值,对于各种岩土体甚至同一岩土体未必具有同样的意义<sup>[36]</sup>。

为了在基坑边坡稳定性分析中考虑存在的变异性和不确定性,使计算结果更切合实际,人们逐渐发展并形成了概率极限状态方法,即以概率统计理论为基础,以随机变量和随机过程作为研究对象的新方法,也就是可靠度分析方法。

## 2.2 可靠度分析方法的优点

采用可靠度的概念来评价基坑工程的安全性有所不同,它考虑了设计存在的不确定因素和设计参数的变异性。它首先承认设计出的建筑物都有风险,只是风险大小不同而已,风险大的设计,破坏的可能性大,破坏损失也大,但工程投资较小;反之,则投资较大而破坏损失小。这里面存在一个合适的风险程度的问题,也就是进行优化设计的问题。因而,可靠度分析方法克服了传统定值设计法的缺点和不足,其优点主要体现在以下几个方面<sup>[24,37]</sup>:

第一,可靠度分析方法比较符合实际。可靠度分析能运用概率统计对庞杂的试验数据进行统计分析,且考虑了岩土性质及我们对结构破坏机理的认识不足等诸多不确定性问题和风险问题。

第二,可靠度有望成为比较不同工程安全的基本尺度。对于不同设计安全系数的基坑,如果基坑支护结构的可靠度相同,则它们具有相同的安全性。

第三,可靠度设计理论能够提供说明基坑工程安全性的评价指标,能够定量地考虑各种不确定因素对工程安全性的影响。

第四,可靠度分析还可以从结构的安全性、经济性、适用性等角度出发,通过引入模糊优化、模糊决策等方法,进行结构的优化选型,从而为工程设计提供参考<sup>[38,39]</sup>。

简言之,可靠度分析方法就是运用概率和数理统计来分析荷载、承载力的变异特征与规律,利用既有工程经验,在安全性和经济性之间寻找合理的平衡点,确定支护或加固工程的目标可靠指标。这种基于概率论的基坑工程安全性评价的可靠度分析方法,有很大的优越性。今后利用可靠度分析方法来评价基坑工程的安全性将是大势所趋,这正是可

靠度分析的意义所在<sup>[38,39]</sup>。

## 2.3 岩土工程可靠度研究步骤及主要研究内容

### 2.3.1 岩土工程可靠度的研究步骤

由于岩土工程中存在不确定性和变异性,进行可靠度研究时需解决大量的土性参数的变异性、相关性以及力学模型的不确定性等问题,因此其可靠度研究将是一个复杂的过程,该过程归纳起来大致可按下列步骤进行:

(1)收集岩土工程中的随机变量的观测或试验资料,用统计的方法进行统计分析,求出其分布规律及有关的统计量,作为可靠度计算的依据。与岩土工程有关的随机变量很多,但主要考虑三大类,即外来作用(如荷载)、土性参数的性质、结构或构筑物的几何尺寸。随机变量的统计分布较多的是正态分布、对数正态分布和极值型分布,相应的统计值为均值、标准差或变异系数等。

(2)用力学的方法计算研究主体的荷载效应,通过试验与统计获得结构的抗力,从而建立结构的破坏模式。荷载效应指的是荷载作用下主体所受的内力、应力以及主体的位移、变形等量值,可以用力学方法求解。主体的抗力指的是主体抵抗破坏或变形的能力,如基坑滑移、抗倾覆、抗变形、加固体抗拔以及地基承载力等,它们可以通过力学计算、试验或统计获得。由于岩土工程的设计采用极限状态,因此破坏标准就用极限状态表示。通过结构抗力和荷载效应,建立工程可靠度计算的极限状态方程。

(3)用概率论计算满足结构破坏标准下工程的可靠度。根据工程的随机变量以及破坏标准,用可靠度计算方法计算工程的可靠度。目前一般不用可靠度,而直接用反映工程可靠度的可靠指标。

(4)分析各随机变量的分布类型、变异性及其自身的变化对工程可靠度的影响,得出一些规律性的结论,从而为工程可靠度的设计提供依据,使工程建设满足经济、可靠的要求。

### 2.3.2 主要研究内容

本书着重论述了结构可靠度的基本原理和如何应用可靠度理论分析基坑土钉支护结构的稳定性问题,其中主要的研究内容和方法如下所述<sup>[24]</sup>:

(1)论述了岩土工程的不确定性和变异性,借用随机理论分析了土体的相关性,并且通过假设检验来确定土体抗剪强度参数分布类型。

(2)简要论述了结构可靠度的分析原理,讨论了土木工程中常用的可靠度设计方法,如一次二阶矩法、JC法、实用分析法以及 Monte - Carlo 法,并分析了各种方法的优缺点。

(3)根据土钉支护结构的作用机理和工作特点,论述了土钉支护结构的可能破坏模式,并将其分为结构外部和内部两种,分别讨论土钉支护结构的稳定性。

(4)将荷载效应和结构抗力视为随机变量,采用结构可靠度分析原理研究土钉支护结构的可靠性。对于土钉支护结构外部的整体稳定性,依据挡土墙的作用机理分别建立



抗滑移、抗倾覆和地基承载能力的极限状态方程;对于结构内部的稳定性,采用王步云提出的双折线法进行简化分析,分别建立了抗块体滑落、土钉整体抗拔以及单根土钉抗拔的极限状态方程。

(5)根据前人的研究成果和经验确定目标可靠指标。

(6)将一次二阶矩实用分析法引入到基坑土钉支护结构的可靠性分析中,应用 Visual Basic 6.0 对前面建立的各极限状态方程编写了相应的计算程序。通过工程实例进行可靠度计算,并采用边坡设计软件 geo - slope 中提供的 Monte - Carlo 法求出结构的系统可靠度,来验证采用实用分析法计算的正确性与可行性。

(7)分别研究了基坑土体的黏结力、内摩擦角,钉土之间的黏结强度,各参数的概率分布和相关性对土钉支护结构可靠度的影响状况,并阐述了可靠指标与安全系数的关系,最终得出一些有益的结论,为土钉支护结构的设计与施工提供参考。