

SIMPLIFIED SERIES OF
CIVIL ENGINEERING

清華

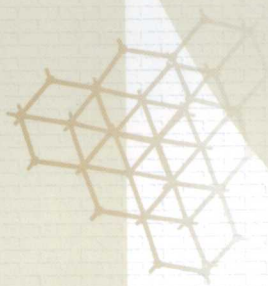
清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

陈有亮 杨洪杰 徐前卫 著

简明土木工程系列专辑

地下结构稳定性分析



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社
www.cnipr.com



Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

陈有亮 杨洪杰 徐前卫 著

简明土木工程系列专辑

地下结构稳定性分析

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
知识产权出版社
www.cnipr.com



内容提要

本书系“简明土木工程系列专辑”中的一本。本书介绍了基坑和隧道工程的一些计算、设计和施工方法以及边坡工程稳定性分析的一些基本方法，并重点介绍了盾构法隧道。结合上海的几个重大工程实例，本书对基坑和隧道工程的有限元计算和分析过程进行了详细的介绍。本书还结合广东一岩质公路边坡介绍了极限平衡法、有限元法和极限分析下限法计算边坡安全系数的过程。

本书对基坑和隧道工程基本理论的介绍既简明扼要又尽量面面俱到。在实例分析部分，计算过程详细，以便于读者参考。

本书可作为土木、水利、公路、铁路、采矿等相关专业高年级本科生和研究生相关专业课的教材，也可以作为工程单位和科研单位广大科技工作者和技术人员的参考书。

选题策划：阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip. sina. com; z_baolin@263. net

责任编辑：阳 森 张宝林

文字编辑：彭天放

图书在版编目 (CIP) 数据

地下结构稳定性分析 / 陈有亮，杨洪杰，徐前卫著．

北京：中国水利水电出版社：知识产权出版社，2008

（简明土木工程系列专辑 / 崔京浩主编）

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5259 - 3

I. 地… II. ①陈…②杨…③徐… III. 地下工程—边坡
稳定性—分析 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 032685 号

简明土木工程系列专辑

地下结构稳定性分析

陈有亮 杨洪杰 徐前卫 著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路 6 号；电话：010 - 68331835 68357319)
知识产权出版社 北京市海淀区马甸南村 1 号；电话：010 - 82005070

北京科水图书销售中心 (零售) 电话：(010) 88383994、63202643

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32 开 7.75 印张 208 千字

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

印数：0001—4000 册

定价：20.00 元

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5259 - 3

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题，可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044，电子邮件：sales@waterpub. com. cn)

清华大学土木工程系组编

简明土木工程系列专辑

编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驷

主 编 崔京浩

副主编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 彭天赦 张 冰 邹艳芳

总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准，等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写机构臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业，1964年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇，编著专业书4本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副系主任，现为中国力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。

前 言

我国经济的高速发展给地下结构工程技术和地下结构学科的发展带来了前所未有的机遇，也提出了许多很有价值的研究课题。对上海等沿海地区的地下工程工作者来说，地下结构学科目前正经历着有史以来最好的发展时期。本书主要介绍作者近几年在隧道工程、基坑工程和边坡工程等方面的部分研究成果。

本书分为基坑、隧道和边坡等三大部分。基坑和隧道部分主要介绍了作者结合所承担和参与的上海市重大工程项目进行的数值计算和理论分析工作。为了照顾初学者，同时为了满足研究生和高年级本科生课堂教学的需要，本书还对基坑、隧道的基本知识和基本理论进行了比较详细的介绍。边坡部分主要介绍了作者近期在边坡理论分析和数值计算方面的一些成果。

本书由上海理工大学陈有亮、徐前卫，上海申通轨道交通有限公司杨洪杰，上海大学杨乐滨、徐珊、常乐群、靳巍巍、刘井学等编写；陈有亮、杨洪杰、徐前卫担任主编。具体分工为：第1章由徐珊编写，第2章由杨乐滨、刘井学、陈有亮编写，第3章由常乐群编写，第4章由徐前卫编写，第5章由常乐群、杨乐滨、陈有亮编写，第6章和第7章由杨洪杰编写。全书由徐前卫和陈有亮负责统稿。

在本书的编写过程中，中国水利水电出版社副总编辑阳森女士、张宝林编辑、彭天赦编辑、上海理工大学城市建设与环境工程学院的领导以及土木工程系的领导和同事们给与了极大的支持

和幫助，在此，作者謹向他們表示深深的謝意。

由于時間倉促，本書肯定存在一些缺點和不足，敬請讀者批評、指正。

作 者

2008年1月

于上海理工大學軍工校區

目 录

总序

前言

基 坑 工 程 篇

第 1 章 基坑工程基本理论..... 1

第 1 节 概述/ 1

第 2 节 基坑工程的研究现状/ 3

第 3 节 基坑工程的分类/ 3

第 4 节 基坑开挖的主要特征/ 4

第 5 节 土压力计算理论/ 6

第 6 节 基坑工程支护结构设计理论/ 15

第 7 节 侧向位移与地表沉降计算理论/ 19

参考文献/ 20

第 2 章 基坑工程实例分析 21

第 1 节 上海轨道交通 6 号线北洋泾站基坑有限元计算
分析/ 21

第 2 节 基坑工程标准算例计算及其影响因素分析/ 32

参考文献/ 58

隧 道 工 程 篇

第 3 章 隧道工程基本理论 63

第 1 节 隧道工程的分类/ 63

第 2 节 隧道工程的主要施工方法/ 64

第 3 节 隧道工程的主要计算理论/ 69

参考文献/ 89

第4章 盾构法隧道 90

第1节 盾构法隧道的历史与现状/ 90

第2节 盾构机的构造与分类/ 95

第3节 隧道衬砌的构造与分类/ 100

第4节 衬砌结构的设计/ 110

第5节 开挖面稳定性/ 124

第6节 盾构法施工的地层变形理论与预测/ 128

参考文献/ 144

第5章 盾构隧道工程实例分析 148

第1节 上海复兴东路隧道工程计算分析/ 148

第2节 上海青草沙越江输水隧道工程计算分析/ 168

边坡工程篇

第6章 边坡工程基本理论 188

第1节 极限平衡法/ 188

第2节 有限元法/ 196

第3节 极限分析法/ 197

参考文献/ 222

第7章 边坡工程实例分析 226

第1节 极限平衡法/ 227

第2节 有限元法/ 227

第3节 极限分析下限法/ 229

第4节 几种计算方法对比分析/ 230

参考文献/ 231

出版者的话

基坑工程篇

第1章 基坑工程基本理论

第1节 概 述

基坑是指房屋建筑、市政工程或地下建筑物等施工时需要开挖的地坑，一般深度大于6m的基坑称为深基坑。在城市的基坑工程建设中，由于基坑周围大多密集着市政道路、管线和高层建筑物，这些建筑物对基坑支护结构和周围土体提出稳定性及变形的严格要求。因此，在保证支护结构本身安全的同时，又要保证周围建筑物结构和使用的安全，从而对地表沉降有较高的要求，根据基坑工程事故的统计分析，基坑工程事故发生率比较高，占1/4左右^[1]。这些事故主要表现为支护结构产生较大的位移、支护结构破坏、基坑塌方及大面积滑坡、基坑周围道路开裂及沉陷、与基坑相连的地下管线变形乃至破坏等，这些问题与其特有的区域性、个体差异性以及复杂性是密切相关的，同时也说明基坑工程是一项高风险的工程，是综合性强、涉及多学科的复杂的系统工程。

经济的迅猛发展加快了我国基础设施建设的步伐，随之出现的大量的高层、超高层建筑以及城市地下空间的充分利用发展都极大地促进了我国基坑工程设计、施工技术方面的进步。近些年来，深基坑工程的设计计算方法、施工技术、监测手段以及基坑工程理论在我国都有了长足的发展，但由于深基坑工程区域性、个体差异性及复杂性，工程事故仍时有发生。因此，深基坑工程作为一项集高投资、高难度和高风险于一身的工程，已引起了有关部门和工程界的广泛关注。

深基坑工程支护结构的设计经历了强度控制、变形控制和系统控制三个阶段^[2]。变形控制的基本思想是要求支护结构在满足强度及结构稳定的前提下,尚需满足控制变形位移的使用要求,即地下工程施工中既要保证其结构安全、不失稳,又要对周围环境不造成超出允许变形值的不利影响。系统控制的方法是指将施工环境看成一个由地质、工程及环境相互作用而又相互依赖的统一体,进而应用控制论、系统论和信息论等的理论和方法达到系统控制的目的。目前,除强度控制理论、方法较为成熟外,在变形控制尤其是系统控制方面尚存在很多空白和不足,所以基坑工程的稳定性和变形控制成为基坑工程的难点,一般基坑的失稳形式是很多的,通常包括两类失稳问题^[1]:一类是基坑稳定破坏,包括基坑支护结构的倾覆破坏、基底隆起和整体失稳破坏等,由于这类失稳破坏主要表现为围护结构静力平衡条件的丧失,因而主要研究的是围护结构满足静力平衡条件的稳定性问题;另一类是基坑围护结构刚度不足引起的破坏,如支撑压曲或围护结构变形过大等,主要研究的是围护结构满足强度和刚度的要求,通常保证了基坑变形在允许范围的基坑工程基本不出现失稳问题。目前深基坑工程仍处于边实践边摸索阶段,尚缺乏成熟技术规范的指导,主要是用半理论半经验的方法解决问题,导致深基坑事故发生(约占20%),造成了严重的损失,从而制约了基坑工程的发展。因此,加强对深基坑计算理论及数值模拟方法的研究,提高深基坑工程实践指导的科学性尤为重要。

研究深基坑工程的土体力学性状、围护结构和土体的变形性状、渗流规律以及水、土及支护结构相互作用规律,科学地指导深基坑工程的设计、施工是推动深基坑理论与技术发展的关键。因此,深入研究围护结构和土体的变形规律(包括影响因素)、土的本构关系、渗流及渗流与应力耦合规律,合理模拟深基坑工程的基本过程并指导施工具有十分重要的理论意义和实用价值。

第2节 基坑工程的研究现状

基坑工程是一个古老而又具有时代特征的岩土工程课题,放坡开挖和简易木桩围护可以追溯到远古时代。人类频繁的土木工程活动促进了基坑工程的发展,特别是20世纪以来,随着高层、超高层建筑结构以及地下工程不断涌现,基坑工程作为一个重要的分支跻身于岩土工程领域,同时随着工程问题的越来越多,也越来越受到高度的重视。

最早提出基坑分析方法的是 Terzaghi 和 Peck 等人,他们在20世纪40年代提出预估挖方稳定程度和支撑荷载大小的总应力的方法,这一理论一直沿用至今,只不过有了许多改进与修正。50年代, Bjerrum 和 Eide 给出了分析基坑坑底隆起的方法。60年代开始,在挪威的奥斯陆和墨西哥的墨西哥城的软黏土深基坑中使用仪器进行监测,对提高预测的准确性起到了促进作用。从70年代起,产生了相应的指导开挖法规。基坑工程在我国进行广泛研究始于80年代初,高层建筑发展和地下工程的兴起,促进了深基坑的发展,随之产生了深基坑支护设计与施工问题。基坑开挖深度不断加大,促进了深基坑开挖技术的研究与发展,产生了许多先进的设计、计算方法,众多新的施工工艺不断付诸实施,出现了许多技术先进的成功工程实例。进入90年代后,为了总结我国深基坑支护设计和施工经验,开始编制全国性和地方性的行业规范。

基坑工程的主要研究内容,一般可分为基坑稳定性问题、围护结构和土体的变形问题以及环境问题。

第3节 基坑工程的分类

基坑工程的分类方法很多主要有以下几种:

(1) 按土方开挖方式分类,可以分为放坡开挖基坑和支护开

挖基坑两大类。其中,有支护基坑工程一般包括勘察、支护结构设计 and 施工、地基加固、土方开挖、降水工程、工程及环境监测等工作。

(2) 按支护结构分类,可以分为自立式支护结构和有撑锚的支护结构。

(3) 按支护墙体刚度分类,可以分为刚性和柔性两种。刚性支护在基坑开挖过程中变形很小(但位移可能并不小),如重力式水泥搅拌桩支护;柔性支护在基坑开挖过程中的变形较大,如地下连续墙支护和排桩支护等。

第 4 节 基坑开挖的主要特征

基坑开挖方法可以分为有支护开挖和无支护开挖两大类。目前,在城市建设中,由于受周边环境条件所限,以支护开挖为主要形式。支护开挖包括围护结构、支撑系统、土方开挖、地下水处理和变形控制等几个组成部分。

基坑开挖变形主要包括墙体变形、基坑底部土体的隆起及坑周地表土体和建筑物的沉降。研究表明,这三方面是相互关联的,这一结论也是很多计算的出发点。三部分中以支护结构和地表沉降对环境的影响最大,也是研究的重点。

4.1 墙体的变形

基坑开挖时,荷载不平衡导致围护墙体产生水平向变形和位移,从而改变基坑外围土体的原始应力状态并引起地层移动。由于基坑开挖时,围护墙内侧卸去原有的土压力,而基坑外侧受主动土压力,坑底墙体内侧受全部或部分被动土压力,不平衡土压力使墙体产生变形和位移。围护墙的变形和位移又使墙体主动土压力区和被动土压力区的土体发生位移,墙外侧主动土压力区的土体向坑内移动,使背后土体水平应力减小,剪力增大,出现塑性区;而在开挖面以下的被动区土体向坑内移动,使坑底土体水平向应力加大,导致坑底土体剪应力增大而发生水平向挤压和向

上隆起的位移。当基坑开挖较浅，尚未设支撑时，刚性墙体（如水泥土搅拌桩墙、悬喷桩墙等）表现为墙顶位移最大，向基坑方向水平位移，呈三角形分布形式，随着基坑开挖深度的增加，刚性墙体继续表现为向基坑内的三角形水平位移或平行刚体位移；而对一般柔性墙如果设支撑，则表现为墙顶位移不变或逐渐向基坑外移动，墙体腹部向坑内突出，墙体变形不仅使墙外侧土体移动引起地表沉降，而且使墙外塑性区扩大，因而增加了墙外土体向坑内的移动和相应的坑内隆起，墙体的变形是引起周围地层移动的重要原因。两种柔性支护基坑的基坑变形如图 1.1 所示。

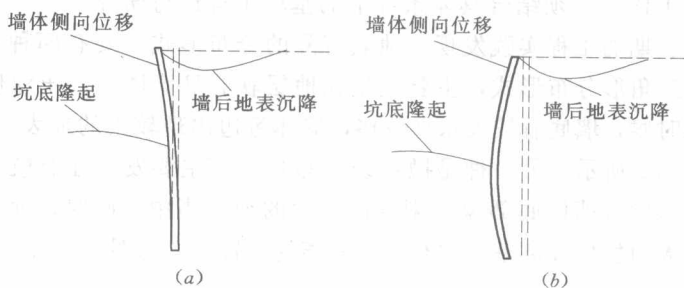


图 1.1 墙体水平变形
(a) 悬臂式；(b) 内支撑式

4.2 基坑底部的隆起

坑底土体隆起是坑底土体原有应力状态因垂直卸荷而改变的结果。在开挖深度不大，坑底土体在卸荷后发生垂直的弹性隆起，其特征为坑底中部隆起最高，这种隆起基本不会导致两侧围护墙体的侧向变形。当开挖达到一定深度且基坑较宽时，出现塑性隆起，隆起量也逐渐由中部最大转变为两边大中间小的分布形式，但对于较窄的基坑或长条形基坑仍是中间大两边小分布形式。

4.3 地表沉降

很多学者对基坑开挖引起的地表沉降曲线的形态作了大量的

研究,他们大多根据实测资料、模型实验或有限元计算等方法 and 手段提出地表沉降曲线的形式。如侯学渊提出的三角形沉降曲线和抛物线形沉降曲线^[2], Perk 教授提出的正态分布沉降曲线^[10], 还有指数分布曲线和根据上海地区实测提出的上海经验分布曲线等。Clough 认为基坑的地表沉降曲线的分布形式取决于沉降量的大小,沉降量小的时候为抛物线,沉降量大的时候为三角形^[2]。而对于实际的工程当中,可能因为地质条件、围护结构的种类、入土深度、支撑的刚度、施工的方法和降水等因素,地表沉降曲线的形状会有比较大的差异,所以对于研究地表沉降曲线这一工作,必须结合具体条件下的基坑工程进行研究。

长期的工程实践发现,地表沉降的分布形式主要有两种:一种是三角形分布形式,主要发生在地层软弱且墙体的入土深度不大的时候,墙底有较大水平位移,墙体旁边出现较大的地表沉降,如图 1.2 所示。另一种是抛物线分布形式,主要发生在有较大的入土深度或墙体底部深入刚度比较大的地层当中,此时,地表沉降最大值发生在离基坑边有一段距离的位置上,如图 1.3 所示。

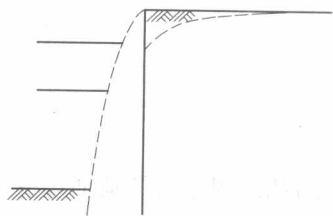


图 1.2 三角形沉降曲线图

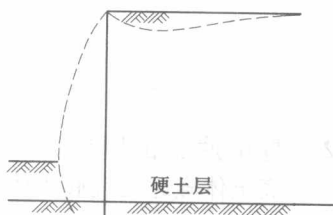


图 1.3 抛物线形沉降曲线

第 5 节 土压力计算理论

5.1 土压力的分类

土压力是土的自重或外部荷载作用在围护结构上的侧向压力。影响土压力分布和大小的主要是挡土结构的位移方向和位移