

国家自然科学基金面上项目 (No. 51174106)
沈阳市科学技术计划项目 (No. F13-165-9-00)

联合资助

深基坑开挖 及支护工程 理论与实践

张维正 郝 哲 肖明儒 © 著



人民交通出版社
China Communications Press

国家自然科学基金面上项目(No. 51174106) 联合资助
沈阳市科学技术计划项目(No. F13-165-9-00)

深基坑开挖及支护工程理论与实践

Shenjikeng Kaiwa ji Zhihu Gongcheng Lilun yu Shijian

张维正 郝 哲 肖明儒 著

 人民交通出版社
China Communications Press

内 容 简 介

本书在深基坑开挖及支护工程的理论、机理、模拟、勘察、设计、施工、预测等方面开展了研究工作。内容包括:绪论、深基坑变形机理及时空效应分析、深基坑工程实践、深基坑引发环境地质灾害问题及沉降预测研究、深基坑开挖过程之三维有限元分析、深基坑支护结构变形影响因素分析、深基坑开挖过程之 FLAC^{3D} 分析、深基坑帷幕止水对开挖稳定性影响研究、深基坑支护及降水方案优化研究等。

本书是作者近年来的研究成果和工程实践总结,可供土木、交通、力学、地质等行业的科技工作者及相关专业的高校师生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深基坑开挖及支护工程理论与实践/张维正,郝哲,肖明儒著. —北京:人民交通出版社,2014.3
ISBN 978-7-114-11252-2

I. ①深… II. ①张… ②郝… ③肖… III. ①深基坑—工程施工 ②深基坑支护 IV. ①TU473.2 ②TU46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 042266 号

书 名:深基坑开挖及支护工程理论与实践

著 者:张维正 郝 哲 肖明儒

责任编辑:赵瑞琴

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:12.25

字 数:300千

版 次:2014年3月 第1版

印 次:2014年3月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11252-2

定 价:38.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

深基坑开挖与支护是一个传统而又有时代特点的课题,同时又是一个综合性的岩土工程难题,包含土力学中典型的强度与稳定性问题,位移变形问题,土与支护结构相互作用问题以及环境岩土工程问题,体现很强的区域性和显著的个性,如果处理不好将给工程带来不可估量的损失。

深基坑工程量大、技术难度高、不可预见因素多,具有很强的经验性和实践性,这就要求我们对深基坑工程要有一个系统的认识,运用基本理论,结合工程经验,有的放矢处理好各个环节。目前,基坑分析仍沿用传统土压力理论和依赖经验对比,尚未形成完善统一的理论体系和计算方法。如何针对不同地质条件和深基坑的自身特点,开展深入的研究工作,运用科学的理论来指导设计和施工,保证其经济、有效、稳定,已成为建设工程的迫切要求。

本书正是针对当前深基坑开挖及支护工程中存在的问题,结合工程实践,在理论、机理、模拟、勘察、设计、施工、预测等诸方面开展全面研究工作,给予深基坑工程更高层次的科学指导。

全书体系如下:

绪论。对深基坑工程的历史发展进行回顾;对深基坑工程的内容、特点和支护类型等进行阐述;对深基坑开挖及支护、深基坑周边建筑物沉降预测、深基坑数值计算方法的研究现状进行综述;阐述本书的研究背景和研究内容。

深基坑变形机理及时空效应分析。阐述深基坑的变形特征;探讨深基坑的变形机理;制定建(构)筑物的变形控制标准;开展深基坑变形的时间和空间效应分析。

深基坑工程勘察、设计、施工和监测实践。以砂土地区的沈阳中铝大厦深基坑工程和软土地区的营口红运广场深基坑工程为例,对深基坑工程的勘察、设计、施工和监测过程进行阐述,为后续研究搭建现场平台。

深基坑引发环境地质灾害问题及沉降预测研究。剖析深基坑引发环境地质灾害的主要形式,地质灾害产生原因,不同基坑地质灾害特点、防治措施及对策等;建立深基坑周边沉降灾害预测的人工神经网络方法,对实测值和神经网络预测值进行比较分析。

深基坑开挖过程之三维有限元分析。利用 ADINA 软件,建立砂土地区深基坑开挖过程的三维有限元模型和求解方法,得出相应变形规律,并开展空间效应分析。

深基坑支护结构变形影响因素分析。开展深基坑支护结构变形影响因素的三维数值模拟分析;开展正交数值模拟实验,给出影响支护结构变形各因素的敏感性排序,得出其显著性规律。

深基坑开挖过程之 FLAC^{3D} 分析。采用 FLAC^{3D} 软件,对软土地区深基坑开挖全过程进

行三维模拟,给出开挖不同阶段的应力和变形状态;剖析模拟监测点的位移变化特征;对基坑稳定性进行评价。

深基坑帷幕止水对开挖过程影响研究。采用FLAC^{3D}软件,模拟软土深基坑止水、开挖及支护过程,得出基坑止水帷幕施工后的孔压和流速分布规律,给出坑周水平变形和沉降位移的分布特征,证实软土地区采用止水帷幕+双排桩+锚索方案的可行性和合理性。

深基坑支护及降水方案优化研究。建立深基坑支护方案优选的模糊综合评判系统,并针对沈阳东大国际中心深基坑工程,开展基于模糊评判的支护结构优化,提出合理支护设计方案;对沈阳地铁3个车站深基坑进行降水方案的技术经济比较分析,提出降水优化设计方案。

结束语。对全书研究工作进行总结和展望。

本书是作者近年来在深基坑领域的工程实践和研究成果总结。全书内容较为丰富,涉及深基坑工程的诸多相关领域;研究对象是从生产实践中提出来的课题,具有重要现实意义;所建立的研究思路和方法对类似深基坑工程具有较大参考价值。本书可供土木、建筑、力学、地质等系统的广大科技工作者及相关专业的高校师生参考。

在此,对在工作中给予笔者大量帮助的张向东教授、于永江副教授、侯永莉教授级高工、田亚光工程师等表示感谢。本书在写作过程中,参考了大量相关书籍和文献,引用了许多单位及个人的研究成果与工程总结,由于资料来源广、头绪众多,可能难以一一予以注明和核查,请有关作者给予谅解,并致以诚挚的谢意。

本书的完成和出版得到了国家自然科学基金面上项目(No. 51174106)、沈阳市科技计划项目(No. F13-165-9-00)的资助和支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,尤其书中内容多为作者自己的成果和观点,如有不妥之处,真诚期望同行专家及阅读本书的读者不吝赐教、提出宝贵的批评和建议。

著作者
2014. 2

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.2 深基坑工程概述	(1)
1.2.1 深基坑工程的历史发展	(1)
1.2.2 深基坑工程的内容	(2)
1.2.3 深基坑工程的特点	(3)
1.2.4 深基坑开挖及支护	(4)
1.3 深基坑工程研究综述	(5)
1.3.1 深基坑开挖及支护特性研究	(5)
1.3.2 深基坑周边土体变形及沉降预测研究	(6)
1.3.3 深基坑变形控制设计理念研究	(6)
1.3.4 深基坑数值计算方法研究	(7)
1.4 本书的研究内容	(10)
1.4.1 研究背景	(10)
1.4.2 研究内容	(10)
1.4.3 研究方法	(11)
1.4.4 研究意义	(11)
第2章 深基坑变形机理及时空效应分析	(12)
2.1 深基坑的变形现象	(12)
2.1.1 墙体变形	(12)
2.1.2 坑底土体隆起(回弹)	(12)
2.1.3 墙后地表沉降	(13)
2.2 基坑的变形机理	(13)
2.2.1 墙体变形	(13)
2.2.2 坑底土体隆起	(14)
2.2.3 墙后地表沉降	(14)
2.3 建(构)筑物变形的控制标准	(14)
2.4 基坑变形的时空效应分析	(15)
2.4.1 基坑变形的时间效应分析	(15)
2.4.2 基坑变形的空间效应分析	(16)
2.4.3 基坑变形的时空效应分析	(17)

2.5	小结	(20)
第 3 章	深基坑工程勘察、设计、施工和监测实践	(21)
3.1	沈阳中铝科技大厦砂土深基坑工程	(21)
3.1.1	基坑工程概况	(21)
3.1.2	基坑工程勘察	(21)
3.1.3	基坑工程设计	(24)
3.1.4	基坑工程施工	(33)
3.1.5	基坑工程监测	(34)
3.1.6	小结	(38)
3.2	营口红运广场软土深基坑工程	(39)
3.2.1	基坑工程概况	(39)
3.2.2	基坑工程勘察	(39)
3.2.3	基坑工程设计	(45)
3.2.4	基坑工程施工	(46)
3.2.5	基坑工程监测	(51)
3.2.6	小结	(53)
	附件 3-1 沈阳中铝科技大厦基坑工程施工图片	(54)
	附件 3-2 营口红运广场基坑工程施工图片	(59)
第 4 章	深基坑引发环境地质灾害问题及沉降预测研究	(61)
4.1	深基坑引发环境地质灾害问题研究	(61)
4.1.1	深基坑引发环境地质灾害主要形式	(61)
4.1.2	深基坑引发环境地质灾害的原因及特点	(64)
4.1.3	深基坑引发环境地质灾害的防治措施	(67)
4.1.4	深基坑引发环境地质灾害的防治对策	(68)
4.1.5	小结	(69)
4.2	深基坑周边建筑物沉降预测的人工神经网络方法	(70)
4.2.1	引言	(70)
4.2.2	人工神经网络的基本特征和结构	(70)
4.2.3	BP 神经网络	(72)
4.2.4	基于 BP 神经网络的建筑物沉降预测	(74)
4.2.5	小结	(78)
第 5 章	深基坑开挖过程之三维有限元分析	(79)
5.1	有限元法及 ADINA 软件介绍	(79)
5.1.1	有限元法在基坑工程中的应用	(79)
5.1.2	ADINA 软件介绍	(79)
5.2	基坑工程中的有限单元	(80)

5.2.1	杆单元	(80)
5.2.2	三维实体单元	(81)
5.3	材料及土体本构模型的选取	(81)
5.3.1	钢材本构关系	(81)
5.3.2	土体本构模型	(82)
5.3.3	接触单元	(83)
5.4	基坑工程有限元求解过程	(85)
5.4.1	基本步骤	(85)
5.4.2	初始地应力处理方法	(85)
5.4.3	基坑开挖过程的模拟	(86)
5.5	模型建立	(86)
5.5.1	几何模型	(86)
5.5.2	边界条件	(87)
5.5.3	材料参数选取	(88)
5.5.4	单元选择及划分	(88)
5.5.5	单元生死设置	(88)
5.6	后处理分析	(89)
5.6.1	支护结构变形对比	(89)
5.6.2	空间效应影响分析	(89)
5.7	小结	(91)
第 6 章	深基坑支护结构变形影响因素分析	(92)
6.1	引言	(92)
6.2	砂土地区深基坑支护结构变形影响因素的数值模拟分析	(92)
6.2.1	模型建立	(92)
6.2.2	土体参数变化对支护结构的影响	(94)
6.2.3	灌注桩几何性状对支护结构的影响	(100)
6.2.4	锚杆参数对支护结构的影响	(103)
6.2.5	小结	(111)
6.3	砂土地区深基坑支护结构变形影响因素的正交试验分析	(112)
6.3.1	正交分析法	(112)
6.3.2	深基坑支护变形正交试验	(115)
6.3.3	小结	(120)
第 7 章	深基坑开挖过程之 FLAC^{3D}分析	(121)
7.1	引言	(121)
7.2	有限差分法及 FLAC 软件介绍	(122)
7.2.1	有限差分法	(122)

7.2.2	FLAC 软件介绍	(122)
7.3	计算模型建立	(125)
7.3.1	现场基坑支护布置图	(125)
7.3.2	本构模型及参数选取	(126)
7.3.3	模拟开挖过程	(126)
7.3.4	开挖模拟步骤分析	(127)
7.3.5	模拟区域设定及网格剖分	(127)
7.4	程序模拟结果	(128)
7.4.1	不平衡力	(128)
7.4.2	应力分布	(129)
7.4.3	塑性区分布	(131)
7.4.4	位移分布	(132)
7.4.5	模拟监测及剖面分析	(136)
7.4.6	结构分析	(138)
7.5	计算结果分析	(139)
7.5.1	不平衡力分析	(139)
7.5.2	应力分布规律	(140)
7.5.3	位移分布规律	(141)
7.5.4	历史记录及剖面分析	(143)
7.5.5	支护结构分析	(144)
7.6	小结	(144)
第 8 章	深基坑帷幕止水对开挖过程影响研究	(145)
8.1	引言	(145)
8.2	基坑止水及支护计算模型	(145)
8.2.1	现场基坑止水措施	(145)
8.2.2	基坑渗流模型	(145)
8.2.3	岩土及结构模型	(147)
8.2.4	渗流及力学参数	(147)
8.2.5	模拟区域及边界条件	(147)
8.2.6	模拟网格剖分	(147)
8.3	程序模拟结果	(148)
8.3.1	不平衡力	(148)
8.3.2	渗流场分布	(148)
8.3.3	应力分布	(148)
8.3.4	塑性区分布	(148)
8.3.5	位移分布	(148)

8.3.6	模拟监测及剖面分析	(149)
8.4	计算结果分析	(153)
8.4.1	不平衡力分析	(153)
8.4.2	渗流分析	(153)
8.4.3	应力分析	(154)
8.4.4	位移分析	(154)
8.4.5	历史记录及剖面分析	(154)
8.5	小结	(155)
第9章	深基坑支护及降水方案优化研究	(157)
9.1	基于模糊综合评判法的深基坑支护方案优化研究	(157)
9.1.1	引言	(157)
9.1.2	深基坑支护方案优选的模糊综合评判法	(157)
9.1.3	深基坑支护优化的简化处理	(161)
9.1.4	工程实例	(162)
9.1.5	小结	(164)
9.2	基于技术经济对比的深基坑降水方案优化研究	(164)
9.2.1	引言	(164)
9.2.2	地铁深基坑降水方法分类	(164)
9.2.3	黄海路站降水方案	(165)
9.2.4	青年大街站降水方案	(168)
9.2.5	津桥路站降水方案	(170)
9.2.6	降水方案经济比较	(173)
9.2.7	深基坑降水方案对比优化	(175)
9.2.8	小结	(177)
第10章	结束语	(178)
参考文献	(180)

第1章 绪 论

1.1 基本概念

基坑:为进行建(构)筑物地下部分的施工,由地面向下开挖出的空间。

基坑工程:为保证基坑的开挖、主体地下结构的施工和周围环境的安全而采取的支护结构、降水和土方开挖与回填措施。

深基坑工程:开挖深度超过5m(含5m)的基坑土方开挖、支护、降水工程;开挖深度虽未超过5m,但地质条件、周围环境和地下管线复杂,或影响毗邻建筑(构筑)物安全的基坑土方开挖、支护、降水工程。

深基坑支护:为保证地下结构施工及基坑周边环境的安全,对深基坑侧壁及周边环境采用的支挡、加固与保护的措施。

1.2 深基坑工程概述

1.2.1 深基坑工程的历史发展

深基坑工程是基础工程和地下工程中的一个古老的传统课题。最早的放坡开挖和简易木桩围护可以追溯到远古时代。人类的土木工程活动促进了基坑工程的发展。1943年, Terzaghi 和 Peck 提出了预估挖方稳定程度和支撑荷载大小的总应力法;1956年, Bjerrun 和 Eide 给出了分析深基坑底板隆起的方法;20世纪60年代开始,在奥斯陆和墨西哥城软黏土深基坑中使用了仪器进行监测。随着大量高层、超高层建筑以及地下工程等的不断涌现,基坑的开挖深度和面积在逐渐加大,基坑围护与开挖技术的复杂程度也在不断提高,促使工程技术人员以新的眼光去审视基坑工程这一古老课题,使许多新理论和新技术得以出现和成熟。

深基坑工程在我国起步较晚,20世纪70年代以前的基坑深度较小,国内只有少数开挖深度达10m以上基坑工程;进入80年代,随着北京、深圳、上海、广州、天津等城市的大规模建设,高层、超高层建筑和市政设施及地铁的建设,基坑开挖深度不断地增大,复杂程度也不断提高,并积累了很多的设计和施工经验。进入90年代,许多地区已经开始编制深基坑支护设计与施工的有关技术规范 and 法规。近20年来,我国万幢高楼拔地而起(10层以上的建筑物已逾1亿平方米),其中高度逾百米者已有约200座。上海金茂大厦高达420m,深圳地王大厦高达325m,广州中天大厦高达322m,它们已跻身于世界百座超级巨厦之列;一些大城市,如北京、上海、广州、武汉、重庆、沈阳地铁工程相继全面展开;各大中城市大型市政地下设施也屡见不鲜。因此,深基坑工程的深度随之迅速增加,目前深度超过20m基坑已为数不少,一些工业基坑深度甚至超过30m。

众所周知,基坑工程是实用性、经验性极强的学科。近年来的工程实践既有大量成功的经验,也有失败的教训,更有一系列有待进一步解决的问题。目前,我国基坑越来越深,环保要求

更加严格,这就需要工程技术人员以更加严谨的科学态度,在工程实践中不断总结、创新,提高技术水平,为我国基坑工程技术的发展作出贡献^[1]。

深基坑的类型主要包括以下几种:

1) 高层、超高层建筑深基坑

我国已建和在建高层、超高层建筑的基坑深度,已由 6~8m 发展到 20m 以上,如:福州新世纪大厦基坑达 24m,天津津塔挖深 23.5m,苏州东方之门最大挖深 22m。基坑的平面尺寸也越来越大,如上海仲盛广场基坑开挖面积为 5 万 m²,天津市 117 大厦基坑面积为 9.6 万 m²,上海虹桥综合交通枢纽工程开挖面积达 35 万 m² 等。

2) 地铁站深基坑

北京、上海、广州、天津、青岛、南京、沈阳等均有地铁在建,这些地铁沿线地下车站百余座多采用明挖法施工。如:广州地铁 2 号线海珠广场站基坑最大深度达 26.4m,上海地铁四号线董家渡修复基坑则深达 41m。上海徐家汇地铁车站为亚洲最大地铁车站,开挖宽 23m,长 660m。

3) 市政工程地下设施深基坑

近几年来各地兴建了许多大型市政地下设施,例如:上海人民广场地下车库和商场,建筑面积 5 万 m²;上海合流污水治理工程彭约浦泵站是目前世界最大的污水治理泵站,基坑深达 26.45m;哈尔滨奋斗路地下街长 300m,宽 16m;屹立在黄浦江畔的亚洲第一电视塔“东方明珠”,基坑深 12.5m,基底面积约为 2700m²;石家庄站前地下商场建筑面积 4 万平方米;北京王府井大型三层地下商业街长 780m,宽 40m 与地铁四个车站及东安商场、东方广场的地下室分别相通。

4) 工业深基坑

我国目前已有不少的规模较大的工业深基坑,例如:宝钢热扎厂铁皮坑深 32m,上海世博 500kV 地下变电站挖深 34m,浦东耀华皮尔金顿浮法玻璃溶窑坑,亚洲最高烟囱北仑港电厂 240m 的高烟囱深基坑等等。

这些深大基坑通常都位于密集城市中心,常常紧邻建筑物、交通干道、地铁隧道及地下管线等,施工场地紧张、施工条件复杂、工期紧迫。这导致深基坑工程的设计和施工难度越来越大,重大恶性基坑事故不断发生,工程建设的安全形势越来越严峻。

1.2.2 深基坑工程的内容

深基坑工程的内容包括:基坑工程勘察;支护结构的设计和施工;基坑土方的开挖和运输;控制地下水位;基坑土方开挖过程中的工程监测和环境保护等。深基坑工程是涉及土力学、基础工程、结构力学、工程结构、施工技术、监测技术等多学科的新兴学科,其理论性和实践性都很强。

深基坑的开挖工艺有两种:放坡开挖(无支护开挖)和在支护体系保护下开挖(有支护开挖)。前者简单且经济,在空旷地区或周围环境允许时能保证边坡稳定的条件下应优先选用。但事实上,在城市中心地带、建筑物稠密地区很难具备放坡开挖的条件。因为放坡开挖需要基坑平面以外有足够的空间供放坡之用。如在此空间内存在临近建(构)筑物基础、地下管线、运输道路等,都不允许放坡,此时就只能采用在支护结构保护下进行垂直开挖的施工方法。对支护结构的要求,一方面是创造条件便于基坑土方的开挖,但在建(构)

筑物稠密地区更重要的是保护周围的环境。采用支护结构,开挖基坑的费用要提高,一般情况下工期亦要延长。但在一定条件下支护结构是必须的,因此对支护结构应进行精心地设计和施工。

对地下水位较高的软土地区,支护结构一般都要求降水或挡水,在开挖基坑土方过程中坑外的地下水一般不会进入坑内。但基坑土方本身有较高的含水率,在软土地区往往呈饱和状态,在该类地区的深基坑工程一般都在坑内采取帷幕止水措施,以便基坑土方开挖和有利于保护环境。

本书研究的深基坑工程实例,都是采用在支护结构保护下的垂直开挖方法;支护方式以排桩+锚索的桩锚支护结构为主;控制地下水位措施有管井降水和帷幕止水。

1.2.3 深基坑工程的特点

深基坑工程具有许多特征,概括起来有以下几点:

(1)深基坑支护工程是临时工程,设计的安全储备相对可以小些。但又与地区性有关,不同区域地质条件其支护特点也不相同。

(2)深基坑工程是岩土工程、结构工程以及施工技术相互交叉的学科;是多种复杂因素交互影响的系统工程;是理论上待发展的综合性学科。

(3)深基坑工程造价高、工程量大,是各施工单位争夺的重点;又由于技术复杂、涉及范围广、影响因素多、事故频繁,是建筑工程中最具有挑战性的技术上的难点;同时也是降低工程造价,确保工程质量的重点。

(4)深基坑工程正向大深度、大面积方向发展,有的长度和宽度均超过百米,深度超过20余米,工程规模日益增大。

(5)地质埋藏条件和水文地质条件的复杂性、不均匀性,往往造成勘察所得的数据离散性很大,难以代表土层的总体情况并且精确度较低,给基坑支护工程的设计和施工增加了难度。

(6)在软土、高水位及其他复杂场地条件下开挖基坑,很容易产生土体滑移、基坑失稳、桩体移位、坑底隆起、支挡结构严重漏水、流土以致破损等病害,对周边建筑物、地下构筑物及管线的安全造成很大威胁。

(7)工程实践证明,要做好基坑工程必须关注整个开挖支护的全过程,它包括勘察、设计、施工和监测工作等整个系统,因而强调要精心做好每个环节的工作。

(8)随着旧城改造的推进,各城市的主要高层、超高层建筑大都集中在建筑密度大、人口密集、交通拥挤的狭小场地中,对基坑稳定和位移控制要求严格。

(9)深基坑工程包含挡土、支护、防水、降水、挖土等许多紧密联系的环节,其中的某一环节失效将会导致整个工程的失败。

(10)相邻场地的基坑施工,如打桩、降水、挖土等各项施工环节都会产生相互影响与制约,增加事故诱发因素。

(11)深基坑工程设计中应包括支护体系选型,围护结构的强度、变形计算,场内外土体稳定性、降水、挖土、监测等内容。应注意避免“工况”和计算内容可能出现的“漏项”,从而导致基坑失稳。

(12)深基坑施工过程中,尤其在软土地区施工时,应该认真研究并合理安排好挖土的方法以及支撑与挖土的配合,将会显著的减少基坑变形和支护事故的发生。

(13)深基坑支护工程由于是临时性工程,一般不愿投入较多资金,可是一旦出现事故处理十分困难,造成的经济损失和社会影响往往十分严重。

(14)深基坑支护工程施工周期长,从开挖到完成地面以下的全部隐蔽工程常需经历多次降雨、周边堆载、振动、施工失当等不利条件,其安全度的随机性较大,事故的发生往往具有突发性。

1.2.4 深基坑开挖及支护

1) 深基坑开挖

深基坑工程是基坑开挖、支护结构施工以及地下水控制的系统工程,基坑开挖对周边环境的影响、甚至基坑工程的安全都非常重要。同样类型的基坑,采用相同的设计方法和支护结构,由于土方开挖的方法、顺序不同,支护结构的位移和对环境影响的程度存在较大差异。“及时支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”,是大量深基坑工程设计与施工的实践经验总结,也是深基坑开挖应遵循的基本原则。在大面积深基坑工程中,基坑开挖过程的时空效应十分明显。土方开挖方式应结合基坑规模、开挖深度、平面形状以及支护设计方案综合确定^[31]。

深基坑应分层进行土方开挖,分层位置应结合支护体系的特点,如多级放坡的分级位置、锚杆、土钉、内支撑或结构梁板的高程位置等确定,必要时还可在以上分层的基础上进一步细分。对于平面面积较大的基坑工程,土方开挖应分段、分块进行。

土方分块时应考虑主体结构分缝、后浇带位置、现场施工组织等因素,土方分块开挖宜间隔、对称进行,开挖到位的区块应及时进行支撑(锚杆)施工或形成垫层,减少基坑周边支护结构的无支撑暴露长度。

按照分块开挖的顺序不同,深基坑开挖的方式可分为:分段(块)退挖、岛式开挖和盆式开挖等几种,现场应根据支护布置形式确定合理的开挖方式。基坑开挖方式的不同对周边环境的影响也有所不同,岛式开挖更有利于控制基坑开挖过程中的中部土体的隆起变形,盆式开挖则能够利用周边的被动区留土在一定程度上减少支护结构的侧向变形。

土方开挖产生的渣土应及时外运出场至指定地点,不应在基坑开挖过程中在基坑周边留存大面积的填土堆载。确需进行坑外堆土时,应经过复核并对相应的支护体系进行加强后方可实施。土方开挖后,应及时跟进支撑或垫层的施工,控制无支撑暴露时间,有利于控制支护结构的变形和基坑内部的隆起变形,减少对周边环境的影响。

2) 深基坑支护

深基坑支护结构的传统方法是板桩支撑系统或板桩锚拉系统。经过多年的探索与工程实践,目前我国基坑工程所采用的支护结构形式多样,按受力性能大致可分为五大类,即:悬臂式支护结构、重力式支护结构、锚喷(网)支护结构、单(多)支点混合支护结构及拱式支护结构,如图 1-1 所示。

其中,桩锚支护作为单(多)支点桩排组合支护结构形式之一,在辽宁省的沈阳、鞍山、大连等地区被广泛使用。

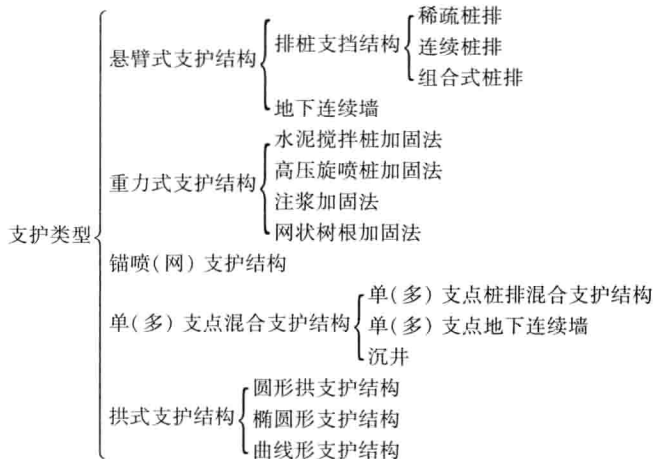


图 1-1 基坑支护结构类型

3) 深基坑地下水控制

地下水控制与深基坑工程的安全以及周边环境的保护都密切相关。在地下水位较高的地区,基坑降水(降压)配合排水是为了满足基坑工程安全和方便现场施工的需要,隔水是处于对环境保护的考虑,这些都直接关系到基坑工程的成败。因此地下水控制是基坑工程的设计和施工必须要考虑的重要问题。

地下水控制主要有以下三种处理方式:降水、排水和隔水^[31]。其中,降水是深基坑开挖过程中最为常见的地下水处理方式,目的在于降低地下水位、增加边坡稳定性、给基坑开挖创造便利条件;当基坑开挖到基底高程时,承压含水层覆土的重力不足以抵抗承压水头的顶托力时,需要降压以防止坑底突涌。降水系统的有效工作需要通畅的排水系统,但除了将坑内抽降的地下水及时排出外,排水系统还包括地表明水、开挖期间的大气降水等的及时排除。为避免降、排水造成地面沉降,影响周边建筑物、市政管线的正常使用,需要设置隔水(止水)帷幕,切断基坑内外的水力联系和补给,既避免坑外的水位下降,也能够有效减少坑内降水的水量。这三种地下水处理方式,作用不同,在基坑工程中常常需要组合使用,才能保护地下水处理的合理、可行、有效。

1.3 深基坑工程研究综述

1.3.1 深基坑开挖及支护特性研究

由于不同地质条件的影响,难以对深基坑开挖进行通用性的研究,需要因地制宜选取最优方案。深基坑开挖的研究涉及了许多方面的问题,一般可分为基坑本身的稳定性、应力应变问题、基坑支护结构的变形问题、基坑周围土体的位移及其对邻近建筑物和地下管线的影响等。对这些问题现今主要的研究方法有:工程经验总结、现场及室内试验研究、数值模拟计算等。

近几十年,国内外学者进行了大量基坑开挖性状的研究工作,并已取得了相当丰富的成果。Terzaghi 和 Peck 等人早在 20 世纪 40 年代就提出了预估挖方稳定程序和支撑荷载大小的总应力法;Bjenum 和 Eide 在 20 世纪 50 年代给出了分析深基坑底板隆起的方法;20 世纪 60 年代开始在奥斯陆和墨西哥城软黏土深基坑中使用仪器进行监测;20 世纪 70 年代产生了相

应的指导开挖的法规。从 20 世纪 80 年代初开始,我国逐步进入深基坑设计与施工领域。20 世纪 90 年代以后,我国编制了多部国家行业标准及地方的相关法规,国内许多专家也提出新的理论和方法。秦四清提出支护结构优化设计理论;杨光华提出多锚撑设计增量计算法;刘建航院士提出软土深基坑开挖的时空效应理论^[7];廖瑛采用结构可靠度理论研究基坑支护结构的稳定可靠度问题,通过 JC 法计算实例的稳定可靠指标,得出了在多元失稳模式下基坑支护结构失稳的概率界限范围^[8];周东等提出了基于搜索的基坑支护协同优化设计分析模型,给出了与方案、细部和子细部优化相对应的数学模型,并讨论了总系统优化与各子系统优化即全局寻优与局部寻优的关系,得出“必须求解能全面反映各子系统间各种耦合关系的总系统才能得到基坑支护系统的全局最优解”的结论^[9];吴恒等将协同演化思想应用于基坑桩锚支护优化设计中,成功开发了深基坑桩锚支护优化设计系统,协同演化方法提供了模拟空间不断变化的演化机制,是一种高效的优化算法,适合于深基坑支护这一复杂系统的优化^[10];孙海涛、吴限提出了深基坑变形预报的人工神经网络法,详细介绍了该方法的建模和应用实例,预报结果与实测值较为吻合,从而表明在深基坑工程中利用该方法进行变形预报是可行的^[11];王元湘对上海、北京的四个地铁车站的监测结果进行分析,提出挡土结构在基坑开挖和回筑过程中发生的复杂反应与场地条件、挡土结构的刚度、施工方法、工程措施以及施工管理等关系密切^[12]。

1.3.2 深基坑周边土体变形及沉降预测研究

在当前城市建设中,深基坑开挖已不是传统的只要保证坑壁稳定以满足地下建造的简单问题。深基坑开挖需要保证相邻建筑、城市排水管道、电缆、煤气管道的安全以及附近交通的正常运行等。实际上,深基坑开挖在小区域内是一项环境工程,因此对于基坑周围土体变形的监测与周边建筑物沉降的控制就成为一个不容忽视的问题。

建筑物的沉降预测即利用已有的沉降监测数据来预测后期沉降情况,无疑更加重要且更具实际意义。沉降预测的方法可分为理论计算法和基于实测数据的实测数据分析法^[13]。

实测数据分析法不管沉降的作用机理如何复杂,其效果均通过沉降量表现出来。利用现场监测数据,通过建立数据模型可较好地预测后续开挖建筑物的沉降。在沉降预测控制技术中,实测数据分析法主要是采用各种非线性方法对现场观测结果进行预测。例如,对于建筑物沉降问题,人工神经网络预测方法可充分考虑各因素影响,随着训练数据数的增加而提高求解精度,适用于已积累大量基坑工程实测资料的地区建立预测模型,对实际工程有一定的指导意义^{[14][15]}。

1.3.3 深基坑变形控制设计理念研究

按照龚晓南教授的观点^[4],目前基坑工程的设计方法有两种:

(1) 基坑工程稳定控制设计。当基坑周围空旷允许基坑周围土体产生较大变形时,基坑围护体系满足稳定性要求即可。

(2) 基坑工程变形控制设计。当基坑紧邻市政道路、管线、周围建构物,不允许基坑周围地基土体产生较大的变形时,基坑围护设计应按变形控制设计。它不仅要求基坑围护体系满足稳定性要求,还要求基坑围护体系的变形小于某一控制值。按变形控制设计不是愈小愈好,也不易统一规定。对此,现有规范、规程、手册及设计软件均未能从理论高度加以区分。

在我国,最早提出基坑工程按变形控制设计理念的,见于1996年8月侯学渊、杨敏主编的《软土地基变形控制设计理论和工程实践》^[6]。所谓变形控制设计是指在充分了解周边环境的前提下,综合考虑基坑深度、地质条件(含地下水条件)和环境条件、气象条件、场地红线条件的基础上,对基坑支护结构及可能影响的周边环境进行变形验(估)算,在支护结构体满足强度及稳定的前提下,控制位移在环境允许的范围内,合理确定其变形控制量,并进行支护方案的选择和优化,选择合理的变形控制技术(措施)。在方案实施过程中实行动态设计,以确保基坑变形对周围道路、地下管线、建(构筑物)不会产生不良影响,不会影响其正常使用为目的。这一设计理念就叫基坑工程变形控制设计。

做好基坑工程的变形控制设计,应包括以下内容^[44]:

- (1)明确周边环境(建、构筑物、道路、地下管线)的位移变形量(包括变形速率)。
- (2)做好基坑工程的概念设计,对支护方案进行比选,在正确选型基础上对支护结构进行优化设计(如对支护桩嵌固深度、刚度的调整 拉锚采用扩大头锚杆调整位置、调整预应力以控制变形等)。
- (3)对支护结构和保护对象进行变形预测分析和估算,必要时调整、补充或优化设计。
- (4)选择合理的止水帷幕,并控制施工质量,防止基坑发生大的涌砂事故,以控制基坑变形。
- (5)设计合理的土方开挖方案以控制基坑的不正常变形。
- (6)科学、全面监测、分析,随施工过程及反馈信息及时调整设计方案,实行动态设计,当变形过大时及时采取工程措施。
- (7)有效的变形控制技术及应急措施。

本书的各部分研究工作均体现出变形控制设计的理念。

1.3.4 深基坑数值计算方法研究

1)深基坑支护计算方法

基坑支护设计计算方法大致可为三类^[54]。第一类是常规设计方法;第二类称为弹性抗力法;第三类是数值计算方法。

常规设计方法是最常用的方法,其要点是在选择一定的支护入土深度以满足整体稳定、抗隆起和抗渗要求的前提下用经典土力学理论计算主动土压力和被动土压力(或对计算的土压力作某些经验修正),然后对重力式刚性挡墙验算其抗倾覆、抗滑移稳定性,安全系数沿用设计规范中对普通挡土墙的规定;或者计算柔性挡墙(悬臂式或有支锚结构)的内力,对墙身和支锚结构进行设计。这种方法对于普通挡土墙或开挖深度不深的钢板桩是比较成熟的。但对深基坑,特别是软土中的深基坑支护结构设计就难以考虑更为复杂的条件和难以分析支护结构的整体性状。例如支护结构与周围环境的相互影响,墙体变形对侧压力的影响,支锚结构设置过程中墙体结构内力和位移的变化,内侧坑底土加固或坑内、外降水对支护结构内力和位移的影响,压顶圈梁的作用与设计,复合式结构的受力分析等等。这些问题有时却成为控制支护结构性状的主要因素。

弹性抗力法针对常规方法中挡墙内侧被动土压力计算中的问题提出了改进。其概念是由于挡墙位移有控制要求,内侧不可能达到完全的被动状态,实际上仍处在弹性抗力阶段,因此,引用承受水平荷载桩的横向抗力的概念,将外侧主动土压力作为施加在墙体上的水平荷载,用