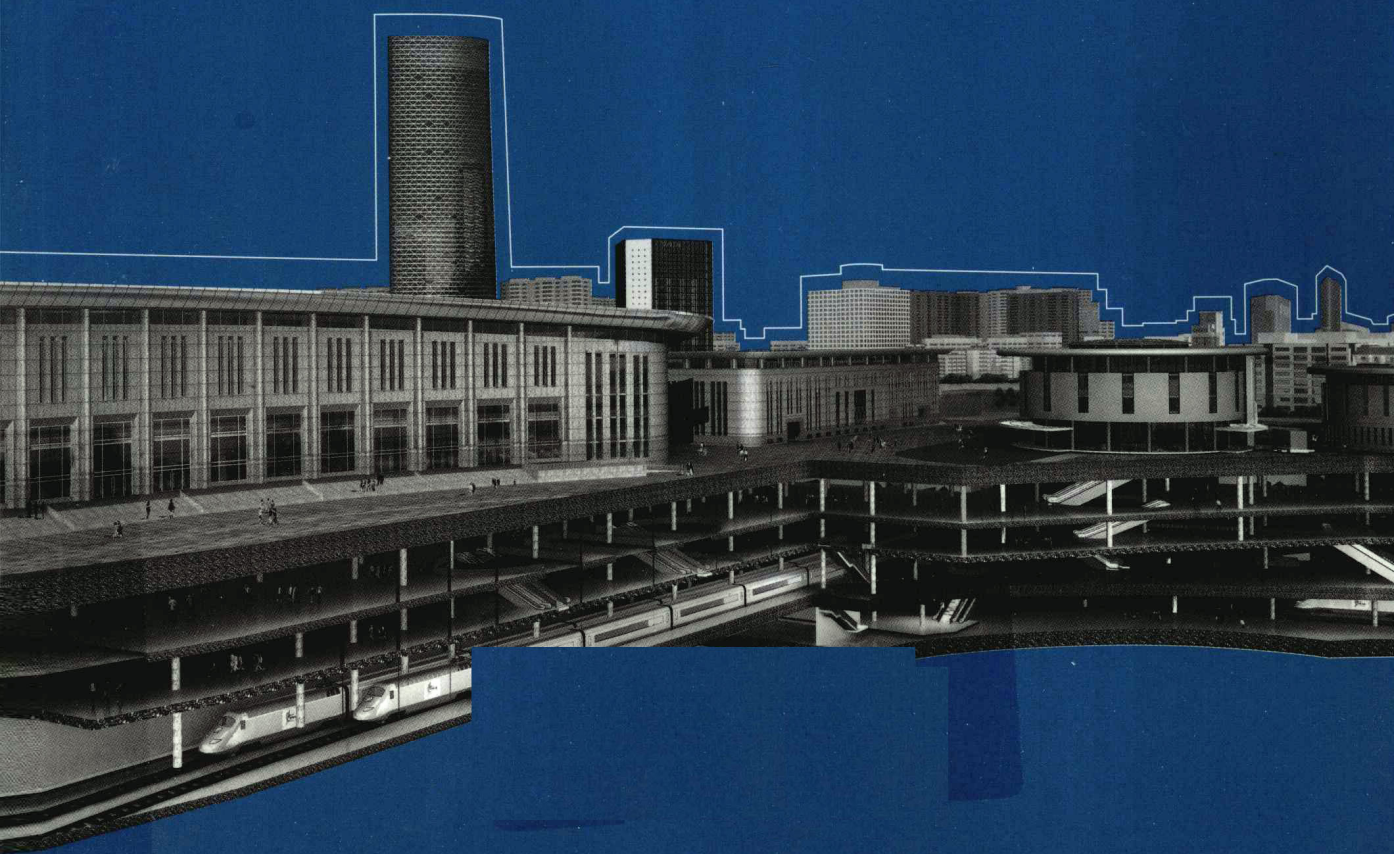


深基坑工程 设计理论及工程应用

郑 刚 · 焦 莹 编著
顾晓鲁 主审



中国建筑工业出版社

深基坑工程设计理论及工程应用

郑 刚 焦 莹 编著
顾晓鲁 主审

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深基坑工程设计理论及工程应用/郑刚, 焦莹编著.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-112-12647-7

I. ①深… II. ①郑… ②焦… III. ①深基础-结构设计②深基础-工程施工 IV. ①TU473.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 226928 号

本书重点对国内外的深基坑稳定与变形研究成果进行了分析与总结。全书共分 7 章, 其中包括深基坑工程的土力学问题, 深基坑工程在围护结构施工、降水过程中产生的坑底隆起、基坑稳定问题以及土方开挖各阶段的变形预测与控制问题分析与讨论, 深基坑工程监测与信息化施工等内容。

本书适合岩土工程设计施工、监理人员使用, 也可供相关专业的科研、教学人员参考使用。

* * *

责任编辑: 王 梅 咸大庆

责任设计: 赵明霞

责任校对: 张艳侠 赵 颖

深基坑工程设计理论及工程应用

郑 刚 焦 莹 编著

顾晓鲁 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 27 $\frac{3}{4}$ 字数: 692 千字

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月第一次印刷

定价: 66.00 元

ISBN 978-7-112-12647-7

(19926)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

随着我国城市人口密度的不断增加和城市建设的发展,合理地开发与利用地下空间是城市可持续发展的要求。我国各大城市都正在兴建或准备兴建地铁,地铁建设已经成为城市建设和经济发展的重要部分,并且高层建筑与超高层建筑、地下商场、地下铁道、地下仓库、地下民防工程等都在大量建设,这些都可能涉及深基坑工程。深基坑工程的突出特点是,其设计与施工除需保证深基坑工程自身的技术合理与安全外,还需控制其施工对环境的影响。由于我国深基坑工程发展的历史不长,在理论研究、设计方法、施工经验、施工管理、监测手段等各方面均显得不足。可以说,理论研究落后于工程实践,而工程经验本身不能满足基坑深度、规模、难度的快速发展而带来的挑战,加之管理水平、施工队伍人员的技术水平的限制,我国近年来出现了一些基坑工程事故,也出现了相当多的深基坑工程施工对环境造成有害影响的工程事例。因此,从根本上加强深基坑工程相关理论的研究,不断改进与完善设计方法,改进现有施工工法与发展新的工法,改进与发展施工监测技术从而提高信息化施工水平等是提高基坑工程整体水平的关键。

本书主要从深基坑工程的关键理论、设计方法出发,介绍了国内外深基坑工程的相关理论与设计方法的发展,重点介绍了深基坑工程施工引起的变形、变形的工程效应及环境效应、变形控制的理论与方法,以及深基坑工程稳定分析与控制方法。本书共7章,其中第一章为绪论,从总体上把我国深基坑工程的发展情况进行了简要回顾,对深基坑工程发展的特点及趋势进行了分析。第二章深基坑开挖中的土力学问题,介绍了国内外及作者对深基坑开挖设计的若干土力学的关键问题的研究成果。第三章深基坑开挖引起土层变形分析与控制,对国内外深基坑开挖引起的土层变形及对邻近建筑物等的影响与控制进行了介绍。第四章深基坑工程开挖坑底隆起及其工程效应,针对深开挖引起的坑底隆起及其工程效应,介绍了国内外及作者的研究成果。第五章深基坑工程的稳定分析,针对深基坑涉及的各种稳定问题,介绍了各种稳定分析方法及其作者针对一些稳定分析方法进行的改进。第六章深基坑工程降水理论与工程应用,介绍了我国一些典型城市的地下水分布特点及对深基坑工程设计施工的影响,然后介绍深基坑工程中地下水控制的研究成果。第七章深基坑工程监测介绍了深基坑工程施工过程中的常用监测手段与方法,并结合典型工程实例进行了分析。

本书由郑刚、焦莹编著,顾晓鲁主审。雷华阳、鲍立楠、李竹、杨建民、刘畅、李治国、李明、马召林、李志伟、程雪松、刁钰、李帅、张立明、邓旭、刘庆晨、魏少伟、路平、武继虎、张雪莲等参加了本书编写工作。

本书介绍了深基坑工程设计理论、方法及工程应用的最新发展,适合深基坑工程科研、设计、监测的技术人员使用。

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 深基坑工程的土力学问题	14
2.1 深基坑工程土体强度指标	14
2.2 深开挖卸荷过程中土体的应力状态和应力路径的模拟分析	24
2.3 深基坑工程土体各向异性及其影响	34
2.4 深基坑工程分层降水开挖诱发的土体超固结问题	43
2.5 考虑超深基坑开挖土体超固结的本构模型	53
2.6 超深基坑的土压力与变形的问题	57
2.7 考虑温度影响的土压力与支护结构内力变形分析	63
参考文献	77
第 3 章 深基坑工程开挖引起土层变形分析与控制	80
3.1 概述	80
3.2 基坑围护结构的位移	81
3.3 坑外土体的位移	89
3.4 基坑变形的影响因素	100
3.5 围护结构变形的计算	109
3.6 坑外土体位移的预测	114
3.7 基坑变形的时空效应	128
3.8 非对称基坑工程实例	136
3.9 基坑开挖对周边建筑物的影响	141
3.10 基坑变形的控制措施	170
参考文献	177
第 4 章 深基坑工程开挖坑底隆起变形及其工程效应	183
4.1 深基坑开挖引起的坑底隆起变形特点	183
4.2 深开挖坑底隆起变形分析	184
4.3 考虑深基坑分层降水与开挖对坑底隆起影响的分析	194
4.4 深开挖坑底卸荷及隆起变形的工程效应	197
4.5 深开挖卸荷及坑底隆起对坑内工程桩的影响	198
4.6 深开挖坑底隆起对邻近地下隧道的影响	224
4.7 深开挖坑底隆起变形的工程实例	243
参考文献	273
第 5 章 深基坑工程的稳定分析	277
5.1 深基坑的稳定破坏特点	277

5.2	深基坑稳定分析中土的强度指标	292
5.3	深基坑的稳定分析方法	305
5.4	基坑坑内被动区加固条件下的稳定分析	347
5.5	特殊形状基坑的稳定问题	358
	参考文献	361
第 6 章	深基坑工程降水理论与工程应用	365
6.1	我国主要城市工程地质条件及水文地质条件	365
6.2	深基坑工程承压水风险分析	374
6.3	基坑工程降水基本理论	380
6.4	基坑降水引起的土层变形分析	393
6.5	深基坑降水工程抽水试验与反演分析	397
	参考文献	403
第 7 章	深基坑工程监测	406
7.1	深基坑监测的特点	406
7.2	深基坑支护结构内力监测	408
7.3	深基坑变形监测	417
7.4	深基坑远程监控及信息化施工	428
	参考文献	436

第 1 章 绪 论

国际土木工程界有一个共识,即 19 世纪是高层建筑的世纪,20 世纪是桥梁建设的世纪,而 21 世纪则是地下空间开发的世纪。其中高层建筑(特别是超高层建筑)、地下空间的建設均不可避免地涉及深开挖。大量的工程实践和基于工程实践基础上的理论研究,在深基坑支护结构设计、基坑变形分析、基坑稳定分析、地下水分析与控制,以及深基坑开挖与降水产生的环境影响分析与控制方面逐渐形成系统的理论与方法,并逐渐形成了基坑工程学这一岩土工程学科的分支。

自 20 世纪 90 年代以来,特别是进入 21 世纪以来,进行了大规模的高层建筑、桥梁及地下空间的建設,在这一背景下,我国岩土工程进入了一个快速发展的时期。国家自然科学基金委工程与材料学部于 2004 年 12 月 25~27 日在北京召开了岩土工程学科发展战略研究的专题会,与会专家认为,结合学科发展的特点以及我国重大工程建設的需求,环境岩土工程、地下工程、土动力学与地震工程、特殊土工程等四个研究方向是我国建設事业发展过程中城市化进程、西部大开发、重大基础设施建设和可持续发展的重大技术需求,也是推动岩土工程学科发展的主要科学问题。

由于我国城市人口密度的不断加大和城市建設的需要,合理地开发与利用地下空间变得更加迫切。目前,我国各大城市都正在兴建或准备兴建地铁,地铁建設已经成为城市建設和发展的重要部分,并且各类地下商场、地下铁道、地下仓库、地下民防工程等都在大量建設。但是,我国开展深基坑的研究历史较短,到 20 世纪 80 年代末,深基坑工程方面的理论研究才逐渐引起重视,直至 1998 年我国才召开第一次专门的全国性深基坑工程学术会议。可以说,理论研究明显落后于工程实践,而工程经验本身不能满足基坑深度、规模、难度的快速发展而带来的挑战,加之管理水平、施工队伍人员的技术水平的限制,我国近年来出现了较多的基坑工程事故。

纵观我国基坑工程的发展,具有如下特点:

1. 基坑开挖深度与难度正在经历跨越式发展,理论与研究工程经验面临深基坑工程发展的挑战

随着我国工程建设的快速发展和城市地下空间开发逐渐向深部地下空间推进,我国基坑工程的发展目前呈现两个代表性的特点:

(1) 基坑开挖深度快速加大,深基坑与超深基坑成为理论与研究工程实践的主题

我国改革开放至今不过 30 余年,而基坑工程大发展主要自 20 世纪 90 年代开始,至今不过 20 余年。80 年代末期,由于高层建筑不多,地铁建設也很少,涉及的基坑深度大多在 10m 以内。自 90 年代初期,高层建筑逐渐增多,90 年代中期后,以北京、上海、深圳、广州等为代表的城市,高层建筑如雨后春笋般大量开始建設,以地铁为代表的地下工程也已开始规模建設,基坑开挖最大深度逐渐接近 20m,少量超过 20m。90 年代末期以来,基坑开挖最大深度迅速增大至 30~40m,其中上海世博地下变电站基坑开挖深度接近

34m, 上海地铁4号线修复工程深基坑开挖深度接近41m。以天津为例, 进入21世纪以前, 基坑开挖深度很少有超过10m, 但进入21世纪以来, 短短不到10年的时间里, 每年都有数百个深基坑工程, 基坑开挖深度由10m以内迅速发展到超过30m, 例如2006年开始建设的最大开挖深度33.5m的天津站交通枢纽工程, 正在建设的天津地铁2、3号线有大量深基坑开挖深度在20~30m。在本书中, 笔者将深度小于10m的基坑称为浅基坑, 深度10~20m称为深基坑, 深度大于20m的则称为超深基坑, 表1-1、表1-2是中国以及国际上一些代表性超深基坑工程实例。由于深基坑和超深基坑的设计、施工难度大, 风险高, 因此, 深基坑与超深基坑已成为基坑工程理论与实践的主题, 特别是超深基坑涉及的有关土力学问题。

中国深基坑工程案例

表 1-1

编号	工程名称	开挖深度 (m)	软土 厚度 (m)	围护结构形式	围护结构深度 (m)	支撑情况	开挖面积 (10 ⁴ m ²)
1	天津高银 Metropolis 中央商务区 (117 大厦)	19.4 (靠山楼)	0	外围 $\phi 900$ 灌注桩, 内围 0.8m 地下连续墙	27.2 (地下连续墙)	多道内支撑	13.8
		36	0	正在设计	—	正在设计	—
2	天津津塔	19.6~25.5	—	1.0m 地下连续墙	43.2	4 道混凝土 支撑	2.0
3	天津塘沽某工程	20.6~23.1	8	$\phi 1250@1450$ 灌注桩	35.4	4 道混凝土 支撑	2.3
4	天津滨海新区于家堡 交通枢纽	29.5	2~5	1.2m 地下连续墙	60	7 道混凝土 支撑	
5	天津站交通枢纽工程	25~33.5	—	1.2m 地下连续墙	45~55	盖挖逆作法	5.0
6	上海世博 500kV 地下 变电站	33.6	11	1.2m 地下连续墙	57.5	逆作法	$\phi 130m$
7	上海中心基坑	31.3	—	1.2m 地下连续墙	50	6 道混凝土 支撑	$\phi 121m$
8	上海地铁 4 号线董家 渡基坑	38.0~40.9	—	1.2m 地下连续墙	65	8 道钢支撑	
9	上海环球金融中心	18.35	—	1m 地下连续墙	34~36	3 道环梁, 无支撑	$\phi 100m$
10	台北 101 大厦	21.6	—	1.2m 地下连续墙	45	6 道混凝土 支撑	0.85
11	高雄捷运大港埔车站 基坑	27	—	1.8m 地下连续墙	60	—	$\phi 140m$
12	台湾 Cathay	21	12	地下连续墙	—	多道内支撑	—
13	台湾 FarEast	20	24	地下连续墙	—	逆作法	—
14	香港 Charter Station	26	14	地下连续墙	—	逆作法	—
15	香港某基坑	28	—	Soldier Piles	—	逆作法	—

续表

编号	工程名称	开挖深度 (m)	软土 厚度 (m)	围护结构形式	围护结 构深度 (m)	支撑情况	开挖面积 (10 ⁴ m ²)
16	香港理工大学酒店与 旅游管理学院基坑	25	5	外径 640mm、厚度 12mm、间距 800mm 钢管桩	31	6 道钢 支撑	0.33
17	香港 Dragon Centre	27	—	地下连续墙	32.5	逆作法	—
18	香港 Hong Kong Station	23	—	地下连续墙	37	逆作法	—
19	香港 Sheung Wan Cross- over	32	—	地下连续墙	23	多道内支撑	—
20	南京紫峰大厦	23.5	—	0.8m 地下连续墙	31.2	3 道混凝土 支撑	—
21	上海廖创金融中心	22.4	14	1.0m 地下连续墙	35	6 道支撑	—
22	上海某污水外排过江 管工程顶管基坑	33.7	21.5	0.8m 地下连续墙	48	逆作内衬墙	φ5.6m
23	上海宝钢股份宽厚板 轧机旋流池	32.1	15.0	1.0m 地下连续墙	51	逆作内衬墙	φ24.6m
24	上海人民广场地下变 电站	23.2	14.6	1.2m 地下连续墙	38.2	逆作内衬墙	φ62.4m
25	上海宝钢 1780 热轧项 目旋流池	31	9.7	1.0m 地下连续墙	53	逆作内衬墙	φ30m
26	上海金茂大厦主楼	19.7	13.9	1.0m 地下连续墙	36	4 道混凝土 支撑	—
27	上海复兴东路隧道浦 东岸工作井	21.5	—	0.8m 地下连续墙	35	4 道混凝土 支撑+1 道钢 支撑	—
28	上海外环隧道浦西 基坑	30.4	9.6	1.2m 地下连续墙	44	5 道混凝土 支撑+1 道钢 支撑	—
29	上海 R2 线人民公园站 东端头井	22.1	—	0.8m 地下连续墙	40	6 道角撑	—
30	上海外环观光隧道浦 西竖井(端)	24.5	7.9	1.0m 地下连续墙	42	3 道混凝土 支撑+5 道钢 支撑	—
31	上海外环观光隧道浦 西竖井(标)	20.5	7.9	1.0m 地下连续墙	36	3 道混凝土 支撑+4 道钢 支撑	—

续表

编号	工程名称	开挖深度 (m)	软土 厚度 (m)	围护结构形式	围护结 构深度 (m)	支撑情况	开挖面积 (10 ⁴ m ²)
32	上海复兴东路隧道浦 西岸边段	19.8	—	1.0m 地下连续墙	33	7 道钢 支撑	—
33	上海明珠二期张扬路 站标准段	20.8	10.3	1.0m 地下连续墙	35	2 道混凝土 支撑+5 道钢 支撑	—
34	上海明珠二期西藏南 路站	23	—	1.0m 地下连续墙	38	6 道钢 支撑	—
35	上海交大海洋深水试 验池	39	13.4	1.0m 地下连续墙	47	无内撑	φ8.2m
36	太原亲贤北街梅园中 心停车库基坑	18.8~21.4	—	0.8m 地下连续墙	30	4 道水平 支撑周边 逆作	—
37	天津于家堡金融服务 区起步区 B3 地铁车站 基坑	23.1	6~12	φ1300@1500 灌注桩	38.7	4 道钢筋 混凝土	—
				φ850 三轴止水帷幕	45	水平支撑	
38	天津西站交通枢纽地 铁 4 号线西站	26.5	—	1.0m 地下连续墙	43	4 道钢筋 混凝土 水平支撑	—
39	天津滨海新区俊安 大厦	19.7	14	1.1m 直径灌注桩	31	3 道钢筋 混凝土 内支撑	2.0
40	上海彭越浦泵站	26.5	13.5	0.8m 地下连续墙	37.5	逆作内衬墙	φ60m
41	温州鹿城广场	28.6m (局部 30.4m)	>20	1.2m 地下连续墙	—	4 道 (局部 5 道) 水平支撑	—
42	武汉王家墩商务区宗 地 11、地块项目	16.9	1.3	排桩+止水帷幕	—	3 道 钢筋混凝土 支撑	2.3
43	深圳东海商务中心	20.0	—	φ1200 人工挖孔桩	30.0	6 道预 应力锚索	基坑周长 870m
44	北京第五广场	24	—	上部土钉、下部桩锚 φ800@1500 灌注桩	17.7	上部 7 排土钉 下部 4 道锚杆	1.15

国际深基坑工程案例

表 1-2

编号	工程名称	开挖深度 (m)	软土层 厚度 (m)	围护结构形式	EI (kN/m ⁴)	支撑类型	支撑竖向 间距 (m)
1	Bermondseve	19.5	0	地下连续墙	2500000	多道内支撑	6
2	Humber Bridge	24.5	—	地下连续墙	1280000	多道内支撑	4.92
3	Seattle	23.8	—	板桩	63500	多道内支撑	2.64
4	Pion. Square, Seattle	21.9	0	灌注桩	1126000	多道内支撑	5.5
5	Washington	25	—	板桩	63500	多道内支撑	6.25
6	Singapore CE II	21.5	—	灌注桩	100000	多道内支撑	4
7	Mass. Rotterdam	21	0	板桩	1717900	单道内支撑	17
8	Hannover	21.9	—	灌注桩	1134000	多道内支撑	6.6
9	Duisburg	23	—	排桩	4320000	多道内支撑	4.8
10	Han River, Seoul	25	13.5	切割桩	60640	多道内支撑	2.78
11	Colomb. Seattle	37	0	灌注桩	763400	多道锚杆	1.75
12	Seattle	23	0	排桩	718690	多道锚杆	1.5
13	Calais	24	4.5	地下连续墙	5881600	多道锚杆	8
14	Duisburg	20	—	排桩	1280000	多道锚杆	2.9
15	British Library	24.4	3	灌注桩	2571750	逆作法	5
16	Aldersgate	23	8	地下连续墙	2500000	逆作法	3.3
17	PO Square Boston	23.4	4	地下连续墙	1822500	逆作法	3.3
18	75 StateSt. Boston	19.8	3	地下连续墙	1106125	逆作法	3.36
19	Wien	24	—	排桩	1280000	逆作法	6.3
20	Singapore River	29	20	地下连续墙	1280000	多道锚杆	3.3
21	Singapore interchange	20	15	灌注桩	1338750	多道锚杆	4
22	Nieuw Mass	19.5	19.5	地下连续墙	4320000	多道内支撑	6
23	Sheung Wan HK	30	19	地下连续墙	4320000	多道内支撑	2.73
24	Sewage Tr. Tokyo	26	30	钢管桩	8000000	多道内支撑	4.3
25	Osaka A	20.6	25	地下连续墙	2500000	多道内支撑	3
26	新加坡地铁循 环线 C824 标段	33	约 30m	0.8m 厚地 下连续墙	—	10 道钢支撑	3m 左右

注：以上所选工程均为开挖深度 20m 以上和接近 20m 的基坑，“—”表示暂时查找不到数据。

相比较于浅基坑或一般的深基坑工程，超深基坑工程是一个更为复杂的系统工程，影响超深基坑工程工作特性的因素更多，其危险系数更大，发生事故时的危害程度也更大。因此，如何从加强诸如土压力确定、变形分析与控制、稳定分析与控制等关键问题的研究，提高深基坑工程的理论与实践水平，就成了岩土工作者必须要解决的难题。

(2) 已由单个基坑的施工发展到基坑群的施工，基坑群的理论、设计与施工远比单个

基坑复杂

目前我国区域性和城市交通发展表明,大型城市交通枢纽的建设可实现城市之间的区域快速轨道交通、城市轨道交通及其他公共交通有机的衔接配合。因此,北京、天津、上海、重庆等均开展或规划了大型交通枢纽的建设。例如天津市正在进行天津站交通枢纽、天津西站交通枢纽、天津滨海新区于家堡交通枢纽等的建设,其中天津站交通枢纽工程是京津城际轨道(高速铁路)、天津地铁2、3、9号线、津秦客运专线、天津地下直径线以及原天津站普速铁路的超大型换乘枢纽,地下工程总面积19万 m^2 。三角形超深基坑边长分别约500m、530m和220m,占地面积约5万 m^2 。地下工程为整体地下三层,部分地下四层结构,地下三层结构底板埋深25~28m,地下四层结构底板埋深32.5m,局部开挖深度最大达33.5m。上海虹桥综合交通枢纽工程,是包括航空、城际铁路、高速铁路、轨道交通、长途客运、市内公交等多种换乘方式于一体的综合交通客运站。交通枢纽包括4个新的综合社区以及一个新的容纳国内航班的机场航站楼、10条磁悬浮列车的站台、30条城际及高速列车的站台、一个能容5条线路的地铁站以及一个新的城际巴士总站。其中地下空间的总面积达到了20余万 m^2 ,是继天津站交通枢纽工程之后,又一个软土地区一体化开发规模最大的地下空间工程。

此外,我国各大城市也都在建设和筹建城市中央商务区,出现了城市中央商务区的建设,例如天津于家堡国际金融区,在狭小的地区内规划了数十幢高度达200~300m的超高层建筑,还有多条地铁贯穿其间,并形成于家堡大型地下交通枢纽,多个开挖深度达10~30m的基坑在平面上和深度上形成交叉。因此,大面积深基坑群的支护、降水及土方开挖对基坑群支护体系的受力与变形的影响,以及大面积基坑群的降水对区域性地层沉降的影响均是深基坑理论与工程实践的新课题。

2. 主要在城市建筑物、道路及地下设施密集区域进行,后发“劣”势问题突出

随着改革开放以来积累财富的增长,我国大、中城市均进行了一轮大规模的旧城改造与建设。随着城市人口的增加、规模的扩大,可持续发展的问题日益突出,而地下空间的开发适应了这一趋势。然而,这也使我国以城市地下工程、超高层建筑等涉及的深基坑开挖,也主要是在城市建筑物、道路及地下设施密集的区域进行。因此,存在着场地狭小、环境条件限制严格等问题、一旦出现事故则影响大、后果严重。因此,我国深基坑工程的建设与发展面临着滞后于城市建设而带来的后发“劣”势。

3. 开挖深度大、环境要求严格,深基坑工程进入了变形控制设计的时代

早期的基坑工程主要以放坡和悬臂支护为主,即使需要设置水平支撑或锚杆,也多是由于减小结构内力、保证稳定的要求,降水也多采用坑内外同时降水。而现在的深基坑工程,由于主要是在城市建筑物、道路及地下设施密集的区域进行。基坑工程的施工过程是与环境高度耦合的过程。在这耦合过程中,基坑工程在围护结构施工、施工降水、土方开挖、支撑拆除等过程中,周围地层原始平衡状态被打破,造成地层损失,引起地表沉降、路面开裂、建筑物倾斜、既有地铁和铁路线路轨道差异沉降、管线折裂等风险。

北京、天津、上海等地的地铁沿线附近已有数处深基坑和高层建筑紧靠地铁隧道,英国等地铁发达国家也都出现了类似的情况。在已建成的区间隧道、车站及其附属设施的两侧进行加载或卸载的建筑施工活动,必将影响地铁隧道的移动。如上海人民广场站至新闻路站间的新世界商厦,其地下室深基坑13m,深基坑与隧道净距仅3m。而且,在隧道两

侧及其顶部还将建造高楼,如不采取可靠措施,必将影响隧道结构及线路安全,危及地铁正常服役。为此上海市在地铁一号线通车以前,上海市就提前开始研究邻近地铁的建筑物基坑或桩基施工对地铁影响的预测与治理问题。通过大量的研究工作,并根据上海市政府(93)37号令批准的《上海市地铁管理办法》,制定了《上海地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》,提出地铁保护技术标准,对地铁沿线深基坑、桩基及其他可能对地铁造成影响的建(构)筑物施工的影响及保护措施作了规定。在日本,已将近距离条件下地下结构施工定义为“邻近施工影响问题”,并给予了高度重视,并由日本铁道综合技术研究所于1996年编制了《接近既有隧道施工指南》。

对基坑工程变形控制的要求越来越严格给基坑变形预测与控制的理论与方法研究带来了重大挑战。基坑方案的优劣也主要取决于是否能够成功将基坑开挖引起的变形控制在允许的范围内。因此,可以说,我国基坑工程已进入变形控制设计的时代。

变形控制贯穿基坑工程的全部环节,包括设计、围护结构施工、降水、土方开挖等环节,其中变形可发生在围护结构施工、降水、土方开挖等施工阶段,如表1-4所示。在较大的深基坑工程中,这些阶段还可能发生时间与空间上的交叉。因此,变形控制既涉及理论计算与预测,又很大程度上依赖于施工过程中的控制。深基坑工程变形控制设计涉及变形控制标准、变形预测理论、变形控制理论、变形控制方法等方面。

(1) 变形控制标准

基坑工程施工中的环境保护,关键是要建立建造过程中对环境影响的控制标准。基坑工程建设对周围环境的影响可用其造成周围地层位移及影响范围内的建(构)筑物、道路、管线、相邻城市地下工程的位移及由此引起的附加应力来衡量。对环境的保护,以及确保地下工程建造工程中的安全,都需要首先确立地层和结构(包括拟建地下工程结构本身及相邻的其他既有结构)变形、变位的控制标准。

国际上基坑工程及隧道施工的变形控制主要是根据实际工程和试验,将基坑开挖对环境造成的变形影响反映为其在坑外土层中引起的沉降、不均匀沉降、水平应变和角应变(地面沉降曲率),以及在建筑物中造成的拉应变,并与感官视觉、建筑物功能损坏、建筑物结构损坏等相联系。例如 Burland (1995) 和 Boscardin 等(1989)通过观察由隧道开挖所引起结构的沉降值,对框架结构的极限拉应变进行了修正,并将框架结构的极限应变与房屋结构破坏等级对应(见表1-3),或将建筑物的角变量与建筑物的损坏程度对应。表1-3列出了房屋结构的变形(拉应变)与房屋结构潜在的破坏关系。

损坏分级与极限拉应变的关系

表 1-3

损害分级	严重程度	极限拉应变(%)
0	可忽略	0~0.05
1	很轻微	0.05~0.075
2	轻 微	0.075~0.15
3	中 等	0.15~0.3
4~5	严重~很严重	>0.3

国外基坑变形控制标准主要是基于基坑工程施工影响范围内的建筑物或其他设施的变形或应变控制标准,我国现有的研究及规范主要还是基于控制围护结构的变形,并提出基坑围护结构(排桩、地下连续墙等)的最大水平位移控制标准来保证对环境影响的控制。目前我国尚没有完整的建筑物保护等级的划分标准,现有的一些基坑工程和城市地下工程施工引起的地面沉降允许值往往由专家们根据经验规定的。例如,北京地铁施工规定地面

基坑施工全过程可产生的变形

表 1-4

产生阶段	产生原因	产生机理	变形形式及危害	治理措施
支护 结构 施工	水泥搅拌桩止水帷幕施工	注水、注浆搅拌导致土体失去强度 软土中因注浆及搅拌在周围土中产生超净孔隙水压力	地表下沉; 邻近建筑物沉降; 软土地表隆起和侧移; 影响邻近管线或荷载小的结构(如围墙)上抬	搅拌桩与建筑物之间设置隔离排桩 减小施工速度、减少注水量
	地下连续墙成槽	槽段内泥浆不能补偿槽段开挖前槽壁应力	地表下沉; 邻近建筑物沉降; 邻近管线变形;	与建筑物之间设置隔离排桩或隔离墙,减小槽段长度、膨润土泥浆护壁
	大直径、密排灌注桩成孔	孔内泥浆不能补偿钻孔前孔壁应力	邻近地下隧道变形; 邻近建筑物、桥梁桩基位移、产生附加弯矩	桩实行跳打、设置隔离排桩或隔离墙,膨润土泥浆护壁
	锚杆施工	塌孔 高水位砂、粉土中锚杆钻孔过程中水土流失	地表下沉; 邻近建筑物沉降;邻近管线变形	锚杆施工时采取防止水、砂流失措施; 采用其他内支撑形式
基坑 降水	基坑开挖前的坑内降水	降水导致降水深度范围内土体有效应力增加;在墙产生水平位移前墙两侧降水产生压力差,产生水平向固结	桩、墙产生水平位移(产生影响与“基坑开挖”中“桩、墙水平位移”产生的影响相同)	先设置水平支撑; 分段(分仓)降水; 分层降水
	基坑疏干降水	止水帷幕未进入隔水层,导致坑外地下水位下降 地下水产生自坑外向坑内的渗流,坑外竖向	地表下沉; 邻近建筑物沉降; 邻近地下隧道变形; 管线变形曲率过大; 邻近建筑物、桥梁桩基位移、产生附加弯矩	止水帷幕进入隔水层; 坑外回灌
	基坑开挖开始后抽降承压水	承压含水层水头下降,有效应力增加 弱透水层失水固结 相邻含水层产生越流,水头下降,有效应力增加		截断承压含水层; 减少抽水量; 缩短工期; 减少承压水头下降,承压含水层回灌
	桩、墙水平位移	坑内开挖卸荷,造成坑内外压力差; 支撑安装不及时; 土方开挖方案不合理; 坑外荷载过大; 水平支撑因温差膨胀、收缩	地表下沉; 邻近建筑物沉降; 邻近地下隧道变形; 邻近管线变形; 邻近建筑物、桥梁桩基位移、产生附加弯矩	合理选择桩、墙及支撑刚度; 合理选择桩、墙刚度; 及时设置支撑; 合理的开挖方案; 控制坑外荷载
基坑 开挖		基坑两侧因开挖深度、坑外荷载、土质条件、土方开挖、坑外注浆等原因造成不对称,一侧发生向另一侧的位移	同上	进行考虑不对称的基坑整体计算; 采取减小不对称所产生的变形的控制措施

续表

产生阶段	产生原因	产生机理	变形形式及危害	治理措施
基坑开挖	坑底隆起	坑底地基土承载力不足； 桩、墙插入深度小； 被动区支挡结构物向基坑前移(踢脚)； 坑底开挖卸载土体回弹； 地下水自坑外向坑内渗流； 坑底下承压水的扬压力	桩墙附加水平位移(引起的环境影响同土)； 水平支撑的支撑柱向上位移； 桩、墙向上位移； 逆作法(盖挖逆作法)施工时中间柱、墙出现差异变形并产生附加内力； 工程桩中产生拉应力,严重时工程桩断裂； 降低坑底工程桩竖向承载力与竖向刚度	增大桩、墙插入深度； 被动区土体加固； 坑内隆起变形大的区域设置减小隆起的桩； 分块开挖土方、分块施工基础底板； 缩短基坑暴露时间； 减小地下水渗流的水力梯度； 降低承压水水头
	地面静荷载	堆土、堆料引起附加土压力		控制地表荷载大小、距离
	坑外动荷载	扰动土体,降低土体强度产生超净孔隙水压力		控制动荷载大小、距离； 设计阶段考虑动荷载影响
	止水帷幕渗漏	水土流失		提高止水帷幕质量； 及时封堵渗漏点
基坑使用阶段	坑外注浆(堵漏、建筑物下注浆纠倾、抬升)	作用在墙体上土压力加大	桩墙附加水平位移(产生影响与“基坑开挖”中“桩、墙水平位移”产生的影响相同)	控制注浆压力； 增加坑内支撑； 选择合理的注浆介入时间
	土体固结	开挖阶段产生的负孔压消散,土体有效应力减小	坑底隆起变形增加 桩、墙水平位移增大 稳定安全系数减小	分块开挖土方、分块施工基础底板； 缩短基坑暴露时间
	土体流变	土体蠕变 应力松弛	桩、墙变形持续增加 导致主、被动区土体对墙体作用力重分布	减小基坑工作时间； 坑底土体加固； 分块开挖土方、分块施工基础底板
	温度变化	温差导致水平支撑膨胀或收缩	温度升高导致支撑轴力增加、墙体向外位移并导致土压力增加；反之则墙体向坑内位移	设计阶段予以考虑； 对钢支撑进行覆盖； 必要时对钢支撑进行浇水降温等措施
		墙后土体冬季冻结	增加墙后土压力、墙体向坑内位移	设计阶段予以考虑
	在达到拆除支撑条件前,提前拆除支撑	提前拆除支撑后产生附加变形； 没有按设计要求进行换撑	产生影响与“基坑开挖”中“桩、墙水平位移”产生的影响相同	按设计要求拆除支撑； 按设计要求换撑
地下水位恢复	地下室外墙与桩、墙之间回填土不密实	回填土不密实产生压缩		回填土按要求压实； 在地下室楼地板高处设置素混凝土传力带
	承压水水头恢复	对承压水上覆隔水层产生扬压力导致地下室底板产生上浮	采用盖挖拟作法时引起中间柱上浮	设计抗浮桩时加以考虑

任意点的下沉量均不得超过 30mm；深圳地铁施工规定地面任意点的下沉量均不得超过 30~40mm，地面附加倾斜不得超过 1/300；上海地铁总公司则按上海软土层深基坑工程经验资料，根据周围环境要求，提出深基坑工程的变形控制标准分为 4 个保护等级。

总体上，目前我国在基坑施工引起的支护结构变形与建筑物及地下管线设施等的破坏之间关系的理论研究较少，对土层水平变形对建筑物的影响、基坑底部隆起对围护结构及坑外建筑物变形的影响也没有给予重视。因此，针对我国基坑工程特点，加强深基坑工程支护结构自身变形，相邻建筑物、地下隧道、管线等的变形控制指标以及控制标准研究，成为深基坑变形控制设计的关键。

(2) 深基坑的变形预测与控制理论

与传统的深度较小的基坑支护变形分析不同，从支护结构而言，深基坑与超深基坑的支护结构更趋于柔性支护范畴，其变形主要表现为弯曲变形，而不是像大多数刚性挡墙所具有的平移或倾斜。变形分析目前采用的主要方法有经验预测方法及数值分析方法。数值分析方法又极大程度地依赖于合理的参数选择、准确的参数获取、能够较好描述土变形的本构模型以及施工过程的合理模拟，参数及本构模型本身又涉及土的取样扰动、土样的制备、参数的试验方法、土的非线性、各向异性、应力路径、小应变等复杂问题。施工过程中的变形也涉及围护结构施工工艺、降水方法、土方开挖方案等。可以说，无论是数值分析方法涉及的参数、本构模型，还是施工涉及的围护结构施工工艺、降水方法、土方开挖方案，都是制约深基坑变形分析与控制的重大、复杂难题。

就像深基础的沉降计算与浅基础的沉降计算不同一样（前者需考虑回弹再压缩、后者则简化为考虑地基在附加应力作用下的压缩），深基坑、超深基坑的变形远比一般浅基坑的变形复杂。工程技术人员在计算支挡结构的变形时，常常采用弹性抗力法等方法，这些方法仅考虑了水平向土压力引起的支护结构的水平向受力和变形。当基坑开挖深度不大时，这样也许不会产生很大的误差。但对超深基坑来说，特别是在软土地区深度达 20~40m 的超深基坑，除因基坑开挖导致的挡土结构（桩、墙）两侧压差造成挡土结构水平位移以及坑外地表的沉降、土层的深层位移外，基坑底的隆起量往往很可观，因土方开挖而引起的坑底竖向回弹变形可达数厘米至十余厘米，并可引起较大的挡土结构的水平位移、水平支撑结构的上浮、坑外地表的沉降及邻近建筑物的变形。坑底隆起的工程效应（包括对围护结构的内力与变形、坑外地面沉降、邻近建筑物、道路及地下管线设置以及坑内工程桩的影响）不能随意忽略，有时必须采取措施加以控制。基坑开挖深度很大还会带来坑内降水造成的支挡结构位移，基坑开挖过程中的非对称开挖也会造成支挡结构的非对称变形。

深基坑的开挖导致基坑底土体隆起主要由以下四个方面构成：

①由于土体开挖，由开挖面以上土产生的自重应力被全部或部分释放，致使基底土产生卸荷回弹。由于地下连续墙、排桩等对土体回弹的约束，在基坑角边处隆起量为最小，基坑中央的隆起量为最大，坑底隆起呈反扣锅底形。

②基坑开挖后，支挡结构向基坑内侧变位，被动区土体类似三轴拉伸状态，由此产生被动区土体的三轴拉伸剪切变形，造成基底的隆起。基底隆起最大点不在基坑最边缘也是因为地下连续墙、排桩等对土体伸长变形的约束。地下连续墙或排桩的抗弯刚度越小、入土深度越小；水平支撑距坑底的距离越大等均会增大因被动区土体因剪切变形而引起的基

坑底隆起变形。

③地下水绕地下连续墙在坑内产生自下而上的渗流,当水力梯度较大时,可导致在渗流影响区域的土体作用较大的动水力,从而产生隆起变形。由于此部分渗流力主要作用在坑内邻近地下连续墙的土体。当坑内外水头差越大、自坑外向坑内的渗流路径越小时,因渗流导致的隆起变形越大。

④有承压水存在时,在隔水层以上的上覆土重因基坑开挖而减少,从而导致隔水层及隔水层以上土体因承压水的浮托力作用而产生隆起。

对于一定开挖深度的基坑,基坑底实际产生的隆起量大小还与以下因素有关:

①开挖影响深度范围内土质条件。当土质软弱时,产生的卸荷回弹、拉伸剪切隆起及变形越大。

②坑底被动区加固等措施也可减小被动区的隆起变形。

③坑底有工程桩时,可减小以上四种因素引起的坑底隆起变形。

④基坑开挖前的坑内降水,或者深基坑分步开挖过程中的分步降水,可对坑底以下土体产生压密作用,增大坑底以下土体的超固结比,从而也可减小坑底隆起变形。

⑤对于以黏性土为主的基坑,基坑底部的隆起量与基坑开挖后搁置时间的长短有关。基坑开挖后应尽量减少基坑搁置时间。

此外,超深基坑往往涉及承压水的控制问题,在土质软弱地区,当对承压水含水层不能实施封闭抽水时,也会引起大范围的地面沉降。

(3) 变形控制方法

此外,对超深基坑来说,基坑的变形不仅仅是由挡土结构(桩、墙)的水平位移引起,当基坑影响深度范围内土质较为软弱时,基坑底的隆起(回弹与塑性隆起)及由此引起的坑外地表沉降、土层深层位移也很可观,因此,变形的控制除围护结构自身水平位移的控制,还涉及对基坑隆起的控制对超深基坑涉及承压水的控制问题时,在土质软弱地区,还需制定当对承压水含水层不能实施封闭抽水时引起的大范围的地面沉降的控制措施。

因此,变形的控制涉及合理的支护结构方案、围护结构施工工艺、地下水控制策略与工艺、土方开挖方案等。施工过程中的变形控制又依赖于先进的现场量测技术。因此,变形的控制本身就是一个系统工程。

(4) 变形控制是一个动态的系统工程

由于基坑工程的变形可能发生在围护结构施工、降水、土方开挖、土方回填、拆除支撑等环节,基坑工程的施工往往又是分区域、分阶段(围护结构施工、降水、土方开挖各阶段)、分步骤(每个阶段又可能分为若干步骤)动态施工,包括分区域制定基坑支护方案,分区域、分层降水,分区域、分层开挖,分区域、分层回填等,不同区域在施工时的各阶段、各步骤之间又可相互交叉、相互影响,故而基坑变形控制标准、变形预测、变形监测、变形控制本身也受基坑的分区域、分步骤施工的影响而互相影响、互相制约,因此,基坑的变形控制是一个动态的过程,是一个复杂的系统工程。

4. 超深基坑开挖涉及的土力学问题更加复杂

超深基坑工程的特点和突出的土力学问题体现在:

(1) 作用在围护结构上的水土压力非常大,可达到 300~500kPa;