



高层建筑施工

(第二版)

主 编 刘俊岩
副主编 张 铭 刘 燕
主 审 赵志缙 李继业



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

高层建筑施工

(第二版)

主 编 刘俊岩

副主编 张 铭 刘 燕

主 审 赵志缙 李继业



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍高层建筑施工的一般规律、工程问题及关键施工技术。书中内容除着重介绍国内外高层建筑施工中成熟的技术外,还力求反映近年来我国在高层建筑施工中的新技术和创新发展。为了更好地培养学生解决工程实践问题的能力,全书在介绍基本概念和基本理论的同时,还补充了重大工程施工实例的分析,以及对新规范的理解和应用等内容。

本书共分5章,内容包括绪论、高层建筑基坑工程施工、大体积混凝土施工、高层建筑结构施工以及高层建筑施工实例。

本书可以作为高等院校土木工程专业及相关专业的教材使用,也可供土建类专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑施工 / 刘俊岩主编. -- 2版. -- 上海: 同济大学出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-5608-5399-4

I. ①高… II. ①刘… III. ①高层建筑—工程施工—高等学校—教材 IV. ①TU974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 321629 号

高层建筑施工(第二版)

刘俊岩 主编 张 铭 刘 燕 副主编 赵志缙 李继业 主审

责任编辑 高晓辉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏句容排印厂

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 20.25

印 数 1—3 100

字 数 505 000

版 次 2014 年 1 月第 2 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5399-4



定 价 39.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

进入 21 世纪以来,我国高层、超高层建筑蓬勃发展,工程科研人员、技术人员攻坚克难,取得了一系列高层建筑施工技术和科技创新成果,使我国当代施工技术在许多方面赶上甚至超过了世界先进水平。建筑施工是一门实践性强、发展很快的学科,就工程建设和人才培养而言,需要不断地汲取新知识、新技术,总结经验,并在实践中进行创新,科技创新已成为我国当代施工技术发展、企业发展的最大动力。

近年来,我们依托工程技术研究中心等产、学、研平台,加强了与国内特大型施工企业的合作,以重大工程项目为对象,开展施工关键技术的研发,并不断总结创新成果和工程经验,锻炼师资队伍,取得了以工程建设国家标准为代表的一些工程应用科技成果。

为了更好地反映我国当代高层建筑施工技术,紧密结合工程实际,我们组成了由高校“双师型”教师、国内大型施工企业工程科技人员组成的编写小组,对本书进行了修订。本书的第一版由我国建筑施工界著名学者、同济大学赵志缙教授担任主编,在本书修订策划期间,赵老师提出由刘俊岩教授担任第二版主编,他担任主审,并对本次修订提出了诸多建设性意见,遗憾的是修订期间赵老师突发疾病不幸逝世。但本书仍倾注了赵老师的心血,他渊博的学识、严谨的作风、高贵的品格永远留在了我们的心中,在此向恩师赵志缙教授再次表示崇高的敬意。

本次修订补充了近年来高层建筑施工中成熟的技术,力求反映我国在高层建筑施工中的新技术和创新发展。为了更好地培养学生解决工程实践问题的能力和创新能力,进一步补充了重大工程施工实例分析,以及对新规范的理解和应用等内容。

本书第一版曾多次重印,得到了广大读者的欢迎,本次修订传承了第一版的特点和部分内容,在此对第一版作者表示感谢和致敬。本次修订特别邀请了上海建工集团的工程技术老专家和一线工程技术负责人参与了编写,整理分析了部分重大工程的施工方案,以突出施工教学的实践性。

本书的第 1 章由济南大学刘俊岩教授、上海建工四建集团邱锡宏教授级高工编写;第 2.1 节、2.2 节、2.5 节、4.1 节由刘俊岩教授编写;第 2.5 节由中国海洋大学刘涛副教授编写;第 3.1 节、3.3 节、3.4 节、3.5 节由济南大学刘燕副教授编写;第 3.2 节由山东农业大学刘经强副教授编写;第 4.2 节、4.3 节由济南大学任锋副教授编写;第 4.4 节由济南大学谷传耀副教授编写;第 5 章由上海建工四建集团邱锡宏教授级高工、张铭教授级高工、楼楠高工、曹汉卿工程师编写。全书由刘俊岩教授进行统一修改和加工,山东农业大学李继业教授进行了最终审查。

由于作者水平有限,本书难免有不足之处,诚挚欢迎读者给予批评指正。

编者

2014 年 1 月

第一版前言

我国由于实行改革开放政策,经济得到飞速发展,因而近年来高层和超高层建筑的建设规模日益扩大,有的大城市一年施工的高层建筑达数百幢,不少中、小城市亦开始建造高层建筑。

高层建筑施工的技术要求较高,施工难度较大。在多数高等专科学校的建筑工程类专业和专业中,为帮助学生了解高层建筑的施工技术,开设了“高层建筑施工”课程,有些学校甚至将此作为施工类课程中的重要组成部分进行讲授,但到目前为止仍缺少适合高等专科学校层次使用的“高层建筑施工”教材。为适应当前的教学需要,由同济大学、济南大学、山东水利高等专科学校、山东建筑工程学院等联合编写了这本《高层建筑施工》,供有关学校试用。当然,本书亦可作为本科专业相应课程的教材使用。

近年来,我国高层建筑施工领域的理论和技术发展很快,有些方面已接近或赶上世界先进水平。我们在编写中,在极力反映国际上高层建筑施工先进技术的同时也尽可能介绍我国成熟的技术和创新发展的新技术,并力求结合高等专科教育的特点,使之更适合这一层次学生的学习。由于时间仓促,也限于作者的水平,不足之处在所难免,在此热忱欢迎读者给予批评指正,以便将来不断修订和改进。

本教材的1,2.2.1~2.2.5.2,4.4,4.5由同济大学赵志缙编写;2.1,2.2.5.3~2.2.7,2.3由济南大学刘俊岩编写;3由山东水利高等专科学校李继业编写;4.1~4.3由济南大学率兵和山东建筑工程学院王好温编写。全书最后由赵志缙进行统一修改和加工。

编者

1999年2月

目 录

前言/第一版前言

1 绪论	(1)
1.1 高层建筑的定义	(1)
1.2 高层建筑的发展	(1)
1.3 高层建筑施工技术的发展	(3)
2 高层建筑基坑工程施工	(4)
2.1 深基坑工程发展现状与趋势	(4)
2.2 深基坑工程的地下水控制	(6)
2.2.1 地下水的基本特性	(8)
2.2.2 动水压力和流砂	(11)
2.2.3 降低地下水位的方法	(12)
2.2.4 截水	(19)
2.2.5 回灌	(21)
2.3 深基坑工程的支护结构	(22)
2.3.1 支护结构的作用与构成	(22)
2.3.2 支护结构的选型	(23)
2.3.3 荷载与抗力计算	(32)
2.3.4 重力式水泥土墙	(36)
2.3.5 支挡式支护结构	(43)
2.3.6 土钉墙和复合土钉墙	(107)
2.4 深基坑工程监测	(122)
2.4.1 监测目的	(122)
2.4.2 监测方案	(122)
2.4.3 监测项目	(123)
2.4.4 测点布置	(124)
2.4.5 监测设备	(126)
2.4.6 监测数据的整理和报警标准	(129)
2.5 深基坑工程土方开挖	(130)
2.5.1 土方开挖方案	(130)
2.5.2 土方开挖注意事项	(133)
2.5.3 安全技术	(135)
3 大体积混凝土结构施工	(137)
3.1 大体积混凝土结构施工的特点	(137)
3.2 结构物裂缝的基本概念	(138)
3.2.1 裂缝的种类及产生原因	(138)
3.2.2 控制裂缝开展的基本方法	(141)
3.3 大体积混凝土浇筑体施工阶段温度应力与收缩应力的计算	(142)
3.3.1 混凝土浇筑体中的温度场	(142)
3.3.2 混凝土防裂性能判断	(145)
3.3.3 温度应力计算	(145)
3.4 控制温度裂缝的技术措施	(148)

3.4.1	水泥品种选择和用量控制	(148)
3.4.2	掺加外加料	(149)
3.4.3	骨料的选择	(150)
3.4.4	控制混凝土出机温度和浇筑温度	(151)
3.4.5	延缓混凝土降温速率	(152)
3.4.6	提高混凝土的极限拉伸值	(154)
3.4.7	改善边界约束和构造设计	(154)
3.4.8	加强温控施工的现场监测	(156)
3.5	大体积混凝土结构施工	(158)
3.5.1	钢筋工程	(158)
3.5.2	模板工程	(159)
3.5.3	混凝土工程	(161)
4	高层建筑结构施工	(165)
4.1	高层建筑脚手架工程	(165)
4.1.1	悬挑式脚手架	(165)
4.1.2	附着式升降脚手架	(176)
4.1.3	悬吊式脚手架	(194)
4.2	高层建筑施工用起重运输机械	(196)
4.2.1	塔式起重机	(196)
4.2.2	混凝土泵	(201)
4.2.3	施工电梯	(203)
4.2.4	起重运输机械的选择	(204)
4.3	高层现浇混凝土结构模板工程	(205)
4.3.1	高层建筑滑升模板施工	(206)
4.3.2	高层建筑爬升模板施工	(212)
4.3.3	高层建筑大模板施工	(224)
4.3.4	高层建筑楼盖结构施工用模板	(232)
4.4	高层建筑混凝土工程施工	(246)
4.4.1	粗钢筋连接技术	(246)
4.4.2	混凝土泵送施工技术	(256)
5	高层建筑施工实例	(265)
5.1	上海金茂大厦深基坑支护技术	(265)
5.1.1	总体支护施工方案的选择	(265)
5.1.2	钢筋混凝土桁架支撑的平面布置	(266)
5.1.3	基坑支护系统的施工节点构造设计	(267)
5.1.4	基坑支护系统的施工	(268)
5.1.5	钢筋混凝土内支撑系统及辅助设施的拆除	(276)
5.1.6	基坑支护工程施工体会	(277)
5.1.7	结论与建议	(277)
5.2	济南绿地中心核心筒平台式液压自动爬模系统施工专项方案	(278)
5.2.1	工程概况、难点及编制依据	(278)
5.2.2	核心筒混凝土结构平台式液压自动爬模技术方案综述	(279)
5.2.3	液压爬模的施工和难点解决方案	(295)
5.2.4	施工组织管理和质量、安全保证措施、应急预案	(317)
	参考文献	(318)

1 绪 论

为解决城市用地有限和人口密集的矛盾,出现了高层建筑;国际交往的日益频繁和世界各国旅游事业的发展,更促进了高层建筑的蓬勃发展。同时,随着建筑科学技术的不断进步,在建筑领域内也出现了不少新结构、新材料和新工艺,这些又为现代高层建筑的发展提供了条件。

我国的高层建筑正在迅猛发展,已从北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、武汉等大城市发展到其他大中城市,有些经济发达的小城市亦建有高层建筑。

1.1 高层建筑的定义

多少层或多么高的建筑物算是高层建筑?不同的国家和地区有不同的理解。而且从不同的角度,如结构、消防和运输来看待该问题,亦会得出不同的结论。1972年召开的国际高层建筑会议确定如下:第一类高层建筑,9~16层(最高到50m);第二类高层建筑,17~25层(最高到75m);第三类高层建筑,26~40层(最高到100m);超高层建筑,40层以上(高度100m以上)。

国家标准《民用建筑设计通则》(GB 50352—2005)中规定,高层建筑是指10层及10层以上的住宅及高度大于24m的公共建筑;建筑高度大于100m的民用建筑为超高层建筑。

1.2 高层建筑的发展

高层建筑在古代就有,我国古代建造的不少高塔就属于高层建筑。如公元523年(1400多年前)建于河南登封市的嵩岳寺塔,10层,高40m,为砖砌单筒体结构。公元704年改建的西安大雁塔,7层,高64m。公元1055年建于河北定县的料敌塔,11层,高达82m,砖砌双筒体结构,更为罕见。此外,还有建于1056年,9层,高67m的山西应县木塔等。这些高塔皆为砖砌或木制的筒体结构,外形为封闭的八边形或十二边形。这种形状有利于抗风和抗地震,也有较大的刚度,在结构体系上是很合理的。

同时,我国古代也出现了高层框架结构。如公元984年建于河北蓟县的独乐寺观音阁,即为高22.5m的木框架结构。其他如高40m的河北承德普宁寺的大乘阁等亦为木框架结构。

我国这些现存的古代高层建筑,经受了几百年甚至上千年的风雨侵蚀和地震等的考验,至今基本完好,这充分显示了我国劳动人民的高度智慧和才能,也表明我国古代在高层建筑的设计和施工方面就有较高的水平。

在国外古代亦建有高层建筑,古罗马帝国的一些城市就曾用砖石承重结构构建了10层左右的建筑。公元1000年前后,意大利建筑过一些高层建筑,例如,公元1100—1109年,意大利的Bologna城就建造了41座砖石承重的塔楼,其中有的竟高达98m。19世纪前后,西欧一些城市还用砖石承重结构建造了高达10层左右的高层建筑。

古代的高层建筑,由于受当时技术经济条件的限制,不论是承重的砖墙还是筒体结构,

墙壁都很厚,使用空间小,建筑物越高,这个问题就越突出。如 1891 年在美国芝加哥建造的 Monadnock 大楼,为 16 层的砖结构,其底部的砖墙厚度竟达 1.8 m。这种小空间的高层建筑不能适应人们生活和生产活动的需要。因而,采用高强和轻质材料,发展各种大空间的抗风、抗震结构体系,就成为高层建筑结构发展的必然趋势。

近代高层建筑是从 19 世纪以后逐渐发展起来的,这与采用钢铁结构作为承重结构有关。1801 年,英国曼彻斯特棉纺厂 7 层高,首先采用铸铁框架作为建筑物内部的承重骨架。1843 年,美国长岛的黑港灯塔亦采用了熟铁框架结构。这就为将钢铁材料用于承重结构开辟了一条途径。此后一段时间内所建造的 10 层左右的高层建筑,大多采用内部铁框架与外承重砖墙相结合的结构形式。1883 年,美国芝加哥的 11 层保险公司大楼首先采用由铸铁柱和钢梁组成的金属框架来承受全部荷重,外墙只是自承重,这已是近代高层建筑结构的萌芽。

1889 年,美国芝加哥的一幢 9 层大楼首先采用钢框架结构。1903 年,法国巴黎的 Franklin 公寓采用了钢筋混凝土结构。与此同时,美国辛辛那提城一幢 16 层的大楼也采用了钢筋混凝土框架结构。开启了将钢、钢筋混凝土框架用于高层建筑的时代。此后,从 19 世纪 80 年代末至 20 世纪初,一些国家又兴建了一批高层建筑,使高层建筑技术出现了新的飞跃。不但建筑物的高度一跃成为 20~50 层,而且在结构中采用了剪力墙的钢支撑,建筑物的使用空间显著扩大了。

19 世纪末至 20 世纪初是近代高层建筑发展的初始阶段,这一时期的高层建筑结构虽然有了很大的进步,但因受到建筑材料和设计理论等限制,一般结构的自重较大,而且结构形式也较单调,多为框架结构。

近代高层建筑的迅速发展,是从 20 世纪 50 年代开始的。由于轻质高强材料的发展,新的设计理论和电子计算机的应用,以及新的施工机械和施工技术的涌现,都为大规模、较经济地修建高层建筑提供了可能。同时,由于城市人口密度的猛增,地价昂贵,迫使建筑物向高空发展也成了客观上的需要,因而不少国家都大规模地建造高层建筑,到目前为止,在不少国家,高层建筑几乎占了整个城市建筑面积的 30%~40%。

目前,美国的高层建筑数量最多,160 m 以上的就有 100 多幢。目前世界上最高的建筑是 2010 年 1 月投入使用的 828 m 高的阿拉伯联合酋长国迪拜塔;第二高建筑是 2010 年建成的地上 101 层高达 508 m 的中国台北 101 大楼;2008 年 8 月竣工的上海环球金融中心,地上 101 层、地下 3 层,高度 492 m,是目前中国第二高楼世界第三高楼。此外,1974 年建成的地上 110 层、地下 3 层,高达 443 m 的西尔斯大厦(美国芝加哥);1931 年建于纽约的 102 层高 381 m 的帝国大厦;1995 年建于深圳的 68 层高 384 m 的地王商业大厦,1998 年建于上海的高 420 m 的金茂大厦等也都是闻名于世的高层建筑。其他如英国、法国、日本、加拿大、澳大利亚、新加坡、俄罗斯、波兰、南非等国家以及我国香港特区等也修建了许多高层建筑。

我国的高层建筑始于 20 世纪初。1906 年建造了上海和平饭店南楼,1922 年建造了天津海河饭店(12 层),1929 年建造了上海和平饭店北楼(11 层)和锦江饭店北楼(14 层),1934 年建造了上海国际饭店(24 层)、上海大厦(20 层)以及广州爱群大厦(15 层),至 1937 年抗日战争开始,我国约建有 10 层以上的高层建筑 35 幢,主要集中在上海等沿海大城市。高 82.5 m 的国际饭店当时是远东最高的建筑。

20 世纪 50 年代,我国在北京、广州、沈阳、兰州等地曾建造了一批高层建筑。60 年代,

在广州建造了 27 层高 87.6 m 的广州宾馆。70 年代,在北京、上海、天津、广州、南京、武汉、青岛、长沙等地兴建了一定数量的高层建筑,其中广州于 1977 年建成的 33 层高 115 m 的白云宾馆,是当时除港澳地区外国内最高的建筑。进入 80 年代,我国的高层建筑蓬勃发展,各大城市和一批中等城市都兴建了大量高层建筑。90 年代是我国高层建筑发展最快的时期,在大、中城市建造了大量高层建筑,其中包括一些世界著名的高层建筑。

1.3 高层建筑施工技术的发展

从 20 世纪 70 年代中期以来,尤其是近年来通过大量的工程实践,我国的高层建筑施工技术得到很大的发展。

在基础工程方面,高层建筑多采用桩基础、筏式基础、箱形基础或桩基与箱形基础的复合基础,涉及深基坑支护、桩基施工、大体积混凝土浇筑、深层降水等施工问题。近年来,由于深基坑的增多,支护技术发展很快,多采用排桩、水泥土桩挡墙、地下连续墙、土钉及复合土钉支护等;施工工艺有很大改进,支撑方式有内部钢管(或型钢)支撑、混凝土支撑,亦有在坑外用土锚拉固;内部支撑形式也有多种,有十字交叉支撑,有环状(拱状)支撑,亦有采用“中心岛”式开挖的斜撑;土锚的钻孔、灌浆、预应力张拉工艺亦有很大提高。

桩基础方面,混凝土方桩、预应力混凝土管桩、钢管桩等预制打入桩皆有应用,有的桩长已超过 70 m。在减少打桩对周围有害影响方面亦总结了一些经验,采用了一些有效措施。近年来混凝土灌注桩有很大发展,在钻孔机械、桩端压力注浆、成孔扩孔、动力试验、扩大桩径等方面都有很大提高,大直径钻孔灌注桩应用愈来愈多。

大体积混凝土裂缝控制的计算理论日益完善,为减少或避免产生温度裂缝,各地都采用了一些有效措施。由于商品混凝土和泵送技术的推广,万余立方米以上的大体积混凝土浇筑亦无困难,在测温技术和信息化施工方面亦积累了不少经验。在深基坑施工降低地下水位方面,已能利用轻型井点、喷射井点、真空深井泵和电渗井点技术进行深层降水,而且在预防因降水而引起附近地面沉降方面亦有一些有效措施。

在结构工程方面,已形成大模板、爬升模板和滑升模板的成套工艺,对钢结构超高层建筑的施工技术亦有了长足的进步。大模板工艺在剪力墙结构和筒体结构中已广泛应用,形成“全现浇”、“内浇外挂”、“内浇外砌”成套工艺,且已向大开间建筑方向发展。楼板除各种预制、现浇板外,还应用了各种配筋的薄板叠合楼板。爬升模板首先用于上海,工艺已成熟,不但用于浇筑外墙,亦可内外墙皆用;在提升设备方面已有手动、液压和电动提升设备,有带爬架的,亦有无爬架的,尤其与升降脚手架结合应用,优点更为显著。滑模工艺有很大提高,可施工高耸结构、剪力墙或筒体结构的高层建筑,也可施工框架结构和一些特种结构(如沉井等),在支承杆的稳定以及施工期间墙体的强度和稳定性计算方面亦有很大改进。

大批高层钢结构的建造大大提高了我国钢结构的施工技术,在钢构件加工、钢结构安装、厚钢板焊接、高强螺栓连接,以及防腐、防火涂装方面大有改进。钢管混凝土和型钢混凝土结构开始应用。

此外,在粗钢筋的机械连接、商品混凝土生产、泵送混凝土施工、大跨和特种结构安装、防水技术和玻璃幕墙等高级装饰技术等方面都有长足的发展。

随着我国高层和超高层建筑的进一步发展,传统技术会进一步提高,一些新理论、新技术、新工艺也在不断涌现,将使我国的高层建筑技术登上一个新的高峰。

2 高层建筑基坑工程施工

2.1 深基坑工程发展现状与趋势

随着我国城市化进程的加快,各大、中城市纷纷开发地下空间,超高层建筑、大型地下综合体的建设以及地铁建设热潮已蔓延至众多大中城市,带动了地下工程尤其是基坑工程向深、大、难方向发展。以上海为例,上海虹桥综合交通枢纽工程基坑总面积超过 35 万多平方米;500 kV 上海世博变电站基坑开挖深度超过了 33 m,是目前世界上最大的全地下变电站。受城市土地稀缺性、人防、停车等的影响,近年来我国大中城市高层建筑地下空间开发利用越来越受到重视,涌现了大量地下结构 2~3 层、开挖深度 10~18 m 的深基坑工程。

深基坑工程施工常在管线密布、建筑物密集、车流和人流流量大的环境下进行,特别是我国复杂多样的地质环境,呈现出较大的地区差异性,如措施不力,基坑开挖和降水造成的地层位移、地基变形将危害到临近既有建筑、市政、电力、燃气管线等设施,并影响人们的人身安全,由此导致的工程事故也屡见不鲜。如 2005 年 7 月 12 日广州海珠城广场深基坑工程事故,造成邻近海员宾馆坍塌,3 栋居民楼倾斜,居民撤离,附近地铁停运,经济损失巨大。因此我们必须正确认识目前在地下空间建设中深基坑设计、施工、监测和环境保护方面的问题。

1. 基坑工程支护设计理论

目前,我国深基坑围护结构的主要形式有复合土钉墙、灌注桩挡墙、水泥土重力式挡墙、钢板桩和钢筋混凝土板桩挡墙、型钢水泥土搅拌桩挡墙和地下连续墙等。围护结构的支撑体系主要形式有锚拉体系、混凝土或钢管内支撑体系等。

针对围护桩(墙)结构的分析方法常用的有极限平衡法、平面弹性地基梁法和有限单元法。极限平衡法在基坑设计中一直被广泛应用,是我国相关设计人员最熟悉的基坑支护设计计算方法之一。该方法计算简单、使用方便,但是由于不考虑墙体变形和横向支撑变形,仅通过已知的水土压力计算墙体的倾斜,因此该法不宜用于空间效应明显、地层变化大、周围环境复杂的支护结构设计。

与极限平衡法相比,平面弹性地基梁法(地基反力法、弹性支点法)是将围护结构简化为竖直放在土中的梁,土体简化为竖向的温克尔弹性地基,可以考虑支撑轴力、墙体弯矩、土压力等随开挖过程的变化,能合理解释结构刚度和土刚度的作用,目前应用最为广泛。

有限单元法可以考虑深基坑工程的复杂性,模拟很多常规方法难以反映的因素,如土体的非线性、弹塑性桩土接触面的摩擦效应等,因此该方法在实践中得以广泛应用。

但是,近几十年来的重大地下工程事故表明,单纯的土体强度引起的基坑失稳所占比例并不多,很多事故都是由于围护结构或支撑体系等的局部破坏或局部变形过大引起的。因此黄茂松等人提出在地下工程设计中引入冗余度的设计思想,以提高地下工程这种多场多体的复杂工程的安全性和稳定性。冗余度设计思路为基坑工程的设计开辟了新的思路,但是目前尚未建立相应的设计理论与方法。

实践表明,基坑工程历来被认为是实践性很强的岩土工程问题,基坑的稳定性、支护结

构的结构分析,以及地层的位移对周围建筑物和地下管线等的影响及保护的计算分析,目前尚不能准确地得出比较符合实际情况的结果,但是,有关地基的稳定及变形的理论,对解决这类实际工程问题仍然有非常重要的指导意义,故目前在工程实践中采用理论分析(包括数值模拟)、现场监测和经验判断三者相结合的方法,对基坑工程设计、施工及周围环境保护问题做出较合理的技术决策和现场的应变决策。

近年来,考虑应力路径的作用,土的各向异性、土的流变性、土的扰动、土与支护结构的共同作用等的计算理论以及有限单元法和系统工程等科学的研究日益引起基坑工程专家们的重视。

2. 基坑工程施工技术

基坑工程施工中对周边环境保护的问题,节能减排、走可持续发展道路问题等,给工程技术人员带来了很大的挑战,同时也给基坑工程新技术的创新与应用提供了广阔的舞台。近几年,我国基坑工程施工中发展成熟的技术有明挖法、暗挖法、盖挖法、冻结法及注浆法等,这些技术大多已达到国际先进水平。近年来,我国基坑工程施工中还涌现了一批新技术,如支护结构与主体结构相结合技术、超深水泥土搅拌墙技术、软土大直径可回收式锚杆支护技术、预应力装配式鱼腹梁支撑技术等,这些新技术在节能降耗和可持续发展方面具有明显的优势,在工程应用中取得了良好的经济、社会和环境效益。

3. 基坑工程的环境土工效应

在密集建筑群附近开挖地下工程,不但要满足稳定性的要求,变形控制的要求也越来越重要。基于变形控制的设计模式和施工技术的研究已成为工程实践中亟须解决的问题。探索、研究开挖过程中支护结构变形、周围地层位移和邻近建筑变形三者之间的关系规律,正在成为基坑工程学者、工程技术人员研究的重点和难点问题。

当前开挖引起的环境土工效应问题在城市地下工程活动中备受关注。开挖过程中由于土体的应力释放,引起地层位移,状况加剧则会危及邻近区域建筑物和地下管线的安全和正常使用。高层建筑多处在城市中心区,周围建筑物密集,地下管线、隧道错综复杂,基坑开挖的环境敏感程度很高,尤其是一些年代久远的古老建筑和长期腐蚀条件下的市政管线,抵抗变形的承受能力大打折扣,对开挖的反应更为剧烈。而燃气管线等压力型管线一旦发生变形泄漏,危害将十分巨大。

基坑工程开挖对邻近建筑的影响,较多的还是采用整体有限元分析方法,整体有限元方法可以再现复杂的实际施工工况,模拟周围土体介质的力学特性以及建筑与土体的共同作用,但该方法工作量大、耗时长,需要专业软件并且建模复杂。土体本构模型的选择、结构刚度的等效、施工作用的模拟等方面若存在诸多问题,这些问题均会影响分析结果的可靠性,往往得不到与实际情况相符合的预测结果,在工程界难以推广。因此对于基坑开挖对周围环境的影响分析,主要是在区域内大量工程实测数据基础上进行统计和理论分析,探讨研究区域开挖应力自由边界面的变形形态与有关物理力学参数之间的关系,如围护墙体的侧向变形、坑外地表的沉降等,并采用数学函数进行变形曲线的拟合。鉴于实测数据不够充分,目前对基坑工程的变形研究还停留在开挖应力自由面上,针对整个自由土体位移场变形分布规律的实测和统计研究几乎没有。近年来,国内学者在此方面开展了诸多探索与研究,如上海开展的“对地表沉陷及岩土体形变数据的监控”工作,在地下空间开发利用中发挥了积极作用。

4. 基坑工程的风险监控

深基坑工程具有受地质条件影响大、施工速度快、施工技术复杂、不可预见因素多、对周边环境影响大等特点,是一项高风险的建设工程,风险管理已成为国内外大型地下工程施工中的例行程序,其中对施工安全风险的监控是风险管理中的重要手段。安全风险是一个动态的过程,国外先进的理念是提出地下工程“迭代”式设计、施工和管理,目的就是为了适应地下工程与工程地质条件、环境条件相互影响的复杂性,以期最大限度地规避安全风险。我国近年来在基坑工程中也提出了“动态设计、信息化施工”的理念,强化了对施工风险的辨识、分析与评价,这一措施的落实依赖于对基坑工程安全风险的监控。基坑工程安全风险具有独特性,事故的发生看似具有偶然性,但实际上,多数基坑安全事故的发生具有明显的征兆,是完全可以监控的。

基坑工程监测是保证基坑安全、保护周边环境的有效手段,也是动态设计、信息化施工的重要依据。2009年我国颁布实施了关于基坑工程的第一部国家标准《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2009),推动了我国基坑工程监测行业的发展,对基坑工程风险监控发挥了重要作用。

2.2 深基坑工程的地下水控制

随着我国城市地下空间的开发利用,地下综合体、地下交通枢纽、地铁车站、人防工程等大量兴建,深基坑越来越多。此外,高层建筑由于上部荷载大,大多采用补偿性基础,因此一般都设一层或多层地下室,这样有利于建筑物的稳定,并可充分利用地下空间。但同时由于基础埋深较大,基坑开挖较深,也给施工增大了难度。尤其是在地下水位较高地区开挖深基坑时,土的含水层被切断,地下水会不断地渗入基坑,容易造成流砂、边坡失稳和地基承载力下降,为此,在进行深基坑施工时必须做好地下水的控制工作。

地下水的控制方法主要有降水、截水和回灌等几种形式。地下水控制应根据工程地质和水文地质条件、支护形式、周边环境要求,并结合当地经验选用降水、截水、回灌的方法,这几种方法可以单独选用,也可以组合选用。

降水的方法有集水明排和井点降水两类。

集水明排属重力降水,它是在开挖基坑时沿坑底周围开挖排水沟,并每隔一定距离设置集水井,使基坑内挖土时渗出的水经排水沟流向集水井,然后用水泵将水排出坑外。这种方法的缺点是,地下水沿边坡面或坡脚或坑底渗出,使坑底软化或泥泞;当基坑开挖深度较大:坑内外水头差大时,如果土的组成较细,在地下水动水压力的作用下,还可能引起流砂、管涌、坑底隆起和边坡失稳。因此,集水明排这种地下水控制方法虽然设备简单、施工方便,但在深基坑工程中单独使用有一定的条件。

井点降水是应用最广泛的降水方法,是高地下水位地区基坑工程施工的重要措施之一。井点降水主要是将降水工具沉设到基坑外四周或坑内的土中,利用各种抽水工具,在不扰动土体结构的情况下,将地下水抽出,使地下水位降低到坑底以下,保证基坑开挖能在较干燥的施工环境中进行。井点降水的作用是:

- (1) 通过降低地下水位消除基坑坡面及坑底的渗水,改善施工作业条件;
- (2) 增加边坡稳定性,防止坡面和基底的土体流失,以避免流砂现象;
- (3) 降低承压水位,防止坑底隆起与破坏;

(4) 改善基坑的砂土特性,加速土的固结。

井点降水法主要有轻型井点法、喷射井点法、电渗井点法、管井井点法和深井井点法等。

在城市中心区建筑密集的地区开挖深基坑,降水时还要考虑对周围环境的影响。井点降水形成的盆式降水曲线,在使基坑内地下水位下降的同时,坑外一定区域内地下水位也有所下降,从而使基坑周围的土体固结下沉,如沉降较大则影响地上建筑物和地下管线等的安全与使用。

根据是否在基坑四周设置截水帷幕,可以把降水方案分为开敞式降水和封闭式降水两种。开敞式降水不在基坑四周设置截水帷幕,降水对抗外较大区域的地下水位均会造成下降,当土的密实度低、孔隙率高、压缩性较大时,宜造成土体固结下沉,如果降水期较长,这一特点尤为明显。因此如果开敞式降水造成的土体下沉,会影响到周边环境中的建筑、管线等的正常使用和安全时,则不应采用。

当因降水的原因可能会危及基坑及周边环境安全时,宜采用截水方法或回灌方法。

深基坑工程的截水方法经常采用的是截水帷幕,它是在基坑开挖前沿基坑四周设置隔水围护壁(亦称隔水帷幕),帷幕的底部宜深入坑底一定深度或到不透水层,由于围护壁是止水的,这样基坑内外的地下水就不能相互渗流。截水后,基坑内的水量或水压较大时,可以采用基坑内井点降水,这种方法既有效地保护了周边环境,同时又使坑内一定深度内的土层疏干并排水固结,改善了施工作业条件,并有利于围护壁及基底的稳定。

回灌法就是在降水井点和要保护的原有建筑物、地下管线之间打一排井点,在降水的同时,通过回灌井点向土层内灌入一定数量的水,从而阻止或减少回灌井点外侧建(构)筑物下的地下水流失,使原地下水位基本保持不变,这样就不会因降水而使土层产生固结下沉,消除或减少了周围的地面沉降,保证原有建筑物、地下管线的安全与使用。

地下水控制的设计是基坑工程设计的重要组成部分之一。其设计应满足支护结构设计要求,控制方法的选用要根据场地及周边水文地质条件、环境条件并结合基坑支护和基础施工方案综合分析后确定。地下水控制方法适用条件参见表 2-1。

表 2-1 地下水控制方法适用条件

控制方法		土质类别	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	降水深度/m	水文地质特征
集水明排		填土、砂土、粉土、黏性土	<20.0	<5	上层滞水或水量不大的潜水
井点降水	轻型井点		$0.1 \sim 20.0$	单级 <6 多级 <20	
	喷射井点		$0.1 \sim 20.0$	<20	
	电渗井点	黏性土、淤泥及淤泥质土	<0.1	根据选用的井点确定	含水丰富的潜水、承压水、裂隙水
	管井井点	粉质黏土、粉土、砂土、碎石土、可溶岩、破碎带	$0.1 \sim 200.0$	不限	
		砂土、碎石土	$10.0 \sim 250.0$	>10	
	真空深井井点	粉砂、粉土、富含薄层粉砂的粉质黏土、黏土、淤泥质土	$0.001 \sim 0.5$	$8 \sim 18$	上层滞水、潜水承压水

续表

控制方法	土质类别	渗透系数/(m·d ⁻¹)	降水深度/m	水文地质特征
截水	黏性土、粉土、砂土、碎石土、岩溶岩	不限	不限	
回灌	填土、粉土、砂土、碎石土	0.1~200.0	不限	

2.2.1 地下水的基本特性

2.2.1.1 水在土中渗流的基本规律

为了弄清水在土中渗流的基本规律,首先看一下最简单的一维渗流情况(图 2-1)。只要土样的 A—A' 与 B—B' 面间存在并保持水头差 ΔH , 水就会不断地从 A—A' 面流向 B—B' 面,形成稳定流。实验表明,单位时间内流过土样的水量 Q (m³/d 或 cm³/s) 与水头差 ΔH (m 或 cm) 成正比,与土样的横截面面积 A (m² 或 cm²) 成正比,而与渗径长度 L (m 或 cm) 成反比,亦即

$$Q \propto \frac{\Delta H}{L} A$$

或
$$Q = k \frac{\Delta H}{L} A \quad (2-1)$$

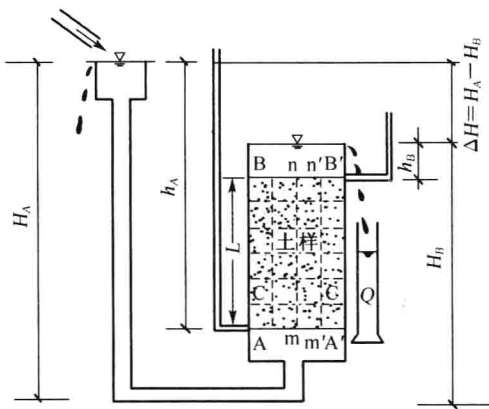


图 2-1 一维渗流实验示意图

式中, k 为比例系数,随土而异,反映土的透水性大小,称为土的渗透系数,单位为 m/d 或 cm/s。

单位时间内流过单位横截面积的水量,称为渗流速度 v (m/d 或 cm/s):

或
$$v = \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta H}{L} \quad (2-2)$$

式中, $i = \frac{\Delta H}{L}$, 代表单位长度渗径所消耗的水头差,亦称水力梯度。

从式(2-2)可以看出,水在土中的渗流速度 v 取决于两方面因素:一是土的透水性(反映为 k),二是水力条件(反映为 i),这就是水在土中的渗流基本规律,亦即达西定律。

理解达西定律时还要注意两个问题:

(1) 渗流速度并不是水在土中渗流的真正速度,因为土中孔隙是弯弯曲曲的,实际渗径长度并不等于 L ;横截面积 A 中不全是孔隙,实际过水面积也不等于 A ;因此实际平均流速小于渗流速度 v 。但工程实践中关心的是流经整个土体的流量,所以用表观的流速 v ,同时按表观的横截面积 A 、渗径长度 L 考虑是可以的,而且更为方便。

(2) 达西定律 $v = ki$ 只适用于砂及其他较细颗粒的土中,而孔隙太大时(如卵石、砾石),流速太大,会有紊流现象,渗流速度 v 不再与水力梯度 i 的一次方成正比。另一方面,对塑性指标 I_p 特别大的黏土,由于结合水膜较厚,水力梯度太小时克服不了阻力,水渗流不

过去,只有当水力梯度 i 超过某一初始的水力梯度 i' 时才能渗流。因此,达西定律应用于高塑性致密黏土时改写成:

$$v = k(i - i') \tag{2-3}$$

2.2.1.2 土的渗透系数

水在土中的流动称为渗流。水质点运动的轨迹称为“流线”。水在流动时如果流线互不相交,这种流动称为“层流”;如果水在流动时流线相交,水中发生局部旋涡,这种流动称为“紊流”。水在土中的渗流一般多属于“层流”,适用于达西定律。从达西定律 ($v = ki$) 中可以看出渗透系数 k 的物理意义,即土的渗透系数 k 是水力梯度 i 等于 1 时的渗流速度。渗透系数 k 反映土的透水性大小,是计算水井涌水量的重要参数之一,常用量纲为 m/d 或 cm/s。渗透系数 k 一般通过室内渗透实验或现场抽水试验测定,在地基土壤勘探时应提供各土层的 k 值。

影响土渗透系数的主要因素有土的粒度组成、密实度、饱和度、土的结构和构造等。一般土粒愈粗、大小愈均匀、形状愈圆滑,渗透系数值也就愈大;土愈密实,渗透系数值愈小;饱和度愈高,渗透系数值愈大;细粒土在天然状态下具有复杂结构,一旦结构被扰动,原有的过水通道将被改变,因而渗透系数值也就不同;土的构造因素对渗透系数值的影响也很大,如在黏性土中有很薄的砂土夹层的层理构造,会使土在水平方向的渗透系数值超过竖直方向渗透系数值几倍甚至几十倍,因此,在室内测定渗透系数时,土样的代表性很重要。另外,一个测点的渗透系数,不一定能代表整个土层的透水性,有条件时,应做现场抽水试验来测定 k 值较为可靠。

2.2.1.3 流网

土体中的稳定渗流可用流网表示,流网由一组流线和一组等势线组成。

以图 2-1 所示的一维渗流为例。如果在 A—A' 面上放置一些颜料,就会出现若干条反映水流方向的流线,如图中 $\overline{mn}$ 和 $\overline{m'n'}$, 两条流线之间的空间称为流槽。等势线是总水头相等的各点连线,如 $\overline{AA'}$, $\overline{BB'}$, $\overline{CC'}$ 都是等势线。由等势线与流线分格出的网,就称为流网。任何流网都必须满足两个基本条件:一是流线与等势线应成正交,这是由流线和等势线的定义所决定的;二是流网中,由流线和等势线所包围的各个流区的 $\frac{b_i}{l_i}$ 值相等 (b_i 为 i 流区的流线平均距离, l_i 为 i 流区的等势线平均距离), 这是为了计算方便,有意使各个流槽的流量 ΔQ_i 相等,使各条等势线之间的水头差 ΔH_i 相等。

绘制流网的目的是可直观地考察水在土中的渗流途径,更重要的是可以计算渗流量以及确定土体中各点的水头和水力梯度。尤其是在实际工程中多遇到二维或三维渗流情况,这时绘制流网就很有用。

下面以图 2-2 所示的基坑渗流为例,介绍用图示法绘制流网的步骤。该例基坑中段可看作是二维稳定渗流问题。

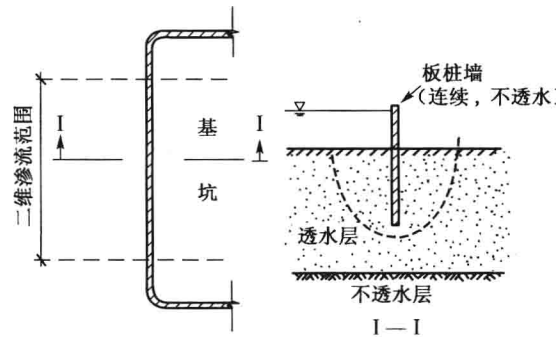


图 2-2 基坑渗流

流网绘图步骤如下:

(1) 按一定比例绘出结构物和土层的剖面图(图 2-3)。

(2) 判定边界条件,如 $a'a$ 和 bb' 为等势面(透水面), acb 和 ss' 为流线(不透水面)。

(3) 先试绘若干条流线,流线应接近相互平行、不交叉,而且是缓和曲线(因为水总是找最短的路径走,改变方向总是沿缓和曲线);流线应与进水面、出水面(等势线)成正交,并与不透水面(流线)接近平行、不交叉。图 2-3 所示的实曲线为流线。

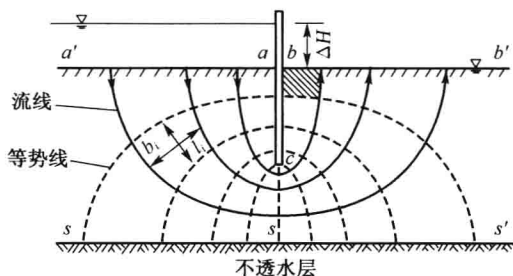


图 2-3 流网绘制

(4) 加上若干条等势线,等势线必须与流线正交,而且每个流区的形状必须接近“方块”(亦即 $\frac{b_i}{l_i} = 1$)。如图 2-3 所示的虚曲线为等势线。

(5) 反复修改、调整所有流线和等势线,直到满足上述条件为止。

根据流网,可以计算渗流量 Q 。

设流槽数为 N_f ,各个流槽的流量为 ΔQ ,则沿基坑边长每延米的渗流量 $Q = N_f \Delta Q$; 设水头落差数为 N_D ,则各条等势线之间的水头差 $\Delta H_i = \frac{\Delta H}{N_D}$ 。因此根据达西定律:

$$\Delta Q = k \frac{\Delta H_i}{l_i} b_i \times 1$$

因为各个流区的 $\frac{b_i}{l_i}$ 值相等且 $\frac{b_i}{l_i} = 1$, 所以

$$\Delta Q = k \Delta H_i = k \frac{\Delta H}{N_D} \quad (2-4)$$

$$Q = N_f \Delta Q = N_f k \frac{\Delta H}{N_D} = k \left(\frac{N_f}{N_D} \right) \Delta H \quad (2-5)$$

【例 2-1】 某基坑如图 2-2 所示,透水层土质为粉土, $k = 0.3 \text{ m/d}$,基坑内外总水头差 $\Delta H = 3 \text{ m}$,基坑绘制的流网如图 2-3 所示,求沿基坑边长每延米的渗流量。

解 根据流网可知,流槽数 $N_f = 4$,水头落差数 $N_D = 10$,由式(2-4)得各个流槽的流量 ΔQ 为

$$\Delta Q = k \frac{\Delta H}{N_D} = 0.3 \times \frac{3}{10} = 0.09 (\text{m}^3/\text{d})$$

由式(2-5)得基坑边长每延米的渗流量 Q 为

$$Q = N_f \Delta Q = 4 \times 0.09 = 0.36 (\text{m}^3/\text{d})$$

2.2.1.4 潜水与层间水

土中水除了有一部分是受电分子力作用吸附在颗粒表面的结合水之外,其余都是自由水。自由水能够传递静水压力,能够在重力和表面张力作用下在土中流动。地下水位以下土体中