

城市地下综合体 建设技术指南

徐日庆 等编著

中国建筑工业出版社

城市地下综合体建设技术指南

徐日庆 等编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市地下综合体建设技术指南/徐日庆等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2016. 5
ISBN 978-7-112-19444-5

I. ①城… II. ①徐… III. ①城市空间-地下建筑
物-建筑设计 IV. ①TU92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 103222 号

本书系统地介绍城市地下综合体建设中涉及的基本理论、工程设计、施工和监测检测等方面的内容。全书共有 10 章, 包括绪论、地下水与土的工程性质、基坑工程设计与施工技术、盾构法隧道设计与施工技术、顶管法管道设计与施工技术、暗挖法通道设计与施工技术、地下工程地下水控制技术、综合体开发的监测技术、综合体开发环境效应与保护技术和工程实例。

本书可供从事地下工程设计、施工及管理的工程技术人员以及高等院校相关专业的师生参考阅读。

责任编辑: 杨 允

责任校对: 李欣慰 刘梦然

城市地下综合体建设技术指南

徐日庆 等编著

*

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

北京科地亚盟排版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 30 字数: 724 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 70.00 元

ISBN 978-7-112-19444-5

(28704)

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

随着我国社会经济快速发展,城镇化强力推进,城市地价不断攀升,开发地下空间就成为必然趋势,其中地下综合体的开发占有很大的分量。结合国家科技支撑计划“城市地下空间开发技术集成与示范”项目的“城市地下综合体建设技术研究”子课题,集成了现有综合体的建设技术和武林广场地下综合体示范工程,形成了《城市地下综合体建设技术指南》。

《城市地下综合体建设技术指南》一书共有10章,第1章绪论,由浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心徐日庆和朱亦弘编写;第2章地下水与土的工程性质,由浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心徐日庆和邓玮文编写;第3章基坑工程设计与施工技术,由浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心俞建霖编写;第4章盾构法隧道设计与施工技术,由江苏省交通规划设计院隧道分院王涛编写;第5章顶管法管道设计与施工技术,由浙江大学城市学院魏纲编写;第6章暗挖法通道设计与施工技术,由宁波大学建筑工程与环境学院朱剑锋编写;第7章地下工程地下水控制技术,由北京市市政工程设计研究院郭印编写;第8章综合体开发的监测技术,由浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心董梅和徐日庆编写;第9章综合体开发环境效应与保护技术,由胜利油田技术检测中心齐静静编写;第10章工程实例,由杭州武林广场地下商城建设有限公司徐波、来剑平,浙江省建工集团沈西华,浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心朱亦弘和吴勇编写;全书由徐日庆主编。

本书较全面、系统地介绍了城市地下综合体建设中涉及的设计、施工和监测和环境效应与保护技术,收入了最新的设计计算理论和工程实例。

本书得到国家科技支撑计划(2012BAJ01B04-3)资助,在此表示衷心感谢!

《城市地下综合体建设技术指南》在编写过程中,得到了浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心的同事们支持和帮助,浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心博士研究生李俊虎、陆建阳和冯苏阳以及硕士研究生张子浩和王旭做了校稿和编排工作,在此谨向他们致以衷心的感谢!

由于编者知识面和能力所限,书中若有不当和错误,敬请读者批评指正。

徐日庆

2016年4月紫金港

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 城市地下综合体发展	1
1.2 地下工程设计计算理论现状及发展	5
1.3 地下工程建设技术现状与发展	6
参考文献	8
第 2 章 地下水与土的工程性质	9
2.1 概述	9
2.2 基于微观结构的软土孔隙率和接触面积率	9
2.3 软土颗粒接触面积率与宏观孔隙率之间的关系	14
2.4 基于接触面积的软土渗流分析	18
2.5 基于接触面积的饱和土渗流固结理论	25
2.6 基于接触面积的土压力理论	32
2.7 基于接触面积的边坡稳定分析	43
2.8 本章小结	52
参考文献	53
第 3 章 基坑工程设计与施工技术	55
3.1 概述	55
3.2 支护结构设计	55
3.3 土钉墙施工	83
3.4 重力式水泥土挡墙施工	86
3.5 板桩墙施工	92
3.6 排桩墙施工	98
3.7 型钢水泥土搅拌墙施工	107
3.8 地下连续墙施工	110
3.9 支锚体系施工	117
3.10 本章小结	123
参考文献	124
第 4 章 盾构法隧道设计与施工技术	125
4.1 盾构法隧道概述	125
4.2 盾构法隧道设计	131
4.3 盾构法隧道施工	140
4.4 盾构隧道近距离穿越建构筑物风险分析及保护措施	147
4.5 本章小结	163
参考文献	164

第5章 顶管法管道设计与施工技术	165
5.1 概述	165
5.2 顶管工程设计	168
5.3 顶管工程施工	181
5.4 顶管法施工若干关键技术问题	207
5.5 本章小结	213
参考文献	213
第6章 暗挖法通道设计与施工技术	214
6.1 暗挖法通道概述	214
6.2 矿山法通道设计与施工	215
6.3 浅埋暗挖法通道设计与施工	220
6.4 软土地层通道冻结法设计与施工	230
6.5 本章小结	236
参考文献	236
第7章 地下工程地下水控制技术	237
7.1 概述	237
7.2 地下工程降水设计与施工	238
7.3 地下工程排水设计与施工	272
7.4 地下工程防水设计与施工	283
7.5 地下工程渗漏治理技术	317
7.6 本章小结	336
参考文献	337
第8章 综合体开发的监测技术	340
8.1 概论	340
8.2 支护结构的安全监测与控制	341
8.3 周围环境的安全监测与控制	352
8.4 基于无线传感器网络的地下工程全生命周期安全监测技术	382
8.5 本章小结	394
参考文献	394
第9章 综合体开发环境效应与保护技术	395
9.1 概述	395
9.2 综合体建设对周围环境的影响规律	395
9.3 周围环境改变对综合体的影响规律	400
9.4 综合体的保护技术	409
9.5 本章小结	421
参考文献	421
第10章 工程实例	422
10.1 杭州武林广场地下商城工程	422
10.2 杭州东站铁路枢纽工程	449

第 1 章 绪 论

随着我国城市化进程的不断提高,城市规模不断扩大,城市人口快速攀升。东部城市人口陆续突破百万级别,城市病现象显著,诸如城市生存空间拥挤、基础设施建设滞后、交通拥堵、生态环境恶化等城市问题不断涌现。国外城市在快速城市化过程中为了平衡城市扩张带来的人口、资源、环境压力,纷纷聚焦开发城市地下空间,提升土地的单位价值,拓展城市发展空间,促使城市向集约化和可持续化方向发展。

发达国家从 19 世纪中叶开始大规模开发地下空间,至今已积累了大量的开发经验。城市地下空间的功用从最初仅仅作地下步行道、地铁、排水系统等公共功能设施发展为 20 世纪前期的地下仓储、地下基础设施、地下工业厂房等为代表的地下建筑。到了 20 世纪中后期,旧有城市的地下空间改造使原本零碎的地下空间功能更为全面完整,新建的城市中心商务区对地下空间的规划利用也进入了全新的阶段,地下商城、地下车站等民用设施大量涌现。地下空间开发由最初的单一功能建筑逐步发展为复合功能的综合设施,由此发展出了涵盖市民生产、生活、娱乐等多项功能的城市地下综合体。

我国自 20 世纪 80 年代起逐步开始开发城市地下空间,经过三十多年的发展,地下空间开发进入了高速开发时期,其中复杂的城市地下综合体以井喷速度发展。以浙江省地下空间开发为例,截止 2012 年底,浙江省地下空间开发面积达 12181.9 万 m^2 ,且每年地下空间建成面积超过 100 万 m^2 。杭州市新建的钱江新城地下空间面积达 240 万 m^2 ,涵盖了商业、旅游、休闲、物流和停车等多项功能,是杭州现有规模最大、功能最全的地下综合体。

我国各类地下综合体项目建设如火如荼,但考虑到地下综合体建设复杂、开发规模大、埋设深、项目资金投入量大等特点,开发风险和难度相对较大。需要政府对地下综合体项目科学有效地规划引导,增强地下综合体开发的技术储备并形成相应的技术规范,改善地下综合体融资方式和运营方法。本指南通过介绍地下综合体建设技术,分析经典项目案例,以期形成地下综合体建设的关键技术框架。

1.1 城市地下综合体发展

城市综合体指由各个使用功能不同的空间组合形成的单体式或群组式的建筑,可以承载城市不同性质的社会功能空间,如商业、办公、居住、娱乐、交通等。城市综合体的“混合使用”的城市设计概念最早由美国城市土地学会于 1976 年发表的专著《Mixed-Use Development: New ways of land use》中正式提出。

混合使用提出的新土地规划使用方法包含三大主要特征:(1) 包含三种及以上的能够提供收益的主要功能且各主要功能可以相互支持;(2) 各组成部分可以形成空间和功能上的整体化;(3) 按照一个有条理的计划进行各单元功能的开发。20 世纪中叶,美国等发达

国家开发的多功能建筑组团均符合上述三大特征，并逐步发展形成了城市综合体的概念。

城市地下综合体是城市综合体转向地下空间开发的表现形式，是在同一空间内具有多种使用功能的综合性地下建筑。由于地下空间的采光、通风等问题，城市地下综合体的使用功能较城市综合体有明显区别，主要用作地下交通及换乘设施、地下商城、地下综合管沟和地下基础设施。

“二战”结束后，西方发达国家积极重建城市，兴修了大量地下综合体。各国基本以地下交通网络作为地下综合体的骨架，在地下人行道和换乘站等人流密集处配置地下商业街，并建设地下综合管沟。

日本由于国土资源匮乏，人口压力大，是全球最早大面积系统开发地下综合体的国家之一，开发的地下空间的规模、深度和用途也是最广泛和深入的。20 世纪 50 年代，日本进入地铁时代，先后 60 多个城市相继开始建设地铁，发展至 70 年代，日本城市地下 15m 内地下空间已基本开发完成，形成地铁交通网络、人行网络等立体交通网络，在地下人行道上基本设有地下综合管廊。地下综合体开发成本主要通过地下街租金回收，资本回收周期一般在十年以上。日本政府十分重视地下空间规划，与地上空间一起形成立体整体规划，并且以地下交通建设为核心，为地下商业设施提供足够的人流，整体性的规划和持续的政策保证了地下空间开发的回报收益。随着开发经验和技术的逐步积累，日本建设了体量巨大的地下综合体，区域功能完善与地上城市无异。



图 1-1 日本八重洲地下商城



图 1-2 芝加哥地下步行街示意图



图 1-3 加拿大蒙特利尔地下综合体

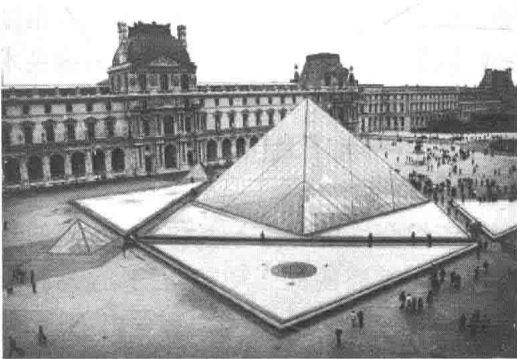


图 1-4 法国巴黎卢浮宫地下展厅

美国芝加哥地区是美国第三大都会区，仅次于纽约市和洛杉矶。但芝加哥城市中心地区道路狭窄，市内交通问题严峻，人车矛盾突出。1951 年，芝加哥中心区两条地铁展厅的

地下人行道建成，形成了地铁、地下人行道和地面汽车交通并行的立体交通系统。在 20 世纪 60 年代大力建设地铁的同时芝加哥建设完善地下步行网络系统，并结合旧城区改造建设了第一国家银行下沉广场和伊利诺中心地下步行系统。通过近三十年的努力，在 20 世纪 90 年代建设完成了不受天气干扰的步行系统，实现了人车分离，提高了地面交通的通行效率。

蒙特利尔是加拿大第二大城市，每年有四个月被冰雪覆盖，构建地下交通网络可以有效解决当地居民的日常出行问题。20 世纪 60 年代，火车站改造和地铁站兴建催生了地下人行网络的发展。蒙特利尔成功举办了 1967 年世博会和 1976 年的奥运会，进一步推进了城市地下综合体的建设，最终建成了长达 33km 的地下步行网络，连接了中心商业区 10 个地铁站、2 个火车站和会议中心、展览馆等 60 多座建筑。

法国巴黎地下空间开发利用较早，在 1878 年便已修建了 600km 的地下水道，20 世纪初开始建设地铁和地下道路。1970 年前后，巴黎对旧城区进行改造扩建，在保护古建筑的同时系统开发中心城区的地下空间，建成了涵盖地铁、城郊铁路、换乘设施、商店、步行街、游泳池等多项建筑功能的 Les Halles 地下广场；扩建卢浮宫地下空间，增设 4 个玻璃金字塔，将剧场、餐厅、仓库、停车场等附属功能安置在地下空间，使展厅面积扩大 80%。

国外地下综合体开发过程中积累了宝贵的经验，值得我国借鉴：（1）统筹规划地面空间和地下空间，保证城市规划的统一性；（2）以地下多层次交通建设为核心，通过地下交通网串联多区块地下空间功能；（3）建立完备的法律体系，明确地下空间开发的所有权问题可以促进地下综合体的有序开发，调动民间资本投资积极性；（4）重视地下综合体的运营和养护，建立系统整体的监控体系。

我国人均 GDP 已突破 7000 美元，按国际经验正处于大规模开发地下空间的时期。沿海发达地区已积累了大量开发经验，并制定了相应的法律规范。上海建立了从整体规划、分区规划到详细规划三个层面的地下空间规划设计体系；北京通过政府组织、多单位共同参与编制了《北京中心城中心地区地下空间开发利用规划》，并制定了《北京市城市地下管线管理办法》等配套法规文件，确保地下空间开发的合理有序。

上海虹桥综合交通枢纽涵盖了航空港、高速铁路、磁浮、城市轨道交通、客运汽车等多种交通方式，是世界级超大型交通枢纽。虹桥枢纽 2007 年主体结构开工，2009 年竣工，占地面积达 26.26km²，总建筑面积达 129.1 万 m²，其中地下部分约为 50 万 m²，局部最大挖深达 29m。虹桥枢纽可实现 6 种交通形式的换乘，各功能区间无障碍联通，市内交通和市外交通可以便捷换乘。虹桥枢纽地下空间除包含地下人行交通网络、巴士换乘站等交通设施外，还包含了雨水泵站、变电站、通信机房、地下管沟等基础设施以及各类餐饮、休闲娱乐设施。

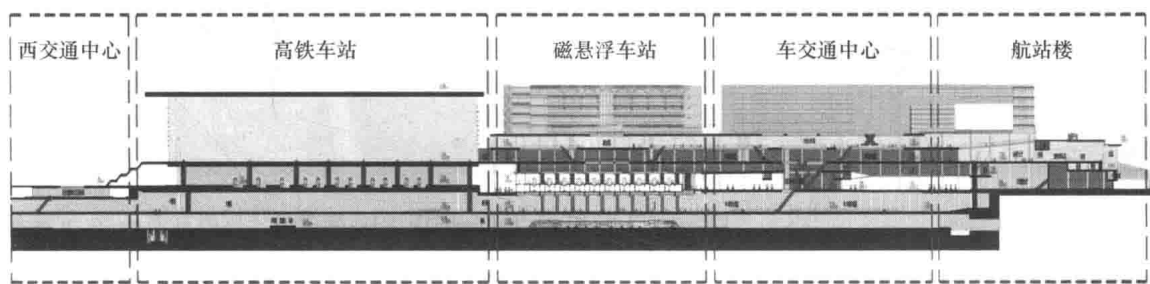


图 1-5 上海虹桥综合枢纽功能分区图



图 1-6 上海虹桥综合枢纽概念图

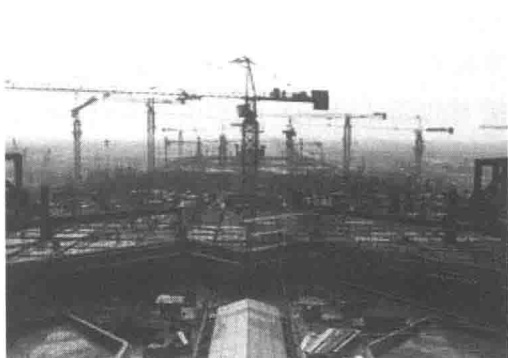


图 1-7 上海虹桥综合枢纽在建图

杭州钱江新城是杭州新城区规划中的中央商务区，是杭州发展重心从“西湖时代”转向“钱塘江时代”的标志。钱江新城核心区占地面积为 4.02km^2 ，总建筑面积达 1080万 m^2 ，地下空间面积为 240万 m^2 。钱江新城以中轴线的波浪文化城和富春江购物走廊为基本框架，初步形成地下步行交通网络；远期 2 个地铁站投入使用形成完整的地下交通网络。波浪文化城地下空间达 12万 m^2 ，涵盖了商业、旅游、休闲、物流等多项功能。紧邻钱塘江防波堤建设有地下综合管沟。

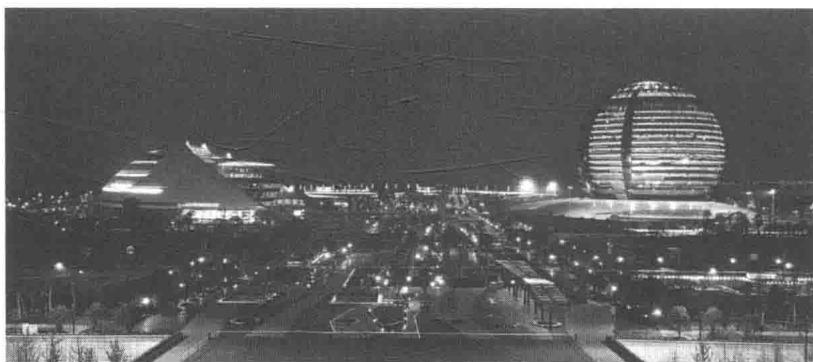


图 1-8 钱江新城中轴线



图 1-9 波浪文化城鸟瞰图



图 1-10 波浪文化城内景图

国内地下综合体的开发已取得了长足的进展，但仍有许多不尽规范合理之处需要继续学习国外开发经验。国内少数城市设立了地下空间开发的行政法规，但存在监管缺位和欠

缺乏可执行性的问题，未设立法规的城市地下空间开发相对混乱。国内城市规划少有整体考虑地面和地下空间的整体功能布局，各职能部门缺乏沟通，不能统筹建设地下空间，导致多次开挖，建设资源浪费。

1.2 地下工程设计计算理论现状及发展

地下工程设计计算理论发展初期，由地面结构计算方法演变而来，没有考虑地层施加的荷载压力及地层约束结构变形提供的反力。随着地下工程设计经验的不断积累，对地层荷载的认知不断深入，并开始考虑结构与地层相互作用引起的应力重分布，使设计更为科学合理。

城市地下工程所受的荷载主要包括自身重力、使用期间的各类活荷载、动荷载和冲击荷载、土压力和水压力。其中土压力和水压力是地下工程特有的荷载，是地下结构的主要荷载。土压力可分为竖向土压力和侧向土压力。侧向土压力又可分为静止土压力、主动土压力、被动土压力。深层地下空间常采用的多道内支撑支护结构会在坑内外形成主动区和被动区，需采用相应方法计算。由于土是一种松散的堆积物，当地下工程埋深较大时，上方土体会产生土拱效应，使地下结构只受压力拱下土体自重荷载作用；浅埋结构则无法形成压力拱，结构上方土体自重全部作用在结构上。

随着地下工程所用材料的不断变化，地下结构的计算理论也在不断发展。19 世纪中叶地下结构多以砖石材料构筑圬工结构，为了提高结构的稳定性，截面尺寸往往取得偏大。当时采用明挖法施工，地下工程埋深小，作用在结构上的荷载较小，相应的材料变形也较小。因此最早的地下结构计算理论将地下结构作为刚性结构进行计算，并发展出了压力线理论。

19 世纪后期，混凝土材料和钢筋混凝土材料逐渐应用在工程建设领域，地下结构的整体性有了较大的提高。地下结构开始尝试单拱结构外的多拱框架结构和框架结构。当时只考虑作用在结构上的主动土压力，基于弹性力学理论计算超静定结构内力，也被称为荷载-结构计算模型。材料和计算方法的革新使地下工程跨度增大，功能日趋增多。

20 世纪中期，连续介质力学理论逐渐发展成熟，通过考虑地层材料的弹塑性及地下结构与地层的相互作用，将地下工程与地层作为一个力学体系整体计算分析，并可体现岩土材料的弹塑性特性。随着计算机技术的快速发展，基于连续介质力学的有限元分析方法快速崛起，并在地下工程设计领域展露拳脚。有限元法可以考虑岩土体的初始应力、岩土体屈服后的本构关系、结构与地层的相互作用及其界面属性求解复杂的地下工程问题，有极大的发展和应用空间。但有限元法中的岩土体本构参数、界面本构参数等仍需进一步的研究完善。

1971 年 Cundall 提出了离散单元法，将研究对象分解成刚性单元集合，基于牛顿第二定律计算每个刚性单元的运动特征，适用于准静态或动态条件下物体变形和破坏的研究。离散元法尤其适合分析在动力荷载作用下的岩土材料和地下结构材料界面的变化性质。

现在地下工程设计仍多采用基于弹性力学的荷载-结构计算模型，依凭计算机强大的计算能力完成地下结构设计。随着数值计算方法理论和经验的进一步积累，相信数值分析方法会逐渐用于指导设计。

1.3 地下工程建设技术现状与发展

1.3.1 地下工程的开挖技术

地下工程的开挖技术多种多样,不同的开挖技术选取主要考虑地下工程的水文地质条件、地下结构、埋深、使用功能和周边环境等因素。开挖技术按是否挖除地表表面的土体分为明挖法和暗挖法。其中明挖法适合埋设浅、开发规模大的地下工程;暗挖法适合埋设大、断面面积较小的隧道工程。

早期明挖法多直接放坡或采用刚度较小的围护结构支护开挖,属于顺做明挖法。随着地下开发逐渐向深层地层推进,发展出了采用刚度较大的地下连续墙并辅以多道内支撑的开挖方式。城市地下综合体主体结构开发规模大、埋设深,且往往位于城市繁华地段,周边环境相对复杂,周边建筑物和管线对基坑开挖过程中产生的土体变形较为敏感,则多采用支护刚度更大的逆作法以保证基坑的稳定和控制周边建筑变形。

逆作法施工是在开挖过程中自上而下施工地下结构,用结构楼板替代水平支撑,在施工时先施工结构楼板,待结构强度成型后再开挖楼板下方土体,侧向支撑刚度远大于顺做法的临时支撑,可以有效约束围护结构变形。由于施工精度问题,早期的逆作法竖向支承结构仍采用临时结构,即基坑外围采用钻孔灌注桩,基坑中部采用临时柱连接工程桩。随着施工技术的不断进步,可采用计算机控制将结构柱静压入工程桩,围护结构采用深层地下连续墙技术,不仅精简了施工工序,并解决了早前逆作法基坑易渗漏的问题。现在逆作法基本采用永久结构作为支护体系,即地下连续墙作为围护结构,结构柱和工程桩作为竖向支承结构,结构楼板作为水平支撑结构。逆作法围护结构刚度大,适合深基坑开挖,稳定性好,围护结构变形小,节省建筑材料,但是出土不便、工期长、施工技术和管理水平要求高,因此基本只在大型地下工程项目中采用。

暗挖法原本多用于山岭隧道的修建,随着城市地下工程开发中小断面隧道项目增多,发展出了一些适应于城市浅埋隧道开挖的暗挖技术。

浅埋暗挖法基于新奥法的理念,针对城市地下隧道的特点,演化产生的开挖方法。浅埋暗挖法是通过管棚支护或者喷锚注浆技术改善城市地下软弱地层,以地表沉降为指导指标,在软弱地层中快速开挖的技术。浅埋暗挖法工法灵活多变,可根据不同地质条件选择不同的地层加固和开挖方法,需要的专业设备相对简单,适应性强。

盾构法采用盾构机在地下掘进,完成隧道的开挖和支护工作。盾构机可以平衡开挖面的水土压力,提供向前的掘进推动力,并完成衬砌施工。盾构机刀头可以稳定开挖面土体,控制地表沉降,特别适用于城市软弱地层中的开挖。盾构法开挖自动化程度高、开挖面安全稳定、施工速度快、人力成本低,但专业设备要求高。

1.3.2 地下工程的支护技术

城市地下空间开发逐步向深层发展,围护结构需要承载更大的土压力,并隔断自由水和承压水,这要求围护结构有更大的刚度及更好的抗渗性。传统的基坑支护方法采用临时围护结构挡土止水,围护结构只需在基坑开挖工期内发挥作用,结构刚度和耐久性都较差,无法应用到深层地下空间开发。

型钢水泥土搅拌墙技术(TRD工法)与早年应用的型钢水泥土搅拌桩墙技术(SMW

工法)原理相近,采用水泥土搅拌机械切削破碎土体并使土体与水泥浆液充分搅拌混合形成水泥土作为止水帷幕,在水泥土搅拌墙中插入 H 型钢形成刚度较大的围护结构。型钢水泥土搅拌墙围护结构在地下室施工完成后,可以将 H 型钢从水泥土搅拌墙中拔出,使钢材可以再度利用。传统的 SMW 工法采用常规三轴水泥土搅拌机械,其有效搅拌加固深度约为 30m,不能满足超深基坑的围护要求;TRD 工法采用链式纵向切割技术,有效加固深度可达 60m,在切割刀具安装完成达到设计深度后可快速切削搅拌土体形成连续墙。该工法与常规的围护形式相比工期短,施工过程污染少,场地噪声小,且节约社会资源,近年来在深基坑工程中得到了大量的应用。

TRD 工法采用液压马达驱动链锯式切割箱,分段连接切削土体至设计深度,在切割箱底部注入固化液使周围土体与之搅拌混合,形成较高强度的水泥土,搅拌均匀后水平横向挖掘推进,形成高质量等厚度水泥土搅拌墙,可用作深基坑的止水帷幕。在水泥土搅拌墙中插入型钢提高搅拌墙的刚度和强度后,水泥土搅拌墙也可作为深基坑的围护结构。

传统支护技术采用临时结构作为围护结构,项目建设完成后围护结构便废弃在项目地块中,材料浪费严重且成本高企。地下空间开发逐渐转向深层开发后,采用临时结构作为围护结构的材料浪费和成本问题愈发严重。因此逐渐发展出主体结构与围护结构相结合的技术。该技术可以减少混凝土等材料的使用,缩短建设周期,节约社会资源,降低开发成本,是深层地下空间开发的重要建设技术。

根据主体结构替代围护结构构件位置的不同,可以将该技术分为结构外墙与围护墙体相结合技术、水平梁板结构与内支撑相结合技术和结构柱与内支撑竖向支撑结构相结合技术。实际工程应用中可以根据场地条件、施工工期等因素选择其中一项或多项技术。结构外墙与围护墙体相结合的技术又可称为二墙合一技术,提高结构外墙的抗渗性还可以将结构外墙作止水帷幕使用,达到三墙合一效果,可以大幅降低施工成本和施工工期,内支撑仍可采用传统临时混凝土支撑,施工时可采用顺作法施工,因此两墙合一技术应用最多且最为成熟。利用梁板结构作为基坑内支撑结构及利用结构立柱作为基坑内支撑竖向支承结构技术则应用相对较少,采用该方法需采用逆作法施工,施工组织管理要求较高,需对施工期间交通组织、出土安排、结构构件施做等有科学系统的统筹,适合场地局限、周围环境变形敏感的项目。

1.3.3 地下工程的抗浮技术

地下空间开发逐渐向深层空间发展,地下结构在承压水作用下的抗浮问题也愈发突出。传统地下结构抗浮技术有增加配重,降低水头及设置抗拔基础等方法,其中抗拔基础应用最多也相对可靠。常用的抗拔基础有抗拔锚杆和抗拔桩。抗拔锚杆虽然有造价低廉、施工简便等优点,但由于单根锚杆能提供的抗浮力较小,在深层地下空间中即使大量布置仍可能达不到抗浮设计要求。因此地下综合体大规模开发地下空间常采用新型抗拔桩技术。普通直桩的抗拔力主要来自桩周土的摩阻力,因此能提供的抗拔力十分有限。新型抗拔桩技术考虑增大桩抗拔受力面积或增大桩周土对桩的约束粘结力以提高桩的抗拔能力。

一般认为扩底抗拔桩在承受上拔力时桩身摩阻力先发挥作用,达到承载力极限后由桩体扩大头处周围土体承担,直至周围土体局部剪切破坏,扩底桩达到抗拔承载力极限状态。因此扩底桩的上拔 $Q-s$ 曲线在荷载较小时与普通直桩曲线相近,当荷载较大时扩底处逐渐发挥作用,较一般的直桩有更大的抗拔承载力。软土地区扩底抗拔桩多为长桩,在上

拔过程中产生的位移较大,回弹量较小,一般考虑正常使用状态的位移量来确定抗拔承载力。

扩底灌注桩现多采用 AM 全液压旋挖钻孔扩底工法,可使用计算机图像监测管理系统使成孔扩孔过程稳定可靠。该工法先用钻机打设到设计深度后,更换扩底铲斗并在设计标高处扩底,扩底的位置、尺寸信息均可输入计算机,并通过计算机直接操作机械完成。扩孔桩扩孔位置灵活,可根据抗浮需要在桩身上多次扩孔。

在砂土地层中,钻孔灌注桩成孔较为困难,桩身质量难以保证,也难以采用 AM 工法进行扩底,更换机具和扩孔过程中都有可能引起孔壁坍塌,不仅难以保证扩孔处质量,新增的工序甚至会增加缩颈、断桩的风险,使桩体质量可靠性下降。在砂土地层中不适宜采用扩底灌注桩工法,而多采用桩侧后注浆抗拔桩技术。

桩侧后注浆抗拔桩是在灌注桩成桩后通过预先埋设在桩身内的注浆导管和桩侧注浆器对桩周进行注浆,改善桩身与桩周土的接触界面特性,进而提高承载力。扩孔抗拔桩的抗拔力提高集中在扩大头处,桩侧后注浆抗拔桩全桩长范围内摩阻力提升均较为明显,桩侧后注浆法可靠性更高。当桩径较大、桩身较长且周边土性质较好时宜用桩侧后注浆法。桩侧注浆的施工重点在于侧注浆阀的制造、预埋和保护,需在施工环境中重点关注并予以保护。

参考文献

- [1] Robert E. Witherspoon, Jon P. Abbett, Mixed-Use Development: New ways of land use [M], Urban Land Institute, 1976
- [2] 刘建航,侯学渊等. 基坑工程手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [3] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [4] 夏明耀,曾进伦. 地下工程设计施工手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [5] 杨其新,王明年. 地下工程施工与管理 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005
- [6] 孙利民. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [7] 吴念祖. 虹桥综合交通枢纽地下工程技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010
- [8] 缪宇宁. 上海虹桥综合交通枢纽地区地下空间规划 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (2): 243-249
- [9] 王卫东. 城市岩土工程与新技术 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7 (1): 1274-1291
- [10] 郑刚. 地下工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011
- [11] 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会. 深基坑支护技术指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- [12] 高迪国际出版有限公司. 城市综合体 [M]. 南京: 江苏人民出版社, 2012
- [13] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012

第 2 章 地下水与土的工程性质

2.1 概述

地下工程的勘察、设计、施工过程中,地下水问题始终是一个极为关注的问题。地下水既作为岩土体的组成部分直接影响岩土的性质与行为,又作为地下建筑工程的环境问题影响地下建筑工程的稳定性和耐久性。在地下工程设计时,必须充分考虑地下水对岩土及地下建筑工程的各种作用。施工时应充分重视地下水对地下建筑工程施工可能带来的各种问题并采取防治措施。

在土力学研究中,地下水问题是一个极为重要的问题。由于土骨架是由颗粒组成,颗粒之间是连通的孔隙,在饱和土体中,自由水可以在水头差作用下在土孔隙中流动,由水头高处向低处流,产生渗流现象。同时,地下水作为岩土体的组成部分对工程的影响很大。土的应力、变形、强度及稳定等问题都与土中水的运动和渗流有关,施工过程中应充分重视地下水渗流对地下工程建设带来的影响,并采取相应的防治措施。

随着我国经济建设的发展与对外改革开放的需要,各大城市不断兴建各类高层、超高层、地下轨道、地下商场等工程,在工程建设中由地下水引发的环境土工问题屡见不鲜。据调查统计,在全国各地发生的建筑工程事故中,以地下水的作用在地下工程失事中占多数,如土坡失稳、隧道事故、流砂、砂土液化、井点降水引起的道路或建筑物开裂,对邻近建筑物的破坏作用等。此类事故的苗头不易察觉,一旦失事,难以补救,甚至造成灾难性的后果。

因此,有必要从土体的内部细微结构来分析地下水及其在工程中的角色,进一步揭示土体在地下水作用下的特性及作用机理,并进行理论和实践上的讨论、分析与总结,汇总资料为工程建设提出指导性建议。

本章突破传统文献中分析地下水与土的工程性质研究的常规方法,传统的计算理论往往是基于连续介质假定的基础上发展起来,从宏观上获取土体性状公式,难以真实描述土体内部的受力及变形的机理。而以土体颗粒的微观研究为基础对土与水的关系进行分析,考虑的是非连续性问题,更能体现土体的真实情况,传统研究考虑的是一个整体,忽略了土体内部的结构性,微观强调的是颗粒之间的结构性。因此,从土体微观研究中获取地下水与土的工程性质,与传统的研究相比,有其独特的一面,建立基于微观结构特性的地下水与土的工程性质计算和分析,将对岩土工程有极大的贡献。

2.2 基于微观结构的软土孔隙率和接触面积率

2.2.1 软土微观孔隙率

2.2.1.1 软土三维微观孔隙率定性评价及定量计算方法

图 2-1 中是软土某孔洞的微观 SEM 图像,放大倍数为 6000 倍。从图中可以看到,软

土孔隙在微观图像中的灰度由深到浅颜色是逐渐减小的，在孔隙底层，灰度最大，颜色最深，在孔隙敞口处，颜色最浅，对应的灰度最小。从切取的试样看，孔洞由底向上其断面面积是在逐渐增大的。

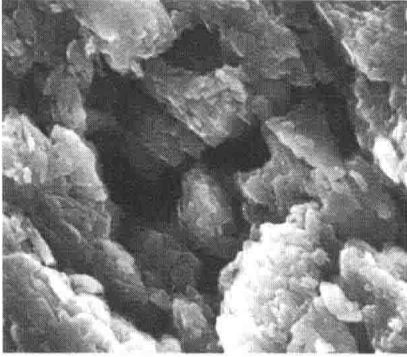


图 2-1 软土微观孔隙图

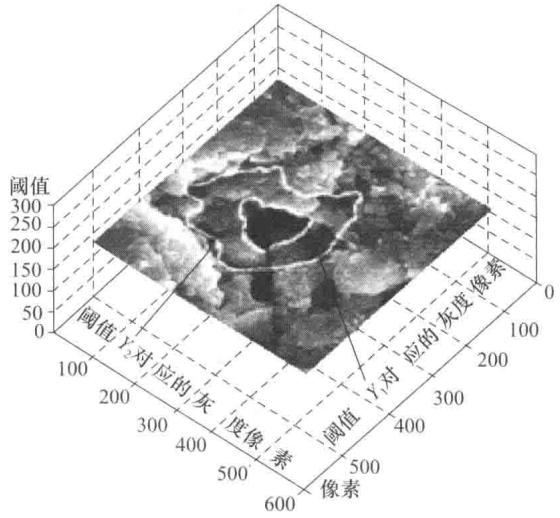


图 2-2 三维孔隙率计算模型

在 SEM 图像中的，图像的大小通过像素来表达的，但图像颜色的深浅是由灰度来表达，不同的灰度由不同的阈值控制，阈值的取值范围是 0~255，取最小时代表的亮度在最深，随阈值的增大，亮度由深到浅变化。建立如图 2-2 所示三维空间模型，平面方向由图像的像素来表达，竖直方向的高度由阈值来表达，图中所示为某土样 SEM 图片，中间部分为一不规则孔洞，现预计算该孔洞的像素面积，采用微积分的积分思想，对不规则形体求体积，只要有每个断面上的面积，然后乘以相应的高度就能得到体积，而 SEM 图像中不同的阈值刚好对应不同断面上孔洞的面积，将阈值缩小到足够小，就可以得到该不规则体的体积。假设某阈值 Y_1 下对应的灰度为图中所示小圈包围的面积 A_1 ，阈值 Y_2 下对应的灰度为图中大圈包围的面积 A_2 ，这两个阈值下孔洞的体积可由下式来描述：

$$V_1 = \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \times (Y_2 - Y_1) \quad (2-1)$$

由微积分思想，只要阈值 $(Y_2 - Y_1)$ 的值足够小，那么 A_2 与 A_1 就很接近，求得的孔隙体积就逼近真实的体积，把求解推广到整个孔隙可以得到孔隙体积 V_{3D} 为：

$$V_{3D} = \sum_{i=1}^{255} \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) \times (Y_i - Y_{i-1}) \quad (2-2)$$

从而得到土体任意阈值灰度下的三维孔隙率 n_{3D} 为：

$$n_{3D} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) \times (Y_{i+1} - Y_i)}{(Y_m - Y_0) \times S_A} \quad (2-3)$$

式中 m 为阈值分割数， Y_m 为阈值， S_A 为 IPP 分析时选取的区域像素，为一定值，对一次求解，可以固定选取同一像素大小的区域进行分析。由量纲分析原理知，像素在比值中约去了，上式求得的结果可以代表土体的三维孔隙率。又由于初始阈值 Y_0 等于 0，所以上式变为：

$$n_{3D} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) \times (Y_{i+1} - Y_i)}{Y_m \times S_A} \quad (2-4)$$

2.2.1.2 孔隙数量、大小及变化趋势的三维体现

软土微观图像的三维孔隙计算模型是否符合实际情况呢？目前已经有不少研究学者用其他方法做过了相关的研究，并取得了一定的成效。其中在软土微观孔隙研究中取得的主要成果有：王宝军等利用 GIS 软件对 SEM 图像进行三维可视化分析，分别研究了土样孔隙度的二维和三维计算方法。张先伟等利用 Matlab 计算了基于灰度的三维孔隙率。袁则循等提出利用数字地形模型（DTM）计算三维孔隙度的方法，该方法无需选取阈值对图像进行分割，避免了由于阈值选取引起的统计误差。李涛等利用微观结构试验，提出了一个计算红黏土孔隙比的计算模型。

图 2-3 是其中一张放大 1600 倍后的软土微观图像，图 2-4 是阈值取 100 时对应的二值灰度图，图中白色区域为孔隙，根据统计结果，对应于该阈值灰度的孔隙个数有 1091 个，最小孔隙像素为 10，最大孔隙像素为 8554，所有孔隙像素和为 252663，总像素为 903309。

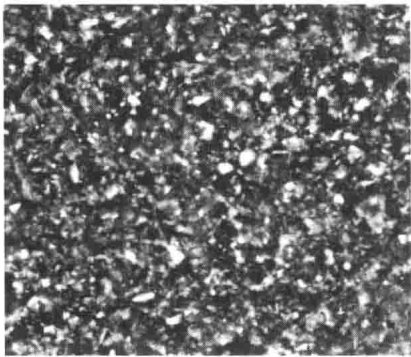


图 2-3 软土微观原图

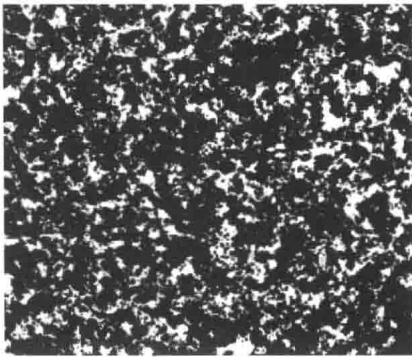


图 2-4 软土二值化微观图

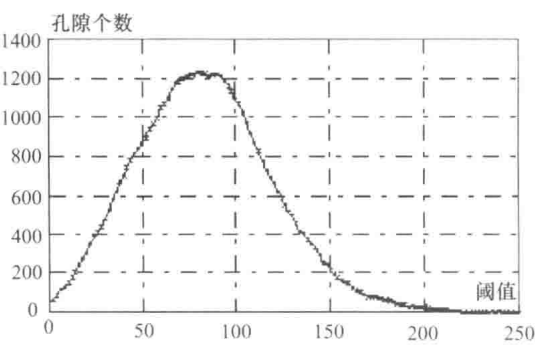


图 2-5 孔隙数量随阈值变化曲线

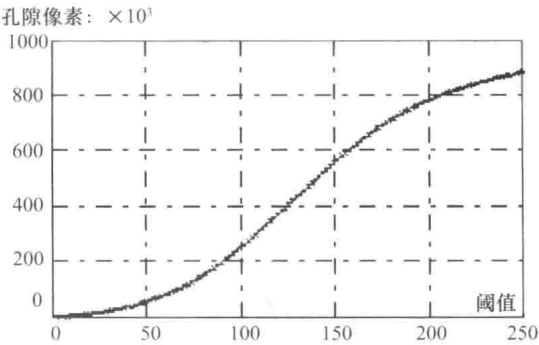


图 2-6 孔隙像素随阈值变化曲线



图 2-7 颗粒表面三维显示（王宝军，2008）