

New Technology of Construction of
Large Span Underground Space

大跨地下空间 建造新技术

乐贵平 刘 军 贺美德 金 鑫 编著



中国建筑工业出版社

北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目 (The Project
of Construction of Innovative Teams and Teacher Career Development for
Universities and Colleges Under Beijing Municipality: IDHT20130512)

大跨地下空间建造新技术

乐贵平 刘 军 贺美德 金 鑫 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大跨地下空间建造新技术/乐贵平等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-112-20966-8

I. ①大… II. ①乐… III. ①地下建筑物-大跨度
结构-结构设计 IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 162465 号

责任编辑: 李玲洁 田启铭

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 党 雷

大跨地下空间建造新技术

乐贵平 刘 军 贺美德 金 鑫 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 字数: 320 千字

2017 年 9 月第一版 2017 年 9 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-20966-8
(30550)

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

目前,国内城市地下空间结构建造的主要方法有明挖法、矿山法和盾构法,对大跨度地下空间结构的施工方法多为明挖法和矿山法,但是前述三种方法在实际使用过程中均受到周边环境、工程地质和水文地质条件等诸多因素不同程度的制约。

明挖法对于城市地面交通繁忙、周边建筑物众多、地下管线密集的工程环境下修建地下空间结构,施工时必须进行交通疏导、管线改移等,施工产生的噪声、振动等也会对附近居民的生活和工作造成干扰,使得施工所受干扰大、工期较长、工程间接费用高。矿山法灵活多变,具有对地面建筑物及地下管线影响不大、拆迁占地小、扰民少等优点。在地下空间结构工程地质和水文地质条件差、地下管线密集、周边建筑物密集的环境中,采用矿山法进行大跨度的地下空间结构施工对周边环境和结构上方道路及管线的安全控制要求较高,从而使得施工风险也明显增大。盾构法具有施工速度快,不需拆迁地面建筑物和地下管线,施工期间噪声小、振动小、不影响地面交通等优点。但是盾构法施工存在断面固定、盾构机对地层变化适应性差等缺点,尤其是在城市轨道交通建设中,盾构区间隧道与车站施工在工期上、组织上的矛盾,盾构机频繁调头拆装等要求,使得盾构法快速施工的优势得不到发挥。

随着城市建设的不断加快,城市地下空间结构的建设也必然受到周边建筑物多、地下管网密集、地面交通繁忙、施工工期要求等诸多因素的制约。而《大跨地下空间建造新技术》一书,正是为了克服现有技术中存在的不足而编著的。

本书侧重一系列专利技术的介绍,并紧密结合一系列工程实践,真实、全面、透彻地阐述了一系列地下工程大空间建造的新技术,开阔了工程技术人员思路、提高了工程技术人员解决实际工程问题的能力,重点突出了新颖性、先进性和简明性。

洞槽桩和桩墙法一章,主要介绍了洞槽桩法和桩墙法。洞槽桩法解决了城市地下空间结构施工时受周边建筑物多、地下管网密集、地面交通繁忙等诸多因素制约的问题,同时在保证安全的前提下,有效减少了对围岩的多次扰动,使得地表沉降、结构变形都得到了较好的控制,降低了施工风险,实现了盾构隧道管片重复利用,减少了废弃工程量,缩短了施工工期,降低了工程造价。桩墙法解决了现有的地下空间施工方法存在传力途径复杂、施工进度慢、结构整体性差、对周边环境影响大的技术问题。其支护体系受力明确,简单明了,可通过模拟和计算在施工之前对施工风险进行控制。另外,该方法灵活多变,不受地质条件限制,适应性强,可根据工程功能需求,修建多种结构形式,为今后地下空间的建造提供了一种广泛适用的新方法。

盾构-矿山法复合一章,阐述了将盾构法与矿山法有机结合起来,充分发挥了盾构法与矿山法两种工法的特点。不仅可以优化地铁建设车站和区间的设计,实现车站暗挖和区间盾构的有机结合;而且可以实现狭窄道路条件下的线路布置,以及城市密集建(构)筑物环境下的快速高效施工。该工法对于提高地铁建设质量、加快地铁建设速度、提高盾构

设备利用率、降低工程施工风险和对地面交通的影响、增加车站站位选择的灵活性、增强社会效益及环境效益,都有重要的现实意义。该工法适用于在城市中建造地铁车站、大断面隧道、地下交通等地下工程,可修建单层单跨、单层多跨、多层多跨等各种形式的地下工程结构。另外,研究成果可以形成一整套创新、适用的地铁综合建造技术,为城市复杂建设环境条件下地铁建设提供新的思路和技术经验。

大直径盾构扩挖法一章,介绍了扩挖大直径盾构隧道修建地铁车站能够在确保结构安全的条件下,减小工程体量、缩短工期、减少对周围环境的影响,同时还可以结合邻接车站的施工组织,充分发挥盾构法和矿山法的优势。这一章以北京地铁 14 号线将台站为工程背景,从车站主体结构施工方法、扩挖形式、施工步序、结构空间特点、现实可行性、工期造价、工程体量、结构受力、地表沉降等方面,对扩挖施工方案进行对比,再结合数值方法比选得出最优方案为 PBA 法扩挖方案。在方案比选的基础上,对 PBA 法扩挖大直径盾构隧道修建地铁车站的过程进行风险源辨识,提出相应的风险控制技术措施。进一步结合数值模拟和现场实测数据,对扩挖过程进行施工力学分析,详细论述了车站主体结构施工对邻近地下管线和地表沉降的影响规律,提出了符合工程实际的管线变形和地表沉降控制技术措施和控制标准。

预注拱法一章,重点介绍了预切槽工法在复杂地质条件下特别是松散地层中较其他工法在控制地表沉降和降低噪声方面所具有的明显优势。该工法具有较好的灵活性,在必要时用预切槽方法施工的隧道可以灵活地改变施工方法,与其他工法综合使用,适用于地质情况多变的隧道的修建,因此该工法在我国有着广阔的应用前景。这一章通过模型试验、数值模拟及理论分析,对预切槽工法施工过程中的土体位移、土压力、结构受力的变化规律以及结构设计做了深入的研究,得到了一些有益的结论,但是也存在一定不足。在我国,对于预切槽工法的研究尚处于初级阶段。为了促进该工法在国内的大量推广和应用,有必要对该工法进行进一步研究。

敞口式盾构法一章,选定了北京地铁 6 号线二期工程 15 标郝家府站至东部新城站右线约 388m 长区间作为试验段,开展敞口式盾构掘进技术及相关施工辅助措施研究。采用数值分析、现场测试等方法,探究敞口式盾构适应性、始发、到达、开挖面稳定控制、掘进控制和地层扰动测量等技术。最后提出了选取含漂石卵石地层试验段、优化敞口式盾构设备和施工辅助措施、优化同步注浆工艺、探究盾构分仓形式以及出土模式等建议。

限于编著者水平,书中错误难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地下工程的类型与特点	1
1.1.1 地下工程的类型	1
1.1.2 地下工程的特点	4
1.2 地下工程施工方法	5
1.2.1 明挖法	5
1.2.2 矿山法	6
1.2.3 盾构法	8
1.3 大跨地下空间	11
第 2 章 洞槽桩法和桩墙法	13
2.1 洞槽桩法	13
2.1.1 概述	13
2.1.2 施工工序	13
2.1.3 案例	14
2.2 桩墙法	24
2.2.1 概述	24
2.2.2 施工工序	24
2.2.3 案例	25
第 3 章 盾构-矿山复合法	33
3.1 概述	33
3.2 盾构与 PBA 复合方法	33
3.2.1 概述	33
3.2.2 施工工序	33
3.3 盾构与 CRD 复合方法	35
3.3.1 概述	35
3.3.2 施工工序	35
3.4 盾构与导洞复合方法	38
3.4.1 概述	38
3.4.2 施工工序	38
3.5 案例	41
第 4 章 大直径盾构扩挖法	45
4.1 概述	45
4.2 工程概况	47
4.3 大直径盾构扩挖方法	48

4.3.1 盾构过站面临的问题..... 48

4.3.2 大直径盾构扩挖方法的创新思路 50

4.3.3 大直径盾构扩挖方法的方案比选 52

4.3.4 PBA 法扩挖大直径盾构隧道修建地铁车站方案比选 57

4.4 大直径盾构 PBA 法扩挖风险及控制措施 70

4.4.1 风险辨识与风险控制措施概述 70

4.4.2 风险辨识 73

4.4.3 风险控制措施 76

4.5 监控量测及分析..... 83

4.5.1 地表沉降监测及分析..... 83

4.5.2 地表沉降数值分析 86

4.5.3 管线沉降监测及分析..... 91

4.5.4 管线沉降数值分析 98

4.5.5 小结 111

第 5 章 预注拱法..... 113

5.1 概述 113

5.2 预注拱法发展历程 113

5.2.1 预注拱法的发展历史 113

5.2.2 预注拱法在我国的发展前景 116

5.3 预注拱法基本原理及适用条件 117

5.3.1 预切槽机基本组成 117

5.3.2 预注拱法工艺过程及特点 118

5.3.3 预注拱法与其他方法的比较 123

5.3.4 预注拱法适用条件 129

5.4 预注拱法三维仿真力学模型试验 130

5.4.1 模型试验方案设计和实施 130

5.4.2 模型试验结果及工法对比 149

5.5 工程案例 167

第 6 章 敞口式盾构法..... 172

6.1 概述 172

6.2 敞口式盾构机工作原理及适用范围 174

6.2.1 工作原理 174

6.2.2 适用范围 176

6.3 敞口式盾构机及关键技术 177

6.3.1 敞口式盾构机构造组成 177

6.3.2 液压、电气及控制系统 186

6.3.3 关键技术分析..... 187

6.4 工程应用 190

6.4.1 工程简介 190

6.4.2 地质情况 191

6.4.3 敞口式盾构机掘进参数及关键部件分析 192

6.4.4 施工中的重难点及解决方案 195

参考文献..... 199

第 1 章 绪 论

地下工程为一个泛指的技术领域，凡在地层内部天然形成或人工修筑的地下建筑物（或空间）均可称为地下工程，对人类来说，地下空间也是一种资源。地下空间的利用与城市发展是紧密关联的，利用地下空间的主要原因为：①保护城市历史文物与景观；②城市空间不足；③充分利用与发挥地下空间的优越性。地下空间的利用一般是先开发地下 10m 左右的空间，然后是 20m 左右的空间，其次是 20~50m 左右的空间，以后将逐步发展到 100m 以内的空间。

1.1 地下工程的类型与特点

1.1.1 地下工程的类型

地下空间的作用和价值被人们重新发现后，认为是一种人类仅有的少数尚未被充分开发的自然资源。地下空间资源的开发，从理论上说几乎是无限的。瑞典曾有人估计，在 30m 深度范围内，开发相当于城市总面积 1/3 的地下空间，就等于全部城市地面建筑的容积，即不需扩大城市用地，就可使城市的环境容量增加 1 倍，说明城市地下空间资源有很大的潜力。尽管城市地下空间资源很丰富，但毕竟不能代替地上空间，而只能作为地面空间的扩展或补充，二者统一起来，形成立体化的城市。从世界上这一领域比较先进国家的实践经验看，城市地下空间类型相当广泛，大致可以归纳为以下九类。

1. 居住空间

在城市中，有不少居民居住在建筑物的地下室或半地下室。由于居住环境一般不如地上，一旦有可能，居民都希望住到地上去。人们长期在地下居住，对于健康到底有没有影响，至今尚无科学的解释。日本法律规定禁止在地下室中住人，也是出自这种考虑。但是，现代科学技术完全有可能使地下居住环境得到根本的改善，因此地下居住空间仍有一定的发展潜力。20 世纪 70 年代初，美国从建筑节能的角度出发，开发了一种利用太阳能进行空气调节的半地下覆土住宅。房屋向阳的一面大量开窗，屋顶和其他外墙则在施工后覆土，以改善围护结构的热工性能，达到节能的目的，一般可节约常规能源 50% 以上，又可充分利用斜坡地形，因而得到一定程度的推广。

2. 业务空间

办公、会议、教学、实验、医疗、展览、图书阅览等各种业务活动，都可以在地下空间中进行。这些一般不需要天然光线的活动内容，当具备全面空气调节条件时，在地下空间中进行是比较合适的。美国旧金山市的莫斯康尼中心，是一座集展览、会议于一体的综合性大型地下建筑，地下展览大厅面积达 23000m²，采用 90m 跨度的预应力拱，厅内无

柱,能同时容纳 2 万人活动;还有能容纳 50~600 人的大小会议厅 30 多个,以及能为 6000 人提供饮食的食堂。这座建筑造价很高,但由于经济效益显著,两三年即可收回建设投资。美国明尼苏达大学土木与矿物工程系的地下系馆,包括各种教室、实验室和办公室,总面积 14100m²,90%在地下,并采取了各种节能措施,安装了日光和景物两个传输系统,成为迄今为止汇集各种最新技术的大型地下公共建筑的范例。美国哈佛大学一座图书馆由于采取了地下方案,很好地解决了校园用地不足和保留校园古典建筑传统风格的问题,对于各种珍贵图书文献的保存也非常有利。

3. 商业空间

在瑞典、加拿大、德国、法国等的一些大城市,地下商场、商店很多,日本的地下商业街更为著名。对于商业活动来说,由于不需要天然光线,人们滞留时间相对较短,在地下空间中进行是很合适的。同时,大量人流被吸引到地下去,对改善地面的交通与环境也都是有利的。在气候严寒多雪或酷热多雨地区,购物活动在地下空间中进行,不受外界气候的影响,故特别受到居民的欢迎。由于商业的营业额大,利润率高,因此如果布置和经营得当,有可能在一定时期内收回建设投资,或用商业收入弥补其他地下设施(如交通)收入的不足,经济效益、社会效益都比较显著。

4. 文娱空间

像电影、戏剧、音乐、运动、游泳等文化、娱乐、体育活动,即使在地面上,也多采用人工照明,因此在地下进行更为方便。地下影剧院由于人员集中,安全问题较大,目前除我国、法国、加拿大有少量外,在其他国家尚不普遍。在瑞典、挪威、芬兰等一些北欧国家,由于地质条件较好,在城市和城郊的山体岩石中,修建一些跨度较大的地下音乐厅、体育馆、游泳池、冰球馆等,对开展群众性文娱、体育活动十分方便,同时还都准备在战时改作公共的人员掩蔽所。

5. 交通空间

城市地下铁道、高速公路隧道、地下步行道以及地下停车场等,都属于交通空间。由这样一些设施组成的城市地下交通网,客运能力强,例如一条地铁线路单向每小时客运量为 4 万~6 万人,为地面公共汽车运量的 8 倍;行车速度快,例如快速地铁的旅行速度比常规地铁快 2~3 倍,比地面公共汽车快 5~6 倍。因而对于缓解地面上的交通矛盾十分有效,再加上安全、准时等优点,成为迄今为止城市地下空间利用的最主要内容之一,也是在城市生活中起作用最大的一种地下空间。目前,全世界已有 100 多个左右城市建成或正在修建地铁,已运营的总长度达上万公里。到 2016 年底我国地铁运营里程 3748.67km,其中上海达 617km,已成为目前世界上运营线路最长的城市。北京运营里程 554km,广州 308km,都进入了世界地铁运营里程最长的城市之列。此外,伦敦、纽约、巴黎、莫斯科和东京五大城市的地铁线路里程也排在前列。

在美国的纽约、芝加哥、达拉斯,加拿大的蒙特利尔、多伦多,日本的东京等地,修建了规模相当大的地下步行道系统,有的是为了避开地面上不利的气候条件,有的是为了把各种地下交通线路的车站连接起来,以便于换乘。其中,加拿大多伦多市的地下步行道系统规模最大,把市中心区 30 幢高层办公楼和 5 个地铁车站在地面连通起来,以克服严寒积雪给地面交通造成的困难。

此外,地下空间还为城市静态交通服务在解决城市停车问题上起重要作用。例如,巴黎市

中心区有 80 座左右地下停车场,拥有近 10 万个停车位,使市中心区停车非常方便;日本全国有公共停车场 279 个,其中 107 个在地下,占 38%,今后还将着重发展地下停车。

6. 公用设施空间

城市中的供水、排水、动力、热力、通信等系统的管道、电缆等,一般都埋设在地下,占用一定的空间。这可以说是城市地下空间利用的一个传统内容。欧洲和我国的一些城市,迄今还保留着几百年前修建的砖砌城市下水道。通常,各种管线多是按各自的系统直接埋设在土层中,检修不便,容易损坏,并使城市道路经常受到破坏。近年来在国际上提倡修建一种多功能的地下管廊,在日本称为“共同沟”,将各类管线综合布置在可通行的廊道中,不但可避免直埋的缺点,还有利于地下空间的综合利用。此外,各种公用设施系统中的处理设施,如自来水厂、污水处理厂、垃圾处理厂、变电站等,也适于布置在地下空间中,对于节省用地、减轻污染都是有利的。瑞典斯德哥尔摩市建有几座大型污水处理厂,均在地下岩层中,使全市的污水基本都能得到处理。

7. 生产空间

除某些易燃、易爆性生产或污染较严重的生产外,其他类型的生产一般都可在地下进行,特别是精密性生产,在地下环境中更为有利。许多国家将水力发电站的厂房布置在地下,也有的将核电站建在地下,比在地上更为安全。在城市中,在地下进行某些轻工业或手工业生产,是完全可能的。我国一些城市利用人防工程进行纺织、制造类型的生产,取得了较好的效益。当然,在地下建造大型厂房或在地下进行工艺较复杂的生产,要付出较高的代价,因此除为了安全或战备等特殊情况下,这样做是没有必要的。

8. 贮存空间

地下环境最适合于物资的贮存,因为稳定的温、湿度条件是贮存许多物资所必需的。在地下贮存粮食、食油、食品、药品、燃油等,损耗小、质量高、贮存成本低、经济、节能效益高、节省城市仓库用地,因而得到了广泛的发展。在一些发达国家的大城市中,冷冻的半成品食品非常普及,消耗量很大,地下冷库为这些食品的贮存、周转提供了廉价和方便的条件。

瑞典等一些北欧国家,城市多直接建在基岩上,因此有可能在市区内建造大型地下燃油库、热水库等,直接为地上居民服务,运输距离大为缩短。在地质条件有利时,还可在地下大量贮存饮用水,海滨城市则可以贮存淡水。此外,把某些危险品和有害的城市废弃物贮存在地下深层空间中,是比较安全的。

9. 防灾空间

地下空间对于各种自然的和人为的灾害都具有较强的防护能力,因而地下空间被广泛用于防灾。中国、瑞士、瑞典、芬兰等国建造的大量核掩蔽所,占这些国家城市地下空间利用的较大比重。瑞士、瑞典等国的核掩蔽所,按每人一个床位的标准,已足够全国人口的 80%~90%使用,到 21 世纪末将达到 100%。

此外,地下建筑受地震的破坏作用要比地面建筑轻得多,因为地震波的加速度在地表面处最大,越深则越小,在地下 30m 处仅为地表面处的 40%。像日本等多地震国都把地下空间指定为地震时的避难所。

从以上地下空间利用的多种内容看,城市地下空间较适合于人在其中短时间活动的内容和不需要天然光线的内容,如出行、购物、文娱、体育等。对于根本不需要人或仅需要

少数人进行管理的一些内容，如贮存、物流、废弃物处理等，则更为合适。

从目前世界上发达国家在地下空间利用方面的情况，可以看到我国的差距，要借鉴发达国家的经验：

北欧各国如瑞典在地下空间利用方面，除了住宅的地下室及城市设施外，可以看到很多利用坚固的岩石洞穴建设的城市构筑物，其中有地下街道、地铁隧道、公用设施沟、停车场、空调设施及地下污水处理厂。生产设施除地下工厂外，还有地下核电站、石油储罐、食品仓库及地下避难所，还有一系列的地下商城。

美国将很多设施置于地下，地下空间的利用是多方面的、广泛的。例如，将城市地下空间利用点、线、面以整体网络型组合起来。其中生活设施有考虑到节约采暖、空调费用的地下住宅及复式住宅；城市设施主要从更新城市机能及节约能源的角度考虑，除地下街道及地下铁路、道路隧洞外，还有考虑到与自然比较协调及采光要求的半地下式大学；贮藏设施除食品贮藏外，还正式研究开发保存放射性废料的设施；交通设施有道路隧洞、地下停车场等；而地下核防护设施则居世界之首。

日本由于国土面积较小，地下空间的综合利用虽比北欧等国起步晚，但是地下街道、地下车站、地下铁道、地下商场的建设规模和成熟程度可以认为已居世界领先地位。

我国地下空间利用最早始于西北黄土高原，至今还有 4000 多万人居住在延续数千年的窑洞建筑中，在黄土层中还修建过结构简单、圆筒拱形的地下粮库。但是有计划、大规模的建设则是 20 世纪 30 年代的事。我国在 20 世纪 60 年代、70 年代建设了一批地下工厂、早期人防工程和北京、天津地下铁道。20 世纪 80 年代各大城市陆续规划、修建了一些适合我国特点的地下综合体工程，集商业、交通、人行过街和停车场等服务设施于一体。如吉林市大世界地下商场、沈阳市车站广场地下街等。上海、南京、广州、青岛等城市已经建造或规划建设地下铁道。与此同时，城市高层建筑地下室随着城市中心及居住小区的开发而大量发展。

1.1.2 地下工程的特点

地下空间开发利用与地上空间开发利用相比有其独到之处。地下空间的恒温性、恒湿性、隔热性、遮光性、气密性、隐蔽性、空间性、安全性等远远优于地上空间。但是，地下空间一经建成后，对其再度改造与改建的难度是相当大的，不可能恢复原样，单就这一点它又远不如地面建筑容易改造与改建，因此它有相当强的不可逆性。另外，地下构筑物的建设成本高、工期长，难于利用太阳光及天然景观，方向性感观较差。所以，现在人们仍对在地下工作与生活持一种偏见。从这种意义上来讲，就要求对地下空间利用计划持慎重态度，要有长远眼光，要经得起后人及时间的检验，对其计划进行多方面论证，认真评估后才能实施。

1. 地下工程的优点

- (1) 有效的土地利用；
- (2) 环境与利益：地表面空间开放，与自然景观协调一致；
- (3) 有效的往来与输送方式；
- (4) 节省能源：地下处于稳定的温度和湿度；
- (5) 抵御自然灾害：强风、龙卷风、地震等；

- (6) 噪声和振动的隔离：较少或完全不受噪声和振动的影响；
- (7) 减少维修管理工作。

2. 地下工程的缺点

- (1) 获得自然采光的机会有限；
- (2) 进入和往来的限制；
- (3) 心理不良影响；
- (4) 通风、排水、防水困难；
- (5) 场地局限；
- (6) 造价高。

1.2 地下工程施工方法

我国城市地下工程建设起步较晚，随着人防、地铁、地下商场、仓库、影剧院等大量工程的建设，特别是近年来的工程实践，城市地下空间开挖技术得到了长足发展和提高，主要的开挖方法有明挖法、矿山法、盾构法，这些技术有的已达到国际先进水平。

1.2.1 明挖法

明挖法具有施工简单、快捷、经济、安全的优点，城市地下隧道式工程发展初期都把它作为首选的开挖技术，其缺点是对周围环境的影响较大。

明挖法的关键工序是：降低地下水位、边坡支护、土方开挖、结构施工及防水工程等，其中边坡支护是确保安全施工的关键技术。

基坑工程根据场地条件、施工方法、开挖方法，可以分为无支护（放坡）开挖与有支护开挖，如图 1-1 所示。

无支护开挖方式既简单又经济，适合具有较大放坡空间时应用，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。可以结合周边的具体工程环境，配合土体加固技术减少土方开挖量，不进行基坑侧壁的支护结构施作，直接进行基坑开挖。

但是在中心城区地带、建筑物稠密地区，往往不具备放坡开挖的条件。城区缺乏放坡开挖需要的足够空间，并且现有城市空间内存在邻近建（构）筑物基础、地下管线、运输道路等，尤其地下管线埋深较浅，在平面分布上很广，新建建筑物红线范围有限，因此，基坑开挖大部分情况下采用在支护结构保护下进行垂直开挖的施工方法，如：

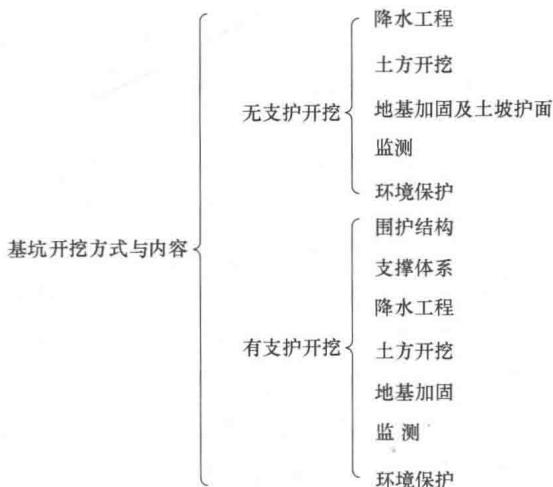


图 1-1 基坑开挖方式与内容

1. 排桩支护技术

一般有人工挖孔或机械钻孔两种方式。钻孔中灌注普通混凝土和水下混凝土成桩。支护可采用双排桩加混凝土连梁,也可采用桩加横撑或锚杆形成受力体系。

2. 地下连续墙支护技术

一般采用钢丝绳和液压抓斗成槽,也可采用多头钻和切削轮式设备成槽。连续墙不仅能承受较大载荷,而且具有隔水效果,适用于软土和松散含水地层。

3. 锚杆(索)支护技术

在孔内放入钢筋或钢索后注浆,达到强度后与桩墙进行拉锚,并加预应力锚固后共同受力,适用于高边坡及受载大的场所。

4. 混凝土和钢结构支撑支护方法

依据设计计算在不同开挖位置上灌注混凝土内支撑体系和安装钢结构内支撑体系,与排桩或连续墙形成一个框架支护体系,承受侧向土压力,内支撑体系在做结构时要拆除。

城市基坑工程由于施工空间受到限制,基坑开挖只能由上至下进行,同时支护结构也要由上至下进行施作,称之为逆作法支护结构。

盖挖法可看作一种特殊的明挖法形式,指的是边坡支护为地下连续墙、排桩灌注桩,其上为盖板所构成的框架结构,并在其保护下开挖及施工的方法。可分为由浅而深地逐层开挖、逐层做结构的盖挖逆作法以及依次开挖至底后再做结构的正作法两种。前者适用于地质条件复杂、开挖断面大的情况,后者反之。盖挖法适用于市区高层建筑密集区,具有快速、经济、安全的优点,是较明挖法对环境影响小,较暗挖法成本低的一种方法。

1.2.2 矿山法

矿山法施工的应用主要有山岭隧道的新奥法施工及城市地下工程的矿山法施工。

新奥法是把围岩和支护结构作为一个统一的受力体系来考虑,围岩既是荷载的来源,又是支护结构体系的一部分,围岩和支护结构相互作用。

新奥法施工的基本思想是:充分利用围岩的自承能力和开挖面的空间约束作用,开挖作业强调尽量减少对围岩的扰动,土质隧道采用机械或人工施工,岩质隧道采用光面或预裂爆破施工,采用锚杆和喷射混凝土作为主要支护手段,及时对围岩进行加固,约束围岩的松弛和变形,并通过对围岩和支护结构的监控、量测来指导地下工程的设计与施工。

新奥法的技术要点为:充分保护围岩,减少对围岩的扰动;充分发挥围岩的自承能力;尽快使支护结构闭合;加强监测,根据监测数据指导施工。

新奥法的基本原则为:少扰动、早喷锚、快封闭、勤量测。

矿山法沿用了新奥法的基本原理,创建了信息化量测反馈设计和施工的新理念;采用先柔后刚复合式衬砌新型支护结构体系,初期支护按承担全部基本荷载设计,二次模筑衬砌作为安全储备;初期支护和二次衬砌共同承担特殊荷载。应用矿山法进行设计和施工时,同时采用多种辅助工法,超前支护,改善加固围岩,调动部分围岩的自承能力;采用不同的开挖方法及时支护、封闭成环,使其与围岩共同作用形成联合支护体系;在施工过程中应用监控量测、信息反馈和优化设计,实现不塌方、少沉降、安全生产与施工。矿山法大多应用于第四纪软弱地层中的地下工程,由于围岩自身承载能力很差,为避免对地面建筑物和地下构筑物造成破坏,需要严格控制地面沉降量。

矿山法施工分类如下：

1. 台阶法

将结构断面分成两个或几个部分，即分成上下两个工作面或几个工作面，分步开挖。根据地层条件和机械配套情况，台阶法又可分为正台阶法、中隔墙台阶法等。该法在矿山法中应用最广。

2. CD 法（中隔墙法）

主要适用于地层较差和不稳定岩体，且地面沉降要求严格的地下工程施工。在原正台阶法的基础上增加了中隔墙。

3. CRD 法（交叉中隔墙法）

当 CD 工法不能满足要求时，可在 CD 工法的基础上加设临时仰拱，将原 CD 工法先挖中壁一侧改为两侧交叉开挖、步步封闭成环、改进发展的一种工法。

4. 双侧壁导坑超前中间台阶法（眼镜法）

是变大跨度为小跨度的施工方法，其实质是将大跨度（>20m）分成三个小跨度进行作业，主要适用于地层较差、断面很大的地下工程施工。但该法工序较复杂，导坑的支护拆除困难，有可能由于测量误差而引起钢架连接困难，从而加大了下沉值，而且成本较高，进度较慢。

5. 中洞法

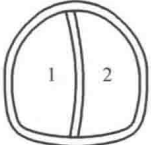
先开挖中间部分（中洞），在中洞内施作梁、柱结构，然后再开挖两侧部分（侧洞）。由于中洞的跨度较大，施工中一般采用 CD 法、CRD 法或眼镜法等进行施作。中洞法施工工序复杂，但两侧洞对称施工，比较容易解决侧压力从中洞初期支护转移到梁柱上时产生的不平衡侧压力问题，施工引起的地面沉降较易控制。

6. PBA 法（洞柱法）

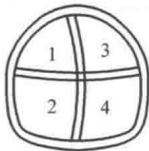
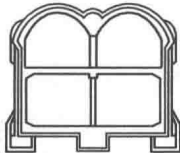
先开挖，在洞内制作挖孔桩。梁柱完成后，再施作顶部结构，然后在其保护下施工，实际上就是将盖挖法施工的挖孔桩梁柱等转入地下进行施工。

各方法之间的区别见表 1-1。

矿山法的分类 表 1-1

施工方法	示意图	适用条件	特点
台阶法		适用于较好地层的中小型断面，一般断面<8m	施工方便，速度较快，可增设临时仰拱和锁脚锚杆，对控制下沉有利
CD 法		适用于软弱地层的中小型断面，一般断面<8m	施工方便，速度较快，对控制地面沉降有利

续表

施工方法	示意图	适用条件	特点
CRD 法		适用于软弱地层且地面控制严格的中型断面，一般断面 8~12m	施工复杂，速度慢，有利于控制地面沉降，但成本较高
双侧壁导洞法		适用于软弱地层且地面控制严格的中型断面，一般断面 >12m	施工复杂，速度慢，废弃工程量大
PBA 法		适用于地层条件差且断面特大的多跨结构，如地铁站、地下停车场、地下商业街等	施工复杂，速度较慢，有利于控制地面沉降

1.2.3 盾构法

盾构法是指在盾构（Shield）的钢壳之内保持开挖面稳定的同时，在其尾部拼装管片，然后用千斤顶顶住已拼装好的衬砌，利用反力将盾构推进。

盾构可按挡土形式、开挖方式及工作面加压方式分类，如表 1-2 所示。

盾构的分类 表 1-2

按挡土形式	按开挖方式	按工作面加压方式
1. 全敞开式 2. 半敞开式 3. 密闭式	1. 手掘式 2. 半机械式 3. 机械式	1. 气压式 2. 泥水加压式 3. 削土加压式 4. 加水式 5. 加泥式 6. 高浓度泥水加压式

所谓全敞开式是指开挖面大部分呈敞露状态，没有挡土机构，根据开挖方式又可分为手掘式、半机械式及机械式三种。这种盾构机适用于开挖面自稳性较好的围岩，若围岩不能自稳则要使用使开挖面稳定的辅助工法。

半敞开式盾构机是指挤压式盾构机。密闭式是在机械式盾构机内设置挡土机构，按稳定工作面的方式不同可分为泥水加压式盾构机、土压式盾构机等。

1. 手掘系统盾构

(1) 手掘式盾构

手掘式盾构是最原始的一类盾构，其构造简单、配套设备少、造价低，为敞口式盾构。盾构顶部装有活动前檐以支护上部土体，挖土由人工从上往下进行，每隔 2~3m 设一个作业平台，可适应各种复杂地层，开挖面可以根据地质条件全部敞开，也可以采用正面支撑，边开挖边支撑。掘削下来的土砂从下部通过皮带输送机输送给出土台车，掘削工

具一般为风镐、铁锹等。手掘式盾构机具有易处理地下障碍、易于纠偏及造价低（与密闭式盾构相比，价格便宜20%~40%）的优点，但效率低、进度慢，且不宜于在含水地层中施工。

（2）挤压式盾构

挤压式盾构分为全挤压式及半挤压式两种，属于敞口式盾构。前者是将手掘式盾构的开挖工作面用胸板密闭起来，把土层挡在胸板外，没有水、土涌入及土体坍塌的危险，并省去了出土工序，可取得比较安全可靠的效果；后者是在密闭胸板上局部开孔，当盾构推进时，土体从孔中挤入盾构，装车外运，省去了人工开挖，劳动条件比手掘式盾构大为改善，效率也成倍提高，但挤压式盾构对地层的扰动较大，易引起地面变形。

（3）网格式盾构

网格式盾构是一种介于半挤压式和手掘式之间的盾构形式，也为敞口式盾构之一。这种盾构在开挖面装有钢制的开口格栅，称为网格。当盾构向前推进时，土被网格切成条状，进入盾构后运走；当盾构停止推进时，网格起到挡土的作用，有效地防治了开挖面坍塌。这种盾构对土体的挤压作用比挤压式盾构小，因而引起的地表变形也小。网格式盾构只适用于软弱可塑的黏性土层，当地层含水时，尚需要辅以降水等措施。

2. 半机械式盾构

在手掘式盾构的正面装上挖土机械和出土装置，即成为半机械式盾构。挖土机械有铲斗式、切削式和混合式三种形式。与手掘式盾构相同，盾构顶部装有活动前檐和正面支撑千斤顶。

3. 机械式盾构

在手掘式盾构的切口环部分安装与盾构直径大小相同的旋转大刀盘，对土体进行全断面开挖。它适用于各种土层，尤其适用于极易坍塌的砂性土层中的长隧道，可连续掘进挖土。由旋转刀盘切削产生的渣土经过刀盘上的预留槽口进入土仓，提升和流入漏斗后，再通过传送带运入出土车。这类盾构具有作业环境好、省力、省时、省工、效率高、后续设备多、发生偏差时纠偏难、造价高等特点。

4. 泥水加压式盾构

泥水加压式盾构就是在机械式盾构大刀盘的后面设置一道隔板，隔板与大刀盘之间作为泥水室，在开挖面和泥水室中充满加压的泥水，通过压力保持机构的加压作用，保证开挖面土体的稳定。盾构推进时开挖下来的土体进入泥水室，由搅拌装置进行搅拌，搅拌后的高浓度泥水用流体输送系统送出地面，把送出的浓泥水进行水土分离，然后把分离后的泥水再送入泥水室，不断地循环使用，其全部作业过程均由中央控制台综合管理，可实现施工自动化。其工作原理见图1-2。

泥水加压式盾构中的泥水主要起到以下作用：

泥水的压力和开挖面水土压力平衡，通常按下式设定： $\text{泥水压} = \text{地下水压} + \text{土压} + \text{预压}$ 。

地下水压实际上为掘削面地层中的孔隙水压力，一般使用观测井中的测量值，对于黏土地层而言，通常将地下水压计在土压中。土压是指掘削面地层中水平方向上的土压力。预压通常根据经验确定，主要考虑地下水压和土压的设定误差及送、排泥设备中的泥水压变动等因素。

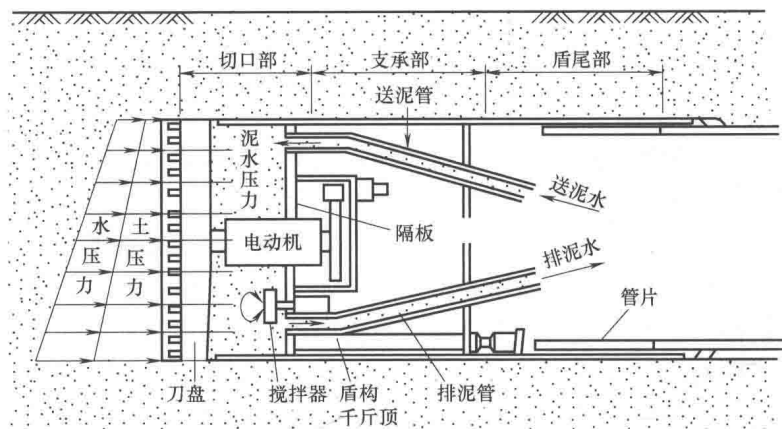


图 1-2 泥水加压式盾构机工作原理

泥水在开挖面后形成一层不透水的薄膜，使泥水产生有效的压力稳定地层；加压泥水可渗透到开挖面内的某一深度，使得开挖面稳定。

可见，泥水加压式盾构是利用泥水压力的特性对开挖面起到稳定作用。泥水要想很好地发挥上述作用，必须具备如下特性：物理稳定性好，化学稳定性好，泥水的粒度级配、相对密度、黏度要适当，流动性好，成膜性好。

通常适合采用泥水加压式盾构的土层地质条件为：粒径在 0.074mm 以下的细粒土含有率在粒径加积曲线的 10% 以上；粒径在 2mm 以上的砾石类土层含有率在粒径加积曲线的 60% 以上；天然含水量在 18% 以上；渗透系数 $K < 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。

盾构法是在地面以下暗挖隧道的一种施工方法，其施工概貌如图 1-3 所示。

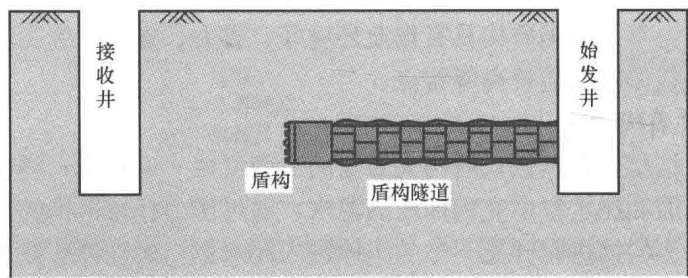


图 1-3 盾构法施工概况

首先在拟建隧道的某段修建一座基坑或竖井，以供盾构安装就位；盾构从基坑或竖井设定的墙壁开孔出发，在地层中沿着设计轴线，向另一座基坑或竖井设计洞口推进。盾构推进过程中不断排出土方，其所受到的地层阻力通过千斤顶传至盾构尾部已经拼装好的隧道衬砌（管片）上，再传至基坑或竖井的后靠背上。盾构是这种施工方法的主要机具，是一种既能支承地层荷载又能在地层中推进的钢筒结构。盾构每推进一环距离，就在盾尾支护下拼装下一环衬砌，并及时向紧靠盾尾后面的衬砌环外周与开挖隧道内周之间的空隙中压注足够的浆液，以防止围岩松弛与地面下沉。

盾构法施工的一般步序为：