

地下工程的施工技术与方法

许运伟

上海建工二建集团, 上海 200080

[摘要]文中首先介绍了地下工程的分类与特点。根据地下工程的分类给出了地下工程中的施工技术。重点介绍了基坑工程和隧道工程中的各类技术。在基坑工程中重点梳理了开挖和支护的不同方式, 以及逆作与气压沉箱, 以及基坑工程中的机械。此外, 比较了隧道工程中的顶管法、盾构法、新奥法、TMB (掘进法), 和沉管法, 以及各种施工方法所用到的机械。最后做出展望。

[关键词]基坑; 开挖; 支护; 逆作; 隧道

DOI: 10.33142/ect.v3i1.15101

中图分类号: TU943

文献标识码: A

Construction Technology and Methods for Underground Engineering

XU Yunwei

Shanghai Construction No. 2 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

Abstract: The article first introduces the classification and characteristics of underground engineering. According to the classification of underground engineering, construction technology in underground engineering are provided. Emphasis was placed on introducing various technologies in foundation pit engineering and tunnel engineering. In foundation pit engineering, the different methods of excavation and support, as well as reverse work and pneumatic caisson, and the machinery used in foundation pit engineering were emphasized. In addition, the top pipe method, shield tunneling method, new Austrian tunneling method, TMB (excavation method), and immersed tube method in tunnel engineering were compared, as well as the machinery used in various construction methods. Finally, an outlook was made.

Keywords: foundation pit; excavation; support; inverse operation; tunnel

引言

地下工程是指为开发利用地下空间, 在地面以下所建造的工程。地下工程包括地下房屋、地下构筑物、地下铁道、地下公路、地下隧道、水下隧道、地下共同沟、地下连通道、人防工程、巷道、管道、粮仓、油库, 以及地下过街通道等。具有良好的热稳定性和密闭性、良好的抗灾和防护性能、很好的社会效益和环境效益; 当然一般施工难度会增加、工期较长、投资量较高、使用时要充分考虑人的光照、通风、温湿度, 以及心理需求。

随着城市化进程的放缓, 我国的城市工程建设必将更加突出开发和利用“地下空间”。与建立海底城市、太空城市相比, 开发与利用现有国土资源所涵盖的地下空间是最现实且经济价值回报快速且显著的途径。主要原因有三: 一是有大量的国土地下空间资源; 二是现有的地下空间技术和方法正在不断完善和日益成熟; 三是始终不脱离土地和城市, 便于广大民众的居住和生活。

开发地下空间的益处也显而易见: 在有限的地面土地资源条件下, 它提供了可利用的丰富的地下空间资源。由此可见, 地下工程的应用前景广阔: 铁路、公路隧道建设; 地下海底隧道; 地铁隧道; 地下市政建设; 以及水利、水电的地下工程等。

尽管土木工程领域专门针对地下工程的诸多领域并

未像岩土工程和结构工程一样那样成果斐然。但其实很多工程类的相关研究和基础知识是相通的。其工艺和施工技术也可以相互借鉴。比如, 地下工程中也可能涉及桩基工程, 对桩基一样也可以根据承载力特征、桩身材料、施工方法、成桩大小, 和成桩直径对桩基进行分类^[1]。还有沉井的分类^[2]与做法^[3]、常用地基土的处理方法(换土垫层、加筋、化学加固、深层密实)^[4], 以及对土体的工程分类理解^[5], 等。

1 分类与特点

根据工程类型, 地下工程可分为: 洞室开挖、洞室支护、衬砌工程、洞内建筑及防排水工程、专业设备安装工程, 洞口及配套工程。

地下工程与地面工程受力特点不同, 是先有荷载, 后有结构, 且荷载类型与大小不确定。围岩作为工程材料的特性不稳定, 常常需要根据围堰的材料特性做支护工程。此外, 围岩的破坏模式也不确定。地下工程的难度受围岩土体、水文地质、开挖顺序、支护方式、施工工艺, 以及支护时间影响。此外, 还面临信息搜集难、勘察困难, 地下工程环境具有明显的局部特性。

2 施工技术

在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间称为地下空间。建造在岩层或土层中的各种建筑物和构筑物。在地下形成的构筑物, 称为地下建筑。地面建筑的地

下室部分归为地下建筑。地下工程的施工技术和（开挖）方法总结如下：

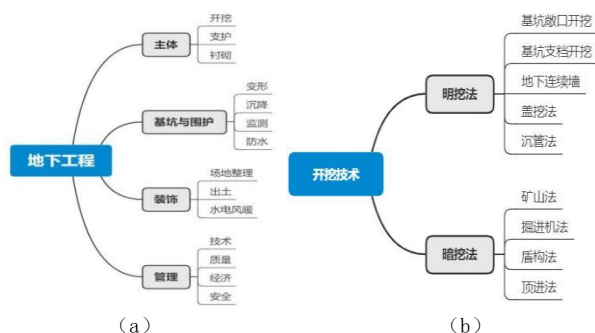


图1 地下工程与开挖技术分类图（图1a、b）

3 基坑工程

基坑施工可根据开挖深度，选择不同方案。如：放坡开挖、土钉墙、水泥土搅拌桩、灌注桩加支撑、SWM工法加支撑、地下连续墙加支撑、半逆作法，或逆作法。

3.1 开挖

开挖是地下工程实际施工时的第一步。主要方法包括放坡开挖、土钉墙、水泥土搅拌桩、灌注桩、SWM，和地下连续墙，等。

3.1.1 放坡开挖

早期的开挖常采用放坡形式。后来随着挖深的增加，支护形式更为复杂，支护结构增加。当放坡面受到限制时，多采用支护开挖。

3.1.2 土钉墙

土钉墙是一种原位土体加筋技术。将基坑边坡通过由钢筋制成的土钉进行加固。边坡表面铺设一道钢筋网，再喷射一次混凝土面层和土方边坡相结合的边坡加固型支护方案。

土钉墙能充分利用土体的自稳能力，结构合理、轻质、柔性大，破坏前有变形发展过程。施工设备及工艺相对简单，不需要复杂的技术和大型机具。

3.1.3 水泥土搅拌桩

水泥土搅拌桩是用于加固饱和软黏性土地基的一种方法。工程搅拌机械在搅拌过程中添加水泥基等土体固化材料，将软黏性土与粘结材料充分搅拌。随着固化材料的水化水合等的物理和化学的变化，将原先的软黏性土硬结成新的地基。新地基具有一定的固态强度，并且整体大幅提升。水泥土搅拌桩加固深度通常超过5m，干法加固深度不超过15m，湿法加固深度不超过20m。用回转的搅拌叶片，将压入软土内的水泥浆与周围软土强制拌和，形成泥加固体。

3.1.4 灌注桩

根据成孔方法可分为钻孔灌注桩、挖孔灌注桩，和沉管灌注桩等。灌注桩是指在通过机械钻孔、开挖、钢管挤土，等方法在地基土中获得一定深度的孔径，随后再在其

中放置钢筋笼，并最终浇筑混凝土成的桩。根据桩的排列形式，灌注桩还可分为间隔式、双排式，和连续式等几种形式。灌注桩其特点是施工时无振动、无噪音等环境污染，无挤土破坏。排桩对周围环境影响小、墙身强度高、刚度大、支护稳定性好，且变形小。尤其适用于软黏土质地区。缺点是桩与桩之间主要通过桩顶冠梁和围檩连成整体，整体性较差。

3.1.5 SWM

劲性水泥土连续墙（SMW）是采用专用多轴搅拌机，就地钻进切削土体，同时从其钻头前端将水泥浆液注入土体，经反复搅拌和充分混合后，再将H型钢或其他芯材插入搅拌体内，形成地下连续墙体。SMW止水性好，对周围环境影响小，无泥浆污染，施工速度快，以及对地层适应性强等。

3.1.6 地下连续墙

地下连续墙是地下用于承重、挡水、防渗等作用的钢筋混凝土墙体。地下连续墙技术适用于地质条件差、环境复杂、基坑深度大，以及周边环境要求较高的基坑。优点是施工时对周边环境影响小，施工速度快，墙体整体性好，施工速度快、使用范围广、施工场地清爽，且对环境友好。缺点是造价较高，施工需要专用设备。

3.2 支护

3.2.1 钢筋混凝土支撑

现浇钢筋混凝土支撑具有较大的整体刚度。优点是安全可靠、变形小、现浇节点不会产生松动，墙体位移增加。现浇形状多样，有利于浇筑成最优化的布置形式。在钢结构支撑施工技术水平不高的情况下，钢筋混凝土支撑具有更高的可靠性。其缺点是自重较大，材料不能重复使用。安装和拆除工期较长，施工工艺复杂。且由于整个钢筋混凝土支撑施工过程耗时较长，无法随挖随撑。因此造价比钢内支撑高。适用于各种复杂平面形状的基坑。

3.2.2 钢支撑

钢支撑优点是自重轻、造价低、环保，利于施工且便于回收。可根据土方开挖进度，做到边挖边撑。还可施加预应力，还可多次调整预紧力值，利于控制墙体变形。由于在两个方向施加预紧力，使纵横支撑的连接处于铰接状态。一般专业化施工情况下优先采用。

3.3 逆作

顺作法优点是施工作业面多、方法简单、速度快、支撑构架单纯、工期易掌握、易掌控工程质量、工程造价低。顺作法缺点有：开挖受限制、工期长、适合浅开挖工程、对城市生活干扰大、对周围环境破坏大。避开“顺作法”的缺点，“逆作法”是利用地下室的梁、板、柱结构，取代内支撑体系去支撑围护结构。逆作法中，地下室梁板结构要随着基坑，由地面向下开挖，而由上往下逐层浇筑，直到地下室底板封底。

对于深度大的多层地下室,用上述传统方法施工存在一些问题:如基坑深,支护结构的挡墙长度大,费用增加。基坑内部支护的支撑量大:一方面需要大量大规格的钢材;另一方面也增加了地下结构施工的难度。

逆作法主要优点是可上部结构的施工和地下基础结构施工平行立体作业,节省工时。利用先完成的刚性高的地下结构体作为挡土支撑,挡土墙变形较小,周围地盘与邻房之不良影响较小,安全性好。节省构台支撑的时间与费用,在不规则基坑施工时较容易。且方便地下施工,利于降低噪音,且受气候影响小。

3.4 智能化气压沉箱

气压沉箱是一个气密性高的钢筋混凝土结构工作室。在无水的环境下,智能化气压沉箱,可以进行远程遥控排土与挖土。箱体在指定位置下沉,首先在箱底浇筑钢筋混凝土底板,并逐步完成混凝土沉箱的整体全部结构。

智能化气压沉箱施工技术适用的地质条件广,特别在城市更新等新工程中值得借鉴。很多城市更新的施工条件是:周边环境复杂,对周边及沉降变形要求严苛,尤其是涉及文保类和优秀历史建筑的保护。

4 隧道工程

隧道施工,根据机械的不同,可以分为:顶管法、盾构法、新奥法、TBM(掘进法),和沉管法等。

4.1 盾构法

盾构法是一全新的智能施工方法,依赖的是盾构机。盾构机在前方刀盘切削岩层和土体的同时,向前掘进。还能将刀盘切割下的岩石碎块和土体从盾构机身通过,输送到尾部运出。此外,新型的盾构机还兼具拼装预制管道结构的能力,常见的有圆形钢筋混凝土管道结构和矩形。

盾构法分为土压平衡盾构和泥水平衡盾构。盾构开挖相对安全,衬砌和掘进速度快,施工劳动强度低;盾构的推进、出土、拼装衬砌等全过程可实现自动化作业;不影响地面交通与设施,不影响航运,同时不影响地下管线等设施;不受季节、风雨等气候条件影响,施工中没有噪音。在松软含水地层中修建埋深较大的长隧道常具有技术和经济优势。缺点是断面尺寸多变的区段适应能力差。新型盾构购置费昂贵,对施工区段短的工程不太经济。

4.2 新奥法

传统方法认为巷道围岩是一种荷载,而新奥法则通过一系列加固技术,把加固过的围岩区域都等同于一种承载结构。具体的方法包括,比如浇筑厚壁混凝土以加固紧邻的围岩,构筑成柔性的与围岩紧贴的支护结构。还有诸如采用喷射混凝土、拉结防护网,和铺设锚杆桩。缺点是加固方法需要很强的技术和理论支撑。往往随着环境的变化,相应的巷道围岩的力学特性的分析有很强的局限性。新方法旨在使围岩与支护结构共同形成支撑环,来承受压力。但不可避免地会有化学物理变化的影响以及耐久性影响。

故缺点也很明显。因此,在采用新奥法时上应少扰动、早支护、勤测量,和紧封闭。

4.3 TBM掘进法

隧道掘进机法,也称为TBM掘进法,是隧道掘进机切削破岩,开凿隧道的施工方法。一种靠旋转并推进刀盘,通过盘形滚刀破碎岩石而使隧道全断面一次成型的机器,由盾构法发展而来的。

一般只适用于圆形断面隧道。适用于中硬岩层。地质条件对TBM掘进效率影响大。遇到不良岩层时情况不可控。一般情况下,施工速度快,工期短,特别适合稳定围岩的中长距离掘进。工作时,对环境和上部构筑物影响小,沉降偏小。机械化程度高。安全性高,作业环境好。缺点是运输和组装费用高。挖掘的灵活性不够。开挖成本高,短距离不适用。

4.4 顶管法

借助顶推设备,将工具管或掘进机从始发井穿过土层一直推到接收井,与此同时,把紧随工具管或掘进机后的管道埋设在两井间的一种施工技术。主要适用于断截面面积稍小一些的地下管线的铺设。

顶管法中的管段可在工厂完成预制。因此,质量和强度都有保证。工序简单,只需要不断从一端顶向另一端即可。管段之间的连接可以设计成套口的等的形式。主要的施工难度在于顶管井口处的不断顶进过程中的勘测和定位。形成的整体管型密封性好,力学性能优异。缺点是位置校准难度大,中途遇到特殊的土体或者硬块的时候会难以处理。对于一些大、小截面的管幕施工,亦可采用顶管法。

4.5 沉管法

沉管法是水底隧道的一种施工方法,也称作预制管段沉放法。沉管隧道就是将钢筋混凝土或钢结构等预制段分别浮运到水面,并一个接一个地沉放安装在已疏浚好的基槽内。

沉管法对地质水文条件适应能力强。施工工艺简单、地基荷载较小。沉管可浅埋,与两岸道路衔接容易。无需长引道,线性较好,防水性也好,接头少漏水。施工工期短,管段预制可与基槽开挖平行施工,浮运沉放较快。且造价低,水下挖图与管段预制成本较低,少于盾构隧道。施工条件好,一般水下作业极少,可做成大断面结构。

缺点是管段制作混凝土工艺要求严格,需保证干舷与抗浮系数。车道较多时,需增加沉管隧道高度。导致压载混凝土量、浚挖土方量,与沉管隧道引道结构工程量增加。

5 展望

目前,在建筑生产领域,还处在部分人工,部分生产劳动由工程机械完成的阶段。且工程机械还是人工操作。要实现地下工程施工的自动化,需要首先完备地下施工的机械化,并同时给施工装备装上“数控”的大脑。

在数字化浪潮的席卷之下,地下工程施工已经开始利

用数字大平台,来统筹和管理包括地下工程机械在内的生产和施工。当务之急,是需要归纳和总结已有的地下工程的施工技术,统计地下工程的重要施工机械。并结合工程实际,研发新的地下工程施工机械,并逐步完成自动化和数字化的过程。

[参考文献]

- [1]陈希哲.土力学地基基础[M].北京:清华大学出版社,2004.
[2]段良策,殷奇.沉井设计与施工[M].上海:同济大学出

版社,2006.

- [3]袁聚云,楼晓明,姚笑青,等.基础工程设计原理[M].北京:人民交通出版社,2011.
[4]袁聚云,李镜培,楼晓明.基础工程设计原理[M].上海:同济大学出版社,2001.
[5]赵明华,王贻荪.土力学与基础工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2014.

作者简介:许运伟(1986—),男,汉族,上海人,本科毕业,天津理工大学项目管理专业。