

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材  
普通高等学校土木工程专业新编系列教材  
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

# 地下工程施工技术

(新1版)

D X G C S G J S

姜玉松 主编



WUTP

武汉理工大学出版社

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材  
普通高等学校土木工程专业新编系列教材  
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

# 地下工程施工技术

(新 1 版)

主 编 姜玉松  
副主编 方江华

武汉理工大学出版社

## 【内 容 提 要】

本书较详细、较全面地介绍了矿山井巷、铁路与公路隧道、水利水电隧洞及硐室、城市地下空间等地下工程中常采用的、以暗挖为主的施工技术与方法。全书共分11章,包括绪论、水平岩石巷(隧)道施工、立井施工、倾斜坑道施工、岩石隧(巷)道掘进机施工、盾构施工技术、顶管法施工、沉管隧道施工、辅助工法、施工辅助工作以及施工组织与管理。

本书可作为高等院校土木工程专业教材,也可供矿山工程、铁路与公路交通工程、水利水电工程、市政工程等专业方向的师生以及工程技术人员参考、学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下工程施工技术/姜玉松主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2008.8

ISBN 978-7-5629-2818-8

I. 地…

II. 姜…

III. 地下工程-工程施工-施工技术

IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 131547 号

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

印刷者:荆州市鸿盛印务有限公司

发行者:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:20

字 数:648 千字

版 次:2008 年 8 月第 1 版

印 次:2008 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87397097 87383695

## 前 言

本书于 2007 年被安徽省教育厅列为安徽省高等学校“十一五”省级规划教材。

人们普遍认为,21 世纪将是开发地下空间的世纪。面对 21 世纪中国城市地下空间开发利用,能源、交通、水利水电建设的需要,地下工程的领域越来越广、数量越来越多、规模越来越大、埋藏越来越深,对地下工程施工技术的掌握显得越发重要。为满足这种需求,特编写了这本《地下工程施工技术》。

土木工程专业,不论是“地下建筑与工程”方向或“隧道与地下工程”方向,还是“矿山建设”方向,一般来说,地下工程规划与设计、地下工程结构与设计与计算、地下工程施工工艺与技术都是必修的专业课程,三者相辅相成,构成了地下工程的完整体系。因此,“地下工程施工技术”是“地下工程”方向专业课程的重要组成部分,是土木工程专业地下工程方向的主干课程之一。

从现有地下工程施工技术的教材来看,其行业特征比较明显,针对性较强。随着市场经济的发展,过去从事矿山、铁路、交通、水电、市政等工程施工的企业已逐渐打破了原有行业界限,纷纷跨出部门、行业,走向市场,承担着各种不同类型、不同领域的工程建设任务。从高等院校的人才培养来说,也应迅速适应这种市场变化,培养出能适应不同行业施工需要的人才。事实上,不论哪一领域,就地下工程而言,其基本施工原理和方法都是相通的。因此,本书尽量打破行业界限,淡化行业特征,重点讲述施工技术、施工工艺和施工方法,力求使本书成为一本以施工技术为主导体系的通用性教材。

全书约 60 万字,可按 60 学时左右安排教学。使用中,有关学校可根据实际情况有选择地讲授。单独开设有“特殊施工”课程的院校(如原煤炭系统院校),本书中“冻结”、“注浆”、“沉井”、“帷幕”等相关内容可不讲授。

本书取材面广,内容丰富,尽量反映当前地下工程施工的主要工艺与技术,先进性、实用性较强,不仅适用于矿山、铁路、公路、水利水电、城市地下空间等方向开设地下工程课程的高等学校使用,也可供这些行业的工程技术人员学习、参考。

本书由安徽理工大学姜玉松教授任主编、方江华副教授任副主编。各章编写分工为:第 1、2、5、8 章由姜玉松编写;第 3 章由蔡海兵编写;第 4 章由孙勇编写;第 6、10、11 章由方江华编写;第 7、9 章由李栋伟编写。全书由姜玉松统稿。

本书编写中参考了许多书籍及资料,主要参考文献列于书末,书中不再一一注明,特此说明并向作者表示诚挚的谢意。

本书得到了武汉理工大学出版社的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中纰漏之处在所难免,敬请读者提出宝贵意见。

E-mail:ysjiang@aust.edu.cn

编 者

2008 年 3 月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	(1)
1.1 地下工程的概念 .....	(1)
1.1.1 地下工程的定义 .....	(1)
1.1.2 地下工程的分类 .....	(1)
1.1.3 地下工程的发展 .....	(1)
1.2 地下工程施工技术的发展与水平 .....	(2)
1.2.1 矿山施工技术的发展 .....	(2)
1.2.2 隧道施工技术的发展 .....	(2)
1.2.3 相关技术、理论与科学的发展 .....	(3)
1.3 地下工程的围岩性质 .....	(3)
1.3.1 岩石和土 .....	(3)
1.3.2 岩石(土)的工程强度分级 .....	(4)
1.3.3 围岩与围岩压力 .....	(5)
1.3.4 围岩的稳定性分级(类) .....	(6)
复习思考题 .....	(10)
<b>2 水平岩石巷(隧)道施工</b> .....	(11)
2.1 基本施工方案 .....	(11)
2.1.1 全断面一次开挖法 .....	(11)
2.1.2 分断面两次开挖法 .....	(12)
2.1.3 台阶工作面法 .....	(13)
2.1.4 导坑施工法 .....	(14)
2.1.5 施工实例 .....	(18)
2.2 钻眼爆破作业 .....	(21)
2.2.1 炮眼定位 .....	(21)
2.2.2 钻眼机具及作业 .....	(23)
2.2.3 爆破作业 .....	(26)
2.2.4 光面爆破 .....	(30)
2.2.5 爆破图表 .....	(31)
2.3 岩石装运工作 .....	(32)
2.3.1 装岩工作 .....	(32)
2.3.2 运输工作 .....	(35)
2.3.3 调车工作 .....	(37)
2.3.4 矸石转载 .....	(39)
2.4 支护技术 .....	(39)
2.4.1 棚式支护 .....	(40)
2.4.2 锚杆支护 .....	(42)
2.4.3 喷射混凝土支护 .....	(49)
2.4.4 锚喷联合支护 .....	(54)
2.4.5 连续式衬砌支护 .....	(56)
2.5 巷道施工作业方式 .....	(59)

2.5.1	施工作业方法	(59)
2.5.2	一次成巷施工作业方式	(60)
2.5.3	巷道施工循环方式与循环图表	(61)
	复习思考题	(62)
<b>3</b>	<b>立井施工</b>	(64)
3.1	概述	(64)
3.1.1	我国的立井施工技术水平	(64)
3.1.2	立井的类型与结构	(64)
3.1.3	立井施工的基本工艺	(65)
3.2	表土施工	(66)
3.2.1	表土的分类	(66)
3.2.2	锁口砌筑	(66)
3.2.3	表土掘砌方法	(67)
3.2.4	表土施工提升	(69)
3.3	钻眼爆破	(71)
3.3.1	钻眼工作	(71)
3.3.2	爆破工作	(72)
3.4	装岩与排矸	(76)
3.4.1	抓岩机械	(77)
3.4.2	抓岩机的选择	(78)
3.4.3	排矸	(79)
3.5	提升与悬吊	(80)
3.5.1	提升方式	(80)
3.5.2	凿井井架	(80)
3.5.3	提升吊桶	(81)
3.5.4	钢丝绳	(82)
3.5.5	提升机	(83)
3.5.6	凿井绞车	(85)
3.5.7	天轮	(85)
3.6	井筒支护	(85)
3.6.1	临时支护	(85)
3.6.2	永久支护	(86)
3.7	施工作业方式	(89)
3.7.1	掘砌单行作业	(89)
3.7.2	掘砌平行作业	(89)
3.7.3	短段掘砌(喷)混合作业	(90)
3.7.4	施工作业方式的选择	(91)
3.8	凿井设备布置	(91)
3.8.1	凿井设备布置原则	(91)
3.8.2	天轮平台的布置	(92)
3.8.3	凿井工作盘的布置	(93)
3.8.4	井内凿井设备布置	(95)
3.8.5	地面提绞设备的布置	(96)
3.8.6	凿井设备布置的总校验	(98)
3.9	反井施工法	(98)

3.9.1	普通反井法	(98)
3.9.2	吊罐反井法	(99)
3.9.3	爬罐反井法	(100)
3.9.4	钻进反井法	(102)
3.10	沉井法	(103)
3.10.1	沉井分类	(103)
3.10.2	不淹水沉井	(104)
3.10.3	淹水沉井	(105)
3.10.4	沉井结构	(106)
3.10.5	井壁施工	(108)
3.10.6	井壁防偏与纠偏	(109)
3.10.7	封底与固井	(111)
	复习思考题	(112)
<b>4</b>	<b>倾斜坑道施工</b>	(114)
4.1	概述	(114)
4.2	斜井表土施工	(114)
4.2.1	斜井井口明槽施工	(114)
4.2.2	井筒表土施工	(117)
4.3	斜井基岩施工	(120)
4.3.1	钻眼爆破工作	(120)
4.3.2	装岩工作	(121)
4.3.3	提升与运输	(122)
4.3.4	斜井支护施工	(125)
4.3.5	其他	(126)
4.3.6	施工安全措施	(126)
4.4	由下向上施工斜巷	(128)
4.4.1	钻眼爆破工作	(128)
4.4.2	通风工作	(128)
4.4.3	装岩工作	(129)
4.4.4	提升运输工作	(130)
4.4.5	支护工作	(130)
4.5	斜井(巷)施工机械化	(131)
4.5.1	斜井岩石掘进机	(131)
4.5.2	斜井反井钻机施工	(131)
4.5.3	机械化配套	(132)
	复习思考题	(133)
<b>5</b>	<b>岩石隧(巷)道掘进机施工</b>	(134)
5.1	概述	(134)
5.2	全断面岩石隧道掘进机	(134)
5.2.1	概述	(134)
5.2.2	全断面岩石掘进机的类型与结构	(135)
5.2.3	全断面岩石掘进机的后配套系统	(138)
5.2.4	全断面岩石隧道掘进机的选择	(139)
5.2.5	全断面岩石隧道掘进机施工	(142)
5.2.6	全断面岩石掘进机评述	(147)

5.3	悬臂式掘进机 .....	(148)
5.3.1	概述 .....	(148)
5.3.2	悬臂式掘进机的类型与参数 .....	(149)
5.3.3	悬臂式掘进机的主要结构 .....	(150)
5.3.4	悬臂式掘进机的选择 .....	(151)
5.3.5	悬臂式掘进机施工 .....	(153)
5.3.6	悬臂式掘进机的发展趋势 .....	(156)
5.4	掘锚联合机组 .....	(157)
5.4.1	掘锚联合机组的结构 .....	(158)
5.4.2	巷道掘进作业方式和工作程序 .....	(160)
5.4.3	ABM20 掘锚联合机组技术性能特点和综合技术评价 .....	(160)
	复习思考题 .....	(161)
6	盾构施工技术 .....	(162)
6.1	概述 .....	(162)
6.1.1	盾构法基本原理 .....	(162)
6.1.2	盾构法的主要优缺点 .....	(162)
6.1.3	盾构技术发展简介 .....	(163)
6.1.4	盾构技术的新进展 .....	(164)
6.2	盾构的基本构造 .....	(165)
6.2.1	概述 .....	(165)
6.2.2	盾构壳体 .....	(165)
6.2.3	推进系统 .....	(167)
6.2.4	掘削机构 .....	(169)
6.2.5	排土系统 .....	(170)
6.2.6	管片拼装机构 .....	(171)
6.2.7	挡土机构 .....	(172)
6.2.8	驱动机构 .....	(172)
6.3	盾构的类型及选择 .....	(172)
6.3.1	盾构机的类型 .....	(172)
6.3.2	盾构选型 .....	(177)
6.4	盾构法施工的出洞、进洞技术 .....	(177)
6.4.1	盾构机的工作井 .....	(177)
6.4.2	盾构基座与后座(后盾) .....	(178)
6.4.3	盾构出洞、进洞方式 .....	(179)
6.4.4	盾构出洞 .....	(179)
6.4.5	盾构进洞 .....	(179)
6.4.6	临时封门 .....	(180)
6.4.7	洞门土体加固 .....	(181)
6.5	盾构推进作业 .....	(182)
6.5.1	盾构推进开挖方法 .....	(182)
6.5.2	盾构的掘进管理 .....	(182)
6.5.3	盾构姿态的控制 .....	(183)
6.5.4	盾构机推进时的壁后充填 .....	(186)
6.6	盾构隧道衬砌 .....	(187)
6.6.1	衬砌断面形式与结构 .....	(187)



6.6.2	衬砌管片类型与结构尺寸 .....	(187)
6.6.3	管片的拼装 .....	(189)
6.6.4	衬砌防水措施 .....	(190)
6.6.5	隧道的二次衬砌 .....	(191)
6.7	盾构掘进对地层的影响及监测 .....	(192)
6.7.1	致使地层变位的因素及阶段划分 .....	(193)
6.7.2	地层位移的计算和预测 .....	(193)
6.7.3	地表沉降的监测与控制 .....	(194)
	复习思考题 .....	(195)
<b>7</b>	<b>顶管法施工 .....</b>	<b>(197)</b>
7.1	概述 .....	(197)
7.1.1	顶管施工的基本原理 .....	(197)
7.1.2	顶管施工技术的应用 .....	(198)
7.1.3	顶管技术的发展 .....	(198)
7.1.4	顶管施工的分类 .....	(199)
7.2	顶管机及其选型 .....	(199)
7.2.1	手掘式顶管机 .....	(199)
7.2.2	泥水平衡式顶管机 .....	(201)
7.2.3	土压平衡顶管机 .....	(203)
7.2.4	顶管机类型的选择 .....	(205)
7.3	工作井及其布置 .....	(205)
7.3.1	工作井的形式 .....	(205)
7.3.2	工作井的选择 .....	(206)
7.3.3	顶进工作井的布置 .....	(206)
7.4	顶管施工及进出洞技术 .....	(208)
7.4.1	顶进前的施工准备 .....	(208)
7.4.2	顶管出洞段施工 .....	(209)
7.4.3	顶管正常顶进施工 .....	(209)
7.4.4	顶管进洞段施工 .....	(210)
7.4.5	施工测量 .....	(211)
7.4.6	施工用电 .....	(211)
7.5	长距离顶管 .....	(212)
7.5.1	增加主千斤顶的顶力 .....	(212)
7.5.2	减摩 .....	(212)
7.5.3	增设中继环(间) .....	(213)
7.5.4	降低开挖面正面顶进阻力的措施 .....	(215)
7.6	微型顶管 .....	(215)
7.6.1	压入式微型顶管 .....	(215)
7.6.2	螺旋钻式微型顶管 .....	(216)
7.7	顶管工程计算 .....	(217)
7.7.1	顶管使用荷载的计算 .....	(217)
7.7.2	顶管顶力的计算 .....	(217)
7.7.3	顶管后靠墙的稳定验算 .....	(218)
7.7.4	开挖工作面稳定性验算 .....	(219)
7.8	管节接缝的防水 .....	(219)

7.8.1	钢筋混凝土管节接缝的防水 .....	(219)
7.8.2	钢管顶管的接口形式 .....	(220)
7.9	地层变形的控制 .....	(220)
7.9.1	顶管引起地层移动的分析 .....	(220)
7.9.2	顶管施工时对周围环境的保护 .....	(221)
	复习思考题 .....	(222)
<b>8</b>	<b>沉管隧道施工</b> .....	<b>(223)</b>
8.1	概述 .....	(223)
8.1.1	沉管隧道的基本结构 .....	(223)
8.1.2	沉管隧道施工工艺流程 .....	(225)
8.1.3	沉管法评述 .....	(225)
8.1.4	沉管隧道的发展 .....	(226)
8.2	干坞 .....	(226)
8.2.1	干坞的设计 .....	(227)
8.2.2	干坞内的设备设施 .....	(229)
8.2.3	干坞的施工 .....	(229)
8.3	管段制作 .....	(229)
8.3.1	钢壳混凝土管段制作 .....	(229)
8.3.2	矩形管段的制作 .....	(229)
8.3.3	管段的检漏与干舷调整 .....	(231)
8.4	沉管隧道的浚挖 .....	(232)
8.4.1	沉管基槽的设计 .....	(232)
8.4.2	沉管基槽施工 .....	(233)
8.4.3	航道疏浚 .....	(234)
8.5	管段沉放与连接 .....	(234)
8.5.1	管段的出坞 .....	(234)
8.5.2	管段的浮运 .....	(235)
8.5.3	管段的沉放 .....	(235)
8.5.4	管段的水下连接 .....	(239)
8.5.5	管段的内部连接 .....	(241)
8.5.6	管段的最终接头 .....	(241)
8.6	基础处理及回填 .....	(242)
8.6.1	概述 .....	(242)
8.6.2	先铺法 .....	(243)
8.6.3	喷砂法 .....	(243)
8.6.4	灌砂法 .....	(244)
8.6.5	灌囊法 .....	(244)
8.6.6	压浆法 .....	(245)
8.6.7	压砂法 .....	(245)
8.6.8	桩基础法 .....	(246)
	复习思考题 .....	(247)
<b>9</b>	<b>辅助工法</b> .....	<b>(248)</b>
9.1	冻结法 .....	(248)
9.1.1	冻结法施工原理 .....	(248)
9.1.2	冻结制冷设备 .....	(249)

9.1.3	冻结施工方案 .....	(252)
9.1.4	冻结法工艺参数 .....	(254)
9.2	注浆法 .....	(257)
9.2.1	概述 .....	(257)
9.2.2	注浆工艺 .....	(257)
9.2.3	注浆材料及选择 .....	(261)
9.2.4	注浆参数 .....	(263)
9.2.5	注浆设备 .....	(265)
9.3	混凝土帷幕法 .....	(266)
9.3.1	概述 .....	(266)
9.3.2	槽孔施工 .....	(267)
9.3.3	灌注混凝土 .....	(269)
	复习思考题 .....	(271)
<b>10</b>	<b>施工辅助工作</b> .....	<b>(272)</b>
10.1	通风防尘工作 .....	(272)
10.1.1	通风目的 .....	(272)
10.1.2	通风方式 .....	(272)
10.1.3	通风方式的选择 .....	(274)
10.1.4	通风机选择 .....	(274)
10.1.5	风筒(管)的选择 .....	(278)
10.1.6	防尘工作 .....	(279)
10.2	压缩空气供应工作 .....	(279)
10.2.1	空压机站布置 .....	(280)
10.2.2	空压机站的供风能力 .....	(280)
10.2.3	空压机选择 .....	(281)
10.2.4	压风管道的设置 .....	(282)
10.3	供水与排水工作 .....	(283)
10.3.1	施工供水 .....	(283)
10.3.2	施工排水 .....	(285)
10.4	供电及照明 .....	(288)
10.4.1	供电 .....	(288)
10.4.2	照明 .....	(290)
10.4.3	安全用电 .....	(290)
	复习思考题 .....	(290)
<b>11</b>	<b>施工组织与管理</b> .....	<b>(291)</b>
11.1	施工准备 .....	(291)
11.1.1	技术准备 .....	(291)
11.1.2	物质准备 .....	(292)
11.1.3	人力准备 .....	(292)
11.1.4	工程准备 .....	(292)
11.2	施工组织设计 .....	(292)
11.2.1	各阶段施工组织设计及内容 .....	(293)
11.2.2	施工组织设计的编制依据、原则及程序 .....	(294)
11.3	施工方案 .....	(294)
11.3.1	施工方法的选择 .....	(294)

11.3.2	施工机具、机械设备的选择 .....	(295)
11.3.3	施工顺序的安排 .....	(295)
11.3.4	施工方案的技术经济评价 .....	(295)
11.4	施工场地布置 .....	(296)
11.4.1	施工场地的布置原则 .....	(296)
11.4.2	主要施工设施布置要求 .....	(297)
11.4.3	施工场地布置平面图 .....	(297)
11.5	施工进度计划 .....	(299)
11.5.1	施工进度计划表现形式 .....	(299)
11.5.2	施工进度计划编制 .....	(300)
11.6	技术管理 .....	(301)
11.6.1	技术管理的任务及内容 .....	(301)
11.6.2	技术管理制度 .....	(301)
11.7	安全管理 .....	(302)
11.7.1	安全管理的要求 .....	(302)
11.7.2	安全生产责任制 .....	(303)
11.8	质量管理 .....	(304)
11.8.1	施工质量控制的任务 .....	(304)
11.8.2	质量控制的基本方法 .....	(304)
	复习思考题 .....	(305)
	参考文献 .....	(306)

# 1 绪 论

## 1.1 地下工程的概念

### 1.1.1 地下工程的定义

地下工程是一个较为广阔的范畴。它泛指修建在地面以下岩层或土层中的各种工程空间与设施,是地层中所建工程的总称,通常包括矿山井巷工程、城市地铁隧道工程、水工隧洞工程、交通山岭隧道工程、水电地下硐室工程、地下空间工程、军事国防工程、建筑基坑工程等。

### 1.1.2 地下工程的分类

随着国民经济的发展,地下工程的范围越来越广泛,其分类也越来越复杂。按领域分,有矿山、交通、水电、军事、建筑、市政等;按用途分,有交通、采掘、防御、贮存、工业、商业、农业、居住、旅游、娱乐、物流等;按空间位置分,有水平式、倾斜式和垂直式;按形状分,有洞道式和厅房式;按埋藏深度分,有深埋式和浅埋式,等等。

尽管分类方法繁多,但从施工角度来看,最主要的是所处位置的介质、空间位置和形状,因为它们直接决定着施工方案与方法、施工工艺与设备的选择。在岩石中开凿的工程,围岩比较稳定,支护比较容易,开挖较为困难,需用爆破法或岩石掘进机法破岩;在土中则相反,支护困难破岩易,可用人工或机器开挖(如挖掘机、盾构机),必要时还要采取特殊的施工法,如降水、冻结、注浆等;在水中修建隧道则需用沉管法。在立井(又叫竖井)、斜井、平洞中施工,尽管支护方式类似,但所用设备及其设备的布置则有较大差别。

在洞道式和厅房式分类中,洞道式是指长度较大、径向尺寸相对较小的地下工程;厅房式又叫硐室式(也有的称硐室),是指长度相对较短、径向尺寸较大的地下工程。两者在支护上有不同的要求,在开挖方式的选择上有一定差异,如厅房式工程无法使用掘进机施工。

这里需要说明的是,对于洞道式工程,不同的行业领域有不同的称谓。公路及铁路部门称之为隧道,在矿山中称为巷道,水利水电部门称之为隧洞,而军事部门则称之为坑道或地道,在市政工程中又叫通道或地道。隧道通常是指修筑在地下或山体内部,两端有出入口,供车辆、行人等直接通行的交通工程。隧道由于要通过车辆,断面一般比较大。巷道通常是指为采掘地下矿物而修建的地下空间结构体,包括各种用途的巷道,有时也泛指硐室。矿山巷道一般埋藏较深,断面较小,主要用以运输、行人和通风。隧洞是水力发电工程、城市市政方面用于引水、排水、通风等的地下工程,两端有出口,断面一般比较小。通道、地道和坑道的长度和断面都相对较小,有单出口或多出口,多用于行人和储物。

### 1.1.3 地下工程的发展

地下工程是随着社会的进步而兴起并不断发展的。

人类很早就利用天然洞穴作为居住场所,当社会发展到能够制造挖掘工具时,出现了人工开挖和利用地下空间的现象。到人类进入文明社会,随着采矿、运输、航运的兴起和农业灌溉特别是战争的需要,出现了各种人工开挖的坑道式地下工程。早在 4000 年以前,古代强盛的巴比伦王国就在幼发拉底河下开掘了一条最早的连接王宫与圣庙的地下通道。

从 16 世纪以后,由于炸药的发明和应用,以及凿岩机械的出现,大大加速了地下工程的发展。19 世纪在美国修建了世界上第一座长约 12 km 的铁路隧道。随着地下施工技术的进步,城市地铁工程也在世界各地兴起,从 1863 年伦敦开始修建第一条地铁至今,世界上在建和在运转的地铁已遍布近百个城市。我国的香港、北京、上海、西安等地在地下空间的开发利用方面率先取得了一定的成效,积累了一定的经

验。我国目前发展最快的是城市地铁,除已经有地铁的城市还在继续扩建外,又有成都、武汉、昆明、西安等约 20 个城市正在建设和准备建设地铁,预计今后 10 年将是我国地铁建设的兴盛时期。其次是地下商场、商业街等,全国已有 20 多个城市的车站广场建有地下商场,西安的钟鼓楼广场、上海的人民广场等是近几年建成的典型大型地下空间开发工程。地铁、地下商场等地下空间的大量开发推动着地下城市建设工作的发展与进步。

近十几年来,日本在地下空间的开发利用方面发展迅速,现已从超高层建筑等的空中开发时代转向大深度地下空间的开发时代,目前正规划建设大规模的地下停车场。有人曾构想把高速铁路、高速道路甚至航空线都建造于地下。

新中国成立后,特别是近 20 年来,我国的交通建设有了突飞猛进的发展。我国是一个多山、多江河的国家,铁路、公路建设中需要穿越山岭、河流、海洋的隧道修建量很大。随着国民经济的快速提升,若干大型的水利水电工程也正在积极兴建。据不完全统计,近期每年有 180 km 的水工隧道、270 km 的铁路隧道、30 km 的地铁隧道、3.4 万 km 的微型隧道需要开挖。

矿山是地下工程的重要组成部分。我国是矿山资源开发量较大的国家之一,煤炭、金属、非金属矿山遍布全国各地。作为工业粮食的煤炭,当前及今后的需求量很大,仍有大批的新井、深井需要建设。

21 世纪,人类将向地下要空间、要资源、要效益、要生存、要环境。据预测,今后 10~15 年内将是我国地下工程开发利用的重要发展时期。未来的时代是地下时代,人类将重返地下。人们普遍认为,19 世纪是桥梁的世纪,20 世纪是高层建筑的世纪,21 世纪则将是开发地下空间的世纪。

## 1.2 地下工程施工技术的发展与水平

地下工程的快速发展带动了施工技术的进步和发展,同时,施工技术的发展也反过来推进了地下工程的发展,若干以前无法施工的工程现在成为可能。近半个多世纪以来,我国在地下工程施工的技术和理论上取得了重大进步,许多方面开始或已经步入世界先进行列。

### 1.2.1 矿山施工技术的发展

矿山施工技术发展主要突出表现在以下方面:

(1) 锚喷支护以及光面爆破技术的应用。锚喷是地下支护技术的一项革新,施工简单,效果显著,现已成为地下工程施工中广泛应用的技术。已开发应用的锚杆有上百种,喷射混凝土机具经历了多次替代,支护设计理论逐步成熟。目前,锚喷、锚注、锚索(简称“三锚”)联合支护技术在高地应力、大变形巷道中取得良好成效,中深孔、深孔光面爆破技术已得到广泛应用。

(2) 岩石巷道凿岩台车及钻、装、运、支等工序的成套机械设备的使用,形成了多种类型的机械化作业线,大大提高了巷道施工的机械化程度和掘进速度。装岩运输设备正向大型化、自动化方面发展,用于爆破钻眼的凿岩机器人已经研制成功,全断面巷道掘进机得到了较快的发展,悬臂式掘进机得到了较多的应用。

(3) 立井快速施工技术及大型机械化配套技术基本成熟。伞形钻架、大吊桶、大抓岩机、大井架、大绞车、大吊泵、大模板、大搅拌机等设备得到全面配套,施工速度大大提高,基岩段月进百米已轻而易举。目前,立井施工技术正向深度 1000~1300 m 的深井发展。

(4) 人工冻结加固岩土技术更加成熟并得到推广应用。人工冻结是处理软土问题的一项有效手段,而且对控制施工影响和施工环境保护有重要的意义。冻结法过去主要应用于煤炭矿山,现已成功应用于城市地铁隧道、深基坑围护以及桥墩基础等工程。在煤炭矿山,冻结深度已由最初的 100 m 左右发展到目前的 700 m 左右。

### 1.2.2 隧道施工技术的发展

近 20 多年来,隧道施工技术随着隧道工程的日益增多和相关科学技术的发展,取得了重大进步,主要体现在以下方面:

(1) 大型全断面岩石隧道掘进机(TBM)的研究和应用。掘进直径可达 10 m 以上,破岩的硬度甚至达到数百兆帕,并实现了整个隧道施工作业连续化,大大提高了隧道施工的现代化程度。预测我国近期需要的 TBM 数量可达 40 台以上。在 TBM 的研制方面,过去主要靠进口,现已能自行制造,并将逐步实现国产化。

(2) 盾构施工技术的完善和广泛应用。以往盾构施工只能用于极其松软的土层中,现在可在任何软土地层中使用,而且已有既可掘进土质地层又可开挖岩石地层的混合盾构机。原则上,利用盾构机可施工任何断面形状的隧道工程。我国从 20 世纪 50 年代起开始研制软土隧道盾构施工设备,1971 年上海黄浦江打浦路隧道建成通车,标志着我国隧道盾构施工技术的成功。目前正在兴建的上海长江隧道,全长 8.95 km,开挖直径 15 m,盾构直径 15.43 m,是目前世界上最大的超大、特长越江隧道工程,在若干单项技术上达到国际领先水平。

(3) 水下隧道沉管法的应用促进了海底隧道、越江隧道的发展。世界上已建成沉管隧道 100 多座,我国已建成的沉管隧道有 10 多座,广州、浙江等地有多座沉管隧道正在施工。新建成的上海外环沉管隧道,规模为世界第二、亚洲第一,标志着我国的沉管隧道施工水平达到了世界先进水平。

### 1.2.3 相关技术、理论与科学的发展

(1) 新奥法(New Austrian Tunnelling Method, NATM)理论的应用。新奥法于 1948 年由奥地利专家 L. V. Rabcewicz 提出,1963 年形成系统理论。它不仅仅是锚喷支护技术,更说明一种支护原理,强调隧道施工应遵循适当控制围岩变形的原则。现在,新奥法在矿山巷道、公路与铁路隧道、地下交通隧道等工程中得到了广泛应用。

这里需要强调的是,新奥法和矿山法是两个完全不同的概念。矿山法一般是指采用传统的钻眼爆破法开挖地下工程的方法,故有时也称为钻爆法。目前,矿山法也包括悬臂式掘进机开挖法。新奥法是指在采用矿山法施工地下工程时,对挖掘和支护(尤其对支护)进行科学设计和组织的一种思想、理念,它是强调先柔后刚、变形监测、合理二次支护的一套地下工程设计、掘进、衬砌、测试相结合的完整新概念。新奥法包含于矿山法之中。新奥法的基本思想和方法不仅适用于隧道工程,同样适用于矿山等各类巷道工程。

(2) 随着计算技术与计算机科学的发展,有限元、边界元等数值计算方法和计算机在地下结构设计与工程力学分析中得到了广泛应用。

(3) 地下工程信息技术得到重视,数字矿山、数字城市地下空间等已成为研究热点。

(4) 地下工程防灾减灾及环境问题。水、火、有害气体、沉降仍是地下工程的主要灾害。注浆堵水技术、结构接缝防水技术取得了长足发展。火灾、地层沉降的预防预测技术达到了较高水平。

总之,地下工程仍具有投入高、劳动强度大、施工环境恶劣甚至是有危险、技术难度大而整体技术水平相对较低的特点。目前,它正向着长、大、高(高水平的设计与施工技术)、深、难和现代化的方向发展。对每一个地下工程工作者,学习和掌握现代的地下工程施工技术,对提高施工速度和质量,保证施工安全,提高经济效益都是十分重要的。

## 1.3 地下工程的围岩性质

由于地下工程施工的作业对象主要是岩石或土,所以岩(土)体的各种物理力学性质及其赋存条件,直接影响地下工程开挖时围岩的稳定性。为正确进行工程的设计和布局,合理选择地下工程的开挖方法和支护方式,保证地下工程施工及运营安全,须对围岩岩石(土)强度及稳定性进行分析。

### 1.3.1 岩石和土

岩石和土可总称为岩土。

岩石是经过地质作用形成的由一种或多种矿物组成的天然集合体,所以矿物是组成岩石的细胞,岩石的性质很大程度上取决于它的矿物成分。按其成因,岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类,不同类型的岩石,其物理力学性质是不一样的。地下工程施工方法、施工设备选择中经常需要考虑的岩石物理性质

有岩石的密度、硬度、耐磨性、孔隙比、碎胀性、水胀性、水解性、软化性等；力学性质有岩石的抗压、抗拉、抗剪强度指标以及弹性、塑性、流变性。

地下工程中更大范围内的岩石组成了岩体，岩体可由一种或多种岩石组成。因此，岩体也可以看做是由岩块组成的地质体。岩体的性质除决定于岩块性质外，很大程度上受其结构的影响。在地壳岩石形成过程中，地质构造作用以及其他漫长的大自然作用破坏了岩体的完整性和连续性，产生了许多裂隙、节理、断层以及溶洞等。人们常常把节理、裂隙、断层和沉积岩与由沉积岩变质的变质岩在生成过程中形成的层理和层面统称为结构面，把由结构面切割出的完整块体称为岩块，因此，岩体又可以认为是由岩块和结构面组成的复杂地质体。

地下工程中遇到的大多是沉积岩。沉积岩是由沉积物经过压紧、胶结等作用而形成的岩石，通常把这些固结性岩石称为基岩，把覆盖在基岩之上的松散性沉积物称为表土，如黄土、黏土、砂土等。按地质年代，表土层又分第三纪、第四纪冲积层，第四纪冲积层是极不稳定的地层。在基岩和表土之间，成岩作用不够充分的那部分岩层通常称之为基岩风化带。

风化后的岩石或土体还会受到水、风、冰川等的动力作用，经冲刷、搬运后沉积在一起，形成新的土体，经长期的高压、脱水、固结后，又会形成岩石。因此，岩石和土的区别只是颗粒胶结的强弱。土的胶结力比较弱，因此，土的成分对土体的物理力学性质影响很大。

### 1.3.2 岩石(土)的工程强度分级

岩石和土的工程强度分级方法很多，这里简要介绍按岩石饱和单轴抗压强度和岩石坚固性系数划分的方法。

#### 1.3.2.1 按岩石饱和单轴抗压强度划分

我国公路、铁路、水利部门的隧道设计规范中，给出了根据岩石单轴饱和抗压强度  $R_b$  大小划分的岩石强度等级，见表 1-1。

表 1-1 按岩石单轴抗压强度划分的岩石强度等级(MPa)

隧道类型	划分指标及等级				
公路隧道	$>60$	$30\sim60$	$15\sim30$	$5\sim15$	$<5$
	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩
	硬质岩		软质岩		
铁路隧道	$R_c > 60$	$30 < R_c \leq 60$	$15 < R_c \leq 30$	$5 < R_c \leq 15$	$R_c \leq 5$
	极硬岩	硬岩	较软岩	软岩	极软岩
	硬质岩		软质岩		
水工隧洞	$R_b > 60$	$30 < R_b \leq 60$	$15 < R_b \leq 30$	$5 < R_b \leq 15$	
	坚硬岩	中硬岩	较软岩	软岩	
	硬质岩		软质岩		

#### 1.3.2.2 按岩石坚固性系数划分

前苏联 M. M. 普罗托吉雅可诺夫于 1926 年提出用“坚固性”这一概念作为岩石工程分级的依据。普氏认为，岩石的坚固性在各方面的表现是趋于一致的，难破碎的岩石用各种方法都难于破碎，容易破碎的岩石用各种方法都易于破碎。因此，他建议用一个综合性的指标“坚固性系数  $f$ ”来表示岩石破坏的相对难易程度： $f = R_c / 10$ 。

通常称  $f$  为普氏岩石坚固性系数(简称普氏系数)， $R_c$  是岩石饱和单轴抗压强度(MPa)。该法因方法简明、便于使用而得到广泛应用。根据  $f$  值的大小，将岩石分为十级共 15 种(见表 1-2)。



表 1-2 岩石坚固性分级表

级别	坚固性程度	岩 石	f 值
I	最坚固的岩石	最坚固、最致密的石英岩及玄武岩,其他最坚固的岩石	20
II	很坚固的岩石	很坚固的花岗岩类,石英斑岩,很坚固的花岗岩,硅质片岩,坚固程度较 I 级岩石稍差的石英岩,最坚固的砂岩及石灰岩	15
III	坚固的岩石	致密的花岗岩及花岗岩类岩石,很坚固的砂岩及石灰岩,石英质矿脉,坚固的砾岩,很坚固的铁矿石	10
III a	坚固的岩石	坚固的石灰岩,不坚固的花岗岩,坚固的砂岩,坚固的大理岩,白云岩,黄铁矿	8
IV	相当坚固的岩石	一般的砂岩,铁矿石	6
IV a	相当坚固的岩石	砂质页岩,泥质砂岩	5
V	坚固性中等的岩石	坚固的页岩,不坚固的砂岩及石灰岩,软的砾岩	4
V a	坚固性中等的岩石	各种不坚固的页岩,致密的泥灰岩	3
VI	相当软的岩石	软的页岩;很软的石灰岩,白垩,岩盐,石膏,冻土、普通泥灰岩,破碎的砂岩,胶结的卵石及粗砂砾,多石块的土	2
VI a	相当软的岩石	碎石土,破碎的页岩,结块的卵石及碎石,坚硬的烟煤,硬化的黏土	1.5
VII	软岩	致密的黏土,软的烟煤,坚硬的表土层	1.0
VII a	软岩	微砂质黏土,黄土,细砾石	0.8
VIII	土质岩石	腐殖土,泥煤,微砂质黏土,湿砂	0.6
IX	松散岩石	砂,细砾,松土,采下的煤	0.5
X	流沙状岩石	流沙,沼泽土壤,饱和水的黄土及饱和水的土壤	0.3

### 1.3.3 围岩与围岩压力

围岩顾名思义就是地下工程开挖后所形成的空间周围的岩体,围岩既可以是岩体,也可以是土体。未经人为开挖扰动的岩(土)体称为原岩。当在原岩内进行地下工程开挖后,周围一定范围内岩体原有的应力平衡状态被打破,导致应力重新分布,引起附近岩体产生变形、位移,甚至破坏,直到出现新的应力平衡为止。所以,理论上又将开挖后隧道周围发生应力重新分布的岩体称为围岩,重新分布的应力称为二次应力。

如果在出现新的应力平衡之前已经对围岩进行了支护,则围岩的变形和破坏就会引起应力和位移的变化,甚至破坏支护结构。岩体力学中把由于开挖而引起的围岩或支护结构上的力学效应统称为广义的围岩压力。围岩压力的大小不仅与岩体的初始应力状态、岩体的物理力学性质和岩体结构有关,同时还与工程性质、支护结构类型及支护时间等因素有关。显然,当围岩的二次应力不超过围岩的弹性极限时,围岩压力将全部由围岩自身来承担,地下工程也就可以不加支护而在一定时期内保持稳定。当二次应力超过围岩的强度极限时,就必须采取支护措施,以保证地下工程的稳定,此时,围岩压力是由围岩和支护结构共同承担的。可见,作用在支护结构上的压力仅仅是围岩压力的一部分。因此,把作用在支护结构上的这部分围岩压力称为狭义的围岩压力。通常所说的围岩压力多指狭义围岩压力。

围岩压力按其来压方向分为顶压、侧压和底压;就其表现形式可分为松动压力、变形压力、冲击压力和膨胀压力等。由于开挖而引起围岩松动或坍塌的岩体以重力形式作用在支护结构上的压力称为松动压力;开挖必然引起围岩变形,支护结构为抵抗围岩变形而承受的压力称为变形压力;冲击压力是围岩中积蓄的大量弹性变形能受开挖的扰动而突然释放所产生的压力,包括岩爆、岩震等;膨胀压力是岩体遇水后体积发生膨胀而产生的压力,其大小取决于岩体的性质和地下水的活动特征。

对围岩的理论研究表明,围岩本身具有一定的自承载能力,充分发挥围岩的自承载能力,会大大降低地下工程支护成本。隧道开挖后,适当控制围岩的变形,对隧道的维护具有重要意义。