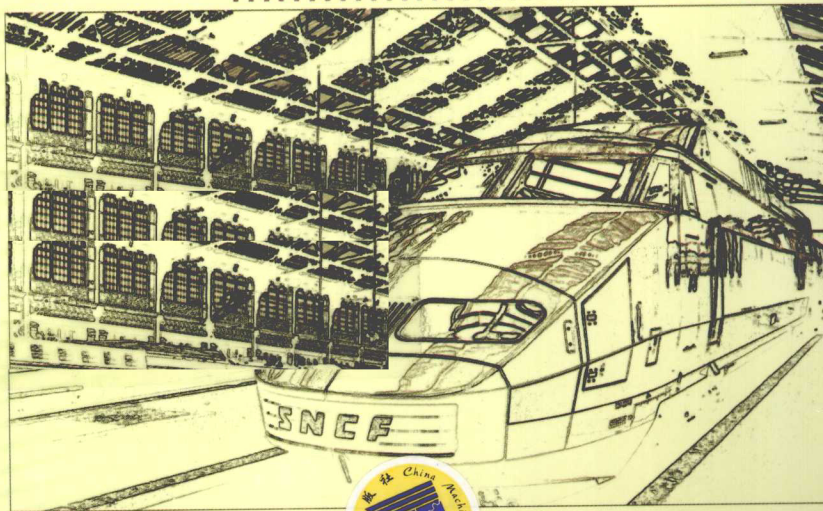


普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

地下工程

● 郑刚 主编

EDUCATION



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

地下工程

主 编 郑 刚
副主编 雷华阳
参 编 刘春原 刘 畅 王成华 王贵君
王容侠 仲晓梅 柴寿喜
主 审 顾晓鲁

图 书 在 册 号 (CIP)

ISBN 978-7-111-33025-3
普通高等教育“十二五”土木工程专业规划教材
北京：机械工业出版社，2010.12

ISBN 978-7-111-33025-3
普通高等教育“十二五”土木工程专业规划教材
北京：机械工业出版社，2010.12

ISBN 978-7-111-33025-3
普通高等教育“十二五”土木工程专业规划教材
北京：机械工业出版社，2010.12

ISBN 978-7-111-33025-3
普通高等教育“十二五”土木工程专业规划教材
北京：机械工业出版社，2010.12

ISBN 978-7-111-33025-3
普通高等教育“十二五”土木工程专业规划教材
北京：机械工业出版社，2010.12

ISBN 978-7-111-33025-3
普通高等教育“十二五”土木工程专业规划教材
北京：机械工业出版社，2010.12



机械工业出版社
地址：北京西城区百万庄大街24号
邮编：100037
电话：(010) 88391066

机械工业出版社
地址：北京西城区百万庄大街24号
邮编：100037
电话：(010) 88391066

机械工业出版社

机械工业出版社
地址：北京西城区百万庄大街24号
邮编：100037
电话：(010) 88391066

本书主要介绍了地下结构静力计算、基坑开挖与支护工程、地下连续墙设计与施工、地下工程逆作法设计与施工、沉井设计与施工、顶管工程、盾构法隧道设计与施工、箱涵的设计与施工、新奥法设计与施工、地下工程锚喷支护等。在本书的编写中适当介绍了目前工程中应用的新兴技术以及科学领域中的前沿问题,如二墙合一的设计、地下工程施工对环境的影响等。每章后均编有思考题,便于学生复习和巩固学习内容。

本书可作为土木工程专业本科生的教材,也适用于同类专业其他学生和有关技术人员参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程/郑刚主编. —北京:机械工业出版社, 2010.12
普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材
ISBN 978-7-111-33052-3

I. ①地… II. ①郑… III. ①地下工程-高等学校-教材
IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第007797号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 刘涛 责任编辑:马军平

责任校对:樊钟英 封面设计:张静

责任印制:杨曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2011年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·449千字

标准书号:ISBN 978-7-111-33052-3

定价:37.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

编 审 委 员 会

主任委员：

姜忻良 天津大学 教授、博导

副主任委员：

张向东 辽宁工程技术大学 教授、博导

李自林 天津城市建设学院 教授、博导

委 员：

李 珠 太原理工大学 教授、博导

魏连雨 河北工业大学 教授、博导

王成华 天津大学 教授

李 斌 内蒙古科技大学 教授

赵根田 内蒙古科技大学 教授

胡启平 河北工程技术大学 教授

张瑞云 石家庄铁道大学 教授

段树金 石家庄铁道大学 教授

段敬民 天津城市建设学院 教授

张敏江 沈阳建筑大学 教授

徐世法 北京建筑工程学院 教授

曹启坤 辽宁工程技术大学 教授

张泽平 太原理工大学 教授

前 言

会 员 委 审 编

地下工程是土木工程专业的主干课程之一。本书是为适应当前人才培养模式向宽专业口径发展的要求，结合土木工程专业课程教学的新要求，在吸收地下工程学科领域的最新理论和工程技术成果的基础上，以基本原理、基本概念、基本方法的阐述为主，结合新规范编写而成的。全书重点突出，深入浅出，在关键的知识点上努力求新求深。由于地下工程涉及面广，相关专业的参考书籍也较多，学习时可结合参考文献阅读其他的专著。

本书由天津大学、河北工业大学、天津城市建设学院的多位长期从事地下工程教学、科研工作的教师集体编写。郑刚教授任主编，雷华阳副教授任副主编，顾晓鲁教授任主审。第1章由郑刚编写；第2章由刘畅编写；第3章由郑刚编写；第4章由仲晓梅编写；第5章由王贵君编写；第6章由刘春原编写；第7章由王成华编写；第8章由雷华阳编写；第9章由王容侠编写；第10章由刘春原编写；第11章由柴寿喜编写。雷华阳负责全书的统稿。

主审提出了许多宝贵的修改意见，在此深表谢意。

由于编者水平有限以及客观条件和时间精力等限制，本书难免存在不妥之处，希望广大读者不吝赐教。

编者

目 录

前言

第1章 绪论..... 1

第2章 地下结构静力计算..... 4

2.1 地下结构的类型 4

2.2 地下结构计算理论简介和
计算方法分类 5

2.3 地下建筑结构设计内容 10

2.4 地下结构的地层压力及
其他荷载 10

2.5 弹性地基梁的计算 20

2.6 无铰拱的计算 30

2.7 曲墙拱的计算 35

2.8 直墙拱的计算 41

2.9 矩形闭合框架的计算 45

2.10 弹性支承法 56

思考题 65

第3章 基坑开挖与支护工程 66

3.1 概述 66

3.2 基坑支护结构类型 68

3.3 土压力与水压力 71

3.4 基坑稳定性分析 74

3.5 放坡开挖 80

3.6 桩墙式支护结构的设计计算 81

3.7 支撑体系的设计计算 84

3.8 SMW 工法设计与施工 87

3.9 水泥土重力式支护结构 91

3.10 基坑工程的地下水控制 95

3.11 基坑周围地面变形的控制 97

3.12 基坑土方开挖与施工监测 98

思考题 100

第4章 地下连续墙设计与施工..... 101

4.1 概述 101

4.2 地下连续墙的施工工艺过程 102

4.3 地下连续墙设计与计算 104

4.4 地下连续墙的主要施工工序 106

思考题 115

第5章 地下工程逆作法设计与
施工..... 116

5.1 概述 116

5.2 逆作法的设计及计算 120

5.3 逆作法的施工 127

思考题 132

第6章 沉井设计与施工..... 133

6.1 概述 133

6.2 沉井的分类和构造组成 133

6.3 沉井的设计 138

6.4 沉井的施工 155

思考题 162

第7章 顶管工程..... 163

7.1 顶管的分类及特点 163

7.2 顶管施工环节与设备 165

7.3 泥水式顶管施工 169

7.4 气压式顶管施工 170

7.5 土压平衡式顶管施工 171

7.6 微型顶管施工 173

思考题 174

第8章 盾构法隧道设计与施工..... 175

8.1 概述 175

8.2 盾构的基本结构及分类 176

8.3 盾构的尺寸和盾构千斤顶
推力的确定 184

8.4 衬砌设计与防水 187

8.5 盾构法施工及对周围环境的
影响 205

思考题 212

第9章 箱涵的设计和施工..... 213

9.1 概述 213

9.2 箱涵结构设计 213

9.3 箱涵结构设计实例	218	11.2 锚喷支护设计	262
9.4 箱涵的顶入法施工	226	11.3 锚喷支护施工	271
9.5 各种顶进方法简介	240	11.4 锚固试验、现场监控与 工程验收	275
思考题	244	思考题	279
第10章 新奥法设计与施工	245	附录	
10.1 概述	245	附录A 两个对称力矩作用下 基础梁的角变 θ	280
10.2 新奥法设计	246	附录B 两个对称集中荷载作用下 基础梁的角变 θ	281
10.3 新奥法施工	248	参考文献	283
10.4 新奥法量测	250		
思考题	257		
第11章 地下工程锚喷支护	258		
11.1 锚喷支护结构的特点和 组成	258		

第1章 绪 论

地下工程是指工程结构的全部或大部设置于地表以下的工程,包括城市地下工程和野外地下工程。城市地下工程包括所有城市地面以下土层或岩层中建造的各类地下建筑物与构筑物,包括地下交通运输、地下商业、地下储藏、地下生产、文化、体育、娱乐、人防等方面具有单一或多种功能的地下建筑与构筑物。例如,城市地铁车站常常还兼设地下商场、地下餐饮、地下娱乐等多种功能设施。野外地下工程主要有铁路、公路交通涉及的山岭地下隧道,穿越江河湖海的地下隧道,各类工业、民用、军用地下设置等。

以地下工程周围的围岩来分类,地下工程可分为修建在土中的地下工程和修建在岩石中的地下工程。近年来,地下工程的概念进一步延伸,如提出了在海底建设悬浮于海水中的悬浮隧道,这类“水下工程”由于从地表无法看见,似乎也可归为“地下工程”。

地下空间的开发可分为浅层、次浅层、次深层和深层开发,相应地,地下工程按照其埋深又可分为浅埋地下工程和深埋地下工程。一般来说,浅层地下空间和次浅层地下空间是指地表以下10m以内和10~30m的空间;次深层和深层地下空间则分别指地表以下30~100m和100m以下的空间。浅层地下空间适于建设可供人类活动的地下工程,而次深层和深层地下空间则仅适于建造各类地下储存系统,如废弃物处理地下工程、地下水封储库、能源设置等。当然,随着军事科技的发展,为了人防的需要,地下人防设施的建设深度也越来越大,如深埋于地表以下的飞机洞窟、地下指挥中心、地下疏散中心、地铁等,例如,莫斯科地铁的最大埋深超过了80m。为了降低储存成本及满足国家战时需要,水资源、能源、粮食等主要战略储备物资也常采用地下储存,美国等国家大多是利用地下透水层、溶岩空间存储地下水,石油、天然气及其他战备资源也可采用岩体中的洞室、溶岩腔存储。

人类对地下空间的应用已有较长的历史。由于洞穴可以冬暖夏凉、既可防风避雨,又可躲避野兽侵袭等,因此古人类就已经利用天然洞穴作为居住的地方,如北京周口店的山顶洞人。随着人类文明的发展,特别是自人类开始掌握青铜和铁制工具的使用后,人类开始有意识地建造各类地下工程以满足人类的需要,如建造于公元前2000多年前的巴比伦河底隧道、公元前312~226年罗马地下输水道和储水池等。近代地下工程的发展主要以海底隧道、山岭隧道和城市地下铁道的发展为标志,如伦敦于1863年建成了世界上第一道城市地下铁道。图1-1所示为我国西北地区人民传统居住的窑洞,就建造于黄土中。

世界近代建筑发展的历史大致可划分为三个阶段,即人们一般认为的19世纪是桥梁建设的世纪、20世纪是高层建筑的世纪、而21世纪则为地下空间发展的世纪。实际上,自20世纪20年代以来,世界各国由于城市化进程加快,城市用地紧张,基础设施落后,

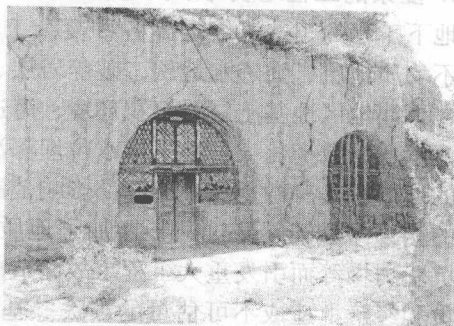


图1-1 我国西北地区人民传统居住的窑洞

环境恶化等问题日渐突出,一些发达国家就开始开发地下空间,通过修建过街通道、地铁、商场、仓库和地下综合服务区等,实现对地下空间的利用。东京首条地下高速路“东京中央环状新宿线”,于2007年3月开通之后,不仅大大缩短了通行时间,而且还有效地缓解了市中心地区的交通拥挤,并减轻了市内环境污染问题;美国波士顿中央大街改造工程是美国20世纪最复杂、最宏大、最具技术挑战的高速路工程,它是在中央大街下面建设一条地下快速路和一条穿越波士顿港的海底隧道,以联系机场和城市中心,完善城市交通,改善城市环境;巴黎也将构筑两环加放射的地下道路机动车交通系统,解决机动车在城市内部的运行问题。

自新中国成立以来,我国地下工程的建设发展速度日益加快,如1952年通车的成渝铁路以及此后的湘黔铁路等,开凿了大量的山岭隧道。随着铁路建设发展的需要和我国隧道建设技术的飞速发展,长达18km的秦岭隧道等长大隧道也得以完成。对于城市地下工程,1969年北京建成第一条地铁,1980年天津地铁通车,1979年香港地铁运营,1995年上海地铁一号线运营以及大量过江、引水、电缆、市政、地下街道、停车场、多功能地下建筑的兴建,标志着我国城市地下工程的建设进入了新的时代。

随着国民经济建设和城市建设的快速发展,城市地下空间的开发与利用成为21世纪我国城市基础建设的重要组成部分,是解决我国城市化发展与城市用地紧缺之间矛盾的主要手段。在城市地下空间的开发利用中,大型复杂地下工程的建设已成为地下空间开发与利用的重要组成部分,发展大运量的城市地下快速交通,特别是地铁已成为解决大城市交通矛盾的关键,也是城市向可持续、生态型方向发展的必然之路。作为城市地下工程的一种主要的形式,地下铁道的建设在我国具有广阔的前景。2008年,国务院批复了22个城市的地铁建设规划,至2016年,我国将新建轨道交通线路89条,总建设里程为2500km,目前已有50条、约1154km线路开工在建。

在城市中,地下工程往往还和地下建筑物联合建设,成为地上和地下交通、购物、休闲的转换枢纽,其功能得以提升。例如,总建筑规模 $7 \times 10^5 \text{m}^2$ 、堪称亚洲之最的北京东直门交通枢纽地上、地下各有两层,地面一层为公共电汽车到发站,地面二层为磁悬浮列车的到发站和首都机场第二始发大厅;地下二层是西直门至东直门的城市轻轨铁路的到发站,地下一层是环城地铁的东直门站。在这个立体式的交通枢纽里,人们可以轻松完成市内公交、郊区公交、地铁、城市轻轨、机场高速铁路、出租车、水上交通游艇7种交通形式的转换。

地下工程由于是在地表以下建设,因此其设计和建造面临着复杂的建造条件。

1. 复杂的工程地质与水文地质环境

地下工程的建造可能遇到各种复杂工程地质、水文地质条件,包括软弱地层、坚硬地层、不均质地层、强透水地层、破碎岩层、采空区、岩溶、可液化土层以及下穿江、河等。例如,天津地区地基土层受沉积环境、海进、海退以及海陆交互作用的影响,土层变化比较复杂,渗透系数变化大。地下潜水位埋深浅,一般离地表面0.4~2.1m,浅部的粉土或砂土层中的地下水具有微承压性,深部影响范围内存在承压水头较高的承压含水层。潜水与微承压水的相互渗透补给又进一步增加了地质条件的复杂性,容易出现因流砂、管涌、坑底失稳、坑壁坍塌等而引发重大工程事故,造成周围地下管线和建(构)筑物不同程度的损失,在人员和经济上造成不可估量的损失。基坑控制作为防范此类工程事故的一项重要配套措施,方案的设计、选择及实施效果对其安全性和经济性影响重大。

2. 周围设施及社会环境

城市地下工程的建造不可避免地要邻近或穿越既有建筑物、道路、立交桥桩基础、既有隧道、地下管线等。城市地下工程的建造及运行,当邻近或从下方穿越居住区、医院、学校等时,会面临减振、降噪等环境要求。山岭隧道建设要面临造成地下水水位下降等环境问题。

3. 复杂的建筑方法

地下工程的建造方法多种多样,地下工程建造中地下工程结构的受力与围岩的受力因施工方法的不同而可能显著不同。对城市地下工程,其施工方法可包括各类明挖法和暗挖法,这些方法在建造与使用过程中对围岩的扰动和支护方法不同。在软弱土中的施工方法更是多种多样,包括明挖法、暗挖法、逆作法、盖挖逆作法、沉井法、沉管法、盾构法、顶管法、箱涵顶进法等。

地下工程建设投资巨大,建设与使用周期长。同时,地下工程的建造方法多种多样,属于隐蔽工程,在建造及使用过程中存在较大的风险,而且在使用过程中一旦出现损坏,其修复难度也较大。因此,大型地下工程的设计、建造是百年大计的问题。然而由于地下工程设计、建造的复杂性,以及设计、施工、监测、管理等方面的不成熟与不完善,导致近年来发生了大量工程事故,造成巨大的生命财产损失和不良社会影响。

2003年7月,正在施工的上海地铁4号线发生涌水流砂事故,引起隧道部分结构损坏及周边地区地面沉降,造成三栋建筑物严重倾斜,防汛墙局部塌陷,直接经济损失达1.5亿元。北京地铁10号线建设过程中发生多次施工事故,如熊猫环岛站基坑坍塌、光华路区间地面大范围坍塌事故、苏州街车站出入口发生塌方导致6名施工人员被埋身亡等。2007年5月,南京地铁2号线茶亭站西基坑东端约500m³土体发生滑坡,造成2名工人死亡。2008年1月,广州地铁5号线施工中突然涌水,发生塌方,导致珠江大桥引桥下的双桥路旁地面突然下陷。2008年11月,杭州地铁1号线南端湘湖车站的基坑工地突然坍塌,21人遇难或失踪,造成中国地铁修建史上最严重的事故。德国位于科隆市中心的科隆城市档案馆于2009年3月3日突然发生坍塌,同时引发周边建筑不同程度坍塌下沉,发生1人死亡、9人失踪的惨剧。更令德国人痛心的是,大批德国珍贵历史文献影像资料也葬身废墟。有报道称档案馆坍塌可能与附近地铁施工有关。此外,开挖深度逾30m的新加坡地铁环线基坑的坍塌、台湾地铁车站基坑涌水事故等均造成了重大损失。

地下工程的设计与建造涉及工程地质、材料力学、土力学、岩石力学、水力学、结构力学、土动力学等的专业理论与知识,因此,地下工程的学习也涉及与其相关的岩土工程、结构工程、防灾减灾等学科专业理论与知识的课程的学习。

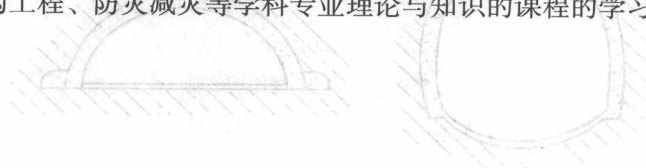


图 1-5-1 图

图 1-5-1 (a) 明挖法 (b) 暗挖法 (c) 沉井法 (d) 沉管法 (e) 盾构法 (f) 顶管法 (g) 箱涵顶进法

第 2 章 地下结构静力计算

2.1 地下结构的类型

地下结构是地下建筑工程的重要组成部分，其结构形式应根据地层的类别，使用目的和施工技术水平等进行选择。按照结构形式不同，地下结构一般可分为四大类：拱形结构、圆管结构、框架结构和沉井结构。

1. 拱形结构

图 2-1 所示各种衬砌结构的横剖面均属拱形结构。

(1) 喷锚结构 采用喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆喷混凝土或锚杆钢筋网喷混凝土等在毛洞开挖后及时地对地层进行加固的结构称为喷锚支护（图 2-1a）。由于喷锚支护是一种柔性结构，故能更有效地利用围岩的自支撑能力维护洞室稳定，其受力性能一般优于整体式衬砌，被认为是一种新型的地下结构形式。

(2) 半衬砌 当地下岩石较坚硬，侧壁无坍塌危险，仅顶部岩石可能有局部脱落时，只在顶部衬砌，叫做半衬砌（图 2-1b）。此时，为了保护岩石不受风化，常在侧壁表面喷一层 2~3cm 厚的水泥砂浆。

(3) 厚拱薄墙 顶拱的拱脚较厚，边墙较薄，称为厚拱薄墙（图 2-1c）。这样，可将顶拱所受的力通过拱脚大部分传给了岩石，充分利用了岩石的强度，使边墙所受的力大为减少，从而减少了边墙的厚度，节约了建筑材料。为了保证边墙的稳定，可在边墙的上端打入锚杆，将边墙与岩石锚固在一起。

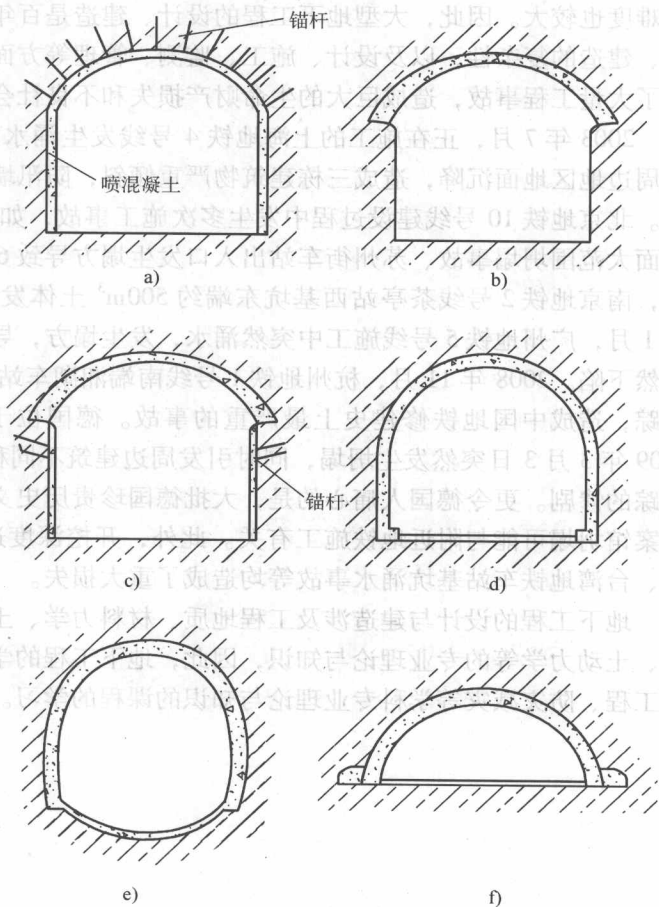


图 2-1 拱形结构

a) 喷锚结构 b) 半衬砌 c) 厚拱薄墙
d) 直墙拱 e) 曲墙拱 f) 落地拱

(4) 直墙拱 顶拱与边墙浇筑在一起, 形成一个整体结构, 称为直墙拱 (图 2-1d)。在铁路隧道、地下厂房, 地下仓库, 军事坑道、水工隧洞等地下建筑中, 广泛地使用直墙拱。直墙拱不但在坚硬地层中常被采用, 在软土中小跨度的人防通道亦常应用。

(5) 曲墙拱 当岩石松散破碎易于坍塌时, 可采用曲墙拱 (图 2-1e)。如岩石比较坚硬, 又无涌水现象, 底板可做成平板并与边墙分开。

(6) 落地拱 落地拱 (图 2-1f) 多用于大跨度的仓库, 如飞机库等。在岩石或软土中均可使用。

2. 圆管结构

软土中的地下铁道或穿越河底的交通隧道常采用圆管结构 (图 2-2)。这种结构多做成装配式, 叫做管片结构。施工时利用盾构掘进。

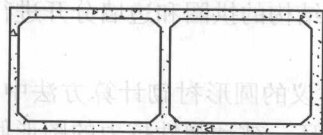
3. 框架结构

软土中明挖施工的地下铁道常采用箱形结构, 计算这种结构常采用框架的计算理论, 故叫做框架结构。图 2-3a 为地下铁道通道的横剖面图。

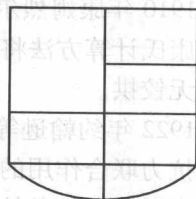
软土中的地下厂房、地下医院或地下指挥所亦常采用框架结构。图 2-3b 表示地下发电厂的结构简图。



图 2-2 圆管结构



a)



b)

图 2-3 框架结构

a) 地下铁道 b) 地下发电厂

4. 沉井结构

沉井结构用于软土中, 先在地面上建造井筒 (井筒的水平剖面为圆形或矩形), 然后在井筒内挖土使其逐渐下沉。待沉到设计标高, 则进行封底并浇筑底板与顶板。软土中的地下厂房及油库等常采用沉井结构。

2.2 地下结构计算理论简介和计算方法分类

2.2.1 地下结构计算理论的发展

地下结构计算理论形成初期, 仅仿照地面结构的计算方法进行地下结构的计算, 经过较长时期的实践, 形成以考虑地层对结构受力变形约束为特点的地下结构计算理论。20 世纪中期起, 数值计算技术的出现和进步大大推动了岩土力学和工程结构等学科的研究, 地下结构的计算理论也因此有了更大的发展。地下结构计算理论的发展, 大致可分为以下六个阶段。

1. 刚性结构阶段

19 世纪的地下建筑物大都是以砖石材料砌筑的拱形圬工结构, 这类建筑材料的抗拉强

度很低,且结构物中存在有较多的接缝,容易产生断裂。为了维持结构的稳定,当时的地下结构的截面都拟定得很大,结构受力后产生的弹性变形较小,因而最先出现的计算理论是将地下结构视为刚性结构的压力线理论。压力线理论认为地下结构是由一些刚性块组成的拱形结构,所受的主动荷载是地层压力,当处于极限平衡状态时,是由绝对刚体组成的三铰拱静定体系,铰的位置分别假设在墙底和拱顶,其内力可按静力学原理进行计算。

2. 弹性结构阶段

19世纪后期,混凝土和钢筋混凝土材料在地下工程中的应用,使地下结构具有较好的整体性。从这时起,地下结构开始按弹性连续拱形框架进行内力计算。弹性连续拱形框架的内力按超静定结构力学方法计算,作用在结构上的荷载是主动的地层压力。这种计算方法的缺点是没有考虑地层对结构产生的弹性抗力的约束作用,但由于有了比较可靠的力学原理为依据,至今在软弱土层中设计地下结构时仍有时采用。

3. 假定抗力阶段

地下结构衬砌在承受主动荷载作用产生弹性变形的同时,将受到地层对其变形产生的约束作用。将地层对衬砌的约束按衬砌受与其变形相适应的弹性抗力的假设形式进行考虑,地下结构的计算理论便进入了假定抗力阶段。

1910年康姆烈尔首先在计算整体式隧道衬砌时假设刚性边墙受有呈直线分布的弹性抗力。康氏计算方法将整体式结构的拱圈和边墙分开进行计算,并将拱圈视为支承在固定支座上的无铰拱。

1922年约翰逊等人在建议的圆形衬砌计算方法中也将结构视为受主动荷载和侧向地层弹性抗力联合作用的弹性圆环。被动弹性抗力的图形假设为梯形,抗力大小可根据衬砌各点有无水平移动的条件加以确定。

上述假定抗力法的缺点是过高估计了地层抗力的作用,使结构设计偏于不安全。为了弥补这一缺点,结构设计采用的安全系数常被提高到3.5~4以上。

1934年,朱拉波夫和布加耶娃对拱形结构按变形曲线假定了镰刀形的抗力图形,并按局部变形理论认为弹性抗力与结构周边地层的沉陷成正比。该法将拱形衬砌(曲墙式或直墙式)的拱圈与边墙整体考虑,视为一个直接支承在地层上的尖拱,以结构力学原理计算其内力。由于该法按结构的变形曲线假定了地层弹性抗力的分布图形,并由变形协调条件计算弹性抗力的量值,因而比前二种假定抗力法较为合理。

4. 弹性地基梁阶段

由于假定抗力法对抗力图形的假定带有较大的任意性,人们开始研究将边墙视为弹性地基梁的结构计算理论,将隧道边墙视为支承在侧面和基底地层上的双向弹性地基梁,即可计算在主动荷载作用下拱圈和边墙的内力。

首先应用的弹性地基梁理论是局部变形理论,共同变形弹性地基梁理论在稍后也被用于地下结构计算。

按共同变形理论计算地下结构的优点,在于其以地层的物理力学特征为根据,并能考虑各部分地层沉陷的相互影响,在理论上比局部变形理论有所进步。

5. 连续介质阶段

20世纪中期以来,按连续介质力学理论计算地下结构内力的方法也逐渐发展。这种计算方法以岩体力学原理为基础,认为坑道开挖后洞室内变形而释放的围岩压力由

支护结构与围岩组成的地下结构体系共同承受。一方面围岩本身由于支护结构提供了一定的支护阻力,从而引起其应力调整达到新的平衡;另一方面由于支护结构阻止围岩变形,必然要受到围岩给予的反作用力而发生变形。这种反作用力和围岩的松动压力极不相同,是支护结构与围岩共同变形过程中对支护结构施加的压力,称为变形压力。

这种计算方法的重要特征是把支护结构与岩体作为一个统一的力学体系来考虑。两者之间的相互作用与岩体的初始应力状态、岩体的特性、支护结构的特性、支护结构与围岩的接触条件以及参与工作的时间等一系列因素有关,其中也包括施工技术的影响。

6. 数值方法阶段

20世纪60年代以来,随着计算机技术的推广和岩土介质本构关系研究的进步,地下结构的数值计算方法得到很大发展。有限元法、边界元法及离散元法等数值解法迅速发展,除了编制程序,还出现了很多模拟围岩弹塑性、黏弹塑性及岩体节理面等的大型程序,使得连续介质力学的计算应用范围得到扩大。这些理论都是以支护与围岩共同作用和已知地应力及施工条件为前提的,比较符合地下工程的力学原理。然而,计算参数还难以准确获得,如原岩应力、岩体力学参数及施工因素等。另外,对岩土材料的本构模型与围岩的破坏失稳准则还认识不足。因此,目前根据共同作用所得的计算结果,一般也只能作为设计参考依据。

2.2.2 地下结构计算的力学模型

从各国的地下结构设计实践看,目前用于地下结构的计算模型有两类:一类是以支护结构作为承载主体、围岩作为荷载的来源,同时考虑其对支护结构的变形约束作用的模型,称为结构力学模型;另一类则相反,视围岩为承载主体,支护结构则约束围岩向隧道内变形的模型,称为岩体力学或连续介质力学模型。

1. 结构力学的计算模型

结构力学的计算模型也称为荷载—结构模型。其计算方法认为,地层对结构的作用只是产生作用在地下结构上的荷载(包括主动的地层压力和由于围岩约束结构变形而形成的弹性反力),以计算衬砌在荷载作用下产生的内力和变形的的方法称为荷载—结构法。其设计原理是按围岩分级或由实用公式确定围岩压力,围岩对支护结构变形的约束作用是通过弹性支承来体现的,而围岩的承载能力则在确定围岩压力和弹性支承的约束能力时间接考虑。围岩的承载能力越高,给予支护结构的压力越小,弹性支承约束支护结构变形的弹性反力越大,相对来说,支护结构所起的作用就变小了。

荷载—结构模型是我国目前广泛采用的一种主要的地下结构计算模型。荷载—结构模型虽然都是以承受岩体松动、崩塌而产生的竖向和侧向主动压力为主要特征,但在围岩与支护结构相互作用的处理上却有几种不同的做法。

(1) 主动荷载模型 不考虑围岩与支护结构的相互作用。因此,支护结构在主动荷载作用下可以自由变形,和地面结构的作用没有什么不同。这种模型主要适用于围岩与支护结构的“刚度比”较小的情况下,或是软弱地层对结构变形的约束能力较差时(或衬砌与地层间的空隙回填、灌浆不密实时)。围岩没有“能力”去约束刚性衬砌的变形(图2-4a)。

(2) 主动荷载加围岩弹性约束的模型 认为围岩不仅对支护结构施加主动荷载,而且由于围岩与支护结构的相互作用,还对支护结构施加被动的弹性反力。因为,在非均匀分布的主

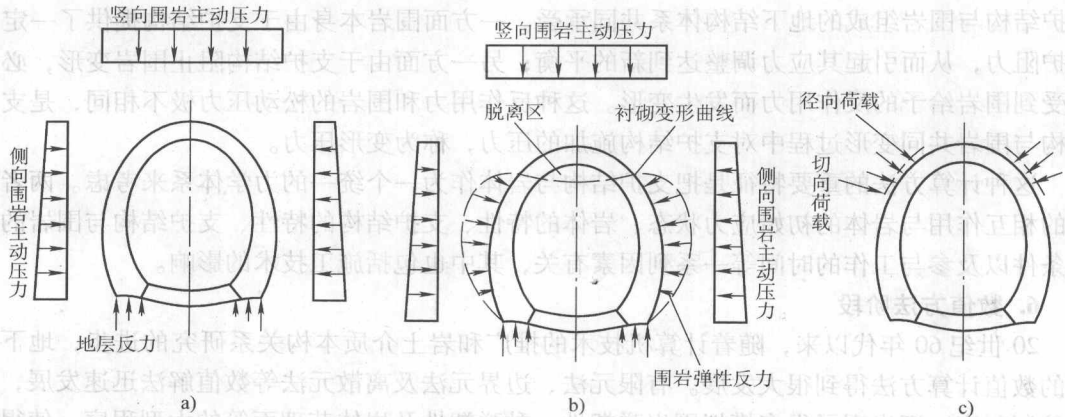


图 2-4 结构力学的计算模型

a) 主动荷载模型 b) 主动荷载加被动抗力模型 c) 实地量测荷载模型

动荷载作用下, 支护结构的一部分将发生向着围岩方向的变形, 只要围岩具有一定的刚度, 就必然会对支护结构产生反作用力来抵制其变形, 这种反作用力就称为弹性反力, 属于被动性质。而支护结构的另一部分则背离围岩向着隧道内变形。当然, 不会引起弹性反力, 形成所谓“脱离区”。支护结构就是在主动荷载和围岩的被动弹性反力同时作用下进行工作的 (图 2-4b)。

(3) 实地量测荷载模型 实地量测的荷载值是围岩与支护结构相互作用的综合反映, 既包含围岩的主动压力, 也含有弹性反力。在支护结构与围岩牢固接触时 (如喷锚支护), 不仅能量测到径向荷载, 而且还能量测到切向荷载 (图 2-4c)。切向荷载的存在可以减小荷载分布的不均匀程度, 从而大大减小结构中的弯矩。结构与围岩松散接触时 (如具有回填层的模筑混凝土衬砌), 就只有径向荷载。但应该指出, 实地量测的荷载值除与围岩特性有关外, 还取决于支护结构的刚度以及支护结构背后回填的质量。因此, 某一种实地量测的荷载, 只能适用于与量测条件相同的情况。

这一类计算模型主要适用于围岩因过分变形而发生松弛和崩塌, 以及支护结构主动承担围岩松动压力的情况。由于此类模型概念清晰, 计算简便, 易于被工程师们所接受, 故至今仍很通用。

从上述可知, 对于 (1) 类模型, 只要确定了作用在支护结构上的主动荷载, 其余问题用结构力学的一般方法即可解决, 常用的有弹性连续框架 (含拱形) 法, 如力法、位移法等。

对于 (2) 类模型, 除了上述的主动荷载外, 尚需解决围岩的弹性反力问题。正如上面所述, 所谓弹性反力就是指由于支护结构发生向围岩方向的变形而引起的反力。在围岩上引起的弹性反力的大小, 可以用局部变形理论 (图 2-5a) 或共同变形理论 (图 2-5b) 计算。目前常用的是以文克勒 (Winkler) 假定为基础的局部变形理论来确定。其认为围岩的弹性反力是与围岩在该点的变形成正比的, 用公式表示为

$$\sigma_i = K\delta_i \quad (2-1)$$

式中 δ_i ——围岩表面上任意一点 i 的压缩变形;

σ_i ——围岩在同一点所产生的弹性反力;

K ——比例系数, 称为围岩的弹性反力系数。

文克勒假定相当于把围岩简化成一系列彼此独立的弹簧。某一弹簧受到压缩时所产生的反作用力只与该弹簧有关，而与其他弹簧无关。这个假定虽然与实际情况不符，但简单明了，而且也满足了一般工程设计的需要精度，因此应用较多。

共同变形理论（图2-5b）假定地基为弹性半无限体，作用在地基上某一点的力，不仅引起该点地基的变位，也会引起其他点的变位，且会影响到一定的范围。换句话说，共同变形理论假定，围岩某一点的变位不仅与该点的作用荷载有关，而且与其他点作用的荷载有关，是一种叠加效应。应用这种计算理论的计算方法有弹性地基梁法（如弹性地基上的闭合框架、直边墙拱形衬砌的计算等）。这种计算理论比较符合实际情况，但计算公式的理论推导比较繁琐，实际应用时，是根据荷载类型和弹性地基梁的相对刚度，整理出不同的计算表格，使用起来比较方便。需要时可参考有关专著。

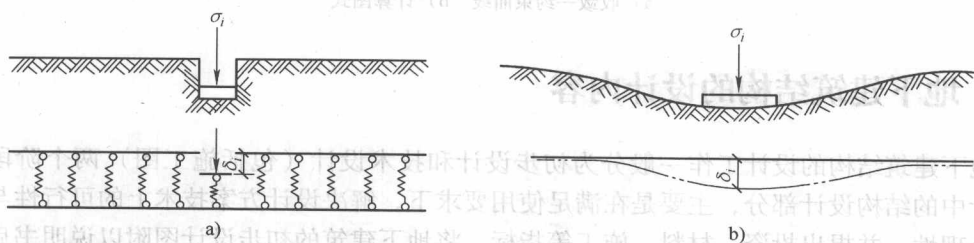


图2-5 弹性反力计算模型

a) 局部变形理论 b) 共同变形理论

2. 连续介质力学的计算模型

连续介质力学的计算模型也称围岩—结构模型（图2-6）。现代的岩体力学模型是将支护结构与围岩视为一个整体，作为共同承载的地下结构体系，故也称复合整体模型。在这个模型中，围岩是直接的承载单元，支护结构是镶嵌在围岩孔洞上的承载环，只是用来约束和限制围岩的变形，两者共同作用的结果是使支护结构体系达到平衡状态。这一点正好和前述模型相反。

在围岩—结构模型中，可以考虑各种几何形状、围岩和支护材料的非线性特性、开挖面空间效应所形成的三维状态，以及地质中不连续面等。在这个模型中，只对圆形结构取得了精确的解析解，但绝大部分问题因数学上的困难必须依赖数值方法，所以，目前常用的数值计算法中主要是以有限单元法（FEM）为主。

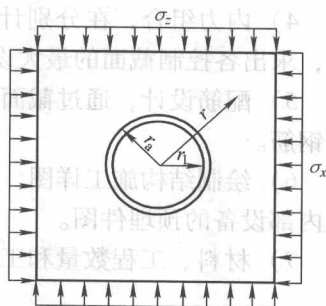


图2-6 围岩—结构模型

收敛—约束法严格地说来也应是连续介质力学的计算方法之一。其原理是按弹塑—黏性理论等推导公式后，在以洞周位移为横坐标、支护阻力为纵坐标的坐标平面内绘出表示地层受力变形特征的洞周收敛线，并按结构力学原理在同一坐标平面内绘出表示衬砌结构受力变形特征的支护约束线。根据以上两条曲线的交点（图2-7a）表示的支护阻力值进行衬砌结构设计（图2-7b）。软岩地下洞室、大跨度地下洞室和特殊洞形的地下洞室的设计较适于采用收敛—约束法。

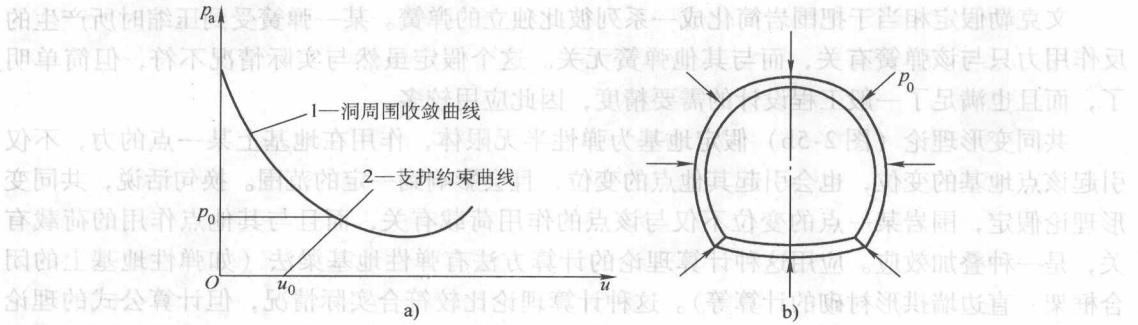


图 2-7 收敛—约束模型

a) 收敛—约束曲线 b) 计算图式

2.3 地下建筑结构的设计内容

地下建筑结构的设计工作一般分为初步设计和技术设计（包括施工图）两个阶段。初步设计中的结构设计部分，主要是在满足使用要求下，解决设计方案技术上的可行性与经济上的合理性，并提出投资、材料、施工等指标。将地下建筑的初步设计图附以说明书后，送交有关主管部门审定批准后，才可进行下一步的技术设计。地下结构设计的内容主要包括：

1) 计算荷载，按地层介质类别、建筑用途、防护等级、地震级别、埋置深度等求出作用在结构上的各种荷载值。

2) 计算简图，根据实际结构和计算的具体情况，拟出恰当的计算图式。

3) 内力分析，选择结构内力计算方法，得出结构各控制设计截面的内力。

4) 内力组合，在分别计算各种荷载内力的基础上，对最不利的可能情况进行内力组合，求出各控制截面的最大设计内力值。

5) 配筋设计，通过截面承载力和裂缝计算得出受力钢筋，并确定必要的分布钢筋与架立钢筋。

6) 绘制结构施工详图，如结构平面图，结构构件配筋图及节点详图，风、水、电和其他内部设备的预埋件图。

7) 材料、工程数量和工程财务预算。

2.4 地下结构的地质压力及其他荷载

2.4.1 作用在地下结构上荷载的种类和组合

荷载的确定是工程结构计算的先决条件，而地下建筑结构承受的荷载是比较复杂的。到目前为止，其确定方法还不够完善，有待深入研究。

1. 荷载种类

作用在地下建筑结构上的荷载，按其存在的状态，可以分为永久荷载、活荷载、动荷载及其他荷载四大类。

(1) 永久荷载 又称恒载，是地下结构承受的主要静力荷载，在设计基准期内其大小、