

地下结构 设计原理与方法

(第2版)

曾艳华 汪波 封坤 董唯杰 编著



西南交通大学出版社

内容提要

本教材系统地介绍了地下结构设计的基本理论与计算方法，突出了地下支护结构理论，形成了以理论计算和经验设计为基础，并以施工量测信息反馈设计来指导施工的地下结构设计体系。

本书重点阐述了地下结构的工作环境、支护结构原理、荷载-结构模型的计算方法、地层-结构模型的计算方法和信息反馈设计方法。同时，为说明这些计算原理与方法，还撰写了有关的基础知识，列举了大量的工程实例，并辅以算例，做到理论与实践相结合。

本书可作为高等院校地下工程专业本科学生的教材，亦可供从事相关工程工作的科研、设计和施工技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地下结构设计原理与方法 / 曾艳华等编著. —2 版

. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.11

ISBN 978-7-5643-8920-8

I. ①地… II. ①曾… III. ①地下工程—结构设计
IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 169419 号

Dixia Jiegou Sheji Yuanli yu Fangfa

地下结构设计原理与方法 (第 2 版)

曾艳华 汪波 封坤 董唯杰 / 编著

责任编辑 / 韩洪黎

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 21.75 字数 540 千

版次 2003 年 9 月第 1 版 2022 年 11 月第 2 版

印次 2022 年 11 月第 9 次

书号 ISBN 978-7-5643-8920-8

定价 58.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第 2 版前言

地下工程通常包括在地下修筑的各种隧道与洞室。铁路、公路、地铁、矿山、水电、国防等多个领域都大量涌现出了多种多样的地下工程。随着科学技术与工业的不断进步，以及人类社会绿色低碳发展的迫切要求，地下工程将会有更为广阔的应用前景，21 世纪将是地下工程的世纪。

地下结构不同于地面结构，分析和研究地下结构的安全性和稳定性不仅与结构本身有关，还与周围的环境——工程地质条件及施工过程密切相关，即围岩的稳定性极大地影响地下结构的安全性。尽管地下结构计算理论的发展至今已有百余年的历史，但在人们还没有认识到这一点之前，地下结构长期处于“经验设计”和“经验施工”的局面。

地下工程施工技术水平的提高，特别是以新奥法原理为基础的现代支护技术的应用与发展，使得充分发挥和提高围岩的承载能力成为可能，人们也就更加认识到将围岩的承载力以及围岩与支护结构相互作用的关系正确地反映到计算模型中来，从而降低工程造价的重要性。

本书是根据 2003 年出版的《地下结构设计原理与方法》(李志业、曾艳华，西南交通大学出版社)，结合近 20 年地下工程建设中有关设计理论方面的研究成果，在总结多年教学经验的基础上修订而成的。全书针对目前国内外广泛应用的设计方法，重点阐述了以新奥法为基础的地下结构支理论及设计方法、以围岩分级为基础的经验设计方法、国内外广泛采用的结构力学的计算模型、随着岩体力学的发展而发展起来的连续介质力学模型、随着量测技术发展起来的信息化设计方法等。同时，为说明这些设计方法和计算原理，还撰写了地下结构工作环境的基础知识。

本教材为土木工程专业地下工程方向的教材之一。本着以授课为主、自学为辅的原则，除了阐述有关计算模型的基本原理与方法以外，还列入了许多实例，以便于自学。

本教材还可供地下工程专业的研究生和工程技术人员参阅。

全书共分 7 章，第 1 章、第 5~7 章由曾艳华、封坤教授编写；第 2~4 章由汪波教授和董唯杰副教授编写；肖明清大师完成了第 6 章隧道支护结构设计总安全系数法的编写，耿萍教授完成了第 3 章地震荷载及第 6 章隧道地震响应时程分析的编写。李志业教授对全书进行了审阅。董唯杰副教授对全书的图形和符号的统一做了大量的工作，在此一并表示感谢。

在编写过程中可能还存在一些疏漏或不足，敬请广大读者批评指正。

编者

2022 年 7 月

第 1 版前言

地下工程通常包括在地下开挖的各种隧道与洞室。铁路、公路、矿山、水电、国防、城市地铁及城市建设等许多领域，都有大量的地下工程。随着科学技术及工业的发展，地下工程将会有更为广泛的应用前景。科学预测指出 21 世纪将是地下工程的世纪。

地下结构不同于地面结构，分析和研究地下结构的安全性和稳定性不仅与结构本身有关，还与周围的环境——工程地质条件及施工过程密切相关，即围岩的稳定性极大地影响地下结构的安全性。尽管地下结构计算理论的发展至今已有百余年的历史，但在人们还没有认识到这一点之前，地下结构长期处于“经验设计”和“经验施工”的局面。

随着地下工程施工技术水平的提高，特别是以新奥法原理为基础的现代支护技术的应用与发展，使得充分发挥和提高围岩的承载能力成为可能，人们也就更加认识到如何将围岩的承载力以及围岩与支护结构相互作用的关系正确地反映到计算模型中来，从而达到降低工程造价的目的。

本教材基于上述现状，在总结十几年教学经验的基础上，就目前国内外广泛应用的设计方法，重点阐述了以新奥法为基础的现代支护理论及设计方法；以围岩分级为基础的经验设计方法；国内外广泛采用的结构力学的计算模型；随着岩体力学的发展而发展起来的连续介质力学模型；随着量测技术发展起来的信息化设计方法等。同时，为说明这些设计方法和计算原理，还撰写了有关的基础知识。

本教材为土木工程专业地下工程方向的教材之一。本着以授课为主自学为辅的原则，除了阐述有关计算模型的基本原理与方法以外，还列入了许多实例，以便于自学。

本教材还可供地下工程专业的研究生和工程技术人员参阅。

本书共分 7 章，第 1 章~第 5 章由李志业教授编写；第 6 章~第 7 章由曾艳华副教授编写；郭艳华完成了第 3 章的大部分算例；刘红燕完成了第 5 章 5.3 中的算例。高波教授对全书进行了审阅。曾艳华副教授对全书的图形和符号的统一做了大量的工作，关宝树教授对此书提出了宝贵的意见，肖中平也为本书提供了很多素材，在此一并表示感谢。

在编写过程中可能还存在一些疏漏或不足，敬请专家及同行指正。

编者

2003 年 5 月

目 录

第 1 章 概 论	001
1.1 地下结构体系及计算特点	001
1.2 地下结构计算理论的发展与现状	008
1.3 地下结构计算的力学模型	012
1.4 地下结构设计方法	016
思考题与习题	020
第 2 章 地下工程结构物的工作环境	021
2.1 初始应力场	021
2.2 围岩的工程性质	030
2.3 地下洞室的围岩分级及其应用	041
思考题与习题	065
第 3 章 洞室开挖后围岩的力学效应	066
3.1 基本概念	066
3.2 洞室开挖后的应力场特征及力学效应	068
3.3 围岩应力和位移的线弹性分析	072
3.4 围岩应力和位移的弹塑性分析	078
3.5 围岩压力	090
思考题与习题	113
第 4 章 支护结构设计原理与方法	115
4.1 地下结构体系的设计理念	115
4.2 支护结构的组成与力学作用机理	117
4.3 围岩与支护结构的收敛-约束效应	129
4.4 以围岩分级为基础的经验设计	137
4.5 轴对称条件下锚喷支护的计算与设计	154
思考题与习题	160

第 5 章 结构力学的计算方法	161
5.1 概 述	161
5.2 不考虑弹性反力的计算方法	167
5.3 假定弹性反力的计算方法	181
5.4 弹性地基梁法	209
5.5 弹性支承法	222
5.6 支挡结构计算	240
思考题与习题	253
第 6 章 地层-结构模型的计算方法	257
6.1 解析法	257
6.2 数值法	262
6.3 隧道支护结构设计总安全系数法	289
思考题与习题	297
第 7 章 地下结构信息反馈设计方法	299
7.1 概 述	299
7.2 现场监控量测	302
7.3 量测数据的分析处理	310
7.4 信息反馈方法	313
7.5 隧道净空位移的监控基准及监控曲线	326
附 录	331
参考文献	337

第 1 章 概 论

1.1 地下结构体系及计算特点

在保留上部地层（山体或土层）的前提下，在开挖出能提供某种用途的地下空间内修筑的建筑物，通称为地下结构。

1. 地下结构体系的组成

地下结构和地面结构物，如房屋、桥梁、水坝等一样，都是一种结构体系，但两者在赋存环境、力学作用机理等方面都存在着明显的差异。地面结构体系一般都是由上部结构和地基组成。地基只在上部结构底部起约束或支承作用，除了自重外，荷载都是来自结构外部，如人群、设备、列车、水力等 [图 1.1.1 (a)]。而地下结构是埋入地层中的，四周都与地层紧密接触。结构上承受的荷载来自于洞室开挖后引起周围地层的变形和坍塌而产生的作用力，同时结构在荷载作用下发生的变形又受到地层的约束。在地层稳固的情况下，开挖出的洞室中甚至可以不设支护结构而只留下地层，如我国陕北的黄土窑洞，证实了在无支护结构的洞室中，周边岩土体本身就是承载结构。

由于地下结构周围的地层是千差万别的，洞室是否稳定不仅取决于岩石强度，而且取决于地层构造的完整程度。相比之下，周围地层构造的完整性对洞室的稳定性更有影响。各类岩土地层在洞室开挖之后，都具有一定程度的自稳能力。地层自稳能力较强时，地下结构将不受或少受地层压力的荷载作用，否则地下结构将承受较大的荷载直至必须独立承受全部荷载作用。因此，周围地层能与地下结构一起承受荷载，共同组成地下结构体系。地层既是承载结构的基本组成部分，又是形成荷载的主要来源 [图 1.1.1 (b)]，且洞室周围的地层在很大程度上是地下结构体系中承载的主体。地下结构的安全性首先取决于地下结构周围的地层能否保持持续稳定，并且应充分利用和更好地发挥围岩的这种承载能力。在需要设置支护结构时，支护结构能够阻止围岩不发生有害的变形，使其达到稳定的作用，这种合二为一的作用机理与地面结构是完全不同的。

除在坚固、完整而又不易风化的稳定岩层中可以只开成毛洞外，其他地层中的坑道都需要修建支护结构，即衬砌，或称为被覆。它是在坑道内部修建的永久性支护结构。因此，支护结构有 2 个最基本的使用要求：一是满足结构强度、刚度要求，以承受诸如水、土压力以及一些特殊使用要求的外荷载；二是提供一个能满足使用要求的工作环境，以便保持隧道内部的干燥和清洁。这两个要求是彼此密切相关的。

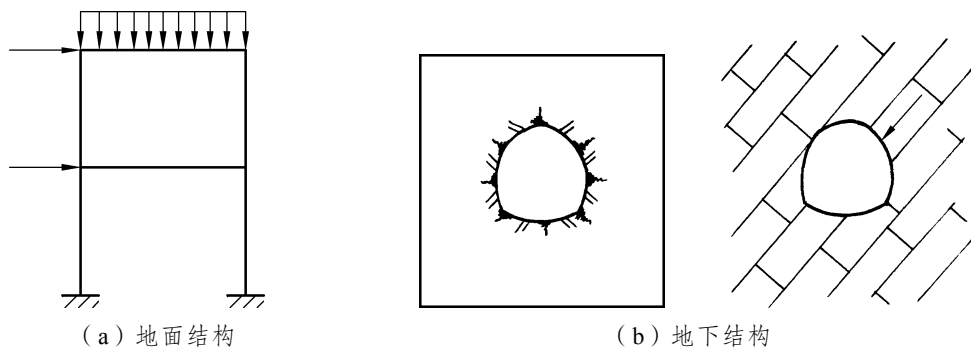


图 1.1.1 地下结构与地面结构的区别

支护结构即是我们所要研究的地下结构物。有时，在衬砌内部还设有为分割不同使用空间的梁、板、柱等内部结构。内部结构的设计和计算与地面结构相同。

2. 地下结构的形式

因为地下结构周围的介质是千差万别的，所以不同地质条件需要的支护结构形式会有很大的不同，它直接影响到地下结构上的荷载。因此，结构形式首先由受力条件来控制。通常按其使用目的有如下基本类型：

(1) 防护型支护。

例如顶部防护。这是开挖支护中最轻型者，它既不能阻止围岩变形，也不能承受岩体压力，而是仅用以封闭岩面，防止坑道周围岩体质量的进一步恶化。它通常是采用喷浆、喷混凝土或局部锚杆来完成的。

(2) 构造型支护。

在基本稳定的岩体中，如大块状岩体，坑道开挖后的围岩可能出现局部掉块或崩塌，但在较长时间内不会造成整个坑道的失稳或破坏。这种情况下常常使用构造型支护，其支护参数应满足施工及构造要求。

构造型支护通常采用喷混凝土、锚杆和金属网、模注混凝土等支护方式。

(3) 承载型支护。

承载型支护是坑道支护的主要类型。视坑道围岩的力学动态，它可分为轻型、中型及重型等。

对于承载型结构，其断面形式主要由使用要求、地质条件和施工方法 3 个因素综合决定。其中，施工方法对地下结构的形式会起重要影响，并且会影响到支护结构的计算方法。

当地质条件较好、跨度较小或埋深较浅时，常采用矩形结构；当地质条件较差，围岩压力较大，特别是承受较大的静水压力时，应优先采用圆形结构，可充分发挥混凝土结构的抗压强度。当地质条件介于两者之间时，按具体荷载的大小和结构尺寸决定。例如，荷载以竖直压力为主时，则用直墙拱形结构为宜；跨度较大时，可用落地拱结构，且底板常做成倒拱形。

地层性质的这种差别不仅影响地下结构的选型，而且影响施工方法的选择。因地下结构在施工阶段同样必须安全可靠，故采用不同的施工方法是决定地下结构形式的重要因素之一，在使用要求及地质条件相同的情况下，施工方法不同也会采用不同的结构形式。

此外，地下结构的选型还与工程的使用要求有关。例如人行通道，可做成单跨矩形或拱形结构；地下铁道车站或地下医院等应采用多跨结构，既减少内力，又利于使用；飞机库则中间不能设柱，而常用大跨度落地拱；在工业车间中，矩形隧道接近使用限界；当欲利用拱形空间放置通风等管道时，亦可做成直墙拱形或圆形隧道。

综合地质条件、使用要求、施工方法等因素，衬砌的制造方式可归纳为下列几种：

(1) 就地灌注整体式混凝土衬砌。

就地灌注整体式混凝土衬砌是在施工现场架设模板，在围岩与模板之间灌注混凝土使其成型的一种支护方法。适用于矿山法施工，且围岩可以保持短时间的稳定，也适用于采用明挖法施工的衬砌形式。衬砌的表面整齐美观，施工进度快，质量容易控制。

采用矿山法施工时常用拱形结构形式，这种结构大多数由上部拱圈、两侧边墙和底部仰拱（或铺底）组成。上部拱圈的轴线采用多心圆或半圆形，边墙可做成直边墙或曲边墙。当底部压力较大或有地下水时，应做成带仰拱的封闭式结构，如图 1.1.2 所示。根据地质条件的不同或者所受荷载不同，常需要不同的结构形式。

在岩层较坚硬、整体性较好的稳定或基本稳定的围岩中，可采用半衬砌，边墙只设防护，施工时应保证拱脚岩层的稳定性。当使用要求较大跨度时，可以做成落地拱 [图 1.1.2 (a)]。

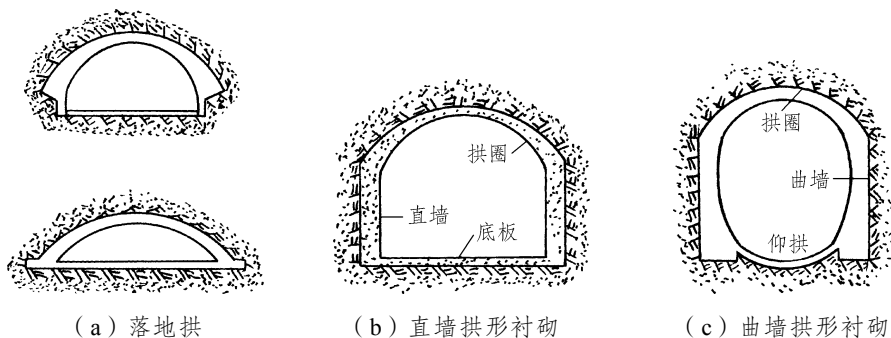


图 1.1.2 拱形衬砌

对水平压力较小的洞室可采用厚拱薄墙衬砌，其受力特点是可将拱圈所受的荷载通过扩大的拱脚传给岩层，使边墙受力减小，以节省建筑材料和减少土石方开挖量。

以竖直压力为主，而水平压力不大的洞室，一般采用直墙拱形衬砌 [图 1.1.2 (b)]。衬砌与围岩间的空隙应密实回填，使衬砌与围岩能整体受力。

对于岩层松散破碎、易于坍塌、具有较大的竖直压力和水平侧压力等情况，应采用曲墙拱形衬砌。遇洞室底部地层软弱或为膨胀性地层时，应采用底部结构为仰拱的曲墙拱形衬砌，将整个衬砌围成封闭式 [图 1.1.2 (c)]，以加大结构的整体刚度。

此外，两隧道垂直相接时的衬砌，称交叉段衬砌（图 1.1.3）；从 1 个双线隧道逐步拉开距离分离成 2 个单线隧道的过渡段部位，称为连拱形隧道（图 1.1.4）。这些类型的隧道结构在计算时，应考虑空间效应。当图 1.1.4 中的 2 条隧道逐渐分离到 III—III 断面时，就成为 2 条近距离隧道。此时，一条隧道的施工会对另一条隧道产生非对称的荷载效应，引起它的应力和位移状态发生不利的变化，在设计和施工中都要考虑这种不利的荷载状态。

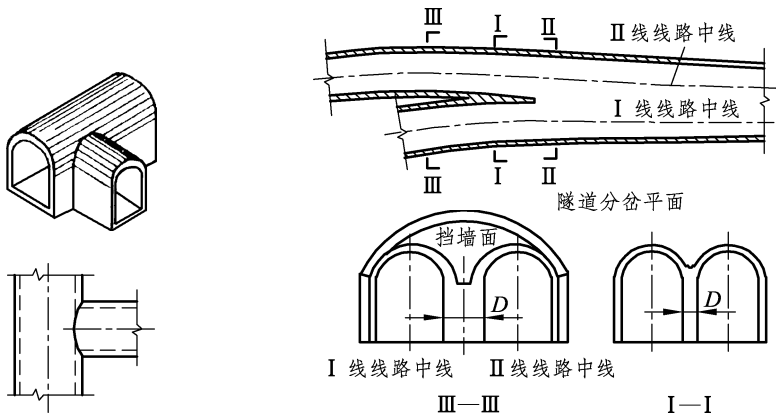


图 1.1.3 交叉段衬砌

图 1.1.4 连拱形衬砌

采用明挖法施工常用的结构形式是矩形框架，其内部根据使用目的设有梁、柱或中墙，将整体框架分成多跨和多层。施工时常用桩或墙式支挡结构作为施工时的临时支护，它们也可作为地下结构墙体的一部分。在遇到施工场地狭窄时，特别是在交通繁忙的市区修建地铁车站，可优先考虑采用地下连续墙结构（图 1.1.5）。它是首先建成地下连续墙，之后在墙体的保护下明挖基坑，修筑结构；或用逆作法施工，先修建顶板，回填路面，再开挖内部土体和修建边墙、内部结构及底板。

沉埋法施工（亦称水下明挖法）的衬砌结构，是在专门的制造场地预制的，其结构形式与制造方式有关。干船坞形的结构形式一般是多跨的钢筋混凝土管段 [图 1.1.6 (a)]；船台形的结构形式一般外形为八角形，用钢板焊接而成，内轮廓一般为单圆或双圆 [图 1.1.6 (b)]。

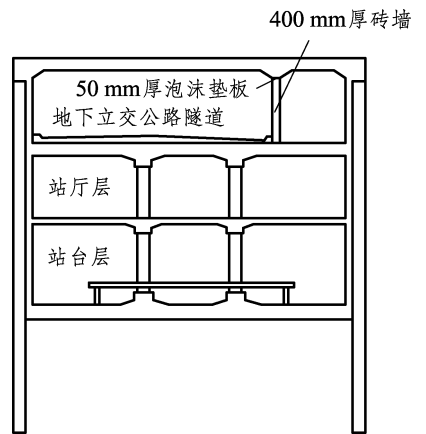
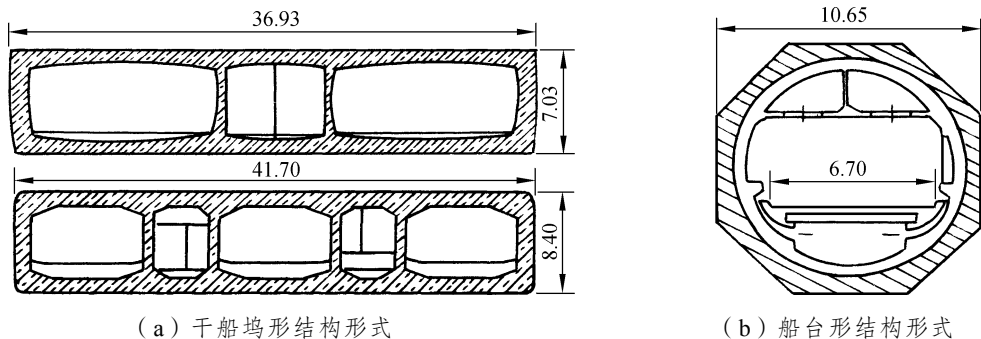


图 1.1.5 某地下铁道车站



(a) 干船坞形结构形式

(b) 船台形结构形式

图 1.1.6 沉埋法施工的结构形式（单位：m）

用明挖法施工修建的地下构筑物，需要有和地面连接的通道，它是由浅入深的结构，称为引道，在无法修筑顶盖的情况下通常都做成开敞式的。图 1.1.7 为水底隧道引道采用开敞式结构时的断面示意图。遇地下水压较大时，开敞式结构一般均应考虑采取抗浮措施。

(2) 锚喷支护。

常用于矿山法施工，它可以在坑道开挖后及时施工，因此，能有效地限制洞周位移，保护作业人员的安全，避免局部产生过大的变形。当围岩条件比较好，用锚喷支护可以获得长期的稳定，并达到使用要求时，可以将其作为永久结构（图 1.1.8）；但常常是作为永久支护的一部分，与整体现浇的混凝土衬砌组成复合式衬砌（图 1.1.9）。由于锚喷支护是一种柔性结构，能更有效地利用围岩的自承能力维持洞室稳定，其受力性能一般优于整体式衬砌，因而被认为是一种新型的地下结构形式。

锚喷支护可以根据围岩的稳定情况，由喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆、钢筋网、钢纤维喷混凝土和钢支撑等不同的组合形式构成，其各部分的功能详见第 4 章的叙述。

(3) 复合式衬砌。

分 2 次修筑，中间加设薄膜防水层的衬砌称为复合式衬砌，如图 1.1.9 所示。复合式衬砌的外层常为锚喷支护，以利于及时架设，尽快使围岩和初期支护达到基本稳定。内层常为现浇整体式混凝土衬砌、喷混凝土或钢纤维喷射混凝土衬砌、装配式衬砌等不同的形式。

用喷混凝土作内衬的特点是与初期支护的结合状态好，但表面不光滑，还需再次处理，故目前较少使用。

用装配式衬砌作复合式衬砌的内衬时，2 层衬砌之间的空隙需压浆，典型的实例是英吉利海峡隧道（掘进机施工法）的内衬即是这种结构。

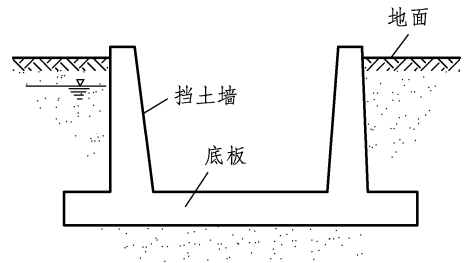


图 1.1.7 开敞式结构

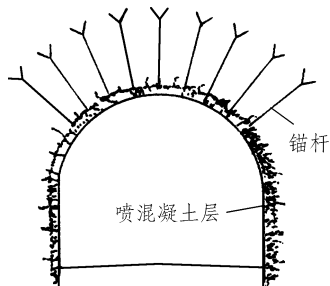


图 1.1.8 锚喷衬砌

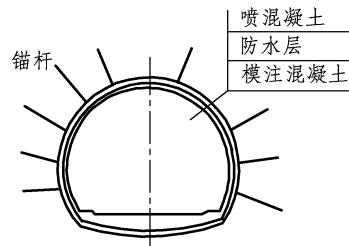


图 1.1.9 复合式衬砌

(4) 装配式衬砌。

由工厂预制、在洞内拼装而成的衬砌称为装配式衬砌，每一个衬砌单元称为管片。一般由数块标准块 A、2 块邻接块 B 和 1 块封顶块 K 拼装成一衬砌环，再用纵向螺栓连接成隧道（图 1.1.10）。采用装配式衬砌可以使生产标准化，加快施工速度，提高工程质量。由于装配式衬砌的拼装接缝较多，常常是漏水的通道，所以对管片的制造精度和拼装精度要求较高，也是修建隧道成败的关键技术之一。

遇地层土质较差、靠其自承能力可维持稳定的时间很短时，对中等埋深以上的土层地下结构常用盾构法施工；在地质条件较好的情况下可以使用掘进机施工；此时常采用圆形装配式衬砌 [图 1.1.10 (a)] 的结构形式。将平行修建的装配式管片横向连通，即可成为多孔道的车站 [图 1.1.10 (b)]。

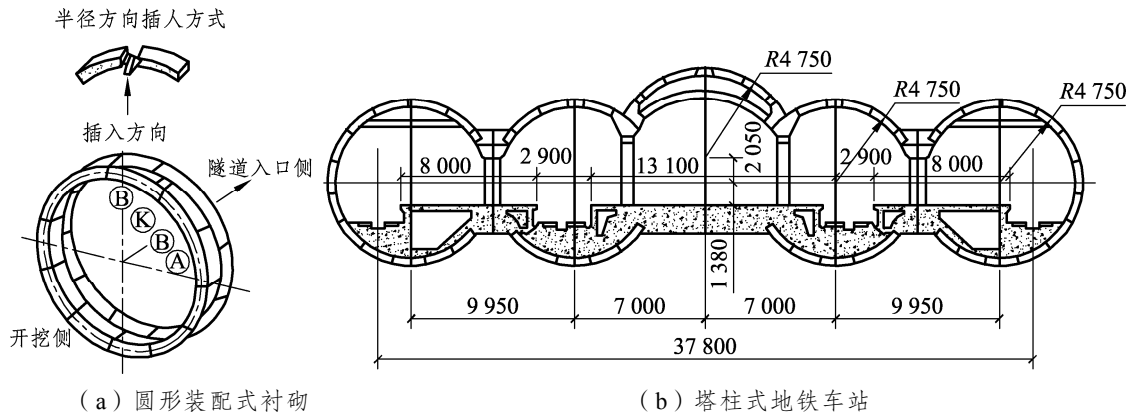
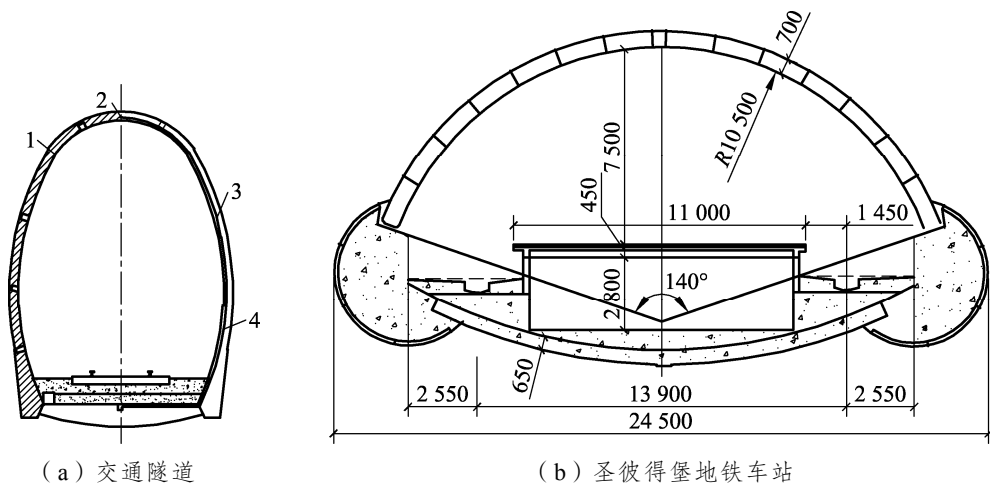


图 1.1.10 盾构法施工的装配式衬砌 (单位: mm)

用于盾构法施工的装配式衬砌, 由于在盾尾内拼成圆环衬砌, 在盾构向前推进时, 要承受千斤顶推进的反力。同时, 由于盾构的前进而使装配好的衬砌环一旦暴露在盾尾外时, 立即承受地层给予的压力。因此要求衬砌: ① 能立即承受施工荷载和永久荷载, 如围岩压力、机具压力, 后者包括盾构推进时的千斤顶压力; ② 有足够的刚度和强度, 不透水、耐腐蚀, 具有足够的耐久性能; ③ 装配安全、简便、构件能互换, 且在管片刚被推出盾尾后即刻要承受向衬砌背后注浆的压力。

近年来, 随着盾构形式的发展, 相继出现了矩形、椭圆形、马蹄形、多圆等断面形式的盾构, 装配式衬砌的形式也相应地得到发展。

用于矿山法施工的单线交通隧道的装配式衬砌如图 1.1.11 (a) 所示。图 1.1.11 (b) 为圣彼得堡地铁的单拱车站横断面, 隧道埋置于不透水的致密黏土层中, 拱圈和仰拱均由混凝土砌块组成, 支承在 2 个圆形支墩上。图中所示结构由于管片间无受拉连接构件, 所以只适用于有一定自稳能力的地层。



1—装配螺栓; 2—混凝土嵌块; 3—企口槽; 4—吊装孔。

图 1.1.11 矿山法施工的装配式衬砌 (单位: mm)

用于明挖法施工的装配式衬砌如图 1.1.12 所示。图中结构的底板采用整体现浇的混凝土, 边墙和顶板预制, 顶板采用的是密肋板式结构, 使得重量减轻且有利于拼装。

3. 地下结构的计算特性

地下工程所处的环境和受力条件与地面工程有很大不同，将其特征反映在计算模型中，大致可归纳成如下几点：

(1) 必须充分认识地质环境对地下结构设计的影响。

地下工程是在自然状态下的岩土地质体内开挖的，这种地质体有史以来就在地层的原始应力作用下参与工作，并处于相对的平衡中。因而地下工程的这种地质环境对支

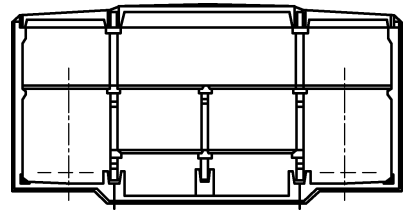


图 1.1.12 装配式密肋板车站

护结构设计有着决定性意义。地下工程上的荷载取决于原岩应力，这种原岩应力是很难预先确定的，这就使地下工程的计算精度受到影响。其次，地质体力学参数很难通过测试手段准确获得，不仅不同地段差别很大，而且由于开挖过程会引起原有初始荷载的应力释放而改变地层中原有的平衡状态，其后果也会改变围岩的工程性质，如由弹性体变为塑性体。这一变化过程不能简单地用一个力学模型来概括，因为它与形成最终稳定的工程结构体系的类型及时间过程有很大关系。这也使地下工程的计算精度受到影响。因此对地下工程来说，只有正确认识地质环境对支护结构体系的影响，才能正确地进行支护结构的设计。

(2) 地下工程周围的地质体是工程材料、承载结构，同时又是产生荷载的来源。

地下结构周围的地质体不仅会对支护结构产生荷载，同时它本身又是一种承载体。我们既不能选择，也不能极大地影响它的力学性质。作用在地质体上的原岩应力是由地质体本身和支护结构共同来承载的。作用在支护结构上的压力除与原岩应力有关外，还与地质体强度、支护的架设时间、支护的形式与尺寸及洞室形状等因素有关，是由支护结构和周围岩体之间的相互作用决定的，并且很大程度上取决于周围岩体的稳定性，它不是事先能给定的参数。充分发挥地质体自身的承载力是地下支护结构设计的一个根本出发点。

(3) 地下结构施工因素和时间因素会极大地影响结构体系的安全性。

地下结构在修筑的中间阶段，即施工状态，其荷载、变形和安全度与其他结构相比都远远没有固定，尤其是与最终状态相比，因此计算中应尽量反映这些中间状态对结构体系安全性的影响。与地面结构不同，作用在支护结构上的荷载受到施工方法和施工时机的影响。某些情况下，即使选用的支护尺寸已经足够大，但由于施工时机和施工方法不当，支护仍然会遭受破坏。例如矿山法施工过程中，若开挖方法不当，会引起洞室周围岩体的坍塌；若支护结构施加的时间过早，会造成结构内力过大，支护结构施加的时间过晚，会造成围岩过度的松弛以至于坍塌；若衬砌与围岩之间回填不密实或由于地下水的流失而在衬砌背后形成空洞，也会降低结构后期的安全性等。

(4) 与地面结构不同，地下工程支护结构安全与否，既要考虑到支护结构能否承载又要考虑围岩会不会失稳，这 2 种原因都能导致支护结构破坏。

支护结构的承载力可由支护材料强度来判断，但围岩是否失稳至今没有妥善的判断准则，一般都按经验来确定。

(5) 地下工程支护结构设计的关键问题在于充分发挥围岩自承力。

要做到这点，隧道开挖后，应允许围岩在一定范围内进入塑性状态。但岩土体进入塑性状态后，其本构关系是很复杂的。因此，由于本构模型选用不当亦会影响到计算的精度。可见，在力学模型上，地下工程也要比地面工程复杂得多。

1.2 地下结构计算理论的发展与现状

地下工程所处的环境条件与地面工程是全然不同的，早期的地下工程建设都是沿用适用于地面工程的理论和方法来指导地下工程的设计与施工，因而常常不能正确地阐明地下工程中出现的各种力学现象和过程。经过较长时间的实践，人们才逐步认识到地下结构受力、变形的特点，并形成以考虑地层对结构变形约束为特点的地下结构计算理论和方法。

地下工程支护结构理论的发展至今已有百余年的历史，它与岩土力学的发展有着密切关系。土力学的发展促使着松散地层围岩稳定和围岩压力理论的发展，而岩石力学的发展促使围岩压力和地下工程支护结构理论的进一步飞跃。随着新奥法施工技术的出现以及岩土力学、测试仪器、计算机技术和数值分析方法的发展，地下工程支护结构理论正在逐渐成为一门完善的学科。

地下工程支护结构理论的一个重要问题是如何确定作用在地下结构上的荷载以及如何考虑围岩的承载能力。

从这方面来讲，支护结构计算理论的发展大概可分为刚性结构、弹性结构、连续介质 3 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，且结构物中存在较多的接触缝，容易产生断裂。为了维护结构的稳定，当时的地下结构截面都设计得很大，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，当地下结构处于极限平衡状态时，它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。

这种计算理论认为，作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重力。可以作为代表的这类理论有海姆（A.Haim）理论、朗肯（W.J.M.Rankine）理论和金尼克（А.Н. Диник）理论。不同之处在于，他们对地层水平压力的侧压系数有不同的理解。海姆认为侧压系数为 1，朗肯根据松散体理论认为侧压系数

$$\lambda = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$$

式中 φ ——岩体的内摩擦角。

而金尼克根据弹性理论认为侧压系数

$$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

式中 μ ——岩体的泊松比。

然而，这种计算理论没有考虑围岩自身的承载能力。由于当时地下工程埋置深度不大，因而曾一度认为这些理论是正确的。

压力线假设的计算方法缺乏理论依据，一般情况下偏于保守，所设计的衬砌厚度会大很多。

2. 弹性结构阶段

19世纪后期，混凝土和钢筋混凝土材料陆续出现，并用于建造地下工程，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用超静定结构力学方法计算结构内力。作用在结构上的荷载是主动的地层压力，并考虑了地层对结构产生的弹性反力的约束作用。由于有了比较可靠的力学原理为依据，故至今在设计地下结构时仍时有采用。

这类计算理论认为，当地下结构埋置深度较大时，作用在结构上的压力不是上覆岩层的重力而只是围岩坍塌体积内松动岩体的重力——松动压力。可以作为代表的这类理论有太沙基（K. Terzaghi）理论和普氏（М. М. Протдьяконов）理论。他们的共同观点是，都认为坍塌体积的高度与地下工程跨度和围岩性质有关。不同之处是，前者认为坍塌体为矩形，后者认为是抛物线形。普氏理论把复杂的岩体之间的联系用一个似摩擦系数来描写，显然过于粗糙，但由于这个方法比较简单，直到现在普氏理论仍在应用。

松动压力理论是基于当时的支护技术发展起来的。由于当时的掘进和支护所需的时间较长，支护与围岩之间不能及时紧密相贴，致使围岩最终有一部分破坏、塌落，形成松动围岩压力。但当时并没有认识到这种塌落并不是形成围岩压力的唯一来源，也不是所有的情况都会发生塌落，更没有认识到通过稳定围岩，可以发挥围岩的自身承载能力。

对于围岩自身承载能力的认识又分为以下2个阶段：

（1）假定弹性反力阶段。

地下结构衬砌是埋设在岩土内的结构物，它与周围岩体相互接触，因此衬砌在承受岩体所给的主动压力作用产生弹性变形的同时，将受到地层对其变形的约束作用。地层对衬砌变形的约束作用力就称之为弹性反力。这样计算理论便进入了假定弹性反力阶段。

弹性反力的分布是与衬砌的变形相对应的。20世纪初期，康姆列尔（O. Kommerell）、约翰逊（Johanson）等人提出弹性反力的分布图形为直线（三角形或梯形）。这种假定弹性反力法的缺点是过高估计了地层弹性反力的作用，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常被提高3.5~4倍以上。

1934年，朱拉夫（Г. Г. Эураобв）和布加耶娃（О. Е. оукаева）对拱形结构按变形曲线假定了月牙形的弹性反力图形，并按局部变形理论认为弹性反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高拱，用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反力的分布图形，并由变形协调条件计算弹性反力的量值，因此比前一种假定弹性反力法合理。

（2）弹性地基梁阶段。

由于假定弹性反力法对其分布图形的假定有较大的任意性，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。20世纪30年代,苏联地下铁道设计事务所提出按圆环地基局部变形理论计算圆形隧道衬砌的方法,20世纪50年代又将其发展为侧墙(指直边墙)按局部变形弹性地基梁理论计算拱形结构的方法。

共同变形弹性地基梁理论在稍后也被用于地下结构计算。1939和1950年,达维多夫先后发表了按共同变形弹性地基梁理论计算整体式地下结构的方法。1954年,奥尔洛夫(C. A. Орлов)用弹性理论进一步研究了按地层共同变形理论计算地下结构的方法。舒尔茨(S. Schuze)和杜德克(H. Dudek)在1964年分析圆形衬砌时,不但按共同变形理论考虑了径向变形的影响,而且还计入了切向变形的影响。

按共同变形理论计算地下结构的优点,在于它以地层的物理力学特征为依据,并考虑了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。

3. 连续介质阶段

由于人们认识到地下结构与地层是一个受力整体,20世纪中期以来,随着岩体力学开始形成一门独立的学科,用连续介质力学理论计算地下结构内力的方法也逐渐发展,围岩的弹性、弹塑性及黏弹性解答逐渐出现。

这种计算方法以岩体力学原理为基础,认为坑道开挖后向洞室内变形而释放的围岩压力将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,从而引起它的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,它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,它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则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。

由连续介质力学建立地下结构的解析算法是一个困难的任务,目前仅对圆形衬砌有了较多的研究成果。典型的有史密德(H. Schmid)和温德尔斯(R. Windels)得出了有压水工隧道的弹性解;费道洛夫(В. Л. Федоров)得出了有压水工隧洞衬砌的弹性解;缪尔伍德(A. M. Muirwood)得出了圆形衬砌的简化弹性解析解;柯蒂斯(D. J. Curtis)又对缪尔伍德的计算方法做了改进;塔罗勃(J. Talobre)和卡斯特奈(H. Kastner)得出了圆形洞室的弹塑性解;塞拉格(S. Serata)、柯蒂斯和樱井春辅采用岩土介质的各种流变模型进行了圆形隧道的黏弹性分析;我国学者也按弹塑性和黏弹性本构模型进行了很多研究工作,发展了圆形隧道的解析解理论,利用地层与衬砌之间的位移协调条件,得出圆形隧道的弹塑性解和黏弹性解。

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有了很大发展。有限元法、边界元法及离散元法等数值解法迅速发展,模拟围岩弹塑性、黏弹塑性及岩体节理面等大型程序已经很多,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需得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,人们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。

与此同时，锚杆与喷射混凝土一类新型支护的出现和与此相应的一整套新奥地利隧道设计施工方法（新奥法）的兴起，终于形成了以岩体力学原理为基础的、考虑支护与围岩共同作用的地下工程新奥法支护理论。

新奥法支护理论与传统支护理论之间的区别主要表现在以下几方面：

（1）对围岩和围岩压力的认识方面。

传统支护理论认为围岩压力由洞室塌落的围岩“松动压力”造成，而新奥法支护理论则认为围岩具有自承能力，围岩作用于支护上的压力不是松动压力，而是阻止围岩变形的形变压力。

（2）在围岩和支护间的相互关系上。

传统支护理论把围岩和支护分开考虑，围岩当作荷载，支护作为承载结构，属于“荷载-结构”体系，新奥法支护理论则将围岩和支护作为一个统一体，两者组成“围岩-支护”结构体系共同参与工作。

（3）在支护功能和作用原理上。

传统支护只是为了承受荷载，新奥法支护则是为了及时稳定和加固围岩。

（4）在设计计算方法上。

传统支护主要是确定作用在支护上的荷载，新奥法支护设计的作用荷载是岩体地应力，由围岩和支护共同承载。

（5）在支护形式和工艺上。

新奥法支护理论的形成与发展，首先是由于锚喷支护结构的大量使用，它可在围岩松动之前及时加固围岩，其应用实践给人们积累了丰富的经验。新奥法是典型的代表，尤其是现场监控量测的应用。到 20 世纪 80 年代又将现场监控量测与理论分析结合起来，发展成为一种适应地下工程特点和当前施工技术水平的新的设计方法——现场监控设计方法（也称信息化设计方法）。

目前，工程中主要使用的工程类比设计法，也正在向着量化、精确化和科学化方向发展。

地下工程支护结构理论的另一类内容，是岩体中由于节理裂隙切割而形成的不稳定块体失稳，一般应用工程地质和力学计算相结合的分析方法，即岩石块体极限平衡分析法。这种方法主要是在工程地质的基础上，根据极限平衡理论，研究岩块的形状和大小及其塌落条件，以确定支护参数。

与此同时，在地下工程支护结构设计中应用可靠性理论、推行概率极限状态设计研究方面也取得了重要进展。采用动态可靠度分析法，即利用现场监测信息，从反馈信息的数据预测地下工程的稳定可靠度，从而对支护结构进行优化设计，是改善地下工程支护结构设计的有效途径。考虑各主要影响因素及准则本身的随机性，可将判别方法引入可靠度范畴。

在计算分析方法研究方面，随机有限元法（包括摄动法、纽曼法、最大熵法和响应面法等）、Monte-Carlo 模拟法、随机块体理论和随机边界元法等一系列新的地下工程支护结构理论分析方法近年来都有了较大的发展。

地下工程支护结构理论正在不断发展，各种设计方法都需要不断提高和完善，尤其是能