



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高校土木工程
专业指导委员会规划推荐教材

地下建筑结构

(第二版)

朱合华 主编
张子新 廖少明 副主编
杨林德 主审

中国建筑工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

地下建筑结构

(第二版)

朱合华		主 编
张子新	廖少明	副主编
杨林德		主 审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下建筑结构/朱合华主编. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 11

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材)

ISBN 978-7-112-12686-6

I. ①地… II. ①朱… III. ①地下建筑物-建筑结构
IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 226982 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

地下建筑结构 (第二版)

朱合华 主 编

张子新 廖少明 副主编

杨林德 主 审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×960毫米 1/16 印张: 28³/₄ 字数: 580千字

2011年1月第二版 2011年5月第十次印刷

定价: 45.00元 (赠送课件)

ISBN 978-7-112-12686-6

(19939)

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)

本书参考国内外相关文献，并结合新规范，着重从基本概念、基本理论和方法介绍了地下建筑结构的成熟成果与观点。全书重点突出，各篇章相互衔接，每章均附有思考题及习题。

本书主要内容包括：绪论、地下建筑结构的荷载、弹性地基梁理论、地下建筑结构的计算方法、地下建筑结构可靠度理论、浅埋式结构、附建式地下结构、沉井与沉箱结构、地下连续墙结构、盾构法隧道结构、沉管结构、基坑围护结构、顶管、管幕及箱涵结构、整体式隧道结构、喷锚支护、特殊结构等。

本教材适用于地下工程、建筑工程、公路工程、铁路工程、桥梁与隧道工程、水利水电工程等专业的本科教学使用，也可供相关专业工程技术人员参考。

读者若需要本书教学课件（PPT），请到同济大学隧道一室网站作者主页面下载，网址为：<http://www.sinotunnel.org/>。

* * *

责任编辑：王 跃 吉万旺

责任设计：张 虹

责任校对：姜小莲 王 颖

第二版前言

《地下建筑结构》最初于2005年在中国建筑工业出版社出版。2009年中国建筑工业出版社建议作者进行修订，作为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”出版。该教材的英文教材“Underground Structures”也于2009年由中国建筑工业出版社出版，为“普通高等教育土建学科专业‘十一五’规划教材”。

基于对地下建筑结构范畴的理解，在第二版的内容安排上遵循了第一版的基本框架结构，主要内容包括绪论、地下建筑结构的荷载、弹性地基梁理论、地下建筑结构的计算方法、地下建筑结构可靠度理论、浅埋式结构、附建式地下结构、沉井与沉箱结构、地下连续墙结构、盾构法隧道结构、沉管结构、基坑围护结构、顶管、管幕及箱涵结构、整体式隧道结构、喷锚支护、特殊结构等。通过介绍地下建筑构架，希望能够引领读者对地下建筑结构的构架和理论体系产生一个基本认识。

与第一版相比，本书在修订过程作了相当幅度谬误的改动，这些改动主要根据本人教学实践需要进行调整的。自1996年以来，一直承担本科生和研究生的《地下建筑结构》课程的教学工作，在教学实践中体验到《地下建筑结构》第一版的部分理论内容需要和工程实际紧密结合，从而提高教学效果。为此，在《地下建筑结构》第二版修订过程中，结合该课程国家级精品课程的建设，提供了相关章节的教学课件（PPT），供教师和读者参考使用。

本书的组织和设计，由朱合华和张子新负责，并承担主要编写与修订工作。在本版的修订中，总论中的第一章朱合华编写，第二章张子新、王军编写，第三章徐干成、张子新编写，第四章朱合华、张子新编写，第五章黄宏伟编写；第二篇土层地下建筑结构中的第六章李增福、陆继贻、李树信和彭芳乐编写，第七章张立平、廖少明编写，第八章彭芳乐、陆同寿编写，第九章廖少明、钱福元编写，第十章廖少明、董云德编写，第十一章廖少明、郑汉璋编写，第十二章、第十三章廖少明编写；第三篇岩石地下建筑结构中第十四章由张子新、罗济章、徐干成编写，第十五章由张子新、吴兆兴、王桐封编写，第十六章由张子新、罗济章编写。张子新对本书进行了统一校正。此外，闫静雅、胡欣雨、贺伟莲、高文杰、刘长祥、雷庆华、李佳宇等研究生为本书修订和出版付出了辛勤劳动，在此表示衷心谢意。

本书在内容设计上，注重系统理论分析和工程实践结合；在结构安排上，将国际上经典的理论方法和数值方法相结合，有利于学生或读者对地下建筑结构理

论的学习和掌握。本教材可作为高年级本科生和研究生教材，以及理论研究和土木工程工作者的参考书。

由于编者水平有限，不当和错漏之处在所难免，敬请广大读者谅解，欢迎批评指正，作者的电子邮箱为：zxzhang@tongji.edu.cn。同时，若需要本书教学课件（PPT），请到同济大学隧道一室网站作者主页下载，网址为：<http://www.sinotunnel.org/>。

作者

2010年仲秋于上海同济大学求实斋

第一版前言

随着我国国民经济的飞速发展，高速公路、水电、城市地铁、铁路、矿山、国防建设、市政通道及地下商业建筑等都有很大的发展，因此，各种形式的地下建筑结构也越来越多，地下建筑的设计、施工水平也取得了长足的进步，但与世界先进水平相比，尚有一定差距。

地下建筑结构是原建筑工程、交通土建工程、桥梁工程、地下工程等多个专业合并的土木工程专业主干课程之一。地下建筑结构所处的环境条件与上部建筑结构有本质区别，但长期以来大多沿用适用于地面工程的理论和方法解决地下建筑结构的问题，因而常常不能准确地描述地下建筑结构中出现的各种力学行为，使地下建筑的设计和施工更多地依赖于经验设计和施工，这种局面与飞速发展的地下空间开发极不和谐，也不能满足目前地下建筑方向本科教学的要求和工程技术人员的需要。本教材就是在汲取了国内外地下建筑结构方向相关教材和文献的基础上，为适应上述要求而编写的。本教材适用于地下工程、工民建、公路工程、铁路工程、桥梁与隧道工程、水利水电工程等专业的本科生，也适用于大专院校师生，可供相关专业工程技术人员参考。

本书共分为三篇，第一篇为总论，包括第1章至第5章，重点介绍了地下建筑结构的基本概念、荷载类型及确定方法、弹性地基梁理论、地下结构的荷载法和地层结构法及可靠度理论；第二篇为土层地下建筑结构，包括第6章至第13章。该篇主要介绍了浅埋矩形框架结构、附建式的梁板结构和口部结构、沉井与沉箱结构、地下连续墙结构、盾构法隧道结构、沉管结构、基坑围护结构、顶管管幕及箱涵结构；第三篇为岩石地下建筑结构，包括第14章至第16章。重点介绍了整体式隧道结构、喷锚支护结构与特殊结构。本书力图考虑学科的最新发展，结合新规范，着重从基本概念、基本理论和方法介绍地下建筑结构的成熟成果与观点。全书系统完全，重点突出，各篇章相互衔接，每章均附有思考题及习题。同时，书中列出了相关参考书籍或文献，学习时可供课外参考。

本书由朱合华主编，张子新、廖少明副主编，杨林德主审。总论中的第1章由朱合华编写，第2章由张子新、王军编写，第3章由徐干成、张子新编写，第4章由朱合华、张子新编写，第5章由黄宏伟编写；第二篇土层地下建筑结构中的第6章由李增福、陆继贲、李树信和彭芳东编写，第7章由张立平、廖少明编写，第8章由彭芳乐、陆同寿编写，第9章由廖少明、钱福元编写，第10章由廖少明、董云德编写，第11章由廖少明、郑汉璋编写；第12章、第13章由廖

少明编写；第三篇岩石地下建筑结构中的 14 章由张子新、罗济章、徐干成编写，第 15 章由张子新、吴兆兴、王桐封编写，第 16 章由张子新、罗济章编写。张子新对本书进行了统一校阅。中国建筑工业出版社的领导、编辑、校审人员为本书的出版付出了辛勤劳动。此外，闫静雅、胡欣雨、贺伟莲、高文杰、刘长祥、郭建刚、张占荣等研究生为本书打印、校对、编排做了许多工作。鉴于此，在本书付梓之日，作者对于为本书编写出版给予支持和帮助的所有同仁表示衷心的感谢。

特别应该强调的是本教材是在《岩石地下建筑结构》（中国建筑工业出版社，1979 年）和《土层地下建筑结构》（中国建筑工业出版社，1982 年）这两本教材的基础上编写而成的，在此衷心感谢为上述教材的编写作出贡献的单位与个人。

在本书编写过程中，作者虽然力求突出重点，内容系统而精炼，兼顾科学性和实用性，但因时间和水平有限，书中必然存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

作者

目 录

第一篇 总 论

第 1 章 绪论	1
1.1 地下建筑结构的概念及其作用	1
1.2 地下建筑结构的形成	2
1.3 地下建筑结构设计程序及内容	5
思考题	6
第 2 章 地下建筑结构的荷载	7
2.1 荷载种类和组合	7
2.2 荷载确定方法	8
2.3 岩土体压力的计算	9
2.4 初始地应力、释放荷载与开挖效应	41
2.5 地层弹性抗力	43
2.6 结构自重及其他荷载	44
思考题	45
第 3 章 弹性地基梁理论	47
3.1 概述	47
3.2 弹性地基梁的计算模型	47
3.3 弹性地基梁的挠度曲线微分方程式及其初参数解	49
3.4 弹性地基短梁、长梁及刚性梁	61
3.5 算例	66
思考题	68
习题	68
第 4 章 地下建筑结构的计算方法	69
4.1 概述	69
4.2 荷载—结构法	72
4.3 地层—结构法	74
4.4 算例	82
思考题	86

第 5 章 地下建筑结构可靠度理论	87
5.1 概述	87
5.2 可靠性分析的基本原理	89
5.3 可靠度分析的近似方法	94
5.4 算例	111
思考题	115

第二篇 土层地下建筑结构

第 6 章 浅埋式结构	116
6.1 概述	116
6.2 矩形闭合框架的计算	120
6.3 截面设计	126
6.4 构造要求	127
6.5 算例	132
思考题	144
习题	144
第 7 章 附建式地下结构	145
7.1 概述	145
7.2 梁板式结构	154
7.3 口部结构	163
思考题	167
第 8 章 沉井与沉箱结构	168
8.1 概述	168
8.2 沉井结构	169
8.3 沉箱结构	194
思考题	203
第 9 章 地下连续墙结构	204
9.1 概述	204
9.2 地下连续墙挡土墙设计	206
9.3 地下连续墙兼作外墙时的设计	223
9.4 地下连续墙接头设计	228
思考题	233
第 10 章 盾构法隧道结构	234
10.1 衬砌形式和构造	234
10.2 衬砌圆环内力计算	243
10.3 衬砌断面设计	258

10.4 隧道防水及其综合处理	268
10.5 盾构新型管片衬砌形式简介	270
10.6 算例	273
思考题	279
计算题	279
第11章 沉管结构	281
11.1 概述	281
11.2 沉管结构的设计	285
11.3 沉管的防水设计	292
11.4 变形缝与管段接头设计	295
11.5 沉管基础设计	298
思考题	302
第12章 基坑围护结构	303
12.1 概述	303
12.2 基坑工程的设计内容	305
12.3 基坑围护结构的内力计算	310
12.4 基坑稳定性验算	320
12.5 基坑工程的变形计算	326
12.6 常见围护结构及其构造设计	329
思考题	338
第13章 顶管、管幕及箱涵结构	339
13.1 顶管结构	339
13.2 管幕结构	355
13.3 箱涵结构	359
思考题	369

第三篇 岩石地下建筑结构

第14章 整体式隧道结构	370
14.1 概述	370
14.2 半衬砌结构	373
14.3 直墙拱结构	381
14.4 复合衬砌结构	398
14.5 连拱隧道结构	400
思考题	406
习题	406

第 15 章 喷锚支护	409
15.1 概述	409
15.2 围岩分级	409
15.3 喷锚支护设计	413
15.4 施工信息的反馈	421
15.5 围岩稳定性的分析	422
思考题	424
习题	424
第 16 章 特殊结构	425
16.1 概述	425
16.2 穹顶直墙结构	425
16.3 洞门	427
16.4 岔洞	432
16.5 竖井和斜井	435
思考题	441
参考文献	442

第一篇 总 论

第1章 绪 论

1.1 地下建筑结构的概念及其作用

地下建筑是修建在地层中的建筑物，它可以分为两大类：一类是修建在土层中的地下建筑结构；另一类是修建在岩层中的地下建筑结构。地下建筑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、市政等许多领域，都有大量的地下工程。随着科学技术和国民经济的发展，地下建筑将会有更为广泛的新用途，如地下储气库、地下储热库及地下核废料密闭储藏库等。

地下建筑结构，即埋置于地层内部的结构。修建地下建筑物时，首先按照使用要求在地层中挖掘洞室，然后沿洞室周边修建永久性支护结构——衬砌。为了满足使用要求，在衬砌内部尚需浇筑或修建必要的梁、板、柱、墙体等内部结构。所以，地下建筑结构包括衬砌结构和内部结构两部分，如图 1-1 所示。

衬砌结构主要是起承重和围护两方面的作用。承重，即承受岩土体压力、结构自重以及其他荷载的作用；围护，即防止岩土体风化、坍塌、防水、防潮等。

本书所研究的地下建筑结构主要指衬砌结构和一些基础结构，而内部结构与地面建筑的设计基本相同。

地下建筑与地面建筑结构相比，在计算理论和施工方法两方面都有许多不同之处。其中，最主要的是地下建筑结构所承受的荷载比地面结构复杂。这是因为地下建筑结构埋置于地下，其周围的岩土体不仅作为荷载作用于地下建筑结构

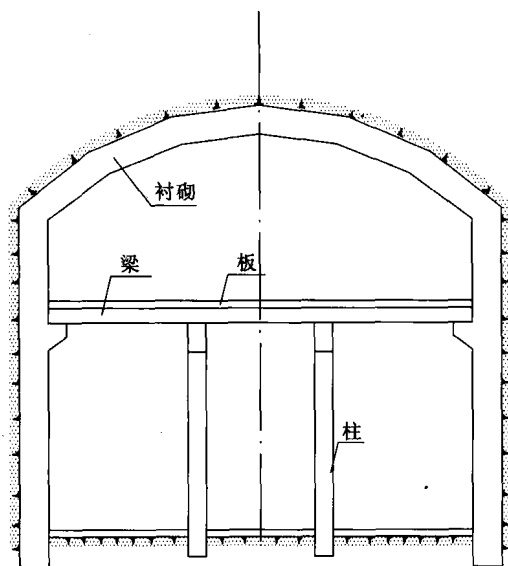


图 1-1 地下建筑结构示意图

上,而且约束着结构的移动和变形。所以,在地下建筑结构设计中除了要计算因素多变的岩土体压力之外,还要考虑地下结构与周围岩土体的共同作用。这一点乃是地下建筑结构在计算理论上与地面建筑结构最主要的差别。

1.2 地下建筑结构的形式

地下建筑结构的形式主要由使用功能、地质条件和施工技术等因素确定。要注意施工方法对地下结构的形式会起重要影响。

结构形式首先由受力条件来控制,即在一定条件下的围岩压力、水土压力和一定的爆炸与地震等动载下求出最合理和经济的结构形式。地下结构断面可以有如图 1-2 的几种形式:矩形隧道,适用于工业、民用、交通等建筑物的使用限界,但直线构件不利于抗弯,故在荷载较小,即地质较好、跨度较小或埋深较浅时常被采用;圆形隧道,当受到均匀法向压力时,弯矩为零,可充分发挥混凝土结构的抗压强度,当地质条件较差时应优先采用。其余五种形式系介于以上两者的中间情况,按具体荷载和尺寸决定,例如顶压较大时,则可用直墙拱形结构。大跨度结构需用落地拱,底板常做成仰拱式。

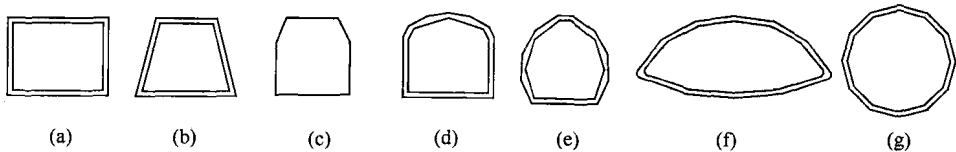


图 1-2 地下结构断面形式

(a) 矩形; (b) 梯形; (c) 多边形; (d) 直墙拱形; (e) 曲墙拱形; (f) 扁圆形; (g) 圆形

结构形式也受使用要求的制约,一个地下建筑物必须考虑使用需要。如人行通道,可做成单跨矩形或拱形结构;地铁车站或地下车库等应采用多跨结构,既减小内力,又利于使用;飞机库则中间部位不能设置柱,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。

施工方案是决定地下结构形式的重要因素之一,在使用要求和地质条件相同情况下,由于施工方法不同而采取不同的结构形式。

综合地质条件、使用要求、施工技术等因素,地下建筑结构形式根据地质情况的差异,可分土层和岩层内的两种形式。本书拟按土层和岩层分别介绍地下建筑结构形式如下:

1.2.1 土层地下建筑结构

(1) 浅埋式结构:平面成方形或长方形,当顶板做成平时,常用梁板式结

构。浅埋地下道路通道常采用板式、梁板式、矩形结构、浅拱形结构、多边形结构。地下指挥所可以采用平面呈条形的单跨或多跨结构。为节省材料及使结构受力合理,顶部可做成拱形;如一般人员掩蔽部常做成直墙拱形结构;如平面为条形的地铁等大中型结构,常做成矩形框架结构。

(2) 附建式结构:是房屋下面的地下室,一般有承重的外墙、内墙(地下室作为大厅用时则为内柱)和板式或梁板式顶底板结构。

(3) 沉井(沉箱)结构:沉井施工时需要在沉井底部挖土,顶部出土,故施工时沉井为一开口的井筒结构,水平断面一般做成方形,也有圆形,可以单孔也可以多孔,下沉到位后再做底顶板。与沉井施工不同的是,沉箱内部为一封闭结构,充满气压,以控制地下水的作用。其出土有专用通道。

(4) 地下连续墙结构:先建造两条连续墙,然后在中间挖土,修建底板、顶板和中间楼层。

(5) 盾构结构:盾构推进时,以圆形最适宜,故常采用装配式圆形衬砌,也有做成方形、半圆形、椭圆形、双圆形、三圆形的。

(6) 沉管结构:一般做成箱形结构,两端加以临时封墙,托运至预定水面处,沉放至设计位置。

(7) 其他结构:除上述地下结构之外,还包括顶管结构和箱涵结构等。在城市管道埋深较大、交通干线附近和周围环境对位移、地下水有严格限制的地段常采用顶管结构,施工更为安全和经济。而在铁路和公路交叉口,为了不影响交通,需修建下立交地道,一般采用箱涵结构。对于大断面的浅埋通道,一般先采用管幕围护,再采用箱涵结构。

1.2.2 岩石地下建筑结构

岩石地下建筑结构形式主要包括直墙拱形、圆形、曲墙拱形等。此外,还有一些其他类型的结构,如喷锚结构、穹顶结构、复合结构等。最常用的是拱形结构,这是因为它具有以下优点:

(1) 地下结构的荷载比地面结构大,且主要承受竖向荷载。因此,拱形结构就受力性能而言比平顶结构优(例如在竖向荷载作用下弯矩小)。

(2) 拱形结构的内轮廓比较平滑,只要适当调整拱曲率,一般都能满足地下建筑的使用要求,并且建筑布置比圆形结构方便,净空浪费也比圆形结构少。

(3) 拱主要是承压结构。因此,适用于采用抗拉性能较差,抗压性能较好的砖、石、混凝土等材料构筑。这些材料造价低,耐久性良好,易维护。

以下简单介绍常用的几种拱形结构、喷锚结构以及穹顶结构等。

(一) 拱形结构

1. 贴壁式拱形结构

贴壁式拱形结构是指衬砌结构与围岩之间的超挖部分应进行回填的衬砌结

构,其包括拱形半衬砌结构、厚拱薄墙衬砌结构、直墙拱形衬砌结构及曲墙拱形衬砌结构。

(1) 半衬砌结构

当岩层较坚硬,岩石整体性好而节理又不发育的稳定或基本稳定的围岩,通常采用半衬砌结构,即只做拱圈,不做边墙。

(2) 厚拱薄墙衬砌结构

厚拱薄墙衬砌结构的构造形式是它的拱脚较厚,边墙较薄。这样,可将拱圈所受的力通过拱脚大部分传给围岩,充分利用了围岩的强度,使边墙受力大为减少,从而减少了边墙的厚度。

(3) 直墙拱形衬砌结构

贴壁式直墙拱形衬砌结构由拱圈、竖直边墙和底板组成,衬砌结构与围岩的超挖部分都进行密实回填。一般适用于洞室口部或有水平压力的岩层中,在稳定性较差的岩层中亦可采用。

(4) 曲墙拱形衬砌结构

当遇到较大的竖向压力和水平压力时,可采用曲墙式衬砌。若洞室底部为较软弱地层,有涌水现象或遇到膨胀性岩层时,则应采用有底板或带仰拱的曲墙式衬砌。

2. 离壁式拱形衬砌结构

离壁式拱形衬砌结构是指与岩壁相离,其间空隙不做回填,仅拱脚处扩大延伸与岩壁顶紧的衬砌结构。离壁式衬砌结构防水、排水和防潮效果均较好,一般用于防潮要求较高的各类贮库,稳定的或基本稳定的围岩均可采用离壁式衬砌结构。

(二) 喷锚支护

在地下建筑中,可采用喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆喷混凝土或锚杆钢筋网喷混凝土加固围岩。这些加固形式统称为喷锚支护。喷锚支护可以做临时支护,也可作为永久衬砌。目前,在公路、铁路、矿山、市政、水电、国防各部门中已被广泛采用。

(三) 穹顶结构

穹顶结构是一种圆形空间薄壁结构。它可以做成顶、墙整体连接的整体式结构;也可以做成顶、墙互不联系的分离式结构。穹顶结构受力性能较好,但施工比较复杂,一般用于地下油罐、地下回车场等。它较适用于无水平压力或侧壁围岩稳定的岩层。

(四) 连拱衬砌结构

连拱隧道结构主要适用于洞口地形狭窄,或对两洞间距有特殊要求的中短隧道,按中墙结构形式不同可分为整体式中墙和复合式中墙两种形式。

(五) 复合衬砌结构

复合衬砌结构通常由初期支护和二次支护组成,为满足防水要求须在初期支

护和二次支护间增设防水层。一般认为复合衬砌结构围岩具有自支承能力，支护的作用首先是加固和稳定围岩，使围岩的自支承能力可充分发挥，从而可允许围岩发生一定的变形和由此减薄支护结构的厚度。

1.3 地下建筑结构的设计程序及内容

地下建筑结构的程序设计，应做到技术先进、经济合理、安全适用。

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。

初步设计的内容主要包括：

- (1) 工程等级和要求，以及静、动荷载标准的确定；
- (2) 确定埋置深度与施工方法；
- (3) 初步设计荷载值；
- (4) 选择建筑材料；
- (5) 选定结构形式和布置；
- (6) 估算结构跨度、高度、顶底板及边墙厚度等主要尺寸；
- (7) 绘制初步设计结构图；
- (8) 估算工程材料数量及财务概算。

结构形式及主要尺寸的确定，一般可通过同类工程的类比法，吸取国内外已建工程的经验教训，提出设计数据。必要时可用近似计算方法求出内力，并按经济合理的含钢率初步配置钢筋。

将地下建筑的初步设计图纸附以说明书后，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。

技术设计主要是解决结构的承载力、刚度和稳定、抗裂性等问题，并提供施工时结构各部件的具体细节尺寸及连接大样。

技术细节的主要内容是：

- (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，求出各控制界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。还有