



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

土 木 工 程 教 材 精 选

地下建筑结构设计

(第3版)

Design of Underground Construction Structure (Third Edition)

王树理 主编

王树仁 孙世国 杨万斌 朱建明 副主编



清华大学出版社



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

土 木 工 程 教 材 精 选

地下建筑结构设计

(第3版)

**Design of Underground
Construction Structure**
(Third Edition)

王树理 主编

王树仁 孙世国 杨万斌 朱建明 副主编



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了目前代表全球主流大学土木工程相关地下建筑结构设计教学中的最主要的、流行的地下建筑结构设计种类、设计理论、设计原理及设计方法,突出地下建筑结构设计,旨在培养地下建筑结构设计人才。全书共分10章,内容包括绪论;地下建筑结构设计方法;地下建筑结构设计计算理论;盾构法隧道衬砌结构设计;钻爆法隧道结构设计;非开挖顶管结构设计;明挖基坑支护结构设计;沉井结构设计;沉管结构设计;地下建筑工程降水与防水设计。

全书集成的大量图表、公式、例题、复习思考题和习题方便读者理解书中的内容。本书可作为大土木工程地下建筑工程本科生、研究生教材,供地下工程、地质工程、岩土工程、隧道工程等土木工程领域相关专业高校师生及广大科技工作者使用或参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

地下建筑结构设计/王树理主编.--3版.--北京:清华大学出版社,2015

土木工程教材精选

ISBN 978-7-302-37679-8

I. ①地… II. ①王… III. ①地下建筑物—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU93

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第188836号

责任编辑:秦娜 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:203mm×253mm 印 张:22.5 字 数:525千字

版 次:2007年3月第1版 2015年1月第3版 印 次:2015年1月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.00元

产品编号:060615-01

前 言

2006年,我在加拿大 McGill University 做访问学者的时候,考察了 McGill University 和 University of Toronto 的土木工程方向的科研方向、教学和教材,于2007年组织了燕山大学的王树仁、北方工业大学的孙世国、河北大学的杨万斌、北京航空航天大学朱建明同行编著了第一版的《地下建筑结构设计》。2008年《地下建筑结构设计》被评为北京高等教育精品教材。2009年对本书补充了大量的例题和复习思考题及习题,出版了第二版。2014年我再次赴美国 Michigan Technological University 做访问学者,先后又考察了世界前50强美国大学中的7所大学(依据 <http://cwur.org>),对美国土木工程排名前列的 Massachusetts Institute of Technology, University of Illinois at Urbana-Champaign, University of California-Berkeley, Columbia University, Princeton University, Texas A&M University, University of Washington 的土木工程的科研方向、教学和教材再次进行考察和研究,决定对本书进行第三次修订,出版第三版。

第三版书中所谈到的设计计算理论,虽然有的文献年代稍早,看似陈旧,但是明白经典的土力学和岩石力学理论经过几十年的发展,仍然没有重大的突破,大家也就可以理解。能够有所发展的是计算机技术在土力学和岩石力学中的应用,如有限元、边界元等应用在地下建筑结构设计,这使得这个古老的学科能够赶上时代,得以重生。很难想象,假如今天没有计算机技术,我们会增加多少成本来实现想要的研究结果。为了适应计算机技术在地下建筑结构设计中的应用,我已经购买了处理地下建筑结构设计中的岩土体问题设计和分析的完整商业软件,包括主要处理岩体问题的 Dips 6.0, Examine3D 4.0, Phase2 7.0, RocData 5.0, RocFall 5.0, RocPlane 3.0, RocSupport 3.0, Settle3D 3.0, Slide 6.0, Swedge 6.0, Unwedge 3.0; 处理土体问题的 DC-foundation, DC-soil; 处理爆破工程设计和分析的 2DBench, 2DFace, 2DRing, 2Dview, JKBMS; 用于各种材料的、目前公认的、最优秀的显性动力分析软件 LS-DYNA。用于钢筋混凝土结构设计的 spBeam v3.50, spColumn v4.50, spFrame v1.50, spWall v4.00, spMats v8.00, spSlab v3.50。第三版书的 PPT 文本

将再现计算机技术在地下建筑结构设计中的魅力,并将数值分析的研究成果增加在 PPT 里面。这个 PPT 也将不断地升级,通过电子邮件的方式配送到那些教学需要的大学老师的手中。

新版教材中,图片 413 张,公式 335 个,表格 107 个,例题 36 题,复习思考题 54 题,习题 22 题。内容尽可能以形象的图表格式表现,方便自学。考虑到全书的字数限制,对第二版书中的例题、复习思考题和习题进行了优化筛选。

地下建筑结构设计理论和实践随着计算机技术的发展日新月异,除了经典的理论,新技术、新方法和新理论也不断涌现,吸收和讲授新的内容,追求正确的、先进的、可以持续地使用的理论和技术,一直是本书的目标。

一本书修订到第三版,理论上内容的错误、可读性和表述方法的流畅性应该被解决,但是,从我再读修改稿内容的时候,仍然发现了许多错字、别字及文献引述中的错误,也许第三版出版后,其内容的不足和错误仍然存在,希望读者能够真实、诚恳地回复到我的邮箱:wsl6666@yahoo.com,作为奖励,每一个回复书中内容错误的读者或改进本书内容的建议读者,都将得到一本由我付费赠送的第三版《地下建筑结构设计》。

王树理

2014 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地下建筑结构的概念和特点	1
1.1.1 工程特点	1
1.1.2 设计特点	2
1.2 地下建筑结构分类和形式	2
1.2.1 居民住宅	4
1.2.2 娱乐场所	4
1.2.3 商业与教育设施建筑物	5
1.2.4 特殊设施	6
1.2.5 地下停车场	7
1.2.6 工业设施	7
1.2.7 军事及民防设施	7
1.2.8 储藏建筑	8
1.2.9 交通运输	10
1.2.10 公共隧道	11
1.2.11 地下采矿巷道	12
1.2.12 明挖基坑结构	14
复习思考题	14
第 2 章 地下建筑结构设计方法	15
2.1 土中地下支护结构设计方法	15
2.1.1 勘察	16
2.1.2 衬砌设计	17
2.1.3 地面沉降控制	18
2.1.4 土体移动对结构的影响	24

2.2	岩石中地下支护结构设计方法	25
2.2.1	计算机模型在开挖设计中的作用	26
2.2.2	地下开挖引起围岩变形的基本分析	26
2.2.3	轴对称弹塑性分析	28
2.2.4	依赖于时间的变形对开挖稳定性的影响	32
2.2.5	水压力对开挖稳定性的影响	32
2.2.6	圆形开挖围岩的实际状态与厚壁圆筒理论比较	34
2.2.7	古典弹性-非弹性分析与实际的关联	35
2.2.8	开挖支护	37
2.2.9	断面对开挖稳定性的影响	38
2.2.10	支护的实际效果	39
2.2.11	开挖面上岩体的稳定性	40
2.2.12	支护设计方法	41
2.2.13	开挖稳定性的不连续分析	42
2.2.14	总结	43
2.3	地下建筑结构设计内容	43
2.4	地下建筑结构设计规范	46
	复习思考题	46
第3章	地下建筑结构设计计算理论	47
3.1	土压力计算理论	47
3.1.1	土压力及其分类	47
3.1.2	静止土压力	48
3.1.3	朗肯土压力理论	49
3.1.4	库仑土压力理论	55
3.2	岩石力学计算理论	58
3.2.1	围岩压力及分类	58
3.2.2	非圆形洞室等代圆法	63
3.2.3	圆形洞室围岩线弹性应力和位移分析	65
3.2.4	圆形洞室围岩弹塑性应力和位移分析	68
3.2.5	非轴对称条件下围岩的应力分布特征	76
3.2.6	围岩与支护结构的相互作用	77
	复习思考题	79
	习题	80

第 4 章 盾构法隧道衬砌结构设计	81
4.1 盾构法概述	81
4.1.1 盾构法隧道衬砌设计流程	81
4.1.2 盾构法隧道结构设计程序包括的主要内容	82
4.1.3 盾构法隧道结构设计常用名词及图示符号	84
4.2 盾构衬砌结构设计方法	85
4.2.1 设计原则	85
4.2.2 荷载	86
4.2.3 衬砌材料	93
4.2.4 安全系数	94
4.2.5 管片结构设计计算	94
4.2.6 断面安全性检验	101
4.2.7 连接缝构造计算	106
4.2.8 衬砌安全性校核	106
4.2.9 管片构造	106
4.2.10 管片的生产	108
4.2.11 二次衬砌	109
4.3 设计实例	111
复习思考题	129
习题	129
第 5 章 钻爆法隧道结构设计	130
5.1 引言	130
5.2 钻爆法掘进隧道	130
5.2.1 冲击钻进法的原理	132
5.2.2 隧道凿岩台车选择	134
5.3 台阶爆破设计	141
5.4 轮廓爆破	151
5.4.1 线性钻眼	151
5.4.2 预裂爆破	151
5.4.3 光面爆破	152
5.5 隧道爆破设计	154
5.5.1 掏槽区炮眼设计(A区)	154
5.5.2 底眼设计(E区)	158

5.5.3	非光面爆破洞室直墙/拱顶周边眼设计(B区)	160
5.5.4	光面爆破洞室直墙/拱顶周边眼设计(B区)	160
5.5.5	辅助眼设计(B区、C区)	161
5.6	爆破损伤及控制	162
5.7	隧道支护结构设计	173
5.7.1	支护结构概述	173
5.7.2	常用支护类型及其受力特点	174
5.7.3	支护结构抗力设计计算	177
5.7.4	组合支护体系特性	180
5.8	注浆结构设计	180
5.8.1	概述	180
5.8.2	注浆设计方法	182
5.8.3	渗透-水泥浆注浆	186
5.8.4	渗透-化学注浆	194
5.8.5	劈裂注浆	200
5.8.6	压密注浆	203
5.8.7	高压射流注浆	206
	复习思考题	213
	习题	214
第6章	非开挖顶管结构设计	215
6.1	概述	215
6.2	顶管技术结构设计	220
6.2.1	土层工程地质勘察	220
6.2.2	顶管工作井设计	222
6.2.3	顶进力的分析计算	229
6.2.4	后座墙设计	230
6.3	顶管施工方法、设备和管材	235
6.3.1	顶管施工方法	235
6.3.2	中继环结构及原理	237
6.3.3	顶管顶进方向控制	239
6.3.4	减少顶进阻力的措施	240
6.3.5	各类管道及其接口	242
	复习思考题	246

第 7 章 明挖基坑支护结构设计	247
7.1 支护结构类型	247
7.1.1 重力式挡土墙	248
7.1.2 排桩与地下连续墙式挡土结构	248
7.1.3 逆作拱墙挡土结构	252
7.1.4 土钉支护结构	253
7.2 支护结构设计	253
7.2.1 设计依据及所需资料	253
7.2.2 混凝土重力式挡墙设计	255
7.2.3 排桩与地下连续墙式支护结构设计	261
7.2.4 土层锚杆设计	269
7.2.5 土钉墙支护结构设计	277
复习思考题	282
习题	282
第 8 章 沉井结构设计	283
8.1 沉井概述	283
8.1.1 沉井分类	283
8.1.2 沉井设计原则	284
8.1.3 沉井施工步骤	284
8.2 沉井构造	285
8.3 沉井结构设计计算	288
8.3.1 下沉系数计算	288
8.3.2 沉井底节验算	289
8.3.3 沉井井壁计算	289
8.3.4 沉井刃脚验算	291
8.3.5 沉井封底计算	294
8.3.6 沉井底板计算	297
8.3.7 沉井抗浮稳定验算	297
复习思考题	298
第 9 章 沉管结构设计	299
9.1 沉管结构概述	299
9.2 沉管结构设计	301

9.2.1	沉管结构所受荷载	301
9.2.2	浮力设计	302
9.2.3	结构分析与配筋	303
9.3	接缝管段处理与防水措施	304
9.3.1	变形缝布置与构造	304
9.3.2	止水缝带	305
9.3.3	管段外壁防水措施	306
9.3.4	钢壳与钢板防水	306
9.3.5	卷材防水	307
9.4	管段沉没与水下连接	307
9.4.1	沉没方法与设备	307
9.4.2	水下连接	308
9.5	管段接头	309
9.5.1	刚性接头	310
9.5.2	柔性接头	310
9.6	沉管基础	310
9.6.1	地质条件与沉管基础	310
9.6.2	基础处理	311
9.6.3	软弱土层上的沉管基础	313
	复习思考题	316
第10章	地下建筑工程降水与防水设计	317
10.1	地下水的类型及性质	317
10.1.1	地下水的基本类型	317
10.1.2	地下水的基本性质	319
10.2	地下建筑工程降水设计	319
10.2.1	地下建筑工程降水方法	319
10.2.2	降水工程的平面布置	322
10.2.3	基坑总排水量计算	323
10.2.4	单井最大出水量计算	326
10.2.5	井点间距计算	326
10.2.6	降深与降水预测	326
10.2.7	降水观测	327
10.2.8	井点管拔除	328

10.3	地下建筑工程防水设计	330
10.3.1	设计原则	330
10.3.2	设计要求	331
10.3.3	地下工程防水等级与设防要求	332
10.4	地下建筑防水材料	334
10.4.1	卷材防水层	334
10.4.2	涂料防水层	335
10.4.3	塑料防水板防水层	336
10.4.4	膨润土板(毯)防水层	337
10.5	地下建筑混凝土结构防水	337
10.5.1	变形缝防水	337
10.5.2	施工缝防水构造	339
10.5.3	后浇带防水	340
10.6	地下建筑工程环境保护	340
10.6.1	环境、环境问题及环境保护	340
10.6.2	地下工程环境保护的内容	341
10.6.3	地下工程环境保护的意义	342
10.6.4	地下工程环境保护方法	342
	复习思考题	346
	习题	346
	参考文献	347

1.1 地下建筑结构的概念和特点

地下建筑结构是指在地面以下保留、回填或不回填上部地层,在地下空间内修建能够提供某种用途的建筑物。

1.1.1 工程特点

地下建筑结构设计不同于地上建筑结构设计,其设计的工程特点表现在:

(1) 地下空间内建筑结构替代了原来的地层,建筑结构承受了原本由地层承受的荷载。在设计和施工过程中,要最大限度地发挥地层自承载能力,以便控制地下建筑结构的变形,降低工程造价。

(2) 在受载状态下构建地下空间结构物,地层荷载随着施工进度发生变化,因此,设计要考虑最不利的荷载工况。

(3) 作用在地下建筑结构上的地层荷载,应视地层的地质情况合理简化确定。对于土体一般可按松散连续体计算;而对岩体,首先查清岩体的结构、构造、节理、裂隙等发育情况,然后确定是按连续还是非连续介质处理。

(4) 地下水状态对地下建筑结构设计 and 施工影响较大。设计前必须弄清地下水的分布和变化情况,如地下水的静水压力及动水压力、地下水的流向、地下水的水质对结构物的腐蚀影响等。

(5) 地下建筑结构设计要考虑结构物从开始构建到正常使用以及长期运营过程的受力工况,注意合理利用结构的反力作用,节省造价。

(6) 在设计阶段获得的地质资料,有可能与实际施工揭露的地质情况不一样,因此,在地下建筑结构施工过程中,应根据施工的实时工况,动态修改设计。

(7) 处在岩体中的地下建筑结构物,围岩既是荷载的来源,在某些情况下又与结构共同构成承载体系。

(8) 当地下建筑结构的埋置深度足够大时,由于地层的成拱效应,结构所承受的围岩垂直压力总是小于其上覆地层的自重压力。地下建筑结构上的荷载与众多的自然和工程因素有关,它们的随机性和时空效应明显,而且往往难以量化。设计时必须考虑个体工程的特殊性,以及相关工程的普遍性。

1.1.2 设计特点

地下建筑结构设计方法与地上建筑结构设计方法相比,其设计特点有以下几个方面:

1) 基础设计

- (1) 深基础的沉降计算要考虑土的回弹再压缩的应力-应变特性;
- (2) 处于高水位地区的地下工程应考虑基础底板的抗浮问题;
- (3) 厚板基础设计,如筏型基础的板厚设计,应根据建筑荷载和建筑物上部结构状况,以及地层的性能,按照上部结构与地基基础协同工作的方法确定其厚度及配筋。

2) 墙板结构设计

地下建筑结构的墙板设计比地上建筑结构要复杂得多,作用在地下建筑结构外墙板上的荷载(作用力)分为垂直荷载(永久荷载和各种活荷载)、水平荷载(施工阶段和使用阶段的土体、水压力以及地震作用力)、变形内力(温度应力和混凝土的收缩应力等),设计工作应根据不同的施工阶段和最后使用阶段,采用最不利的组合和墙板的边界条件,进行结构设计。

3) 明挖与暗挖结构设计

地下建筑结构的明挖可采用钢筋混凝土预制件或现浇钢筋混凝土结构,而暗挖法施工一般采用现浇钢筋混凝土拱形结构。

4) 变形缝的设置

地下建筑结构中设变形缝最难处理的是防水问题,所以,地下建筑结构一般尽量避免设变形缝。即使在建筑荷载不均匀可能引起建筑物不均匀沉降的情况下,设计上也尽可能不采用沉降缝,而是通过局部加强地基、用整片刚性较大的基础、局部加大基础压力增加沉降或调整施工顺序等来得到整体平衡的设计方法,使沉降协调一致。地下结构环境温差变化较地上结构小,温度伸缩缝间距可放宽,也可以通过采用结构措施来控制温差变形和裂缝,以避免因设置伸缩缝出现的防水难题。

5) 其他特殊要求

地下建筑结构设计还应考虑防水、防腐、防火、防霉等特殊要求的设计。

1.2 地下建筑结构分类和形式

根据地下空间的特点,地下建筑结构按用途、几何形状和埋深的分类见表 1-1~表 1-3。

表 1-1 地下建筑结构按用途分类

序号	用途	功能
1	工业民用	住宅、工业厂房等
2	商业娱乐	地下商业城、图书馆等
3	交通运输	隧道、地铁、地下停车场等
4	水利水电	电站输水隧道、农业给排水隧道等
5	市政工程	给水、污水、管路、线路、垃圾填埋等
6	地下仓储	食物、石油及核废料存储等
7	人防军事	人防工事、军事指挥所、地下医院等
8	采矿巷道	矿山运输巷道和开采巷道等
9	其他	其他地下特殊建筑

表 1-2 地下建筑结构按几何形状分类

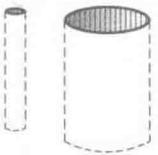
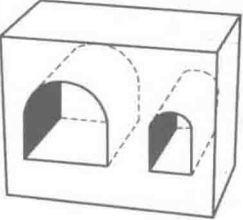
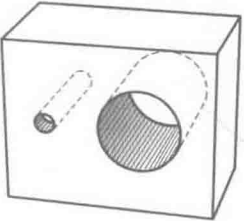
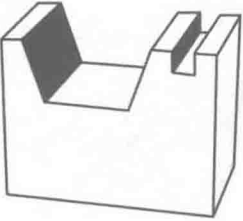
几何形状	施工	形式	方向	几何形状	施工	形式	方向
	钻孔或竖井	挖掘	垂直或倾斜		洞室或洞穴	天然或挖掘	水平或倾斜
	微型隧道或隧道	天然或挖掘	水平或倾斜或螺旋		堑壕或露天矿	明挖	倾斜或垂直

表 1-3 地下建筑结构按埋深分类

名称	埋深范围/m			
	小型结构	中型结构	大型运输系统结构	采矿结构
浅埋	0~2	0~10	0~10	0~100
中深	2~4	10~30	10~50	100~1 000
深埋	>4	>30	>50	>1 000

典型的地下建筑形式如下:

1.2.1 居民住宅

窑洞可能是人类使用地下建筑结构最古老的形式。图 1-1 所示为我国农村的地下黄土窑洞。世界上许多地区的宗教和超常规使用的场所也被建在地下,如图 1-2、图 1-3 所示。图 1-2 为哥伦比亚锡帕基拉(Zipaquira)地下盐洞大教堂入口。图 1-3 为印度建在岩石中的阿楼拉(Ellora)佛教寺庙。

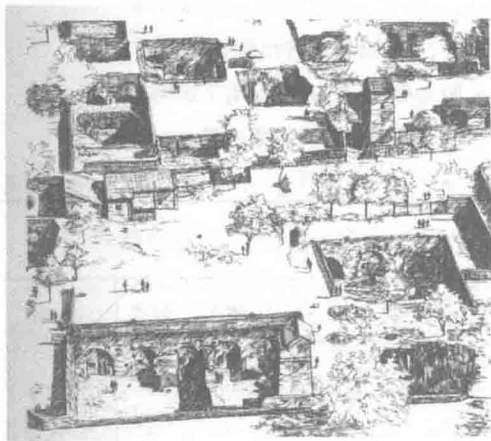


图 1-1 我国农村地下黄土窑洞

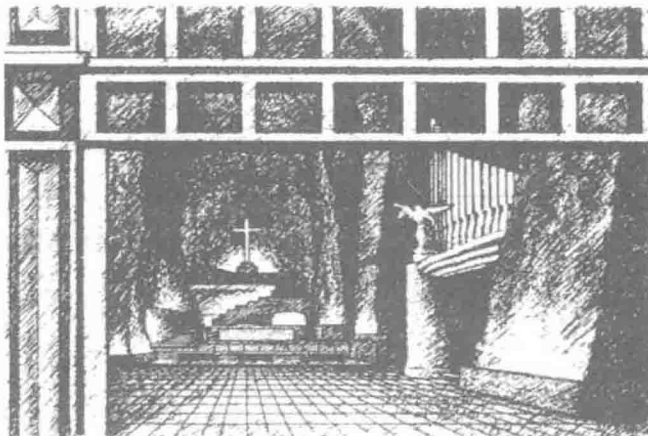


图 1-2 哥伦比亚锡帕基拉地下盐洞大教堂入口
(Pinzon-Isaza, 1983 年)



图 1-3 印度建在岩石中的阿楼拉佛教寺庙

1.2.2 娱乐场所

地下建筑娱乐场所包括天然洞室探险、旅游观光、运动设施和社区中心。

图 1-4 为前捷克斯洛伐克的旅游小船穿过迈查尔(Machocha)溶洞。

图 1-5 为挪威加尔克(Gjorvik)的地下游泳池。

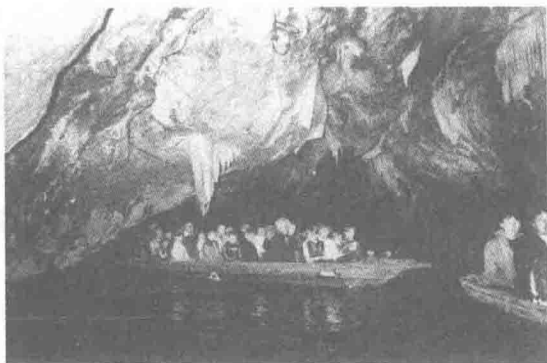


图 1-4 前捷克斯洛伐克的旅游小船穿过迈查尔溶洞

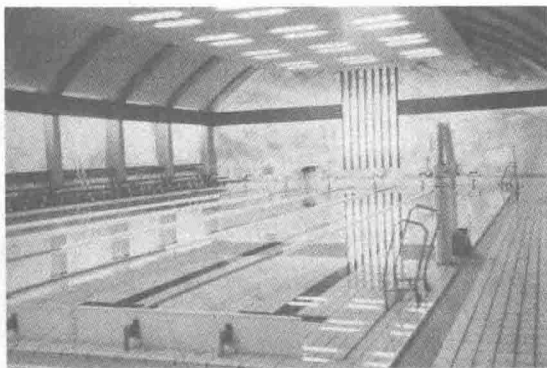


图 1-5 挪威加尔克的地下游泳池

图 1-6 为加拿大蒙特利尔(Montreal)地下步行街网络布置图(部分)。

图 1-7 为法国巴黎亚乐(Les Halles)地下街外景。



图 1-6 加拿大蒙特利尔地下步行街网络布置图(部分)



图 1-7 法国巴黎亚乐地下街外景

1.2.3 商业与教育设施建筑物

地下商业建筑物包括游览设施、展览馆和图书馆等。如建在哈佛大学校园里的内森·汞撒利·蒲赛(Nathan Mersh Pusg)图书馆(见图 1-8),英国牛津大学的拉德克利夫(Radcliffe)科学图书馆和日本东京七层深的国家国会图书馆。

教育设施建筑在地下建筑中占有重要地位,一般是浅埋明挖式建筑物,以防范火灾,使人容易从安全出口逃脱,如图 1-9、图 1-10 所示。明尼苏达大学的民用与矿产工程技术大楼,就是针对校园地表空