



高等院校城市地下空间工程专业“十二五”规划教材

地下空间工程 施工技术

DIXIA KONGJIAN GONGCHENG
SHIGONG JISHU

主编 曹净 张庆



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等院校城市地下空间工程专业“十二五”规划教材

地下空间工程 施工技术

主 编 曹 净 张 庆

副主编 丁祖德 刘海明 桂 跃



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书全面和系统地介绍地下空间工程施工的基础理论、施工技术、施工工艺和方法,内容兼顾施工基础知识和专业知识的结合,做到专业方向施工知识的全面性和系统性。主要包括两部分:第一部分是土木工程施工技术的基本理论,主要包括土方工程、混凝土工程、基础工程;第二部分是各类地下空间工程施工技术,主要包括基坑工程施工技术、盾构法和顶管法施工技术、隧道掘进机施工技术、沉管法及沉井法施工技术、注浆法施工技术以及地下空间工程防水。

本书适合城市地下空间工程专业的师生,以及城市地下铁道、地下隧道与管线、基础工程、地下商业与工业空间、地下储库等工程的设计、研究、施工、管理、投资、开发等部门从事技术或管理工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下空间工程施工技术 / 曹净, 张庆主编. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2014. 11
高等院校城市地下空间工程专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-2701-0

I. ①地… II. ①曹… ②张… III. ①地下工程—工
程施工—高等学校—教材 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第270515号

书 名	高等院校城市地下空间工程专业“十二五”规划教材 地下空间工程施工技术
作 者	主编 曹净 张庆
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19印张 451千字
版 次	2014年11月第1版 2014年11月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



前 言

土木工程是建造各类工程设施的科学技术的总称。实际教学时，土木工程专业按照专业方向进行教学，2012年，中华人民共和国住房和城乡建设部制定颁布的《高等院校土木工程本科指导性专业规范》中土木工程有三个专业方向，分别为建筑工程、桥梁与隧道工程和地下空间工程。地下空间工程施工技术是地下空间工程专业的一门必修的专业基础课，它在培养学生具有独立分析与解决土木工程施工中有关施工技术和基本能力方面起着重要的作用。

地下空间工程施工技术研究地下空间工程施工中各主要工种工程的施工技术、工艺原理的一般规律。该课程具有涉及面广、实践性强、发展迅速的特点。作为应用型的专业基础课，其研究内容均来源于丰富的工程实践。随着我国建设事业与科学技术的不断发展，土木工程施工的新技术、新工艺、新材料、新方法层出不穷。在编写过程中，本书主要结合本科教学及工程实际需要，力求全面和系统地介绍地下空间工程施工的基础理论、施工技术、施工工艺和方法。在选择内容时，兼顾了施工基础知识与专业知识的结合，做到专业方向施工知识的全面性和系统性。

本书由昆明理工大学建筑工程学院组织编写。全书共分10章，具体分工如下：第1章至第4章由张庆编写，第5章由刘海明编写，第6章由曹净编写，第7章由丁祖德编写，第8章由桂跃编写，第9章由刘海明编写，第10章由桂跃编写。全书由曹净、张庆进行了统稿与审定。此外，孙长宁、丁文云、普琼香、杨海星、杜永刚、余志华等研究生为本书的出版付出了辛勤劳动，在此表示衷心感谢。

本书在编写中力求做到理论联系实际，结合我国现行规范、规程与标准，反映当前地下空间工程施工的先进水平。但由于作者的水平有限，不足之处在所难免，诚恳地希望广大读者批评指正。

编者
2014年8月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 地下空间工程概述.....	1
1.1.1 地下空间工程的利用历史	1
1.1.2 地下空间工程的发展前景	3
1.2 地下空间工程施工技术进展	4
1.3 本门课程的学习方法.....	4
思考题与习题	5
第2章 土方工程	6
2.1 概述	6
2.1.1 土的工程性质	6
2.1.2 土的工程分类	7
2.2 场地设计标高的确定.....	8
2.2.1 确定场地设计标高的一般方法	8
2.2.2 土方工程量计算	10
2.2.3 土方调配.....	12
2.3 土方工程的施工	18
2.3.1 土方工程施工前的准备工作	18
2.3.2 土方工程机械化施工	18
2.3.3 土方的填筑与压实	22
2.3.4 影响填土压实的因素	23
2.3.5 填土压实的质量检查	24
思考题与习题	25
第3章 混凝土工程	27
3.1 钢筋工程	27
3.1.1 钢筋的进场检验与加工	27
3.1.2 钢筋的连接	28
3.1.3 钢筋配料与代换	34
3.1.4 钢筋验收检验	38
3.2 模板工程	39
3.2.1 模板的构造与分类	39

3.2.2	模板的设计	46
3.2.3	模板施工	49
3.3	混凝土工程	50
3.3.1	混凝土质量的控制	50
3.3.2	混凝土的运输	55
3.3.3	混凝土的浇筑	58
3.3.4	混凝土的密实成型	63
3.3.5	混凝土的养护	64
3.3.6	混凝土的冬期施工	65
3.3.7	混凝土的质量检查	67
	思考题与习题	69
第4章	基础工程	71
4.1	浅基础	71
4.1.1	砌筑浅基础施工	71
4.1.2	现浇钢筋混凝土基础	73
4.1.3	装配式杯口基础	75
4.2	桩基础	75
4.2.1	预制桩施工	76
4.2.2	灌注桩施工	83
4.2.3	桩基质量检查与验收	90
	思考题与习题	91
第5章	基坑工程施工技术	92
5.1	概述	92
5.2	基坑支护结构施工	94
5.2.1	无支护开挖	94
5.2.2	有支护开挖	94
5.3	基坑截水结构施工	129
5.3.1	水泥土重力式围护墙	129
5.3.2	高压旋喷桩施工	132
5.4	基坑降排水的施工	133
5.4.1	降水井施工	133
5.4.2	基坑明沟排水设计施工	139
	思考题与习题	139
第6章	盾构法和顶管法施工技术	141
6.1	盾构法施工技术	141
6.1.1	概述	141
6.1.2	盾构法施工	143

6.1.3	盾构机及其选型	146
6.1.4	常用盾构施工技术	156
6.1.5	盾构施工主要技术参数	164
6.1.6	盾构隧道施工技术问题	171
6.2	顶管法施工技术	174
6.2.1	基本原理	174
6.2.2	顶管法施工	175
6.2.3	顶管机及其选型	182
6.2.4	常用顶管施工技术	187
6.2.5	顶管工作井的设置	194
6.2.6	顶管施工的主要技术问题	196
	思考题与习题	203
第7章	隧道掘进机施工技术	204
7.1	概述	204
7.1.1	隧道掘进机法的基本概念	204
7.1.2	隧道掘进机法施工特点	204
7.1.3	国内外工程应用概况	205
7.2	隧道掘进机的类型及构造	207
7.2.1	TBM 的类型	207
7.2.2	TBM 主机基本构造	207
7.2.3	TBM 主机部件及结构	211
7.2.4	TBM 后配套系统	214
7.3	采用 TBM 法的基本条件	215
7.3.1	地质条件	215
7.3.2	机械条件	217
7.3.3	隧道条件	217
7.4	TBM 掘进施工	217
7.4.1	破岩机理	217
7.4.2	TBM 循环作业原理	218
7.4.3	TBM 掘进操作与控制	221
7.5	TBM 衬砌施工	223
7.5.1	复合式衬砌	223
7.5.2	管片式衬砌	223
7.6	TBM 法的辅助工法	224
7.6.1	超前支护	224
7.6.2	喷射混凝土	225
7.6.3	安装钢拱架	225

7.6.4 安装锚杆	226
思考题与习题	226
第8章 沉管法及沉井法施工技术	227
8.1 沉管法施工技术	227
8.1.1 概述	227
8.1.2 沉管隧道的分类	228
8.1.3 沉管隧道施工工艺	229
8.2 沉井施工技术	244
8.2.1 概述	244
8.2.2 沉井类型	244
8.2.3 沉井制作与下沉	244
8.2.4 沉井下沉施工常遇问题和预防处理方法	256
8.2.5 沉井的质量检验标准	258
思考题与习题	259
第9章 注浆法施工技术	260
9.1 注浆材料与设备	260
9.1.1 注浆材料	260
9.1.2 注浆施工设备的作用和选择	263
9.2 注浆法分类及其特性	264
9.3 注浆法施工工艺	266
9.3.1 注浆方法	266
9.3.2 注浆顺序	268
9.3.3 注浆参数	270
9.3.4 注浆结束标准	272
9.3.5 注浆检查	272
思考题与习题	274
第10章 地下空间工程防水	275
10.1 概述	275
10.2 地下工程排水	275
10.3 地下工程防水	276
10.3.1 地下工程防水等级	276
10.3.2 地下工程混凝土结构主体防水	277
10.3.3 地下工程混凝土结构细部构造防水	279
10.3.4 特殊施工法的结构防水	285
思考题与习题	291
参考文献	292

第 1 章 绪 论

地下空间具有非常高的利用价值。21 世纪，随着中国经济的不断发展，对城市空间资源的需求日趋高涨。与此同时，还要充分考虑城市的景观和环境问题，在确保城市现有景观与环境的前提下谋求城市的再生发展，有效开发和利用地下空间是城市获得新生的一条重要途径。通过对地下空间的有效利用和开发，可以改善城市的社会环境、生活环境，恢复自然环境。

1.1 地下空间工程概述

地下空间工程是指在地面以下地质环境中修建的各类地下建（构）筑物。地下空间工程具有以下特性：①空间性：在地面以下可提供人类活动或人类可利用的“空间”；②隔离性：地下空间是一个相对封闭的环境，不但相对隔绝了外界的影响，而且空间内部的声响、光照、气味等不会影响到外界；③恒常性：指其具有一定的恒定性，即地下空间状态的稳定性，比如地下空间可以缓和气温的变化（恒温性）和湿度的变化（恒湿性）、阻隔声音的传递（降噪性）等。

地下空间工程主要有地下商业街、地下停车场、人防避难工程、地下房屋、地下工厂、地下发电站等地下民用或工业建筑物，地下铁路、地下公路隧道、水下隧道等地下交通设施，以及各种地下通道工程、电力、燃气地下管道、各种地下储备设施等辅助构筑物等。

地下空间工程的利用已经渗透到人类生产、生活的各个领域，形成了功能广泛的工程系统和科学体系，并发展成为对国民经济具有重要意义的产业。它是一个横跨岩土、地质、结构、计算机科学和灾害防御等科学领域的综合性学科，也是 21 世纪重大的技术领域。其主要作用如下：

(1) 可以为地下公路、铁路、隧道等提供安全、高速、经济的交通手段。

(2) 修建的地下管道是城市的能源、信息网络的保障，如水、电力、煤气、通信、地下物流等。同时，地下管道还可以净化城市，如污水排放，对保护环境起到有效作用。

(3) 提高土地的利用价值。地下储藏空间和其他空间的利用，可使土地单位利用面积倍增。

(4) 提供了一个相对安全的储藏空间和避难场所，如储藏放射性物质或其他有害物质，可作为人防空间。此外，粮食、液体、瓦斯、能源、高放废物等的地下储藏也是目前的一个发展趋势。

1.1.1 地下空间工程的利用历史

在史前时代，洞窟可以守护生命、躲避自然灾害（如气候变迁、风霜雨雪、火山地

震等)和阻止敌害的入侵。因此,天然洞穴是人类利用地下空间的起点,如中国周口店的山顶洞、法国的拉斯科洞窟等,这些遗迹都可以让我们看到史前对地下空间利用的影子。

随着社会文明的发展,人类对地下空间的利用发生了很大的变化。回顾整个人类对地下空间利用的历史,可见人类对地下空间的利用背景主要有三个方面:一是为了克服自然环境而挖掘利用,如在以法国为中心的欧洲地区,有先人采掘燧石后留下的坑道遗迹,古埃及人在金字塔里面开凿有石室和隧道,世界各地的洞穴居住等;二是积极发挥自然环境条件并加以利用,如宗教设施、储藏设施、水渠等;三是近代为克服地表的种种限制而开发利用的地下空间,如地下商场、隧道等。

人类利用地下空间的历史大概经历了如下几个阶段:

(1) 史前时代、有文字历史时代初期。这个时期,人类居住在天然洞穴里,利用这些地下空间可以防御自然灾害的威胁以及其他部落的攻击,还可以作为贮藏粮食等物品的手段。此后,逐渐从穴居转移到地面建房居住,但是许多大型陵墓则在地下进行修筑,并作为古代国家王权的象征、暗示了从地府复活的自信,如中国的殷墟、埃及的国王谷及日本的横穴式古墓等。到了文明国家阶段,开始注重与人民生活密切相关的社会基础设施的建设,如利用地下涵洞引水来解决居民的用水问题。

(2) 从罗马时代到中世纪。这个时期涵洞构筑技术取得了很大进步,开矿、城市以及周边集镇的形成推动了交通、水渠(罗马)技术的发展。欧洲在十字军之后为防御异教徒的侵犯,把宗教设施移至地下,如卡帕多西亚洞窟修道院。以地下墓穴而文明的罗马时代地下公共墓地就是古代欧洲基督教所代表的宗教感的集中展示。

(3) 文艺复兴以后的近代。文艺复兴以后,地下空间工程的利用逐渐发展到城市领域,而下水道、墓地等设施逐渐移至地下。同时,在城市发展规划时,开始考虑与地上空间设施协调进行配备,从而使得生活更加便利。如在日本,江户时代以后的城市建设中,道路、水渠、航运等都开始有规划的配合城市发展而建设。

(4) 19世纪以后的现代。19世纪以后,由于地下掘进技术的革新,地下空间的利用已变成了社会基础设施建设的重要环节,并形成了一定的规模,如地铁、道路、发电、能源、防灾、环保、各种仓储、运动等设施,以及军事基地、避难点防空洞等陆续兴建。在美苏冷战时期,北欧诸国充分利用地质结构特点,在地表坚固岩盘下开凿了很多防核掩体,并兼作各种民用设施。

可见,人类对地下空间的利用在很大程度上为历史、社会、政治制度、文明程度以及宗教等时代背景所影响。但是随着社会的进步和人口的激增,地下空间的利用已经明显朝着多样化的方向发展。工业革命和炸药的发明更是有效促进了当今地下空间利用多样化发展,工业革命带动了凿岩机等地下掘进技术的飞速发展,炸药的发明则大幅度提高了掘进的效率,使得人类足迹到达更深的硬质岩层变为可能。

从古代沿袭下来的以克服自然灾害为目的的水利、防灾设施以及以克服地形条件为目的的各种隧道,即使到现在也仍然是很重要的,而在军事上对地下空间的利用自古至今都一样。但随着工农业的发展,人口数量激增,文化趋于成熟,城市建设中的地表限制越来越突出,地下空间的利用更加需要向多元化发展。因此,地铁、地下通道、地下街开始兴

盛起来，有人将此现象称作“回归地下”。人类最初从洞穴走出来，在地表寻求便利的生活场所，而现在人类又开始重新考虑回到地下索求便捷舒适的生活了。

1.1.2 地下空间工程的发展前景

随着社会生产力的发展，日益增长的人类生活需求与逐渐枯竭的自然资源之间的矛盾越来越突出，已经引起人们的普遍关注。每个人的生活都需要生态空间和生活空间，生态空间即生产粮食等生活必需品，生活空间即供人居住和从事各种活动的空间。这两类空间都是以土地为依托，而人口的膨胀导致现有的生活空间十分有限，因此迫切需要开拓新的生存空间。国际上提出了一种普遍接受的观点：认为19世纪是“桥”的世纪，20世纪是“高层建筑”的世纪，21世纪则将是人类开发和利用“地下空间”的世纪。

21世纪的人类面临着人口、粮食、资源和环境四大挑战。可持续发展作为基本国策摆在每个学科和产业面前，开拓新的空间资源是一条新的可持续发展道路。随着城市化进程的发展，大片的土地被现代化建筑、交通道路及其他设施所覆盖，难以再生，居住、交通、环境的矛盾更加突出。充分利用地下空间来建设交通道路、厂房及仓库，以释放更多的地上空间，已成为21世纪现代化城市建设的必由之路。目前，各国把地下空间利用的重点逐渐放在城市建设上。城市地下空间作为城市的重要资源，应得到多方面的应用，如地下商场和商业街，地下停车场、交通设施、地下物流、通信设施等。这些地下设施与地上设施一起构成了城市的立体空间网络。

从城市地下空间利用现状来看，地下空间的发展重点在于联络城市各处设施的地下通道、地下商场和城市轨道交通系统（地铁和轻轨）。据不完全统计，日本在全国20多个城市，共拥有150多条地下街，总建筑面积约为120万 m^2 ；法国、英国也拥有大量的地下街；加拿大的最大城市蒙特利尔已经提出以地铁车站为中心，建造联络城市2/3设施的地下商业街网的宏伟规划。

城市有轨交通系统近年来得到了巨大发展，不但是城市的基础设施，同时也是灾害防御设施。许多国家都针对城市发展规模的特点，在人口超过50万的大中城市发展轨道交通系统。这是城市国际化、现代化的一个重要标志。一些国家也正在研究城市道路地下化的交通系统，如日本东京的地下环形道路的建设，极大地减轻了地面交通的压力。我国近几年大量城市在进行“地铁和轻轨”的建设，继北京地铁之后，上海、广州、深圳等地铁也投入运营。南京、青岛、哈尔滨、昆明、成都等大量城市的地铁都在建设中。目前，昆明市地铁规划有六条线路，截至2014年已有三条线路部分路段进行运营。可见，地下空间利用有着非常大的发展空间和前景。

21世纪将是地下空间大发展的世纪。目前，主要利用的地下空间深度仅有20m左右，地下20~50m深度还有待开发，以后将逐渐发展到地下100m深度左右。地下空间是国家重要的社会资源，也是社会可持续发展的资源，应加以充分开发和利用；地下空间的利用应作为国家的基本国策，予以支持，推进其健康发展；地下空间的发展方向应是城市地下空间的综合利用，是建立防灾型城市的重要基础。地下空间的开发利用以及地上、地下空间的合理配置，将使得社会基础设施的配套建设产生新的飞跃，从而得到更为便捷舒适的生活。

1.2 地下空间工程施工技术进展

地下空间工程施工技术的发展与国民经济发展息息相关。随着我国经济和城市化进程的快速发展,地面交通设施超负荷运转,交通事故、交通阻塞以及交通公害已经阻碍了国家和地区经济的发展。开发城市地下空间,发展地下空间施工技术,是目前亟须研究的课题之一。

近几十年来,地下空间工程在我国得到大规模的发展,工程实践的不断探索使得地下空间工程的施工技术有了新的飞跃。尤其是随着科学技术的进步,先进的施工机械的出现,地下空间工程的施工水平越来越高,成本越来越低。近年来,地下空间工程施工技术的新进展主要体现在以下几个方面:

(1) 地下空间工程的施工机械自动化水平不断提高。隧道掘进机、盾构机、煤矿巷道掘锚一体机等自动化程度高的大型施工设备得到普遍应用,这些设备的使用极大地提高了劳动效率、降低了工人的劳动强度,使得施工速度不断提高,施工质量不断改善。

(2) 主动支护方法的理论及实践水平不断提高。主要以锚杆、锚索联合支护技术为代表的支护技术在地下空间工程中得到广泛应用,先进支护技术的使用大大提高了地下工程的施工速度。

(3) 地下空间工程的新工法不断出现,提高了地下空间工程的施工水平。如盾构法施工,具有围岩扰动小、地面沉降小、对地表构筑物影响小等优点,目前在地铁区间隧道工程施工中已经得到普遍应用;再如浅埋暗挖法施工,具有造价低、拆迁少、灵活多变、无需太多专用设备及不干扰地面交通和周围环境等特点,在复杂条件下城市地铁车站及区间施工中得到广泛应用。

(4) 地下空间工程信息化水平不断提高。由于地下空间工程施工条件的复杂性,特别是多为隐蔽工程,为保证施工质量和安全,监控预测信息反馈指导地下空间工程施工已得到广泛应用,如深基坑工程施工监测、隧道工程施工监测和地铁工程施工监测等。

(5) 地下空间工程项目管理的理论和实践不断发展,进度、质量和成本三大控制在地下空间工程项目管理方面得到普遍应用,提高了施工管理水平。

1.3 本课程的学习方法

我国城市地下空间的开发与利用处于刚刚起步阶段,但已经涉及包括能源、交通、民用建筑、水利水电等多个领域。随着社会经济的逐步发展,地下空间工程所涉及的领域将会越来越广,数量和规模也会越来越大,亟须工程人员对地下空间工程施工技术进行系统的学习和掌握。

为了更好的开发和利用城市地下空间,培养该方面的专业技术人才,国家在多所高校设立了“城市地下空间工程”本科专业,各高校在土木工程专业下设置了地下空间工程专业方向。

本课程主要介绍了地下空间工程施工的基础知识和专业技术。地下空间工程施工技

术这门课程主要有如下特点：首先是综合性强，课程涉及的内容广泛，需要学生在学习了专业相关的工程地质学、理论力学、材料力学、结构力学、工程测量学、建筑材料、土力学、岩体力学、地下空间结构等课程之后进行学习。其次是实践性强，课程内容操作性强、区域性强，因为工程的实现涉及方方面面，方法也是多种多样，而且工程的高质量和经济性还应与所在地区的条件相适应，这些特点容易让学生感觉课程内容琐碎、理论简单、叙述不详，也容易暴露出教师实践经验欠缺等问题。最后是发展快，各种新材料、新工艺、新技术推陈出新，如住建部每年都有一批重点推广科技项目，这与当今科技迅猛发展的大趋势相适应。学生的学习应当首先了解本门课程的特点，做好先修课程的学习，注重实践与理论相结合，不断接触新知识。

本门课程是理论与实践相结合的课程，现场实践是学好本门课程的一个重要手段。学生应首先学习课本的理论知识，尤其是重视施工方法和施工设备的使用方法的学习，然后结合认识实习、生产实习、毕业实习、课程设计等继续学习，通过现场观摩、亲自操作等方法，掌握具体施工过程，巩固理论知识，了解新材料、新工艺。因此，对地下空间工程施工技术的学习是一个持续的学习过程。

思考题与习题

1. 什么是地下空间工程，主要有哪几类？
2. 简述地下空间工程的发展历史及其前景。
3. 简述地下空间工程施工技术进展。
4. 如何学好地下空间工程施工技术这门课程？

第2章 土方工程

土方工程具有施工条件复杂的特点，因为它受地质、水文、气象等较多不确定因素的影响，同时，土方工程又具有工程量大、劳动繁重的特点，因此，为了提高土方施工劳动生产效率，在组织土方工程施工前，应详细分析与核对各项技术资料（如地形图、工程水文地质勘察资料、地下管道、电缆、地下构筑物资料及土方工程施工图等），进行现场调查并根据现有施工条件，制订出技术可行、经济合理的施工方案和技术措施。

土方工程是地下空间工程施工中的主要工种之一，包括土方的开挖、运输、填筑、弃土、平整和压实等主要施工过程。

2.1 概述

土的工程性质对土方工程施工有直接的影响，也是进行土方施工设计必须掌握的基本资料。

2.1.1 土的工程性质

土的主要工程性质有：土的可松性、含水率、渗透性、密实度、抗剪强度、土压力等，部分内容在土力学中有详细分析，在此不赘述。

1. 土的可松性

土具有可松性，即自然状态下的土，经过开挖后，其体积因松散而增大，以后虽经回填压实，仍不能恢复。土的可松性程度用可松性系数表示，即

$$\left. \begin{aligned} K_s &= \frac{V_2}{V_1} \\ K'_s &= \frac{V_3}{V_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

式中 K_s ——最初可松性系数；

K'_s ——最终可松性系数；

V_1 ——土在天然状态下的体积， m^3 ；

V_2 ——土经开挖后的松散体积， m^3 ；

V_3 ——土经回填压密后的体积， m^3 。

由于土方工程量是以自然状态的体积来计算的，所以在土方调配、计算土方机械生产率及运输工具数量等的时候，必须考虑土的可松性。如 K_s 是计算土方施工机械及运土车辆等的重要参数， K'_s 是计算场地平整标高及填方时所需挖土量等的重要参数。

2. 原状土经机械压实的沉降量

原状土经机械往返压实或经其他压实措施后，会产生一定的沉陷，根据不同土质，其

沉降量一般在 3~30cm 之间。可按下述经验公式计算：

$$S = P/C \quad (2.2)$$

式中 S ——原状土经机械压实后的沉降量，cm；

P ——机械压实的有效作用力，MPa；

C ——原状土的抗陷系数，MPa/cm，可按表 2.1 取值。

表 2.1 不同土的 C 值参考表

原状土质	C /(MPa/cm)	原状土质	C /(MPa/cm)
沼泽土	0.01~0.015	大块胶结的砂、潮湿黏土	0.035~0.06
凝滞的土、细粒砂	0.018~0.025	坚实的黏土	0.10~0.125
松砂、松湿黏土、耕地	0.025~0.035	泥灰石	0.13~0.18

2.1.2 土的工程分类

土的分类方法很多，在土木工程施工中按土的开挖难易程度将土分为八类（表 2.2），前四类属一般土，后四类属岩石。它是施工中选择合适的机械与开挖方法的依据，也是确定土木工程施工劳动定额的依据。

表 2.2 土的工程分类

土的分类	土的名称	开挖方法	可松性系数	
			K_s	K'_s
第一类 (松软土)	砂土、粉土、冲积砂土层、种植土、淤泥(泥炭)	用锹、锄头挖掘	1.08~1.17	1.01~1.04
第二类 (普通土)	粉质黏土、潮湿的黄土、夹有碎石和卵石的砂、种植土、填筑土和粉土	用锹、锄头挖掘，少许用镐翻松	1.14~1.28	1.02~1.05
第三类 (坚土)	软及中等密实黏土，重粉质黏土，粗砾石，干黄土及含碎石、卵石的黄土，粉质黏土，压实的填筑土	主要用镐，少许用锹、锄头，部分用撬棍	1.24~1.30	1.04~1.07
第四类 (砾砂坚土)	坚硬密实黏土及含碎石、卵石的黏土，粗卵石，密实的黄土，天然级配砂土，软泥灰岩	先用镐、撬棍，然后用锹挖掘，部分用楔子及大锤	1.26~1.37	1.06~1.09
第五类 (软石)	硬质黏土，中等密实的页岩、泥灰岩、白垩土，胶结不紧的砾岩，软石灰岩及贝壳石灰岩	用镐或撬棍、大锤，部分用爆破方法	1.30~1.45	1.10~1.20
第六类 (次坚石)	泥岩，砂岩，砾岩，坚实的页岩、泥灰岩，密实的石灰岩，风化花岗岩、片麻岩	用爆破方法，部分用风镐	1.30~1.45	1.10~1.20
第七类 (坚石)	大理石，辉绿岩，玢岩，粗、中粒花岗岩，坚实的白云岩、砾岩、砂岩、片麻岩、石灰岩，风化安山岩、玄武岩	用爆破方法	1.30~1.45	1.10~1.20
第八类 (特坚石)	安山岩、玄武岩，花岗片麻岩，坚实的细粒花岗岩、闪长岩、石英岩、辉长岩、辉绿岩，玢岩	用爆破方法	1.45~1.50	1.20~1.30

2.2 场地设计标高的确定

大型工程项目通常都要确定场地设计平面，进行场地平整。场地平整就是将自然地面改造成工程施工所要求的平面。

2.2.1 确定场地设计标高的一般方法

选择设计标高，需考虑以下因素：①场地平面总体规划设计标高的要求；②满足生产工艺和运输的要求；③尽量利用原地形，分区分别确定不同设计标高，以减少挖、填土方数量；④场地内挖填方平衡，土方量最少，以降低土方运输费用；⑤场地要有一定的泄水坡度（ $\geq 2\text{‰}$ ），同时也要满足地下水排泄要求，避免地下水在场平填土中堆积；⑥考虑最高洪水位的要求。

当对场地设计标高无其他特殊要求时，则可根据挖填方平衡的原则，按照下述步骤和方法确定。

1. 初步计算场地设计标高

在地形图上将施工区域划分成边长为 a 的方格，方格边长一般采用 $20\sim 40\text{m}$ ，如图 2.1 (a) 所示。每个方格的角点标高，可以在地面上用木桩打好方格网，然后用水准仪直接测出。如果有地形图，也可以根据地形图上相邻两等高线的标高，用插入法求得。

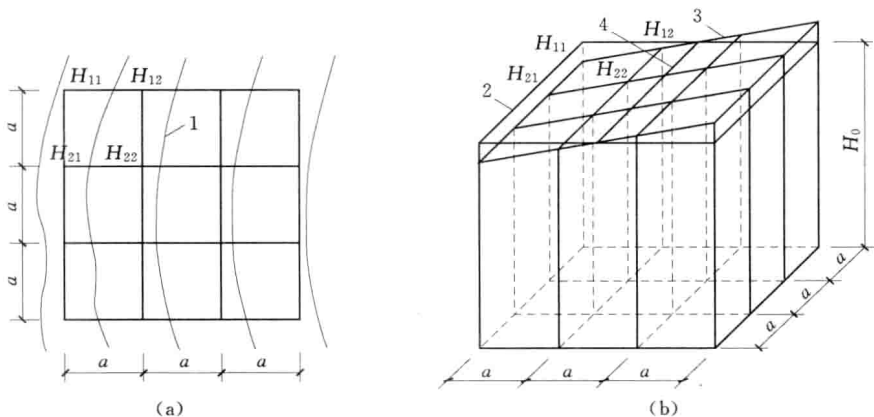


图 2.1 场地设计标高计算示意图

(a) 地形图方格图；(b) 设计标高示意图

1—等高线；2—设计标高；3—自然地面；4—零线

一般理想的设计标高，应该使场地内的土方在平整前和平整后土方体积相等，从而达到挖填方平衡，如图 2.1 (b) 所示。即

$$nH_0a^2 = \sum_{i=1}^n \frac{H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22}}{4} a^2 \quad (2.3)$$

$$\text{即} \quad H_0 = \sum_{i=1}^n \frac{H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22}}{4n} \quad (2.4)$$

式中 H_0 ——计算的场地设计标高，m；

a ——方格边长, m;

n ——方格个数;

H_{11} 、 H_{12} 、 H_{21} 、 H_{22} ——任意一个方格的 4 个角点的标高, m。

从图 2.1 中可看出, 不同的角点在计算过程中被应用的次数 P_i 并不一样, 在测量学上将其称为“权”, 反映了各角点标高对计算结果的影响程度。如: H_{11} 系一个方格的角点标高, H_{12} 和 H_{21} 均系两个方格共用的角点, H_{22} 则系四个方格共用的角点标高。如果将每个方格的 4 个角点标高相加, 那么, 类似 H_{11} 这样的角点标高加了 1 次, 类似 H_{12} 和 H_{21} 的标高加了 2 次, 而类似 H_{22} 的标高则被加了 4 次。因此, 考虑了各角点标高的“权”后, 式 (2.4) 可改写成便于计算的形式:

$$H_0 = \frac{\sum H_1 + 2\sum H_2 + 3\sum H_3 + 4\sum H_4}{4n} \quad (2.5)$$

式中 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 ——一个方格、二个方格、三个方格、四个方格所共有的角点标高, m。

2. 设计标高的调整

式 (2.5) 计算结果为场地的初步设计标高, 为一理论值, 在实际工程中, 还需考虑以下因素进行调整:

(1) 土的可松性, 理论上挖填平衡, 考虑可松性后, 填土会有多余。可以考虑相应地提高设计标高。

(2) 边坡填挖土方量不等 (特别是坡度变化大时), 需考虑设计标高增减。

(3) 设计标高以下的各种挖方工程, 需考虑相应地提高设计标高; 设计标高以上的各种填方工程, 需考虑降低设计标高。

(4) 部分挖方就近弃土于场外或将部分填方就近取土于场外而引起挖填土的变化, 需增减设计标高。

(5) 场地泄水坡度的影响。场地均处于同一平面不利于排水, 因此, 场地设计一定的坡度是必要的, 下面介绍考虑泄水坡度对设计标高的影响后, 场地内各方格角点的实际施工所用的设计标高的变化情况。主要介绍单向与双向泄水坡度两种情况。

单向泄水时, 按照场地内土方挖填平衡, 用式 (2.5) 计算出初步设计标高 H_0 作为场地中心线的标高 (图 2.2), 场地内任意一点的设计标高则为

$$H_i = H_0 \pm l \cdot i \quad (2.6)$$

式中 H_0 ——场内任意一点的初步设计标高, m;

l ——该点至标高轴线的距离, m;

i ——场地泄水坡度 (不小于 2‰)。

双向泄水时, 其原理与前相同, 如图 2.3 所示。 H_0 为场地中心点标高, 场地内任意一点的设计标高为

$$H_i = H_0 \pm l_x \cdot i_x + l_y \cdot i_y \quad (2.7)$$

式中 l_x 、 l_y ——该点在 $x-x$ 、 $y-y$ 方向距场地中心线的距离, m;

i_x 、 i_y ——该点于 $x-x$ 、 $y-y$ 方向的泄水坡度。

图 2.2 和图 2.3 中, H_0-H_0 为场地垂直泄水方向中心线, $x-x$ 、 $y-y$ 为平整场地