



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# 地下工程施工与管理

(第2版)

杨其新 王明年 编



西南交通大学出版社

[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校土木工程专业系列教材——地下工程

# 地下工程施工与管理

(第2版)

杨其新 王明年 编

西南交通大学出版社

·成都·

## 内 容 简 介

本书按普通高等教育“十一五”国家级规划教材要求编写，共分为4篇21章。本书全面地介绍了地下工程施工技术和施工组织管理的系统知识；根据当前地下工程施工技术的新发展，增加了部分新内容；书中围绕地下工程的建设，着重介绍了目前广泛使用的地下工程施工方法和技术，此外，还介绍了近年来越来越被重视的工程科学管理技术。

本书是普通高等院校土木工程大类地下工程专业方向本科生、研究生的教科书，也可供地下工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

地下工程施工与管理 / 杨其新, 王明年编. —2版  
—成都: 西南交通大学出版社, 2009.10  
(高等学校土木工程专业系列教材. 地下工程)  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5643-0448-5

I. ①地… II. ①杨…②王… III. ①地下工程—工程施工—施工管理—高等学校—教材 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第169583号

---

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校土木工程专业系列教材——地下工程

### 地下工程施工与管理 (第2版)

杨其新 王明年 编

\*

责任编辑 张 波

特邀编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 29

字数: 724千字 印数: 4 001—7 000册

2005年9月第1版 2009年10月第2版 2009年10月第3次印刷

ISBN 978-7-5643-0448-5

定价: 46.00元

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

《地下工程施工与管理》是土木工程专业地下工程专业方向本科生的教材，自2005年10月第1版问世以来，多个高校将其作为专业课教材使用，已有部分工程建设部门将其作为培训教材和设计、施工、管理部门技术人员的参考书。2008年5月，该书被教育部收录为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，现面向全国普通高校地下工程专业，按要求进行修编，是为第2版。

根据要求，教材的修编，既要全面系统、专业性强、由浅入深，又要体现专业的特点，即传统技术和新技术相结合，基本方法和特殊方法相结合，工程经验和理论相结合。本教材的修编，吸纳了国内外最新科技成果和新技术，扩充和更新了原教材的内容，对原内容中的一些欠妥错误之处也作了一定修正。

修编的内容主要有TBM施工技术、盾构施工技术、浅埋暗挖技术、钻爆法施工技术、明挖施工技术、隧道信息化施工技术，以及隧道施工组织管理与检测技术等。

增加的内容主要有复杂条件下的隧道施工技术（海底隧道、瓦斯隧道、黄土隧道、岩溶隧道、高速铁路隧道）、隧道洞口施工技术、病害隧道加固修复技术等。

修订比例约为40%。

本书由杨其新教授编写绪论，第1篇，第2篇的第12、13、14章，第3篇的第15章，第4篇的第19、20章及附录；王明年教授编写第2篇的第5、7、8、9章和第11章的11.1、11.2、11.3、11.7节，第3篇的第16、17、18章。张志强教授编写了第2篇的第10章和第11章中的11.4、11.5、11.6节；王志杰教授编写了第2篇的第6章，第4篇的第21章。

本书由杨其新主编，王明年为副主编。全书由杨其新统稿。

由于编者学识水平有限，疏漏不足之处在所难免，恳请各位专家、同行和读者提出宝贵的批评和修改意见，以便本书再次印刷时补充完善。

编者

2009年4月

# 第 1 版前言

随着我国经济建设的迅速发展，各类地下工程的建设越来越多，规模也越来越大。近年来地下工程施工技术有了很大的发展。本教材的编写，是为了扩充和更新地下工程施工教材的内容，力求反映近年来地下工程施工中涌现出的各种新科技成果和新技术，同时也是满足土木工程类地下工程专业方向的教学需要，为学生提供一本较系统、完整和实用的教科书。

在编写本书的过程中，编者参照了我国当前有关的地下工程施工技术标准、规范和规程，全面吸取了有益的施工和管理经验，力求全面和系统地介绍地下工程施工的基础理论、施工技术、施工工艺和方法。同时，力求各章节安排合理、叙述简练、条理清晰，有利于教学；在选择内容时，兼顾了设计、施工和管理三者的关系，做到专业工程方向的系统性。

本书作为地下工程专业方向本科生的教材，可供地下工程和岩土工程等专业工程技术人员参考。本书由杨其新编写绪论，第 1 篇，第 2 篇的第 10、11、12 章，第 3 篇的第 13 章，第 4 篇的第 17、18、20 章；王明年编写第 2 篇的第 5、6、7、8、9 章，第 3 篇的第 14、15、16 章，第 4 篇的第 19 章。虽然编者尽了很大努力，但由于学识水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2005 年 7 月

# 目 录

绪 论 .....	1
-----------	---

## 第 1 篇 地下工程明挖法

第 1 章 基坑开挖 .....	5
1.1 敞口放坡明挖法 .....	5
1.2 基坑支护开挖法概述 .....	10
1.3 基坑支挡开挖 .....	12
1.4 土锚支护明挖法 .....	19
1.5 冻结明挖法 .....	20
思考题 .....	22
第 2 章 地下连续墙法 .....	23
2.1 概 述 .....	23
2.2 地下连续墙设计和计算的主要内容 .....	25
2.3 常用工法概要 .....	27
2.4 地下连续墙的施工 .....	30
2.5 地下连续墙接头施工 .....	38
思考题 .....	41
第 3 章 盖挖施工法 .....	42
3.1 盖挖顺作法 .....	42
3.2 盖挖逆作法 .....	43
思考题 .....	45
第 4 章 沉管隧道施工 .....	46
4.1 概 述 .....	46
4.2 沉管隧道调查规划 .....	49
4.3 沉管隧道设计简介 .....	53
4.4 沉管隧道施工过程 .....	65
4.5 附属设备 .....	71
思考题 .....	75

## 第 2 篇 地下工程暗挖法

第 5 章 隧道施工方法 .....	76
5.1 隧道分部开挖方案 .....	76
5.2 隧道分部开挖方法比选 .....	80
思考题 .....	80

<b>第 6 章 地下工程信息化施工技术</b> .....	81
6.1 隧道超前地质预报技术 .....	81
6.2 隧道工程信息化监测技术 .....	91
思考题 .....	106
<b>第 7 章 隧道钻爆法施工技术</b> .....	107
7.1 隧道爆破的基本概念 .....	107
7.2 隧道爆破器材及起爆方法 .....	108
7.3 隧道掏槽爆破技术 .....	116
7.4 隧道光面爆破技术 .....	128
7.5 隧道爆破设计 .....	135
思考题 .....	154
<b>第 8 章 隧道支护技术</b> .....	155
8.1 锚杆施工 .....	155
8.2 喷射混凝土施工 .....	160
8.3 钢拱架制作与安设施工 .....	170
8.4 二次衬砌施工 .....	171
8.5 隧道预加固工法 .....	174
思考题 .....	183
<b>第 9 章 隧道邻近建筑物施工技术</b> .....	184
9.1 隧道邻近建筑物施工影响分析 .....	184
9.2 隧道邻近建筑物施工对策 .....	190
思考题 .....	191
<b>第 10 章 连拱隧道与小净距隧道施工技术</b> .....	192
10.1 连拱隧道施工技术 .....	192
10.2 小净距隧道施工技术 .....	200
思考题 .....	205
<b>第 11 章 复杂条件下的隧道施工技术</b> .....	206
11.1 大断面海底隧道施工技术 .....	206
11.2 大断面黄土隧道施工技术 .....	215
11.3 高速铁路隧道施工技术 .....	218
11.4 瓦斯隧道施工技术 .....	224
11.5 岩溶隧道施工技术 .....	235
11.6 浅埋暗挖隧道施工技术 .....	244
11.7 隧道洞口施工技术 .....	250
思考题 .....	254

<b>第 12 章 盾构法施工</b> .....	255
12.1 概 述 .....	255
12.2 盾构机的种类 .....	256
12.3 盾构机机型的选择 .....	261
12.4 盾构隧道衬砌的基本类型 .....	264
12.5 盾构法施工过程 .....	266
12.6 特殊盾构应用简介 .....	273
思考题 .....	284
<b>第 13 章 掘进机 (TBM) 施工</b> .....	285
13.1 掘进机 (TBM) 法概述 .....	285
13.2 隧道掘进机的基本构成和性能 .....	288
13.3 采用隧道掘进机法的基本条件 .....	292
13.4 隧道掘进机法的附属设施 .....	296
13.5 隧道掘进机法的支护技术 .....	300
13.6 采用隧道掘进机法的辅助工法 .....	301
思考题 .....	305
<b>第 14 章 顶管法施工</b> .....	306
14.1 概 述 .....	306
14.2 顶管施工的基本原理 .....	307
14.3 顶管施工的分类及特点 .....	311
14.4 常用顶管施工技术 .....	312
思考题 .....	319
<b>第 3 篇 地下工程施工辅助作业</b>	
<b>第 15 章 地下工程防排水施工作业</b> .....	320
15.1 概 述 .....	320
15.2 地下水位及地下工程防水原则 .....	322
15.3 地下工程防水材料 .....	323
15.4 地下工程排水 .....	325
15.5 地下工程刚性防水 .....	326
15.6 地下工程柔性防水 .....	333
15.7 特殊地下工程防水 .....	339
思考题 .....	346
<b>第 16 章 地下工程施工中的风水电作业</b> .....	347
16.1 压缩空气供应 .....	347
16.2 隧道施工供水 .....	350



16.3 隧道施工供电及照明	353
思考题	358
<b>第 17 章 地下工程施工通风与防尘作业</b>	<b>359</b>
17.1 隧道施工通风	359
17.2 隧道施工防尘	367
思考题	368
<b>第 18 章 地下工程出渣运输作业</b>	<b>369</b>
18.1 装 渣	369
18.2 运 输	371
18.3 卸 渣	376
思考题	376
<b>第 4 篇 地下工程施工组织和管理</b>	
<b>第 19 章 地下工程施工组织</b>	<b>377</b>
19.1 施工准备	377
19.2 施工组织设计	379
19.3 施工方案	381
19.4 施工进度计划	383
19.5 施工现场平面图设计	388
思考题	391
<b>第 20 章 地下工程施工管理</b>	<b>392</b>
20.1 质量管理	392
20.2 合同管理和风险管理	399
20.3 施工管理	401
思考题	407
<b>第 21 章 地下工程衬砌结构质量检测</b>	<b>408</b>
21.1 地质雷达检测地下工程衬砌质量的原理	408
21.2 无损电测喷射混凝土层厚度的方法	415
21.3 衬砌混凝土强度的检测	416
21.4 锚杆长度和砂浆饱满度检测	417
思考题	419
<b>附录 某地下工程（隧道）施工组织设计（例）</b>	<b>420</b>
<b>参考文献</b>	<b>454</b>

# 绪 论

## 一、地下工程施工技术简述

地下工程施工技术是以在地层中构筑建筑物为目的，研究解决地下工程修建中的技术方案和措施，地下工程在各种地质条件下的施工方法、手段、工艺和工程实施中的技术、计划、质量、经济和安全措施。所包含的内容主要有地下工程的基本作业、辅助作业、环境控制和施工管理等（图 1）。

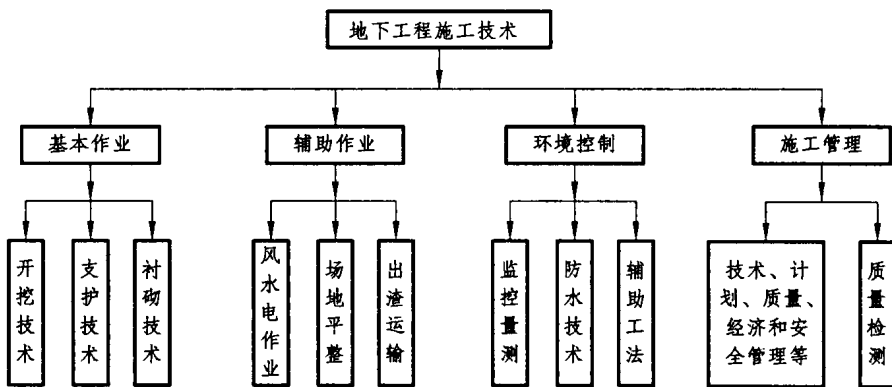


图 1 地下工程施工技术

地下工程基本作业主要包括开挖、支护和衬砌三大技术。在开挖技术中十分重要的是开挖方法的选择，选择的主要考虑因素一般有工程地质和水文地质条件、地形和地貌、埋置深度、结构形状和规模、使用功能和环境条件、施工队伍的技术水平和施工机具、交通条件和工期要求、经济和技术等，通过综合研究来确定。目前我国地下工程使用的开挖方法可分为两大类（表 1）。

表 1 地下工程开挖方法

地下工程 开挖方法	{	明挖法	<ul style="list-style-type: none"> <li>基坑敞口开挖</li> <li>基坑支挡开挖</li> <li>地下连续墙</li> <li>盖挖法</li> <li>沉管法</li> </ul>
		暗挖法	<ul style="list-style-type: none"> <li>矿山法（钻爆法）</li> <li>掘进机（TBM）法</li> <li>盾构法</li> <li>顶进法</li> </ul>

支护技术是为了地下工程开挖的安全，一般分为临时支护和永久支护两类；形式上有木支撑、钢支撑、格栅支撑、锚杆、喷混凝土和它们的组合等。

衬砌技术有现浇混凝土和预制混凝土两类。

地下工程辅助作业是配合基本作业必需的环节，包括风水电的设计、安装和供给，施工场地的规划和布置，出渣运输的计划和设备的配置等。

环境监控主要研究解决地下工程施工过程中的安全和对周围环境的影响，如开挖洞室的位移过大引起围岩塌方，支护结构位移过大引起结构失稳或者侵限，地面沉陷过大对环境的影响，地下水的控制等；采用的手段主要是对施工的过程进行量测监控，发现异常情况，及时采取加固措施（辅助施工手段）和更改施工方法。

施工管理是通过有效的管理来保证工程的质量和工期，应用科学合理和符合地下工程施工特点的方法，规划组织施工设计，对各施工中的各环节进行科学的技术、计划、质量、经济和安全的管理，达到高质量、高效益的目的。

## 二、地下工程施工技术的发展

地下工程施工技术的发展是和国家经济发展相关联的。近年来随着我国社会经济快速发展，城市化进程加快，地面交通增长十分迅猛，而修建水平满足不了发展的需要，造成了城市用地紧张，各种交通设施超负荷运转，交通事故、交通阻塞和交通公害等成为一大社会问题，阻碍了国家和地区经济的发展。因此，开发城市地下空间，规划和修建高水平的交通隧道（铁路隧道、公路隧道、地下铁道、越江隧道等），是目前急需研究的课题之一。

我国是拥有地下工程数量最多的国家，具有悠久的历史，在古代人们挖掘窑洞来居住，是最早的地下工程。具有一定工程规模的地下工程，根据考古研究发现，应是长沙的楚墓、洛阳的汉墓、明朝的定陵等；第一座用于交通的铁路隧道是 1887—1889 年修建在我国台湾的从基隆到台南的窄轨（1 067 mm）铁路线上的长 261 m 的师球岭隧道，而 1907 年我国杰出的工程师詹天佑先生，主持修建了第一座由中国人自己设计和施工的现代隧道——八达岭铁路隧道，其长 1 091 m，目前该隧道还在运营。1949 年前，由于我国经济和技术落后，修建的地下工程数量很少；中华人民共和国成立后，地下工程建设有了较大的发展，尤其是改革开放以来，伴随我国经济的腾飞，地下工程施工技术有了飞跃，地下工程的建设得到大规模的发展。据有关统计数据，至 2005 年底，我国共修建铁路隧道 7 538 座，总延长达 4 314 km，公路隧道 1 780 余座，总延长达 800 km；北京、上海、天津、广州、南京、深圳相继建成了超过 100 km 的地下铁道，目前还有超过 25 个城市拟建设地下铁道；近年来采用沉管法修建的穿越珠江、甬江、长江的隧道，极大地提高了我国修建水下隧道的技术水平。目前我国已具有修建各种地质条件下的地下工程的能力，在许多方面已步入世界先进水平。

我国人口多，幅员辽阔，是一个多山的发展中国家，城市化交通处于发展阶段，城市地下空间开发刚刚起步，可以预见，地下工程的建设必将有更大的发展。

地下工程施工技术水平的进步主要体现在：

修建长大交通隧道方面，近年来修建的交通隧道越来越长，跨度越来越大，如乌鞘岭铁路隧道长 21 km，秦岭终南山公路隧道长 18.1 km，正在修建的关角铁路隧道长达 32 km，修建超过 20 m 的大跨隧道技术已十分成熟。我国已掌握了修建长大隧道的成套技术。

在不良地质条件下修建隧道方面，我国已经积累了丰富的工程经验和科技成果，取得了主动权。如在青藏铁路的修建中，解决了在海拔 4 000 m，- 40 °C 的高寒地区修建隧道的问题；在渝怀铁路的修建中，克服了大涌水的因素，修建了圆梁山隧道；1996 年建成的南昆铁路家竹箐隧道，克服了高瓦斯、高地应力、大涌水三位一体的困难，填补了我国在高瓦斯、高地应力隧道施工技术方面的空白。这些充分说明我国能够在各种不良地质条件下修建隧道。

地下工程开挖技术方面，在城市明挖地下工程修建中，形成了适应各种条件下的基坑敞口开挖、支挡开挖、地下连续墙、盖挖法的施工技术体系；暗挖钻孔技术由人力持钻钻进到支腿架钻，进而采用风动和液压的钻孔台车。近年来，非爆破机械开挖技术在我国得到长足的发展，隧道掘进机（TBM）和盾构机得到广泛的应用，如北京、上海、南京、广州和深圳地铁就使用盾构修建部分区间隧道，水利建设更是大量使用盾构修建输水隧道，秦岭双线铁路隧道采用隧道掘进机修建其中一条隧道。

支护和衬砌技术方面，从木支撑、钢支撑发展到锚杆和喷混凝土、格栅支护等技术的广泛应用；修建衬砌由砖石垒砌，到混凝土就地模注、混凝土泵挤送、锚喷柔性衬砌、喷射钢纤维混凝土衬砌等。

另外，以监控量测信息反馈指导施工，在我国地下工程施工中得到广泛的应用。

地下工程施工技术的发展，体现了地下建筑不占地面空间、抗震、隐蔽等优越性，扩大了地下建筑的应用范围，充分利用地下空间的途径已为各界人士所重视。许多地下工厂、地下仓库、地下核能设施、地下休闲设施、地下体育馆、地下废物处理设施、地下街、地下停车场、地下养殖场……相继出现在城市的规划和建设中。可以说，地下工程已经渗透到了国民经济建设的各个领域，成为人们活动的又一新空间。

我国地下工程施工技术的进步为大规模建设地下工程奠定了基础，取得了很大的成就。但是同国外先进技术和管理水平相比，我们还有许多需要学习的地方，许多问题有待研究解决，如怎样获取准确的地质勘察信息、施工中的超前地质预报、隧道施工的机械化配套技术、非爆破掘进机械的国产化、高强度衬砌技术、预制拼装衬砌研究应用、现代化施工管理技术等，都是需要我们认真解决的问题。

# 第 1 篇 地下工程明挖法

明挖法是从地表面向下开挖，在预定位置修筑结构物方法的总称。它是一种用垂直开挖方式修建隧道的方法（对应于水平方向掘进隧道而言）。在城市地下工程中，特别是在浅埋的地下铁道工程中，明挖法获得了广泛的应用；此外，在水底隧道两端河岸段、洞门入口附近等常采用此法修建。

一般在地形平坦，埋深小于 30 m 时，采用明挖法具有很好的实用价值；明挖法适应性强，适用于任何岩（土）体，可以修建各种形状的结构物；明挖法可以为地下结构的施工创造最大限度的工作面，各项工序可以全面铺开，进行平行流水作业，因而施工速度快；明挖法施工技术比较简单，便于操作，工程质量有保证。在地面交通和环境条件允许的地方，应优先选择明挖法施工。

近年来基坑开挖和支护技术随着地下空间的利用有了很大的发展。早期基坑开挖较浅，基坑支护多以放坡开挖或悬臂式支护为主；随着基坑开挖的逐渐加深，这时基坑的支护再以放坡开挖或悬臂式支护已经不再经济并难以满足要求，所以多以地下连续墙支护为主，后来又出现了土钉和土钉墙加预应力锚索综合技术。随着深基坑开挖工程的逐渐增多，深基坑支护技术有了很大发展，逆作法就是一项近几年发展起来的新兴的基坑支护技术。

随着埋深的增加，明挖法的工程费用、工期都将增大。同时，明挖法对周围环境的影响大，譬如对地面交通、商业活动、居民生活的影响等，其地下管线的拆迁量比暗挖法大；当地下水位较高时，降水和地层加固费用非常高。因此在采用明挖法时，应充分考虑各种施工方法的特征，选择最能发挥其特长的施工方法。

明挖法施工重点要解决的问题有：基坑的稳定性问题及施工工序、维护结构的选择以及降水问题。明挖法设计中应注意的若干问题如下所述。

## 1. 隧道设置深度

采用明挖法修筑隧道，主要的问题是隧道设置深度。一般说，隧道应设置在尽可能良好的地层中，并进行充分地调查，从技术、经济、运营、地层等方面，慎重研究设置深度，一般情况应  $< 20\text{ m}$ ，以确保隧道建成后的功能和安全性。

通常，根据地质状态，隧道建成后的地层有可能发生位移时，要充分研究其影响，并在设计上采用相应的措施。特别是在有图 A

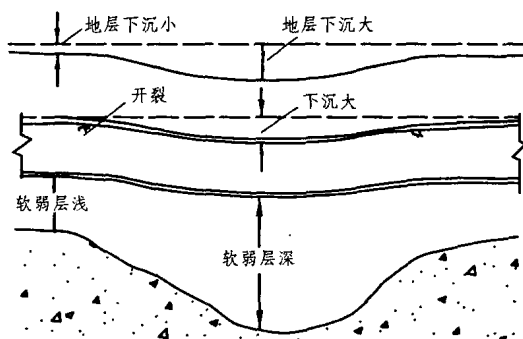


图 A 地层下沉和隧道变异

所示的软弱地层厚度变化大的情况，可能沿纵向产生地层的不均匀下沉，而造成结构纵向的异常变形。此外，在饱和的松散土砂中时，地震会诱发砂层液化，从而使结构物受到较大的应力等。这些问题在隧道规划时必须给以足够的关注。

## 2. 隧道的结构形式

明挖法隧道采用的结构形式是多种多样的，大体可归结为直墙拱及单跨、双跨或多跨矩形闭合框架等。但一般都是箱形的、纵向连接的结构。中间构件多采用柱结构或墙结构。箱形结构的侧墙多采用连续墙作为主体结构的一部分。箱形结构的断面形状，视隧道的使用目的不同，有各种各样的形式，如图 B 所示。

隧道纵向结构都是连续的，一般在良好的地层中，可以不考虑隧道纵向的影响，但在荷载状态及地层状态有显著变化的情况和隧道断面有显著变化的情况，要充分研究这种情况对隧道稳定性的影响。

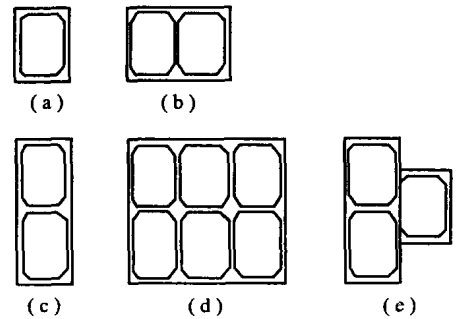


图 B 明挖隧道的断面形状

## 3. 隧道结构的防水及抗震

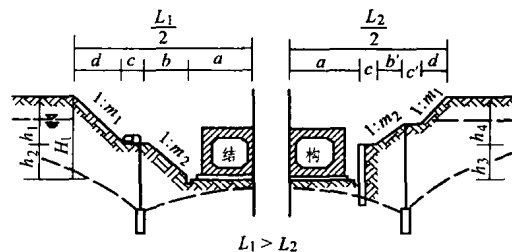
明挖隧道一般都是修筑在地下水位以下的，因此隧道结构要具有良好的防水功能。为此，结构应尽量单纯化，以提高防水施工的可靠性。

明挖隧道与地面结构不同，隧道与周围地层的相互作用是非常复杂的，因此，要特别注意地震时隧道的动态。在设计时，要研究地震对隧道动态的影响，同时还要研究隧道受震灾后的社会的、经济的影响。

# 第 1 章 基坑开挖

## 1.1 敞口放坡明挖法

敞口放坡明挖法也称做敞口基坑法，包括全放坡开挖和半放坡开挖（图 1.1）2 种。全放



(a) 全放坡开挖基坑断面 (b) 半放坡开挖基坑断面

图 1.1 放坡开挖基坑断面

坡开挖是指基坑采取放坡开挖不进行坑墙支护，根据地质条件采用相应的边坡坡度，分段开挖至所需位置进行结构施工，完成后进行回填，将地面恢复到原来状态。半放坡开挖是在基坑底部设置一定高度的悬臂式钢桩加强土壁稳定。其槽底宽度是根据地下结构宽度的需要并考虑施工操作空间确定的。为了保持边坡稳定，常常需要沿基坑两侧设井点降水。

### 1.1.1 适用条件

在没有建筑物的空旷地段，以及便于采用高效率的挖土机及翻斗卡车的情况下，常采用全放坡或半放坡开挖，不加支撑的基坑形式。

采用此种开挖方式工程造价较低，与一般的打桩施工开挖方法相比，因不架设路面覆盖板，可使工费减少，工期缩短。但占地宽，拆迁量、土方挖填量较大，工程区域的交通被中断，在道路狭窄和交通繁忙的地区是不可行的。在市中心地区采用本方式施工的不多。地质情况的好坏、渗水量的多少以及开挖深度等条件，是这种方式能否采用的重要因素。敞口基坑法施工中，基坑边坡防护和开挖对于附近建筑物、地下埋设物的影响在施工管理中应充分注意。

### 1.1.2 设计与施工

边坡设计需要确定两个基本参数：边坡开挖深度和坡度。由于基坑的边坡稳定主要是通过边坡土质的抗剪强度来实现的，所以边坡开挖的深度以及坡度都受到土体抗剪强度的限制。

#### 1. 边坡失稳的破坏形式

- (1) 沿近似圆弧的滑动面转动，这种破坏常常发生在较为均质的黏性土层；
- (2) 沿近乎平面的滑移，这种破坏常常发生在无黏性土层。

#### 2. 影响基坑边坡稳定的因素

基坑边坡坡度是直接影响基坑稳定的重要因素。当基坑边坡土体中的剪应力大于土体的抗剪强度时，边坡就会失稳坍塌。另外施工不当也会造成边坡失稳，表现为：

- (1) 没有按照设计坡度进行边坡开挖；
- (2) 基坑坡顶堆载过大；
- (3) 基坑降排水措施不利，地下水未降至基底以下，而地面雨水、基坑周围地下给排水管线漏水渗流至基坑边坡的土层中，使土体湿化，土体自重加大，增加土体中的剪应力；
- (4) 基坑开挖后暴露时间过长，经风化而使土体变松散；
- (5) 基坑开挖过程中，未及时刷坡，甚至挖反坡，使土体失去稳定性。

#### 3. 基坑边坡稳定性的确定方法

确定基坑边坡稳定性有 3 种方法，即算法、图解法和查表法。

(1) 算法。通过计算公式确定边坡开挖深度和坡度。如图 1.2 所示，假定边坡破裂面为通过坡脚的一个平面，滑动面上部土体为 ABC，则其重力线密度为

$$G = \frac{\gamma h^2}{2} \cdot \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin \theta \sin \varphi} \quad (1.1)$$

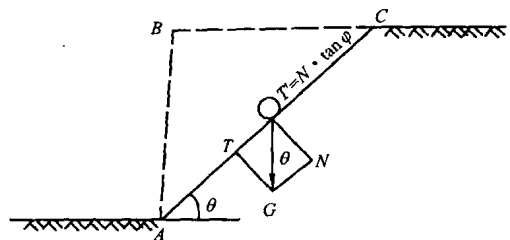


图 1.2 计算法图

当土体处于极限平衡状态时，边坡极限高度为

$$h = \frac{2C \sin \theta \cos \varphi}{\gamma \sin^2 \left( \frac{\theta - \varphi}{2} \right)} \quad (1.2)$$

式中  $C$  —— 土体黏结力 ( $\text{kN/m}^2$ );  
 $\theta$  —— 边坡坡度角 ( $^\circ$ );  
 $\varphi$  —— 土的内摩擦角 ( $^\circ$ );  
 $\gamma$  —— 土体重度 ( $\text{kN/m}^3$ ).

土体  $C$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  值和边坡极限高度 (基坑开挖深度)  $h$  为已知, 则基坑边坡的坡度角即可求出。并由公式 (1.1), (1.2) 可知:

① 当  $\theta = \varphi$ ,  $C=0$  时, 则边坡极限高度不受限制, 且边坡处于平衡状态。

② 当  $\theta > \varphi$  时, 则边坡为陡坡, 其  $C$  值越大, 则边坡极限高度  $h$  越高; 若  $C=0$ , 则  $h=0$ , 即非黏性土时, 边坡任何高度都是不稳定的。

③ 坡度角  $\theta$  越大, 坡高  $h$  越小; 反之, 坡度角  $\theta$  越小, 则坡高  $h$  越大。

(2) 图解法。对于基坑边坡坡度不变, 坡顶为一平面, 且土质均匀时, 其稳定边坡角或极限坡高, 可根据图 1.3 来求得, 该图是通过计算资料综合整理而得到的。

图中横坐标为稳定边坡角  $\theta$ , 纵坐标表示稳定系数  $N_s = \gamma H_c / C$ 。假定土内聚力不随深度变化, 对于一个给定的土的内摩擦角  $\varphi$  值, 则边坡的临界高度及稳定安全高度, 可由下式计算

$$\left. \begin{aligned} H_c &= N_s \frac{C}{\gamma} \\ H &= N_s \frac{C}{K\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中  $H_c$  —— 边坡的临界高度 (即稳定高度) (m);  
 $N_s$  —— 稳定系数, 由图 1.3 查出;  
 $C$  —— 土体黏结力 ( $\text{kN/m}^2$ );  
 $\gamma$  —— 土体重度 ( $\text{kN/m}^3$ );  
 $H$  —— 边坡的稳定安全高度 (m);  
 $K$  —— 稳定安全系数, 一般取 1.1~1.5。

上述两式, 当已知  $\theta$  或  $H$  及土体的  $C$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  时, 可求出稳定安全的坡高  $H$  (或  $\theta$ , 或  $K$  值)。

(3) 查表法。在城市地下工程建设的明挖施工中, 一般在地质条件良好、土质较均匀, 而地下水位低或通过降水将地下水位维持在基底面以下时, 常采用查表法确定基坑边坡的坡度。根据地基基础设计规范并结合城市地下工程施工经验给出表 1.1、表 1.2, 施工时可作为参考。

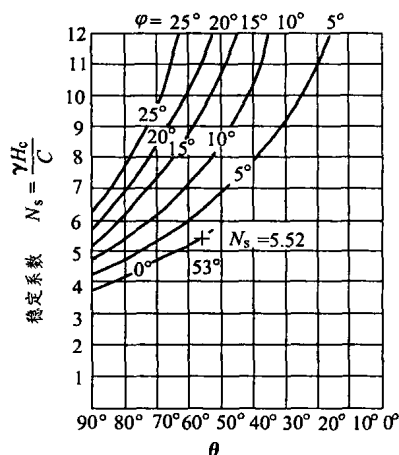


图 1.3 基坑边坡图解曲线



表 1.1 岩石基坑边坡坡度

岩石类别	风化程度	坡度值 (高宽比)	
		8 m 以内	8 ~ 10 m
硬质岩石	微风化	1 : (0.1 ~ 0.2)	1 : (0.2 ~ 0.35)
	中等风化	1 : (0.2 ~ 0.35)	1 : (0.35 ~ 0.5)
	强风化	1 : (0.35 ~ 0.5)	1 : (0.5 ~ 0.75)
软质岩石	微风化	1 : (0.35 ~ 0.5)	1 : (0.5 ~ 0.75)
	中等风化	1 : (0.5 ~ 0.75)	1 : (0.75 ~ 1.00)
	强风化	1 : (0.75 ~ 1.00)	1 : (1.00 ~ 1.25)

表 1.2 土质基坑边坡坡度

土的种类	密实度或状态	坡度值 (高宽比)		
		5 m	5 ~ 10 m	10 ~ 15 m
碎石土	密实	1 : (0.35 ~ 0.5)	1 : (0.5 ~ 0.75)	1 : (0.75 ~ 1.0)
	中密	1 : (0.5 ~ 0.75)	1 : (0.75 ~ 1.0)	1 : (1.0 ~ 1.25)
	稍密	1 : (0.75 ~ 1.0)	1 : (1.0 ~ 1.25)	1 : (1.25 ~ 1.5)
黏性土	坚硬	1 : (0.75 ~ 1.0)	1 : (1.0 ~ 1.25)	1 : (1.25 ~ 1.5)
	硬塑	1 : (1.0 ~ 1.25)	1 : (1.25 ~ 1.5)	1 : (1.5 ~ 1.75)

#### 4. 基坑开挖注意事项

由于种种原因,常常出现施工工况和原设计条件不相符合的情况,或者设计中难以考虑周全的施工情况,此时必须对基坑边坡重新验算。如果安全度不足,应采取相应的补救措施。所以在施工过程中应注意:

- (1) 根据土层的物理力学性质确定基坑边坡坡度,并于不同土层处做成折线形或留置台阶;
- (2) 不要在已开挖的基坑边坡的影响范围内进行动力打入或静力压入的施工活动,如必须打桩,应对边坡削坡和减载,打桩采用重锤低击、间隔跳打;
- (3) 不要在基坑边坡堆加过重荷载,若需在坡顶堆载或行驶车辆时,必须对边坡稳定进行核算,控制堆载指标;
- (4) 施工组织设计应有利于维持基坑边坡稳定,如土方出土宜从已开挖部分向未开挖方向后退,不宜沿已开挖边坡顶部出土,应采用由上至下的开挖顺序,不得先切除坡脚;
- (5) 注意地表水的合理排放,防止地表水流入基坑或渗入边坡;
- (6) 采用井点等排水措施,降低地下水位;
- (7) 注意现场观测,发现边坡失稳先兆(如产生裂纹时)立即停工,并采取有效措施,提高施工边坡的稳定性,待符合安全度要求时方可继续施工;
- (8) 基坑开挖过程中,随挖随刷边坡,不得挖反坡;
- (9) 暴露时间在 1 年以上的基坑,一般可采取护坡措施。