

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 高 锐
责任编辑 胡思佳
封面设计 YUKI工作室/赵鹤

高等职业教育土建系列教材

隧道施工技术



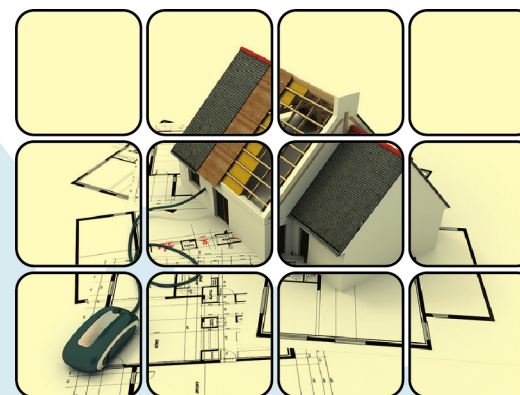
上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

高等职业教育土建系列教材



隧道施工技术

主编 赵国刚 袁春花



隧道施工技术

SUIDAO SHIGONG JISHU

免费提供

精品教学资料包

服务热线: 400-615-1233
www.huatengzy.com



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-13461-5



9 787313 134615

定价: 49.00元



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

高等职业教育土建系列教材



隧道施工技术

主 编 赵国刚 袁春花



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书按照最新公路隧道设计和施工规范的要求编写,共分为 13 个模块,包括围岩分级与围岩压力、隧道构造、隧道施工方法、隧道开挖、支护、超前支护与预加固围岩、监控量测、防排水、辅助坑道、施工辅助作业、超前地质预报、不良地质和特殊岩土地段施工、其他隧道施工方法。

本书既可作为高职高专院校道路桥梁工程技术、高等级公路维护与管理、地下工程与隧道工程技术、城市轨道交通工程技术等专业的教材,也可供相关领域的工程技术管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道施工技术/赵国刚,袁春花主编. —上海:
上海交通大学出版社,2015(2023 重印)

ISBN 978-7-313-13461-5

I. ①隧… II. ①赵… ②袁… III. ①隧道施工—施工技术—高等职业教育—教材 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 166929 号

隧道施工技术

SUIDAO SHIGONG JISHU

主 编:赵国刚 袁春花

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:222 千字

版 次:2015 年 7 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-13461-5

定 价:49.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

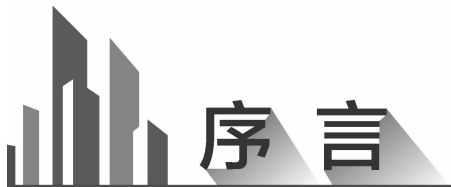
印 张:19.75

印 次:2023 年 7 月第 7 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-8836866



序言

高职高专教育作为我国高等教育的重要组成部分,承担着培养高素质技能型人才的重任。近年来,在国家和社会的支持下,我国的高职高专教育取得了显著成就。随着国民经济的飞速发展,城市化进程不断加快,建筑业蓬勃发展,高技能型建筑人才的缺乏越来越成为影响我国经济进一步快速健康发展的瓶颈。

高质量的教材是培养高素质人才的保证。要加快高职高专教育改革的步伐,全面提高人才培养质量,就必须对课程体系和教学模式等进行探索。在这个过程中,教材的建设与改革无疑起着至关重要的基础性作用。高职高专教材作为体现高职高专教育特色的知识载体和教学的基本工具,直接关系到高职高专教育能否为社会培养并输送符合要求的高技能型人才。

为了推动高职高专土建类专业教材的建设,我们精心组织了一批具有丰富教学经验的专家、教授和企业人员成立了编审委员会。编审委员会依据教育部制定的《高等职业学校专业教学标准(试行)》,调研了多所具有代表性的高等职业技术学院和高等专科学校,广泛而深入地了解了土建类专业人才培养方案,系统地研究了课程的体系结构,同时充分汲取各院校在探索培养应用型人才方面取得的成功经验,并在教材出版的各个环节设置专业的审定人员进行严格审查。

本套教材具有以下特色:

(1) 目标定位准确。教学内容充分对接施工员、质量员、安全员、资料员、材料员、测量员、造价员等初始职业岗位,兼顾注册建造师、监理工程师等发展岗位,实现教学内容与工作过程的统一。

(2) 注重能力培养。以建筑业人才需求为导向,以培养实用为主、技能为本的应用型人才为出发点,构建职业能力训练模块,突出实训内容,加强学生的实践能力与操作技能。

(3) 校企合作开发。建筑企业工程技术人员参与教材编写,将实际工作中所需的技能与知识引入教材,深度参与教学环节,使人才培养方案更加准确有效。

(4) 配套资源丰富。免费提供教学资料包,包含教学课件、教学检测、教学资源推荐和课后习题答案等教学资料,方便教师授课和学生自学使用。

随着教改的不断深入,高职高专院校结合本地实际所展现出的教改成果也各不相同,与之对应的教材也各有特色。希望有更多经验丰富的教师加入我们的行列当中,编写出更多符合高职高专教学需要的高质量教材。

编审委员会



前言

当下，无论是在公路隧道方面还是在铁路隧道方面，我国都是世界上建成隧道数量最多、在建隧道规模最大的国家。我国虽然是“隧道大国”，却不是“隧道强国”，主要体现在隧道设备施工自动化程度低、效率低，施工中对环保不够重视，隧道常见病害多等。例如，隧道初期支护常见质量通病主要有初喷工序缺失；初期支护与围岩不密贴或存在空洞；喷射混凝土强度、厚度不足，表面平整度差；复喷不及时；锚杆（管）制作、安装不规范；钢筋网安装不规范；钢架制作、安装不规范等。在这种情况下，国家迫切需要大量操作能力强的技术技能型人才来改善局面，从而推动我国的经济建设，体现党的二十大的经济发展理念。

本书按照最新隧道设计和施工规范要求编写。全书以公路山岭隧道施工过程为主，在介绍了隧道的基础知识后讲解了隧道的施工方法，把隧道施工技术按新奥法分为隧道开挖、支护、监控量测三部分，把超前支护与预加固围岩、辅助坑道、施工辅助作业及超前地质预报等非新奥法的内容或工作单列为不同模块，这样可以使之与施工规范很好地结合，便于初学者了解隧道施工的过程。不良地质和特殊岩土地段施工是施工的特例，故将其单列为一个模块。另外，将其他隧道施工方法作为补充内容单列为一个模块。教学中可以根据实际需要灵活选取。

本书内容及学时安排（推荐）如下表所示：

序 号	内 容	学 时
0	绪论	2
1	围岩分级与围岩压力	4
2	隧道构造	4
3	隧道施工方法	6
4	隧道开挖	6
5	支护	8
6	超前支护与预加固围岩	4
7	监控量测	6
8	防排水	6



(续表)

序 号	内 容	学 时
9	辅助坑道	2
10	施工辅助作业	2
11	超前地质预报	4
12	不良地质和特殊岩土地段施工	4
13	其他隧道施工方法	2
总计		60

本书特色如下：

(1) 以新奥法作为本书编写的主线。把施工步骤单列，不再介绍现场施工中已经过时的内容，如传统矿山法、棚架法等；为了保证知识的完整性，保留一部分很少用的内容，如直墙式隧道、先墙后拱法、先拱后墙法、拱墙交错法等；对于现场已经明确不允许使用的，如火雷管、干喷工艺等，为了便于读者理解，仍然加以介绍。

(2) 引入行业标准和规范。本书在隧道施工中有显著特色的部分，如喷射混凝土、锚杆、钢架、钢筋网、防水板、土工布、二次衬砌等，引入了中华人民共和国行业标准《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017) 的内容，并与施工现场的情况一致。这样，不论是在校学生还是技术人员，都可以学习或参考。

(3) 以知识目标和技能目标要求为核心进行编写，不过分追求知识体系的完整性。例如，在对隧道的基本分类进行介绍时，按长度、横断面分类到设计规范规定的小净距隧道、连拱隧道，从多方面对隧道进行解读。

(4) 介绍了超前地质预报的内容。超前地质预报的内容在施工规范中已经要求实行多年，因此本书中加以介绍。

(5) 课后安排技能训练项目。技能训练项目的编写本着与教学环境等尽可能一致的原则，安排实操项目，如拱顶下沉、地表下沉、收敛量测；也有模型制作、CAD 画图、工程量计算等，可操作性强。

本书由陕西交通职业技术学院赵国刚、中交集团第二公路工程有限公司职工培训中心袁春花任主编。具体编写分工如下：赵国刚编写绪论、模块 1 至模块 8、模块 11 和模块 12，袁春花编写模块 9、模块 10 和模块 13。

本书在编写过程中参考了一些专家学者的资料，在此一并表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中存在的疏漏和不足之处恳请读者批评指正。

编 者



目 录

绪论

1

0.1 隧道概述	1
0.2 公路隧道的结构组成	4
0.3 公路隧道的特点	4
0.4 公路隧道设计的有关规定	6
0.5 公路隧道常见的质量问题	6
学习评价	7

模块 1 围岩分级与围岩压力

8

1.1 围岩分级	8
1.1.1 公路隧道围岩分级	8
1.1.2 铁路隧道围岩分级	14
1.2 围岩压力	20
1.2.1 围岩压力的基础知识	20
1.2.2 围岩压力的确定	23
技能训练	29
学习评价	29

模块 2 隧道构造

30

2.1 隧道工程的划分	30
2.2 洞身衬砌	31
2.2.1 衬砌材料	31
2.2.2 洞身衬砌的设计要求与类型	33
2.3 明洞	39
2.3.1 明洞的结构类型	40
2.3.2 明洞基础	43
2.3.3 明洞填土的注意事项	44
2.4 洞门	45



2.4.1	洞门的基本概念	45
2.4.2	洞门的作用	46
2.4.3	洞门的类型	46
2.4.4	隧道洞门的构造要求	50
2.5	隧道的通风	51
2.5.1	自然通风	51
2.5.2	机械通风	52
2.6	隧道的照明设施	56
2.7	防排水设施	57
2.7.1	隧道防排水的要求	57
2.7.2	隧道防排水的原则	58
2.7.3	隧道防排水的措施	59
2.7.4	隧道内防排水建筑物	60
2.8	附属设施	64
2.8.1	紧急停车带	64
2.8.2	行人、行车横洞和预留硐室	65
2.8.3	装饰配件设施	66
2.9	公路隧道工程质量鉴定办法相关规定	66
	技能训练	67
	学习评价	67

模块3 隧道施工方法

68

3.1	隧道工程施工概述	68
3.1.1	隧道工程施工的特点	68
3.1.2	隧道施工方法的选择	69
3.1.3	隧道施工的相关概念	70
3.1.4	隧道施工的基本理念	70
3.1.5	山岭隧道的常规施工方法	71
3.1.6	隧道工程设计与施工两大理论	72
3.2	新奥法	75
3.2.1	新奥法的发展过程	75
3.2.2	新奥法的理论基础	75
3.2.3	新奥法的施工程序	77
3.2.4	新奥法施工的基本原则	77
3.3	山岭隧道的开挖方法	78
3.3.1	全断面法	78
3.3.2	台阶开挖法	80
3.3.3	分部开挖法	82
3.4	洞口施工和明洞施工	86
3.4.1	洞口施工	86
3.4.2	明洞施工	88

3.5 浅埋暗挖法	90
3.5.1 浅埋暗挖法的特点	91
3.5.2 浅埋暗挖法施工的基本原则	91
技能训练	91
学习评价	91

模块 4 隧道开挖

92

4.1 凿岩机具	92
4.2 爆破材料和爆破器材	95
4.2.1 炸药	95
4.2.2 工业雷管	98
4.2.3 索状起爆器材	101
4.3 起爆方法	103
4.3.1 导爆管雷管起爆法	103
4.3.2 电力起爆法	104
4.4 爆破作用与爆破术语	104
4.4.1 爆破对固体介质的破坏作用	104
4.4.2 爆破术语	106
4.5 炮眼	107
4.5.1 炮眼的种类	107
4.5.2 炮眼布置的原则和方法	109
4.5.3 炮眼的掏槽	109
4.6 爆破设计	112
4.7 钻爆施工	120
4.7.1 钻爆施工工序	120
4.7.2 超欠挖控制	122
4.7.3 质量检验标准	123
4.8 出碴运输	124
4.8.1 装碴	125
4.8.2 运碴	126
4.8.3 卸碴	129
4.9 公路隧道开挖的一般规定和基本要求	129
技能训练	130
学习评价	131

模块 5 支护

132

5.1 初期支护	132
5.1.1 喷射混凝土支护	133
5.1.2 钢纤维喷射混凝土支护	142
5.1.3 钢筋网喷射混凝土支护	143



5.1.4	喷射混凝土质量检测	144
5.1.5	钢筋网支护	148
5.1.6	钢架制作与安设施工	148
5.1.7	锚杆施工	152
5.2	二次衬砌	161
5.2.1	施工前的准备	162
5.2.2	模板施工	163
5.2.3	施作时间的确定	165
5.2.4	浇筑混凝土的施工	165
	技能训练	168
	学习评价	168

模块6 超前支护与预加固围岩 169

6.1	隧道施工辅助工程措施概述	169
6.1.1	隧道施工辅助工程措施的适用范围及一般规定	169
6.1.2	隧道施工辅助工程措施的类型	170
6.2	辅助工程措施的施工	171
6.2.1	地层稳定措施	171
6.2.2	涌水处理措施	178
	技能训练	181
	学习评价	181

模块7 监控量测 182

7.1	监控量测概述	182
7.2	洞内外观察	191
7.3	周边位移	192
7.3.1	周边位移概述	192
7.3.2	周边位移量测	194
7.4	拱顶下沉量测	196
7.5	地表下沉量测	197
7.6	隧道监控量测数据处理与应用	198
7.6.1	量测数据处理	198
7.6.2	量测数据的应用	199
	技能训练	202
	学习评价	202

模块8 防排水 203

8.1	防排水概述	203
8.1.1	隧道防排水的必要性	203

8.1.2	隧道防排水的要求	204
8.1.3	隧道防排水结构的主要类型	204
8.2	防排水材料	207
8.2.1	高分子防水卷材	207
8.2.2	土工织物	209
8.2.3	防水混凝土	210
8.3	防排水施工	213
8.3.1	防水施工	213
8.3.2	排水系统施工	217
8.3.3	止水带施工	220
	技能训练	224
	学习评价	224

模块 9 辅助坑道

225

9.1	辅助坑道概述	225
9.2	横洞	226
9.3	平行导坑	227
9.4	斜井	229
9.5	竖井	233
9.6	竣工后辅助坑道的处理	235
	技能训练	235
	学习评价	236

模块 10 施工辅助作业

237

10.1	压缩空气的供应	237
10.1.1	压缩空气的供应计算	238
10.1.2	空压机站	239
10.1.3	高压风管管路敷设要求	239
10.2	施工供水与排水	240
10.2.1	施工供水	240
10.2.2	洞内排水	242
10.3	施工通风、防尘、防有害气体	243
10.3.1	通风、防尘、防有害气体的有关规定	244
10.3.2	施工通风方式	246
10.3.3	施工通风计算	248
10.4	施工供电与照明	254
10.4.1	施工供电	254
10.4.2	施工照明	254
	技能训练	255
	学习评价	255



模块 11 超前地质预报 256

11.1 超前地质预报概述	256
11.2 超前地质预报的实施	258
11.3 地质调查法	263
11.4 超前钻探法	265
11.5 物探法	267
11.6 超前导坑预报法	270
技能训练	271
学习评价	271

模块 12 不良地质和特殊岩土地段施工 272

12.1 不良地质和特殊岩土地段施工概述	272
12.2 膨胀土围岩	274
12.3 黄土	276
12.4 溶洞	278
12.5 松散地层和流沙	280
12.6 塌方	281
12.7 岩爆	283
12.8 高地温	285
12.9 瓦斯地层	286
技能训练	289
学习评价	289

模块 13 其他隧道施工方法 290

13.1 盾构法施工	290
13.1.1 盾构法概述	290
13.1.2 盾构的分类	292
13.1.3 盾构法施工简介	293
13.2 沉管法施工	301
技能训练	302
学习评价	303

参考文献 304

绪论



0.1 隧道概述

1. 我国隧道的发展历程

隧道是一种修建在地下的工程结构物。1970年，国际经济合作与发展组织召开了隧道会议综合了各种因素，对隧道下了定义：以某种用处、在地面下用任何方法按规定的形状和尺寸修筑的断面积大于 2 m^2 的洞室。隧道被广泛地应用于交通、矿山、水利及国防等领域，现已成为土木工程的一个重要分支。交通运输类隧道与其他用途的隧道相比，不仅长度长、数量多，而且在施工中遇到的工程地质和水文地质条件也比较复杂，对其平面、纵断面、横断面及形状、尺寸要求都较严格。目前，隧道的勘测、设计和施工体系已日趋成熟。

我国公路隧道主要是随着高速公路的兴起和公路交通的加速发展，进入快速发展阶段。截至2013年底，全国公路隧道有11 359处，总长9 605.6 km。其中，特长隧道有562座，总长为2 506.9 km；长隧道有2 303座，总长为3 936.2 km。

以陕西省为例，截至2013年底，陕西省的通车里程为4 363 km，隧道有529座，总长为426.939 7 km，占全省高速公路总长的9.8%。其中，大于6 km的隧道有5座，总长为49.384 5 km；大于3 km而小于6 km的隧道有25座，总长为108.454 5 km；长隧道有83座，总长为138.184 7 km；中、短隧道有416座，总长为130.916 0 km。

截至目前，全国已运营的10 km以上（包括10 km）的公路山岭隧道有8座（见表0-1）。

我国的水下隧道也得到了长足发展。水下隧道穿江过海，施工方法多样化，有沉管法、盾构法及钻爆法。例如，上海崇明长江隧道采用盾构法修建，南京纬三路长江隧道采用盾构法修建，武汉长江隧道采用盾构法修建，厦门翔安海底隧道采用钻爆法修建，青岛胶州湾海底隧道采用钻爆法修建，港珠澳海底隧道采用沉管法（将矩形或圆形预制混凝土

构件分段沉埋至河底或海底而形成隧道的施工方法）修建，这些都是世界级工程。

表 0-1 全国已运营的 10 km 以上（包括 10 km）的公路山岭隧道

序号	隧道名称	隧道长度/km	序号	隧道名称	隧道长度/km
1	陕西终南山隧道	18.02	5	甘肃大坪里隧道	12.2
2	山西西山隧道	13.65	6	陕西包家山隧道	11.2
3	山西虹梯关隧道	13.11	7	山西宝塔山隧道	10.2
4	台湾雪山隧道	12.9	8	四川泥巴山隧道	10

纵观我国公路隧道的发展史，虽然起步较晚，但发展很快。我国高速公路隧道工程建设成就显著，目前已成为世界上隧道最多、最复杂、发展最快的国家。

2. 隧道的基本分类

公路隧道是指供汽车和行人通行的隧道，一般分为汽车专用隧道和汽车与行人混用的隧道。山岭隧道是指贯穿山岭或丘陵的隧道，是相对城市隧道和水下隧道而言的，它们表示的修建场所不同。本书所说的隧道一般是指山岭公路隧道，与现行公路隧道的设计、施工规范一致。

从设计的角度讲，隧道主体结构必须按永久性建筑设计，设计寿命为 100 年，要求具有规定的强度、稳定性和耐久性。所谓耐久性，一般指所使用的建筑材料具有必要的抗渗性、抗冻性和抗侵蚀性。洞内一般要求设置衬砌。这里所说的主体结构物是指洞门、支护衬砌、各附属风道、风井、硐室、防排水设施、路面板及隧底填充等。建成的隧道应能适应长期运营的需要，方便维修作业。

1) 交通隧道的分类

交通隧道的作用是提供交通运输和人行的通道，以满足交通线路畅通的要求，其一般可分为以下几种类型：

（1）公路隧道。高速公路对道路的修建技术提出了较高的标准，要求线路顺直、坡度平缓、路面宽敞等。公路隧道的修建在改善公路的技术状态，缩短运行距离，提高运输能力，以及减少事故等方面起到了重要的作用。公路隧道是本书主要介绍的隧道。

（2）铁路隧道。开挖隧道直接穿山而过，既可使线路顺直，避免许多无谓的展线，使线路缩短；又可以减小坡度，使运营条件得以改善，从而提高牵引定数，多拉快跑。

（3）水底隧道。当交通线路需要跨越江、河、湖、海、洋时，一般可以选择的方案有架桥、轮渡和隧道。当河道通航需要较高的净空，而桥梁受两端引线高程的限制，一时无法抬起必要的高度时，采用水底隧道。水底隧道方案的优点是不受气候影响，不影响通航，引道占地少，战时不暴露交通设施目标等，其越来越受到人们的青睐。

（4）地下铁道。地下铁道是解决大城市中交通拥挤、车辆堵塞问题，能大量快速地运送乘客的一种城市轨道交通设施，简称地铁。地下铁道可以使很大一部分地面客流转入地下而不占用地面面积。它没有平面交叉，列车各走上下行线，因而可以高速行驶，且可缩短车次的间隔时间，又节省了乘车时间，方便了乘客的活动。在战时，地铁还可以起到人防的功能。

(5) 航运隧道。当运河需要越过分水岭时,克服高程障碍成为十分困难的问题。如果修建航运隧道,把分水岭两边的河道沟通起来,既可以缩短船只航程,又可以省去船闸的费用,使船只迅速而顺直地驶过,航运条件就大为改善了。

(6) 人行地道。为了提高交通运送能力及减少交通事故,除架设街心高跨桥以外,也可以通过修建人行地道来穿越街道或跨越铁路、高速公路等。这样可以缓解地面交通互相交叉的繁忙景象,少占用地面空间,同时也大大减少了交通事故。

2) 隧道按长度的分类

《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)将公路隧道按其长度分为四类,如表 0-2 所示。

表 0-2 公路隧道按长度分类

分 类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
长度 L/m	$L > 3\,000$	$3\,000 \geq L > 1\,000$	$1\,000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)将铁路隧道按其长度也分为四类,如表 0-3 所示。

表 0-3 铁路隧道按长度分类

分 类	特长隧道	长隧道	中长隧道	短隧道
长度 L/m	$L > 10\,000$	$10\,000 \geq L > 3\,000$	$3\,000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

3) 隧道的其他分类

(1) 国际隧道协会(International Tunnelling Association, ITA)规定了按隧道横断面面积的大小划分隧道,如表 0-4 所示。

表 0-4 按隧道横断面面积的大小分类

隧道类型	极小断面隧道	小断面隧道	中等断面隧道	大断面隧道	特大断面隧道
横断面面积 S/m^2	$2 < S \leq 3$	$3 < S \leq 10$	$10 < S \leq 50$	$50 < S \leq 100$	$S > 100$

(2) 按埋深的深度来分,隧道可以分为浅埋隧道和深埋隧道。

(3) 按所在的位置来分,隧道可以分为山岭隧道、水底隧道和城市隧道。

(4) 小净距隧道。小净距隧道是指上下行双洞洞壁净距较小,不能按独立双洞考虑的隧道结构。围岩的级别不同,隧道的最小净距也不同(见表 0-5)。如隧道净距小于表 0-5 规定的数值,即小净距隧道。如对于双车道山岭隧道,当隧道开挖宽度约为 10 m 时,Ⅰ级围岩的最小净距约为 10 m,Ⅵ级围岩的最小净距约为 40 m。

表 0-5 分离式独立双洞间的最小净距

围岩级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
最小净距/m	$1.0B$	$1.5B$	$2.0B$	$2.5B$	$3.5B$	$4.0B$

注: B 为隧道开挖断面的宽度。

(5) 连拱隧道。连拱隧道指双洞拱部衬砌结构通过中柱相连接的隧道结构。

0.2 公路隧道的结构组成

公路隧道结构由主体建筑物和附属建筑物两部分组成。

1. 主体建筑物

公路隧道的主体建筑物是为了保持隧道的稳定，保证行车的安全运行而修建的，它由洞身衬砌和洞门组成。当洞口容易坍塌或有落石的危险时，还需要加筑明洞。

(1) 洞身衬砌。洞身衬砌是帮助围岩获得稳定的人工部分，分为初期支护（初衬）和二次支护（二次衬砌或二衬）。隧道在开挖后，除围岩完全能够自稳而无须支护外，在围岩稳定能力不足时必须加以支护才能使其进入稳定状态，并将其作为永久承载结构的一部分，此项工作称为初期支护。初期支护具体体现的形式是锚喷支护，一般由锚杆、喷射混凝土、钢架、钢筋网等及它们的组合构成。隧道二衬由拱部、仰拱和边墙组成，主要是模筑混凝土或模筑钢筋混凝土。墙顶以上的向上拱起的弧形构造称为拱部，主要支撑洞室上面的荷载；为改善隧道上部支护结构受力条件而设置在隧道底部的反向拱形结构称为仰拱，主要承受地层向上的压力。边墙介于以上两者之间，主要抵抗水平方向的围岩压力。围岩稳定的时候可以不设仰拱。

(2) 洞门。洞门是为保持洞口上方及两侧路堑边坡的稳定，在隧道洞口修筑的墙式构造物，是明暗交界处的结构部分。洞门结构主要起稳定洞口边坡、仰坡，防止洞口塌方落石，美化洞口的作用。

2. 附属建筑物

公路隧道的附属建筑物包括通风建筑物、避难救援通道、防排水设备、照明设施和电力及通信信号的安放设备等。隧道的附属建筑物是为了养护、维修工作的需要及通风、供电、消防、通信等方面的要求而修建的。隧道内设置何种附属建筑物，应根据具体情况而定。

0.3 公路隧道的特点

1. 断面大

两车道公路隧道的断面面积可达 $80 \sim 96 \text{ m}^2$ ，三车道公路隧道的断面面积远超过 100 m^2 。公路隧道的围岩受扰动范围较大，开挖空间暴露的围岩结构面较多，不利地质现象揭露更充分，围岩内的拉伸区与塑性区范围加大，导致施工难度增大。

2. 形状扁平

在确定隧道断面和开挖轮廓线时，为了尽可能降低拱顶高度，公路隧道的断面常为扁平状的马蹄形或曲墙拱形断面。扁平状断面容易导致在拱顶围岩内出现拉伸区，在断面面积相同的条件下，公路隧道施工较一般铁路隧道、水工隧洞和矿山巷道难度要大。

3. 围岩条件的不确定性

公路隧道所面对的围岩岩性多种多样，不同岩性的围岩具有不同的物理力学特性，不同地区大地构造运动及风化侵蚀作用不同，人类活动如矿山采空区等，更加剧了围岩条件

的复杂程度。公路隧道作为线状构造物，不可避免地要遇到并穿越各种复杂围岩条件。在公路隧道设计前期的勘察阶段只能通过有限的钻孔、地表物探、踏勘等工作，推断隧道围岩状况，但这些工作并不能完全准确地反映实际的围岩条件，而只有在隧道开挖后才能揭露出真实的围岩情况。而对于围岩稳定性，需根据揭露的地质条件，结合事前的计算分析、施工过程中的监控量测结果和工程经验来判断，针对不同的围岩条件，应采取不同的工程措施，须做出相应的调整，这将给工程设计和施工带来很大的困难。

4. 隧道衬砌结构的受力不确定

隧道衬砌结构受力通常是经验公式进行计算的，围岩物理力学参数根据现场取样试验和经验取值。然而，由于隧道施工是在有原始应力场的介质内构筑结构，隧道开挖后将形成一定的临空面，围岩力学参数随着受力条件的改变而有所变化；同时，由于临空面的形成，围岩会产生变形，并随时间和支护条件变化。所以，隧道衬砌结构的受力除与地质条件有直接关系外，也与隧道的开挖方式、支护时间、支护刚度有很大关系。

5. 施工环境差

隧道内照明亮度不足、空气污浊、粉尘浓度高、噪声大、一些施工部位排水不良等，这些施工环境条件会对隧道施工作业效率、施工质量、质量检查与施工安全造成不良影响。

6. 隐蔽工程多

除二次衬砌外，超前支护，锚喷网支护，钢架支护，防水层及纵向、环向排水盲沟，路面下排水暗沟，仰拱填充，预留预埋设施等都属于隐蔽工程。需要在施工过程中对这些隐蔽工程进行严格的质量检查和验收，以保证隧道的整体质量。

7. 24 h 不间断施工

隧道内一般实行 24 h 循环施工作业，施工监理人员、施工技术人员、管理人员及施工监控量测人员、超前地质预报人员等应配合隧道内的作业循环开展工作，配置要求高，管理难度大。

8. 防水要求高

在高等级公路上，车辆行驶速度较快，如果隧道出现渗漏或路面溢水，则会造成路面湿滑，不利于安全行车，特别是在严寒地区，冬季隧道内的渗漏水会在隧道上部吊挂冰柱，或在路面形成冰湖，常常会诱发交通事故。此外，长期或大量的渗漏水，还会对隧道内的机电设备、动力及通信线路构成威胁。因此，公路隧道应有较高的防水要求。

9. 需要运营通风

机动车辆通过隧道时，会不断地向隧道内排放废气。一般来说，由于受自然风和交通活塞风的作用，短隧道内有害气体的浓度积聚不会太高，不会对驾乘人员的身体健康和行车安全构成威胁。但是对于长隧道和特长隧道就不同了，自然风和交通活塞风对隧道内空气的置换作用相对较小，如不采取措施，隧道内有害气体的浓度就会逐渐升高，当达到一定浓度时，驾乘人员会感到不适，隧道内能见度降低。因此，必须根据隧道的具体条件，采用适当的通风方式，将新鲜空气随风流一起送入隧道，稀释有害气体，使其浓度降至安全指标以内。

10. 需要运营照明

高速行驶的车辆在白天接近并穿过隧道时，其行车环境要经历一个“亮—暗—亮”的变化过程，驾驶员的视觉在此过程中也会发生微妙的变化以适应环境变化。为了减小驾驶员通过隧道时的生理和心理压力，消除车辆进洞时的黑框或黑洞效应及出洞时的眩光现象，从有利于安全行车的角度考虑，公路隧道一般都需设照明设施。

0.4 公路隧道设计的有关规定

公路隧道的纵坡形式一般宜采用单向坡；地下水发育的长隧道、特长隧道可采用双向坡。隧道纵坡不应小于 0.3%，一般情况下不应大于 3%；受地形限制时，高速公路、一级公路的中、短隧道可适当加大，但不宜大于 4%；短于 100 m 的隧道，其纵坡可与该公路隧道外的纵坡相同。

隧道的限界高度，高速公路、一级公路、二级公路取 5 m；三级公路、四级公路取 4.5 m。高速公路、一级公路的隧道应在两侧设置检修道，其宽度应不小于 0.75 m；二级公路、三级公路的隧道宜在两侧设置人行道（兼检修道），其宽度应不小于 0.75 m；四级公路可不设人行道，但应保留 0.25 m 的 C（余宽）值。特长隧道、长隧道内右侧侧向宽度小于 2.50 m 时，应设置紧急停车带，紧急停车带宽度应为 3.50 m，长度不应小于 30 m，间距不宜大于 750 m。

隧道及其洞口两端路线的平纵横技术指标应符合以下规定：隧道洞口内侧不小于 3 s 设计速度行程长度与洞口外侧不小于 3 s 设计速度行程长度范围内的平、纵面线形应一致，有条件时宜取 5 s 设计速度行程。

高速公路、一级公路的隧道的长度大于 100 m 时，应设置照明设施；二级公路、三级公路、四级公路的隧道，其照明设施可根据具体情况设置。特长隧道和高速公路、一级公路的长隧道必须配置报警设施、消防设施、救助设施等；二级公路、三级公路的长隧道可根据需要设置报警设施、消防设施和救助设施等。

公路隧道的排水设施包括洞内排水设施和洞外排水设施两个部分。

0.5 公路隧道常见的质量问题

1. 隧道渗漏

与其他地下工程一样，公路隧道在施工期间和建成后一直受地下水的影响。施工期间，地下水会给施工造成困难，影响工程质量；隧道建成后，隧道结构处于地下水的包围之中，当地下水量较大，防水工程构造处理不当、质量欠佳时，地下水便会通过一定的渠道渗入或流入隧道内部，使衬砌结构受到侵蚀，路面湿滑、结冰，设备锈蚀，电路短路，影响美观等，对行车安全及衬砌结构的稳定构成威胁。特别是对于一些岩溶区隧道，在极端天气下由于其瞬时排水能力不足，可能导致衬砌背后水压增高，引发渗漏水或导致衬砌爆裂。据统计，目前国内绝大部分公路隧道存在着不同程度的渗漏问题，渗漏部位遍及隧道各个部位。因此，在设计科学的防排水结构和加强防排水施工质量管理方面，我国公路隧道界还有很长的路要走。

2. 衬砌开裂

作用在隧道衬砌结构上的压力与隧道围岩的性质、地应力（存在于地壳中的未受工程扰动的天然应力，也称为岩体初始应力、绝对应力或原岩应力，广义上也指地球体内的应力）的大小及施工方法等因素有关。由于受技术和资金条件的限制，一些不利因素在设计前是很难准确确定的，所以在隧道衬砌结构设计中常带有一定的盲目性，导致结构强度不

足或与围岩压力不协调,而成衬砌结构开裂、破坏。然而,工程上出现的衬砌开裂更多的则是由于初期支护不到位、工艺不合理,衬砌厚度不足,混凝土强度不够,拆模时间不当等原因造成的。衬砌裂缝对结构的稳定及建成后隧道的安全运营构成了潜在的威胁。因此,加强施工管理、提高隧道初期支护和衬砌混凝土质量已迫在眉睫。

3. 限界受侵

建筑限界是保证车辆安全通过隧道的必要断面。在公路隧道施工过程中,有时会遇到松软地层。当地压较大时,围岩的变形量也会很大,如果施工方法不当或支护形式欠妥、支护不及时,就容易导致塌方。另一种施工中的常见现象是在浇筑过程中衬砌混凝土模板强度、刚度不足,出现走模,从而导致限界受侵。为了保证施工安全和避免塌方,严禁在施工过程中仓促衬砌而忽视断面界限,使建筑限界受侵。

4. 支护结构同围岩结合不密实

支护结构同围岩的紧密接触是地下结构区别于地面结构的主要特征。所谓新奥法的出发点,正是支护结构同围岩的共同作用。但是,在施工中由于超欠挖的存在,有的承包人为了经济省事,通过钢筋网在作为初期支护的喷射混凝土层背后填充石块或其他异物,以取代喷混凝土充填空间,造成围岩与初期支护之间不密实,甚至存在大的空区(洞)。在二次衬砌施工过程中,由于泵送混凝土压力不足、流动性不好、重力作用、抽拔泵送管过早过快等原因,拱顶混凝土往往难以饱满,造成二次衬砌背后形成较大空区(洞),衬砌结构受力条件变差,诱发衬砌内缘压裂、掉块的现象。

5. 衬砌拱脚下沉或仰拱底鼓

隧道边墙脚和仰拱施工是隧道工程质量较为突出的部位,由于边墙脚欠挖、纵向排水盲管侵占二次衬砌空间,造成边墙脚衬砌厚度严重不足;边墙脚与仰拱的连接未达到设计要求的状态,引起隧道衬砌拱脚下沉。仰拱未按设计曲率开挖、深度不足,仰拱及仰拱填充采用左右分幅施工,使仰拱没有起到应有的作用,造成仰拱底鼓现象。

6. 路面开裂、冒水

在公路隧道常见的质量问题中,隧道路面开裂和冒水的现象也很突出。路面结构厚度不足、隧底虚渣填筑、仰拱及仰拱填充不符合设计要求、排水盲沟构造不合理,施工不精细造成堵塞、遗漏、高程不准等,都可能引起隧道路面、开裂冒水。隧道路面的开裂、冒水会造成路面板损坏、跳车、路面湿滑,寒冷地区还可能造成路面结冰,危及行车安全。

7. 通风、照明不良

部分运营隧道有害气体浓度超限,洞内照明昏暗,会造成行车环境不良,威胁行车安全。为了不降低隧道的使用标准并确保其安全运营,应在安装设备时对设备性能指标进行检测、检查,在隧道运营中,应加强管理,定期对隧道通风,对照明效果进行抽检、维护,保证风机与灯具的开启强度。



学习评价

- (1) 什么是隧道?试说明隧道工程在整个线路工程中的地位与作用。
- (2) 公路隧道建筑物主要由哪些部分组成?
- (3) 目前我国隧道工作者还面临哪些问题?如何解决?

模块 1

围岩分级与围岩压力



知识目标

- (1) 了解隧道围岩分级的目的和分级方法。
- (2) 熟悉隧道围岩压力的概念、围岩压力的种类及对隧道工程的影响。
- (3) 掌握确定围岩压力的方法。



技能目标

- (1) 通过地质资料可以初步判定围岩等级。
- (2) 可以简单计算围岩压力。

1.1 围岩分级



1.1.1 公路隧道围岩分级

围岩是指隧道开挖后其周围产生应力重新分布的岩体，或指隧道开挖后对其稳定性产生影响的那部分岩体或土体。洞身周围的地层，不管是岩体还是土体统称为隧道围岩。这里的土体是指广义的土，可以理解为是从岩体上剥离的风化物质，包括各种土（黄土、软土等）、卵砾石土等。

在修建隧道时不同的围岩会有不同的地质现象。例如，在有些围岩中开挖坑道后，坑道不会坍塌，能很好地保持稳定；而在有些围岩中开挖坑道后，坑道却不能保持稳定，容易坍塌，为了得到所需要的开挖净空就必须修筑衬砌加以支持。这些说明了在不同的围岩中开挖坑道，围岩会表现不同的稳定性（所谓稳定性是指在隧道开挖后不加支护的情况下

其自身的稳定程度,其可分为充分稳定、基本稳定、暂时稳定和不稳定)。

隧道围岩分级是隧道设计与施工的基础。为了满足隧道设计、施工等的需要,针对各种不同工程项目的具体要求,如施工开挖、支护、支撑与衬砌,以及编制隧道施工组织设计等,把围岩按这些不同要求进行相应的地质条件归类,这就是围岩分级。正确的、符合工程实际的围岩分级对于隧道设计计算及支护设计的准确性有很重要的意义。这里要讨论以解决隧道支护问题为目的的围岩分级,以便确定衬砌结构类型,计算作用于支护、支撑及衬砌结构的围岩压力。

由于工程地质条件的复杂性和多变性,目前国内外提出了许多隧道围岩的分级方法,有的已在实践中得到广泛应用,在这里按照《公路隧道设计规范》(JTJ 3370.1—2018)规定的方法对其进行介绍。

(1) 公路隧道围岩分级的综合评判方法宜采用两步,并按以下顺序进行分级:

① 根据岩石的坚硬程度和岩体的完整程度两个基本因素的定性特征与定量的岩体基本质量指标 BQ , 综合进行初步分级。

② 对围岩进行详细定级时,应在岩体基本质量分级基础上考虑修正因素的影响,修正岩体基本质量指标值。

③ 按修正后的岩体基本质量指标 $[BQ]$, 结合岩体的定性特征综合评判、确定围岩的详细分级。

(2) 围岩分级中岩石的坚硬程度、岩体的完整程度两个基本因素的定性划分和定量指标及其对应关系应符合下列规定:

① 岩石坚硬程度可按表 1-1 定性划分。

表 1-1 岩石坚硬程度的定性划分

名 称	鉴定特征	代表性岩石
硬质岩	坚硬岩 锤击声清脆,有回弹,振手,难击碎,浸水后大多无吸水反应	未风化至微风化的花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英片岩、硅质板岩、石英岩、硅质胶结的砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等
	较坚硬岩 锤击声较清脆,有轻微回弹,稍振手,较难击碎,浸水后有轻微吸水反应	(1) 弱风化的坚硬岩; (2) 未风化至微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂页岩等
软质岩	较软岩 锤击声不清脆,无回弹,较易击碎,浸水后用指甲可在其上刻出印痕	(1) 强风化的坚硬岩; (2) 弱风化的较坚硬岩; (3) 未风化至微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等
	软岩 锤击声哑,无回弹,有凹痕,易击碎,浸水后用手可掰开	(1) 强风化的坚硬岩; (2) 弱风化至强风化的较坚硬岩; (3) 弱风化的较软岩; (4) 未风化的泥岩等
	极软岩 锤击声哑,无回弹,有较深凹痕,用手可捏碎,浸水后可捏成团	(1) 全风化的各种岩石; (2) 强风化的软岩; (3) 各种半成岩

② 岩石坚硬程度定量指标用岩石单轴饱和抗压强度 R_c (单位为 MPa) 表达。一般采用实测值, 若无实测值时, 可采用实测的岩石点荷载强度指数 $I_{s(50)}$ 的换算值, 即按式 (1-1) 计算。

$$R_c=22.82I_{s(50)}^{0.75} \tag{1-1}$$

③ R_c 与岩石坚硬程度定性划分的关系可按表 1-2 确定。

表 1-2 R_c 与岩石坚硬程度定性划分的关系

R_c /MPa	>60	30~60	15~30	5~15	<5
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩

④ 岩体完整程度可按表 1-3 定性划分。

表 1-3 岩体完整程度的定性划分

完整程度 岩石	结构面发育程度		主要结构面的 结合程度	主要结构面类型	相应结构面类型
	组 数	平均间距/m			
完整	1~2	>1.0	好或一般	节理、裂隙、层面	整体状或巨厚层结构
较完整	1~2	>1.0	差	节理、裂隙、层面	块状或厚层状结构
	2~3	0.4~1.0	好或一般		块状结构
较破碎	2~3	0.4~1.0	差	节理、裂隙、 层面、小断层	裂隙块状或中厚层结构
	≥3	0.2~0.4	好		镶嵌破碎结构
			一般		中、薄层状结构
破碎	≥3	0.4~0.2	差	各种类型结构面	裂隙块状结构
		≤0.2	一般或差		碎裂状结构
极破碎	无序		很差		散体状结构

注：平均间距指主要结构面（1~2 组）间距的平均值。

⑤ 岩体完整程度的定量指标用岩体完整性系数 K_v 表达。 K_v 一般用弹性波探测值, 若无探测值时, 可用岩体体积节理数 J_v , 按表 1-4 确定对应的 K_v 值。

表 1-4 J_v 与 K_v 对照表

J_v /(条·m ⁻³)	<3	3~10	10~20	20~35	>35
K_v	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15

⑥ K_v 与定性划分的岩体完整程度的对应关系可按表 1-5 确定。

表 1-5 K_v 与定性划分的岩体完整程度的对应关系

K_v	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15
完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎

⑦ 岩体完整程度的定量指标 K_v 、 J_v 的测试和计算方法应符合《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018) 的规定。

(3) 围岩基本质量指标 BQ 应根据分级因素的定量指标 R_c 值和 K_v 值按式 (1-2) 计算。

$$BQ = 100 + 3R_c + 250K_v \quad (1-2)$$

式中, BQ 为围岩基本质量指标; R_c 为岩石单轴饱和抗压强度; K_v 为岩体完整性系数。

使用式 (1-2) 时应遵守以下限制条件:

- ① 当 $R_c > 90K_v + 30$ 时, 应以 $R_c = 90K_v + 30$ 和 K_v 值代入计算 BQ 值。
- ② 当 $K_v > 0.04R_c + 0.4$ 时, 应以 $K_v = 0.04R_c + 0.4$ 和 R_c 值代入计算 BQ 值。

(4) 围岩详细定级时, 如遇下列情况之一, 应对岩体基本质量指标 BQ 进行修正:

- ① 有地下水。
- ② 围岩稳定性受软弱结构面影响, 且由一组起控制作用。
- ③ 存在高初始应力。

围岩基本质量指标修正值 $[BQ]$ 可按式 (1-3) 计算。

$$[BQ] = BQ - 100 (K_1 + K_2 + K_3) \quad (1-3)$$

式中, $[BQ]$ 为围岩基本质量指标修正值; BQ 为围岩基本质量指标; K_1 为地下水影响修正系数; K_2 为主要软弱结构面产状影响修正系数; K_3 为初始应力状态影响修正系数。

K_1 、 K_2 、 K_3 值可分别按表 1-6、表 1-7、表 1-8 确定。围岩极高应力及高应力状态的评估可按表 1-9 的规定进行。

表 1-6 地下水影响修正系数 K_1

地下水出水状态	BQ			
	>550	550~451	350~251	<250
潮湿或点滴状出水 $p \leq 0.1$ 或 $Q \leq 25$	0	0	0.2~0.3	0.4~0.6
淋雨状或涌流状出水, $0.1 < p \leq 0.5$ 或 $25 < Q \leq 125$	0~0.1	0.1~0.2	0.4~0.6	0.7~0.9
淋雨状或涌流状出水, $p > 0.5$ 或 $Q > 125$	0.1~0.2	0.2~0.3	0.7~0.9	1.0

注: Q 为地下水量, p 为水压。

表 1-7 主要软弱结构面产状影响修正系数 K_2

结构面产状及其与洞轴线的组合关系	结构面走向与洞轴线夹角小于 30° , 结构面倾角为 $30^\circ \sim 75^\circ$	结构面走向与洞轴线夹角大于 60° , 结构面倾角大于 75°	其他组合
K_2	0.4~0.6	0~0.2	0.2~0.4

表 1-8 初始应力状态影响修正系数 K_3

初始应力状态	BQ				
	>550	550~451	450~351	350~251	<250
极高应力区	1.0	1.0	1.0~1.5	1.0~1.5	1.0
高应力区	0.5	0.5	0.5	0.5~1.0	0.5~1.0

表 1-9 围岩极高应力及高应力状态的评估

应力情况	主要现象	$\frac{R_c}{\delta_{\max}}$
极高应力	硬质岩：开挖过程中有岩爆发生，有岩块弹出，洞壁岩体发生剥离，新生裂缝多，成洞性差； 软质岩：岩芯常有饼化现象，开挖过程中洞体岩壁体有剥离，位移极为显著，甚至发生大位移，持续时间长，不易成洞	<4
高应力	硬质岩：开挖过程中可能出现岩爆，洞壁岩体有剥离和掉块现象，新生裂缝较多，成洞性差； 软质岩：岩芯时有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体位移显著，持续时间较长，成洞性差	$4\sim7$

注： $\delta_{\max}$ 为垂直洞轴线方向的最大初始应力。

(5) 根据调查、勘探、试验等资料，岩石隧道的围岩定性特征、围岩基本质量指标 BQ ，或修正的围岩质量指标 $[BQ]$ 值，土体隧道中的土体类型、密实状态等定性特征，按表 1-10 确定围岩级别。

表 1-10 公路隧道围岩分级

围岩级别	围岩或土体主要定性特征	围岩基本质量指标 BQ 或 围岩基本质量指标修正值 $[BQ]$
I	坚硬岩，岩体完整	>550
II	坚硬岩，岩体较完整； 较坚硬岩，岩体完整	$550\sim451$
III	坚硬岩，岩体较破碎； 较坚硬岩，岩体较完整； 较软层，岩体完整，整体状或巨厚层状结构	$450\sim351$
IV	坚硬岩，岩体破碎； 较坚硬岩，岩体较破碎至破碎； 较软岩，岩体较完整至较破碎； 软岩，岩体完整至较完整	$350\sim251$
	土体： (1) 压密或成岩作用的黏性土及砂性土； (2) 黄土 (Q_1、Q_2)； (3) 一般钙质、铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土	

(续表)

围岩级别	围岩或土体主要定性特征	围岩基本质量指标 BQ 或 围岩基本质量指标修正值 $[BQ]$
V	较软岩, 岩体破碎; 软岩, 岩体较破碎至破碎; 全部极软岩和全部极破碎岩	≤ 250
	一般第四系的半干硬至硬塑的黏性土及稍湿至潮湿的碎石土, 卵石土、圆砾、角砾土及黄土 (Q_3 、 Q_4)。非黏性土呈松散结构, 黏性土及黄土呈松软结构	
VI	软塑状黏性土及潮湿、饱和粉细砂层、软土等	

注: 本表不适用于特殊条件的围岩分级, 如膨胀性围岩、多年冻土等。

当根据岩体基本质量定性划分与 $[BQ]$ 值确定的级别不一致时, 应重新审查定性特征和定量指标计算参数的可靠性, 并对它们进行重新观察、测试。

在工程可行性研究和初步勘测阶段, 可采用定性划分的方法或工程类比的方法进行围岩级别划分。

(6) 各级围岩物理力学参数和抗剪强度。各级围岩的物理力学参数及结构面抗剪强度应通过室内或现场试验获得, 如无试验数据时, 可按表 1-11 的规定选用; 岩体结构面抗剪断峰值强度参数可按表 1-12 选用。

表 1-11 各级围岩的物理力学指标标准值

围岩级别	容重 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性反力系数 k /($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	内摩擦角 f /($^\circ$)	黏聚力 c /MPa	计算摩擦角 /($^\circ$)
I	26~28	1 800~2 800	>33	<0.2	>60	>2.1	>78
II	25~27	1 200~1 800	20~33	0.20~0.25	50~60	1.5~2.1	70~78
III	23~25	500~1 200	6~20	0.25~0.3	39~50	0.7~1.5	60~70
IV	20~23	200~500	1.3~6	0.3~0.35	27~39	0.2~0.7	50~60
V	17~20	100~200	1~2	0.35~0.45	20~27	0.05~0.2	40~50
VI	15~17	<100	<1	0.4~0.5	<20	<0.2	30~40

注 1: 本表值不包括黄土地层。

注 2: 选用计算摩擦角时, 不再计内摩擦角和黏聚力。

表 1-12 岩体结构面抗剪断峰值强度参数

序号	两侧岩体的坚硬程度及结构面的结合程度	内摩擦角 f /($^\circ$)	黏聚力 c /MPa
1	坚硬岩, 结合好	>37	>0.22
2	坚硬至较坚硬岩, 结合一般; 较软岩, 结合好	37~29	0.12~0.22

(续表)

序号	两侧岩体的坚硬程度及结构面的结合程度	内摩擦角 $f/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa
3	坚硬至较坚硬岩, 结合差; 较软弱至软岩, 结合一般	19~29	0.08~0.12
4	较坚硬至较软岩, 结合差至结合很差; 软岩, 结合差; 软质岩的泥化面	13~19	0.05~0.08
5	较坚硬岩及全部软质岩, 结合很差; 软质岩泥化层本身	<13	<0.05

(7) 隧道各级围岩的自稳能力宜根据围岩变形量测和理论计算分析来评定, 隧道各级围岩自稳能力也可按表 1-13 做出判断。

表 1-13 隧道各级围岩自稳能力判断

围岩级别	自稳能力
I	跨度 ≤ 20 m, 可长期稳定, 偶有掉块, 无塌方
II	跨度为 10~20 m, 可基本稳定, 局部可发生掉块或小塌方; 跨度 < 10 m, 可长期稳定, 偶有掉块
III	跨度为 10~20 m, 可稳定数日至 1 个月, 可发生小、中塌方; 跨度为 5~10 m, 可稳定数月, 可发生局部块体位移及小、中塌方; 跨度 < 5 m, 可基本稳定
IV	跨度 > 5 m, 一般无自稳能力, 数日至数月内可发生松动变形, 小塌方, 进而发展为中、大塌方; 埋深小时, 以拱部松动破坏为主; 埋深大时, 有明显塑性流动变形和挤压破坏; 跨度 ≤ 5 m, 可稳定数日至 1 个月
V	无自稳能力, 跨度为 5 m 或更小时, 可稳定数日
VI	无自稳能力

注 1: 小塌方指塌方高度小于 3 m, 或塌方体积小于 30 m³ 的塌方。

注 2: 中塌方指塌方高度为 3~6 m, 或塌方体积为 30~100 m³ 的塌方。

注 3: 大塌方指塌方高度大于 6 m, 或塌方体积大于 100 m³ 的塌方。

1.1.2 铁路隧道围岩分级

1. 围岩分级

在我国现行的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 中明确规定了围岩由岩石坚硬程度和岩体完整程度两个决定因素确定, 岩石坚硬程度和岩体完整程度应采用定性划分和定量指标两种方法综合确定。铁路隧道的围岩级别的确定应符合规范规定。依其稳定性由好到差把围岩分为 6 级, 即 I、II、III、IV、V、VI 级。

《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 的围岩分级如表 1-14 所示。

表 1-14 铁路隧道的围岩分级

围岩 分级	围岩主要工程地质条件		围岩挖开后的 稳定状态 (单线)	围岩基本 质量指标 BQ	围岩弹性 纵坡速度 $v_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
	主要工程地质特征	结构特征和 完整状态			
I	极硬岩 ($R_c > 60 \text{ MPa}$): 受地质构造影响轻微, 节理不发育, 无软弱面(或夹层); 层状岩层为厚层, 层间结合良好, 岩体完整	呈巨块状整体结构	围岩稳定、无坍塌, 可能产生岩爆	> 550	A: > 5.3
II	硬质岩 ($R_c > 30 \text{ MPa}$): 受地质构造影响较重, 节理较发育, 有少量软弱面(或夹层)和贯通微张节理, 但其产状及其组合关系不致产生滑动; 层状岩层为中厚层或厚层, 层间结合一般, 很少有分离现象; 或为硬质岩石偶夹软质岩石	呈巨块状或大块状结构	暴露时间长, 可能会出现局部小坍塌; 侧壁稳定; 层间结合差的平缓岩层, 顶板易塌落	$451 \sim 550$	A: $4.5 \sim 5.3$ B: > 5.3 C: > 5.0
III	硬质岩 ($R_c > 30 \text{ MPa}$): 受地质构造影响严重, 节理发育, 有层状软弱面(或夹层), 但其产状及组合关系尚不致产生滑动; 层状岩层为薄层或中层, 层间结合差, 多有分离现象; 或为硬、软质岩石互层	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	拱部无支护时可产生小坍塌, 侧壁基本稳定, 爆破震动过大易坍塌	$351 \sim 450$	A: $4.0 \sim 4.5$ B: $4.3 \sim 5.3$ C: $3.5 \sim 5.0$ D: > 4.0
	软质岩 ($R_c = 15 \sim 30 \text{ MPa}$): 受地质构造影响较重, 节理较发育; 层状岩石为薄层、中层或厚层, 层间结合一般	呈大块状结构			
IV	硬质岩 ($R_c > 30 \text{ MPa}$): 受地质构造影响极严重, 节理很发育; 层状软弱面(或夹层)已基本被破坏	呈碎石状压碎结构	拱部无支护时可产生较大的坍塌, 侧壁有时失去稳定	$251 \sim 350$	A: $3.0 \sim 4.0$ B: $3.3 \sim 4.3$ C: $3.0 \sim 3.5$ D: $3.0 \sim 4.0$ E: $2.0 \sim 3.0$
	软质岩 ($R_c \approx 5 \sim 30 \text{ MPa}$): 受地质构造影响严重, 节理较发育或发育	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构			
	土体: (1) 具有压密或成岩作用的黏性土、粉土及砂类土。 (2) 黄土 (Q_1 、 Q_2)。 (3) 一般钙质、铁质胶结的碎石土、卵石土、大块石土	(1) 和 (2) 呈大块状压密结构, (3) 呈巨块状整体结构			



(续表)

围岩 分级	围岩主要工程地质条件		围岩挖开后的 稳定状态 (单线)	围岩基本 质量指标 BQ	围岩弹性 纵坡速度 $v_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
	主要工程地质特征	结构特征和 完整状态			
V	岩体: 较软岩、岩体破碎; 软岩、岩体较破碎至破碎; 全部极软岩及全部极破碎岩 (包括受构造影响严重的破碎带)	呈角砾、碎石状松散结构	围岩易坍塌, 处理不当会出现大坍塌, 侧壁经常性坍塌, 浅埋时易出现地表下沉 (陷) 或塌至地表	≤ 250	A: 2.0~3.0 B: 2.0~3.3 C: 2.0~3.0 D: 1.5~3.0 E: 1.0~2.0
	土体: 一般第四系坚硬、硬塑黏性土, 稍密及以上、稍湿或潮湿的碎石土、卵石土、圆砾土、角砾土及黄土 (Q_3 、 Q_4)	非黏性土呈松散结构、黏性土及黄土呈松软结构			
VI	岩体: 受构造影响很严重, 呈碎石、角砾及粉土、泥土状的断层带, 富水破碎的绿泥石或炭质千枚岩	黏性土呈易蠕动的松软结构, 砂性土呈潮湿松散结构	围岩极易坍塌变形, 有水时土砂常与水一齐涌出, 浅埋时易塌至地表		< 1.0 (对饱和状态的土小于 1.5)
	土体: 软塑状黏性土、饱和的粉土、砂类土等, 风积沙, 严重湿陷性黄土				

注 1: 弹性纵波速度中 A、B、C、D、E 系指岩性类型, 见《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 表 B.1.2—2。

注 2: 关于隧道围岩分级的基本因素和围岩基本分级及其修正, 可参考表 1-17、表 1-19、表 1-21。

注 3: 围岩分级宜采用定性分级与定量分级相结合的方法, 综合分析确定围岩级别。

注 4: 强膨胀岩 (土)、第三系富水弱胶结砂泥岩、岩体强度应力比小于 0.15 的极高地应力软岩等, 属于特殊围岩 (T), 相应工程措施应进行针对性的特殊设计。

1) 岩石坚硬程度

围岩岩石强度是围岩体抵抗外力的一个重要方面, 在结构特征和完整状态相同的情况下, 围岩的稳定性主要取决于围岩岩石的强度。一般来说, 无裂隙或少裂隙的围岩具有整体结构, 其强度可用岩石试件的抗压强度或抗剪强度来表示, 对于多裂隙的围岩体, 其强度可用工程类比法判断。

根据单轴饱和抗压强度 R_c 的大小可将岩石分为硬质岩和软质岩两类, 如表 1-15 所示。

表 1-15 岩石坚硬程度的划分

岩石类别		R_c / MPa	代表性岩石
硬质岩	极硬岩	$R_c > 60$	未风化至微风化的 A 类岩石
	硬岩	$30 < R_c \leq 60$	微风化的 A 类岩石; 未风化至微风化的 B、C 类岩石

(续表)

岩石类别		R_c/MPa	代表性岩石
软质岩	较软岩	$15 < R_c \leq 30$	强风化的 A 类岩石；弱风化的 B、C 类岩石；未风化至微风化的 D 类岩石
	软岩	$5 < R_c \leq 15$	强风化的 A 类岩石；弱风化至强风化的 B、C 类岩石；弱风化的 D 类岩石；未风化至微风化的 E 类岩石
	极软岩	$R_c \leq 5$	全风化的各类岩石和成岩作用差的岩石

注：岩性类型 A、B、C、D、E 的具体划分见《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 表 B.1.2—2。

2) 岩体完整程度

岩体完整程度的划分如表 1-16 所示，表中结构面结合程度见《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 表 B.1.3—2，层状岩层厚度划分见《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016) 表 B.1.3—3。

表 1-16 岩体完整程度的划分

完整程度	结构面发育程度			主要结构面结合程度	主要结构面类型	相应结构类型	岩体完整性系数	岩体体积节理数/(条·m ⁻³)
	定性描述	组数	平均间距/m					
完整	不发育	1~2	>1.0	结合好或一般	节理、裂隙、层面	整体状或巨厚层状结构	$K_v>0.75$	$J_v<3$
较完整		1~2	>1.0	结合差	节理、裂隙、层面	块状或厚层状结构	$0.55<K_v\leq 0.75$	$3\leq J_v<10$
	较发育	2~3	0.4~1.0	结合好或一般		块状结构		
较破碎		较发育	2~3	0.4~1.0	结合差	节理、裂隙、劈理、层面、小断层	裂隙块状或中厚层状结构	$0.35<K_v\leq 0.55$
	发育		≥ 3	0.2~0.4	结合好	镶嵌碎裂结构		
		结合一般			薄层状结构			
破碎	很发育	≥ 3	0.2~0.4	结合差	各种类型结构面	裂隙块状结构	$0.15<K_v\leq 0.35$	$20\leq J_v<35$
		≥ 3	≤ 0.2	结合一般或差		碎裂结构		
极破碎	无序			结合很差		散体结构	$K_v\leq 0.15$	$J_v\geq 35$

注：平均间距指主要结构面间距的平均值。

3) 围岩基本分级

围岩基本分级如表 1-17 所示。

表 1-17 围岩基本分级

围岩级别	围岩或土体主要定性特性	土体特征	围岩基本质量指标 BQ	围岩弹性纵波速度 $v_p/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
I	极硬岩，岩体完整		>550	A: >5.3



(续表)

围岩级别	围岩或土体主要定性特性	土体特征	围岩基本质量指标 BQ	围岩弹性纵波速度 $v_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
II	极硬岩, 岩体较完整; 硬岩, 岩体完整		451~550	A: 4.5~5.3 B: >5.3 C: >5.0
III	极硬岩, 岩体较破碎; 硬岩或软硬岩互层, 岩体较完整; 较软岩, 岩体完整		351~450	A: 4.0~4.5 B: 4.3~5.3 C: 3.5~5.0 D: >4.0
IV	极硬岩, 岩体破碎; 硬岩, 岩体较破碎或破碎; 较软岩或软硬岩互层, 且以软岩为主, 岩体较完整或较破碎; 软岩, 岩体完整或较完整	具有压密或成岩作用的黏性土、粉土及砂类土, 一般钙质、铁质胶结的粗角砾土、粗圆砾土、碎石土、卵石土、大块石土、黄土 (Q_1 、 Q_2)	251~350	A: 3.0~4.0 B: 3.3~4.3 C: 3.0~3.5 D: 3.0~4.0 E: 2.0~3.0
V	较软岩, 岩体破碎; 软岩, 岩体破碎至极破碎; 全部极软岩及全部极破碎岩 (包括受构造影响严重的破碎带)	一般第四系坚硬、硬塑黏性土; 稍密及以上稍湿、潮湿的碎 (卵) 石土, 粗圆砾土, 细角砾土, 粉土及黄土 (Q_3 、 Q_4)	≤ 250	A: 2.0~3.0 B: 2.0~3.3 C: 2.0~3.0 D: 1.5~3.0 E: 1.0~2.0
VI	受构造影响很严重呈碎石、角砾及粉末、泥土状的富水断层带, 富水破碎的绿泥石或炭质千枚岩	软塑状黏性土、饱和的粉土、砂类土等, 风积沙, 严重湿陷性黄土		<1.0 (对饱和状态的土小于 1.5)

2. 围岩分级修正

结合隧道工程的特点, 考虑地下水状态、初始地应力状态等必要的因素, 围岩级别在基本分级的基础上应进行修正。

1) 地下水状态分级

地下水状态的分级如表 1-18 所示。

表 1-18 地下水状态的分级

地下水出水状态	渗水量/ $[\text{L} \cdot (\text{min} \cdot 10 \text{ m})^{-1}]$
潮湿或点滴状出水	≤ 25
淋雨状或线流状出水	25~125
涌流状出水	>125

2) 地下水影响对围岩级别的修正

地下水影响的修正如表 1-19 所示。

表 1-19 地下水影响的修正

地下水出水状态	围岩基本分级				
	I	II	III	IV	V
潮湿或点滴状出水	I	II	III	IV	V
淋雨状或线流状出水	I	II	III 或 IV ^①	V	VI
涌流状出水	II	III	IV	V	VI

注：①围岩岩体为较完整的硬岩时定位Ⅲ级；其他情况定为Ⅳ级。

3) 初始地应力状态

当无实测资料时，围岩的初始地应力状态可根据隧道工程埋深、地貌、地形、地质、构造运动史、主要构造线与开挖过程中出现的岩爆、岩芯饼化等特殊地质现象，按表 1-20 评估。

表 1-20 初始地应力场评估基准

初始地应力状态	主要现象	评估基准 $\left(\frac{R_c}{\sigma_{\max}}\right)$
极高地应力	硬质岩：开挖过程中有时有岩爆发生，有岩块弹出，洞壁岩体发生剥离，新生裂缝多，成洞性差	<4
	软质岩石：岩芯常有饼化现象，开挖过程中洞壁有剥离，位移极为显著，甚至发生大位移，持续时间长，不易成洞	
高地应力	硬质岩：开挖过程中可能出现岩爆，洞壁岩体有剥离和掉块现象，新生裂缝多，成洞性较差	4~7
	软质岩石：岩芯时有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体位移显著，持续时间长，成洞性差	
一般地应力	硬质岩：开挖过程中不会出现已经岩爆，新生裂缝较少，成洞性一般较好	>7
	软质岩：岩芯无或少有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体有一定的位移，成洞性一般较好	

4) 初始地应力对围岩级别的修正

初始地应力影响的修正如表 1-21 所示。

表 1-21 初始地应力影响的修正

初始地应力状态	围岩基本分级				
	I	II	III	IV	V
极高应力	I	II	III 或 IV ^①	V	VI
高应力	I	II	III	IV 或 V ^②	VI

注：① 围岩岩体为较破碎的极硬岩、较完整的硬岩时定为Ⅲ级；围岩岩体为完整的较软岩、较完整的软硬互层时定为Ⅳ级。

② 围岩岩体为破碎的极硬岩、较破碎及破碎的硬岩时定为Ⅳ级；围岩岩体为完整及较完整的软岩、较完整及较破碎的较软岩时定为Ⅴ级。

当隧道洞身埋藏较浅时,应根据围岩受地表影响的情况进行围岩级别的修正。当围岩为风化层时,应按风化层的围岩基本分级考虑;当围岩仅受地表影响时,应较相应围岩降低1~2级。

1.2 围岩压力

1.2.1 围岩压力的基础知识

围岩压力是周围岩体作用于隧道和地下硐室衬砌或支护上的荷载,也称地层压力。从广义上讲,围岩压力是开挖隧道后围岩变形和应力重新分布的一种物理现象。隧道开挖后,因围岩变形或松动等原因,作用于硐室周边岩体或支护结构上的压力即围岩压力。作用于结构物而使结构产生应力的力量称为荷载。

人们从开挖洞穴后围岩变形和坍塌、衬砌或支护产生变形和开裂等现象中,逐步认识到围岩压力的存在。影响围岩压力的因素有硐室的形状或大小、地质构造、支护形式和刚度、硐室埋深,以及时间因素和施工方法等。围岩压力的性质、大小和分布规律是正确进行隧道和硐室支护、结构设计和选择施工方案的重要依据。在开挖硐室前,岩体处在相对静止状态,其中任何一点的岩土都受到周围地层的挤压,这种状态称为原始应力状态或一次应力状态。它是由上覆地层自重、地壳运动的构造应力及地下水流动等因素所决定的。硐室开挖以后,解除了部分围岩的约束,原始的应力平衡和稳定状态被破坏,围岩中出现了应力的重分布,岩体进入二次应力状态。围岩向硐室内部空间变形,并试图达到新的平衡状态。

1. 围岩压力的类型

围岩压力按作用力发生的形态一般可分为如下几种类型:

1) 松动压力

由于开挖而松动或坍塌的岩体以重力形式直接作用在支护结构上的压力称为松动压力。松动压力按作用在支护上力的位置不同,可分为竖向压力、侧向压力和底压力。松动压力常发生在下列三种情况中:

- (1) 在整体稳定的岩体中,可能出现个别松动掉块的岩石。
- (2) 在松散软弱的岩体中,坑道顶部和两侧片帮冒落。
- (3) 在节理发育的裂隙岩体中,围岩某些部位沿软弱面发生剪切破坏或拉坏等局部塌落。

2) 形变压力

形变压力是由于围岩变形而受到与之密贴的支护(如锚喷支护等)的抑制,而使围岩与支护结构共同变形的过程中,围岩对支护结构施加的接触压力。所以形变压力除与围岩应力状态有关外,还与支护时间和支护刚度有关。

3) 膨胀压力

当岩体具有吸水膨胀崩解的特征时,围岩由于吸水而膨胀崩解所引起的压力称为膨胀

压力。它与形变压力的基本区别在于它是由吸水膨胀引起的。

4) 冲击压力

冲击压力是在围岩中积累了大量的弹性变形能之后,由于隧道的开挖,围岩的约束被解除,能量突然释放所产生的压力。

由于冲击压力是岩体能量的积累与释放问题,所以它与弹性模量直接相关。弹性模量较大的岩体,在高地应力作用下,易于积累大量的弹性变形能,一旦遇到适宜条件,它就会突然猛烈地大量释放。

2. 坑道开挖前后围岩的应力状态

1) 坑道开挖前围岩的应力状态

坑道在开挖前,地层是处于相对静止的状态。地层中任何一处的土石都受到上、下、左、右、前、后土石的挤压,保持着相对的平衡。它是由上覆地层自重、地壳运动的残余应力及地下水活动等因素所决定的。

为了研究方便,仅考虑由上覆地层自重所形成的原始应力,并取深度 H 上的一个单元体来做应力分析,如图 1-1 所示。该单元体受到三对大小相等、方向相反的压力的作用,因此该单元体处于力的平衡状态和变形运动的相对静止状态。

在上覆地层自重作用下,竖直压力 P_z 为

$$P_z = \gamma H \quad (1-4)$$

式中, γ 为地层的容重 (kN/m^3); H 为从地面到单元体的深度 (m)。

由于单元体的侧向变形受到周围地形的限制,便产生了侧向压力 P_x 和 P_y , 其由上覆地层自重和地层的物理力学性质所决定。

$$P_x = P_y = \lambda P_z = \lambda \gamma H \quad (1-5)$$

式中, λ 为侧压力系数。

根据侧向应变 (ϵ_x, ϵ_y) 为零的条件,并把地层看成各向同性的弹性体,可推导出 λ 。

$$\lambda = \mu / (1 - \mu) \quad (1-6)$$

式中, μ 为岩石的泊松比,视地层性质不同, μ 值在 0.14~0.50 变化。

2) 坑道开挖后围岩的应力状态

坑道开挖之后,围岩原来保持的平衡状态受到破坏,由相对的静止状态变成显著的变动状态,于是围岩在应力和变形方面开始了一个新的变化运动,出现了围岩应力的重分布和围岩向开挖的坑道空间变形现象,力图达到新的平衡。

由此可知,坑道开挖以后,地层的一侧丧失了约束,平衡状态受到破坏,引起应力集中,围岩就可能向坑道内变形。变形的大小取决于应力变化的大小和围岩抵抗这些变形的能力。对于不同的岩质,则有不同的情况。在坚硬且完整的围岩中,围岩体本身强度足以承受坑道周边应力,这时围岩是自承的,不需要支撑或衬砌提供外加平衡力。在松软的或裂隙围岩中,由于围岩体破碎,再加上在开挖坑道时受到爆破震动,因而在坑道周边一定范围内的岩体将遭到严重的分割与破坏。同时围岩体本身强度低,不足以抵抗围岩的周边应力,因此这一部分岩体在坑道开挖之后,开始是产生向内的变形运动,其后则出现松动或坍塌。

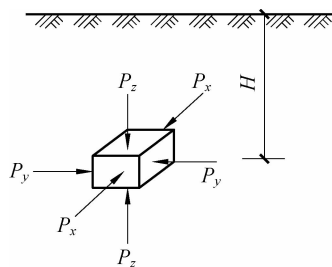


图 1-1 隧道开挖前任一处围岩的受力状态

3. 围岩的成拱作用

在工程实践中人们发现，当隧道在多裂隙围岩（包括一般土层）中埋置较深时，作用在支护结构上的围岩压力远远小于其上覆层自重所造成的压力。究其原因，可以用围岩的成拱作用来解释。在上述条件下，当坑道开挖后，如果任意让其变形、松动和坍塌，最后将会看到在坑道上方形成一个相对稳定的拱形洞穴，如图 1-2 所示。人们常称其为“天然拱”或“平衡拱”。它上方的一部分岩体承受着上覆地层的全部重力，如同一个承载环一样，并将荷载重力向两侧传递下去，这就是所谓的围岩的成拱作用。

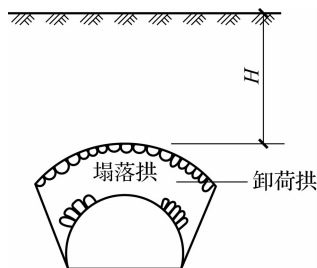


图 1-2 围岩的成拱作用

4. 影响围岩压力的因素

影响围岩压力的因素主要有两类：一类是围岩的工程地质因素，主要包括围岩的原始岩体的结构面等；另一类是工程结构因素，包括时间因素、坑道的形状和尺寸、隧道的埋置深度、支护因素、爆破因素、超挖回填因素等。其中起决定作用的是围岩的地质条件，其是内因。这里就对围岩压力的影响外因（工程结构因素）做简略的分析。

1) 时间因素

无论何种围岩，在坑道开挖后的暴露时间越短越好。采用喷射混凝土技术来支护围岩，可使围岩的暴露时间较短，能及时阻止围岩的变形，防止围岩发生过大变形而产生较大的松动压力，充分利用围岩自身的承载能力；若按照一般模筑混凝土衬砌的修筑方法，不采用喷射混凝土，从开挖到做完衬砌并使之形成一定的强度，往往需要较长的时间，衬砌一开始就要受到很大的松动围岩压力。衬砌结构就要做得相对厚些。要修筑永久性衬砌并使之提供所需的支护力的时间不宜过迟。

时间因素对围岩压力的发展有着十分重要的意义。一般来说，当其他因素不变时，压力的变化表现为时间的函数，其关系曲线如图 1-3 所示。根据围岩的坚硬与稳定程度的不同，以及支护的设置与否、支护质量如何，其增长速度和最终稳定数值的大小是不尽相同的。因此，不论何种围岩，开挖坑道后的暴露时间越短越好。在施工过程中，采用一般的模筑混凝土衬砌是很不利的，也是不经济的。而采用喷射混凝土衬砌这种新工艺、新技术是十分有效的，也是比较经济的。

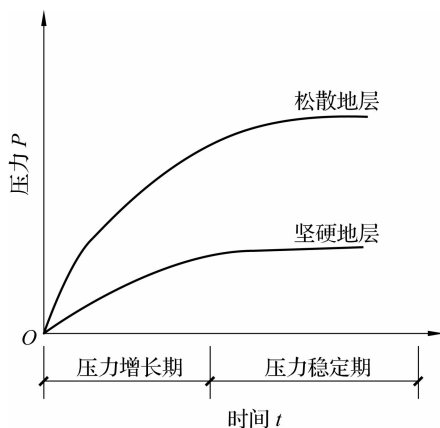


图 1-3 围岩的时间-压力曲线

2) 坑道的形状和尺寸

在同样的围岩条件下,坑道跨度越大,围岩越不稳定,围岩压力也越大。对中等跨度的坑道而言,压力与跨度之间呈直线的关系。当坑道有引起围岩应力集中的形状,即有明显的拐角时,围岩压力相对较大。

公路隧道的横断面设计形状为扁平,这是由于公路隧道的建筑限界基本上是一个宽度大于高度的截角矩形断面,常为形状扁平的马蹄形,双车道公路隧道的断面面积可达 80 m^2 。扁平的断面容易导致在拱顶围岩内出现拉伸区,而岩土等天然材料抗拉强度低,在施工中隧道顶部容易崩落,威胁人身安全。

3) 隧道的埋置深度

当上覆层较薄,不能形成天然拱时,这时坑道上方的土石重量将全部作用在支护结构物上,在此范围内,围岩压力一般是随着隧道埋深的增大而增大。但当埋深超过一定深度(临界深度)时才能形成天然拱。此时作用在支护结构物上的围岩压力仅是塌落拱范围内的土石重量,比前者小得多。当坑道埋深超过此范围时,则围岩压力的大小基本不受埋深变化的影响。前者称为浅埋式隧道,后者称为深埋式隧道。

4) 支护因素

在相同的围岩条件下,有支护的坑道围岩压力要比无支护的坑道小;支护及时的坑道围岩要比支护晚的坑道围岩压力小;支护与围岩密贴得越好则围岩压力越小;当支护的刚度较小即为柔性支护时,坑道的围岩压力相对较小。

5) 爆破因素

采用爆破法开挖对围岩的稳定极为不利,尤其是对地质条件较差的围岩更为不利,爆破的扰动很大,会造成围岩的压力过大,岩体松动甚至塌方。因此在隧道中,能用机械开挖的尽量不要爆破;若必须要爆破,尽量采用控制爆破技术,严格控制爆破用药量,采用光面爆破、预裂爆破等先进的爆破技术。

6) 超挖回填因素

衬砌背后的超挖部分在施工时回填不密实,使得围岩得不到很好的支护而继续松动,严重时会造成围岩坍塌,引起衬砌开裂甚至破坏。

综上所述,施工方法对围岩压力的影响大致可分为爆破的影响、支护的影响、坑道开挖暴露时间的影响等三种类型。对于地质较差的围岩,爆破的扰动很大,常常是造成过大的围岩压力,引起塌方的重要原因之一。一般来说,支护可以防止围岩松动往深处发展。所以有支护比无支护的围岩变形要小;支护及时比支护过晚的围岩压力要小。坑道暴露的时间越长,围岩越容易失稳、压力越大,对于易风化的围岩更是如此。

1.2.2 围岩压力的确定

隧道围岩压力的确定目前有三种方法。

第一种是直接测量法,是用仪器实地量测围岩压力的大小,这种方法最具说服力。但因量测技术手段方面的因素影响,用这种方法量测的结果不能充分反映真实情况。

第二种是工程类比法,即根据大量实际资料分析统计和总结,按不同围岩类别提出围岩压力的经验数值(经验公式),作为隧道工程确定围岩压力的依据。

第三种方法是理论计算法,是在实践的基础上从理论上研究围岩压力的计算方法。由于影响围岩压力的因素很多,企图建立一种完善的和适合客观实际情况的围岩压力理论及计算方法较为困难。

限于测试设备及技术水平,目前采用直接量测法仍很不普遍,而理论计算法则由于地质条件千变万化,难以达到准确性的要求,因此采用工程类比法估算围岩压力较为合适。

当隧道为深埋时,作用在支护结构上的围岩压力,从松动压力的概念看,实际为坑道周围某一破坏范围内岩体的重量,故解决这一破坏范围的大小就成为问题的关键。由经验可知:围岩越好则坑道就越稳定,坑道开挖所影响区域就越小,围岩压力值也就越小;相反,围岩越差则压力值相应就越大,这说明围岩压力。大小与围岩级别成正比。在围岩类别相同的条件下,坑道跨度越大,坑道的稳定性就越差,压力值也就越大,说明围岩压力的大小与坑道跨度成正比。

1. 浅埋隧道与深埋隧道的判别

浅埋隧道是指采用暗挖法施工、埋深较浅的隧道。在隧道埋深不大时,坑道开挖往往会使整个覆盖层产生扰动,较易发生洞顶坍塌,有时会使地表开裂下沉,因此会产生较大的围岩压力。

对公路隧道来说,浅埋隧道多出现在洞口段。深埋和浅埋隧道的分界有很多判定标准,一般是以坑道上方能否形成稳定的深埋围岩压力值来区分的,并且结合具体的地质、施工条件等因素来综合确定。

要形成稳定的深埋围岩压力值,显然除了需要前述的松动范围之外,还需要有足够厚度的岩(土)体,否则松动范围会一直扩展到地表。也就是说,深埋隧道、浅埋隧道的分界深度要比荷载等效高度大,荷载等效高度 h_q 可用式(1-7)计算得到。

$$h_q = \frac{q}{\gamma} \quad (1-7)$$

式中, h_q 为荷载等效高度(m); q 为垂直均布围岩压力(kPa); γ 为围岩天然容重(kN/m³)。

深埋隧道、浅埋隧道分界深度 H_p 可用经验公式计算,即

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_q \quad (1-8)$$

在矿山法施工条件下,I~Ⅲ级围岩取 $H_p = 2h_q$;Ⅳ~Ⅵ级围岩取 $H_p = 2.5h_q$ 。

2. 浅埋隧道围岩压力的计算方法

浅埋隧道围岩压力分两种情况进行计算。

1) 隧道埋深不大于等效荷载高度

在这种情况下,坑道上覆岩(土)体较薄,从安全的角度考虑,略去坑道上方土体下滑时周围土体所产生的阻力,即将上覆土柱全部重力作为围岩压力,视为均布时,垂直压力 q 为

$$q = \gamma H \quad (1-9)$$

式中, q 为均布垂直压力(kPa); γ 为坑道上覆围岩天然容重(kN/m³); H 为隧道埋

深 (m)，指坑顶至地面的距离。

侧向压力 e ，按均布荷载考虑时，其值为

$$e=\gamma\left(H+\frac{1}{2}H_t\right)\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi_g}{2}\right) \tag{1-10}$$

式中， e 为侧向均布压力 (kPa)； γ 为围岩天然容重 (kN/m^3)； H 为隧道理深 (m)； H_t 为隧道高度 (m)； φ_g 为围岩计算内摩擦角 ($^\circ$)，其值如表 1-22 所示。

表 1-22 各级围岩的计算摩擦角 φ_g

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
φ_g	$>78^\circ$	$70^\circ\sim78^\circ$	$60^\circ\sim70^\circ$	$50^\circ\sim60^\circ$	$40^\circ\sim50^\circ$	$30^\circ\sim40^\circ$

2) 隧道埋深大于等效荷载高度而小于隧道分界深度

坑道上覆土体下滑时要考虑滑面阻力的影响，否则会得到过大的压力值。

如图 1-4 所示，由于坑道开挖的影响而引起上覆岩（土）体下沉，即图中 $EFHG$ 下沉。而它的下沉必受到左右岩（土）体的阻碍，或者说两侧的围岩要被它带动下沉。这个阻碍作用在计算围岩压力时需予以考虑，为便于分析，根据实测和试验做出假定。

(1) 假定土体中形成的破裂面是一条与水平成 β 角的斜平面。

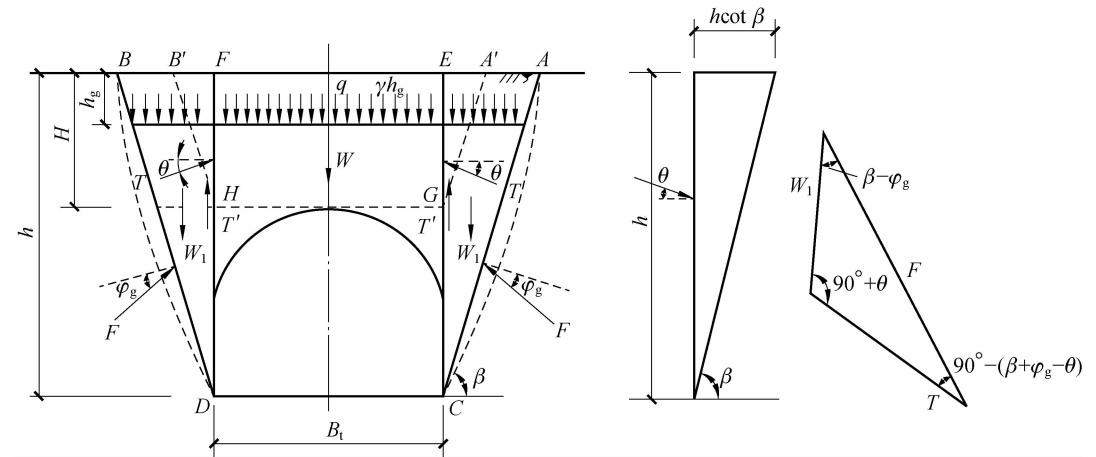


图 1-4 浅埋围岩压力计算示意图

(2) $EFHG$ 岩（土）体下沉，带动两侧三棱土体（见图 1-4 中的 FDB 及 ECA ）下沉，当整个土体 $ABDC$ 下沉时，又要受到未扰动岩（土）体的阻力。

(3) 斜平面 AC 或 BD 是假定的破裂面，分析时考虑黏聚力 c 并采用了计算摩擦角 φ_g 。另一滑面 FH 或 EG 并非破裂面，因此，滑面阻力要小于破裂面的阻力，若该滑面的摩擦角为 θ ，则 θ 值应小于 φ_g 值。当 θ 无实测资料时，一般可参考表 1-23 采用。

表 1-23 各级围岩的 θ 值

围岩级别	I、II、III	IV	V	VI
θ 值	$0.9\varphi_g$	$(0.7\sim0.9)\varphi_g$	$(0.5\sim0.7)\varphi_g$	$(0.3\sim0.5)\varphi_g$

在图 1-4 中,坑道上覆岩体 $EFHG$ 的重力为 W ,两侧三棱岩体 FDB 或 ECA 的重力为 W_1 ,未扰动岩体对整个滑动土体的阻力为 F ,当 $EFHG$ 下沉时,两侧受到的阻力为 T 或 T' 。

由图 1-4 可见,作用于 HG 面上的垂直压力总值 Q_q 为

$$Q_q = W - 2T' = W - 2T \sin \theta \quad (1-11)$$

三棱体自重为

$$W_1 = \frac{1}{2} \gamma h \frac{h}{\tan \beta} \quad (1-12)$$

式中, γ 为围岩天然容重 (kN/m^3); h 为坑道底部到地面的距离 (m); β 为破裂面与水平面的夹角 ($^\circ$)。

由图 1-4,根据正弦定理可得

$$\frac{T}{\sin(\beta - \varphi_g)} = \frac{W_1}{\sin[90^\circ - (\beta - \varphi_g + \theta)]}$$

即

$$T = \frac{\sin(\beta - \varphi_g)}{\sin[90^\circ - (\beta - \varphi_g + \theta)]} W_1 \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-13) 得

$$\begin{aligned} T &= \frac{\sin(\beta - \varphi_g)}{\sin[90^\circ - (\beta - \varphi_g + \theta)]} \cdot \frac{1}{2} \gamma h \frac{h}{\tan \beta} \\ &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\tan \beta - \tan \varphi_g}{\cos \theta \tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_g - \tan \theta) + \tan \varphi_g \tan \theta]} \\ &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\lambda}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (1-14)$$

$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \varphi_g}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_g - \tan \theta) + \tan \varphi_g \tan \theta]} \quad (1-15)$$

式中, λ 为侧压力系数,其他符号意义同前。

由式 (1-12) 及式 (1-13) 可知, β 值是未知的,也就是说 T 值是随 β 值的大小而变化的。在达到极限平衡状态的破裂面位置时,即阻力达到最大值时,有

$$\frac{d\lambda}{d\beta} = 0 \quad (1-16)$$

由此可求得

$$\tan \beta = \tan \varphi_g + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_g + 1) + \tan \varphi_g}{\tan \varphi_g - \tan \theta}} \quad (1-17)$$

至此,极限最大阻力 T 值可求得。将式 (1-14) 代入式 (1-11) 可求得作用在 HG 面上的总垂直压力 Q_q 为

$$Q_q = W - 2T \sin \theta = W - \gamma h^2 \lambda \tan \theta \quad (1-18)$$

由于 GC 、 HD 与 EG 、 FH 相比往往较小,而且衬砌与岩体之间的摩擦角也不同,前面分析时均按 θ 计,当中间土块下滑时,由 FH 及 EG 面传递,考虑压力稍大些对设计的结构也偏于安全。因此,摩阻力不计隧道部分而只计洞顶部分,即在计算中用埋深 H 代替 h 。这样,式 (1-18) 为

$$Q_q = W - \gamma H^2 \lambda \tan \theta \quad (1-19)$$

由于 $W = B_i H \gamma$,

故

$$Q_q = B_t H \gamma - \gamma H^2 \lambda \tan \theta = H \gamma (B_t - H \lambda \tan \theta) \quad (1-20)$$

式中, B_t 为坑道宽度 (m); 其他符号意义同前。

将 Q_q 换算为作用在支护结构上的均布荷载, 其示意图如图 1-5 所示。

$$q_1 = \frac{Q_q}{B_t} = \gamma H \left(1 - \frac{H}{B_t} \lambda \tan \theta \right) \quad (1-21)$$

式中, q_1 为作用在支护结构上的均布荷载 (kPa); 其他符号意义同前。

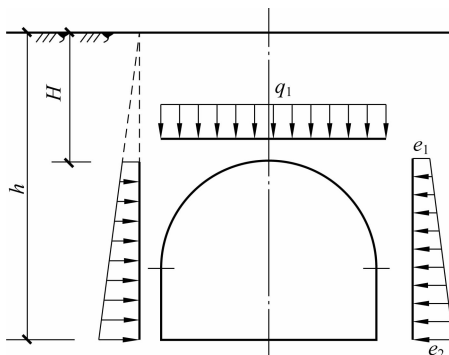


图 1-5 支护结构所受均布荷载示意图

作用在支护结构两侧的水平侧压力为

$$e_1 = \gamma H \lambda \quad (1-22)$$

$$e_2 = \gamma h \lambda$$

当视侧压力为均布压力时, 则有

$$e = \frac{1}{2} (e_1 + e_2) \quad (1-23)$$

由式 (1-21) 可知, 在坑道在某岩 (土) 体中, 若 γ 、 λ 、 θ 、 B_t 等均为常数时, 则有 $\frac{dq_1}{dH} = 0$ 。可得 q_1 为最大值 $q_{\max}$ 时的深度 H , 即

$$\frac{dq_1}{dH} = \gamma - \frac{2\gamma H}{B_t} \lambda \tan \theta = 0 \quad (1-24)$$

此时 $H = H_p$, 得

$$H_p = \frac{B_t}{2\lambda \tan \theta} \quad (1-25)$$

代入式 (1-21) 可得 $q_{\max}$ 值为

$$q_{\max} = \frac{\gamma B_t}{4\lambda \tan \theta} \quad (1-26)$$

由此可见, 浅埋隧道的围岩压力是随坑道埋深 H 增加而增加的, 当 $H > H_p = B_t / (2\lambda \tan \theta)$ 以后, 围岩压力则要逐渐减小; 当围岩压力等于深埋隧道荷载时, 则围岩压力将维持不变。

在判定深、浅埋隧道的分界时, 若用理论公式 (1-25) 也可得出 H_p 值, 但其往往与式 (1-8) 所求得的出入较大。事实上, 用理论公式计算时, 一些参数 (如 λ 等) 就带有主观性, 公式的推导又是由匀质材料出发, 把围岩视作各向同性体, 这与实际有出入。目

前,一般按式(1-8)判别,把理论公式(包括其他理论公式,如泰沙基公式等)、检算卸载拱法或其他经验判断法等作为参考。

2. 深埋隧道围岩均布压力

由前面分析可知,围岩压力值受到许多因素影响,但主要取决于岩体构造和结构面的组合等地质因素,并且压力分布很不均匀(对径向压力而言),岩质多裂隙岩体比土质岩体中的压力分布更不均匀。在某些围岩中,可见到呈拱形的暂时稳定的平衡拱。除黏性土及某些塑性岩石外,荷载的时间效应不显著,压力增长很快,在较短时间内就趋于稳定。

(1) I~V级围岩中的深埋隧道,围岩压力主要为变形压力,其值可按释放荷载计算,可参考设计规范,此处不再叙述。

(2) IV~VI级围岩中的深埋隧道的围岩压力为松散荷载时,其垂直均布压力及水平均布压力可按下列方法计算:

① 垂直均布压力。

$$q = \gamma h \quad (1-27)$$

$$h = 0.45 \times 2^{s-1} \omega$$

式中, q 为垂直均布围岩压力(kPa); γ 为围岩容重(kN/m^3),按表1-24取值; s 为坑道围岩级别; ω 为跨度影响系数,其值为 $\omega = 1 + i(B_t - 5)$, B_t 为坑道宽度(m), i 为 B_t 每增减1m时的围岩压力增减率,以 $B_t = 5.0$ m的垂直均布压力为准,当 $B_t < 5.0$ m时,取 $i = 0.2$,当 $B_t > 5.0$ m时,取 $i = 0.1$ 。

表 1-24 各级围岩容重

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	26~28	25~27	23~25	19~22	17~20	15~16

② 水平均布压力。深埋隧道围岩水平均布压力按表1-25确定。

表 1-25 深埋隧道围岩水平均布压力

围岩级别	I、II	III	IV	V	VI
水平均布压力 e	0	$< 0.15q$	$(0.15 \sim 0.3)q$	$(0.3 \sim 0.5)q$	$(0.5 \sim 1)q$

注:应用式(1-27)及表1-25时,必须同时具备下列条件:

a. $H/B_t < 1.7$, H 为隧道开挖高度(m), B_t 为隧道开挖宽度(m)。

b. 围岩为不产生显著偏压及膨胀力的一般围岩。

3. 围岩压力量测

坑道形状的选择、支护结构设计、围岩压力理论及坑道施工等的进一步深入研究,都需要更好地判断围岩稳定性,也即需要更好地确定围岩压力的大小、分布、方向等,因此对于围岩压力的实测工作,一直受到设计、施工等相关研究人员的重视。

围岩压力量测,一般可通过量测支护结构的变形或内力,然后推算围岩压力的间接方法,或用直接量测作用在支护结构上的压力的方法。

量测支护结构的变形或内力的方法很多,如可采用各种类型的支柱测力计(有机械式、电测式及液压式等),或在衬砌内埋设各种量测元件(如电阻应变片、钢筋应变计、

遥测应变计、混凝土应变砖等)量测衬砌的应变。

直接量测作用在支护结构上的压力,可采用各种类型(机械式、电测式、液压式等)的压力盒。

此外,还可以量测围岩的变形情况(量测中常采用量测锚杆,或量测坑道断面开挖后的收敛情况)及围岩深部的应力情况(采用量测围岩深部应力的应力计)。在试验室,还用模型试验的方法推算结构上作用的压力及围岩变形情况。

但是,时至今日在直接量测围岩压力时仍无法既量测切向压力又量测法向压力(在同一测点处);测得的压力值为围岩与衬砌间的接触应力(包含了主动压力和弹性压力),从测得的接触应力中来确定围岩压力值往往不能办到;由支护结构测得变形或内力来反推围岩压力值,则仍需要假定压力分布形状、分布范围等,这也就难以达到正确确定围岩压力的预期目的,加上就量测技术本身来说,在精确度及稳定性方面还存在问题,有待于进一步提高;量测元件的设置、仪表的操作等对量测结果也会产生影响,这与操作人员的技术水平及熟练程度有很大关系。因此,在围岩压力量测方面还有待于深入研究、改进和提高。



技能训练

围岩级别判定

地质资料:隧道为穿越秦岭的某高速公路,大面积分布为燕山期花岗岩。岩面新鲜呈浅灰色,风化后呈红色调,多为粗粒结构,有些带有斑晶,局部为细粒结构,呈块状构造。隧址区外断层对花岗岩无影响,节理较为发育,尤以剪节理为多,多高倾角,多贯通性差,断续出露,将岩体切割成块状。节理平均密度为4条/米。由于花岗岩风化深度有限,裂隙并不发育,泉水多呈浸出状流出,未见流量大于0.1 L/s的泉水出露。岩体纵坡速度为 $v_p=2\ 800\sim3\ 800\text{ m/s}$ 。

判断该围岩是Ⅳ级围岩还是Ⅴ级围岩。



学习评价

- (1) 隧道围岩分级方法有哪几种?
- (2) 我国现行隧道围岩分为几级?其考虑的主要因素有哪些?
- (3) 解释名词:围岩、围岩压力。
- (4) 什么是围岩的成拱作用?
- (5) 如何判别隧道是深埋还是浅埋?
- (6) 围岩压力量测的目的是什么?
- (7) 隧道围岩压力是随着隧道埋深的增加而增大吗?为什么?