

高等学校教学参考书

# 隧道工程地质

西南交通大学 蒋爵光 主编  
铁道部第四勘测设计院 朱梅生 主审  
长沙铁道学院 李家钰

中国铁道出版社

1991年·北京

## 前 言

本书是为高等院校工程地质专业、隧道及地下铁道工程和铁道工程等专业学生编写的教学参考书。在编写中，结合铁路工程实际，系统介绍了隧道工程建设中的主要工程地质问题及其研究内容，反映了国内外在这方面的新经验、新方法和新技术。本书内容包括隧道工程地质勘测、不同地质条件下隧道位置的选择、隧道围岩分类、洞室稳定性分析、隧道涌水量预测以及隧道施工、运营中有关工程地质问题等章节。

这本教学参考书是在西南交通大学工程地质专业原《铁路隧道工程地质》教材和隧道工程专业选修课《隧道工程地质》教材的基础上编写出来的。本书由蒋爵光主编，并编写了绪论、第一、三、四、五、七章，第二章由唐永富编写，第六章由李秉生、赵珣明编写。铁道部第四勘测设计院朱梅生高级工程师和长沙铁道学院李家钰老师主审。

编 者

## 内 容 提 要

本书比较系统地介绍了铁路隧道工程建设中有关的主要工程地质工作、问题及研究内容,其中包括隧道工程地质勘测、不同地质条件下隧道位置的选择、隧道围岩分类、洞室稳定性分析、隧道涌水量预测及隧道施工、运营中的工程地质问题等几个部分。

本书可作为铁路高等院校工程地质专业和隧道及地下铁道工程专业的参考书,也可作为铁路或其它部门有关隧道、地下洞室工作的工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

隧道工程地质

西南交通大学 蒋鹏光 主编

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 刘桂华 封面设计 刘景山

中国铁道出版社印刷厂印

---

开本: 787×1092mm 1/32 印张: 9.625 字数: 214 千

1991年12月 第1版 第1次印刷

印数: 1—1000册

---

ISBN 7-113-00916-6/TU·203 定价: 2.10元

# 目 录

绪 论	1
第一章 隧道工程地质勘测	7
第一节 隧道工程地质勘测的内容和应完成的资料	7
第二节 隧道工程地质勘测方法	26
第二章 不同地质条件下隧道位置的选择	40
第一节 不同地质构造区隧道位置的选择	41
第二节 不良地质现象发育地区隧道位置的选择	48
第三章 影响隧道围岩稳定性的地质因素	62
第一节 岩体中的初始应力及其与隧道围岩稳定性的关系	62
第二节 岩体结构特征与隧道围岩稳定性的关系	75
第三节 其它地质因素与隧道围岩稳定性的关系	95
第四章 隧道及其它洞室的围岩分类	100
第一节 围岩分类的意义和依据	100
第二节 我国铁路隧道围岩分类	106
第三节 其它几个分类的简介	119
第五章 洞室围岩的稳定性分析	132
第一节 洞室围岩的变形与围岩压力的概念	132
第二节 围岩稳定性分析方法	140

第三节	围岩稳定性分析的赤平极射投影方法	148
第四节	洞室围岩稳定性分析的模型试验方法简介	179
第六章	隧道水文地质条件及涌水量预测	185
第一节	基岩地区隧道的水文地质特征及其研究	185
第二节	隧道涌水量估算	199
第三节	地下水对隧道衬砌的侵蚀	230
第七章	与隧道施工运营有关的地质问题	257
第一节	地质条件与隧道开挖方法和施工技术的关系	257
第二节	不良地质地段隧道施工工程地质问题及处理	267
第三节	隧道衬砌、道床的变形及其与地质条件的关系	286
参考文献		299

## 绪 论

### 一、工程地质条件与隧道及地下洞室建设的关系

我国是个多山的国家,山区及高原约占全国面积的60%。修建在山区的铁路,隧道工程往往占有很大的比重。解放前修建的宝天铁路,差不多平均一公里一座隧道。解放后修建的几条山区铁路干线,如丰沙、宝成、贵昆、京原、湘黔、襄渝、成昆铁路,各条铁路的隧道总长均占线路长度的百分之十几以上。其中襄渝、成昆铁路竟分别达到34%和31%,成昆铁路沿大渡河畔一段线路长26km,有隧道13座,总长达21km,为线路的80%,被称为“地下铁道”。可见隧道工程在山区铁路建设中所占的重要地位。截止到1984年底,我国已修建了铁路隧道4676座,总长2126.5km,为世界上铁路隧道总延长最长的国家之一,现已达2500km以上。

随着国家建设事业发展的需要,为了缩短线路,改善列车运营条件,我国已经修建了许多长隧道(表0-1),其中大瑶山隧道全长达14.3km,是我国目前最长的隧道,也是世界铁路长隧道之一。

除铁路隧道外,世界不少国家还修建了许多公路隧道、水工隧道、过江隧道、海底隧道、地下电站、地下商业区、贮油库以及国防工程等隧道和地下洞室。在我国,地下洞室的建设也有较大的发展,如龚嘴电站地下厂房,横跨达24.5m,边墙高达48m,规模宏大。

上述这些隧道和洞室均是修建在地下的工程建筑物,以岩体(或土体)作为建筑的介质。这些地下工程可能埋设在

我国五公里以上铁路隧道\*

表0—1

隧道名称	所在线路	施工年月	长度 (m)	附注
大瑶山	京广	1981—1987	14295	双线
军都山	大秦	1984—	8460	双线
驿马岭	京原	1967—1969	7032	单线
沙木拉达	成昆	1964—1967	6379	单线
八盘岭	溪田(支)	1986—	6350	单线
平型关	京原	1968—1971	6190	单线
奎先达板	南疆	1974—1978	6152	单线
关村坝	成昆	1964—1966	6107	单线
南岭	京广	1980—1987	6058	双线
红旗	京通	1973—1975	5848	单线
彭莫山	枝柳	1971—1973	5592	单线
大巴山	襄渝	1970—1972	5333	单线
武当山	襄渝	1969—1973	5226	单线
平关	盘西(支)	1966—1970	5139	单线
白家湾	大秦	1984—	5057	双线

※据铁道部隧道工程局(1987)统计资料。

不同的地层中，可能遇到各种各样的地质问题。因而，隧道或地下洞室的设计、施工和使用显然与建筑地区的工程地质条件有着密切的关系。例如，在坚硬完整的岩层中修建隧道时，由于围岩稳定，在开挖时，坑道不易变形，暴露时间稍长也不致失稳。故可采用大断面的开挖方法，坑道一般不用支撑，也可不进行衬砌。而在软弱破碎的岩层中修建隧道时，由于围岩的稳定性差，如果一次开挖成大的断面，则易发生坍塌。因而须将隧道断面分部挖成，并且一般要随开挖随支撑，以减小围岩早期松动和岩体松动范围，而且坑道顶部不宜暴露过久，所以在上部断面开挖好之后即修筑拱圈，并随之完成全部衬砌。对于强度很低、非常破碎的围岩，在施工中还应加密支撑，增大衬砌的厚度，甚至需要设置仰

拱。由此可见，隧道的工程地质条件密切关系到隧道修建时的开挖方法、支撑形式以及衬砌结构的类型。

当隧道或地下洞室通过复杂或不良地质地段，如具有断层、溶洞、流沙、涌水、岩爆、瓦斯等地段时，隧道或地下洞室的设计、施工甚至使用都可能遇到困难，特别是在这些不良地质地段的施工中可能危及人身的安全。例如成昆线的关村坝隧道，因对待岩爆缺乏经验，在施工中，由于严重的岩爆现象，曾多次发生人身事故，威胁施工安全，影响施工进度。贵昆线的梅花山隧道，在施工过程中遇到了大溶洞，洞中并储存了大量地下水，结果只好改线绕行，使工程受到很大影响。又如日本修建的经过津轻海峡的青函海底隧道，全长53.85km，由于对凝灰岩断裂带内含有高压水缺乏认识，在施工中发生特大涌水，涌水量曾高达70m<sup>3</sup>/min，并发生隆隆巨响。这一事故，严重地影响了施工进度。因此，在进行隧道建设时，必须要注意查清隧道通过地段的工程地质条件，判断围岩的稳定性，预测可能出现的工程地质问题，并在设计中加以考虑，在施工中加以注意，以保证隧道工程建设的顺利进行。

对于其它一些地下工程，如地下电站，国防工程等，不仅由于要在其中安装机器设备，因此要求具有稳定的围岩，而且这类地下洞室的规模往往比较宏大，有的跨度、边墙可达数十米，洞室的形状也很复杂，故必须要在取得详细的地质资料及有关参数的基础上，才能作出合理的设计。又如贮油库、核废料贮存洞室，应避开裂隙发育的岩体修建，因为这类地下工程对所在地段的工程地质条件提出了更特殊的一些要求，以保证这些工程的正常使用。

上述的情况充分说明，工程地质条件是隧道和其它地下洞室进行正确设计和施工的基础。可以说：没有正确的工程



地质资料，对工程地质条件没有充分调查清楚，就不能有效地进行隧道和地下洞室的设计和施工。

## 二、隧道和地下洞室的工程地质研究

随着隧道和地下洞室建设的发展，工程地质工作在地下工程建设中的重要性日趋显著，相应的工程地质问题的研究和工程地质勘测、测试技术也得到了进一步的发展。

隧道建筑地段一般山高坡陡，林木茂密，不仅给隧道工程地质勘测工作带来很大的困难，而且仅凭少数地质人员的野外实地测绘和少量勘探工作往往很难完全查清全区的地质情况。近年来世界许多国家都在工程地质测绘中广泛应用了卫星遥感照片、航空遥感照片。根据卫星片和航空片所提供的波谱特征信息和形态特征信息来判释、研究，对于分析和鉴别地质构造特征、各种不良地质现象等都取得了良好的效果。这对提高工程地质测绘工作的效率和质量，有显著的实际意义。

近几年来，声波测试技术获得了很大的发展，并已用于隧道和地下洞室的测试。声波测试技术是利用声波在岩体中的传播特性参数，来判断岩体结构和特性。主要应用于岩石物理力学参数的测试（如动弹性模量和泊松比），评价岩体裂隙的发育程度，并可利用声波参数结合其它地质因素对岩体进行隧道及地下洞室围岩的工程地质分类；利用声波测井，进行工程地质分层，查明裂隙位置，确定风化层厚度，探测隧道及地下洞室围岩扰动区范围，为设计及施工提供依据。等等。在矿山坑道还采用声波发射技术（测试岩体在受力和发生变形过程中所产生的声波信号），侦测矿山危岩情况。

岩体应力测量技术，已在矿山、水工建设等地下工程中

得到应用，而在我国铁路隧道建设中，还只是刚刚开始（如在大瑶山隧道开展了岩体应力测试研究工作）。天然岩体中存在着初始应力，采用岩体应力测量技术对岩体的初始应力状态进行测量研究，进一步了解隧道围岩的力学特征，必将有助于隧道设计理论的进一步发展。

隧道和地下洞室的岩体模型试验，是按相似原理进行的模拟试验，用以研究洞室围岩中的应力分布、变形和破坏特征，评价隧道和地下洞室围岩的稳定性。这对于验证设计方案，预测围岩的变形和破坏，为进一步完善围岩分类或建立理论分析提供有关的物理基础，是有意义的。这方面的试验研究工作虽然已比较广泛地开展起来，但有一些理论和实际方面的问题尚待进一步研究解决。

除去上述通过模型试验，研究不同地质条件下围岩的稳定性，以期待进一步完善隧道和地下洞室的围岩分类外，关于围岩分类的研究，在许多部门，已相继提出了针对本部门地下工程特点的围岩分类方案。当前，有关这方面的研究工作，比较注意在如何定量确定围岩分类的判定指标，综合分析围岩稳定或围岩压力有关的地质和其它因素的影响方面。

关于隧道和地下洞室围岩的稳定性问题，除去用室内模型试验，或按围岩分类类型的判定来进行稳定性分析外，目前还普遍采用了赤平投影的分析方法。近来，又发展了对遍布节理岩体的稳定性分析方法。用这些方法并利用所测定的岩体有关的力学参数，可对隧道围岩的稳定性进行分析和评价。此外，针对围岩的节理裂隙等结构面情况，提出的一些相应的稳定性定量计算方法以及考虑了断层、节理等的有限元方法，在隧道和地下洞室的稳定性分析中，也在进一步探索和应用。

在隧道和地下洞室的工程地质和水文地质的勘探方面，我国已引进了水平钻探技术，在施工过程中，用于探测坑道前进方向可能遇到的岩层、地质构造以及地下水（水量、水压）等情况。这种超前钻探技术，对于预报不良地质和突然涌水有着特别实际的意义。

虽然如上所述在隧道工程地质研究和有关测试、勘探技术方面有了很大的发展，并积累了不少宝贵的实际经验，但在理论与实践方面还有许多问题尚待进一步研究和解决。如对岩体中初始应力场的特征尚待不断积累实测资料和开展研究，以便掌握岩体中初始应力的分布规律，进一步完善隧道和地下洞室的围岩压力的理论；对隧道和地下洞室的工程地质条件和围岩的稳定性研究方面，不仅要进行定性分析，而且要向定量方面发展；对于隧道涌水量的计算，目前虽然有许多方法，但还不准确，有时会遇到突然大的涌水而影响施工和安全，因此极待发展比较能符合实际的预测方法；在地质勘探技术和测试手段方面应向轻型、综合和自动化方向发展，以便更方便、更有效地探明隧道和地下洞室的地质条件，等等。

## 第一章 隧道工程地质勘测

隧道是一项地下工程，修筑在岩土体之中。因此，它的设计、施工甚至运营都与建筑地区岩土体的特性及其所赋存的地质环境，即隧道通过地段的工程地质条件，有着密切的关系。隧道施工开挖的方法、支撑的形式、衬砌结构的类型，以及工程造价、施工管理等，都取决于其所处地段的地质岩性、地质构造、地下水以及可能遇到的不良地质等情况。

由于隧道建筑物是整个铁路上面的一个组成部分，在一般情况下，隧道的位置应当根据整个铁道线路的选定来加以确定。而在特殊情况下，如对于长大隧道，特别是工程地质条件复杂的长大隧道，其位置的选定则往往取决于工程地质条件的优劣。也就是说，这类长大隧道的位置需要根据地质条件来加以选择，因而隧道位置的选定又控制着线路的局部方向。

由此可见，为了较好地选定隧道的位置，保证隧道的正确设计和施工，必须对隧道所处位置的工程地质条件进行仔细的勘测和认真的分析研究。即配合隧道的勘测设计，必须进行相应的工程地质勘测工作。

### 第一节 隧道工程地质勘测的内容和应完成的资料

#### 一、隧道工程地质勘测的基本内容

隧道工程地质勘测就是通过野外地质测绘，配合勘探和

测试工作，查明隧道通过地段的地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质和不良地质现象等工程地质条件，以便为隧道的位置选择和设计、施工提供所需的地质资料，根据隧道地段地质特征，判定隧道围岩的类别，明确主要的工程地质问题，提出相应的工程处理措施。

### (一) 地形地貌调查

山体的地形地貌是在长期自然地质作用下形成的，是岩性、构造、新构造运动和近期外动力地质作用等的综合反映。对隧道地区地形地貌的调查分析，不仅可以了解该地貌特征及其与隧道工程的关系，而且可以根据地貌特征间接判断岩性（图 1—1）或构造（图 1—2）等。

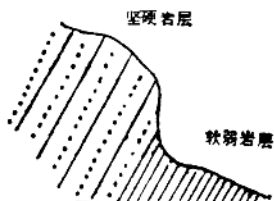


图 1—1 软弱岩层易被剥蚀

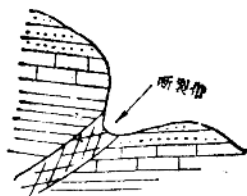


图 1—2 断裂带形成负地形

在地形地貌调查中，应查明隧道通过山体的自然状况。对河谷岸坡要查明山坡的形态和坡度，分析隧道穿过的阶地、岸坡是否稳定；对分水岭的垭口处要注意是否为断裂带所构成的；要查明分水岭两侧沟谷的形态、分布、密度、切割情况和发展趋势；分析冲沟的向源侵蚀和向下切割是否会破坏洞顶岩体的完整性，从而对隧道产生不利的影晌；根据隧道位置的标高和洞顶的埋置深度，从地形上分析有无偏压的可能（表 1—1）；洪水期时河流或地表沟谷水流会不会倒灌进入洞内；等等。

### (二) 地层岩性的研究

傍山浅埋隧道最小覆盖厚度

表1-1

围岩类别	最小覆盖厚度 $t$ (m)		断面示意图
	单线	双线	
IV	4~6	7~9	
III	7~10	10~15	
II	12~20	15~30	

- 注：①  $t_1$  为显著低于隧道围岩等级的软弱层或风化破碎层厚度；  
 ② 表列数值不适用于有显著不利结构面的情况；  
 ③ 表列数值未考虑隧道外侧有其它工程或建筑物的情况；  
 ④ 当  $t_1$  较大，且  $t_1 + t$  大于按  $t_1$  的围岩类别所需最小覆盖层厚度时， $t + t_1$  用该围岩类别所需最小覆盖层厚度值；  
 ⑤ 小于表列数值，便应考虑偏压作用。

岩层是构成隧道的介质，它的特征自然是与隧道工程有着密切的关系。在工程地质勘测中，要查明隧道通过地段的地层层序、年代、岩层分布和岩相变化规律。特别是必须查清隧道洞身的岩层顺序和厚度、岩性特征和物理力学性质，以及岩石的风化程度（表 1-2）等。

不同成因类型的岩石具有不同的特征。沉积岩、岩浆岩和变质岩由于形成过程不同，其矿物成分，特别是结构构造和岩相特征有较大的区别，因而它们的物理力学性质亦具有各自的特点（表 1-3、1-4、1-5、1-6、1-7、1-8）\*。在调查中，要注意软弱夹层的分布和厚度。因为软弱岩层强度低，易于吸水和变形，对隧道围岩的稳定性不利。更要特别注意查明隧道是否通过如煤层、含盐地层、膨胀性地层及有害矿体等特殊地层。因为煤层中可能有沼气等有

\* 表 1-3 至表 1-7 据孙广忠（1983）稍加补充

害气体存在；含盐地层可能促使混凝土遭受腐蚀；含盐地层、膨胀性地层可能产生膨胀现象而致使隧道围岩发生变形和破坏；其它有害矿体不仅可能产生有害气体并且可能具有放射性。因此，应该查明这些特殊地层可能产生的危害和影响，要对有害气体及放射性物质的含量等作出评价，预测由于含盐地层引起的地下水的侵蚀性和由含盐地层、膨胀性地层引起导洞的膨胀变形等等。

岩石风化程度分级

表1—2

风化程度分级	鉴 定 标 准		
	岩矿颜色	岩石结构	破碎程度
未经风化	所有矿物及其胶结物的颜色都是新鲜的	保持原有组织结构	除构造裂隙外，肉眼见不到其它裂隙
风化轻微	岩石颜色比新鲜岩石暗淡，只节理面附近部分矿物变色	组织结构未变，沿节理面稍有风化现象或有水锈	少数风化裂隙，但不易与新鲜岩石区别
风化较重	造岩矿物失去光泽，部分易风化的矿物，如长石、黄铁矿、橄榄石已改变了颜色，黑云母失去了弹性并变为黄褐色	部分岩体结构已遭破坏，裂隙面可能有风化夹层，一般为块状或球状结构	风化裂隙发育，完整性较差
风化严重	岩石及大部分矿物已变色，如黑云母已呈棕红色	组织结构大部分破坏，矿物变质，形成次生矿物，如斜长石风化形成高岭土等，可能形成圆球状结构，球心仍是新鲜的。	松散破碎，完整性很差
风化极严重	已完全变色，黑云母不仅变色，且已变为蛭石	组织结构完全破坏，仅外观保持了岩体状态。矿物晶体间失去胶结联系，大部分矿物变异，如长石变成高岭土、叶蜡石、绢云母；角闪石绿泥石化；石英松散成砂粒等等	用手可压碎

(三) 地质构造的研究

碎屑沉积岩的岩石类型

表1-3

岩石类型	颗粒成分	成岩特征及其力学性质特点
泥岩	粘土为主	矿物仍为粘土矿物，易风化、膨胀和收缩，强度较低
页岩	粘土及粉土	粘土矿物已脱水、绢云母化，页理发育，比较均匀，方向性较强
砂岩	砂及粉土	主要决定于胶结物，主要有硅质、铁质、钙质及粘土质四种，其强度依次降低。其岩相特征与搬运力及堆积环境关系很大。
砾岩	砾石、砂粘土	

有机沉积岩、化学沉积岩、火山沉积岩的岩石类型 表1-4

岩石类型		主要物质来源	成岩特征及力学性质特征
有机沉积岩	硅质岩	硅藻土	常呈团块状、透镜状，层理不明显，质地坚硬，常与灰岩共生
	石灰岩	石灰藻、有孔虫、珊瑚、贝壳等	常呈厚层，岩相及层厚较稳定
	煤、油页岩等可燃性有机岩	植 物	质地软、变形大、强度低
化学沉积岩	硅质岩(如燧石岩、磷灰岩等)	硅质凝胶	常呈团块状、层状及透镜夹层，坚硬易碎
	石灰岩、白云岩	石灰质凝胶	岩相及厚度都比较稳定，变形小，强度高
	岩盐	主要为 $ACl$ 、 $ASO_4$	有的单独成层，有的散在各种沉积岩层中
火山沉积岩	火山凝灰岩、砾岩、火山集块岩、凝灰熔岩等	火山灰及火山碎屑	常与熔岩互层出现，质地有软有硬，易风化，常形成有粘土质软弱夹层

地质构造是构成隧道地区工程地质特征的基本骨架，因而是隧道工程地质勘测中的重要内容。在地质构造研究中，



岩浆岩岩石类型及其特征

表1—5

成岩条件	产状特征	岩相特点	岩石类型			岩石强度	抗风化能力
			酸性岩	中性岩	基性岩		
深成岩	侵入体	粗晶等粒	花岗岩	闪长岩	辉长岩	小 ↓ 大	弱 ↓ 强
浅成岩	岩盘、岩墙、岩脉、岩株	斑状	花岗玢岩	闪长玢岩	煌斑岩		
		细晶	长英岩		辉绿岩		
喷出岩	有层理呈层状	玻璃质有流动构造	流纹岩 粗面岩	安山岩	玄武岩 (有柱状节理)		
岩石强度			大———→小				
抗风化能力			强———→弱				

沉积岩变质形成的岩石类型

表1—6

变质程度	岩石类型			矿物特征	岩石构造	岩石强度	抗风化能力
	碎屑岩	泥灰岩	石灰岩				
浅变质	板岩类 千枚岩类	钙质板岩 钙质千枚岩	结晶石灰岩	绢云母 方解石 微晶	不完整的片理	低	弱
中变质带	片岩	钙质片岩	大理岩	白云母 长石 方解石	片理	中	中
深变质带	片麻岩	钙质片麻岩	大理岩	长石、石英 云母、方解石	片麻理	高	强
石英岩：可在不同变质相条件下，由砂岩或硅质岩经区域变质作用重结晶形成。硅质成分的原岩由于热接触变质作用也可形成。主要由石英组成，一般为块状构造，强度较高。							

要查明隧道地区所处区域性地质构造的部位，特别是要注意查明是否处于几个构造体系的复合部位。因为在这些部位，构造系统往往彼此联系，形成复杂的构造体系，褶皱、断裂发育，岩层构造变动强烈，岩体破碎。在调查中还应对岩层的产状进行仔细的测量，并根据岩层出露情况分析褶皱、断裂