

# 隧道衬砌荷载计算理论 及岩溶处治技术

傅鹤林摇韩汝才摇著

中南大学出版社

# 前摇言

随着经济的飞速发展，需要修建越来越多的公路和铁路，其中在山区修建公路和铁路需要修建大量的隧道。破碎围岩中隧道的荷载计算准确与否直接影响衬砌结构的设计质量，是困扰隧道科技工作者的难题之一。本书从岩体结构的观点出发，将隧道围岩分成连续介质、碎裂介质、块裂介质和板裂介质，针对不同类别求出了单拱和连拱隧道衬砌荷载的理论解，并借助数值分析方法进行了验证。连拱隧道的衬砌荷载理论计算，在国内外是首次提出。本书提出的不同围岩类别隧道衬砌荷载计算的理论解，可为破碎围岩中单拱和连拱隧道的衬砌结构的优化设计提供参考和指导。

在岩溶发育地质条件复杂的山区修建隧道，岩溶的处治是困扰隧道科技工作者的另一难题。本书针对渝怀线的干溪沟隧道，采取地质雷达超前预报该隧道前方地段为填充性岩溶，确定岩溶的位置、边界、形状大小。揭露后，采取模糊优化技术，提出了该岩溶处治的复合地基技术，并采用有限元技术对地基加固效果进行了评估。本书提出的复杂地质条件填充性岩溶成套处治技术，对隧道施工方案和施工措施的选择，确保隧道的安全、快速施工，具有十分重要的指导作用。

本书通俗易懂，实用性强，可供隧道工程界的工程技术人员、科研工作者及研究生、高年级本科生阅读。

本书第 1 章和第 2 章内容由刘高飞高级工程师和韩汝才高级工程师撰写，其余部分由傅鹤林撰写。中国工程院院士曾庆元、李亮教授和朱汉华教授级高级工程师为本书的内容提出了许多宝贵意见。中铁十七局王国钧提供了十分重要的现场资料。范臻辉、吕建兵、周宁和郭建峰为本书的撰写查阅了大量的资料并做了大量的文字整理工作。笔者在此一并致以深切的谢意。

由于笔者理论水平和实践经验有限，书中难免有欠缺、不妥甚至谬误之处，恳请各位专家、学者和广大读者批评指正。

傅鹤林

2009 年 12 月于长沙

# 目 录

## 第一篇 隧道围岩与衬砌作用机理

第 1 章 国内外发展现状及存在的问题 .....	(猿)
1.1 概 述 .....	(猿)
1.2 目前我国公路隧道设计过程中存在的主要问题 .....	(愿)
1.3 本篇的主要研究内容 .....	(苑)
第 2 章 围岩中单拱隧道荷载计算的理论解 .....	(员)
2.1 概 述 .....	(员)
2.2 单拱隧道衬砌荷载的力学分析 .....	(员)
2.3 本章结论 .....	(源)
第 3 章 破碎围岩中单拱隧道荷载计算的数值分析解与解析解的对比分析 .....	(源)
3.1 数值分析解计算模型 .....	(源)
3.2 围岩作用于衬砌垂直荷载的理论解和数值分析解对比 .....	(缘)
3.3 本章结论 .....	(缘)
第 4 章 破碎围岩中连拱隧道荷载计算的理论解 .....	(缘)
4.1 引 言 .....	(缘)
4.2 碎裂介质中连拱隧道荷载的解析解 .....	(缘)
4.3 块裂介质中连拱隧道荷载的解析解 .....	(缘)
4.4 板裂介质围岩的中连拱隧道衬砌与围岩相互作用机理研究 .....	(缘)
4.5 本章结论 .....	(远)
第 5 章 破碎围岩中连拱隧道荷载计算的数值分析解与解析解的对比分析 .....	(远)
5.1 数值分析解计算模型 .....	(远)
5.2 围岩作用于衬砌垂直荷载的理论解和数值分析解对比 .....	(苑)
5.3 本章结论 .....	(苑)
第 6 章 本篇结论 .....	(苑)
参考文献 .....	(苑)

## 第二篇 复杂地质条件下隧道填充性岩溶处治技术研究

第 7 章 绪 论 .....	(愿)
7.1 隧道岩溶的危害及项目的工程背景 .....	(愿)

第 1 章 隧道岩溶处治技术研究的国内外发展概况及存在的问题 .....	( 1 )
第 2 章 本项目的研究意义、国内外研究现状及准备做的工作 .....	( 2 )
第 3 章 本篇的研究内容和思路 .....	( 3 )
第 4 章 地质超前预报 .....	( 4 )
第 4.1 节 地质超前预报的原理 .....	( 4 )
第 4.2 节 地质超前预报的实施 .....	( 5 )
第 4.3 节 地质超前预报的结果分析 .....	( 6 )
第 4.4 节 本章小结 .....	( 7 )
第 5 章 填充性岩溶软基加固选型系统分析与应用 .....	( 8 )
第 5.1 节 引言 .....	( 8 )
第 5.2 节 模糊数学评价模型的建立 .....	( 9 )
第 5.3 节 最优方案算例分析 .....	( 10 )
第 5.4 节 本章小结 .....	( 11 )
第 6 章 所选方案的试验研究 .....	( 12 )
第 6.1 节 复合地基理论现状综述 .....	( 12 )
第 6.2 节 按复合地基理论确定旋喷桩的地基承载力、控制沉降 .....	( 13 )
第 6.3 节 现场试验工艺 .....	( 14 )
第 6.4 节 试验的具体实施 .....	( 15 )
第 6.5 节 本章小结 .....	( 16 )
第 7 章 所选方案的效果分析评价 .....	( 17 )
第 7.1 节 评价方法的确定 .....	( 17 )
第 7.2 节 填充性岩溶软基处治技术的三维有限元分析 .....	( 18 )
第 7.3 节 复杂地质条件下隧道填充性岩溶处治效果的数值模拟研究 .....	( 19 )
第 7.4 节 本章小结 .....	( 20 )
第 8 章 结论及发展展望 .....	( 21 )
第 8.1 节 本篇结论 .....	( 21 )
第 8.2 节 发展展望 .....	( 22 )
参考文献 .....	( 23 )

# 第一篇 隧道围岩与衬砌作用机理

# 第 1 章 国内外发展现状及存在的问题

## 1.1 概述

长期以来,国内外一些发达国家非常重视公路隧道的建设,尤其是欧洲一些国家和日本等发达国家在挖掘长大隧道和宽大跨径隧道方面处于世界领先水平,建成的最长公路隧道已超过 10 km(表 1-1),先后诞生了一些新的隧道设计、施工方法和技术[如新奥法( NAR)、挪威工法( NAR)、信息反馈设计与施工法等]。其中新奥法最适用于机械或人工进行开挖的松软(土)层,这时节理和开挖不占主要地位,断面通常成为圆滑的轮廓,并能建立起较为完整的荷载承受环。新奥法一改过去那种围岩是荷载来源的传统观念,认为围岩本身是支护隧道等地下工程的主要力量,充分发挥围岩和支护系统的共同作用,保护围岩、利用围岩、控制围岩变形是其遵循的主要原则:在决定二次支护的时间和范围等方面,监控量测起着重要作用。挪威工法比较适合于较硬的地层(表 1-1),这时节理和超挖占主要地位,通常的开挖方法为钻爆法或硬岩隧道掘进机( TBM);挪威工法强调对隧道工程地质的全面调研描述。L. 普朗特等人( 1933)提出的 RMR 系统岩体质量分类方法,锚杆是岩体支护的最主要形式,它可以最大限度地调动围岩的强度[1];由于可能超挖,这种情况下刚性的钢架或格栅梁就不适宜大量采用,对裂缝中有粘土和不稳定的岩体就更需要喷混凝土或钢纤维混凝土来加强锚杆。与新奥法相比,挪威工法不常采用最终混凝土衬砌,因而可以大大降低成本,其费用一般仅为新奥法成本的 1/2 左右。隧道工程的信息反馈设计和施工法强调“边挖边测”流程:首先根据施工前的工程地质勘察资料进行预设计,然后付诸施工,同时进行施工监控量测并依其反馈的动态信息修改预设计;再施工、再量测,直到形成一个长期稳定的洞室结构体系,即把过去截然分开的施工和设计两个阶段融为一体,构成一个完整的实际施工过程(图 1-1)。

近年来,我国国民经济高速发展极大地促进了交通基础设施的兴建,尤其是高等级公路和高速公路的修建,在全国范围内正方兴未艾;目前西部大开发的实施,更极大地促进了这一筑路热潮的延续。为适应国民经济的发展,交通部制定了我国高等级公路在 2000 年前建成五纵七横,总里程近 5 万 km 的国道主干线的规划。经过 20 余年的建设,目前我国高等级公路仅 1 万余 km,因此在今后近 10 年中,还需要修建近 4 万 km 的高等级公路,任务十分艰巨。我国地形以山区为主,由于山区地区多为崇山峻岭,地形、地貌和工程地质和水文地质条件十分复杂,历来是我国滑坡地质灾害的多发区和重灾区。且我国人均耕地面积少,因此必然要修建相当多的隧道。据不完全统计,我国已建成公路隧道 1000 多座,总里程超过 1000 km;这些公路隧道在降低交通事故发生率、缩短行车距离、提高车速、保护环境等诸多方面发挥了积极作用,取得了良好的经济效益。表 1-1 给出了我国长度 1 km 以上的主要公路隧道。但是这些公路隧道的建设过程中,却相继遇到了不少复杂工程地质难题,诸如软弱围岩(包括断层破碎带)坍塌、高地应力与岩爆、大变形、岩溶与涌水泥砂和煤层瓦斯及有害

气体(如匀杂等)防治等;由此而产生的在不明或不良工程地质条件下山区公路隧道复杂工况施工过程中的围岩稳定性问题日益突出,致使施工过程中的盲目性和主观性均较大,故稍有不慎或处理不当,便使工程质量受到严重影响或破坏,并使工程造价大幅度增加[远[苑[图]。

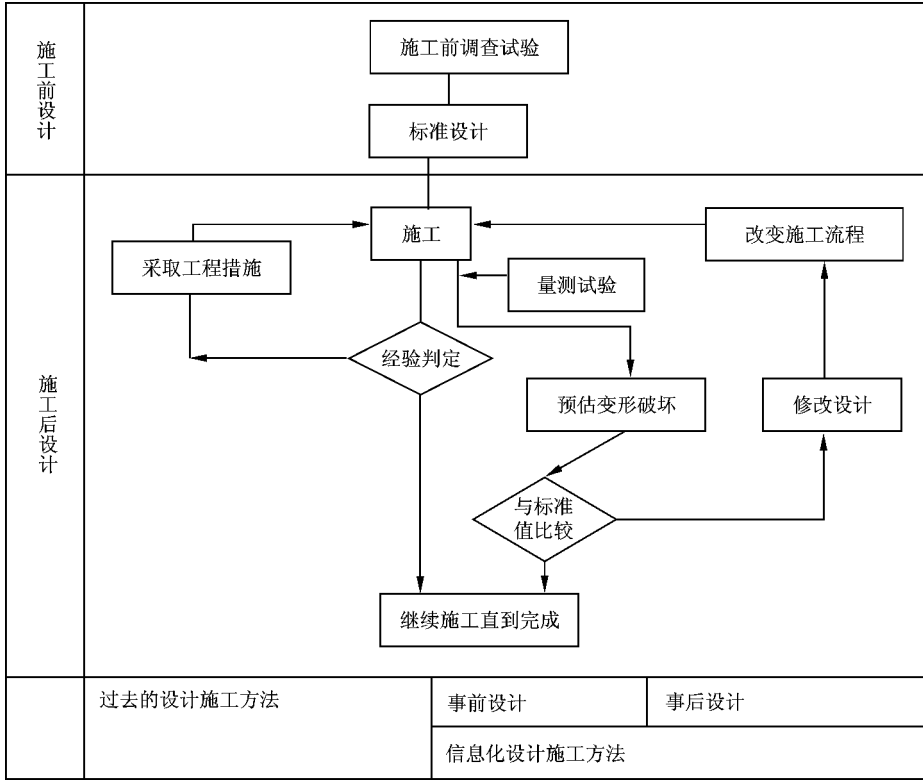


图 员原瑶信息反馈设计与施工法流程

表 员原瑶国外主要长大公路隧道

隧道名称	所在国	长度(皂)	工期(年)	竣工年	车道宽度(皂)	车道洞数	通风方式
昂喇喇	瑞士	员远猿园	员猿	员远猿园	苑愿	圆伊园	横流式
粤耀甲	奥地利	员远苑园	缘	员远苑愿	苑缘	圆伊员	横流式
孕耀译	法国、意大利	员远猿愿		员远猿园	苑园	圆伊园	横流式
酷乐月	法国、意大利	员远苑起	苑	员远缘缘	苑园	圆伊员	半横流式
关越	日本	员远猿愿	怨	员远缘缘	苑园	圆伊员	竖井纵流式
东京	日本	怨猿园	愿	员远苑苑		猿伊园	竖井纵流式
别耀社	意大利	员远苑缘		员远苑苑	苑缘	圆伊园	纵流式
久耀月	瑞士	怨猿园	员园	员远猿园	苑缘	圆伊员	横流式

掘进续表

隧道名称	所在国	长度(米)	工期(年)	竣工年	车道宽度(米)	车道洞数	通风方式
惠那山	日本	1000	1	1963	10	1	纵流式
耶拿	奥地利	1000	远	1968	10	1	横流式
第二新神户	日本	1000	源	1968	10	1	斜井纵流式
新神户	日本	1000	苑	1968	10	1	横流式
阿基	法国	1000	猿	1968	10	1	横流式
马塞	奥地利	1000	缘	1968	10	1	横流式
苏利	瑞士	1000	缘	1968	10	1	半横流式
莱恩	奥地利	1000	远	1968	10	1	横流式
宰恩	德国	1000	缘	1968	10	1	横流式

表 5-1 挪威工法(掘进)的基本特征

掘进通常应用的范围

有节理的岩体：较硬的等级限度(抗压强度  $10 \sim 20 \text{ MPa}$ )  
 粘土承载地带，受力的厚板(  $10 \sim 20 \text{ MPa}$  )

掘进通常的开挖方法

钻爆法，硬岩隧道掘进机，粘土地带人工开挖

掘进临时支护与永久支护可按下列方式选取

就地混凝土拱，钢纤维混凝土 锚杆，锚杆 钢纤维混凝土，锚杆 喷射混凝土，系统锚杆，定点锚杆，无需支护。

- 掘进临时支护成永久支护的组成部分
- 掘进不用钢丝网加固
- 掘进不用钢构架或格栅梁，在粘土地带使用喷混凝土加劲肋
- 掘进承包商选用临时支护
- 掘进业主 顾问选用永久支护
- 掘进不常使用最终的混凝土衬砌，因为系统锚杆加钢纤维混凝土通常作为永久支护

掘进岩体特性

- 掘进预计岩体质量
- 掘进预计所需的支护
- 掘进隧道施工中两者相结合(仅在关键时量测)

掘进挪威法的优点

- 掘进在钻爆法施工的隧道中进度快
- 掘进改进安全
- 掘进改善环境

表 员屏瑶我国 员噪皂 以上的公路隧道(不完全统计)

隧道名称	长度(皂)	洞数	机械通风形式	备注
梧桐山隧道	圆苑	双洞	半横流式、纵向	
板樟山隧道	员苑	双洞	半横流式	
后门隧道	员苑	双洞	纵流式	
盐田坳隧道	员苑	双洞	纵流式	
开口岭隧道	员苑	双洞	纵流式	
焦冲隧道	圆苑	双洞	纵流式	
石苍岭隧道	圆苑	双洞	纵流式	
大宝山隧道	员缘	双洞	纵流式	远车道
靠椅山隧道	圆苑	双洞	纵流式	远车道
大梅山隧道	员苑	双洞	纵流式	
柚树下隧道	员苑	双洞	纵流式	
清潭隧道	猿苑	双洞	纵流式	
飞鸾岭隧道	猿缘	单洞		
五显岭隧道	员缘	双洞	竖井纵流式	
龙门岭隧道	员苑	双洞		
石码岬隧道	圆苑	双洞		
大坪山隧道	圆苑	双洞		
贵新隧道	愿苑	双洞		
严山岭隧道	员苑	单洞		
赤石岭隧道	员缘	单洞		
大溪岭隧道	源苑	双洞	竖井纵流式	
黄土岭隧道	员苑	双洞	纵流式	
塘岭隧道	员苑	双洞	纵流式	
任胡岭隧道	员苑	双洞	纵流式	
盘龙岭隧道	圆缘	双洞	纵流式	
桑州岭隧道	员苑	双洞	纵流式	
延安东路隧道	圆苑	单洞	全横流式	
泥巴山隧道	愿缘	双洞		
打浦路隧道	圆苑	单洞		
云台山隧道	猿苑	单洞	纵流式	
中梁山隧道	猿苑	双洞	竖井纵流式	
铁山坪隧道	圆缘	双洞	纵流式	
义学大山隧道	圆苑	双洞	纵流式	
真武山隧道	猿苑	双洞	竖井纵流式	
青龙嘴隧道	员苑	双洞		
小垭山隧道	员苑	双洞		

瑶瑶续表 员员员

隧道名称	长度(皂)	洞数	机械通风形式	备注
同兴寨隧道	员员员	双洞		
铁山隧道	员员员	单洞	纵流式	
黄草山隧道	员员员	双洞	纵流式	
二郎山隧道	员员员	单洞	纵流式	
华荃山隧道	员员员	双洞	纵流式	
石黄隧道	员员员	双洞	纵流式	
尖子山隧道	员员员	双洞	竖井纵流式	
八盘岭隧道	员员员	单洞		
大峪岭隧道	员员员	双洞	纵流式	
吴家岭隧道	员员员	双洞	纵流式	
老爷岭隧道	员员员	双洞		
麻街岭隧道	员员员	双洞	纵流式	
土地岭隧道	员员员	双洞	纵流式	
秦岭隧道	员员员	双洞	纵流式	
彬县隧道	员员员	双洞	纵流式	
牛郎山隧道	员员员	双洞	竖井纵流式	
六盘山隧道	员员员	单洞	纵流式	
向阳洞隧道	员员员	单洞		
西红梁隧道	员员员	单洞	纵流式	
红岩隧道	员员员	单洞		
风梅垭隧道	员员员	单洞	纵流式	
青杠哨隧道	员员员	单洞	纵流式	
九顿坡隧道	员员员	单洞	纵流式	
大风丫隧道	员员员	双洞	纵流式	
天山 猿号隧道	员员员	单洞		
潭峪岭隧道	员员员	双洞	纵流式	远车道
七道梁隧道	员员员	单洞	纵流式	
天水隧道	员员员	单洞	纵流式	
大板山隧道	员员员	单洞	纵流式	
珠江隧道	员员员	双洞	纵流式	
板石隧道	员员员	双洞	纵流式	
高岭隧道	员员员	双洞	纵流式	
密江隧道	员员员	双洞	纵流式	
石碑岭隧道	员员员	单洞	纵流式	

## 目前我国公路隧道设计过程中存在的主要问题

目前我国公路隧道设计过程中存在的主要问题为<sup>[1][2][3][4]</sup>：

(一) 隧道围岩分类是隧道工程的基本和重要的工作，<sup>[5][6][7][8]</sup>认为，要利用围岩就要保护围岩，把围岩看成是构成支护结构的一部分，不使其因开挖而受到大的扰动或造成围岩较大的松弛范围，在开挖顺序、机具选择、爆破方法等方面都要综合考虑。用于不同目的的分类，多种多样。国内外的岩体分类方法现状为：

普罗脱亚克诺夫(普氏分类法)<sup>[9]</sup>1951年提出以岩石坚固性系数分类，共分成十类。20世纪<sup>[10]</sup>70年代在我国广泛使用。该法简单，粗浅，评价因素单一，但对我国地下工程建设起过重要作用。现在国外已基本上不用该法，而我国有些部门还在使用。

太沙基(<sup>[11]</sup>1925年提出)分类方法在北美曾经广泛使用，它将岩体分成九类，它主要适用于拱形金属支架支护，条件过于严格限制，后被迪尔和巴顿分类方法所取代。而我国目前有些部门在使用普氏分类法的同时，有时也采用太沙基分类法。

迪尔围岩分类法，是按照岩体质量指标(<sup>[12]</sup>1963)分类，共分成五类，分类因素过于单一，现已基本不用，国内也是如此。

比尼奥斯基(<sup>[13]</sup>1965)节理岩体的地质力学分类法，为多因素定量分类法，分成五类，其分类因素为：岩石强度、岩芯质量指标、节理间距、地下水、节理方向和工程轴线之间的关系。目前国外应用较为普遍，考虑因素比较全面，不足之处是没有考虑围岩应力，不适合于挤压、膨胀和涌水影响造成的极其软弱岩体分类。

巴顿分类法是岩体质量指标分类，是根据地下开挖稳定性的大量实例，提出的确定岩体隧道开挖质量指标的方法，为多因素定量分类，共分为九类。其分类因素为：岩石质量指标、节理组数、节理粗糙度系数(<sup>[14]</sup>1972)、节理蚀变影响系数、节理水折减系数，是目前国外普遍应用的岩体分类，特别适合于软弱风化岩体的围岩分类。

威克姆围岩分类法，为岩体结构评价分类，为多因素分类，共分为五类。分类因素为：岩石强度、岩体结构、地质构造影响、节理发育程度、节理产状与工程轴线之间的关系、地下水影响等。该分类方法也是目前国外应用的。

日本池田和颜的隧道围岩强度分类，主要是根据弹性波传播速度进行的分类，是以定量为主的分类，分为七类。建立起不同岩质、破碎带、裂隙发育情况、风化程度与弹性波之间的关系，龟裂系数与岩体完整性状态之间的关系。同时考虑了准围压、抗拉强度、岩层泊松比、有无塑性地压、涌水状态。应用弹性波速度量测解决复杂的岩体结构问题，为围岩分类提供了新手段。此外日本新奥法设计施工指南中的围岩分类(<sup>[15]</sup>1978)分为规划阶段的围岩分类和施工阶段的围岩分类。规划阶段围岩分类，岩石种类按<sup>[16]</sup>1979年池田和颜分类方法，但做了部分修改，为多因素定量分类，分为五类。分类以弹性波速度为主，考虑了岩石性质、围岩强度比。施工阶段的围岩分类主要根据开挖后围岩的变形，开挖面状态，毛洞状态，岩石强度，洞内围岩状态进行分类。定量与定性方法相结合，它强调了应用量测手段和岩体工程地质力学方法。

地下水的存在直接影响围岩的力学性能，也是隧道病害的主要原因之一，国外围岩分类方法中对地下水都作了定量规定，且都考虑工作面开挖对围岩性能动态影响，故围岩分类

较为准确,对隧道的设计和施工起到较好的指导作用。

国内<sup>[1][2][3]</sup>公路部门隧道设计规范中对围岩的分类主要考虑围岩的密度、弹性抗力系数、泊松比、内摩擦角、摩擦系数、岩体质量指标和弹性波波速度等,对于地下水未做定量规定。由于地下水的存在直接影响围岩的力学性能,又是隧道病害的主要原因之一,因此,对于地下水不做定量规定,且很少考虑隧道开挖对围岩性能的动态影响,势必引起围岩分类不准确,从而影响隧道设计和施工的质量。

(圆) 隧道按照新奥法理论施工,尤其是软弱围岩中构筑地下工程,支护紧随掘进面进行,对支护的设计计算仍能采用传统的平面假定而不考虑掘进面附近的石柱的支撑,难以设计出合理的支护结构。因为掘进面附近的岩体释放位移和应力,除受时间效应等因素外,还受掘进面前方待开挖岩体支撑的影响,这一现象称为掘进面的空间效应。目前,国内外对喷锚支护和复合衬砌支护计算尚无统一的标准方法。德国、美国和日本在对隧道喷锚支护和复合衬砌支护设计进行验算时,通常考虑围岩与隧道支护结构协调变形,共同作用,而且分析岩体和衬砌结构时采用粘弹性模型,以尽可能反映围岩和支护结构的实际工作情况。由于围岩产状的影响,围岩施加在衬砌上的荷载容易使衬砌结构出现偏心,因此计算时常考虑围岩产状的影响,数值分析常常采用三维模拟,因此分析结果较为接近实际情况。而我国公路按照规范设计隧道时,对支护结构的设计进行验算时常采用杆单元,将围岩与支护结构隔离开来分析,且计算模型多为弹性或弹塑性,多数情况下只做平面分析,因此分析结果不完全反映工程实际,尤其中隔墙导洞超前先行开挖,左右两侧导洞后开挖时,平面分析的结果无法反映工程隧道开挖的空间效应,如果以此指导隧道设计和施工,势必造成设计和施工的不合理。同时,岩层产状对隧道支护结构受力有直接影响,云~~云~~岩软件和~~云~~岩软件应用于隧道支护结构受力分析对岩层产状和空间效应均同时做了考虑,而国内规范和有关计算软件基本对此未作考虑。

(猿) 连拱隧道建设过程中,存在的问题更多

从已经建好的广州天鹿圆连拱隧道、金华至丽水的双港桥连拱隧道、象山连拱隧道、莲花山连拱隧道、晋焦高速公路省界连拱隧道、金竹林连拱隧道、笕箕湾连拱隧道、海游连拱隧道、五龙岭连拱隧道、练江连拱隧道、崔家垭连拱隧道、贵阳小关连拱隧道、龟形山连拱隧道、桐油山连拱隧道等来看,普遍存在如下问题:①连拱隧道建设中还没有统一的成套技术,设计与施工方法不够系统和完善,工序多、进度慢。②围岩与衬砌结构的受力及受力敏感性不清楚,设计具有一定盲目性,偏于保守,造成材料浪费;有时围岩容易失稳,复杂荷载作用下中隔墙变形、承载力与稳定性、中隔墙及衬砌结构的裂缝产生与防渗漏等不清楚。③连拱隧道围岩、结构整体受力和受力敏感分析技术不能够解决,无法保证工程质量和控制工程投资。④连拱隧道设计均以类比法为主。对于Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ级稳定性较差的破碎围岩及特殊地质围岩,应及时采用类似隧道盾构施工原理的强预支护或改良地层的设计方法。预支护抗力参照围岩压力量测,强预支护设计参数按工程类比法和曲墙式衬砌算法求得参考值;预支护力也可按照普氏理论和太沙基理论计算预估围岩压力,然后乘以折减系数,作为预支护力,用结构力学方法来估算强预支护设计参数,设计缺乏依据。⑤目前规范中对连拱隧道设计也未做专门规定,主要根据《公路隧道设计规范 铁路隧道部分》<sup>[4]</sup>和交通部文件公路法<sup>[5]</sup>源~~源~~号来进行连拱隧道结构设计,而这些规范和文件主要是为单拱隧道结构设计而制定的。理论研究<sup>[6]</sup>与工程实际结合不紧密,研究不完善。所有这些问题主要是由于连拱隧道围岩、结构整体受力及其敏感性不清楚所致<sup>[7][8][9]</sup>。

## 本篇的主要研究内容

尽管对于隧道技术,尤其连拱隧道建设技术,我国研究起步较晚,但有许多学者对隧道建设技术还是进行了系列研究,这些研究工作为隧道建设技术的系列研究奠定了基础。王梦恕在大瑶山隧道施工技术总结的基础上,提出我国长大隧道的关键技术和应对方法;蒋树屏提出了隧道围岩变形的流变模型及根据隧道围岩状况又提出了隧道断面的参数的优化设计方法和理论;林志良利用理论分析和数值分析相结合的方法分析了相思岭隧道衬砌和围岩的应力和位移;吴德兴等利用理论分析和数值分析相结合的方法分析了象山隧道衬砌和围岩的应力和位移;刘慧分析了爆破对单拱隧道衬砌结构的影响;熊有言等分析了中隔墙和帮壁衬砌防渗材料的性能和防渗的结构。傅鹤林对多洞同时平行开挖时围岩中应力和位移的动态效应进行了研究,提出了洞室顶板“卸荷”效应,并提出了如何利用“卸荷拱”合理安排开挖顺序,以确保洞室安全的理论。此外,傅鹤林研究了由地下洞室开挖引起围岩应力重分布的地压规律,根据地压规律对地下洞室支护结构进行了设计;刘宝琛利用随机介质理论分析了地铁开挖引起地表沉降,并提出了时空统一的地表沉降理论;朱汉华和尚岳全提出隧道施工应以新奥法为理论基础,在岩层破碎地段应采取强支护和弱爆破的控制措施,在对海游隧道修建关键技术研究的基础上,出版了专著《公路隧道设计与施工》;王星华强调隧道围岩中的地下水处理应采取堵和疏的方法,发展形成了治理隧道渗漏水的粘土固化注浆理论和工艺。

本篇在参考有关国内外文献的基础上,对隧道荷载设计的理论进行了系统研究,具体的内容为:

(员) 根据《公路隧道设计规范》中围岩的类型,对单拱隧道破碎围岩进一步分类,即隧道围岩为连续介质岩体、块裂岩体、碎裂岩体还是层状板裂岩体。

(圆) 根据围岩类别分别建立单拱隧道衬砌与围岩共同的力学模型,即连续介质岩体模型、块裂岩体模型、碎裂岩体模型和层状板裂岩体模型。

(猿) 将碎裂介质力学模型与实际工程结合,计算破碎围岩中单拱隧道衬砌所受荷载。

(源) 按有限元法计算单拱隧道衬砌荷载。

(缘) 两种计算结果的分析对比,提出破碎围岩中单拱隧道衬砌荷载计算的推荐公式。

(远) 根据《公路隧道设计规范》中围岩的类型,对连拱隧道围岩进一步分类,确定隧道破碎围岩是连续介质岩体、块裂岩体、碎裂岩体还是层状板裂岩体。

(苑) 根据围岩类别分别建立连拱隧道衬砌与围岩共同的力学模型,即块裂岩体模型、碎裂岩体模型还是层状板裂岩体模型。

(愿) 将碎裂介质力学模型与实际工程结合,计算破碎围岩中连拱隧道衬砌所受荷载。

(怨) 按有限元法计算连拱隧道衬砌荷载。

(员园) 两种计算结果的分析对比,提出破碎围岩中连拱隧道衬砌荷载计算的推荐公式。

# 第 四章 围岩中单拱隧道荷载计算的理论解

## 四章 概述

在隧道施工过程中，对于特殊地质地段，必须采用类似软土隧道盾构施工原理的强支护技术或改良地层方法。对于Ⅳ级、Ⅴ级、Ⅵ级稳定性较差的围岩及特殊地质围岩，应及时采用类似隧道盾构施工原理的强支护或改良地层的设计方法，这样能起着稳定围岩、控制围岩应力和变形、防止松弛、坍塌和产生“松弛压力”的作用，其机理与喷锚支护不同。强支护抗力可参照围岩压力量测，强支护设计参数按工程类比法和曲墙式衬砌计算法求得参考值；强支护力也可按照普氏理论和太沙基理论计算预估围岩压力，然后乘以折减系数，作为强支护力，用结构力学方法来估算强支护设计参数。这两种方法均有其不足之处，具体表现在：

(一) 强支护抗力参照围岩压力量测，因为隧道设计首先是设计然后才施工，只有隧道开挖一段距离后，才能对隧道围岩压力进行量测，此时只能根据隧道围岩压力量测结果对设计进行修正；隧道围岩压力量测只能在有限区段进行，否则，花费很大且影响施工进度。

(二) 强支护也可按照普氏理论和太沙基理论计算预估围岩压力，然后乘以折减系数，作为强支护力，普氏理论由于其考虑因素仅为岩石坚固性系数，单凭一个因素很难反映围岩的真实力学性能，故按普氏理论预估围岩压力不一定全面；而太沙基理论计算预估围岩压力，是按岩层状态换算成岩石荷载高度，岩层状态并不一定全面反映围岩的力学性能，而且岩层状态无法量化，因此判别的经验性很大，所以工程中不易操作。

如果上述问题无法解决，设计的衬砌有可能过于富余而造成浪费，也有可能强度不足而造成支护失效。为了解决上述问题，有必要采用试验及数值分析法对破碎围岩中隧道荷载计算进行研究。通过本研究，对隧道围岩进行新的分类，建立新的分类围岩的力学机制，本章为围岩中隧道荷载计算的理论解。

本篇中，首次将隧道围岩由传统的六级分成连续介质、碎裂介质、块裂介质和板裂介质四类，建立了相应的隧道围岩作用于衬砌力学机制，通过系统分析研究，给出了隧道围岩作用于衬砌的理论解，其中一些理论解也是首次提出和建立的。在此基础上，可以为隧道结构的设计提供参考，也可为今后隧道设计规范的修订提供参考。

## 四章 单拱隧道衬砌荷载的力学分析

围岩与衬砌共同作用，围岩的力学状态和力学特性是隧道衬砌的依据。围岩是复杂的地质体。它经过多次、反复的地质作用，经受过变形，遭受过破坏，形成有一定的岩石成分、一定的结构形态，赋存于一定的地质环境中。它与一般材料不同，围岩内蓄存有初应力，而且

有初应变,同时形成一定的割裂结构。这种结构对围岩的破坏起着控制作用。不同割裂结构的围岩的破坏和变形的力学机制不同。围岩的变形和破坏机理的异同是划分围岩力学介质的基本依据。围岩力学类型分类是整个围岩力学研究的基础,也是隧道开挖衬砌的基础,对整个隧道围岩力学工作成效具有决定性作用。目前根据围岩工程的需要,许多部门形成了各具特色的围岩分类方法,每一种方法具有其使用和局限性。目前,公路行业盛行按围岩的主要工程地质条件和围岩开挖后的稳定状态,将隧道围岩分成六类,具体见表 1-1。

对于深埋和浅埋隧道的判定,《公路隧道设计规范》作了严格的定义,另外明洞的定义和荷载计算已经很明确,也很符合工程实际。因此,本篇主要针对深埋隧道和浅埋隧道进行研究。

由于隧道开挖,只能通过前期勘探和后期隧道开挖揭露围岩的状况来对围岩分类,因此分类工作很难有前瞻性和较好的实用性。在综合各类围岩类型分类的基础上,本篇选择了对隧道工程较为合理的孙广忠分类法。根据孙广忠和工程应用的观点,将围岩分成 3 种类型力学介质,即连续介质、碎裂介质、块裂介质和板裂介质,各种围岩介质的特性及与表 1-1 中的对应围岩类型见表 1-2,与表 1-1 中的岩体分类相对应。每一种力学作用机制并不完全相同,因此,本篇分别对不同围岩介质类型的围岩进行不同的力学分析。

隧道常为非圆形断面,但在隧道围岩变形与破坏的简化分析中,常把直墙拱形、曲墙拱形等接近圆形断面的隧道形状简化为圆形,这种方法称为等代圆法。非圆形隧道等代为圆形隧道的分析是国内外广泛采用的一种方法。这些方法是以隧道的几何形状和大小为基本量,并假定某种依赖关系进行等代的方法,不考虑应力状态等其他因素的影响,有一定的近似性,比较简便。这种几何等代圆半径的方法,主要有三种。

表 1-1 掘进隧道围岩分类(按围岩工程地质条件和开挖后的稳定状态)

类别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态
	主要工程地质条件	结构特征和完整状态	
I	掘进硬质岩石(饱和抗压极限强度 $\geq 60 \text{MPa}$ ),受地质构造影响轻微,节理不发育,无软弱面(或夹层),层间岩层为厚层,层间结合良好	呈巨块整体结构	掘进围岩稳定、无坍塌,可能产生岩爆
II	掘进硬质岩石( $60 \text{MPa} > \text{抗压强度} \geq 30 \text{MPa}$ ),受地质构造影响较重,节理较发育,有少量软弱面(或夹层)和贯通张节理,但其产状及组合关系不致产生滑动,层状岩层为中层或厚层,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	呈大块状砌体结构	掘进暴露时间长,可能会出现局部小坍塌;侧壁稳定,层间结合差的平缓岩层,顶板易冒落
	掘进软质岩石( $30 \text{MPa} > \text{抗压强度} \geq 10 \text{MPa}$ ),受地质构造影响轻微,节理不发育;层状岩层为厚层,层间结构良好	呈巨块状整体结构	

摇摇续上表

类别	围岩主要工程地质条件		围岩开挖后的稳定状态
	主要工程地质条件	结构特征和完整状态	
III	摇硬质岩(砾、砾岩、砂岩),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	摇呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	摇拱部无支护时可产生小坍塌。侧壁基本稳定,爆破震动过大时易塌
	摇软质岩石(砾、砂岩、粉砂岩),受地质构造影响轻微,节理不发育;层状岩层为厚层,层间结构良好	呈巨块状整体结构	
IV	摇硬质岩石(砾、砾岩、砂岩),受地质构造影响很严重,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	摇拱部无支护时,可产生较大的坍塌;侧壁有时稳定
	摇软质岩石(砾、砂岩、粉砂岩)以上至砾岩,受地质构造影响严重,节理发育	呈块(石)碎(石)状镶嵌结构	
	摇略具压密或成岩作用的粘性土及砂性土 摇一般钙质、铁质胶结的碎、卵石土、大块石土 摇黄土(Ⅱ <sub>1</sub> 、Ⅱ <sub>2</sub> )	呈大块状压密结构 呈巨块状整体结构 呈巨块状整体结构	
V	摇石质围岩位于挤压强烈的断裂带内,裂隙杂乱,呈石夹土或土夹石状	摇呈角(砾)碎(石)状松散结构	摇围岩易坍塌,处理不当会出现大坍塌,侧壁经常出现小坍塌,浅埋时易出现地表下沉(陷)或坍至地表
	摇一般第四系的半干硬至硬塑的粘性土及稍湿至潮湿的一般碎、卵石土,圆砾、角砾土及黄土(Ⅱ <sub>1</sub> 、Ⅱ <sub>2</sub> )	摇非粘性土呈松散结构,粘性土及黄土呈松软结构	
VI	摇石质围岩位于挤压极强烈的断裂带内,呈角砾、砂、泥松软体	呈松软结构	摇围岩极易坍塌变形,有水时,土砂常与水一齐涌出;浅埋时易坍至地表
	摇软塑状粘土及潮湿的粉细砂等	摇粘性土呈易蠕动的松软结构;砂性土呈潮湿松散结构	

(员) 取断面外接圆半径

如图 8-1 所示,隧道各部分尺寸与等代关系以式(8-1)表示:

$$r = \sqrt{\frac{H^2}{4} + \frac{L^2}{16}} \quad (8-1)$$

式中:  $r$  为外接圆半径,  $H$  为断面高;  $L$  为跨度之半。

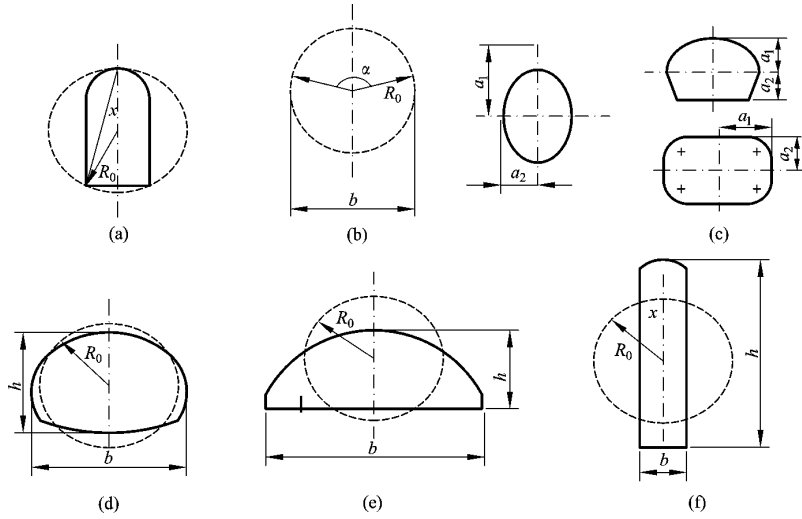


图 圆拱等效圆半径

(圆) 取圆拱半径

如图 圆拱所示，设隧道跨度为  $b$ ，圆拱对应的圆心角为  $\alpha$ ，则圆拱半径  $R_0$  为：

$$R_0 = \frac{b}{2 \sin(\frac{\alpha}{2})} \quad (1)$$

(猿) 取大小半径和之半

如图 圆拱所示，  
 $R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2}$  (2)

以上三种方法都比较简单，对于隧道工程中常用的高跨比为 0.5~1.0 的大体都是适用的。但对于一些大跨度或高边墙的洞室，则以对第三种方法改进后的第四种方法适应性较强，即取等效圆半径为隧道高度  $h$  和跨度  $b$  之和的 1/4，对于下一步继续进行高跨比不同支护抗力的修正，总体较为接近实际。如图 圆拱、(猿)、(猿)所示。典型类比法取此种隧道的等效圆半径为：

$$R_0 = \frac{h + b}{4} \quad (3)$$

### 连续介质围岩中隧道衬砌与围岩相互作用机理研究

#### 连续介质围岩及隧道衬砌的力学分析

在隧道围岩中，没有一种围岩是不受结构面切割的，在以下三种情况下，可将围岩视为连续围岩。

(员) 结构面不连续延展，切割不成分离的结构体，而具有完整结构的围岩。

(圆) 碎裂围岩在较高的围岩压力下结构面闭合，在摩擦作用下，使之在传递应力或变形、破坏过程中结构面不起主导作用。

(猿) 在人工改造下使其结构面人工愈合，破碎结构围岩变为完整结构围岩。

由此可见，在把围岩作为连续介质围岩进行力学研究之前，首先必须鉴别它是否具有连续介质条件。