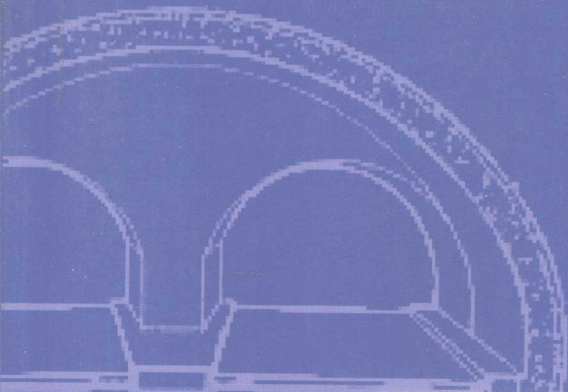
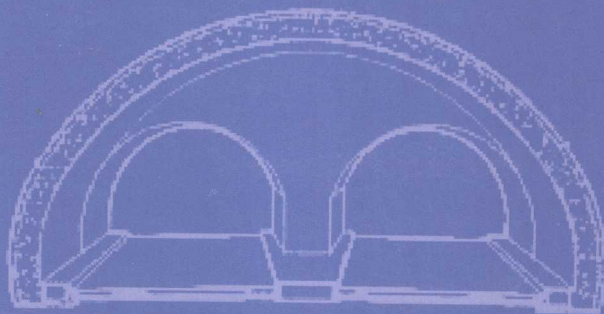




公路分岔隧道 建设技术的研究及应用 ▶

GONGLU FENCHU SUIDAO
JIANSHU JISHU DE YANJIU JI YINGYONG

郭小红 廖朝华◎编著



人民交通出版社
China Communications Press

公路分岔隧道建设技术的

Gonglu Fenchu Suidao Jianshe Jishu de

研究及应用

Yanjiu ji Yingyong

郭小红 廖朝华 编著



558935

广西工学院鹿山学院图书馆



d558935

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以湖北省宜昌至恩施(沪蓉西)高速公路建设工程为背景,以典型工程——八字岭隧道、庙垭隧道和漆树槽隧道为实例,全面阐述了分岔隧道的大拱段、连拱段、小间距段及其过渡段的设计施工技术。同时又详细介绍了分岔隧道施工量测和爆破施工技术、隧道通风设计及应用等内容。

本书可作为隧道施工、设计及养护人员的技术用书,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

公路分岔隧道建设技术的研究及应用 / 郭小红、廖朝华编著. — 北京:人民交通出版社, 2011.9

ISBN 978-7-114-09171-1

I. ①公… II. ①郭… ②廖… III. ①隧洞分岔段 — 公路 IV. ①U453.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 101318 号

书 名: 公路分岔隧道建设技术的研究及应用

著 作 者: 郭小红 廖朝华

责任编辑: 曲 乐 李 喆

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 24

字 数: 561 千

版 次: 2011年9月 第1版

印 次: 2011年9月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09171-1

定 价: 48.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

▶▶▶ 《公路分岔隧道建设技术的研究及应用》编写委员会

编 著：郭小红 廖朝华

参编人员：廖朝华 郭小红 柯小华 梁 巍
程 勇 乔春江 褚以惇 陈卫忠
李术才 李东升 张 涛 李 昕
刘继国 李鸿博 杨林松 伍国军
蔚立元

前 言

20 世纪 80 年代以来,随着我国经济的腾飞,国家进行了大规模的基础建设,隧道和地下工程在铁路、公路、城市交通、水利工程和能源等很多行业得到了迅速发展。以公路交通为例,进入 21 世纪以来,由于西部山区高等级公路的修建,公路隧道进入了飞速发展的阶段。据统计,2000 年年底我国公路隧道仅有 1 684 座,总长 628km,而截至 2010 年年底已经增长到 7 384 座、总长 2 555.5 km。其中特长公路隧道的发展更是突飞猛进,2004 年为 33 座,总长 126.3km,而到 2010 年年底全国已通车和建设中的特长隧道达 265 座,总长 1 138km。

为解决西部交通发展所面临的技术问题,支撑西部交通建设的健康快速发展,推动西部交通科技进步与创新,交通运输部从 2000 年开始投入大量的人力物力,启动了“西部交通建设科技项目”,其中在隧道方面立项近 40 项,极大地提升了我国隧道建设、科研的水平。

沪蓉西高速公路湖北段是沪蓉国道主干线的重要组成部分、交通运输部的典型示范工程。工程所在区域属云贵高原东北部边缘的鄂西高原,全线贯穿区域层峦叠嶂,地势绵延起伏,溪沟纵横,立体地貌突出。为了解决路线布置和桥隧过渡等方面的困难,节省工程投资,设计人员创造性地提出了分岔隧道这种新颖的隧道结构形式。为确保工程安全、经济,并解决分岔隧道建设中的技术难题,特将“分岔隧道设计施工关键技术研究”课题立项。湖北省沪蓉西高速公路建设指挥部、中交第二公路勘察设计研究院有限公司、中科院武汉岩土力学研究所、山东大学和中国铁路工程总公司等多家单位参与了本项目的研究。

借助数值分析、现场测试和模型试验等研究手段,研究人员在路线布置、桥隧过渡、隧道施工方法、近距离隧道通风和分岔隧道设计施工原则等很多方面取得了丰硕的成果,填补了国内技术空白,部分成果达到了国际领先的水平。科研项目的成果在沪蓉西高速公路沿线三座分岔隧道工程的建设中得以应用,获得了巨大的社会、经济效益。

为了推广分岔隧道这种新颖的隧道形式,并与基础建设行业的众多从业者交流经验,中交第二公路勘察设计研究院有限公司组织编写了本书,不足之处敬请广大读者指正。

编 者
2011 年 3 月

目 录

第一章 分岔隧道总体介绍	1
第一节 分岔隧道概况及关键技术	1
第二节 分岔隧道关键技术的研究方法	10
第三节 依托工程概况	15
第二章 大拱段建设技术	27
第一节 大拱段施工工法优化及围岩稳定性分析	27
第二节 大拱段支护结构可靠度研究	42
第三节 大拱段设计	58
第四节 大拱段施工	64
第三章 连拱段建设技术	68
第一节 连拱段施工工法优化及围岩稳定性分析	68
第二节 连拱段支护结构可靠度研究	89
第三节 连拱段设计	97
第四节 连拱段施工	103
第四章 小间距段建设技术	107
第一节 小间距段施工工法优化及围岩稳定性分析	107
第二节 小间距段设计	126
第三节 小间距段施工	133
第五章 过渡段建设技术	136
第一节 过渡段围岩稳定性分析	136
第二节 过渡段模型试验——模型制作、开挖测试	170
第三节 过渡段模型试验——结果分析	194
第四节 分岔隧道设计	220
第五节 分岔隧道施工	225
第六章 监控量测及反分析	231
第一节 现场监控量测方案	231
第二节 监控量测结果及其分析	233
第三节 反分析理论	258
第四节 八字岭分岔隧道围岩参数反分析	274
第七章 施工爆破控制	280

第一节	隧道爆破振动的基本理论·····	280
第二节	八字岭分岔隧道爆破设计及数值模拟·····	288
第三节	爆破振动现场监测·····	304
第四节	爆破减振技术·····	306
第八章	分岔隧道通风·····	310
第一节	隧道通风设计研究现状·····	310
第二节	近距离隧道通风相互影响数值计算·····	316
第三节	减少通风相互影响的对策·····	336
第四节	近距离隧道通风相互影响的室内模型试验·····	342
第五节	分岔隧道通风相互影响现场试验·····	355
第六节	分岔隧道通风设计·····	358
第九章	结论与展望·····	364
第一节	研究手段及研究成果总结·····	364
第二节	分岔隧道创新点及研究展望·····	366
参考文献	·····	368

第一章 分岔隧道总体介绍

第一节 分岔隧道概况及关键技术

一、隧道类型概述

改革开放以来,我国在能源、交通、水利水电、矿山、市政等领域取得了令人瞩目的成就。在近 20 年高速公路建设中,我国公路隧道修建技术在实践中不断进步,隧道的设置形式由单一的上下行标准分离式隧道逐渐发展为分离式隧道、小净距隧道、连拱隧道三种常用类型。

(1)标准间距的分离隧道(图 1-1)是指两洞室净距离大于等于表 1-1 的规定,在设计施工过程中可以基本不考虑两洞室之间相互影响的一种隧道布置方式。

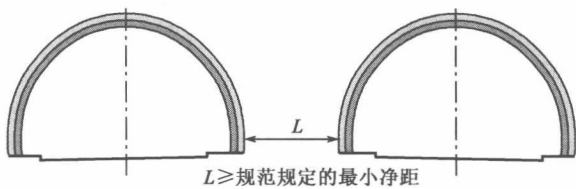


图 1-1 标准间距的分离隧道示意图

分离式独立双洞隧道间的最小净距 表 1-1

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

注:表中 B 代表隧道开挖跨度。

(2)小净距隧道(图 1-2)是指两洞室净距离小于表 1-1 中建议值,在设计和施工过程中需采取特殊措施的一种隧道布置方式。小净距隧道一般用于洞口地形狭窄或有特殊要求的中、短隧道,也可用于长或特长隧道洞口局部地段,宜选择在围岩完整,其自承、自稳能力较好的地段。

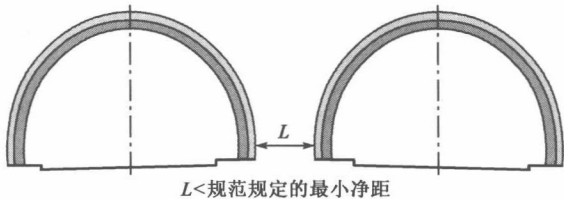


图 1-2 小净距隧道示意图

(3)连拱隧道(图 1-3)是指两洞室无中间岩柱,两洞结构共用中隔墙的一种隧道布置方式。连拱隧道适用于洞口条件狭窄或对两洞间距有特殊要求的中、短隧道。

随着山区高速公路的修建,桥梁、隧道在路线中所占比例明显增加,在地形、地质条件恶劣的地段,常规的桥隧形式已不能适应道路线形设计的要求。为了适应多变的地形地质条件,隧道设置形式中衍生出一种全新的隧道形式——分岔隧道。

分岔隧道是在地形地质更为复杂的条件下修建山区高速公路的过程中提出的一种全新的隧道建设形式,它由大拱隧道或连拱隧道逐渐过渡到上下行分离双洞,因此它同时具备标准间距的分离隧道、小净距隧道、连拱隧道以及大拱隧道等多种隧道形式的特点。典型的分岔隧道形式如图 1-4 所示。

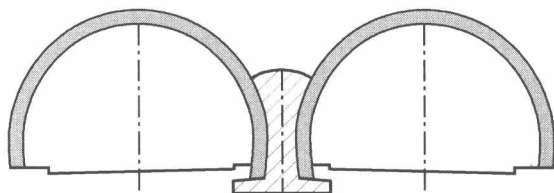


图 1-3 连拱隧道示意图

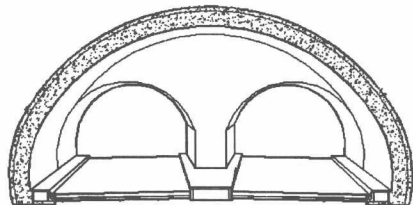


图 1-4 分岔隧道示意图

二、分岔隧道的特点

分岔隧道是指由洞口(洞内)整体式路基(隧道)形式在隧道内实现逐渐过渡为上下行分离式单洞隧道的一种特殊的隧道形式。

分岔隧道基本涵盖了分离式隧道、小净距隧道、连拱隧道三种不同的结构衬砌形式。隧道洞口段由整体式路基(隧道)逐渐过渡为分离式隧道,隧道断面逐渐从洞口大拱衬砌段、整体式中隔墙连拱衬砌段、夹芯式中隔墙连拱衬砌段、小净距衬砌段过渡到普通分离式衬砌段。

分岔隧道根据其分岔段的布置方式可分为两种。

(1)Ⅰ型分岔隧道:洞口段先设置为大拱隧道段,然后逐渐过渡为整体式中隔墙连拱隧道、夹芯式中隔墙连拱隧道、小净距隧道,最后转变为标准的上下行分离隧道。当隧道洞口中央分隔带宽度小于 1.5m 时,一般洞口需设置大拱段(对双车道隧道而言设置四车道大拱隧道)。当洞口中央分隔带宽度在 1.5~3.5m,也应考虑将洞口段设置为大拱隧道,以改善支护结构的受力条件。Ⅰ型分岔隧道的典型设置形式如图 1-5 所示。

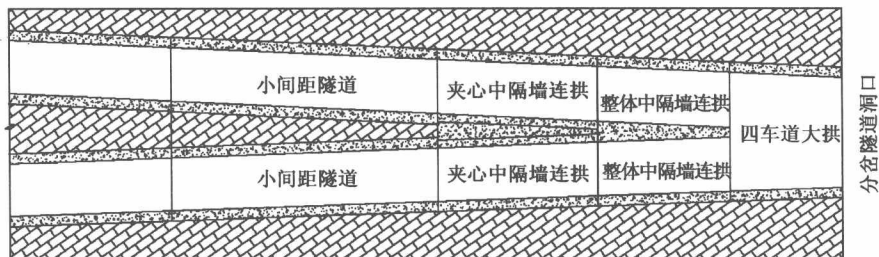


图 1-5 Ⅰ型分岔隧道衬砌平面布置图

(2)Ⅱ型分岔隧道:洞口段先设置为整体式中隔墙连拱隧道,然后逐渐过渡为夹芯式中隔墙连拱隧道、小净距隧道,最后渐变为标准的上下行分离隧道。当隧道洞口中央分隔带

宽度在 2.5m 左右时,可考虑设置为 II 型分岔隧道。II 型分岔隧道的典型设置形式如图 1-6 所示。

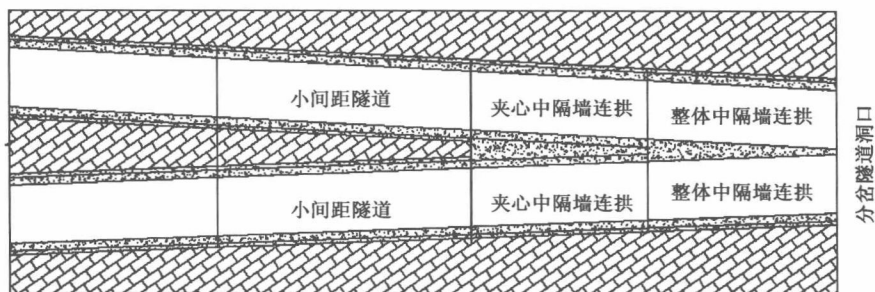


图 1-6 II 型分岔隧道衬砌平面布置图

此外,当隧道洞口中央分隔带宽度大于 5.0m,且地质条件较好时,洞口段一般可设置为小净距隧道(保留中间岩柱),然后逐渐过渡为标准的上下行分离隧道,即在隧道设计中常采用的洞口小净距、洞身分离式隧道形式。

三、隧道设置形式的选取

隧道设置形式的选择,应充分考虑围岩地质条件、断面形状、尺寸大小、施工方法、支护时间、洞口两端接线、占地大小、环境影响和工程造价等因素。高速公路、一级公路的隧道一般应优先选择标准间距的分离隧道,其次考虑小净距隧道,最后考虑连拱隧道。

1. 标准分离式隧道

标准间距的分离隧道最小间距的选定与地质条件及隧道跨度关系最为密切,但还应综合考虑隧道埋置深度及运营期通风等因素,以双洞之间彼此不产生不利影响为原则。实际设计中隧道双洞间距可参照表 1-2 选取。

长大双洞隧道净距参考表(m)

表 1-2

隧道断面	隧道长度 (m)	80% 地段的围岩条件		
		在 III 级及其以上	在 IV 级及其以下	在 V 级及其以下
两车道隧道	≤200	5 ~ 10	8 ~ 12	10 ~ 20
	200 ~ 500	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 25
	500 ~ 1 000	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 30
	≥1 000	15 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40
三车道隧道	≤200	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20
	200 ~ 500	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 30
	500 ~ 1 000	15 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40
	≥1 000	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50

2. 小净距隧道

在地形条件较狭窄的情况下,不能按常规的分离式隧道间距布设,或因设置分离式隧道而导致隧道两端的接线路基(桥梁)的工程量增加较多、施工难度增大时,可考虑设置为小净距

隧道。小净距隧道的间距不宜过小,否则两洞室间施工相互影响较大,不仅增加施工难度,造价亦较高。一定跨度下隧道小净距段适应的最大长度、隧道间距可参照表 1-3 选取。

不同断面形式隧道的连续小净距段最大长度和净距参考表 表 1-3

隧 道 断 面	隧道长度(m)		隧道间距(m)
两车道隧道	一般值	750	不小于 5
	极限值	1 000	8 ~ 15
三车道隧道	一般值	500	不小于 8
	极限值	750	8 ~ 20

注:地质条件好时取低值,地质条件差时取高值。

3. 连拱隧道

连拱隧道,两端接线均可采用整体式路基,具有节约土地、接线顺畅、接线工程量小等优点,但是连拱隧道施工复杂、造价较高。因此,隧道两端接线的平面线形和隧道长度是选择连拱隧道的控制性因素。连拱隧道长度可结合地质条件与洞外工程规模综合确定,不同跨度的连拱隧道经济长度可参照表 1-4 选取。

不同断面形式的连拱隧道的最大长度参考表 表 1-4

隧 道 断 面	隧道长度(m)	
四车道隧道	一般值	400
	极限值	750
六车道隧道	一般值	300
	极限值	500

注:本表主要从经济性与施工工期上考虑,如果有特殊要求也可进一步加长连拱隧道。

连拱隧道根据中隔墙的构造差异又可分为整体式中隔墙连拱隧道及复合式中隔墙连拱隧道。一般复合式中隔墙连拱隧道的防排水系统可靠性更有保障。

4. 分岔隧道

在地形条件特别困难地段,隧道洞口段无法采用分离式双洞而洞身段又必须采用分离双线时,可采用特殊的分岔隧道结构。在隧道内需进行车流分合时(地下互通)也可采用分岔隧道。分岔隧道大拱衬砌断面跨度较大,各类型断面过渡施工复杂,因此分岔隧道分岔段宜布置在围岩等级高于 IV 级的地段。

四、分岔隧道设计与施工中的关键技术

分岔隧道由大拱隧道、连拱隧道、小净距隧道及标准间距的分离隧道组成,同时具备这些隧道的特点,但是绝对不是这些隧道的简单叠加。由于其独特的建设方式及所处的特殊建设条件而具备显著的自身特点。

- (1)分岔隧道一般紧邻特大桥梁,洞口地形条件较差,施工场地狭小。
- (2)为保证结构及运营安全,从桥梁到分岔隧道,在路线平面上应合理过渡。
- (3)分岔隧道的洞口段不仅隧道结构复杂多变,而且埋置深度浅,地质条件差。
- (4)间距处于变化过程中的左右洞室,合理划分各类衬砌,协调这种变化十分重要。



(5)大拱与连拱过渡地段、连拱与小净距过渡地段支护方法、施工方法、稳定性评价是工程成败的关键。

(6)分岔隧道一般为长大隧道,相距较近的洞口送排风的相互窜流对通风方案的影响不能忽视。

因此,为了搞好分岔隧道的设计与施工,在注意全面把握的情况下,还应重点从如下几方面做好工作。

(1)分岔隧道洞外为按整体式路基方式建设的桥梁,进入隧道后要求逐渐由整体式路基的隧道过渡为分离式路基的隧道。从理论上分析,该过渡段(分岔段)越短,则造价越低,施工难度越小。

(2)分岔隧道洞口段的施工组织。由于地形陡峻,场地狭小,如何同时满足特大桥梁与长大隧道施工场地的需要、如何保证施工过程中的安全、如何合理安排桥梁与隧道的各施工工序,对隧道与桥梁的顺利建设十分重要。分岔隧道实施中常需结合地形条件、通风方案等设计合适的施工横洞,以便将隧道与桥梁的施工场地分开,减少相互干扰。

(3)大拱隧道的设计与施工。对于双车道标准高速公路,一般四车道大拱隧道的开挖宽度约20~21m,而分岔隧道洞口段的四车道大拱(全幅高速公路隧道)的开挖跨度达到24~25m,比标准的四车道高速公路隧道还宽3~4m。如何结合洞口段地形地质条件差的特点合理优化支护参数、施工方案以及做好洞室稳定性评价很重要。

(4)中隔墙(中间岩柱)处于渐变中的连拱隧道与小净距隧道的支护设计以及施工方法。由于“渐变”这一因素,使得合理确定连拱隧道中隔墙和小净距隧道中间岩柱的最小厚度、不同地质与结构条件下的施工方法很重要,因为这直接关系到工程造价与施工效率,也关系到施工安全与结构的永久安全。

(5)四车道大拱隧道与连拱隧道的过渡地段、连拱隧道与小净距隧道的过渡地段不仅结构形式变化大,施工工序多,在施工中容易受到意外损伤,而且受力状态复杂,容易引起安全问题,在设计与施工中应充分重视。

(6)连拱隧道中隔墙及小净距隧道中间岩柱的保护。在连拱隧道与小净距隧道的起点段,中隔墙及中间岩柱均比通常条件下更薄,加上施工工序较多,如何采用合理的施工工序及爆破方法来最大限度地保护它们是施工的关键。

(7)洞口送排风的相互干扰以及对通风方案的影响。分岔隧道两洞口相距较近,必然会有部分排出的污染空气被另一洞口重新吸入。对于采用机械通风的长大隧道,该影响不能忽略,必要的情况下还应考虑改变通风方案。

(8)分岔隧道建设条件。分岔隧道是一种特殊形式的隧道建设方式,与同类地质条件下的其他隧道相比,其结构复杂多变,对施工技术要求较高,施工效率相对较低,造价相对偏高,因此应是不得已才选用。该类隧道常面临十分苛刻的建设条件,如隧道洞口要求设置为整体式的桥梁,加宽中央分隔带比缩小隧道间距造价更高、风险更大。

由上面的分析可以看出,分岔隧道的设计重点与难点较多,需要在设计施工过程中加以重视。对于其中连拱隧道与小净距隧道设计与施工的技术问题,由于经验较多,理论也已相对成熟,且有国内外相关单位进行过系统研究,均不构成分岔隧道的关键技术问题。分岔隧道所涉及的全新的关键技术总结起来主要有如下三个方面。

(1) 四车道大拱隧道的设计方法与施工方法。

(2) 过渡段(四车道大拱隧道到连拱隧道、连拱隧道到小净距隧道)的设计方法、施工方法以及围岩与支护结构的保护方法。

(3) 小净距隧道左右洞口送排风的相互影响规律以及对分岔隧道通风方案的影响。

下文以双向四车道分岔隧道为例对分岔隧道进行说明。

1. 四车道大拱隧道

分岔隧道洞口段大拱衬砌分为无中央分隔墙的四车道大拱衬砌和有中央分隔墙的四车道大拱衬砌两种(图 1-7)。对于无中央分隔墙的衬砌方案,左右洞的通风设计应联合考虑;对于有中央分隔墙的衬砌方案,通风设计过程中也应适当考虑两洞室之间的相互影响。

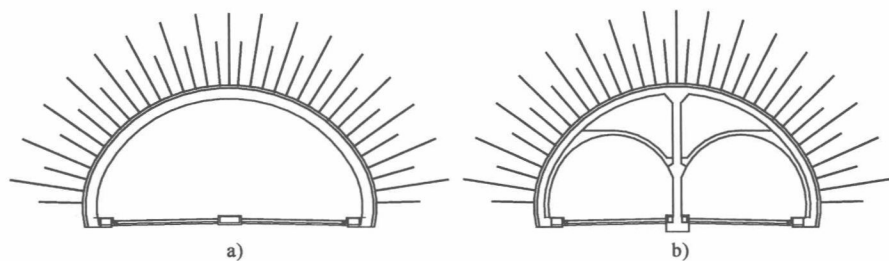


图 1-7 四车道大拱衬砌

a) 无中央分隔墙衬砌;b) 有中央分隔墙衬砌

当根据隧道通风需要必须设置中央分隔墙时,可以将其设计为仅仅起分隔功能的轻型结构,也可以将其设计为能够承担一定变形荷载的承重结构。当中隔墙可能承担荷载时,应根据地质条件、结构刚度及施工工序等方面,综合分析确定承担变形荷载的比例,根据承担的设计荷载,进行内力分析、强度校核和稳定性验算。

洞口大拱段的支护应采用复合式衬砌方案,即衬砌分两次或三次施作,一般条件下 II 级与 III 级围岩宜采用两层支护方案,IV 级与 V 级围岩可采用三层支护方案。

初期支护:对 II、III 级围岩地段由径向锚杆、钢筋网及喷射混凝土组成,对于 IV、V 级围岩地段由工字钢拱架(钢筋格栅)、径向锚杆、钢筋网及喷射混凝土组成。

二次衬砌:对于两层衬砌方案,二次衬砌仅承担少量围岩变形荷载,对于三层衬砌方案,二次衬砌是对初期支护的补充加强,与初期支护共同组成主要承载结构。二次衬砌可采用型钢拱架混凝土或钢格栅拱架混凝土结构。

三次衬砌:一般情况下三次衬砌可采用素混凝土结构,当围岩压力荷载较大,需要第三层衬砌承担部分荷载时,可采用钢筋混凝土。其合理施作时间,应严格按照监控量测数据进行,应尽可能发挥初期支护与二次衬砌的承载能力。

初期支护应边开挖边施作,三层支护方案的二次衬砌应在洞室开挖完成后及时施作甚至在施工开挖过程中分步施作。如果开挖完成后初期支护在后续施工期间不能完全稳定洞室,应及时施作二次支护,最后在确定洞室周边收敛变形基本稳定的条件下,再进行三次支护的施工。

大拱段支护参数,应根据实际地形地质条件,结合拟订的施工开挖方法进行围岩稳定性分析或进行结构强度校核后确定。一般可参考表 1-5 初步确定其支护参数。

大拱段衬砌支护参数

表 1-5

围岩分级		V 级	IV 级	III 级	II 级
初期支护	喷射混凝土	C20 厚 30cm	C20 厚 25cm	C20 厚 15cm	C20 厚 8cm
	锚杆	$L=3\text{m}$ 、6m 间距 70cm × 100cm 交错布置	$L=3\text{m}$ 、6m 间距 80cm × 100cm 交错布置	$L=2.5\text{m}$ 、5m 间距 100cm × 100cm 交错布置	$L=3.0\text{m}$ 间距 120cm × 120cm 拱部布置
	钢筋网 (cm)	$\phi 8\text{mm}$ 、20cm × 20cm	$\phi 8\text{mm}$ 、20cm × 20cm	$\phi 8\text{mm}$ 、20cm × 20cm	$\phi 8\text{mm}$ 、20cm × 20cm
	钢拱架	22 工字钢拱架 间距 70cm	20 工字钢拱架 间距 80cm	16 工字钢拱架 间距 100cm	—
二次衬砌	模筑混凝土	C25 钢筋混凝土厚 55cm	C25 钢筋混凝土厚 50cm	C25 素混凝土厚 50cm	C25 素混凝土厚 40cm
三次衬砌	模筑混凝土	C25 素混凝土厚 30cm	C25 素混凝土厚 30cm	—	—
仰拱	初期支护 (早强模筑混凝土)	C20 厚 30cm 内设拱架	—	—	—
	二次衬砌	C25 钢筋混凝土厚 60cm	C25 钢筋混凝土厚 60cm	—	—
备注	—	进行结构计算后确定	进行结构计算后确定	进行结构计算或围岩稳定分析后确定	进行围岩稳定分析后确定

大拱段衬砌支护参数,在实际施工过程中要注意,加强监控量测,根据监控量测结果及时调整支护参数,以确保施工安全。在施作最后一层衬砌之前,宜根据现场地质条件及监控量测数据对隧道结构的永久可靠性进行评价,以确保隧道运营期间的安全。

特大跨度隧道的支护结构设计,应与施工开挖方法设计相结合。作用在隧道结构上的荷载不仅与隧道跨度及地质条件有关,而且与施工方法有关,与支护结构的强度有关,隧道跨度越大,开挖方法对支护效果的影响越明显。

在地形地质条件较差时,大拱衬砌段一般可采用双侧壁导坑开挖法、三导坑开挖法或其他有效分步开挖方法。在地形地质条件较好时,大拱衬砌段一般可采用分步开挖方法。针对不同的地形地质条件、不同的支护结构参数,寻求最优的开挖方法成为大拱衬砌段设计与施工的重难点问题。典型的台阶分步开挖法如图 1-8 所示。

2. 过渡段隧道

在分岔隧道的分岔段内,将出现两处洞室形状及支护结构形式的较大变化:由四车道大拱隧道过渡到连拱隧道以及由连拱隧道过渡到小净距隧道。针对不同的地质条件合理确定过渡段的设计方法、施工方法、围岩与支护结构的保护方法是分岔隧道设计与施工成败的关键。

在相同的地形与地质条件下,单位长度的四车道大拱造价要高于连拱隧道,连拱隧道造价要高于小净距隧道,小净距隧道造价要高于完全分离隧道,施工过程中的安全度与结构受力条件也具有上述相同的比较趋势。因此在设计过程中应尽可能缩短分岔段的长度,在分岔段内尽可能缩短四车道大拱段与连拱段的长度,不仅关系到工程造价,而且关系到工程安全与施工

效率。隧道平面线形一旦确定,分岔段的长度也就基本确定,设计的关键点在于分岔段内的优化调整。在分岔段内,由于大拱段的长度取决于连拱隧道起点中隔墙的最小厚度,连拱隧道的长度取决于小净距隧道起点中间岩柱的最小厚度,因此合理确定分岔隧道内连拱隧道中隔墙和小净距隧道中间岩柱的最小厚度应是设计首先考虑的问题。分岔隧道过渡段示意图如图 1-9 所示。

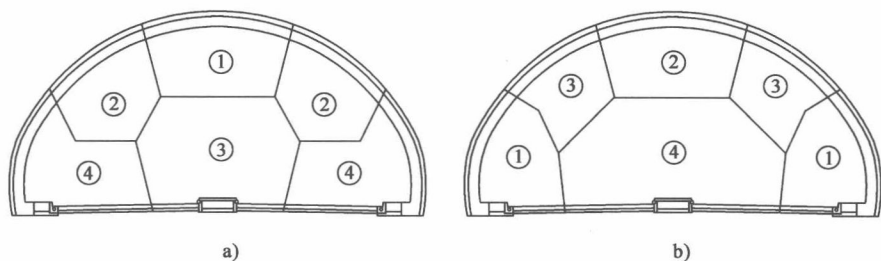


图 1-8 四车道大拱衬砌开挖方案
a) 先拱部及核心,后两侧;b) 先两侧及拱部,后核心

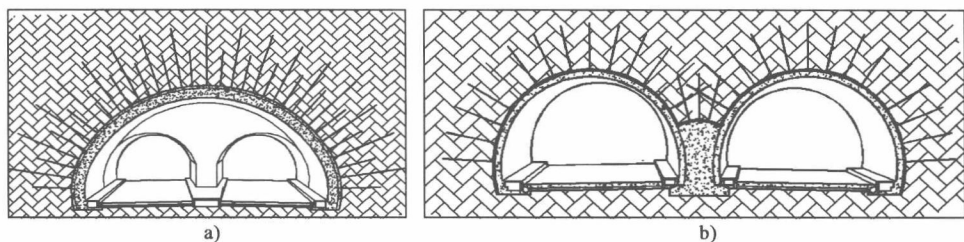


图 1-9 分岔隧道过渡段示意图
a) 四车道大拱过渡到连拱段;b) 连拱过渡到小净距段

一般条件下,整体式中隔墙连拱隧道的中隔墙厚度为 $1.6 \sim 2.0\text{m}$,小净距隧道中间岩柱厚度为 $4.0 \sim 5.0\text{m}$ 。现在,分岔隧道内连拱隧道与小净距隧道不仅比一般条件下取值更小,而且处于过渡段内的连拱隧道与小净距隧道的周边围岩的应力分布和结构受力状态更为复杂,中隔墙及中间岩柱将承受更大的围岩压力,因此在同样地质条件下,过渡段洞室支护参数的确定与优化,将与一般条件下同类洞室存在较大差别,技术要求更高。针对过渡地段复杂的三维特性,其围岩稳定评价方法与衬砌结构强度评价方法也有较大差别,在设计过程中,根据数值计算结果对洞室的稳定状态进行评价以及支护结构上土压力荷载的确定也十分关键。

(1) 连拱隧道中隔墙厚度取值问题

根据前期大量的隧道设计施工经验,常将整体式中墙连拱隧道中隔墙最小厚度取为 1.5m ,分岔隧道渐变段连拱隧道中隔墙厚度将沿隧道线间距的变化而逐步发生变化,不同的地质条件及开挖宽度下,中隔墙厚度对结构自身受力性能影响十分明显,中隔墙厚度分别为 1.2m 、 1.5m 、 1.8m 、 2.0m 时的整体式中隔墙连拱隧道的洞室稳定性能与结构受力变化值得深入研究。

(2) 小净距隧道中夹加固岩体厚度取值问题

常规隧道设计中,小净距隧道中间岩柱厚度最小值常取为 $4.0 \sim 5.0\text{m}$ 。同样在不同地质



条件下中间岩柱厚度分别为 1.5m、2.0m、2.5m、3.0m、4.0m 的小净距隧道的洞室稳定性能与结构受力变化也值得深入研究,以便寻找到一些规律性的结论。

(3) 过渡段隧道开挖方法问题

过渡段洞室不仅洞室跨度大,且形态复杂多变,支护结构与周边围岩的受力特性采用常规的二维平面应变研究方法已不能反映围岩与支护的真实特性,常需结合施工方法进行三维数值分析进行结构分析。

针对不同的地质条件及不同的过渡地段,如何采用合理的分步开挖方法,对于保证施工过程中的安全与结构的永久安全十分关键。设计上,要求连拱隧道在 V 级及 IV 级围岩地段采用三导坑法开挖,在 II 级及 III 级围岩地段采用中导坑法开挖;小净距隧道一般在 V 级围岩地段要求左右洞均采用侧壁导坑法开挖,在 IV 级围岩地段后期施工的洞室应采用侧壁导坑法开挖,以便及时加固中间岩柱;在 II 级及 III 级围岩地段可以采用台阶法开挖,但是内侧应尽快落底,以减少左右洞室之间的相互影响。

大拱到连拱的过渡段施工:

①注意及时加固过渡处开挖面,保证开挖面的稳定。

②只能在大拱段初期支护完成落底甚至仰拱施作完成后,才能进行连拱隧道的开挖。

③连拱衬砌起始段可考虑降低一级围岩进行支护设计,施工开挖方法也应按降低围岩级别进行,以保证施工安全。

④地质条件较差时,应适当加强连拱起始段的超前支护以及导洞支护。

⑤施工过程中注意保证衬砌背后排水系统的通畅以及防水层的完整性。

连拱到小间距的过渡段施工:

①只能在连拱段中隔墙施作完成并达到设计强度后,才能向前开挖小间距隧道。

②小间距衬砌起始段可考虑降低一级围岩进行支护设计,施工开挖方法也应按降低后围岩级别进行,以保证施工安全。

③开挖过程中,应注意保护已施作的连拱隧道中隔墙以及需要保留的中夹岩柱。

④充分重视中夹岩柱上系统锚杆或对拉钢筋的施工质量。

此外在施工过程中,应加强对分岔过渡段洞室周边变形及支护结构内力的监控量测,根据监控量测数据及时调整开挖方法以及支护参数,确保施工安全及结构的永久安全。二次衬砌在衬砌结构形式变化处及地质条件变化处均应设置变形缝,施工过程中注意变形缝防水构造。

3. 洞口送排风相互影响及通风方案的优化

高速公路隧道为充分利用汽车通过隧道时产生的活塞风力,隧道内的通风风流方向一般与行车方向一致,可节约运营期间的通风费用。因此,同一端的两洞口常一处排污另一处吸入新鲜空气。当两洞口相距较近时,必然会有部分排出的污染空气被另一洞口重新吸入。尽管连拱隧道与小净距隧道两洞口相距较近,但由于隧道长度一般较短,且采用自然通风,因此基本上可以不考虑其相互影响,特别是对运营管理费用的影响不大。分岔隧道长度一般大于 1 000m,且采用机械通风,上下行隧道洞口相距较近所产生的影响则不能忽略。

目前,国内外对近距离双洞送排风相互影响的相关研究较少。为了做好分岔隧道通风设计,同时为今后洞口距离较近的其他隧道通风设计提供依据,需对近距离双洞洞口送排风的相互影响程度进行研究,设计上拟采用三维流体分析软件模拟不同间距的双洞隧道在不同的送

风与排风状态下隧道口的空气的流动和扩散规律,给出近距离双洞隧道对相邻隧道的影响程度。当条件容许时,还可进行模型试验以及现场测试,以进一步验证分析结果。

第二节 分岔隧道关键技术的研究方法

改革开放以来,我国在能源、交通、水利水电、矿山、市政等领域取得了令人瞩目的成就,不仅铁路隧道、水利工程隧道迅速发展,公路隧道、城市地铁、地下空间的开发也得到了迅猛发展,大量的小净距隧道和连拱隧道建设成功。同时,我国隧道及地下工程设计、施工技术水平得到显著提高。

由于设计和施工的复杂性,一般均尽量避免在隧道内分岔,但是随着我国交通建设的发展,在高山峡谷地段,为节省桥梁的工程投资,并且受限于地形、地质、施工、运营等条件,修建分岔隧道结构已经在所难免。分岔隧道结构形式在我国的铁路隧道、城市地铁以及矿山巷道中已经得到应用,例如安康线的太峪隧道、大瓢沟隧道、清岔隧道、鱼洞峡隧道、铜羊沟隧道、八亩坪隧道、小河隧道、鹰嘴岩隧道、李家山隧道等均采用分岔结构。但在国内外的大跨度公路隧道建设中,分岔隧道尚未得到推广使用。

目前,国内外对分岔隧道的相邻隧道施工,其受力分析、施工顺序、控制爆破等尚处于总结和积累经验阶段,国内外尚无相应的设计、施工技术规范 and 标准。因此,开展分岔隧道的设计、施工关键技术研究显得尤为重要。

现代工程技术研究的方法主要有三种,即理论分析、科学试验和数值计算。在地下工程领域中,由于工程结构几何尺寸和边界条件非常复杂,要想得到精确的解析解几乎是不可能的,因此就更加依赖于地质力学模型试验和数值仿真。由于隧道新奥法建设技术的广泛应用,在施工现场的监控量测对于了解隧道围岩状态、及时适时调整支护参数和反馈设计具有非常重要的作用,并且基于现场监测数据的位移反分析技术已经非常成熟,可以帮助识别岩土体的本构模型和物理力学参数。另外,应用结构设计中的可靠度理论可以对隧道支护体系进行稳定性评价,而可靠指标的确定已经发展了很多的方法;隧道通风作为在近二十多年来空前活跃的一个领域,它主要是借助于理论计算、模型试验、实地量测和数值模拟等多种方法进行研究。下面对各个方面分别作详细的介绍。

一、地下工程稳定性分析理论与仿真方法

在地下工程的设计计算中,荷载-结构模式是长期以来工程界的主导方法,其缺点是将围岩和衬砌割裂开来,从而无法真正描述施工中的围岩力学特性,包括隧道的周边收敛和地表及地中位移。目前,隧道的理论解析成果主要集中在单孔隧道方面,对于复杂形状的单孔隧道和连拱隧道的理论解析是非常困难的。从20世纪60年代开始,在连续介质中的单孔隧道弹塑性解的基础上,国外许多学者对单孔隧道开挖引起的土体位移及地表沉降作了理论研究及经验的公式分析。隧道围岩压力理论经历了古典压力理论、散体压力理论以及现在广泛应用的弹性理论、弹塑性理论。围岩的力学模型从弹性发展到弹塑性、弹塑性损伤;从各向同性介质发展到各向异性介质;从连续介质力学模型发展到非连续介质力学模型。

20世纪初发展起来的以 Haim 和 Rankine 等人为代表的古典压力理论认为,作用在支护