

交通部西部交通建设科技项目：2002-318-000-22

公路连拱隧道设计

与施工关键技术

*Key Technology of Design and
Construction for Highway Twin-tunnel*

李志厚 朱合华 丁文其 著



人民交通出版社
China Communications Press

交通部西部交通建设科技项目：2002-318-000-22

公路连拱隧道设计 与施工关键技术

*Key Technology of Design and
Construction for Highway Twin-tunnel*

李志厚 朱合华 丁文其 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书以连拱隧道建设关键技术课题研究报告为基础,参照课题组编制的连拱隧道设计标准图、施工操作规程及相关施工资料等撰写而成。书中简述了连拱隧道的发展历史,分析了病害产生的原因,提出了中墙类型及病害防止措施,介绍了连拱隧道设计和施工技术,详述了进洞、洞身掘进、衬砌施作程序、动态反馈分析及典型病害调查方法。

本书编著方式循序渐进,图文并茂,紧密联系实际,并经过3~5年实践检验,证明所述关键技术是成功的,并得到了广泛应用。本书可供从事公路隧道设计、施工、科研、监理等相关技术人员参考,也是相关院校师生的不可多得的一部重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

公路连拱隧道设计与施工关键技术/李志厚等著.

—北京:人民交通出版社,2010.11

ISBN 978-7-114-08683-0

I. ①公… II. ①李… III. ①公路隧道:拱形隧道—设计②公路隧道:拱形隧道—工程施工 IV. ①U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第181213号

书 名:公路连拱隧道设计与施工关键技术

著 者:李志厚 朱合华 丁文其

责任编辑:刘永芬

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.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

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:16.5

字 数:383千

版 次:2010年11月 第1版

印 次:2010年11月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08683-0

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)

公路连拱隧道设计与施工关键技术 编写委员会

编著人员：李志厚 朱合华 丁文其

编 委：李国锋 陈树旺 张发春 高世军

蔡永昌 苏生瑞 李玉文 雷 华

房 锐 王晓彤 谢东武 刘学增

夏才初 李晓军 米增福

序

近年来随着高速公路建设的不断发展,已经和正在修建大量的公路隧道。连拱隧道的采用虽然只有不到40年的历史,但因其适应于一些特殊地形和地质条件,因此发展很快,也由此积累了丰富的实践经验。

连拱隧道跨度大,结构复杂,各种不利因素比较多,施工困难,而可供类比的工程很少,难以寻求到可供借鉴的工程实例。鉴于人们对连拱隧道的认识尚未十分清楚,为了促使其健康发展,针对存在的一些病害,由云南省交通规划设计研究院为承担单位,同济大学、思小公路建设指挥部等部门参加,共同组成了连拱隧道课题研究小组,会同贵州省交通规划勘察设计研究院和四川省交通厅公路规划勘察设计研究院等单位,以思小公路工程为依托,开展了连拱隧道工程的课题研究。

云南省交通规划设计研究院李志厚总工、同济大学朱合华教授和丁文其教授等多年来积极开展有关连拱隧道的研究,已有较多积累,并长期工作在生产建设第一线,由他们牵头,综合了这方面的科研成果编著成本书。该书密切结合工程实际,深入浅出地讲述了相关各方面的技术内容与科研成果。书中所述的连拱隧道关键技术,密切结合勘察、设计、施工等的工作实际,丰富和发展了连拱隧道的设计与施工方法,系统总结了诸多重要的前沿技术问题,有如:连拱隧道中隔墙及横断面结构、连拱隧道设计与计算技术、连拱隧道施工方法、连拱隧道典型病害调查,以及连拱隧道的设计与施工分析软件等等,可作为从事公路隧道建设、勘察、设计、施工、监理和监测等领域的工程技术人员学习与参考,这类技术专著在国内外也尚不多见,它的出版非常可喜可贺。

我粗读了本书全稿,认为它具有较高的科研内涵与工程技术实用价值。值此本专著付梓问世之际,乐于写了以上的一点文字,向业内同行们推荐,是为序。

孙钧

2010年初秋佳日于同济园

孙钧先生,前国际岩石力学学会副主席暨中国国家小组主席、中国土木工程学会副理事长,同济大学终身荣誉教授,中国科学院资深院士。

前 言

伴随着西部经济大开发进程,我国高速公路建设不断向山区延伸,不可避免地要修建大量的公路隧道。有关统计资料显示,截至2006年底,云南省境内已建成的公路隧道超过260座,其中半数左右为连拱隧道。

连拱隧道1974年诞生于日本。虽然起步较晚,然而,连拱隧道却具有独特的优势,特别适宜一些特殊地形、地质条件,其他类型的隧道难以替代。

连拱隧道跨度大,结构复杂,不利因素多,施工困难,可供类比工程少,难以寻求到可借鉴的经验。尽管如此,它仍然以其强大的生命力受到隧道建设者的青睐。例如:云南元(江)磨(黑)高速公路,穿越崇山峻岭,全线23座隧道中,连拱隧道有16座,占70%;思(茅)小(勐养)高速公路(以下简称思小公路)全线15座隧道,其中连拱隧道有13座,占87%。

鉴于人们对连拱隧道的认识,尚未格物致知。为了使其健康发展,针对它存在的问题,由云南省交通规划设计研究院作为承担单位,同济大学、云南思小公路建设指挥部等参加,会同贵州省交通规划勘察设计研究院、四川省交通厅公路规划勘察设计研究院等,共同组成连拱隧道课题研究小组,以思小公路为依托,开展连拱隧道课题研究,并列入交通部(现交通运输部)西部交通建设科技项目,课题编号为2002-318-000-22。

世上无难事,只怕有心人。本课题攻关技术研究工作前后历时3年,探明了隧道围岩与连拱结构的力学转换机制,攻克了设计与施工中的技术难点,保证了依托工程顺利竣工,从而获得了一整套系统完善的研究成果。这些研究成果,包括连拱隧道设计标准图、施工操作规程,以及为实施动态反馈分析编制的软件等,经过3~5年的实践检验,证明其研究成果是成功的。本书即在本课题研究成果基础上,按照循序渐进的方式撰写而成,以便于初学者阅读,也便于研究者参考。

全书共分九章,绪论、第一章概述及第二章连拱隧道的构造,由李志厚、丁文其编著,朱合华审校;第三章连拱隧道设计与计算关键技术,由陈树旺、张发春编著,高世军审校;第四章洞口边(仰)坡稳定评价及洞身超前地质预报,由蔡永昌、苏生瑞编著,丁文其、李玉文审校;第五章连拱隧道施工关键技术由雷华、房锐编著,李国锋审校;第六章连拱隧道现场监控量测,由王晓彤、谢东武编著,刘学增审校;第七章连拱隧道动态反馈设计与信息化施工,由丁文其编著,李志厚审校;第八章连拱隧道典型病害调查由夏才初编著,李志厚审校;第九章连拱隧道设计与施工分析软件,由朱合华、李晓军编著,蔡永昌审校;后记由李志厚、朱合华、丁文其撰写。

书中所述的连拱隧道关键技术,密切结合勘察、设计、施工等实际,丰富和发展了连拱隧道设计与施工方法,可作为从事公路隧道建设、勘察、设计、施工、监理和监测等技术人员学习和

参考。

本书在编写过程中,得到了云南省交通运输厅、云南省高速公路投资公司、思小公路建设指挥部、云南省交通规划设计研究院、同济大学、贵州省交通规划勘察设计研究院、四川省交通厅公路规划勘察设计研究院等,以及思小公路施工、监理及监测单位的大力支持,在此一并表示衷心感谢。本课题研究资料丰富,鉴于时间仓促、水平有限,书中若有不妥之处,或挂一漏万,敬请读者不吝赐教。

如今,西部交通公路建设事业,方兴未艾,愿本书所介绍的连拱隧道关键技术能有的放矢,在西部交通建设中发挥积极作用。

作 者

2010年10月

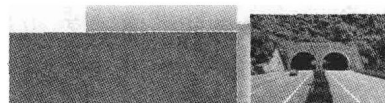
目 录

绪论	1
第一章 概述	9
第一节 分离式隧道	9
第二节 小净距隧道	10
第三节 连拱隧道及关键技术	10
第二章 连拱隧道的构造	17
第一节 连拱隧道中墙及病害分析	17
第二节 连拱隧道横断面形式	21
第三节 连拱隧道防排水系统	23
第四节 连拱隧道内路面构造及交通安全设施	27
第三章 连拱隧道设计与计算关键技术	28
第一节 连拱隧道洞外(内)接线设计	28
一、位于直线路段上洞外(内)接线方法	28
二、位于圆曲线上洞外(内)接线方法	29
第二节 连拱隧道结构选择	30
第三节 连拱隧道中墙优化设计	31
第四节 连拱隧道监测数据分析	31
第五节 连拱隧道洞身支护和参数	32
一、连拱隧道衬砌	32
二、连拱隧道防排水设计	34
三、三层中墙防排水设计	36
第六节 连拱隧道设计荷载	37
一、深埋连拱隧道围岩压力	37
二、连拱隧道深浅埋分界值	39
三、浅埋连拱隧道围岩压力	39
四、偏压连拱隧道围岩压力	42
第七节 连拱隧道计算方法与模型	43
一、计算原理及方法	43
二、广义梁单元研究及其在连拱隧道设计计算中的应用	46
三、广义梁单元算例分析	50
四、连拱隧道计算模型	52
五、荷载结构法设计计算实例	54
第八节 连拱隧道施工方案设计	59
第九节 连拱隧道设计、施工标准图集	61

一、连拱隧道设计图集总说明	61
二、连拱隧道建筑界限	62
三、共用符号意义和规则	64
四、明洞结构标准图	65
五、套拱横断面标准图	67
六、V级围岩整体曲中墙连拱隧道衬砌标准图	68
七、V、IV级围岩三层曲中墙连拱复合式衬砌标准图	70
八、V级围岩整体直中墙连拱复合式衬砌标准图	72
九、连拱隧道二次衬砌配筋标准图	74
第四章 洞口边(仰)坡稳定评价及洞身超前地质预报	79
第一节 洞口边坡稳定性评价及治理措施	79
一、洞口边坡稳定性评价意义	80
二、连拱隧道边坡稳定性分析方法	81
三、连拱隧道洞口边仰坡稳定性分析实例	84
四、洞口边仰坡滑移控制机理与防治措施	96
第二节 连拱隧道洞身地质超前预报方法	100
一、地质超前预报——曼歇4号连拱隧道实例	100
二、曼歇4号隧道围岩分级及稳定性评价	101
三、曼歇4号隧道洞内施工方案建议	103
四、曼歇4号连拱隧道工程应用效果分析	104
第五章 连拱隧道施工关键技术	110
第一节 连拱隧道典型施工法	110
一、洞身掘进方法分类	110
二、连拱隧道进洞施工	110
三、傍山明洞典型施工方法	113
四、主洞掘进方法——三导洞工法	116
五、主洞掘进方法——中导洞施工法	121
六、主洞掘进方法——单洞施工工法	124
七、主洞掘进方法——双洞全断面平行施工法	126
八、连拱隧道施工方法适用性及综合评价	127
第二节 连拱洞身开挖关键技术	127
一、中导洞开挖和支护	127
二、主洞开挖关键技术	128
三、连拱隧道施工支护	135
第三节 连拱隧道特殊地段的施工	152
第四节 连拱隧道防排水施工	155
一、连拱隧道防排水难点	155
二、连拱隧道防排水施工关键技术	156
第五节 连拱隧道施工组织设计	167
一、连拱隧道施工组织设计	167

二、连拱隧道施工人机物配置	168
第六章 连拱隧道现场监控量测	171
第一节 现场监控量测的目的、内容和方法	171
一、现场监控量测的目的	171
二、现场监控量测的主要内容	171
三、现场监控量测的方法	173
四、现场监控量测的频率与报警指标	177
五、现场监测结果分析	179
第二节 连拱隧道现场监控量测典型实例及其应用	182
一、连拱隧道现场监测实例	182
二、连拱隧道现场监测工作要点	190
第七章 连拱隧道动态反馈设计与信息化施工	194
第一节 隧道信息采集与动态反馈设计理论	194
第二节 连拱隧道断面监测数据动态预测	200
第三节 动态预测的实施	202
第四节 动态反馈设计与信息化施工技术	207
第五节 连拱隧道监测反馈典型实例分析	209
第八章 连拱隧道典型病害调查	214
第一节 裂缝现场调查方法	214
第二节 连拱隧道病害典型实例	216
第三节 连拱隧道裂缝机理研究	224
第四节 连拱隧道病害及防止与治理措施	228
第九章 连拱隧道设计与施工分析软件	230
第一节 连拱隧道设计与施工分析系列软件	230
第二节 连拱隧道施工监测数据库管理软件	231
第三节 监测数据管理系统的实现	234
第四节 连拱隧道施工动态数值模拟分析软件	235
一、二维、三维动态数值模拟分析软件的功能	235
二、二维、三维动态数值模拟分析软件原理与设计	236
三、连拱隧道施工动态反馈分析软件	237
四、连拱隧道计算机辅助设计软件	241
五、边坡稳定性分析软件	244
六、同济曙光软件评述	247
后记	248
参考文献	249

绪 论



随着高速公路向山区延伸,为了降低路线纵坡,改善公路线形,优化车辆行驶条件,最大限度保护生态环境,需要修筑大量公路隧道。如今,在山区高速公路中,长大隧道、隧道群、隧道与桥梁相连,已屡见不鲜,成为山区高速公路不可或缺的构筑物(图 0-1)。

图 0-1 是云南水麻高速公路上一路段写真,该路段围绕山体旋转 360°展线,以达到降低路线纵坡,改善车辆行驶条件的目的。路转峰回,山与路相互辉映,勾勒出一幅壮美的画卷。画卷里,分离式隧道、连拱隧道相互协调,分别发挥着举足轻重的作用。

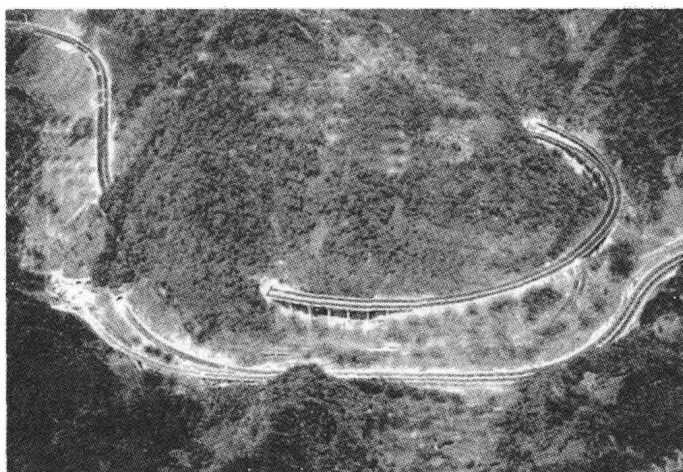


图 0-1 云南省水麻高速公路上螺旋线路段上隧道作用

1. 公路隧道类型

目前,在高速公路上修建的隧道,按上下行两座隧洞的横向布置不同,可以分为三种类型:

- 两隧洞之间的净距大,彼此之间互不影响,分别独立的设置,称为分离式独立隧道。
- 两隧洞虽然独立设置,但它们之间的净距相对较小,在施工期间彼此相互影响,称为小净距隧道。
- 两隧洞像“连体婴儿”那样,彼此相连在一起,称为连拱隧道。

上述三种不同类型的公路隧道,各自拥有自己的“用武之地”,分别适宜不同地势地形条件。



2. 连拱隧道及其特征

连拱隧道作为一种结构,在它出现之初,以其良好的视觉效果、较好的线形以及多方面的优点,获得了隧道建设者的青睐。但是,在公路隧道建设中,以往却很少被选用,国内外对此研究的也甚少。据有关资料显示,1974年日本在伊祖隧道首次采用了连拱隧道结构方案。在同一时期里,欧洲的一些国家,也相应修建了一些连拱隧道。在连拱隧道建设技术发展方面,日本、意大利、瑞士、法国、澳大利亚等国家,已有相当的设计施工经验。

1) 连拱隧道特征

连拱隧道两端接线对地形要求不高,布线方便,接线工程量小,线形顺畅。对于其他类型来说,这些特点常常是难以具备的。

2) 公路隧道比选

总结我国近几十年来公路隧道建设经验,在隧道选型上,对于长、特长隧道,分离式隧道应是首选方案。对于中或短隧道,应是其他结构形式隧道竞争的目标。特别是在山区敷设高速公路时,线路时常穿过小垭口、鸡爪地形,或沿溪敷设路线,在这种情况下,一般有四种方案可选:即路堑、分离式隧道、小净距隧道和连拱隧道。如果选用路堑方案,路基边坡的坡高一般会出现 $\geq 40\text{m}$ 的情况,左右两条路幅难以布设成分离路基,于是放弃分离式独立隧道难以发挥作用;而只对小净距隧道与连拱隧道方案进行比选。

近年来,全国许多条高速公路,积极推崇连拱隧道,并相继被选用。随着经验积铢寸累,连拱隧道形式、设计、施工技术日渐成熟,修建数量快速增长,如贵州省这两年来,就有20多座连拱隧道开工建设。

(1) 不同类型隧道基本特征

2001年,刘伟等针对不同类型的隧道,假设在各自适宜的条件下,曾对它们进行过归纳对比,从而概括出各自适用条件(表0-1)。

三种类型的公路隧道结构形式比选表

表0-1

结构形式	普通分离式隧道	连拱隧道	小净距隧道
双洞最小净距	$(1.5\sim 5.0)B$		$3\text{m}\sim 1.5B$
占地宽度	$(2.5\sim 7.0)B$	$2B+3\text{m}$	$2B+(3\text{m}\sim 1.5B)$
接线难度	较大	较小	较小
施工难度	较小	较大	中等
工期要求	t	$2\sim 3t$	$1\sim 1.5t$
工程造价	M	$1.3\sim 1.5M$	$1.1M$
质量控制难易	较易	较难	中等
爆破震动	基本不控制	$<10\text{cm/s}$	$<10\sim 20\text{cm/s}$
环境保护	山区狭窄地带可能出现高边坡	山区狭窄地带可降低边坡	山区狭窄地带可降低边坡
使用条件	各种隧道	短隧道	短隧道或围岩条件较好的中长隧道

注:上表 B 代表单洞隧道宽度。 t 为相同长度下的分离式独立隧道施工工期。



表 0-1 所列举的各类隧道基本特征指标,虽然是在其各自使用条件允许的情况下做出的,然而却分别完全展示了各自的“用武之地”。如果在客观条件只允许修建连拱隧道时,其他结构形式必然受到冷落。

(2) 不同类型隧道经济对比

在山区隧道选型时,首先要考虑隧道所处的地形条件。在地形条件符合要求的前提下,于是经济效能则占据主要地位。

2004 年,陈文辉、秦峰等对京福高速公路福州、三明、南平路段上不同隧道工程造价进行了对比分析,其分析结果如下:

比较顺序:小净距隧道:连拱隧道分别为:

- 福州段为 0.80 : 1.0;
- 南平段为 0.54 : 1.0;
- 三明段为 0.68 : 1.0;
- 三福段为 0.70 : 1.0。

上述对比方法:结论直观方便。但是,由于合同投标价包含了工程的各个方面,尽管对比结果具有宏观性参考价值,仅从经济比较,显然小净距隧道略占优势。

(3) 不同类型隧道工程量对比

从设计工程量上分析,理论上可以获得较为精确的比较指标。对分离式隧道、连拱隧道和小净距隧道的工程量分析,结果如下:

比较顺序依次是:普通分离式隧道:小间距隧道:连拱隧道

- V 级围岩浅埋为 0.74 : 0.97 : 1.0;
- V 级围岩为 0.77 : 0.88 : 1.0;
- IV 级围岩浅埋为 0.60 : 0.82 : 1.0;
- IV 级围岩为 0.48 : 0.57 : 1.0;
- III 级围岩为 0.75 : 0.79 : 1.0;
- II 级围岩为 0.76 : 0.76 : 1.0。

上述分析比较方法,虽然也很直观,但是由于工程规模不同,分离式和小净距隧道引起路基工程增量,未能充分考虑,因此,难以做出综合比较。

(4) 小净距与连拱隧道综合分析

最后,根据以上比较,对京福高速公路福上隧道做出综合分析,隧道主洞每延米工程造价的比值平均为:

普通公路隧道:小净距隧道:连拱隧道 = 100 : 130 : 170 (图 0-2)。

在工程造价和进度方面,小净距隧道相对于连拱隧道而言,对于高围岩级别而言具有一定的可比优势,但对于低围岩级别而言,视净距的大小而定,净间距大于 15m 时,也有一定优势,净距小于 8m 时,造价高于连拱隧道。

以上比较虽然具有一定的科学性和客观性,但是,只限于隧道自身比选,却忽略了小净距隧道引线工程增量;其

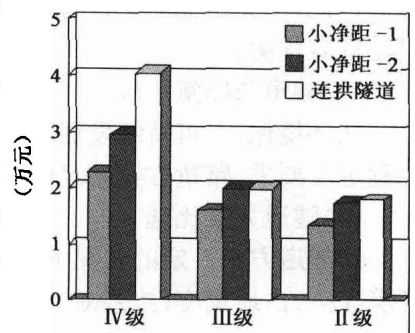


图 0-2 小净距与连拱隧道造价对比图



次,没有针对同一个具体设计进行比较,因此,比较结果也具有一定的局限性。

(5) 云南省交通规划设计研究院分析比较

云南省交通规划设计研究院,对相同条件下隧道方案进行了比较,其比较结果见表 0-2。

部颁定额计算分析结果 表 0-2

围岩级别	连拱隧道 (万元/延米)	两洞分修 (万元/延米)	连拱(两洞)	小净距隧道夹岩加固 (元/延米)
IV 级	13.72	11.87	1.16	6 000
III 级	11.74	10.11	1.16	2 000

从表 0-2 中可见,连拱隧道比两洞分修的隧道造价要高,对 IV、V 级围岩连拱隧道造价分别高出 16%。

对大(理)保(山)高速公路上的七座隧道分析和比较,其结果如表 0-3 所示。

大保公路七座隧道统计分析结果 表 0-3

围岩级别		连拱隧道 (万元/延米)	两洞分修 (万元/延米)	连拱(两洞)
V 级	合同价	8.40	7.69	1.09
	实施价	9.10	10.0	0.90
IV 级	合同价	7.38	5.03	1.47
	实施价	9.38	8.26	1.13
平均				1.15

表 0-3 说明:隧道工程造价对施工和计划经营者是不同的,即业主的工程造价(实施价)和施工中实际施工单位的工程造价(合同价)。两者的造价有时相差较大,应该给予严格的区分。例如峪口隧道,业主总造价应为 3 554 万元,单洞延长米造价为 3.554 万元;承包人总造价 2 758.6 万元,单洞延长米的造价为 2.759 万元。从一般中短公路隧道来看,二者之差在 20%~30%,隧道越长差值就越大。

3) 综合分析比较

基于以上的对比分析,无论是路堑、分离式隧道、小间距隧道、连拱隧道,都有其各自的优点。因此,不能一概而论说哪种形式最好,它们都有各自适用的条件,只有基于这些条件下,才可论证其优劣。

(1) 隧道与路堑比较

从环境保护、可持续发展、以人为本的理念出发,隧道优于路堑。如果仅考虑工程造价和工程进度要求,路堑方案占足够的优势。

(2) 隧道方案比选

当隧道方案一定的情况下,且属于中长隧道,从工程造价条件出发,应选用分离式隧道;从环境保护、占地宽度、接线难度条件考虑,连拱隧道或小间距隧道两者可与分离式隧道开展竞争。

(3) 连拱和小间距隧道竞争



当对连拱隧道和小间距隧道举棋不定时,若考虑工程造价、施工难度,可以优选小间距隧道。

若考虑到占地面积少、地形特别复杂、桥隧接线、景观设计、科技创新、地质预报、环境保护的角度,连拱隧道优于小间距隧道。

4) 综述

连拱隧道与传统的、比较成熟的分离式隧道相比,除工期长、造价高以及质量控制难度大外,在地形条件受到限制时,连拱隧道优势是非常明显的,其他结构类型的隧道,均逊色一筹。

连拱隧道所具有的优势其他类型的隧道虽然不可比拟,但是工期长、造价高以及质量控制难度大等缺点,制约其发展。如果在设计、施工及监测工作中有所突破,能够合理选型,简化繁杂结构和施工工序,并有效降低造价,同时解决隧道某些病害的情况下,连拱隧道就可能成为工程师乐于采用的一种结构形式。

3. 连拱隧道攻关技术

1) 连拱隧道存在的问题

归纳连拱隧道存在的问题,主要体现在洞身复合衬砌设计、中隔墙结构设计与防水设计、洞体开挖设计和衬砌施工等方面。在已建成的连拱隧道上,这些问题主要集中表现为二次衬砌裂缝和渗漏水。

连拱隧道存在的上述问题,表明在衬砌结构设计、施工和中隔墙防水方面,还存在许多技术问题有待完善,目前仍处于探索、积累经验阶段,还没有一套系统完善的、用于连拱隧道设计与施工的方法和成套工程技术,相应的规范也没有形成。

2) 连拱隧道技术实践与研究总结

针对连拱隧道存在的问题,笔者拟借鉴国内外有关资料加以用之,但是,从收集到的 7 000 种期刊中,有关连拱隧道的文献、资料尚不多见,且多集中于 1998 年后。归纳起来,主要集中在以下几方面。

(1) 连拱隧道设计方法方面

通过归纳分析,目前对连拱隧道设计实践和研究,主要集中在以下几个方面:

① 洞体开挖设计、洞身复合衬砌设计、中隔墙结构设计与防水设计;

② 复合受力体系下施工荷载和部分围岩压力由初期支护承担、二次衬砌承担另一部分围岩荷载的设计分担系数;

③ 荷载-结构法的设计方法;

④ 中隔墙的厚度与高度优化等。

(2) 连拱隧道施工方法方面

连拱隧道施工方法为传统的新奥法,除了中导洞先期施作和随后浇筑中隔墙外,两侧洞体视围岩级别高低采用全断面(III 级以下)、上下台阶(IV 级)和侧壁导坑(V 级以上)施工顺序。采用复合式衬砌,初期支护用锚、喷、钢筋网和格栅(拱架)联合方式,在围岩差的条件下使用超前支护。

(3) 关于防水问题方式

目前,连拱隧道防水处理有以下三种:

- 第一种防水方式



防水和结构设计统一处理,即在不削弱结构的条件下,将两侧二次衬砌各自独立成环,按单洞整体式断面施工,从而取消了中隔墙与拱部结合部位的纵向工作缝,避免了预埋件损坏防水板,也避免了多次施工对中隔墙已铺设防水板的损坏。

- 第二种防水方式

不设橡胶防水板,取而代之的是防水混凝土,以保证衬砌的质量,有利于防水。

- 第三种防水方式

加宽中隔墙厚度,并将其中部掏空,以形成直接的排水通道,消除中隔墙常见的渗漏水现象。

分析总结上述实验和研究成果,基本上还处于理念上的研究,尚无成熟的可以直接用于工程上的技术和经验。

3) 连拱隧道攻关技术

连拱隧道关键技术研究于 2002 年 5 月正式启动,至 2005 年 6 月结束,前后历时 3 年,攻克了设计与施工中的技术难点,获得了以下研究成果:

①在广泛调查研究的基础上,总结出连拱隧道裂缝分布规律,揭示其产生的机理,提出了预防措施。

②通过模型试验,探讨了连拱隧道围岩压力分布的定性规律。

③依据依托工程监测数据、模型试验、经验公式、理论计算围岩压力分布,首次建立了完整的连拱隧道荷载计算模式,形成了系统的连拱隧道设计计算方法。

④针对连拱隧道中隔墙结构、厚度、高度,进行了优化分析,提出了不同形式的中隔墙高度、厚度的建议值。首次提出了三层直(曲)中隔墙的成套设计与施工方法,并总结出不同结构设计、施工及防排水技术。

⑤基于连拱隧道受力特征,从总量与增量控制出发,探讨出了不同围岩级别下连拱隧道监测预警值与判断标准,对于连拱隧道稳定和安全施工具有重要的使用价值。

⑥从连拱隧道结构特征出发,开展中导洞先行施工方法研究,总结和提出了一整套中导洞超前地质预报流程与施工方法,系统地建立起动态反馈设计与信息化施工模型,能够及时、快速、超前处理施工中所发生的问题和一切突发事件。

⑦从连拱隧道适用条件、过渡方式、过渡段长度、过渡段线形 4 个方面比较,提出其 5 种洞外接线方式。

⑧利用极限平衡法和强度折减法,对洞口的边仰坡进行了二维和三维稳定性分析,获得了实用性结论。

⑨通过面向对象的设计方法,建立了同济曙光统一图形平台,在此基础上研制出连拱隧道监测数据库管理软件、施工动态数值模拟分析软件、施工动态反馈分析软件、计算机辅助设计软件和边坡稳定性分析软件,开发出成套连拱隧道设计、分析与计算方法的软件,实现了连拱隧道的动态设计、自动化设计。编制出连拱隧道设计准则、设计标准图及施工操作规程,以指导连拱隧道设计和施工。

4. 连拱隧道标准图与施工操作规程

针对连拱隧道存在的上述问题,为解决其设计与施工上的技术难题,扩大其应用范围,本研究课题小组根据研究成果,编制出连拱隧道设计准则、标准图、设计计算及理论分析和



软件、施工操作规程,用于指导连拱隧道工程设计和施工,以期在我国公路交通上发挥积极的作用。

在上述研究成果中,连拱隧道标准图是以思小公路上的麻地河(现名松山岭)1~4号、曼歇1~4号、南岛河,贵州的崇遵线开肩堡Ⅱ号、四川西攀线龙塘湾等连拱隧道设计图纸为基础汇集一起,经过分析、研究编撰成册,其荷载模式、计算模型、计算方法,由“连拱隧道建设关键技术的研究课题”研究提出,并经过实践检验是可行的。该图集既对连拱隧道设计经验进行了全面的总结,又为同类工程提供了有益的参考。

标准图集包括的连拱隧道形式有:三层曲中隔墙、三层直中隔墙、整体曲中隔墙及整体直中隔墙等四种形式,可作为连拱隧道设计参考,主要内容包括以下几部分:

- (1) 总说明。
- (2) 连拱隧道的建筑限界与内轮廓设计图。
- (3) 四种形式的连拱隧道结构设计图。

- 连拱隧道衬砌断面设计图

在V~Ⅱ级围岩条件下,四种形式的连拱隧道衬砌断面设计图,以及整体式连拱隧道洞口部位半明半暗明洞断面设计图。

- 连拱隧道超前支护图

在V、Ⅳ级围岩条件下,四种形式的连拱隧道衬砌断面超前支护图。

- 衬砌配筋图

在V、Ⅳ级围岩条件下,四种形式的连拱隧道衬砌配筋图,以及包括整体式连拱隧道洞口部位半明半暗明洞段衬砌配筋图。

- 防、排水工程图

四种形式的连拱隧道的施工缝、变形缝防水设计图及衬砌防、排水设计图。具体内容包
括:隧道防水板铺设图,施工缝、沉降缝、伸缩缝防水布置及防水构造,二次衬砌回填预埋注浆
管布置图及隧道衬砌防排水总布置图。

- (4) 施工程序图。

在V~Ⅱ级围岩条件下,四种形式的连拱隧道的施工程序示意图,以及整体式连拱隧道洞
口部位半明半暗明洞段施工程序示意图。

- (5) 监控量测工程图

监控量测工程图包括:主观测断面监测方案图、一般观测断面监测方案图、信息化设计流
程图。

- (6) 隧道内路面工程图

路面工程图包括:隧道路面分块布置图、隧道路面结构图、隧道洞口路面结构图、隧道
洞内电缆沟、排水边沟布置图、隧道洞内电缆沟、排水边沟配筋图、隧道洞内路面盲沟布
置图。

本书从连拱隧道标准图中选择部分常用的结构编排于有关章节中,同时对相应的施工操
作规程,在以后章节中以详解的方式进行阐述,以便于读者参考。

5. 连拱隧道发展与展望

上述关于连拱隧道研究成果,可以说解决了目前连拱隧道建设中存在的一些关键问题,弥