

GONGLU LIANGONG SUIDAO
GONGCHENG JISHU

公路连拱隧道

工程技术

姚振凯 黄运平 彭立敏 编著



人民交通出版社

China Communications Press

生
世
界
公
路
连
拱
隧
道
工
程
技
术

Gonglu Liangong Suidao Gongcheng Jishu

公路连拱隧道工程技术

姚振凯 黄运平 彭立敏 编著

人民交通出版社

内 容 简 介

本书阐述了国内外公路连拱隧道工程设计、科研、施工和组织管理方面的先进技术和经验,介绍了一些理论联系实际的成功案例,突出了各种施工方案的适用条件及其优缺点、工艺流程、工艺步序和工艺要点,针对性和实用性较强。

本书适用于公路隧道科研、设计、施工和管理技术人员使用,也可作为研究生及大专院校学生参考用书,还可作为企事业单位中、高级技术人员培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

公路连拱隧道工程技术 / 姚振凯, 黄运平, 彭立敏
编著. —北京: 人民交通出版社, 2006.1
ISBN 7-114-05865-9

I.公… II.①姚… ②黄… ③彭… III.公路隧道:
拱形隧道—工程技术 IV.U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 144870 号

书 名: 公路连拱隧道工程技术
著 作 者: 姚振凯 黄运平 彭立敏
责任编辑: 赵瑞琴
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) 85285656, 85285838, 85285995
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: 北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 18
字 数: 448 千
版 次: 2006 年 1 月 第 1 版
印 次: 2006 年 1 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN7-114-05865-9
印 数: 0001~3000 册
定 价: 39.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

FOREWORD

忆往昔,我国连拱隧道工程技术的发展,在 2000 年前“连拱隧道”术语,在多数隧道工程技术人员中,还是一个新颖的甚至是模糊的概念。当时建成的连拱隧道不多,有关连拱隧道的论文发表也很少。记得在 2000 年参与兴建福州市长安连拱隧道时,很难找到可参考的文献,也难找到已建成的连拱隧道可参观考察。当时萌生出一种想法,如果有本连拱隧道专著查阅该多好,于是开始注意收集这方面资料,并争取有更多机会参与施工实践。

看今朝,这六年来连拱隧道工程技术应用,在我国已获得长足进展。在全国各地高等级公路和城市道路先后建成了数以百座的连拱隧道,许多省份山岭重丘地区甚至是成批地兴建连拱隧道,而且目前正在同时施工的三车道连拱隧道的就有数座。在应用同时,理论研究和经验总结方面也取得丰硕成果,先后有数百篇论文、科研成果和专著发表,并首次出版了有专门章节论述连拱隧道的公路隧道设计规范。本书作者们在这六年也先后参加了多座连拱隧道的设计和施工,为撰写本书创造了实践体会的条件。

在写作本书过程中,得到人民交通出版社领导和中共江西赣州市委副书记、常务副市长张佩昌、赣州市高速公路公司总经理郭成西,以及武汉俊博市政工程公司领导的关心和支持。西南交通大学何川教授、同济大学胡向东教授、中南大学土木建筑学院隧道与地下工程系博士、硕士研究生们、中铁十五局华东公司总工杨荣、中铁十七局远通公司总工宋晋心和李沅熙、湖南省高速公路建设开发总公司侯运秋高工、核工业中南地质局 304 大队韩道华高工以及中铁隧道局四处缪长胜和刘刚工程师等为本书的写作提供了许多宝贵资料。重庆交通科研设计院刘伟高工、何林生高工及中铁隧道局文献江高工给予了通信咨询。中水五局武汉马鞍山隧道项目部总工杨敦才和张洪玲工程师为本书电脑写作给以许多帮助,在此一并致以最诚挚的谢意。此外,本书的写作引用了一批参考文献,对于文献作者推动隧道技术的进步所作的努力表示由衷的敬佩,借此机会也向他们表示感谢。

由于水平和条件所限,书中内容肯定存在许多不足,如对连拱隧道模拟和模型实验方面未能专门阐述,挂一漏万和错误之处,恳请批评指正。

编著者
2005 年 6 月

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	1
第一节 公路连拱隧道名称由来及其演化	1
第二节 连拱隧道适用范围和优缺点	3
第三节 公路连拱隧道的分类	5
第四节 研究现状和发展方向	7
第二章 工程地质勘测和隧道总体设计	11
第一节 工程地质勘测和隧道围岩分级	11
第二节 隧道总体设计和选址	16
第三节 隧道洞口位置选择	19
第四节 隧道线形设计	22
第五节 隧道净空和限界设计	26
第三章 连拱隧道主体结构	34
第一节 断面结构类型	34
第二节 衬砌结构	39
第三节 洞门结构	49
第四节 明洞结构	60
第四章 连拱隧道附属建筑	63
第一节 隧道防排水	63
第二节 路基路面结构	72
第三节 专用管沟和人行横洞	77
第四节 隧道内装饰	78
第五节 通风、照明、防火、消防	79
第五章 支护结构计算与分析	85
第一节 隧道结构体系的计算模型	85
第二节 结构力学方法	87
第三节 岩体力学方法	96
第四节 衬砌可靠度评估方法	103
第五节 工程应用实例	114
第六章 连拱隧道施工方案	124
第一节 施工方案的确定	124
第二节 三导洞方案	126

第三节	中导洞方案	136
第四节	无导洞方案	142
第五节	四导洞方案	144
第六节	开天窗明洞方案	145
第七节	公路隧道组合方案	148
第八节	四连拱隧道中导洞-双边洞方案	148
第七章	洞口和明洞施工	150
第一节	洞口边仰坡刷坡和防护	150
第二节	洞口和洞内超前支护	152
第三节	洞口防偏压施工	161
第四节	明洞施工	163
第八章	导洞和中侧墙施工	166
第一节	导洞断面形态尺寸及中侧墙位置	166
第二节	导洞开挖及其地质预报意义	168
第三节	导洞支护	171
第四节	中墙施工	173
第五节	侧墙施工	178
第九章	主洞施工	180
第一节	主洞开挖方法	180
第二节	钻爆作业设计与施工	187
第三节	主洞初期支护	194
第四节	二次衬砌施工	199
第十章	施工监控量测	202
第一节	概述	202
第二节	地表沉降监控量测	205
第三节	工程地质与初期支护监控量测	206
第四节	洞室周边位移量测	217
第五节	二次衬砌内力量测	222
第六节	监控量测工程实例	224
第十一章	常见病害治理	234
第一节	整体式中墙渗漏水治理	234
第二节	洞口坍方治理	238
第三节	洞内坍方治理	239
第四节	二次衬砌开裂治理	249
第五节	二次衬砌坍方治理	253
第六节	隧道偏压治理	254
第七节	多种病害综合治理	256
第十二章	施工组织与管理	259

第一节	施工组织与设计	259
第二节	熟悉地质勘察报告及施工图设计	260
第三节	施工工序的时空步距	262
第四节	施工队伍组织管理	264
第五节	隧道施工管理	266
参考文献		275

1 第一章 绪 论

本书汇集了设计、科研、高校及施工单位的大量研究成果及实践经验,侧重于介绍双连拱的二车道公路隧道的设计与施工,兼顾三车道的连拱隧道,顺便介绍四连拱隧道,还介绍了特殊条件下的连拱隧道的应用与施工,如下穿的连拱隧道施工和城市带天窗的明挖连拱隧道的设计与施工。重点论述连拱隧道施工方法、工艺和步序,兼顾有关设计内容。在内容表达上,采用大量图表形式,并尽力用实例进行阐述。在如实介绍实例时因当时的各种条件所限,有部分内容可能不完全适用,只供参考,从中也可以了解到连拱隧道的技术发展。在论述施工方法和工艺时,主要从工艺原理、工艺流程和工艺要点三个方面进行分析。

本书尽力和希望能完成下列三个主要的任务:

1. 列出常用的或已有的不同公路连拱隧道设计结构及有关参数,并说明其应用条件,提供读者选择。选择原则应是最经济、最安全、最方便,而且质量好,工期短。
2. 在选定施工方案过程中,要使读者知道如何进行施工和管理,以达到工期最短,经济最省,质量最好,又最安全之目的。
3. 希望能够启示读者不断创新,根据当时当地的具体条件提出新的或改进的施工技术和工艺。因为各地具体条件不尽相同,技术在不断进步,新工艺和新材料不断问世,书刊上介绍的设计和施工技术、工艺不一定完全适合自己用时的实际条件,需要读者在创造中学习,在学习中创造,不断完善和大胆创新地提出因地制宜的设计与施工技术及工艺方案。

第一节 公路连拱隧道名称由来及其演化

公路连拱隧道(Multi-arch Road Tunnel),最初是指两座隧道连成一体的单线双洞隧道,也就是现今的双连拱隧道。单洞隧道是一洞一拱,双洞连体隧道必然双拱相连,故最初得名为连体隧道。考虑到连体隧道范围更广,它不仅包括左右相连的连拱隧道,还包括上下双层的连体隧道,故连体隧道与连拱隧道不能等同视之。

后来研究认为,连拱隧道主要是拱部相连,从而称为连拱隧道,或严格称之为双连拱隧道,比较切意。也有人形象地用英文字母“m”表示既连体又连拱,称其为“m”隧道。还有人称之为联拱隧道。在日本因连拱隧道形似眼镜,称之为眼镜状隧道或眼镜法隧道。本书考虑到双洞连拱和连体这一突出特征,而不是可连可不连的联合,故采纳广为运用的“连拱隧道”这一名称。

我国公路隧道,在解放前因隧道断面较小是单洞双向错开行驶,后来在一些断面较大的隧道内允许双向同时行驶。解放后,尤其是改革开放以来,公路交通量的迅猛增加和安全行驶的需要,公路隧道发展用双洞上下行分离式隧道行驶。经过一段时间运营后,发现在一些特殊地形条件下,线路分离困难,或占用土地太多,民房拆迁量大,分离式隧道线路建造价格昂贵,于

是产生了引进双连拱隧道形式。据文献报导,我国最早成型的公路连拱隧道,是建于 1993 年的广州市白云山三车道连拱隧道,其跨度达到 31.5m。

连拱隧道在最初多是以双连拱二车道结构为主,后来由于交通量增加,不断出现三车道结构的连拱隧道,如京珠高速公路广东段的五龙岭隧道是其例。在城乡交接部位人流量和交通运输量更大,更多城市发展用三车道连拱隧道和四连拱隧道,如武汉市马鞍山三车道连拱隧道,以及广东深圳科苑立交及福州市二环路象山的四连拱隧道等。

连拱隧道的建造数量在我国发展迅猛,20 世纪 90 年代我国只有为数不多的十余座连拱隧道,但进入新世纪以来连拱隧道数量迅速增多,在我国西南的云、贵、川和东南的鲁、苏、浙、闽、粤、桂,以及中部的赣、湘、鄂、豫、陕、晋、皖等省区,已先后得到广泛使用。据不完全统计全国已建和在建的连拱公路隧道有 200 余座(表 1-1),是世界上连拱隧道最多的国家。在云南元磨高速公路全长 147.37km 中有连拱隧道 15 座^[1],平均 9.8km 一座,总共 3388m,占该线路隧道总长的 26.9%,而在老苍坡一处就建了一号至六号共 6 座。阿深线江西赣(州)定(南)高速公路中约 50km 线路中有 6 座连拱隧道。浙江金丽温高速公路二期工程全长 90km 有 21 座之多^[2],平均 4.3km 一座连拱隧道。浙江金华—丽水高速公路中丽水市太平乡境内全长 7.9km 的线路内有连拱隧道 5 座之多,总长度达 1686.8m。贵州遵义—崇溪河高速公路三穗—凯里 88km 中有 30 多座隧道,其中有连拱隧道 19 座之多。玉屏—凯里高速公路全长 134km,有 25 座连拱隧道,平均 5.36km 一座。广南—砚山高速公路 77.55km 中,有连拱隧道 30 座之多。福建省罗长、京福、三福三条高速公路中已建和在建的连拱隧道,有 25 座之多。由此可见,连拱隧道在我国有成群成组建设之势。

部分公路连拱隧道表 表 1-1

序号	名 称	地 理 位 置	长度(m)	施 工 年 份	施 工 单 位
1	白云山	广州北环高速公路,三车道	242	1992 ~ 1993	
2	小束山	日本,第二神明公路(改建)	1240	1993 ~ 1998	
3	象山	福州市二环路,四连拱隧道	217	1995 ~ 1996	中铁隧道局
4	紫云山	陕西延安市子长县	315	1997 ~ 1998	中铁十七局
5	相思岭	福州市,福泉高速公路	460	1997 ~ 1998	中铁十二局
6	练江	云南玉溪—元江高速公路	180	1997 ~ 1999	中铁十八局
7	五龙岭	广东翁源京珠高速,三车道	200	1998 ~ 2000	中铁隧道局
8	猫山	广东新会,西部沿海高速	411	1998 ~ 2000	广东冠粤路桥
9	石梯沟	四川广元,108 国道	320	1999 ~ 2001	四川隧道
10	车陂路	广州市天河区东圃镇	60	2000 ~ 2001	
11	长安	福州市,罗长高速公路	440	2000 ~ 2002	福建二公路
12	马宅顶	福州罗长高速,不对称隧道	291	2000 ~ 2002	
13	小曼萨河	云南元江—磨墨高速	235	2000 ~ 2002	
14	金竹林	四川,沪蓉线梁万高速公路	445	2001 ~ 2002	

续上表

序号	名 称	地 理 位 置	长度(m)	施 工 年 份	施 工 单 位
15	黄埔大道	广州市黄埔路城市隧道三车道	1047.4	2001 ~ 2002	
16	迳古潭一号	江西信丰, 赣定高速公路	221	2002 ~ 2003	中铁十七局
17	下杨坑	江西龙南, 赣定高速公路	485	2002 ~ 2004	中铁隧道局
18	大老地	江西定南, 赣定高速公路	280	2002 ~ 2004	中铁十六局
19	柏三	江西定南, 赣定高速公路	165	2002 ~ 2004	中铁十三局
20	科苑立交	深圳科苑立交, 四连拱隧道	76		深圳市政公司
21	马鞍山	武汉蔡甸市政隧道, 三车道	385	2004 ~ 2005	中水五局

日本最早的连拱隧道是 1974 年兴建的伊祖隧道, 后来在一些欧美国家也先后建成一批连拱隧道。日本在建的第二东(京)名(古屋)及名(古屋)神(户)高速公路等重要干线和一些中心城市周边公路中兴建了大量的连拱隧道, 在 1993 ~ 1998 年改建第二神明高速公路时修建了长达 1240m 的小束山连拱隧道。到目前为止, 日本已有 30 余座连拱隧道。

第二节 连拱隧道适用范围和优缺点

公路连拱隧道的特点, 突出地表现在其形态上的两洞洞身紧紧相连, 只有一中墙相隔, 两洞的拱顶共同搭建在钢筋混凝土中墙之上。连拱隧道通常不长, 多为中短规模, 大多在 500m 以内, 少数超过 500m, 国外如日本有的可达 1240m。因多数连拱隧道长度较短, 导致其埋深浅, 围岩强烈风化破碎, 地质条件较差等一系列特点。再因连拱隧道双洞相连, 导致开挖跨度大, 二车道的跨度超过 20m, 三车道的跨度大于 30m, 且易产生偏压, 施工工序较多, 施工难度较大, 工期较长。但由于双洞相连也带来运营和管理上的方便等一些直观特点^[8~10]。

一、连拱隧道适用范围

兴建连拱隧道的适用范围, 主要有以下几种情况:

(1) 洞口地形狭窄和地质条件在 V 级围岩以上(可含少量 VI 级)的岩石地层, 当 VI 级围岩为主的软弱地质条件中常不采用连拱隧道形式;

(2) 在特殊的地形下, 若采用分离式隧道导致左右洞长度相差很大, 或造成地面建筑受到影响, 或洞外路基工程量过大, 经济上明显不合理时常采用连拱隧道;

(3) 在山岭重丘地形区内, 在路基边坡等于或大于 40m, 且左右路幅难以拉开成独立的左右线时, 或为避免大量的深挖高填的土石方工程量, 减少自然环境的破坏, 适宜采用成群成组兴建连拱隧道;

(4) 在城市周边山丘, 人口稠密, 土地资源紧张, 为减少地面房屋拆迁, 保护自然景观和名胜古迹, 满足日益增长的人流和交通量需要, 更多地采用双连拱或多连拱隧道, 如广州白山和武汉市马鞍山的三车道连拱隧道, 福州市二环路象山四连拱隧道是其例;

(5) 由于连拱隧道造价较高和一些其他不足, 目前我国主要采用中短规模隧道。但在日本建有中长规模的连拱隧道, 长度达 1240m。

二、连拱隧道优点和不足

1. 连拱隧道优点

公路连拱隧道得到日益广泛应用,其原因是因它具有独自的优点。刘洪洲、黄伦海^[11]曾详细论述了连拱隧道的优点和应用条件,其最主要的优点是:

(1)在特殊的山岭重丘地形,和在城市周边有山丘阻碍城乡交通处,以及在人多地少经济活跃的山丘区兴建连拱隧道,有利于洞口和洞身的选择,减少隧道长度,减少投资。

(2)避免隧道洞口桥隧或路隧分幅,节省了进出口洞口路基和桥梁分幅所占土地面积,也避免了线路从整体到分离再到整体的复杂转换,有利于路桥隧总体的线形流畅。如云南大理—保山高速公路砖房连拱公路隧道与桥紧密相连,桥隧连接线形理想,既便于桥梁施工,又降低桥梁造价。

(3)缩小了所占地下空间,提高了地下空间利用率。广州市黄埔大道隧道是一座开天窗平顶连拱隧道,在原黄埔大道中线部位地下用明挖法修建城市车行隧道,最大限度地提高了地下空间利用率。又如在日本小束山隧道,建设部门限制隧道洞身在地下很窄的范围内,在此有限的空间内只允许建连拱隧道,而无设计分离式的地下空间。

(4)在城乡交接的山丘处,因人流量和交通量大,适宜兴建双连拱或多连拱公路隧道,以满足城市发展的需要。

(5)兴建连拱隧道,居民房屋拆迁和开挖土石方数量都相对较少,有助于减少自然环境破坏和保护城郊名胜古迹,又便于运营管理,有着明显的社会效益和经济效益。尽管连拱隧道的每延米造价比分离式隧道高一些,但由于大量减少了占地面积和洞外工程量,尤其是洞口连接路线的土石方及排水工程量,总造价还是划算的。

2. 连拱隧道的不足

公路连拱隧道也有其许多方面的不足,主要是:

(1)最主要是开挖跨度大,二车道隧道跨度大于 22m,三车道隧道跨度大于 30m,因而经受围岩压力较大。

(2)埋深浅,多次开挖爆破导致围岩多次扰动,尤其是中墙顶部及其两侧,稍有不慎易引起隧道围岩坍方,甚至冒顶。

(3)施工工序多,结构特殊且复杂,结构受力状态变化频繁,质量控制点多,施工技术难度较大和维修不便。

(4)中墙和边墙的施工及拱部二次衬砌施工,相隔时间较长,使得支护系统受力复杂。整体式中墙防排水和主洞拱部防排水施工不同步进行,使施工缝更加明显化。

(5)整体式中墙渗漏水现象较为常见,施工质量和洞口安全比不上分离式隧道。部分污秽空气倒流入另一洞内。

(6)目前主要适于特殊地形和中短规模隧道等^[11~13]。

上述存在的诸多不足,很多属于初期缺乏设计和施工经验,以及当时缺少可参考的论著和规范指导有关。为此,近几年许多科研、设计、高校和施工单位的专家、学者联合或者单独针对连拱隧道存在的问题,进行了多方面的研究^[14~18],使之不断改进和完善,有的已获得了较理想的效果,如广泛采用复合式中墙,从根本上解决了中墙渗漏水的通病难题。

3. 连拱隧道与分离式及小净距隧道特征对比

公路连拱隧道与分离式及小净距隧道的特征^[19]对比,列于表 1-2 中。

公路连拱隧道与分离式及小净距隧道特征对比表

表 1-2

序号	对比项目	连拱隧道	分离式隧道	小净距隧道
1	双洞边墙间距(m)	0	大于 15	3~15
2	结构和受力	结构复杂,受力不稳定	简单,稳定	较简单,较稳定
3	工序、工期和难度	工序多,工期长,难度大	少,短,小	较少,较短,较小
4	围岩扰动次数	多	少	较少
5	地质条件	差,浅埋,偏压	好差都有	较好
6	隧道长度	中短型,很少长的	不限,长的显优越性	中短型为主
7	与线路连接	线形最好	差	较好
8	可容交通量	大,可用多连拱隧道	较小	较小
9	适用范围	城市和山丘	山区	较广
10	占地面积	最少	多	较少
11	地下空间利用	最好	差	较好
12	人文景观和环保	最有利	不利	较有利
13	运营管理	最有利	不利	较有利
14	经济评估	每延米造价高,总价划算	每延米造价低,连接线高	有利
15	高跨比(H/B)	<0.5		>0.5

第三节 公路连拱隧道的分类

公路连拱隧道的分类,至今尚无一个统一的分类方案,当前只能根据不同的要求和目的,采用下列不同的分类方案。

一、按所处位置划分

(1)山岭隧道:穿越山岭,可缩短线路,大量连拱隧道归属此类。如贵州玉屏—凯里高速公路全长 134km 中有 25 座连拱隧道。

(2)市政隧道:穿越城市山丘,成为城市人流和交通流的重要通道。如福州市象山和深圳市科苑立交四连拱隧道,武汉市马鞍山三车道连拱隧道等。

二、按长度划分

按连拱隧道长度,以隧道中轴线进出口洞门墙外侧间之距离为准划分:

(1)短隧道:隧道长度短于 500m,我国绝大多数连拱隧道为短隧道。

(2)中隧道:长度为 500~1000m,我国已有不少连拱隧道长度超过 600m,近年还有加长趋势,如浙江温州尖牛山隧道长达 700m。但从造价方面考虑一般认为不宜超过 700m 长,当超过 700m 时在工程造价上已不太划算。

(3)长隧道:1 000~3 000m,目前极少连拱隧道为长隧道,如我国目前只有广州市黄埔大道隧道长 1047.40m,国外有日本小束山隧道长度达 1240m。

三、按埋深划分

连拱隧道浅埋和深埋的分界,一般按荷载等高值,并结合地质条件等因素综合判定,由公

式 $H_p = (2 \sim 2.5) h_q$ 计算^[21], 式中 H_p 为浅埋隧道分界深度(m), h_q 为荷载等效高度(m)。在矿山法施工条件下, IV ~ VI 级围岩取 $H_p = 2.5 h_q$, I ~ III 级围岩取 $H_p = 2 h_q$, 小于此比值者为浅埋, 大于此比值者为深埋隧道^[21], 或按埋深与连拱隧道跨度之覆跨比值粗略计算。按连拱隧道埋深划分以下三类:

(1) 超浅埋隧道: 在隧道拱顶覆盖厚度很小, 其覆跨比值尚无统一数值, 可大致按 0.5 值为界线。过去在这种条件常不采用修建隧道方式, 而是用深挖路堑代替隧道, 后来发展用明挖法施工隧道, 近些年来强调环境保护也采用暗挖法施工超浅埋隧道。

(2) 浅埋隧道: 隧道拱顶覆盖厚度与隧洞跨度比, 小于 2 ~ 2.5, 绝大多数连拱隧道为浅埋隧道。如武汉蔡甸区马鞍山三车道连拱隧道最大埋深为 30m, 而毛洞开挖宽度为 34m, 属典型的浅埋隧道。

(3) 深埋隧道: 隧道拱顶覆盖厚度与隧洞跨度比, 大于 2 ~ 2.5 为深埋隧道。如福州市罗长高速公路二车道的长安隧道, 最大埋深达 115m。

四、按隧道连拱数量划分

按隧道连拱数量划分为:

- (1) 双连拱隧道, 绝大多数连拱隧道为双连拱隧道。
- (2) 四连拱隧道, 我国有福州市象山隧道和深圳市科苑立交隧道为四连拱隧道。

五、按车道数量划分

按车道数量划分为:

- (1) 二车道连拱隧道。多数连拱隧道为二车道。
- (2) 三车道连拱隧道。交通量大的交通主干线及大城市周边的主干线为三车道。如京珠高速公路五龙岭隧道, 武汉市蔡甸区马鞍山市政连拱隧道为三车道。

六、按隧道结构划分

按隧道结构划分是按对称性划分为类, 据中墙内结构划分为型, 依中墙外形划分为种, 以连拱数量划分为属的四级划分原则进行划分(表 1-3)。

连拱隧道按结构的分类表 表 1-3

类	型	种	属	实 例
对称性连拱隧道(断面 对称, 多数属此类)	整体式中墙 (传统式)	直中墙	双连拱	大多数属此类
			四连拱	福州象山隧道
		曲中墙	双连拱	
			四连拱	
	复合式中墙 (优化式)	直中墙	双连拱	贵州玉凯高速
			四连拱	
		曲中墙	双连拱	福建沙潭隘隧道
			四连拱	
非对称性连拱隧道 (断面不对称)	整体式中墙	直中墙	双连拱	福州马宅顶隧道

第四节 研究现状和发展方向

一、发展阶段和研究现状

1. 发展阶段

我国公路连拱隧道研究、设计和施工,经历了初期、发展和提高三个阶段。初期阶段是1992年开始设计和兴建广州白云山连拱隧道至2001年前时期,以2001年全国公路隧道学术会议和2000年11月韩常领提出连拱整体式隧道结构设计的新思路为标志。据不完全统计,在此之前部分公路线路和城市周边因交通量迅猛增加,经过探索研究、设计和施工了10余座连拱隧道。如1993年建成的广州白云山三车道连拱隧道,1998年建成的陕西紫云山隧道,1999年建成的福州象山四连拱隧道和云南省的练江隧道,2000年建成的福建福泉高速公路相思岭隧道、京珠高速公路广东五龙岭三车道隧道、广东新会猫山隧道和广西洋马河隧道等。从中可以看出,公路连拱隧道的建设数量在初期阶段也是逐年在增加。

2001至2004年是连拱隧道大发展阶段。其间,各省区交通部门和有关设计院看到已建连拱隧道体现出的许多优越性,开始大量设计和兴建连拱隧道,而且有许多省区的山岭公路线路成批兴建。如云南元磨高速公路建了15座连拱隧道,贵州遵义—崇溪高速公路建了19座,浙江金丽温高速二期公路建了21座,广南—砚山高速公路建了19多座之多。这种成群成批兴建连拱隧道之势,至今仍然是有增无减地在发展。

2005年开始,随着1990年的公路隧道设计规范的修订,新的《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[21]从2004年11月1日开始实施,标志着我国公路连拱隧道建设进入了一个崭新的阶段,即提高阶段。公路连拱隧道设计和施工,经历了几年大量的实践和经验总结,取得了共识,并写进国家规范,开始进入有章可循阶段,同时将引进国内外的科研成果及新技术、新方法、新工艺和新设备,使公路连拱隧道在目前设计和施工中存在的一些通病,逐一地加以克服,我国公路连拱隧道设计和施工技术进入提高阶段。估计这种提高阶段在延续若干年后将进入成熟阶段。如日本已有30多年连拱隧道的设计和施工经验,各项技术已进入较完善的成熟阶段。

2. 研究现状

根据我国近年公路连拱隧道迅猛发展形势的需要,有关建设单位、研究所、设计院、高校和施工单位抽调专门人员共同组织联合研究体形式,对设计和施工中存在的一些实际问题,及时进行了研究,迅速解决施工中存在的难题和指导施工。如浙江省金丽温高速公路建设指挥部、西南交通大学和贵州省桥梁工程总公司联合,在2001年开展了连拱隧道综合修建技术研究。湖北省在2002年开展了高速公路复杂地层双连拱隧道施工控制工艺研究与应用的交通科研。江西省赣(州)定(南)高速公路建设总指挥部、天津大学、武汉广益工程咨询有限公司和重庆交通科研设计院联合,在2004年完成了公路连拱隧道设计施工综合技术研究。相信还有不少类似这种产学研相结合的研究成果。

定期召开各种学术会议,及时交流学术研究成果。2001年和2003年全国公路隧道学术会议,2002年公路隧道研讨会暨公路建设技术交流大会,2003年上海国际隧道工程研讨会,2004年中国土木工程学会第十一届年会、隧道及地下工程分会第十三届年会等一系列学术会议上,

许多专家、学者和工程技术人员宣读了大批有关连拱隧道方面的学术论文,交流了各自的研究成果、设计和施工经验。据不完全统计,近六年内我国有关连拱公路隧道的论文和研究成果有数百篇,而且绝大多数是 2000 年后发表的。这些成果对我国连拱隧道的设计、施工和研究,起着重要的借鉴和推动作用。

在连拱隧道设计方面不断出现新思路,推出新经验、新成果。自 1992 年铁道部第四设计院设计了我国第一座连拱隧道——广州白云山双连拱隧道以来,不断出现适合当地实际条件的连拱隧道设计新思路、新经验和新成果,如福州市象山四连拱大跨度浅埋隧道的设计、半明半暗连拱隧道设计和公路隧道组合的设计等等。应特别指出的是韩常领提出的双连拱整体式隧道设计,对通用的结构设计模式进行了优化和改动,把整体式中墙改为复合式中墙,将左右洞二次衬砌和防排水各自独立成环,更好地满足了结构受力要求和防止中墙渗漏水病害。这一构思已在近几年京福高速公路福建段坑面兰、沙潭隘和双溪口等隧道获得应用,并取得良好效果。

在施工工艺方面不断改进和优化,简化了工艺工序,缩短了工期,取得了良好的经济效益和社会效益^[31~46]。如大跨度浅埋四连拱隧道施工,中墙顶部混凝土回填和中墙防偏压处理方法,软弱围岩地段连拱隧道施工,偏压连拱隧道施工,穿越滑坡地层的施工方法,以及在运营道路条件下穿浅埋大跨三车道连拱隧道的关键技术工艺等等。

在施工监控量测方面,对实测数据与理论计算进行了比较和分析^[47],监控量测获得了成功的预报经验^[48~49],不对称连拱隧道现场监测的经验^[50]等。

在模型和现场试验研究方面也取得较多成果。如对连拱公路隧道施工方法进行模型和现场试验^[39],施工全过程地层沉降三维数值的模拟试验^[16],隧道断面优化设计模型及其应用模拟^[51],软弱围岩条件下隧道施工阶段的受力模拟^[52],软弱围岩中隧道二次衬砌的力学行为模拟^[53],偏压连拱隧道不同开挖方法的模拟^[54],以及连拱隧道与小净距隧道施工过程的模拟^[55]研究等等。

由于连拱隧道施工过程中易出现一些病害,近年在病害治理方面也获得许多研究成果。特别是对中墙区域渗漏水灾害及其防治措施^[56~57]方面取得明显效果。

有的专家对小净距隧道开挖方法^[19]和结构受力特点^[58]进行研究后,提出以小净距隧道替代连拱隧道的设想,并在京福高速公路福建段兴建了 10 座小净距隧道代替连拱隧道,其净距多在 4.8~5.2m,最小间距为 3.2m,取得了成功经验^[19]。笔者认为,在隧道围岩条件较好的前提下,小净距隧道可以代替连拱隧道,但在软弱围岩条件下代替连拱隧道是很难的,甚至是不可能或是不划算的。至于连拱隧道与小净距隧道的相互转换条件和取代关系,尚值得进一步研究。

二、发展前景分析

由于公路连拱隧道具有不可替代的优点,如最小限度的占用和分割土地,最大限度的保护自然环境,估计今后会有更多的采用和更大的发展,特别是在山岭重丘地形区和城市周边的山丘处更会广泛接纳。这种发展趋势,现已经在国内外明显表现出来。分析其原因,最主要的有以下三个方面:

首先,连拱隧道洞口上下行线路的路面是紧密相连的,因此线路所占用和分割的土地最少,路桥隧相连的线形最为理想。这是分离式隧道和小净距隧道无法相比的。尤其我国是一个多山的国家,约 75% 的国土是山地或重丘,加上农业人口众多,土地资源紧张及其具有不可

再生的特点,更是明显突出。另外,我国大中城市星罗棋布,特别是在我国东、中部地区人口稠密,在城市周边山丘不仅兴建二车道连拱隧道,近些年已发展兴建四连拱隧道和三车道连拱隧道,以满足日益增长的人流和车流交通需要。除少占土地和保护自然环境外,房屋的拆迁量也最少,是我国、日本和欧美一些国家大力兴建连拱隧道的重要依据。

其次,由于连拱隧道洞口连接线路占用和分割土地最少,带来最大限度地保护自然景观,最大限度地减少人文和生态环境的破坏,符合当今以人为本和科学发展观的世界潮流。

第三,我国属山岭重丘地形发育的国家,特别是东南和西南地区山丘重重,适宜兴建成群成组的连拱隧道。这样可以减少山丘的深挖和沟谷的高填,从而最大限度地保护自然生态环境,产生极大的社会效益和经济效益。

至于小净距隧道替代连拱隧道问题,尚需实践证实。不可否认,小净距隧道比分离式隧道有很大优势,在较好的围岩和地形有利条件下也可部分替代连拱隧道。但与连拱隧道总体相比,毕竟还是多占土地,多拆迁房屋,线桥隧相连的线形较差,尤其在软弱围岩条件和城市周边山丘地区兴建双连拱或多连拱隧道的不可替代性更为突出。

三、今后研究方向

尽管连拱隧道的研究近年出了大量成果和有长足的进展,但与分离式隧道相比,仍显得年轻,还远未达到经典程度。现国内外已建连拱隧道座数和里程总量,远远不能与分离式隧道相比,连拱隧道的设计和施工方法还不很成熟,经验依然不足,施工工法还不齐全,尤其是不良地质地段的施工还处于摸索和积累经验阶段,许多参数尚不完整,还缺少可查寻的系列规范和可参考的系列专著,还有大量的研究工作需要去完成。因此建议在以下几个方面继续加强研究:

(1)继续总结施工工法。在现有的施工工法基础上,继续总结一些不同地质条件和要求下接近实际应用的施工工艺和工法,研究不同的围岩级别采用相适应的隧道结构,供设计和施工单位进行比选。特别是尽可能地减少施工工序和步骤,使施工工艺不断优化,达到减轻劳动强度,提高工效,缩短工期,降低工程造价之目的。

(2)拟编出连拱隧道施工规范,供设计和施工中使用。现行的公路隧道施工技术规范^[59]尚未提到连拱隧道内容,建议根据现今已有的施工经验及成果,进行施工规范的修改和补充。如果目前条件尚不成熟,可先单独拟编试行连拱隧道施工规范,供设计和施工按实际情况选择使用。2004年7月发布11月实施的《公路隧道设计规范》^[21],已有连拱隧道的内容,涉及强制性条文的有关规定应当严格执行。同时在实践中还应注意积累资料,总结经验,及时发现和提出问题,使规范更加完善,更好地指导设计与施工。

(3)洞口选择研究。根据洞口地形,尽可能保护自然环境,少开挖仰边坡。当连拱隧道长度超过300m时,需要进行专门通风,为使排出的污浊空气,不致倒流入另一洞内时,是否可以设计左右洞口前后错开一定距离,如3~5m。

(4)继续进行各种模拟和现场模型实验研究。完善不同地质条件和不同规格材料的模拟及现场模型实验,以及进行施工动态的模拟和计算,得出科学合理的各种参数的数值范围,供拟定规范、设计和施工中参考。从现有研究成果看,有的设计部门为了安全保险,采用了过大的保险系数,造成每延米单价过高,导致一些浪费和工期的延长。因此,进行各种施工动态的现场模拟实验研究,不仅具有理论意义,而且还有直接的经济意义。

(5)总结防治各种病害的措施和经验。如整体式中墙防渗漏水和二次衬砌开裂处理等措施研究。现有防渗漏水的措施较多,尤其是改进中墙结构形式后,如变整体式中墙为复合式中

墙,左右洞二次衬砌单独成环,防排水效果大为改观。但要继续研究对施工更方便更安全,效果又好又经济的连拱隧道防治病害措施。

(6)施工中的监控量测研究。由于连拱隧道围岩受到多次扰动,部分初期支护需要拆除,给施工中的监控量测工作带来困难,现有研究成果不算多,需要进一步加强研究。要不断积累数据和经验,建立和健全监控量测体系及监控基准,指导设计和施工,并研究预测和预报施工中可能发生的事故。

(7)从可持续发展理念和科学发展观研究^[60]。“可持续发展,就是要促进人与自然的和谐,实现经济发展和人口、资源、环境协调,坚持走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路,保证一代接一代的永续发展。”因此,应从最少占用和分割土地,最大限度地保护自然景观和生态环境角度,尽量避免和减少地质灾害及交通安全事故,进行线路和隧道位置选择。尤其是对城市中心区及周边的双连拱和多连拱隧道建设路线的研究和设计,更为重要。今后我国自驾车将大幅度增加,为避免道路拥挤或堵塞,还可能需要在大中城市中心区主要街道下兴建更多的类似于广州市黄埔大道开天窗平顶连拱隧道。

(8)进行超前地质预报和围岩位移的智能预测研究。在大多数情况下连拱隧道施工,都先进行中导洞开挖。当在V、VI级围岩条件下还进行三导洞开挖时,有较便利的条件根据中导洞或三导洞地质资料,对左右主洞开挖、初期支护进行超前地质预报。另外,通过智能预测围岩位移的稳定性,为适时支护连拱隧道提供参考,可减少工作量^[61]。可惜目前这一方面的研究很少,有关领导部门和施工单位对这种预测、预报的重要性有时还认识不足,有待加强研究。

(9)施工技术和研究方法的研究。现有的施工技术和研究方法较多,如荷载分析法、复合衬砌结构计算法、典型类比分析法、有限元分析法、长管棚技术、系统注浆技术和多导洞技术等,但如何综合应用和进行科学合理的选择,以及积极慎重采用新思路、新技术、新材料、新设备、新方法和新工艺方面,有待进一步探索。如合理采用连拱隧道、小净距隧道和分离式隧道组合形式及其相互过渡的研究,推广重庆市菜袁路龙家湾隧道组合的经验,发挥各种隧道形式的优势^[21];大断面的三车道连拱隧道日益增多,对大断面隧道施工技术的开发和研究;光面爆破技术、喷混凝土厚度和喷射混凝土量增加及控制其回弹量的施工技术、大型出碴设备研制等是其例。

(10)组织和出版有关连拱隧道的专著。为了指导设计和施工,提高设计和施工理论及施工技术水平,建议组织和出版有关连拱隧道的系列专著,阐述连拱隧道的结构理论、力学计算及模型模拟实验成果,总结施工技术和工艺流程等,服务于国家经济建设。相信今后连拱隧道还会以更快的速度,在更广的范围内获得应用。