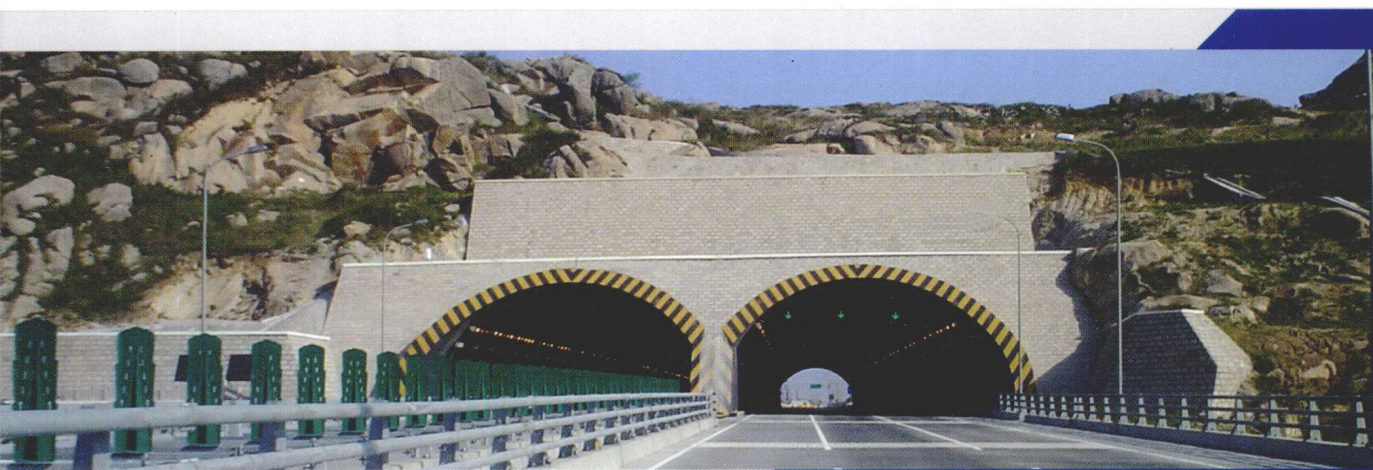




公路连拱隧道

技术新进展

姚振凯 李世清

朱 琪 陈信标

编 著



人民交通出版社
China Communications Press

Gonglu Liangong Suidao Jishu Xinjinzhan
公路连拱隧道技术新进展

姚振凯 李世清 编著
朱 琪 陈信标

人民交通出版社

内 容 提 要

本书对在 2006 年初人民交通出版社出版的《公路连拱隧道工程技术》一书的内容进行了新的补充。因该书出版五年来我国公路连拱隧道在设计、施工和研究方面取得了长足进展,本书正是反映该领域的新成就、新进展。本书适用于公路连拱隧道现场设计、施工和研究人员及高校高年级学生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路连拱隧道技术新进展/姚振凯等编著. —北京:
人民交通出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-114-08856-8

I. ①公… II. ①姚… III. ①公路隧道:拱形隧道—
研究 IV. ①U459. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 004531 号

书 名:公路连拱隧道技术新进展

著 作 者:姚振凯 李世清 朱 琪 陈信标

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)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:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787 × 1092 1/16

印 张:20

字 数:474 千

版 次:2011 年 3 月 第 1 版

印 次:2011 年 3 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08856-8

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)

前 言

自 2006 年初人民交通出版社出版《公路连拱隧道工程技术》和《公路双连拱隧道》两本专著后至今,五年来我国国民经济和交通事业的快速发展,公路连拱隧道技术又有了长足的进展。我国公路连拱隧道众多的设计新理念、新成果、新突破以及大量设计、施工和研究的成功实例,使公路连拱隧道设计与施工进入成熟和创新阶段。

部分作者在 2005 年上半年与他人合作完成《公路连拱隧道工程技术》一书的写作后,参与了 2005 年、2006 年中国水利水电第五工程局组织的以武汉马鞍山双向六车道连拱隧道为依托的《公路双向六车道连拱隧道关键技术》课题研究,并专程考察了南京九华山和玄武湖连拱隧道、上海小洋山岛上连拱隧道、河南宛西高速 16 座连拱隧道和湖南岳阳市金鹗山等双向六车道连拱隧道,参与了武昌郑店下穿京珠高速的连拱隧道设计审查,还借 2007~2010 年在北京工作机会,利用节假日在国家图书馆查阅国内外公路连拱隧道专家、学者的大量论文和专著文献,为本书写作创造了极为有利的条件。2009 年国庆节长假期间专程赴杭州市余杭区,考察邱山单洞隧道改扩建双向四车道连拱隧道的施工,为本书添加了新内容。另一些作者分别参加了安徽沿江高速千军岭连拱隧道,阿深高速河南新县段焦战岭 1 号和 2 号连拱隧道,西汉高速纸房连拱隧道,赣定高速迳古潭 1 号连拱隧道和武汉马鞍山连拱隧道的施工技术工作。作者们从中看到我国公路连拱隧道技术日新月异,感到很有必要对已出版的《公路连拱隧道工程技术》内容进行新的补充。

这 5 年多来,我国不仅双向四车道和双向六车道连拱隧道数量剧增,在福建还建成了两座双向八车道公路连拱隧道,连拱隧道已不限用于山岭隧道,已突破入湖、上岛、过江、开进黄土禁区和穿越大中城市地下等新领域。我国成为全球连拱隧道座数最多(超出 600 座)、总里程最长(超过 130km)的国家。在日本还修建了海底沉管公路连拱隧道。

公路连拱隧道开始写入我国高校 21 世纪教材,有的省还编写了连拱隧道规范。据不完全统计,我国 2005 年下半年至 2010 年上半年,在各种学术刊物和专著中发表有关公路连拱隧道的论文达 500 余篇部。为及时综合反映国内外公路连拱隧道技术新进展,促进我国交通科技事业发展,特编撰《公路连拱隧道技术新进展》一书,供有关领导和同行们参考。

本书撰写过程中,西南交通大学何川教授、中南大学彭立敏教授及施成华副教授,湖北省地矿局薛迪康总工程师等提供了宝贵资料。中水五局吴高见局长、武汉马鞍山隧道项目部梁明生总经理、杨敦才总工程师,湖北俊博市政建设工程公司姚阳生董事长,黄运平总经理,中铁隧道局杭州邱山隧道项目部张杰总经理和乐兴松总工程师,中铁十五局南京九华山隧道项目

部,河南宛西高速建设指挥部的领导和同行们等,引领作者赴现场考察并提供资料。书中引述了众多作者大量有关公路连拱隧道的成果。另外,湖南省人民医院肛肠科主任黄忠诚教授、刘祺副主任医师、邓颖红护师等对本书第一作者进行直肠癌的精心治疗,并给予极大的鼓励,使本书能最终完成定稿。对以上单位的领导和同志们所提供的支持和帮助,表示真诚谢意。书中介绍的内容,只是公路连拱隧道大量成果中的一部分,肯定有遗漏之处,对书中存在的不足和错误,敬请批评指正。

作 者

2010 年 12 月

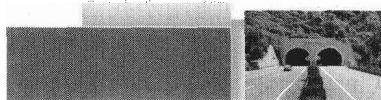
目 录

第一章 总述	1
第一节 本书任务和内容.....	1
第二节 连拱隧道理论总结和理念创新进展.....	3
第三节 连拱隧道数量剧增和分布更加广泛	12
第四节 隧道规模升级及跨度扩至双向八车道	15
第五节 公路连拱隧道分类新进展	16
第二章 连拱隧道部分工序设计施工新进展	18
第一节 中导洞开挖超前地质预报	18
第二节 连拱隧道环保进洞方式	21
第三节 连拱隧道洞口景观设计	24
第四节 连拱隧道错开式洞门	27
第五节 中墙设计与施工	36
第六节 连拱隧道正洞开挖	58
第七节 连拱隧道荷载确定	75
第八节 隧道通风排尘	79
第三章 连拱隧道工艺类型新进展	87
第一节 连拱隧道工艺类型	87
第二节 连拱隧道新工艺	89
第三节 双向六车道连拱隧道工艺	95
第四节 双向八车道连拱隧道工艺	99
第五节 半明半暗连拱隧道工艺.....	102
第六节 黄土连拱隧道工艺.....	107
第七节 单洞隧道改成连拱隧道.....	113
第八节 连拱隧道组合形式.....	116
第四章 连拱隧道新进展	118
第一节 空心中墙和三连拱隧道.....	118
第二节 分岔式中墙和分岔式连拱隧道.....	122
第三节 大拱断面连拱隧道设计与施工.....	126
第四节 不对称连拱隧道.....	135
第五节 湖底连拱隧道.....	137
第六节 城底连拱隧道.....	145
第七节 海底江底连拱隧道.....	151

第八节 岛上连拱隧道设计与施工·····	156
第九节 无中墙连拱隧道·····	161
第五章 连拱隧道病害防治技术新进展·····	171
第一节 仰坡开裂处治·····	171
第二节 洞内塌方处治·····	175
第三节 二次衬砌开裂治理·····	178
第四节 连拱隧道衬砌冻胀防治·····	192
第五节 偏压连拱隧道偏压防治·····	195
第六节 连拱隧道在桩基影响下的地震响应分析·····	217
第六章 连拱隧道监控量测技术新进展·····	222
第一节 光纤监测技术应用·····	222
第二节 监控量测指导施工·····	226
第三节 浅埋偏压连拱隧道监测·····	229
第四节 下穿公路连拱隧道监控量测·····	238
第五节 双向六车道连拱隧道监控量测·····	242
第六节 二次衬砌裂缝三维监控量测·····	246
第七节 湖底连拱隧道监控量测·····	249
第八节 分岔式连拱隧道监控量测·····	252
第九节 连拱隧道综合监控系统·····	260
第七章 连拱隧道模拟试验新进展·····	264
第一节 工艺数值模拟研究·····	264
第二节 连拱隧道施工过程数值模拟·····	268
第三节 施工动态稳定性数值模拟·····	280
第四节 分岔连拱隧道稳定性模型试验·····	286
第五节 二次衬砌结构破坏模型试验·····	292
第六节 模型试验中的量测方法·····	296
第八章 连拱隧道发展和研究方向·····	299
第一节 连拱隧道设计施工中存在的问题·····	299
第二节 不断提高设计施工水平,降低工程造价·····	300
第三节 公路连拱隧道发展的若干设想·····	302
参考文献·····	304

第一章

总 述



第一节 本书任务和内容

一、公路连拱隧道技术进入新阶段

任何事物都有正反两面,公路连拱隧道也不例外,有其长处和不足。由于公路隧道界对连拱隧道采取扬长避短,获得利大于弊的效果。现今对公路连拱隧道的选用,在我国已不是好坏和用否问题,而是如何完善、提高、推广和创新问题。连拱隧道现在已发展到过江、入湖、下海、上岛、进城和进入黄土禁区。我国公路连拱隧道数量大增,连拱隧道总数已超出 600 座,其中双向四车道连拱隧道超过 560 座,双向六车道连拱隧道超出 50 座,还创新建成两座双向八车道连拱隧道。连拱隧道总里程数已超出 133km,成为连拱隧道座数最多,总里程数最长的国家。在日本已建成海底沉管连拱隧道,高速公路连拱隧道穿越城市底部而过。

我国公路连拱隧道技术经历了初期、发展和提高阶段^[1]。从 1992 年开始设计,1993 年建成的我国第一座广州白云山公路连拱隧道,至 2000 年韩常领提出双连拱整体式隧道结构设计的新思路^[2],及 2001 年全国公路隧道学术会议为标志是我国公路连拱隧道建设初期阶段。在此期间我国建成了首批 10 余座公路连拱隧道,如 1995 年的南京市鼓楼隧道,1998 年的陕西紫云山隧道和福建相思岭隧道,1999 年的福州市象山隧道和云南练江隧道,2000 年的广东猫山隧道和五龙岭隧道等等。

2001~2004 年是我国公路连拱隧道大发展阶段。各省市交通部门和设计院,看到建成的首批连拱隧道的优越性,开始大批设计和兴建连拱隧道。尤其是在一些山区高速公路出现成群成组的连拱隧道,如云南元磨高速公路建了 15 座,贵州遵义—崇溪高速建了 19 座,浙江金丽温高速建了 20 座等等。这种成群成组兴建连拱隧道势头,至今仍然方兴未艾地发展。

2004~2008 年是我国连拱隧道提高阶段。从 2004 年新修订的《公路隧道设计规范》中有专门章节论述连拱隧道的设计和施工,开始进入有章可循为标志,到我国建成数百座连拱隧道,且成批的连拱隧道入湖、进城、上岛、开进黄土禁区,及人民交通出版社组织出版了《公路连拱隧道工程技术》和《公路双连拱隧道》^[3]两本专著等。

以 2008 年设计和施工的福州市机场高速路二期工程的金鸡山和罗汉山双向八车道连拱隧道,厦门梧村山无中墙连拱隧道及南宁市南湖水底连拱隧道拱顶透明创新设计等为标志,至今后若干年内是我国连拱隧道步入新的创新阶段。金鸡山和罗汉山双向八车道连拱隧道的设计和建成,成为国内外公路连拱隧道史中的首创范例。2009 年全国公路隧道学术会议上,胡

学兵、蒋树屏介绍了“梧村山无中墙连拱隧道段的设计与施工技术研究”,简化了连拱隧道的施工步序,加快了隧道施工速度,总体降低了工程造价^[4];唐宝珠、蒋中贵介绍了“南宁市南湖水底隧道创新设计”,创新地利用水底连拱隧道拱顶透明开拓城市交通空间,使水底连拱隧道成为更宜人的景观环境^[5]。

连拱隧道适用于我国和日本等国人多地少,或以山川居多,或百万人以上的大中城市多,城市不断扩大、交通出现堵塞的国情。连拱隧道的建设与围岩监控量测、施工技术,已列入我国交通部“十一五”科技发展规划重大专项攻关范畴^[6]。有些国家不提倡修建公路连拱隧道,我国也有专家学者对连拱隧道曾有不同看法。部分国内外专家、学者从岩土力学基本原理出发,认为隧道宜近不宜连,不主张修建双连拱隧道及多连拱隧道,担心连拱隧道左右洞跨度大,易引起不均匀沉降,导致连拱隧道结构性破坏,是有理论根据的。但通过我国近 20 年公路连拱隧道的修建和运营实践,及在日本等一些经济发达国家近 40 年的连拱隧道兴建,并获得大应用、大发展表明,公路连拱隧道形式具有较多不可替代的优越性,特别是当山川沟壑广布,大量与桥相连的隧道,及湖底、江底和海底连拱隧道的兴建更显优越性,其一些不足之处是可以通过技术措施加以防止和克服的。

实践证明,修建公路连拱隧道符合我国人多地少、车流量大的国情,使近年连拱隧道技术有显赫的新进展,突出体现在设计理念创新,连拱隧道座数和里程总长剧增;连拱隧道已不限用于山岭隧道,出现连拱隧道过江、入湖、下海、上岛、进城、开进黄土禁区的趋势。连拱隧道新形式不断涌现,有不对称连拱隧道,分岔式连拱隧道,大拱断面连拱隧道,三连拱、四连拱和五连拱隧道,多洞群连拱隧道,无中墙连拱隧道,单洞隧道改扩建成连拱隧道;不断新增连拱隧道工艺类型,施工技术日益优化,工艺步序和步距不断完善,工程造价日趋降低等等。种种事实表明,公路连拱隧道技术发展在我国已进入创新阶段。

二、本书任务和内容

本书的任务,是设想把最近五年来国内外公路连拱隧道的一些新成就、新进展归集成册,供连拱隧道建设同仁参考,尤其是为我国连拱隧道现场设计和施工人员提供参考借鉴,并以此与隧道界共同探索公路连拱隧道今后发展和研究方向。以此为出发点,在内容介绍过程中采用实际应用为主,适当介绍某些理念动向的原则。

本书内容侧重于:

(1)以新理念、新技术、新工艺、新成就、新进展为主。

(2)以介绍 2005 年下半年以来新建连拱隧道和新发表的论著为主。全国公路隧道学术会议上,2005 年有关连拱隧道论文 12 篇,2006 年 3 篇,2007 年 7 篇,2008 年 5 篇,2009 年 11 篇。在 2007 年人民交通出版社出版河南公路学会编撰的《高速公路研究与实践》文集中有 5 篇连拱隧道论文。另外,据 2005~2010 年的不完全统计,在《公路》、《现代隧道技术》、《中国公路学报》、《岩土工程与力学学报》、《公路工程》、《地下工程与隧道》、《公路交通科技》、《公路交通技术》、《公路隧道》、《西部探矿工程》、《隧道建设》等学术刊物,以及各交通规划设计研究院和各高等学府学报等数 10 余种有关公路隧道的主要刊物上发表的公路连拱隧道论文超过 500 篇,在网上发表的论文数量则更多。

(3)以双向六车道和双向八车道公路连拱隧道为主(此前的连拱隧道论著多以双向四车

道为主)。

(4) 书中用较大篇幅介绍湖底、江底、海底、城底和岛上连拱隧道,以及黄土区连拱隧道、无中墙连拱隧道、单洞隧道改扩成连拱隧道等新工艺及新应用领域。

(5) 探讨公路连拱隧道今后发展和研究方向。

本书资料来源有:

(1) 首先是近 5 年有关刊物发表的论文和出版的专著、文集。

(2) 日常性网上调查公路连拱隧道进展动态。

(3) 作者自己近年对多座连拱隧道工程施工实践,参与中国水利水电集团第五工程局科研项目《公路三车道连拱隧道关键技术研究》的成果,和参与武昌出城高速连接线的郑店连拱隧道设计审查与施工等。

(4) 专门性现场考察。2006 年专门赴上海小洋山隧道、南京九华山和玄武湖隧道、河南宛平高速吴家庄等 16 座隧道、湖南金鄂山隧道等双向六车道连拱隧道进行了现场考察。2009 年考察杭州市余杭区邱山单洞隧道改扩建的双向四车道连拱隧道。

全书共分 8 章。第一章是总述,介绍公路连拱隧道新的进展;第二至第四章介绍连拱隧道部分工序设计和施工、连拱隧道新工艺类型,包括湖底隧道、江底隧道、海底隧道、黄土隧道、城底隧道、岛上隧道、三连拱隧道、四连拱隧道、五连拱沉管隧道、分岔式连拱隧道、双向六车道及双向八车道连拱隧道等新形式隧道设计和施工;第五至第七章介绍公路连拱隧道病害防治、监控量测和数值模拟及模型试验研究的新进展;第八章探索公路连拱隧道发展和研究方向。

第二节 连拱隧道理论总结和理念创新进展

一、连拱隧道理论总结

2006 年初人民交通出版社组织出版了《公路连拱隧道工程技术》、《公路双连拱隧道》专著,首次较全面系统地对公路连拱隧道进行了总结。付鹤林、郭磊、欧阳刚杰、闻生^[7]在 2009 年科学出版社出版的《大跨隧道施工力学行为及衬砌裂缝产生机理》专著中,以整章篇幅论述大跨连拱隧道施工力学动态数值模拟与施工方法比选。2009 年重庆大学出版社出版了蒋树屏主编的《中国公路隧道建设成就画册》中第三部分为连拱隧道^[8]。2009 年中国水利水电出版社出版了荷兰水利交通和公共工程部编,汪易森等译的《荷兰隧道——一个崭新的时代》^[9],用 47 个版面详细介绍了荷兰公路沉管连拱隧道。陈卫忠、伍国军、贾善坡在 2010 年中国水利水电出版社出版的《ABAQUSD 在隧道及地下工程中的应用》^[10]专著中,用专门章节论述公路分岔式连拱隧道。近年在有关隧道的专业会议文集和学术刊物中,发表了许多作者从不同角度或对不同地区的连拱隧道进行的系统总结。

1) 部分专家学者对全国公路连拱隧道总结

(1) 王梦恕院士对隧道设计和施工的意见

2006 年 4 月在第三届公路科技创新高层论坛上,王梦恕院士^[11]作了《隧道设计的基本原则和理念》的报告,系统总结了我国多年的隧道设计和施工经验,提出公路隧道洞前不设路堑,不破坏山体环境,有利于环境保护;必须重视岩溶地区的综合超前地质预报,预报长度应大

于 30m,宽度为隧道周边一倍洞径;隧道初期支护要强,二次衬砌只作为安全储备;采用网构钢拱架,取消型钢拱架,因网构钢拱架在喷混凝土后,能承受 10 倍荷载,型钢拱架承受 4 倍荷载,而且其背后喷不到混凝土,易造成渗漏水;钢拱架接头处设锁脚锚杆。取消系统锚杆,按需要设置;软弱地层必须采用潮喷混凝土,不提倡湿喷混凝土;初期支护从上到下施工,二次衬砌从下到上施工;必须坚持动态设计、动态施工、动态管理等等。上述内容也完全适用于公路连拱隧道。

(2)钱文斐和王亚琼等对我国山区连拱隧道的总结

2007 年钱文斐、王勇、刘洪洲、王廷伯^[12]对我国山区连拱隧道结构设计、施工方法、监控量测和超前地质预报等施工研究现状,以及尚待解决问题等几个方面进行了总结。2008 年王亚琼、谢永利^[13]对连拱隧道在我国的发展现状、连拱隧道的作用、研究现状及存在的技术问题作了总结。

2)云南省公路连拱隧道总结

云南省是我国设计较早和修建连拱隧道较多的省份之一。李志厚、雷华、陈树汪、谢永利^[14,15]在《云南高速公路隧道设计》,《云南省公路连拱隧道的技术进步》中,用较大篇幅总结了云南连拱隧道设计与施工,指出云南绝大多数高速公路的中短隧道采用连拱隧道(表 1-1)。由于连拱隧道具有轴线间距最小、占地最少、有利环保、便于洞外接线等优点,非常适用于云南复杂的地形地貌和以 V 级围岩为主的地质条件,现已成为云南高速公路中短隧道的主要结构形式。据不完全统计,云南在 2008 年初已建连拱隧道 42 座,总长 20 020m 和在建的连拱隧道 42 座,总长达 22 508m,共计 84 座,总共长达 42 528m。

云南高速公路连拱隧道表

表 1-1

公路名称	玉元 高速	元唐 高速	思小 高速	小景 高速	安题 高速	大保 高速	保龙 高速	昆石 高速	鸡石 高速	平锁 高速	蒙新 高速	富广 高速	元武 高速	江召 高速	昭待 高速	水麻 高速	合计
连拱隧道数	1	15	13	3	3	4	9	2	2	1	7	5	4	2	2	11	84
总隧道数	5	23	15	4	6	12	14	4	2	4	18	18	8	2	4	18	157
连拱占比例(%)	20	65	87	75	50	33	64	50	100	25	39	28	50	100	50	61	54
备注	通车	通车	通车	在建	通车	通车	在建	通车	通车	在建	在建	在建	在建	通车	在建	在建	

另外,还总结了一套成熟而有效、且适用于连拱隧道软弱围岩段及岩堆段的施工工艺原则。软弱围岩段的工艺原则是“管超前,弱爆破,短进尺,少扰动,早喷锚,勤量测,早成环,二衬紧跟”及“重地质,短进尺,弱爆破,少扰动,早锚喷,勤量测,早封闭,强支撑,早成环”;岩堆段的工艺原则是“先治水,管超前,严注浆,短开挖,弱爆破,强支护,早封闭,勤量测,抢做门”。并指出隧道防排水原则,过去是“以排为主”进行设计,但在大量排水会对隧区水文地质条件、地表枯水、农业生产和生态环境等造成重大影响情况下,必须按“以堵为主”进行设计;以及对连拱隧道的结构形式、支护参数、防排水、工艺工序和研究成果及施工经验五方面,进行了简要总结。

(1)结构形式方面

云南连拱隧道设计经历了三个阶段,即初期主要采用整体式直中墙连拱隧道,中期主要采用整体式曲中墙连拱隧道,近期几乎全部采用复合式曲中墙连拱隧道。虽然采用复合式曲中

墙或采用复合式衬砌,是连拱隧道结构形式的发展方向,在 2004 年新的隧道设计规范中也建议首先采用这一结构形式,但在施工过程中发现,曲中墙偏压作用较大和造价较高,有待进一步加强复合式曲中墙这一结构形式的设计和施工技术研究。

(2) 支护参数方面

由于连拱隧道的大跨度和连拱结构特点,设计时应根据不同地质、水文地质条件、结构跨度、施工工艺等,结合工程模拟,初拟支护参数,再利用有限元、荷载结构等理论,分别对不同级别围岩进行结构分析。除洞口段埋深小,难以形成平衡拱,采用刚性支护结构外,洞身段均按新奥法设计,采用柔性支护体系结构的复合式衬砌。按不同地质和水文地质条件,需要加强支护时可增加长管棚或短管棚、超前锚杆等超前支护措施。

云南省双向四车道和双向六车道连拱隧道典型支护设计参数如表 1-2、表 1-3 所列。

云南省双向四车道连拱隧道典型支护设计参数 表 1-2

围岩级别	喷混凝土	锚 杆	钢筋网	超前支护	钢支撑	二 次 衬 砌	
						拱部	仰拱
V 浅埋	27cm	$\phi 25 \ L=4.0\text{m}$ @ 0.75m × 0.75m	$\phi 8 \ @ 15\text{cm} \times 15\text{cm}$	$\phi 42 \times 4$	I20a @ 60cm	钢筋混凝土 60cm	钢筋混凝土 60cm
V 深埋	27cm	$\phi 25 \ L=3.5\text{m}$ @ 0.75m × 0.75m	$\phi 8 \ @ 15\text{cm} \times 15\text{cm}$	$\phi 42 \times 4$	I20a @ 80cm	钢筋混凝土 60cm	钢筋混凝土 60cm
IV	23cm	$\phi 25 \ L=3.0\text{m}$ @ 1.0m × 1.0m	$\phi 8 \ @ 20\text{cm} \times 20\text{cm}$	$\phi 28$ 锚杆	I16a @ 100cm	混凝土 50cm	混凝土 50cm
III	15cm	$\phi 25 \ L=2.5\text{m}$ @ 1.2m × 1.2m	不设	不设	不设	混凝土 40cm	不设

云南省双向六车道连拱隧道典型支护设计参数 表 1-3

围岩级别	喷混凝土	锚 杆	钢筋网	超前支护	钢支撑	二 次 衬 砌	
						拱部	仰拱
V 浅埋	30cm	$\phi 25 \ L=5.0\text{m}$ @ 0.75m × 0.75m	$\phi 8 \ @ 15\text{cm} \times 15\text{cm}$	$\phi 42 \times 4$	I25a @ 60cm	钢筋混凝土 80cm	钢筋混凝土 80cm
V 深埋	28cm	$\phi 25 \ L=4.5\text{m}$ @ 0.75m × 0.75m	$\phi 8 \ @ 20\text{cm} \times 20\text{cm}$	$\phi 42 \times 4$	I22a @ 75cm	钢筋混凝土 70cm	钢筋混凝土 70cm
IV	22cm	$\phi 25 \ L=4.0\text{m}$ @ 0.9m × 0.9m	$\phi 8 \ @ 25\text{cm} \times 25\text{cm}$	$\phi 28$ 锚杆	I18a @ 80cm	钢筋混凝土 60cm	钢筋混凝土 60cm
III	15cm	$\phi 25 \ L=3.0\text{m}$ @ 1.2m × 1.2m	局部设置	不设	不设	混凝土 50cm	混凝土 50cm

(3) 防排水方面

目前主要采用整体式中墙和复合式中墙连拱隧道防排水形式。从发展方向看,采用加宽中墙厚度,将中墙中部掏空,用作直接的排水通道,彻底消除中墙渗漏水,或采用自防水二次衬砌混凝土技术是发展趋势。

(4) 工艺工序方面

隧道工艺工序的科学合理与否,直接影响着隧道施工安全、工程造价和工程进度。“三导洞”工艺主要用于地质条件差,围岩级别低,或存在较大偏压的连拱隧道。中导洞工艺主要用于地质条件相对较好,围岩级别中等的连拱隧道。无导洞工艺主要用于地质条件好,围岩级别高的连拱隧道。

(5) 主要成果和经验

①弹塑性数值计算和施工实践表明,左右洞进洞先后次序的选择,以岩性较差的一侧隧洞先开挖,而岩性较好的另一侧隧洞后开挖为宜。对于偏压隧道先开挖靠边坡外侧的隧道,对边坡的稳定更有利。

②中墙厚度较小时(如 $<2.3\text{m}$),塑性区近于贯通。中墙厚度超过某值后(如 4.0m)塑性区很小。

③岩体抗拉强度是影响隧道稳定的极重要参数,当其值偏小时拉裂区会扩至地表连通。当隧道埋深 $<10\text{m}$ 时拉裂区会扩至地表,同时岩墙塑性区也随着增大。故施工前或施工中采用加固措施,加大拱顶岩体及中墙部位岩体的抗拉强度,是很必要和且行之有效的。

④用双层超前小导管进洞,比超前锚杆安全可靠。

⑤设仰拱比不设仰拱更有利结构受力。设置仰拱要适时,过早或太晚都不利于围岩支护结构的受力平衡,从而影响隧道的长期稳定。

⑥对地处软弱围岩的连拱隧道,宜先贯通中导洞,因中导洞既能起地质超前预报作用,又有利于左右洞施工时的通风排尘。

⑦施工中监控量测是确保安全的必要手段,建立了成套的动态回馈设计与信息化施工方法。

⑧中墙顶部防水层布设宜在上下行洞拱部开挖支护完成后施作。

⑨隧道开挖应尽早进洞,尽量不扰动自然原型边仰坡,保护环境,做到绿色环保进洞。

⑩中导洞开挖过程中的地质调查和正洞上半断面地质调查,可直接为后期修正洞支护参数提供可靠的数据。

⑪连拱隧道施工,关键在于中墙部位施工控制,必须根据地形地质条件、施工技术及管理水平,确定合理的施工工艺方案和工艺步骤。

⑫连拱隧道施工过程中,必须根据开挖情况,进行并行操作时,即上下行洞掌子面交错开挖不得小于 10m ,但不宜大于 30m 。上下行二次衬砌浇筑长度相错不得大于一次二次衬砌浇筑长度。

⑬建立了不同结构形式的连拱隧道结构设计、施工及防排水成套技术,形成了连拱隧道设计细则、设计图集与施工规程。建立了完整的连拱隧道荷载模式及确定方法,建立了成套的连拱隧道设计计算分析软件。

3) 贵州省公路连拱隧道总结

高世军^[16]在《连拱隧道结构选型与设计》中,根据2005年8月前贵州省已建8座、在建12座连拱隧道,对其设计进行了总结,指出连拱隧道建设中的一些关键问题已基本得到解决,但隧道施工工艺仍没有较大的突破。因此,在高速公路一些中、短隧道采用连拱隧道结构形式是

可行的,但要处理好洞口的接线问题。连拱隧道结构形式,首选三墙复合式曲中墙或三墙复合式直中墙;当洞外路基宽度和接线不受连拱隧道影响时,宜采用三墙复合式曲中墙;当隧道与洞外路基宽度和接线影响较大时,应采用三墙复合式直中墙。还对三墙复合式中墙连拱隧道衬砌断面形式、中导洞及中墙、施工工序设计进行了论述。

(1) 连拱隧道衬砌断面形式

连拱隧道衬砌断面形式,按不同地质情况进行确定,分为 V、VI 级围岩的土质、软岩或断层破碎带,IV、V 级围岩的较软岩、硬岩,以及 II、III、IV 级围岩的硬岩等三种衬砌断面结构形式。三种衬砌断面结构形式的围岩特点及围岩级别,受力情况分析,开挖、支护和二次衬砌等施工中的注意事项见表 1-4。

连拱隧道衬砌断面结构型式及施工注意事项

表 1-4

结构	岩 类	围岩级别	隧道受力分析	隧道施工注意事项
I	土质软岩 断层破碎带	V、VI	竖向和水平压力大,基底承载力及围岩弹性抗力较小,要求结构有足够承载力,支护体系有足够稳定性	围岩遇水易软化,开挖轮廓尽量圆顺,避免直线开挖,底部和初期支护应及时封闭
II	软岩 硬岩	IV、V	竖向和水平压力较小,基底承载力和围岩弹性抗力较大	底部初期支护可不封闭,但仰拱应及时跟进,以达到支护和及时封闭要求,提高仰拱的作用
III	硬岩	II、III、IV	竖向和水平压力小,特别是水平压力显著减小,基底承载力和围岩弹性抗力大,可采用不带仰拱的衬砌类型	应注意后期开挖对已作的初期支护和二次衬砌的振动影响

(2) 中导洞和中墙设计与施工

中导洞设置应偏向先开挖的正洞一侧,即中导洞靠先行洞一侧宽些,使中墙在中导洞内呈不对称分布,在一侧有较大的施工空间,便于施工人员走动,方便中墙施工的泵送混凝土操作,及保证中墙顶回填的密实性;同时可减少在较窄一侧设置防中墙偏压的支撑或回填的工作量,降低造价,缩短工期;还有利于提高中墙对先行洞开挖、初期支护和二次衬砌的水平抗力和中墙的稳定。

(3) 复合式中墙与整体式中墙

三墙复合式中墙的连拱隧道与整体式中墙连拱隧道,所受的外力大小差异不大,由于三墙复合式中墙的初始中墙,在左右洞二次衬砌后其功能作用已不大,故其设计安全系数可减小。初始中墙厚度应根据围岩级别而定,但最小不应小于 70cm,并注意初始中墙基底宽度,以增强其稳定性。最好在初始中墙顶部增设一些锚杆,锚杆伸入墙体的长度不小于 50cm,墙体混凝土浇筑直达洞顶,既能加固中导洞顶的围岩,又能增强中墙抗倾覆能力。

(4) 复合式中墙隧道工艺要点

三墙复合式中墙连拱隧道的工艺步骤,在隧道不同地段或不同围岩级别处是不相同的。隧道围岩为软岩时的工艺要点是:首选“三导洞”工艺,在地质条件略好时也可用中导洞工艺,后行正洞开挖需在先行正洞二次衬砌施工后进行。隧道围岩为硬岩时的工艺要点是:由于硬岩使基底承载力高,侧压力小,可用中导洞一台阶开挖工艺,或中导洞一全断面开挖工艺,甚至用无导洞开挖工艺施工,但后行正洞开挖最好在先行正洞二次衬砌施工后进行。洞口浅埋偏压段的工艺要点是:先开挖外侧正洞,在外侧正洞二次衬砌完工后,再开挖内侧正洞。

4)浙江省公路连拱隧道总结

高翔、王文星、郑国平^[17]指出,浙江省的第一座连拱隧道,是1998年设计施工的同三国道宁波段高速公路岙岙岭连拱隧道。随着浙江公路建设进入高速发展的时期,山区高等级公路中连拱隧道的数量也呈明显上升趋势。浙江已建和在建的连拱隧道达40余座,累计总里程10km以上,其中仅金丽温高速公路二期就有20余座,被誉为“连拱隧道走廊”。这里只总结近年浙江连拱隧道修建过程中的施工方法、防排水设计等方面的一些经验教训,并结合结构设计和施工两方面,对连拱隧道设计的发展优化作进一步分析。

(1)直中墙连拱隧道设计

传统连拱隧道的断面形式,一般为直中墙连拱隧道(图1-1),前些年设计的连拱隧道也多采用这种形式,所采用的结构设计参数见表1-5。

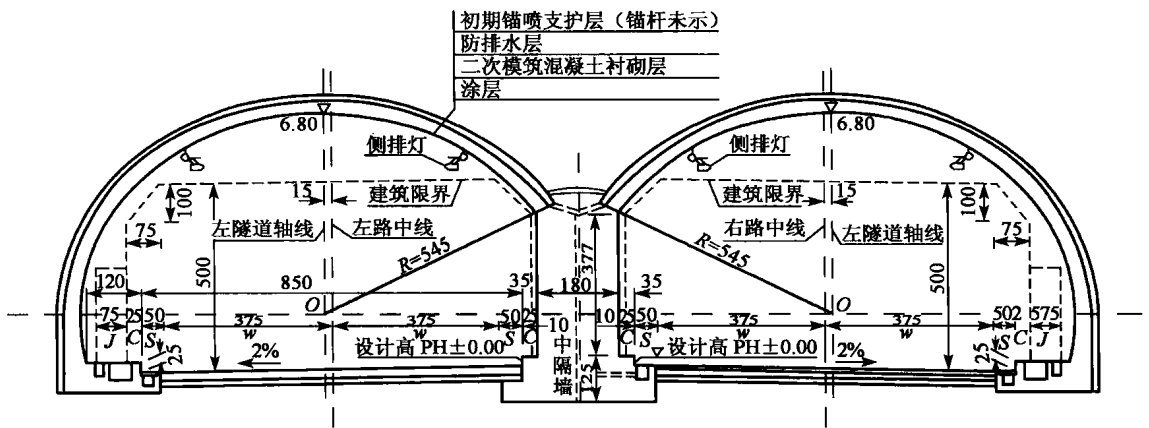


图1-1 直中墙连拱隧道标准横断面(尺寸单位:cm)

直中墙连拱隧道衬砌支护参数表

表1-5

围岩级别	支护类型	超前支护	初期支护			二次衬砌			
			锚杆	焊接钢筋网	喷混凝土	钢拱架	拱圈厚度 (cm)	仰拱厚度 (cm)	中隔墙厚度 (cm)
II	II	φ108 管棚注浆	φ25-1m×(0.5~1)m,长3.5m	φ6间距 15cm×15cm	25cm 仰拱10cm	14#工字钢 @50cm	50 (钢筋混凝土)	50	180 (钢筋混凝土)
III	III	超前锚杆	φ25-1.2m×1.0m,长3.0m	φ6间距 15cm×15cm	20cm	14#工字钢 @100cm	40 (钢筋混凝土)	40	180 (钢筋混凝土)
IV	IV		φ25-1.2m×1.5m,长2.5m	φ6间距 15cm×15cm	15cm		35		180

施工方法通常是“三导洞”——正洞先墙后拱法。在施工中遵循“弱爆破、短进尺、多循环、勤量测、强支护、快衬砌”的原则。施工步骤为:①中导洞开挖,中导洞锚喷支护;②中墙施工,中墙右侧回填;③左右侧导洞开挖;④左右侧墙锚喷支护,铺设防排水层,二次衬砌施工;⑤在拱部环形超前支护(Ⅱ类围岩“管棚+注浆”,Ⅲ类围岩“超前锚杆”)完成后,一侧正洞分步开挖,初期支护;⑥施作二次衬砌及仰拱;⑦开挖另一侧正洞,并施作二次衬砌(左右洞错开

开挖,纵向间距为 30m 左右)。

防排水设计的原则是“排为主,防为辅,防排结合”综合治理。衬砌柔性防水工程设置在二次衬砌面和喷混凝土面之间,一般采用隧道专用防水卷材。二次衬砌做成抗渗 S6 以上的自防水混凝土结构,主要为低碱性膨胀混凝土。地下水通过土工布的毛细渗流,引至边墙及中墙顶的纵向排水管,再通过横向或竖向引水管排入隧道正洞边沟引出洞外。

(2)直中墙连拱隧道的不足

直中墙连拱隧道由于施工工序较多,容易造成对围岩和已建结构的多次扰动,围岩应力多次分布,其自承载能力受到严重破坏。特别是中墙顶部 V 形围岩区,极易产生塑性松弛变形而垮塌,造成连拱失败。拱圈与中墙浇筑时间相隔较长,存在明显的纵向施工缝。中墙上的纵向排水管及竖向排水管的布置,与其它工序有较大冲突,极易破坏和引起堵塞,造成衬背的水“聚不拢、排不畅”,严重影响排水效果,已经成为连拱隧道普遍存在的一大质量通病。另外,由于结构复杂,造成施工难度大,施工质量难以保证,且工期长,影响工程进度。实际使用中发现多座连拱隧道拱圈与直墙连接处纵向施工缝渗漏水,未达到原设计的防排水目的。

(3)复合式曲中墙连拱隧道

鉴于直中墙结构形式连拱隧道的不足,在台缙高速公路石仓、镇头等连拱隧道设计中,提出了一种新的复合式曲中墙式连拱隧道如图 1-2 所示。

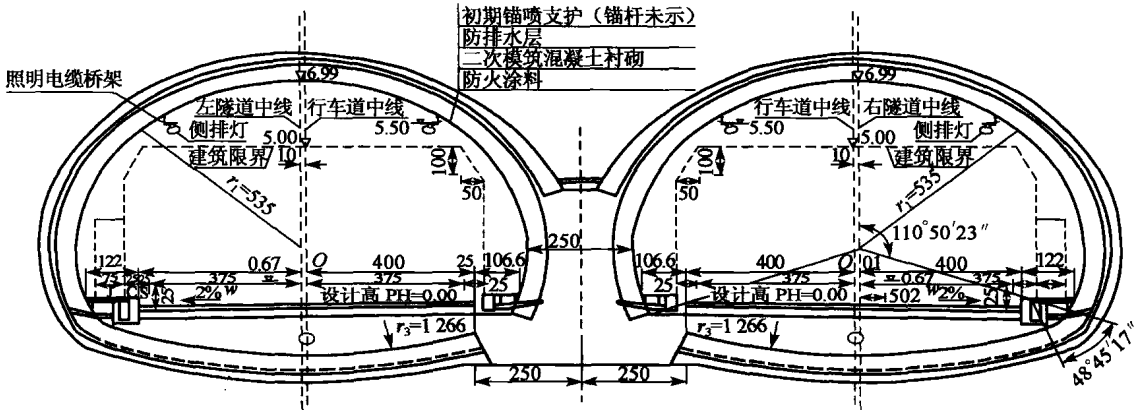


图 1-2 复合式曲中墙连拱隧道横断面(尺寸单位:cm)

复合式曲中墙连拱隧道,高度重视中墙顶 V 形围岩的塑性变形,尽可能保护好此处围岩,除及时施作初期支护外,还可改进中墙顶的回填。原设计的模筑泵直接与中导洞顶部连接,在浇筑混凝土时由于中导洞施工条件较差,往往不能与拱顶紧密接合,致使中墙不能形成连续的支撑结构,未能起到减跨作用。新设计墙顶预留 40cm 高空隙,通过 C20 喷射混凝土 + $\phi 8$ 钢筋网填实,较易实现。另外,通过把中导洞顶垂直锚杆尾部埋入中墙的方式,将中墙与围岩连接,增加了结构整体性(图 1-3)。在较差的围岩内由于中墙与软弱围岩的

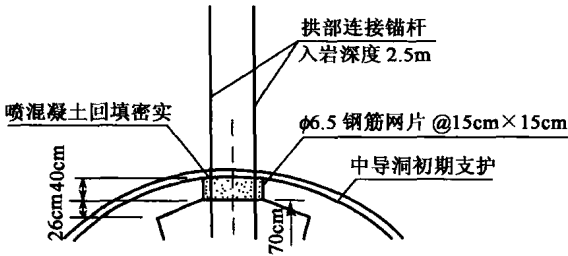


图 1-3 中墙顶大样图

刚度差较大,极易在二次衬砌位置与中墙肩处产生较大剪应力,故采用变截面的喷射混凝土初期支护层,对衬背刚度形成良好的过渡,消除了结构受力的不良隐患。通过同济曙光等有限元软件,对结构进行二维黏弹塑性数值分析,结果显示,复合式曲中墙连拱隧道的受力情况较合理,中墙顶 V 形围岩区屈服接近度下降,塑性区明显缩小。

复合式曲中墙连拱隧道,采用沿隧道纵向每隔 1.5 ~ 3m 设置 70mm × 40mm 环向塑料排水盲沟,改善了地下水渗透条件。复合式曲中墙结构将防排水在不削弱结构的条件下,在两侧正洞二次衬砌各自独立成环落底。中墙顶部与初期支护相连紧实,从根本上消除了中墙与拱部二衬的纵向施工缝,能达到类似普通单洞隧道的防水效果。

采用“中导洞先行,两侧洞平行开挖”的方式成洞,主要步骤为:①中导洞开挖(含中导洞锚喷支护及中墙连接锚杆);②中墙衬砌施工,墙顶挂网,喷混凝土回填,中墙侧边回填(C15 片石混凝土、土石);③在拱部环形超前支护(Ⅱ类围岩“管棚+注浆”,Ⅲ类围岩“超前锚杆”)完成后,一侧正洞分步开挖,初期支护;④施作仰拱;⑤拱部及侧墙二次衬砌施工;⑥开挖另一侧正洞,并施作二次衬砌(左右洞错开施工,纵向间距 30m 左右)。通过调整,简化了施工工序,便于机械化施工,从而极大地缩短了工期。

(4) 直中墙与复合式曲中墙连拱隧道经济比较

通过每延米造价的经济比较(表 1-6)看出,复合式曲中墙连拱隧道,每延米造价比直中墙式连拱隧道稍贵,差价在 10% 以内。但由于复合式曲中墙衬砌的防排水系统比较完善,考虑到高速公路隧道在防水方面的重要性,采用了复合式曲中墙连拱隧道结构形式。

连拱隧道每延米造价比较表

表 1-6

衬砌类型	每延米造价(元)		差值(元)
	直中墙式	曲中墙式	
明洞衬砌	56 082	58 397	- 2 315
Ⅱ类衬砌	149 935	162 738	- 12 803
Ⅲ类衬砌	95 089	103 251	- 8 162
Ⅳ类衬砌	54 946	59 734	- 4 788

5) 福建省连拱隧道总结

林志良^[18]在《福建省连拱隧道的发展》中,对福建省连拱隧道的发展进行了全面回顾,指出福建省于 1997 年 12 月设计出省内第一座连拱隧道——相思岭隧道之后,连拱隧道得到了飞速发展,至 2006 年 5 月全省已建和在建的连拱隧道已达 60 座,总里程约 18km。在连拱隧道数量增加的同时,连拱隧道技术也得到不断的改革创新,表现在:①中墙形式从最初的整体式直中墙,发展到栅格直中墙,再发展到现今的复合式曲中墙;②从对称连拱隧道到不对称连拱隧道;③从全暗或全明连拱隧道到明暗组合的连拱隧道;④从正交进洞到斜交进洞,再到虚拟洞门正交进洞。

6) 颁布施工标准和进入 21 世纪高校教材

2007 年人民交通出版社出版的《公路工程施工工艺标准》^[19]中,有 8 个版面的专门章节,阐明连拱隧道开挖施工工艺标准。连拱隧道开挖施工标准的颁布,加速了连拱隧道开挖施工