

TONGTOU LEISHI SUIDAO
XIUIAN JISHU

通透肋式隧道 修建技术

陈善雄 陈修和 房涛 余飞 王飞 著



科学出版社

通透肋式隧道修建技术

陈善雄 陈修和 房涛 余飞 王飞 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

通透肋式隧道是一种新型傍山隧道,在工程安全、环保、节能和景观协调统一方面具有独有的优势,已在实际工程中成功实践。本书总结黄塔桃高速公路龙瀑隧道(肋式单洞)、望东高速南山隧道(肋式连拱)的相关研究成果和建设经验,系统介绍通透肋式隧道结构与技术特点、受力与变形规律、结构荷载计算理论与方法、施工力学行为时空演化规律、结构设计与施工工法、监控量测技术,形成通透肋式隧道修建技术,为推广应用这一新型环保型隧道提供科学的参考。

本书可供隧道工程设计、施工、管理、规划、研究的科技人员和大专院校有关师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

通透肋式隧道修建技术/陈善雄等著. —北京: 科学出版社, 2019.9

ISBN 978-7-03-061944-0

I. ①通… II. ①陈… III. ①隧道施工 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 154626 号

责任编辑: 孙寓明/责任校对: 高 嵘 刘 畅

责任印制: 彭 超/封面设计: 苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16

2019 年 9 月第 一 版 印张: 10 1/4

2019 年 9 月第一次印刷 字数: 244 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着我国高速公路、高速铁路交通网逐渐向山区、西部高原等环境地质条件复杂的区域延伸,沿河谷、山谷修建的傍山道路占有相当大的比重。受到山区陡峭地形条件的限制,传统深挖路堑和傍山隧道方案一直没有能很好地解决工程安全和环境保护相互协调的问题。在对传统傍山隧道进行优化的基础上,提出一种新型隧道结构——通透肋式隧道,该隧道为嵌入式非对称结构,最大限度地避免山体的切削和植被破坏,节能环保,为我国山区傍山道路的建设提供了新的途径,具有广阔的推广应用前景。

本书以黄塔桃高速公路龙瀑隧道(肋式单洞)、望东高速南山隧道(肋式连拱)工程建设为依托,对通透肋式隧道的关键技术问题开展系统研究,给出肋式单洞、肋式连拱隧道的设计理念、技术特征与适用范围,全面揭示两种新型肋式隧道结构的受力与变形演变规律,弄清肋式隧道拱顶围岩的松弛范围与破坏模式,在此基础上,提出通透肋式隧道结构荷载计算模型,建立肋式连拱中隔墙稳定性验算方法,为浅埋偏压隧道结构荷载设计计算提供了有效的工具;针对通透肋式隧道的异型空间结构特点,进一步研究施工力学行为的时空演化规律,并以此为基础提出一整套通透肋式隧道施工方法,给出开挖进尺、施工间距、衬砌时机等关键施工参数的控制标准,最后介绍通透肋式隧道施工监控量测技术。上述研究成果全面保障我国第一条通透肋式单洞隧道——黄塔桃高速公路龙瀑隧道、第一条通透肋式连拱隧道——望东高速南山隧道的顺利建成,由此将通透肋式傍山隧道的研究成果及修建技术汇编成书,希望对我国傍山道路建设、规划、设计、施工有所裨益。

本书以安徽省交通科技进步计划项目、安徽省交通控股集团科技项目的相关研究成果为基础进行撰写,同时得到了安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司、中交第二公路勘察设计研究院有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国中铁十局集团有限公司、中交第二公路工程局有限公司等单位的大力支持,也包含了他们大量的劳动和心血,作者谨表深切谢意。

由于作者水平有限,书中存在不足之处在所难免,敬请各位专家、学者批评指正。

作 者

2018年12月28日于武汉小洪山

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通透肋式隧道的提出	1
1.2 研究现状	1
1.3 通透肋式隧道的关键技术问题	3
第 2 章 通透肋式隧道结构与技术特点	4
2.1 肋式隧道设计理念与适用环境条件	4
2.1.1 浅埋傍山隧道的主要工程特征	4
2.1.2 浅埋傍山隧道传统设计方案及其优缺点	4
2.1.3 通透肋式傍山隧道结构设计理念	5
2.1.4 通透肋式隧道结构的适用条件	6
2.2 通透肋式单洞隧道结构及其特征	6
2.3 通透肋式连拱隧道结构及其特征	8
第 3 章 通透肋式隧道结构受力与变形规律	12
3.1 通透肋式隧道结构受力与变形分析思路	12
3.1.1 通透肋式单洞隧道分析思路	12
3.1.2 通透肋式连拱隧道分析思路	12
3.2 通透肋式隧道数值分析模型与分析方案	13
3.2.1 通透肋式单洞隧道数值分析模型与分析方案	13
3.2.2 肋式连拱隧道数值分析模型与分析方案	15
3.3 通透肋式单洞隧道结构受力与变形规律	16
3.3.1 拱顶山坡受力变形特征与稳定性分析	16
3.3.2 肋拱式单洞隧道受力变形特征与稳定性分析	21
3.3.3 基于受力变形规律的开挖方案比选与稳定性评价	25
3.3.4 基于受力变形规律的设计与施工优化	28
3.4 通透肋式连拱隧道结构受力与变形规律	29
3.4.1 不同开挖工况下的隧道受力变形对比分析	29
3.4.2 基于受力变形规律的通透肋式连拱隧道设计施工优化	38
第 4 章 通透肋式隧道围岩破坏模式与结构荷载计算方法	40
4.1 通透肋式单洞隧道围岩破坏模式	40
4.1.1 均质围岩条件下通透肋式傍山隧道破坏模式	41
4.1.2 非均质围岩条件下通透肋式傍山隧道破坏模式	43
4.2 通透肋式隧道围岩破裂角确定方法	45
4.3 通透肋式单洞隧道结构荷载计算模型	48

4.3.1	结构荷载计算模型	48
4.3.2	破裂角的对比分析	50
4.4	通透肋式连拱隧道围岩破坏模式	51
4.4.1	围岩破坏类型及影响因素	51
4.4.2	不同围岩条件下围岩破坏模式分析	52
4.4.3	不同地形相交关系下围岩破坏模式分析	55
4.5	通透肋式连拱隧道结构荷载计算模型	57
4.5.1	浅埋隧道结构荷载计算方法	57
4.5.2	通透肋式连拱隧道结构荷载计算模型	59
4.5.3	破裂角的分析	62
第5章	通透肋式隧道施工力学行为时空演化规律	63
5.1	通透肋式隧道施工力学行为演化规律分析思路	63
5.1.1	通透肋式单洞隧道分析思路	63
5.1.2	通透肋式连拱隧道分析思路	64
5.2	施工力学行为三维数值分析模型与分析方案	64
5.2.1	通透肋式单洞隧道三维数值分析模型与分析方案	64
5.2.2	通透肋式连拱隧道三维数值分析模型与分析方案	66
5.3	通透肋式单洞隧道施工力学行为演化规律	69
5.3.1	衬砌时机对结构受力变形的影响	69
5.3.2	开挖进尺对隧道结构受力与变形的影响分析	77
5.3.3	通透肋式单洞隧道掘进施工控制参数	85
5.4	通透肋式连拱隧道施工力学行为时空演化规律	86
5.4.1	开挖进尺对结构受力变形的影响	86
5.4.2	左右洞室开挖间距对结构受力变形的影响	99
5.4.3	衬砌时机对结构受力变形的影响	110
5.4.4	通透肋式连拱隧道掘进施工控制参数	119
第6章	通透肋式隧道结构设计与施工工法	121
6.1	通透肋式单洞隧道结构设计	121
6.1.1	隧道平面线形设计	121
6.1.2	隧道纵断面设计	121
6.1.3	隧道横断面设计	121
6.1.4	隧道洞门设计	122
6.1.5	隧道结构设计	123
6.1.6	隧道防排水工程设计	124
6.1.7	隧道监控量测	125
6.1.8	爆破方案预设计	125
6.2	通透肋式连拱隧道结构设计	126
6.2.1	隧道平面及纵断面方案设计	126

6.2.2 隧道横断面设计	127
6.2.3 隧道洞门设计	127
6.2.4 隧道衬砌结构设计	127
6.2.5 隧道防排水工程设计	129
6.2.6 隧道路面及洞内装饰	130
6.2.7 隧道检修道设计	131
6.2.8 抗震措施设计	131
6.3 通透肋式单洞隧道施工工法	131
6.3.1 通透肋式单洞隧道施工工序与操作要点	131
6.3.2 通透肋式单洞隧道施工工法主要特征与优点	135
6.4 通透肋式连拱隧道施工工法	136
6.4.1 通透肋式连拱隧道施工工法原理与特点	136
6.4.2 通透肋式连拱隧道施工工艺流程及操作要点	137
6.4.3 通透肋式连拱隧道施工工法主要特征与优点	144
第7章 通透肋式隧道施工监控量测技术	145
7.1 通透肋式隧道施工监控量测意义、目标和总体原则	145
7.1.1 施工监控量测意义与目标	145
7.1.2 监控量测工作原则	145
7.2 通透肋式隧道施工监控量测方案	146
7.2.1 监控量测工作内容	146
7.2.2 通透肋式单洞隧道监测方案	146
7.2.3 通透肋式连拱隧道监测方案	147
7.2.4 监测频率	149
7.3 通透肋式单洞隧道施工监控量测与反馈分析	149
7.4 肋式连拱隧道施工监控量测与反馈分析	152
参考文献	154

第1章 绪 论

1.1 通透肋式隧道的提出

中国山脉纵横,地形地势陡峻险要,地质条件复杂。随着我国交通道路基础设施建设力度的加大,高等级道路交通网逐渐向山区、西部高原等环境地质条件复杂的区域延伸,其中沿河谷、山谷修建的傍山道路占有相当大的比重。

傍山道路线路走向与山坡面平行或斜交,主要采用深挖路堑、明洞和傍山隧道方案。受到山区陡峭地形条件的限制,深挖路堑、明洞往往需要开挖山体,这不仅会对山坡植被造成严重破坏,同时也带来了高切坡稳定性问题。另外,傍山隧道围岩级别低,单边覆盖层薄,偏压效应显著,以往设计上多采用挡土墙、护拱或套拱支挡后回填暗挖方案,以平衡偏压荷载。由于这是一种被动受力的支护方法,对支挡结构的强度和自身稳定性要求较高,在地形条件受限的山区,往往需要采用高大的墙身和宽大的基础,工程造价高,且开挖面大,对生态环境和自然景观造成较大的破坏。因此,传统的傍山隧道修建方案一直没能很好地解决工程安全和环境保护相互协调的问题,亟须探索新的傍山道路修筑技术。

在对传统傍山隧道进行优化的基础上,出现了一种新型隧道结构——通透肋式隧道,该隧道为嵌入式非对称结构,隧道外侧采用通透的肋梁代替传统的封闭式衬砌结构,同时对拱顶山坡进行强支护后直接开挖形成洞室。与传统的傍山隧道和明洞相比,该方案采用主动变形控制措施来减小偏压应力水平,在减小开挖面的同时为结构优化提供了空间,最大限度地避免山体的切削和植被破坏,整体结构简洁美观,无须通风、采光系统,节能环保,具有很好的推广应用前景。但作为一种全新的洞室结构形式,其设计计算理论、变形控制技术 & 施工方法还远未成熟,还需要不断研究完善。

1.2 研究现状

浅埋傍山隧道逐渐取代传统的深挖路堑方案,成为傍山道路的一种主要结构形式。浅埋傍山隧道修建主要存在两个方面的技术难题:一方面是工程安全问题,由于浅埋傍山隧道围岩类别低,洞顶覆盖层薄,洞身承受显著的偏压荷载,洞室开挖影响范围波及地表,很容易造成隧道塌方、边坡失稳甚至山体滑坡,大量隧道洞口段的塌方事故以血的教训说明,浅埋隧道及深埋隧道洞口段是隧道建设工程中的高风险区域;另一方面是环境保护问题,傍山隧道多与山坡斜交,隧道开挖和支护造成地表植被破坏,对生态环境和自然景观带来较大的影响。

浅埋傍山隧道开挖破坏了山坡自然平衡状态,形成坡脚被切削的高陡边坡,存在自身稳定性问题。另外,由山坡开挖引起的岩体松弛压力直接作用于隧道结构上,且具有显著的偏压效

应,对隧道结构物的稳定十分不利。由此可见,浅埋傍山隧道的稳定性问题包含高边坡稳定和隧道结构稳定两个方面。由于山坡岩体松弛变形的大小决定了隧道结构偏压应力的水平,控制坡体变形、稳定边坡是保证隧道结构稳定的关键,即高边坡的稳定性是决定浅埋傍山隧道整体稳定的主控因素。

以往傍山隧道多采用棚洞结构及反压护拱式伴山隧道结构^[1-4],且主要应用于洞口段^[5]。对于半明半暗隧道结构而言,通过增设反压护拱、套拱、盖板、挡土墙来平衡偏压荷载^[6-8],对隧道结构受力十分不利,且不经济;而对于拱形明洞或棚洞结构来说,通过刷坡来阻隔岩土体与隧道结构的相互作用,对生态环境影响较大。这几种方案都存在工程安全和环境保护相互协调的问题,限制了它们的发展与应用。

傍山隧道实际包含边坡稳定和隧道结构稳定两个问题^[9],因地形、地质和结构形式的差异,其受力机理与破坏模式异常复杂,前人采用解析法、数值模拟法、直接量测法和模型试验法进行了大量研究^[10-13]。

陆文超等^[14]、房营光等^[15]分别采用复变函数、拉普拉斯变换对浅埋隧道围岩应力的解析解进行了研究,傅鹤林等^[16]对破碎围岩中隧道荷载计算力学模型进行研究,并得到了对应的理论解。杨小礼等^[17]基于浅埋隧道的太沙基破坏模式,利用极限分析法中的上限定理,推导非线性破坏准则下浅埋隧道围岩压力的计算公式。王汉鹏等^[18]根据不可逆热力学理论建立了弹塑性损伤耦合模型,并对浅埋分岔隧道不同施工阶段的应力、位移和损伤屈服区分布特征进行了研究。杨峰等^[19]应用极限分析上限法计算浅埋隧道围岩压力,构造了浅埋隧道围岩两种刚体平动破坏模式,并推导了理论公式。这对认识围岩应力分布的普遍规律有着直观的作用,但对于地质条件复杂、边界效应显著的傍山隧道而言,得到其解析解还存在相当大的难度。

蒋树屏等^[20-21]采用数值模拟方法分析了围岩和支护结构体非线性力学行为的应力场;伍毅敏等^[22]采用有限元方法研究了不同地形条件下半明半暗洞口段的位移和应力分布规律;毕继红等^[23]就埋深对浅埋洞室围岩压力的影响及浅埋山坡处洞室围岩压力进行了分析,得出了一些有益的结论;王祥秋等^[24]对比研究了隧道进口段施工过程中现场监测数据与有限元分析结果,得出了在偏压作用下隧道施工过程中围岩位移的变化规律;张敏等^[25]采用 FLAC 3D 数值模拟,结合工程地质条件分析,对浅埋偏压隧道出口段高边坡变形破坏机制进行了深入研究。但这些研究所涉及的隧道与本书所研究的嵌入式非对称傍山隧道,在结构形式和承载模式上存在明显的差异。余飞等^[26]、张胜等^[27]曾采用数值模拟方法对通透肋式傍山隧道的变形受力特征、围岩破坏模式进行了研究,初步揭示了嵌入式非对称傍山隧道结构受力时空演变规律。

韩桂武等^[28]通过现场测试,研究了浅埋黄土隧道应力和应变随时间的变化规律及分布特征;苟德明等^[29]根据现场测试结果分析了浅埋暗挖隧道中管棚在隧道开挖过程中的受力特性,讨论管棚的作用机制;段海澎等^[30]通过分析监测数据,对偏压连拱隧道围岩变形与支护结构受力特征进行了研究;孔恒等^[31]基于深圳地铁实测资料,系统分析了隧道工作面开挖的地层应力分布特征,揭示了城市地铁隧道工作面围岩应力重分布的规律,提出了浅埋隧道围岩应力的分区概念。

由于实测检验费用高昂,测试周期较长,不能预先探讨相关规律性问题,模型试验法在研究复杂隧道结构时被大量应用。浙江大学王戌平^[32]通过试验模拟,获得破碎围岩下普通双车道和连拱隧道的围岩压力分布规律,揭示了洞周径向压力的松弛范围与洞径、围岩特性、裸露

时间的关系。谢锦昌等^[33]、王兵等^[34]结合模型试验,对偏压隧道开挖产生松动荷载的坍落范围、地表裂缝、松动土体的力学行为进行了研究,阐述了土质偏压隧道变形发展过程及受力特征。李丹等^[35]采用大型真三轴岩土工程模型试验机,对缓倾角层理岩体中隧道的二次应力分布特征及破坏机制进行模型试验研究。以上模型试验研究成果、试验方法和技术手段^[36-38],为本书的研究起到了很好的借鉴作用。

1.3 通透肋式隧道的关键技术问题

通透肋式隧道作为一种全新的洞室结构形式,无成熟的设计和施工经验可供借鉴,面临的主要技术难题有以下四方面。

(1) 通透肋式隧道结构为半明半暗空间受力体系,其结构受力与变形规律复杂,时空效应显著,需要进行系统的研究^[3-10]。

(2) 通透肋式隧道为全新的异型结构,《公路隧道设计规范》(JTG D70/2—2014)给出的浅埋隧道结构荷载计算方法已不适用于这种异型结构,需要对其围岩破坏模式进行系统研究,探求相应的结构荷载设计计算方法^[11-12]。

(3) 通透肋式隧道埋深浅,斜交角度大,偏压严重,存在拱顶山坡稳定和隧道结构稳定两个问题,两者相互作用、相互影响的规律需进行系统的研究^[13-17]。

(4) 针对通透肋式隧道的异型结构特征,需要对其施工方法与工艺、支护和变形控制技术进行系统的研究。

第 2 章 通透肋式隧道结构与技术特点

2.1 肋式隧道设计理念与适用环境条件

2.1.1 浅埋傍山隧道的主要工程特征

浅埋傍山隧道隧址区地表倾斜，隧道傍山开挖形成洞室，埋深较浅，基本为半明半暗洞室结构，其主要工程特性可总结为：①洞顶覆盖层较薄，地面横坡较陡，洞身承受显著不对称荷载；②围岩类别较低，不能形成“自然拱”；③洞室开挖影响范围波及地表，容易造成岩质高边坡变形、山体滑动；④傍山隧道开挖造成地表植被破坏，对生态环境存在较大的影响。

因此，浅埋傍山隧道稳定性与变形控制技术及其环境保护方案是该类隧道工程建设中面临的稳定性（即安全问题）技术难题之一^[1-2]。

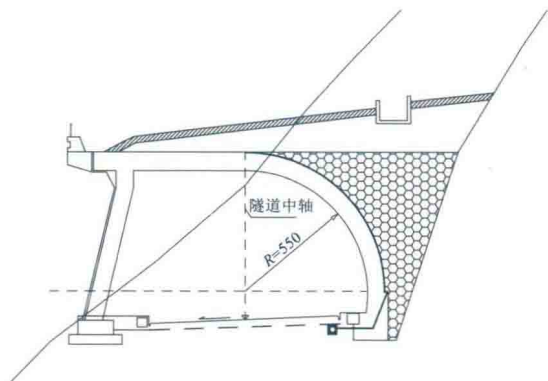
2.1.2 浅埋傍山隧道传统设计方案及其优缺点

以往傍山隧道多采用棚洞结构及反压护拱式傍山隧道结构^[1-4]，且主要应用于洞口段^[5]。

1. 棚洞结构

棚洞是明挖路堑后，构筑简支的顶棚架，并回填而成的洞身，属于明洞范畴的隧道（图 2.1）。采用棚洞的条件与明洞大致相似，其结构整体性比明洞差，但由于顶棚与内外墙简支，其对地基的要求较低。

棚洞结构方案先开挖山坡岩体后修筑棚洞，通过山坡开挖来阻隔岩土体与隧道结构的相互作用，对生态环境影响较大，其实质与深挖路堑方案类似，存在植被破坏和高边坡稳定性问题。



(a) 棚洞结构剖面图



(b) 棚洞结构全景效果图

图 2.1 棚洞结构

2. 反压护拱式傍山隧道结构

反压护拱式傍山隧道应用得比较广泛,该隧道结构通过增设反压护拱、套拱、盖板、挡土墙来平衡偏压荷载^[6-8],然后在拱顶回填反压,最后进行半明半暗开挖形成洞室,典型设计断面如图 2.2 所示。其设计理念在于通过外侧挡土墙和拱顶回填反压,减小洞室开挖过程中山体的偏压效应。但由于主洞开挖过程中,围岩松弛压力直接作用于外侧护拱及挡土墙,对结构强度和抗滑抗倾覆稳定性要求较高,设计上需要采用高大的重力式挡土墙以保证结构的稳定性,同时为了保证陡坡上挡土墙自身稳定性,设计上多采用台阶式片石混凝土和锁脚锚杆作为基础。从图 2.2 可以看到,外侧挡土墙高大,墙底片石混凝土基础笨重,造价高,开挖面大,其经济性和安全性较差。因此,有必要针对浅埋傍山隧道的受力特点进行结构优化。

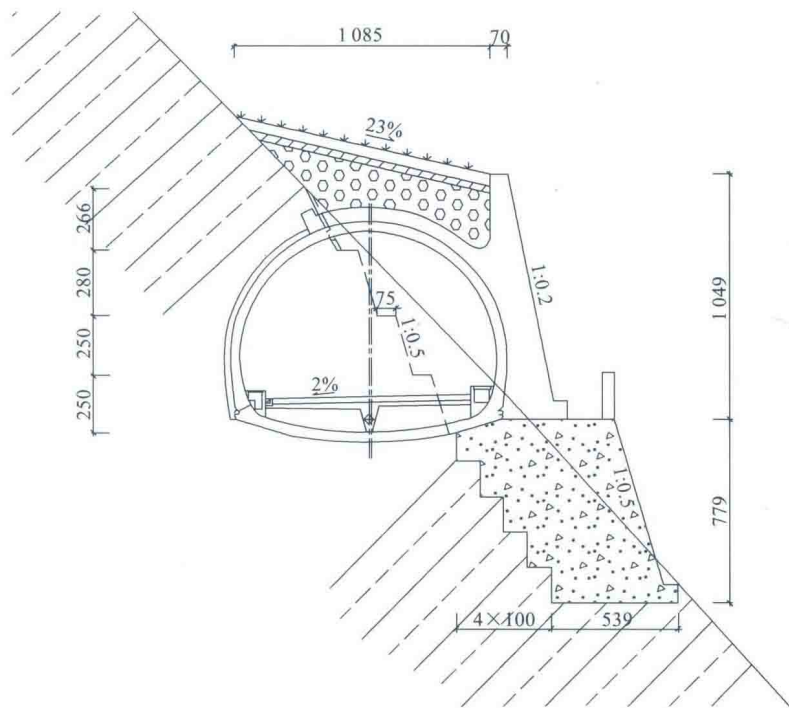


图 2.2 反压护拱式傍山隧道结构

由于这是一种被动受力的隧道结构,对支挡结构的强度和自身稳定性要求较高,且开挖面大,对生态环境和自然景观造成较大的破坏。因此,传统的傍山隧道修建方案一直没能很好地解决工程安全和环境保护相互协调的问题,亟须探索新的傍山道路修筑技术。

2.1.3 通透肋式傍山隧道结构设计理念

以往多通过调整线位来回避傍山地段的工程安全和环境破坏问题,这样一方面限制了线路选择的余地,另一方面受山区复杂地形条件的限制,仍然避免不了隧道进出口、浅埋偏压等傍山路段的出现。若能采用嵌入式的傍山隧道结构,将能较好地适应地形,解决工程安全和环

保协调这一问题,在我国建设生态道路的大背景下,无疑是一种最具前景的通过方案,同时也大大减小了山区选线工作的难度。

要解决傍山隧道工程安全和环境协调统一的问题,需对传统修建方案予以优化,一方面要尽量避免对隧址区山坡进行切削,将隧道结构部分嵌入山坡围岩中,即尽量不开挖隧道轮廓以外的岩体,另一方面是采用主动变形控制措施,对拱顶山坡围岩进行预加固,减小围岩变形,有效降低隧道偏压应力水平。在此基础上,充分利用围岩与隧道结构所形成的空间支撑体系,对隧道外侧拱圈进行优化。

基于上述分析,浅埋傍山隧道的设计应以拱顶山坡支护方案为前提,在保证拱顶边坡稳定的条件下,对隧道结构形式进行优化。在确保隧道整体稳定的同时,尽量减少开挖面,最大限度地保护山坡原生态植被。

根据以上设计理念,采用强支护措施(如管棚注浆)对拱顶山坡进行加强支护,并采用抗滑措施加固外侧拱脚山坡,稳定隧道开挖面内外侧岩体,减小坡体变形,降低隧道结构荷载水平;在此条件下仅开挖隧道轮廓内岩体,最大限度地保留山坡原生态植被;同时对隧道结构进行优化,山坡外侧采用通透的肋梁结构代替高大的挡土墙,改善隧道内的通风、采光和行车视觉效果;肋梁顶端和底端与沿线路通长布置的钢筋混凝土结构相连,以协调各片肋梁受力平衡。隧道内侧采用复合式衬砌,且二次衬砌层与拱顶地梁、肋梁、防撞墙统一浇筑成整体结构,并与仰拱和抗滑桩(或台阶基础)连接形成环型承力体系,以平衡隧道围岩的偏压应力,保证隧道结构的长期稳定性。

2.1.4 通透肋式隧道结构的适用条件

通透肋式隧道作为傍山道路建设中一种新型结构,其应用区域的地质条件一般较差,围岩多为IV~V级围岩,但不适用于自然状态下不稳定、存在滑动体和断裂带的区域。

通透肋式傍山隧道应用区域的地质环境特征主要表现为:①基岩为强度较高的硬质岩石(如花岗岩);②浅表层全-强风化岩层厚度较小,不宜超过4m;③隧道主体围岩为弱风化岩层,节理裂隙多呈闭合形态;④部分区域节理裂隙密集发育形成岩体破碎带,总体规模较小;⑤隧址区地下水主要为基岩裂隙水,隧道设计标高高于侵蚀基准面;⑥隧址区无明显断裂构造;⑦区域地震基本烈度小于VI度。

2.2 通透肋式单洞隧道结构及其特征

对传统隧道结构进行系统优化后,提出了一种全新的隧道结构——通透肋式单洞隧道(图2.3)。通透肋式单洞隧道为半明半暗异型结构,由拱顶管棚、初期衬砌、支护锚杆、内侧拱圈二次衬砌、拱顶地梁、防落石挡块、肋梁、防撞墙、桩基承台、抗滑桩、仰拱等结构部件组成,如图2.4所示。



图 2.3 龙瀑隧道——通透肋式单洞隧道

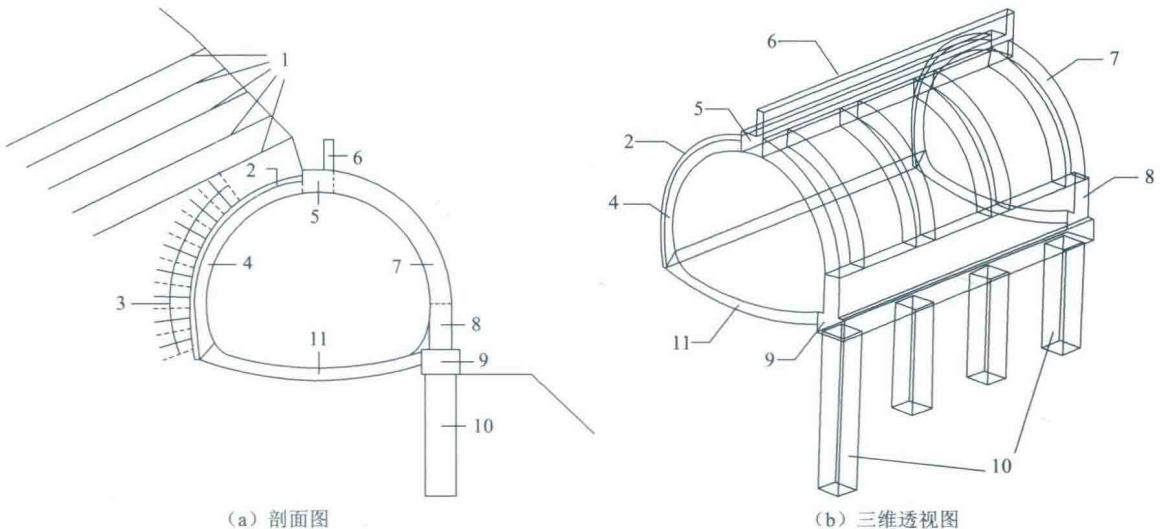


图 2.4 通透肋式单洞隧道结构组成图

- 1—拱顶管棚；2—初期衬砌；3—支护锚杆；4—内侧拱圈二次衬砌；5—拱顶地梁；6—防落石挡块；7—肋梁；
8—防撞墙；9—桩基承台；10—抗滑桩；11—仰拱

拱顶管棚采用预钻孔埋设的热扎无缝钢管，外径为 108 mm，壁厚为 6~8 mm，布置范围根据计算的岩体松弛范围予以确定；隧道内侧初期衬砌层采用 25 cm 厚的混凝土，并布设直径为 8 mm 的钢筋网；支护锚杆为直径 22 mm 的中空注浆锚杆，长度为 6 m，环向间距为 60 cm，纵向间距为 100 cm；内侧拱圈二次衬砌为 60 cm 厚的钢筋混凝土结构，顶端与拱顶地梁相连，底部与仰拱相连；拱顶地梁尺寸为 2.0 m×1.2 m（宽×高），靠山坡外侧设置的钢筋混凝土挡块尺寸为 0.5 m×1.5 m（宽×高）；肋梁为 1/4 圆弧形钢筋混凝土结构，梁体截面为长方形，其尺寸为 1.0 m×1.2 m（宽×高），相邻肋梁中心间距为 6.0 m，形成宽度为 4.8 m 通透式开间；防撞墙为条形钢筋混凝土结构，尺寸为 1.0 m×1.5 m（宽×高）；桩基承台尺寸为 2.2 m×1.2 m（宽×高）；抗滑桩为边长 1.5~1.8 m 的钢筋混凝土桩，其桩长为 8~12 m，相邻桩基之间的中心间距与肋梁保持一致；仰拱采用 60 cm 厚的钢筋混凝土结构，一端与内侧拱圈二次衬砌相连，另一端与桩基承台相连，形成封闭的结构。

通透肋式傍山隧道结构为国内首创, 凸显环保和景观协调的设计理念, 其主要经济技术优势在于: ①能很好地适应山区复杂地形; ②隧道结构受力与山坡变形协调性较好; ③最大限度地避免了山体的切削和植被破坏; ④通透的肋梁结构简洁轻盈, 具有很强的视觉冲击力和建筑美感; ⑤无须通风、采光系统, 节能环保, 行车视觉效果好。

2.3 通透肋式连拱隧道结构及其特征

为适应大跨度高速公路建设需求, 需将通透肋式单洞隧道结构向双洞、宽体方向扩展, 构建适应范围更广的新型隧道结构。因此, 在通透肋式单洞隧道设计方案的基础上, 充分利用其技术优势, 提出了一种全新的隧道结构——通透肋式连拱隧道。

通透肋式连拱隧道为嵌入式非对称结构, 其设计理念在于利用拱顶和拱脚地层锚固系统, 加固开挖影响区域内的山坡坡体, 减小高边坡的变形, 从而降低隧道结构物的应力水平。开挖过程分多步进行, 先开挖中导洞后, 然后施做中隔墙结构, 它既连接了两侧洞室结构, 又承受了山体开挖引起的偏压荷载。两侧洞室分别采用横向管棚对拱顶山坡进行强支护后再开挖形成洞室。其中, 在开挖外洞的过程中, 仅开挖隧道轮廓内岩体, 最大限度地保留山坡原生态植被; 同时外洞采用通透的肋梁结构代替高大的挡土墙, 改善隧道内的通风、采光和行车视觉效果。隧道内侧采用复合式衬砌, 且外侧洞室的二次衬砌层与拱顶地梁、肋梁、防撞墙浇筑成整体结构, 并与先期施做的中隔墙、仰拱和拱脚基础连接形成环形承力体系, 以平衡隧道围岩的偏压应力, 保证隧道结构的长期稳定性。通透肋式连拱隧道三维效果见图 2.5, 实景图见图 2.6。



图 2.5 通透肋式连拱隧道三维效果图



图 2.6 通透肋式连拱隧道实景图(南山隧道)

通透肋式连拱隧道涵盖了通透肋式隧道的主要技术经济特征, 此外, 由于通透肋式连拱隧道结构形式更复杂, 且为非对称的宽体隧道, 其技术特征有以下三点。

(1) 结构异型。与传统隧道相比, 它新增了外洞肋梁结构、中隔墙、内洞衬砌结构, 结构形式的变化必然导致隧道结构受力变形规律更为复杂, 而中隔墙、肋梁等结构的受力规律缺乏成熟的理论依据, 亟待研究。

(2) 开挖扰动区域大,对拱顶山坡稳定性影响大。通透肋式连拱隧道是双洞、宽体结构,与通透肋式单洞隧道相比,开挖范围更大,围岩扰动的区域更广,对拱顶山坡的变形破坏影响也更大。

(3) 开挖步骤多,隧道结构应力调整历程复杂。通透肋式连拱隧道结构形式的复杂性使其开挖过程更复杂,为了确保工程的安全性,其内外洞室的开挖必须分步进行,伴随开挖过程的应力释放,洞室结构应力状态的变化必然更复杂。

通透肋式连拱隧道的结构组成如图 2.7 所示,图 2.8 为通透肋式连拱隧道的结构组成的三

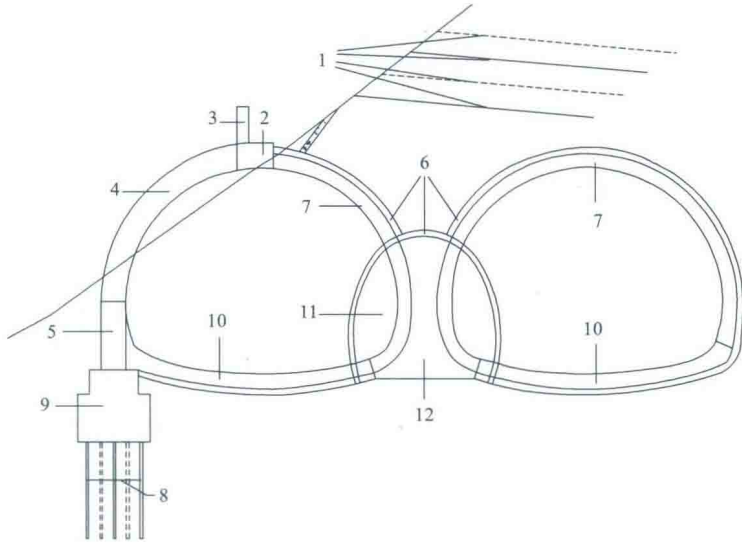


图 2.7 通透肋式连拱隧道的结构组成图

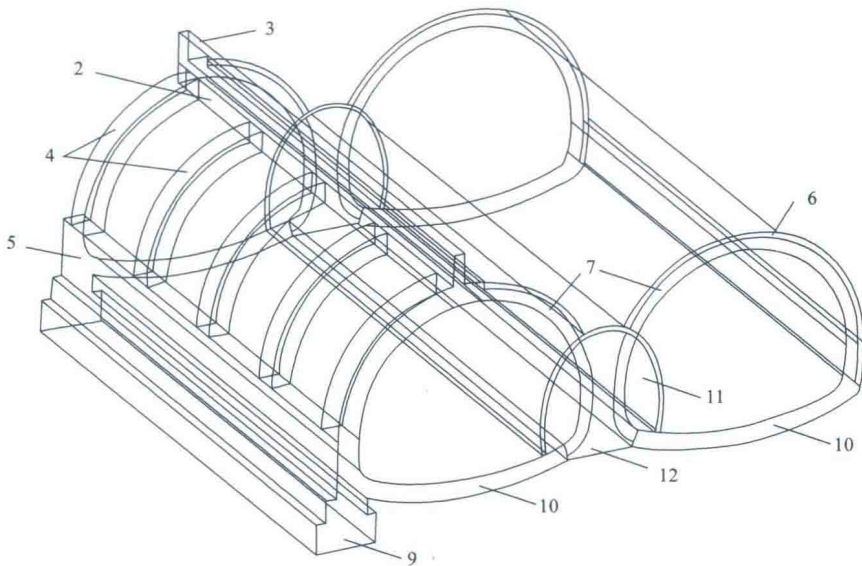


图 2.8 通透肋式连拱隧道的结构组成的三维透视图

1—拱顶锚固系统; 2—拱顶纵梁; 3—防落石挡块; 4—肋梁; 5—防撞墙; 6—初期衬砌; 7—二次衬砌; 8—拱脚锚固系统; 9—拱脚扩大基础; 10—仰拱; 11—中导洞; 12—中隔墙

维透视图。通透肋式连拱隧道结构由拱顶锚固系统、拱顶纵梁、防落石挡块、肋梁、防撞墙、初期衬砌、二次衬砌、拱脚锚固系统、拱脚扩大基础、仰拱、中导洞和中隔墙组成。

其中,拱顶锚固系统采用注浆钢管和小导管,注浆钢管为 $\phi 108\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 预钻孔埋设的热扎无缝钢管;小导管为 $\phi 50\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 注浆小导管,埋入长度为 6 m 。注浆管以向下倾斜 25° 的角度钻入,钻孔轴线与线路走向正交,并采用梅花形布置,管心间距为 2 m 。

拱顶纵梁为宽 1.5 m 、高 1.05 m 的条形钢筋混凝土结构,沿线路纵向通长布置,主要作为隧道外洞拱圈衬砌层与肋梁的连接结构。拱顶纵梁上靠山坡外侧设置有宽 0.5 m 、高 1.5 m 的钢筋混凝土防落石挡块,防止山坡碎石落入隧道内。

肋梁为 $1/4$ 圆弧形钢筋混凝土结构,梁体截面为宽 1.2 m 、高 1.05 m 的长方形,相邻肋梁中心间距为 6.0 m ,形成宽 4.8 m 、高 6.2 m 的通透式开间,各片肋梁顶端与拱顶纵梁相连,底部与防撞墙相连。

防撞墙为宽 1.05 m 、高 2.5 m 的条形钢筋混凝土结构,沿线路纵向通长布置,主要起到防止车辆冲撞隧道结构物的作用,并作为肋梁与拱脚扩大基础的连接结构。拱脚扩大基础为宽 3.0 m 、高 2.5 m 的台阶形钢筋混凝土结构,沿线路纵向通长布置。拱脚扩大基础底部的拱脚锚固系统采用 5 m 长 $\phi 50\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 注浆小导管,以垂直水平面方向向下钻入,并采用梅花形布置,管心间距为 1 m 。

隧道内外洞室初期衬砌层采用 26 cm 厚的C25早强混凝土,并布设 $\phi 8\text{ mm}@20\text{ mm}\times 20\text{ cm}$ 钢筋网。隧道开挖面布置支护锚杆,锚杆采用 $\phi 25\text{ mm}$ 的中空注浆锚杆,锚杆长度为 3.5 m ,沿拱形开挖岩面径向布置,环向间距为 100 cm ,纵向间距为 60 cm ,支护锚杆露头端与初期衬砌层相连,共同形成开挖阶段的初期支护。

隧道内洞拱圈二次衬砌为 60 cm 厚的C30钢筋混凝土结构,两端分别与中隔墙、仰拱相连,形成环形封闭承载结构。隧道外洞拱圈二次衬砌为 60 cm 厚的C30钢筋混凝土壳体结构,其顶端与拱顶纵梁相连,底部与中隔墙相连,形成环形封闭承载结构。

仰拱采用 60 cm 厚的弧形钢筋混凝土结构,内洞仰拱两端分别与二次衬砌和中隔墙相连,形成封闭结构;外洞仰拱一端与二次衬砌相连,另一端与防撞墙相连,形成封闭结构。

中隔墙为C30钢筋混凝土结构,采用复合式曲中墙形式,心墙厚 1.1 m ,底宽 3.3 m ,顶宽 2.3 m ,高 6.1 m ,中隔墙两侧衬砌分别为左右洞 60 cm 厚的C30钢筋混凝土二次衬砌。中隔墙顶部与中导洞顶紧密接触,墙底锚固锚杆采用 $\phi 25\text{ mm}@100\text{ mm}\times 100\text{ cm}$ 中空注浆锚杆,锚杆长度为 3.5 m ,以垂直水平面方向向下钻入。中隔墙将左右洞分开,并承担由偏压地形条件或内外洞室的非对称开挖带来的不平衡荷载。

中导洞是为了施做中隔墙而首先开挖的洞室,宽 6.3 m ,高 6.75 m ,中导洞的洞顶与中隔墙的顶部紧密接触,并在中隔墙浇筑完毕之后采用M7.5浆砌片石进行回填。中导洞初期衬砌层采用 20 cm 厚的C25早强混凝土,并布设 $\phi 8\text{ mm}@20\text{ mm}\times 20\text{ cm}$ 钢筋网。其开挖面布置支护锚杆,锚杆采用 $\phi 22\text{ mm}@60\text{ mm}\times 100\text{ cm}$ 的早强砂浆锚杆,锚杆长度为 3.0 m ,支护锚杆露头端与初期衬砌层相连,共同形成中导洞的初期支护。

通透肋式连拱隧道的主要技术优点有以下6方面。

(1) 通透肋式连拱隧道在通透肋式单洞隧道的基础上,采用中隔墙结构替代围岩来支撑拱顶山坡悬臂岩体,避免了拱脚及边墙部位岩体(应力集中区)破坏引起的围岩失稳,同时为