

通透肋式连拱隧道施工方法研究

尤吉¹, 易岳林¹, 吴华², 陈善雄³, 余飞³

(1. 安徽省交通控股集团有限公司 合肥市 230088; 2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 合肥市 230088)

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉市 430071)

摘要: 通透肋式连拱隧道是一种新型傍山隧道结构,较好地解决了山区公路傍山路段工程稳定与环境保护的协调问题。针对傍山隧道覆盖层薄、偏压效应显著等环境地质问题,结合该异形隧道的空间结构特征和受力变形规律分析,提出了一整套与之相适应的施工方法及工艺。通过实际工程应用,表明通透肋式连拱隧道施工技术的有效性和可靠性,保证了该新型隧道结构的成功实现。

关键词: 肋式连拱隧道; 傍山隧道; 施工方法; 偏压; 围岩加固

山区傍山公路线路走向与山坡面平行或斜交,以往多采用深挖路堑方案,不仅对周围植被造成严重破坏,也带来了高切坡稳定性问题。目前,浅埋傍山隧道逐渐取代深挖路堑方案,成为傍山道路的一种主要结构形式。浅埋傍山隧道的隧址区地表倾斜,隧道傍山开挖形成洞室,埋深较浅,偏压显著,基本为半明半暗洞室结构,存在工程安全与环境保护协调的技术难题。

为解决这一技术难题,出现了一种新型隧道结构——通透肋式拱梁隧道^[1],该隧道结构采用山坡预锚固措施下直接傍山开挖形成洞室,最大程度地避免了对地表植被的破坏,实现了工程与环境的协调统一。为使该新型环保型隧道适应大跨度、双线通行的建设需求,进一步提出了通透肋式连拱隧道结构。

在覆盖层薄、偏压效应显著的傍山地段,修建跨度更大的通透肋式连拱隧道,面临复杂的施工技术难题:(1)开挖面大,扰动区域更广,需要同时保证拱顶山坡、隧道围岩的稳定性;(2)隧道为复杂的空间异形结构,施工方案要保证关键结构部件(肋梁、中隔墙、二衬)的施工稳定性;(3)隧道左右洞掘进的施工力学行为时空演化规律更复杂,对施工工序和施工控制条件提出了更高的要求。

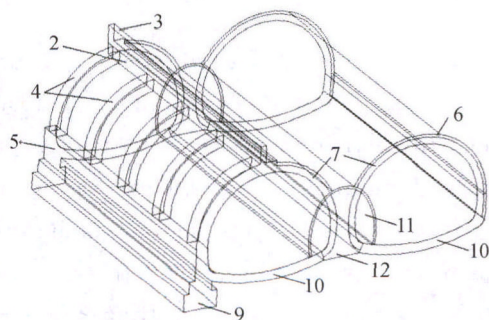
针对以上问题,本文根据通透肋式连拱隧道的结构特征和受力规律,探讨通透肋式连拱隧道的施工技术,以解决浅埋偏压地段,具有显著空间结构特

征的肋式连拱异形隧道,在开挖面更大、施工力学行为更复杂的条件下的隧道施工稳定性问题。

1 通透肋式连拱隧道技术特征

1.1 结构特征

通透肋式连拱隧道为嵌入式非对称结构,主要结构部件包括:拱顶地梁、肋式拱梁、拱脚扩大基础、内外侧衬砌结构、仰拱、拱顶和拱脚锚固系统、中导洞、中隔墙及其衬砌、防落石挡块、临时支护等。其结构组成如图1的示。



1-拱顶锚固系统; 2-拱顶地梁; 3-防落石挡块; 4-肋式拱梁; 5-防撞墙; 6-初期衬砌; 7-二次衬砌; 8-拱脚锚固系统; 9-扩大基础; 10-仰拱; 11-中导洞; 12-中隔墙

图1 通透肋式连拱隧道结构组成示意图

1.2 技术特征

(1)通透肋式连拱隧道采用双连拱结构,采用横向管棚对拱顶山坡进行强支护后分步开挖形成左、

右洞室,最大程度地避免了对山坡植被的破坏。

(2)外洞为肋式拱梁结构,具有良好的通风、采光性能;外洞通过中隔墙与内洞连为整体,平衡偏压荷载,形成跨度更大的双线隧道结构,有效提升了肋式拱梁隧道的通行能力。

(3)采用整体式中隔墙为拱顶山坡岩体提供了有效的支撑,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,降低了施工开挖的安全风险,提高了该类型隧道环境地质的适用性。

(4)通透肋式连拱隧道的高跨比较单洞通透肋式拱梁隧道明显减小,在浅埋偏压地段,具有更高的抗滑、抗倾覆安全系数。

1.3 施工技术难点

通透肋式拱梁隧道主要适用于地表倾斜的傍山地段,覆盖层较薄、围岩类别较低,偏压效应明显,修建跨度更大、空间效应显著的肋式连拱隧道,面临更多更复杂的施工技术难题。

(1)隧道采用更复杂的异形结构,空间结构特征更为显著,施工过程中需要充分考虑肋式拱梁、中隔墙、衬砌结构在偏压荷载作用下的施工稳定性。

(2)隧道开挖面更大、扰动区域更广,尤其是洞口及浅埋段岩体松散,对拱顶山坡及围岩的支护技术要求更高。

(3)隧道施工力学行为的时空演化规律更复杂,既存在纵向推进的时空效应问题,还存在左右洞推进的相互影响问题,施工工序和施工控制条件更复杂。

因此,根据通透肋式连拱梁隧道的结构特征和受力规律,探讨合理的开挖顺序、支护方式、循环进尺等施工工艺参数是保证该新型隧道成功实现的关键环节。

2 通透肋式连拱隧道施工技术

2.1 依托工程环境地质特征

该新型隧道依托工程为安徽省望东长江公路大桥南山隧道,位于东至县香隅镇境内,其起讫桩号为K27+472~K27+636,全长164 m,其中,K27+472~K27+538段采用通透肋式连拱结构(肋式衬砌段),K27+538~K27+636段为普通连拱隧道。

隧址区域属剥蚀低山地貌,沟谷狭窄,地形陡峭,自然植被茂密,生态环境保持良好。隧道围岩主要为变质砂岩,属较软岩至坚硬岩类。线路与地形线近平行,自然边坡坡率约1:1.25,如设置整体式

路基最大开挖高度近70 m,治理难度很大,工程造价较高,严重破坏优美的自然生态环境,并遗留安全风险。经过技术经济论证,采用通透肋式连拱隧道穿越。

2.2 施工开挖总体方案

针对通透肋式拱梁隧道施工面临的主要技术难题,制订了施工开挖总体方案,开挖与支护施工顺序为:拱顶山坡注浆加固→中导洞开挖→中导洞临时支护→中隔墙浇筑→横向钢支撑及中导洞回填→左洞临时坡面开挖→扩大基础浇筑→左洞侧导洞开挖→左洞侧导洞临时支护施工→左洞坡面围岩开挖→支护施工及钢拱架架设→模注左洞肋梁、纵梁及二次衬砌→右洞侧导洞开挖→右洞侧导洞临时支护施工→右洞拱部围岩开挖→支护施工及钢拱架架设→右洞核心土开挖→右洞模注混凝土→下一个施工循环,如图2所示。

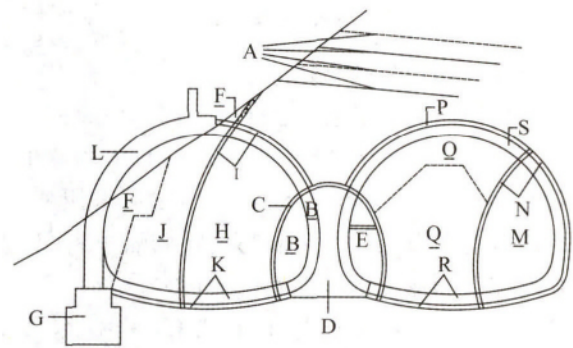


图2 通透肋式连拱隧道施工流程示意

2.3 山坡防护与加固

肋式连拱隧道由于其结构形式的特殊性,隧道偏压较严重,进、出洞口为松散体,开挖前需要对拱顶山坡进行强支护(图2中拱顶锚固系统),以加固围岩,并通过主动变形控制措施来减小偏压应力水平。进行拱顶山坡强支护后,再进行洞室围岩的开挖和结构物施作。

隧道开挖前,沿线路走向的拱顶山坡面上布置5~6排注浆钢管及5~10排注浆小导管,注浆钢管采用外径108 mm、壁厚6 mm的热轧无缝钢管,长

度为 15 m, 间距为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 呈梅花形布置; 注浆小导管外径 50 mm, 壁厚 5 mm, 长度为 6 m, 间距为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 呈梅花形布置。注浆管以水平向下倾斜 25° 的角度钻入, 钻孔轴线与线路走向正交, 注浆管打入围岩后, 水泥砂浆通过注浆孔充填注浆管与岩层之间的缝隙及围岩内部裂隙, 共同起到加固拱顶边坡岩层的作用, 如图 3 所示。



图 3 山坡注浆管加固

2.4 中导洞与中隔墙施工

中导洞是为了施作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 C25 早强混凝土, 并布设 $\phi 8\text{ mm} @ 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 钢筋网。其开挖面布置支护锚杆, 锚杆采用为 $\phi 22\text{ mm} @ 60\text{ mm} \times 100\text{ cm}$ 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。

中隔墙为 C30 钢筋混凝土结构, 采用复合式中墙形式, 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的 60 cm 厚的 C30 钢筋混凝土二次衬砌, 中隔墙的心墙与左、右洞相临的二次衬砌层先期整体浇筑, 形成整体式中隔墙, 以增强施工期中隔墙抗滑、抗倾覆稳定性。

中隔墙基础施工前, 需将基础上的虚渣、石屑全部清除, 保证基础位于基岩上, 超挖部分需采用混凝土换填。并在中隔墙底部采用锚杆进行加固, 锚杆采用 $\phi 25\text{ mm}$ 中空注浆锚杆, $L=350\text{ cm}$, 其间距为 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$, 以垂直水平面向下钻入。中隔墙浇筑完毕后, 在后行洞一侧(右洞)加临时水平钢支撑, 并采用 M7.5 浆砌片石进行回填中导洞, 回填高度为: 自中隔墙底以上 3.5 m, 如图 4 所示。



图 4 中隔墙浇筑成型

2.5 肋梁与左洞衬砌施工

肋式连拱隧道为浅埋偏压连拱隧道, 为有效控制山体变形, 保护围岩自承能力, 减少中隔墙所受偏压荷载, 增强结构整体稳定性, 完成中导洞开挖和支护后应进行左洞肋式衬砌基础和肋梁部分施工。

左洞肋式衬砌段施工前坡面采用大管棚进行注浆预加固确保边拱顶山坡稳定性。具体施工步骤如下。

(1) 扩大基础及临时坡面开挖(图 2 所示 F), 扩大基础宽 3.0 m、高 2.5 m, 为台阶形钢筋混凝土结构, 沿线路纵向通长布置, 其底部布有 5 m 长 $\phi 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 注浆小导管, 采用梅花形布置, 管心间距 1 m, 以增加基础的水平承载力; 开挖时在确保坡面稳定的基础上, 尽量减少对坡面的开挖, 保证右侧土体厚度, 确保侧导洞施工安全。

(2) 左洞侧导洞开挖及临时支护(图 1 所示 H), 临时支护采用 20 cm 厚的 C25 早强混凝土及纵向间距 60 cm 的 I16 工字钢拱架, 并布设 $\phi 8\text{ mm} @ 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 钢筋网。

(3) 左洞坡面围岩开挖(图 1 所示 J), 采用台阶法施工, 机械或弱爆破开挖。应严格控制开挖循环进尺和及时支护, 并注意量测洞内、地表变形。

(4) 施工左洞防水层, 并整体模筑左洞肋梁、拱顶地梁及左洞二次衬砌层。

肋式衬砌段起讫肋梁采用 160 cm (纵向) \times 105 cm (横向) 尺寸, 其余肋梁采用 120 cm (纵向) \times 105 cm (横向) 尺寸, 肋梁布置中心间距为 6.0 m。肋梁顶端设置纵向拱顶地梁作为结构传力系统, 肋梁底部设置钢筋混凝土条形扩大基础, 保证施工过程中及后期运营期的结构稳定性。

隧道左洞拱圈二次衬砌为 60 cm 厚的 C30 钢筋混凝土壳体结构, 其顶端与拱顶纵梁相连, 底部落

于中隔墙墙肩膀上,与底部仰拱形封闭承载结构,如图5所示。



图5 外洞肋梁及防撞墙

循环施工开挖进尺为12~14 m,纵向施工间距为6~8 m;左右洞施工间距为30 m。

为保证侧导洞的安全而施作的临时支护(工字钢、锚喷)虽构不成该隧道的主体结构,却是施工过程中不可缺少的环节,侧导洞开挖并支护后形成的受力结构在坡面围岩开挖(图2所示J)时须拆除,受力体系将发生转换,安全转换受力体系是施工中的重点,只有在正洞初期支护支点作用于扩大基础顶面时方可拆除侧导洞临时支护,确保荷载安全转移到扩大基础顶面上。

2.6 右洞开挖与支护

右洞施工侧导洞采用台阶法、主洞采用环向开挖预留核心土开挖工法不变,施工中稳中求快,开挖进尺每循环控制在1榀拱架间距,开挖后及时按照设计要求支护,并及时施作仰拱以封闭成环。

右洞上部开挖时,采用微振小爆破,控制爆破时差间隔,避免振动波叠加,以减少对已衬砌墙的震动。同时靠中隔墙与侧墙一侧离支撑1.0 m左右预留保护层,并采用二次切割预裂爆破,确保衬砌结构的安全。

右洞侧导洞临时支护采用20 cm厚的C25早强混凝土及纵向间距60 cm的I16工字钢拱架,并布设8 mm@20 cm×20 cm钢筋网,开挖面布置支护锚杆,锚杆采用为22 mm@60×100 cm的早强砂浆锚杆,锚杆长度为3.0 m。

拱部围岩开挖后,及时进行支护和架设钢拱架。初期支护层采用26 cm厚的C25早强混凝土,并布设8 mm@20 cm×20 cm钢筋网及纵向间距60 cm的I20工字钢拱架。

右洞二次衬砌为60 cm厚的C30钢筋混凝土

结构,两端分别与中隔墙和仰拱相连,形成环形封闭承载结构。

进入下一个施工循环,循环施工开挖进尺为12~14 m,纵向施工间距为6~8 m;左右洞施工间距为30 m。

3 通透肋式连拱隧道施工方法的技术优势

通透肋式连拱隧道的施工方法是根据具有通透肋式连拱隧道施工力学行为的时空演化规律而制订的,其主要技术优势体现在以下几个方面。

(1)拱顶山坡锚固系统中的注浆钢管,延伸至洞身系统锚杆加固范围内,两者形成连续的加固体系,有效减小拱顶受拉区岩体的变形,降低隧道结构的应力水平,更好地保证了拱顶山坡岩体及隧道围岩的稳定。

(2)通透肋式连拱隧道为嵌入式非对称结构,其开挖过程分多步进行,先开挖中导洞,再施作整体式中隔墙,即中隔墙与内、外洞相邻的二次衬砌段先期整体浇筑,较传统分三个阶段浇筑的“夹心饼”式中隔墙,具有更大的抗弯刚度,尤其在偏压地段,具有更好的抗滑、抗倾覆性能,有效提高了施工过程中中隔墙的稳定;中隔墙的墙底设置有锚固锚杆,进一步提高中隔墙的抗滑、抗倾覆安全系数。

(3)施工开挖采用“先左洞、后右洞”的方案,即在开挖中导洞并施作中隔墙后,先开挖左侧洞室,并施作肋式拱梁等隧道结构,形成稳定支撑体系后,再开挖右侧洞室,最后施作右洞隧道结构,这一总体开挖方案很好地保证了偏压地段异形连拱隧道施工稳定。

(4)左洞肋式拱梁与拱顶纵梁、防撞墙、防撞墙整体模注,并与中隔墙、仰拱形成环形承力体系,既保证了该异形隧道结构的整体刚度,同时可有效地平衡偏压荷载,提高隧道结构的长期稳定性。

(5)采用上述拱顶锚固系统和拱脚锚固系统来加固开挖影响区域内的山坡坡体,减小山坡岩体的变形,从而降低隧道结构物的应力水平。

(6)采用循环施工的方式分段推进,严格控制每一循环开挖进尺、施工间距,保证通透肋式连拱隧道结构的稳定性。

4 结语

肋式连拱隧道既能顺应公路线路平顺性的要求,又避免了大量开挖切坡、环境破坏,同时结构新

文章编号: 0451-0712(2016)07-318-05

中图分类号: U456.31

文献标识码: B

四家子隧道施工监测及数据模拟分析

马 驰

(辽宁省交通高等专科学校 沈阳市 110122)

摘 要: 隧道的施工监控测量对监测隧道施工过程中的变形、保证隧道安全施工具有重要作用。以四家子隧道施工监控测量为背景,通过对隧道地表沉降、拱顶下沉、围岩收敛观测数据的分析,监测隧道施工过程中围岩的稳定性,并以回归分析的方法,模拟围岩移动与时间的变化关系,从而达到预测围岩变化趋势的目的。结果表明,隧道的拱顶下沉、地表沉降、围岩收敛同步发生,在掌子面施工后的 15 d 内变化剧烈,在以后的一个月逐渐趋于稳定;对 3 种观测数据进行回归分析,利用对数建立的拟合模型均具有较大的判定系数,说明模型具有良好的预测能力。

关键词: 四家子隧道; 监控; 测量; 数据模拟; 分析

隧道监控测量在隧道施工过程中对防止塌方以及安全施工起着重要作用^[1-3]。隧道监控测量的内容主要包括地表沉降测量、围岩收敛测量以及拱顶下沉测量等^[4-7]。本文以建兴高速公路四家子隧道第三方监测项目为例,对四家子隧道进行施工监测,并对监控数据进行分析,研究隧道在施工过程中地表沉降、拱顶下沉以及围岩收敛的动态变化,为隧道的安全施工提供指导。

收稿日期: 2015-09-22

颖,具有创新性,推广应用价值较高。

在对通透肋式拱梁隧道结构特征进行分析的基础上,针对施工面临的主要技术难题,制订了一套通透肋式连拱隧道的施工方法,主要技术优势为:采用注浆钢管加固拱顶山坡,并与洞身系统锚杆衔接形成连续的加固体系,中导洞开挖后施作整体式中隔墙,并采用“先左洞、后右洞”的工序开挖洞室,左洞肋式拱梁与拱顶纵梁、防撞墙、防撞墙整体模注,并与中隔墙、仰拱形成环形承力体系,循环施工开挖进尺为 12~14 m,纵向施工间距为 6~8 m;左右洞施工间距为 30 m。

通透肋式连拱隧道的施工工序、支护体系和施工控制参数,与通透肋式连拱隧道施工力学行为时空演化规律相适应,有效保证了施工过程安全和隧道结构的稳定,为这一新型环保型隧道的推广应用提供了一套实际可操作的施工技术。

依托工程望东长江公路大桥南山隧道的成功建

1 工程概况

四家子隧道位于建昌县药王庙镇上四家子村,呈北西向展布,为两条分离式单向隧道,建筑限界 10.25 m,净高 5 m,隧道左洞长 495 m,右洞长 506 m。设计时速 80 km/h,隧道起讫桩号为左洞 ZK35+650~ZK36+145 m,右洞为 YK35+650~YK36+136 m。隧道洞口段围岩等级为 V 级,洞身段围岩

成,验证和检验了所提出施工方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 王祥秋,杨林德,高文华. 高速公路偏压隧道施工动态监测与有限元仿真模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,(2):284-289.
- [2] 余飞,陈善雄,陈修和,等. 通透肋式拱梁隧道结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,(10):2039-2047.
- [3] JTG F60-2009 公路隧道施工技术规范[S].
- [4] 孙成伟,陈昊,陈树茂. 广州地铁 5 号线淘金站浅埋暗挖隧道施工技术[J]. 施工技术, 2013,(8):57-59.
- [5] 李志星,张宇华,石效民. 浅埋偏压隧道开挖技术[J]. 施工技术, 2011,(3):60-62.
- [6] 马艳春. 高速公路连拱超浅埋隧道下穿 104 国道施工技术[J]. 建筑技术, 2011,(8):754-757.
- [7] 李旭阳. 浅埋偏压隧道施工技术[J]. 公路, 2014,(9):165-167.