

# 高速铁路大断面浅埋偏压隧道不对称护拱暗挖施工技术研究

谭钊

中铁北京工程局集团第二工程有限公司

**摘要:** 隧道工程由于地形和地貌条件限制, 洞口往往不可避免的处于浅埋、偏压等不利地区, 给施工带来了很大的安全风险和技术挑战。传统的施工方法采用大规模挖掘、高刷坡度和增加强力支护措施等, 如果处理不当, 往往会导致隧道口滑坡、二次衬砌开裂等质量安全事故, 并导致二次衬砌整体偏移, 给高速铁路运营造成极大的安全隐患。因此, 控制浅埋偏压隧道洞口在施工中的变形是保证隧道安全进洞施工的重要因素。此外, 使用传统的大规模挖掘技术可能会破坏洞口原始的地形, 并影响原始的自然景观。鉴于环保要求越来越高, 隧道建设尽量减少对原始景观的破坏, 保护自然景观已成为建设的基本原则。采用不对称护拱暗挖施工方法, 不仅大大减小了土石方工程和隧道边坡支撑的负荷, 保护了原有地形和景观, 同时保证了隧道口进洞施工的安全; 通过对不对称护拱进行回填反压, 防止了隧道洞口偏移引起的安全风险, 确保了隧道的安全有序施工; 采用创新的结构设计, 在保证安全质量的前提下, 缩短了开挖支护时间, 节省了施工成本, 简化了施工工艺, 保证了生产安全。

**关键词:** 高速铁路; 大断面浅埋偏压隧道; 不对称护拱暗挖; 施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.21.048

## 一、花岗岩地层隧道不对称护拱暗挖施工初步设计参数

### (一) 大断面浅埋偏压隧道开挖项目受冲切计算要点

在载荷完全分布时, 圆柱端(冲孔面一)和支撑板边缘(冲孔面二)沿45°的倾斜方向形成冲孔锥体, 锥体内各区域的载荷和护拱板自重为有利载荷, 而锥体外区域的载荷和护拱自重为冲切载荷。在高速铁路大断面浅埋偏压隧道开挖项目设计阶段, 冲孔计算通常要确定新建隧道开挖项目各个部件的尺寸, 包括护拱厚度, 拱脚支撑板尺寸, 钢管桩帽尺寸等。护拱顶面普遍覆土且不对称受压, 拱脚支撑节点受力较大。通常选择护拱盖、托板、护拱盖+托板三种节点形式。高速铁路大断面浅埋偏压隧道开挖项目冲孔设计可分为三个阶段进行, 先按新建隧道开挖项目物高度、覆土厚度和柱网大小确定节点形式; 然后通过计算冲孔平面I, 确定总冲孔高度; 若高于新建隧道开挖结构物容许高度, 可考虑使用冲孔箍筋或弯曲钢筋。再次, 对顶板II进行计

算, 并结合高速铁路大断面浅埋偏压隧道开挖项目的弯曲计算结果, 确定不对称护拱的宽度和厚度。

新建隧道开挖项目结构荷载规范中的活荷载数值未对顶部活荷载进行规定。编码编译器给出的解释是, 荷载变化太大, 应该根据项目的实际情况来决定。所以每一个设计院的价格在5到10kN/m<sup>2</sup>之间。对新建隧道开挖后期改造的可能性也越来越大, 这个数值应该设计成10kN/m<sup>2</sup>。集中式反力设计值: 取拱脚上部轴压设计值, 减去拱脚上部冲孔破坏锥体内板的荷载设计值。由于存在不平衡弯矩, 在等效条件下, 应采用考虑不平衡弯矩的反力设计值。不平衡弯矩会增加相邻跨间的集中反力, 在冲孔计算中传递分布。在设计初期, 不平衡弯矩计算比较复杂, 采用手工计算冲孔, 平面导向荷载计算得到的集中反力可以直接乘以系数1.1。为避免或减少不平衡弯矩的影响, 护拱轴网应均匀布置高速铁路大断面浅埋偏压隧道开挖项目, 对局部不规则部位可采用宽扁梁结构。

当混凝土断面尺寸有限, 不能满足冲切计算要求时, 可采取以下措施: 提高护拱顶板混凝土标号, 但不得高于C40; 设置冲切箍筋或抗弯钢筋, 可大大提高拱脚节点的冲切能力; 有条件时, 可采用螺栓式剪力架和型钢型剪力架。高速铁路大断面浅埋偏压隧道开挖项目冲孔计算时, 必须正确掌握计算机的计算结果。对于冲孔一般首先通过设置无箍筋和弯曲筋进行计算, 当冲孔不满足要求时, 通过设置防冲箍筋进行自动计算, 并给出单边与单位箍筋间距范围内的防冲箍筋面积。手工检查冲压计算, 对设计人员而言, 不应盲目相信程序的计算结果。该程序由多个计算参数控制, 其中一个计算参数的误差会影响整个计算结果。为计算高速铁路大断面浅埋偏压隧道开挖项目, 设计者必须进行人工检验, 并与计算机计算结果进行比较, 分析差异产生的原因, 应引起重视。

## 二、工程概述

### (一) 工程主要概况

新建汕头至汕尾铁路是构建东南沿海高速铁路通道的重要环节, 是广东省首条采用EPC模式管理的设计时速为350km/h的高速铁路。全线隧道设计总长33.519km, 占正线全长的20.64%。仙庵隧道位于广东省惠来县境内, 为单洞双线隧道, 隧道全长5889.12m, 洞身围岩主要为燕山期多期次侵入弱风化黑云母花岗岩, 隧道进出口洞口段地形复杂, 呈典型的单面坡偏压形

式，洞口横断面坡度在 $30\sim 45^\circ$ 左右。很多学者均对隧道护拱暗挖施工设计参数、施工工艺进行了诸多研究，总结出了很多的施工经验，但由于地质情况及地形条件的差异，针对不同角度的大断面不对称护拱暗挖施工技术，在应用中仍需进一步的研究总结。

## （二）设计概况

仙庵隧道全长5889.12m，其中暗挖5815m，明挖74.12m，全隧道埋深较深，最大埋深290m，隧道最大跨度14.96m，净高12.64m。隧道挖掘方法主要分为明挖法、半明半暗挖掘法和暗挖掘法3类，具体挖掘方法主要从工程成本、施工进度、施工安全、施工技术、实际运行能力等方面进行分析。对于仙庵隧道洞口位于偏压冲沟附近，多年水流，预测最大流量 $1433\text{m}^3/\text{d}$ ，对于富水集度高的地区，复杂的地质条件浅埋洞口上部和外部环境的影响，通过技术、经济的方式，安全渐进地比较设计方法和现场浅挖方法两种施工方案，获得最佳施工方案。

## 三、施工方案比选

### （一）浅埋地下工程概要

根据《铁路隧道设计规范》，单线或双线隧道拱顶埋藏深度为18米-25米，对于浅埋隧道，覆盖比（拱顶覆盖厚度与结构跨度之比）为 $0.6 < h/d < 1.5$ ，称为浅埋。 $h/d > 0.6$ 被称为超浅埋。仙庵隧道洞口段拱部的最小垂直掩埋深度为2.6米，其他大部分掩埋深度为3.9米-6.6米，根据该定义为超浅掩埋段，采用不对称护拱暗挖技术设计。

### （二）明挖法施工难点

仙庵隧道进口洞口需要一条1.5公里长的施工便道，新建便道必须穿过广阔山脉和沟谷，必须征用。如果明洞段施工提前完成，需要安装供电、供水、通风设施，并新建临时供电站，需要获得大量的土地临时使用权，土地购置成本较高，导致施工准备阶段较长，不利于施工进度和成本控制。根据设计数据和地形图以及现场勘察，洞口开挖地段地质条件复杂，采用对称开挖法的最大挖掘深度为17.3米，开挖地段的周围山体扰动较大，如果处理不当，这很容易导致侧坡和岩石的损失，侧坡、滑坡和坍塌的发生，对施工安全和进度影响较大。

### （三）暗挖法施工

#### 1. 缺点分析

对洞口超浅埋区，在隧道开挖进洞时可能发生拱顶坍塌、侧墙失稳等灾害，需要制定详细的施工计划和支顶措施，以防止灾害发生。地质条件差：浅埋拱顶表面北面有一条冲沟，雨季冲沟内水量较大，容易下渗造成拱部失稳，施工条件差，如何加固浅埋拱顶，防止施工时渗水，是隧道施工的另一个关键要素。

#### 2. 优点分析

超浅埋不对称护拱暗挖技术在中国地下工程中有许

多成功的实例，护拱一侧紧贴山体，另一侧坐落于原状土，可以有效地消除拱顶坍塌和浅埋区挖掘时侧墙稳定性丧失等灾害。护拱可直接利用土模作为支撑进行混凝土浇筑，简单快捷。

对环境的影响小，土地征用和植被破坏减少，对原始景观的破坏减少，山区扰动减少，有利于山区稳定。当地居民受到的影响较小。启动速度快，对施工进度影响小，不确定性小。

## 四、施工工艺

### （一）不对称式护拱基础施工

一是对隧道拱部基底进行挖掘，预留基底上台阶、侧排槽至保护拱基底高度，施作钢管桩作为基底处理桩。在钢管桩浆液强度达到85%以上的条件下，挖掘隧道拱基，确保锚固桩深入拱基。拱脚基础厚100cm，深入拱桩基础50cm，而陡坡的山地侧拱地基采用2根 $\Phi 50$ 钢管桩，1根 $\Phi 25$ 中空注浆锚杆锚固支护，钢管及锚杆纵向设置间距均为1m，长度8.0m，端头预留50cm，与保护拱一起浇注。拱圈采用C35钢筋混凝土，厚100厘米，长度可根据浅埋偏压段的长度具体确定。拱门底座主钢筋采用 $\Phi 25$ 螺纹钢，拱圈钢筋采 $\Phi 16$ 螺纹钢，钢筋之间的距离为25cm，钢筋通过绑扎固定并与底部土模固定，以防止位移。护拱底部可采用原状土或回填土夯填完成以后进行人工修整，修整护拱基底后需复测护拱底部高程及纵横边线，严禁护拱侵入二衬混凝土内。

### （二）不对称式护拱施工

拱门不对称支承采用I20A型工字钢，间隔60cm，拱门设计80cm厚C30钢筋混凝土，主钢筋采用 $\Phi 25@20\text{cm}$ 螺纹钢，拱门保护钢筋与拱门保护主钢筋相连。由于左、右拱门的不对称性，首先浇注右侧，直到两侧对齐，然后均匀浇注两侧。安装螺栓孔，可垂直关闭，每浇筑20-30cm在塞子上，依次打开螺栓孔进行排水，以减少气泡，放水后及时使用螺栓拧紧。

### （三）暗洞开挖施工

偏置隧道由于存在天然地面爆破挖掘，岩石稳定性差，爆炸振动效应得到有效控制，因此施工采用分部开挖方法进行。挖掘顺序由自上而下的施工顺序进行。根据现场具体情况，先后制造上、中、下台阶相应的钢拱架，挖掘完成后，采用湿喷机械手初喷4cm厚的C25喷射混凝土。安装钢拱架，打设锁脚锚杆和系统锚杆，最后根据设计复喷混凝土至设计厚度，完成浅偏隧道开挖支护施工。

### （四）洞顶反压回填

隧道二次衬砌施工完成后，在隧道护拱半明挖侧，在偏移侧拱门上方采用土石填料回填，抵抗偏移产生的侧压，达到整体力学平衡的目标。施工前根据设计使洞顶预埋排水波纹管，经过分层回填，回填厚度不大于0.5m，顶部夯填黏土隔水层，拱部回填厚度不超过3米。采用蛙式夯土机对回填土石进行分层夯实，施工前

根据设计做好洞顶部位的防排水,使其与原有地形、冲沟平顺连接。

## 五、大断面隧道施工技术

### (一) 大断面影响

由于隧道开挖截面大,对隧道建设将产生以下影响:隧道开挖后,开挖面积大,将导致二次应力场对护拱施加较大应力,不利于隧道稳定性;大截面隧道在开挖时应分部进行,开挖后支架应落在非开挖部分上,在整个截面开挖完成并形成封闭支架之前,较大的开挖面积会使开挖的拱门部分承受较大的应力,拱脚承载能力要求较高;隧道横跨度大,拱顶两侧挖掘范围大,施工挖掘时将使隧道挖掘截面不稳定,容易引起较大的沉降或变形,容易导致初始结构侵入二次衬砌施工边界,影响二次衬砌施工需要时间,处理侵入部分的初期支护甚至护拱拱脚,容易导致洞口坍塌、冒顶。

### (二) 应对措施

对于超大截面挖掘,对V级软弱围岩地段、浅埋段进行挖掘,V级孔段和浅埋段采用弧形导坑施工法(预留核心土)。弧形导坑核心土保持方法挖掘和施工的主要阶段是:上台阶弧形导坑挖掘→上导坑初期支护→两侧中台阶挖掘→侧墙初期支护→核心土挖掘→下台阶挖掘→初期支护封闭。施工技术要点:施工各部分挖掘完成后,立即进行初期支护的配套施工;同时考虑挖掘回路设计和支撑钢拱架设计,使加工钢拱架装配后尽可能贴近开挖面,与挖掘回路相匹配,从而降低应力集中,避免钢架局部应力过大影响支撑稳定性;设计了上部弧形导轨坑和两侧的中间台阶,以保持基底土的数量,确保稳定性。规定上部弧形导轨坑和中台阶的挖掘面积应小于总截面的50%;在分阶段挖掘过程中,最后一次挖掘应在先前的支撑和喷射混凝土强度达到70%以上后进行;在施工钢拱架时,在每一级挖掘完成后,必须注意锁锚杆的施工质量,确保钢拱架的稳定性,以发挥钢拱架的辅助作用。施工过程中应严格控制挖掘时的进尺,逐段挖掘每个挖掘周期;使用控制爆炸或人工配合机械挖掘,以尽量减少挖掘过程中的干扰;挖掘出截面所有部分后,初始支撑应尽早封闭成环,及时监测分析监控量测数据,确定支撑结构初始沉降和收敛稳定数据,色湖的临时支撑时,应在监控量测数据稳定后拆除。

## 六、浅埋隧道施工技术

### (一) 浅埋影响

隧道埋深对开挖后隧道横截面的稳定性有很大影响,在开挖后沿挖掘截面周界易形成松动圈,因此挖掘截面上方的地表容易沉降,对原有支撑结构施加更大压力,而地表沉降会导致土壤在山体表面明显移动,形成滑移面,对环境影响较大。同时,浅埋部位往往伴有地表岩石风化程度较严重、岩石弱化、地貌偏移等问题,对隧道稳定性影响较大,因此,在施工浅埋偏压隧道时,必须加强地表沉积物稳定性和沉降控制措施。

### (二) 应对措施

针对浅埋问题,要严格执行超前支护,加强围岩稳定性,采用超前大管棚和超前小导管并进行注浆加固,对浅埋土体进行有效加固。在埋深较浅的地段的洞内岩石软弱,导致进洞难度增大,在进洞前,可配合不对称的护拱,在隧道护拱内按照间距40cm预埋 $\phi 127$ 钢套管,护拱施工完成后,沿钢套管设置长度40m的 $\phi 108$ 大管棚,以保证顺利穿越浅埋偏压段。针对传统半明半暗施工方法中支撑结构连接薄弱的问题,该项目在施工过程中采用不对称护拱结构配合超前大管棚或小导管注浆措施对半明暗结构进行了有效加固。施工技术亮点:原浅埋偏压开挖部分采用不对称护拱支护,代替明暗挖掘部分,大大减少了洞口部位的土石方挖掘量,减小了挖掘深度,同时利用不对称护拱设置传统的钢管棚增加对暗挖部分的超前支护,增强了周围岩石的稳定性;改变开挖拱部分与工字钢原始支承部分暗挖连接的做法,并在开挖拱部分内部进行初始支承,以提高支承结构的完整性,避免局部支承结构薄弱造成变形的不利情况。

## 七、结束语

本文结合新建汕头至汕尾高速铁路仙庵隧道施工过程中的建设情况,在现场地质调查的基础上,从挖掘截面、埋藏深度、隧道位移、支护措施等几个方面对隧道洞口施工进行了分析,并提出了相应的技术措施。仙庵隧道典型浅埋偏压大截面隧道施工过程中,严格遵循“少扰动、强支护、早封闭”的原则,并采取合理措施选择挖掘、支护方式,在不利条件下加强半明暗结构等措施,有效控制围岩变形,保证围岩和支撑结构的稳定性,有效保证了隧道施工的安全顺利进行。

## 参考文献

- [1]苑雪飞.半明半暗浅埋偏压隧道非对称护拱施工技术[J].铁道建筑技术,2019(7):5.
- [2]贾元霞.高速铁路浅埋偏压隧道安全进洞方案研究[J].地震工程学报,2022,44(1):22-28.
- [3]刘建梁.黄土偏压浅埋隧道护拱暗挖法进洞施工技术[J].中国科技纵横,2018(5):2.
- [4]朱浩波.大断面浅埋高速铁路隧道施工关键技术研究[D].北京交通大学,2015.
- [5]毕志刚、毛晓辉、吕文国、李文杰、梁斌.浅埋偏压小净距大断面公路隧道进洞施工技术研究[J].河南城建学院学报,2020,29(4):9.
- [6]吴绍明,程晔.大广高速上坪大断面浅埋偏压隧道进洞施工方案与应急处治研究[J].公路隧道,2017(1):4.
- [7]周克实.铁路三线大断面隧道浅埋偏压(洞口)段施工技术及安全措施[J].中外建筑,2019(4):3.
- [8]PI Liang.大跨断面隧道浅埋偏压条件下穿越软硬不均地层施工技术研究[J].广东交通职业技术学院学报,2019(003):018.