

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.033

复杂条件下半明半暗连拱隧道洞口设计

邬龙刚, 杨开彪

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要:连拱隧道半明半暗结构形式是隧道洞口地表偏斜地段的一种优选方案,目前针对这种结构形式的研究及工程应用较少。文中结合工程实例,在洞口地表偏斜、超浅埋、临近重要构筑物等不利因素叠加的情况下,采用“半明洞+半护拱”的半明半暗结构形式入洞,并提出半明半暗连拱隧道施工方法;采用有限元软件对各施工步骤进行模拟计算,计算结果与现场监测结果吻合,证明半明半暗连拱隧道施工方法在洞口地表偏斜、超浅埋、临近重要构筑物等因素叠加情况下可行。

关键词:隧道;连拱隧道;洞口设计;半明半暗结构;复杂条件

中图分类号:U452

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)04-0143-04

连拱隧道开挖跨度较大,结构组成复杂,施工工序繁多,开挖和支护施工相互交错进行,结构受力的复杂程度和施工难度远大于分离式隧道。隧道洞口设计是连拱隧道的重点及难点,常因设计不合理导致洞口处隧道半边埋深过浅甚至露空,隧道洞口地形偏压严重。采用传统隧道方案会导致路基靠山侧刷方量巨大,开挖时若不及时支护或支护不当易产生较大规模滑坡,形成高陡边坡导致临近洞口建(构)筑物出现险情。

相比于传统方案,半明半暗连拱隧道施工方案在保证安全的前提下可大大减少对山体的开挖,使公路与地形较好地协调。目前对半明半暗连拱隧道无统一的标准计算方法,通常在某些假定条件下采用有限元软件进行分析,对浅埋偏压且洞口临近重要建筑物等复杂情况下连拱隧道的研究较少。该文结合工程实例,在洞口地表偏斜、超浅埋、临近重要构筑物等不利因素叠加的情况下,采用“半明洞+半护拱”的半明半暗结构形式入洞,对临近电塔采用树根桩进行保护,并通过 SoilWorks 软件分析论证该方案的安全性。

1 工程概况

某双向六车道连拱隧道采用双连拱暗挖形式,全长 167 m(K0+688—855),包含北端半明半暗洞口段 35 m、暗挖段 117 m、南端明洞段 15 m,设计速度 60 km/h。隧道纵坡为 -0.37% ,北高南低。单洞净宽为 15.2 m,净高为 9.77 m。按新奥法原理采用复合式衬砌,初期支护采用锚喷支护,二次衬砌为

模筑混凝土衬砌。采用曲墙式衬砌,初期支护采用 C20 喷射混凝土,二次衬砌采用钢筋混凝土结构,混凝土强度等级为 C35,抗渗等级为 P8。

北端洞口 K0+688—723 段地势起伏较大,左低右高,洞身范围地形高差达 10 m,且隧道西侧 10 m 处存在一 110 kV 高压电塔无法迁改。该高压线与隧道两处斜交,距隧道范围地面最近距离仅 15 m(见图 1)。电力部门要求拟建隧道施工中确保电塔安全且满足安全施工净距要求(见图 1)。



图 1 隧道洞口现状地貌

隧道北端洞口场地岩土层主要由全、强风化混合花岗岩组成,全、强风化层呈坚硬土状、半岩半土状,局部呈碎石状;局部由混合花岗岩残积砂质黏性土及中风化混合花岗岩组成(见图 2)。岩土层具有遇水软化、崩解、岩质软、强度低等特点。

拟建道路沿线所在地区抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度为 $0.10g$,设计地震分组为第一组。建筑场地类别为Ⅱ的地段,场地特征周期为 0.35 s ;建筑场地类别为Ⅲ的地段,场地特征周期为 0.45 s 。

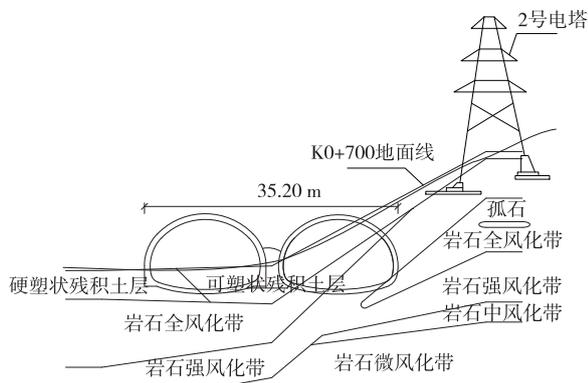


图2 半明半暗洞口示意图

2 设计方案研究

因北端洞口所处场地地势起伏较大,附近存在高压电塔。高压电塔采用扩大基础,其基础距隧道外边线仅 7.6 m,其上高压电线距地面距离较小,如采用抗滑桩+预应力锚索等路堑支挡方式通过,易对电塔造成较大扰动,且高压电线下方净空有限,无法满足打桩、钢筋笼吊装等施工作业要求。另外,抗滑桩方案临空面高度约 12 m。考虑后期锚索维护保养及山体植被恢复等环保因素,经综合比选,确定半明半暗的隧道通过方案,即先行施工左侧明洞及中隔墙,利用已建成的左侧明洞及中隔墙为右洞护拱提供反力,确保护拱下右洞暗挖安全。

2.1 设计方案

为确保隧道施工安全及进洞右侧 2 号电塔安全,对右洞右侧山体采用树根桩加固,并进行左洞拱脚及中隔墙预制方桩地基加固。设计方案如下:

(1) 主洞开挖采用预留核心土环形导坑方法,核心土的纵向长度不小于 5 m,高度不小于 4 m。胸坡设为 1:0.2,因围岩完整性、风化程度、地下水发育等原因导致坡面难稳定,加喷混凝土。每循环进尺喷混凝土一次,掌子面喷 5 cm 厚混凝土封闭。

(2) 树根桩支护。开挖前在电塔与隧道之间打设 4 排直径 25 cm、间距 35 cm(或 50 cm)树根桩,排距为 60 cm(或 80 cm),桩长为至隧道支护底面以下 5 m(或 3 m)。

(3) 初期支护钢架采用 I22b 型钢,全环设置;二次衬砌采用 C35 钢筋混凝土。

(4) 为控制沉降,拱墙钢架设锁脚锚管并垫型钢,且初期支护尽早封闭成环。每榀钢架采用 4 根锁脚锚管,锁脚锚管采用 $\phi 42$ 钢花管并注水泥浆。

(5) 若电塔的沉降变形超过设计或相关规范容

许值,则对电塔补充跟踪注浆措施,确保其安全。

2.2 施工步骤

步骤 1:跳槽开挖左洞 1 部,开挖后立即在坑槽两侧坡面喷射厚 10 cm C20 混凝土,依次施作右洞外侧电塔加固树根桩、左洞基础处理预制方桩(见图 3)。

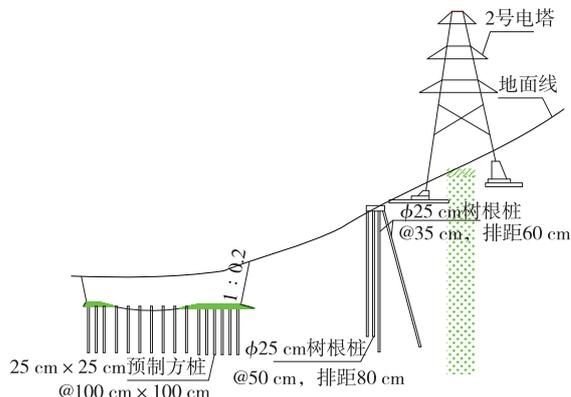


图3 施工步骤 1 示意图

步骤 2:施作左侧明洞,并采用 C20 混凝土回填左洞左下角开挖基槽;施作中隔墙,在墙右侧上、下角预埋钢筋和钢板(见图 4)。

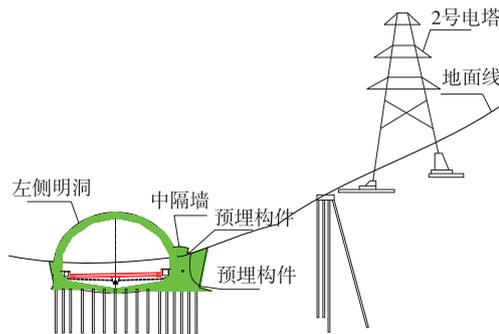


图4 施工步骤 2 示意图

步骤 3:待明洞及中隔墙施工完成并达到设计强度后,跳槽开挖右上部边坡并锚喷支护;回填右洞至护拱内轮廓线,浇筑 42 cm 厚护拱;待护拱混凝土初凝后,立即采用 M10 浆砌片石及土石同步对称回填护拱两侧三角区;护拱达到设计强度后,同步对称回填土石至护拱顶 0.5 m(见图 5)。

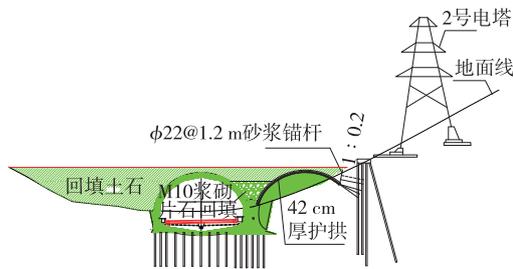


图5 施工步骤 3 示意图

步骤 4:在护拱的保护下采用侧壁导坑法依次开挖 I ~ V 部并施作初期支护,待初期支护变形稳定后,施作暗洞二次衬砌;待二次衬砌达到设计强度后,进行洞门墙基础土石方开挖,并施作洞门端墙;最后回填土石至设计标高(见图 6)。

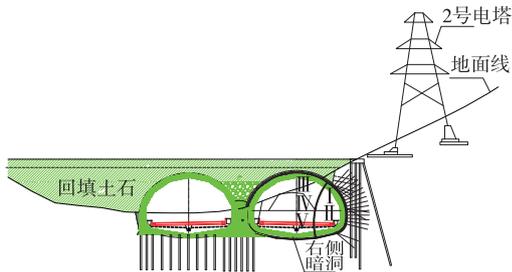


图 6 施工步骤 4 示意图

3 半明半暗连拱隧道数值分析

采用 SoilWorks 有限元软件对上述施工方法进

行数值模拟计算。选取电塔处截面进行分析,模型计算范围为隧道左、右、下侧约 70 m,模型共划分为 14 835 个单元(见图 7)。

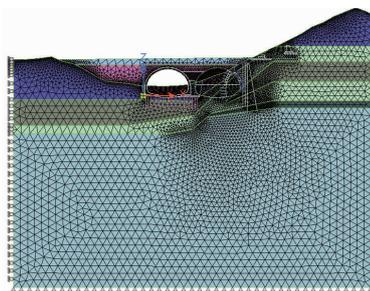


图 7 计算模型

隧道岩土层的物理力学指标依据勘察报告及《公路隧道设计细则》取值(见表 1),支护材料参数见表 2。隧道施工步骤见表 3,其中工序 11 见图 8。

表 1 各岩土层力学参数

| 岩土层 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 容重/(kN · m ⁻³) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|---------|----------|------|----------------------------|---------|----------|
| 可塑状粉质黏土 | 0.015 | 0.37 | 19.0 | 20 | 15 |
| 可塑状残积土层 | 0.015 | 0.35 | 19.0 | 20 | 15 |
| 硬塑状残积土 | 0.030 | 0.35 | 19.0 | 25 | 20 |
| 岩石全风化带 | 0.500 | 0.40 | 19.6 | 28 | 23 |
| 岩石强风化带 | 1.000 | 0.40 | 20.0 | 45 | 26 |
| 岩石中风化带 | 2.400 | 0.33 | 20.0 | 500 | 35 |
| 岩石微风化带 | 110.000 | 0.25 | 23.0 | 1 100 | 44 |

表 2 支护材料参数

| 材料名称 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 容重/(kN · m ⁻³) |
|-------|----------|-----|----------------------------|
| 喷射混凝土 | 21 | 0.2 | 22.0 |
| 锚杆 | 210 | 0.3 | 78.5 |
| 钢筋混凝土 | 31 | 0.2 | 25.0 |

表 3 隧道施工步骤

| 工序号 | 施工内容 | 工序号 | 施工内容 |
|-----|--------------|-----|------------|
| 1 | 初始应力场计算 | 7 | 开挖侧导洞并支护 |
| 2 | 施工树根桩 | 8 | 开挖主洞上台阶并支护 |
| 3 | 开挖及地基处理 | 9 | 开挖主洞下台阶并支护 |
| 4 | 施工明洞、中隔墙及土胎模 | 10 | 施作二次衬砌 |
| 5 | 施作护拱并回填 | 11 | 洞顶回填 |
| 6 | 侧导洞超前支护 | | |

隧道变形分析结果见图 9、图 10、表 4、表 5,内力分析结果见图 11~13。隧道施工过程中,中隔墙的最大水平变形为 1.9 mm,电塔侧的偏压力由左侧

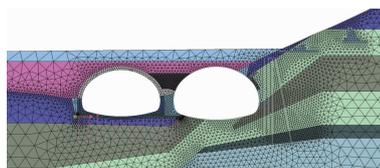


图 8 工序 11 示意图

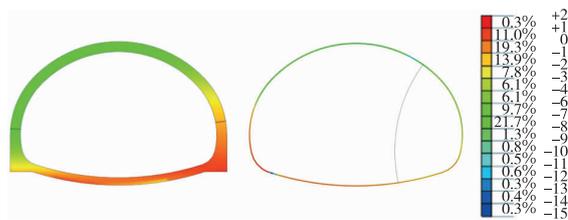


图 9 隧道水平位移(单位: mm)

隧道和回填土抵消,半明半暗工法可较好地控制隧道的水平变形;最大弯矩为 54 kN · m(出现在右侧拱腰位置),最大轴力为 742 kN(出现在右侧拱脚处),最大剪力为 171 kN(出现在右侧拱腰位置),隧道受力以轴力为主。

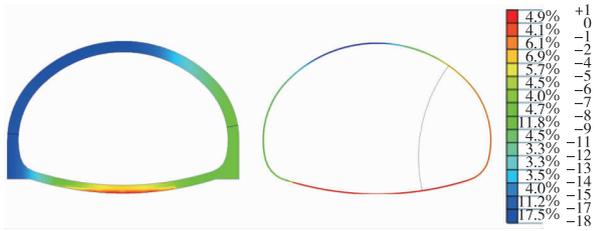


图 10 隧道竖向位移(单位:mm)

表 4 隧道变形 mm

| 位置 | 水平位移 | 竖向位移 |
|--------|------|-------|
| 左侧隧道拱顶 | -4.1 | -12.2 |
| 右侧隧道拱顶 | -6.6 | -13.6 |
| 左侧隧道拱脚 | 0.8 | -6.4 |
| 右侧隧道拱脚 | 0.8 | -5.3 |

表 5 中隔墙水平位移 mm

| 工序号 | 水平位移 | 工序号 | 水平位移 |
|-----|------|-----|------|
| 8 | -0.5 | 10 | -0.8 |
| 9 | -0.5 | 11 | -1.9 |

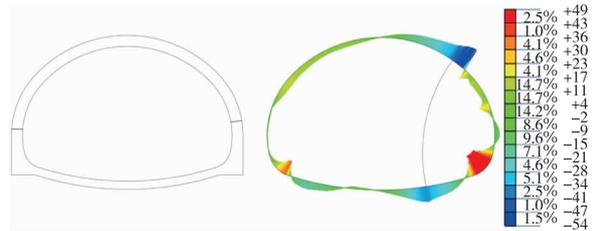


图 11 隧道弯矩(单位:kN·m)

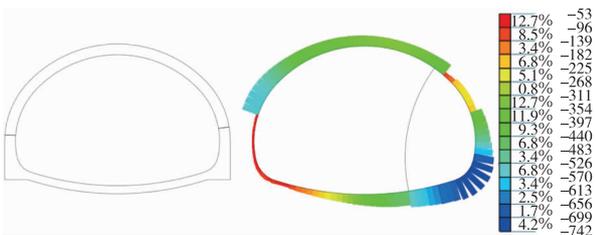


图 12 隧道轴力(单位:kN)

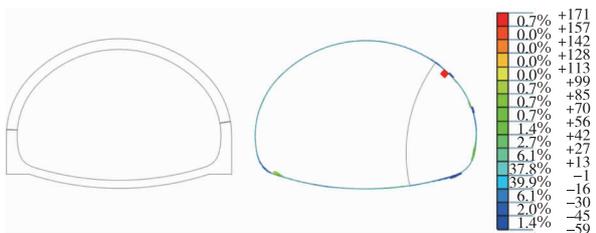


图 13 隧道剪力(单位:kN)

取靠近隧道侧的电塔基础为分析对象,变形分析结果见表 6。半明半暗隧道施工对临近电塔的影响以水平位移为主,施工过程中最大水平、竖向和总

位移分别约 4.7 mm、1.4 mm、4.9 mm,水平位移在可控范围内,半明半暗工法可较好地控制临近建(构)筑物的变形。

表 6 电塔基础变形 mm

| 工序号 | 水平位移 | 竖向位移 | 总位移 |
|-----|------|------|-----|
| 3 | 3.5 | 0.5 | 3.6 |
| 7 | 3.7 | 0.8 | 3.8 |
| 8 | 4.3 | 1.0 | 4.4 |
| 9 | 4.4 | 1.0 | 4.6 |
| 11 | 4.7 | 1.4 | 4.9 |

4 施工注意事项

(1) 右洞开挖遵循“短进尺,多循环,初期支护紧跟掌子面”的原则,采用人工或机械开挖,不得采取爆破工艺;施工中加强对围岩的监控量测,发现围岩变形不收敛或其他异常情况时采取加强措施,保证安全。

(2) 施工过程中如发现边坡不稳,立即采取临时防护措施,并通知参建各方予以解决。

(3) 为探明隧道中可能出现的断层破碎带、突然涌水等不良地质,提前掌握掌子面前方的地质及水文地质情况,施工过程中进行地质超前预报。

(4) 因围岩完整性、风化程度、地下水发育等原因导致坡面难稳定时加喷混凝土,每循环进尺喷一次,掌子面喷 5 cm 厚混凝土封闭。

(5) 隧道开挖后逐段核对地质资料,及时进行初期支护并根据监控量测资料确定二次衬砌施作时间。发现与设计地质资料出入较大时,通知设计单位及时修正支护参数及施工方法。对勘察报告中提及的存在孤石地段,施工时引起重视,必要时采取加强措施。

(6) 建立日常量测管理机制,加强洞内、洞顶、地表的监控量测。隧道开挖后施作初期支护的同时加强对洞室收敛变形、围岩内部变形、地表沉降的监测,发现异常及时汇报监理、设计、业主三方,及时采用补强的支护措施,控制变形。

(7) 隧道施工中严密观测电塔的振动监测点,其报警值应符合电力部门要求。

5 实施效果

现场施工监测数据显示,电塔基础的最大变形为 3.6 mm,隧道中隔墙变形为 2.4 mm。目前隧道

(下转第 149 页)