

浅埋段偏压软弱围岩双连拱隧道施工动态过程研究

张春涛

(安徽省公路桥梁工程有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要:以赣崇(赣州—崇义)高速公路下关村双连拱隧道浅埋段施工为背景,针对浅埋段围岩软弱偏压情况,采用 ANSYS 有限元软件进行二维有限元分析,通过对隧道各开挖阶段的模拟计算,分析浅埋段偏压软弱围岩双连拱隧道开挖中围岩应力、地表变形和衬砌结构内力的变化规律,为实现隧道开挖过程动态控制提供依据。

关键词:隧道;浅埋;偏压软弱围岩;双连拱隧道;开挖阶段;有限元分析

中图分类号:U456.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)05-0143-03

连拱隧道以其线形流畅、占地面积少、空间利用率高、避免洞口路基或大桥分幅、与洞外线路连接方便等优势,被优先应用于各种特殊地质地形区域。但双连拱隧道因其开挖断面跨度增大、高跨比减小使隧道结构受力更复杂,开挖与支护交错进行使结构受力体系转换频繁,围岩应力和衬砌荷载始终处于动态变化过程。尤其是隧道处于浅埋段软弱偏压围岩时,设计不合理或施工过程控制不当会使围岩应力和衬砌荷载转换复杂,导致隧道结构受力处于不利状态、隧道整体稳定性变差、地表变形增大。目前对浅埋、偏压、地质条件复杂等条件下的双连拱隧道的研究多针对施工方法和开挖顺序选择,对隧道开挖过程中围岩应力、地表变形的变化规律及衬砌结构内力研究还有很大欠缺。该文以赣崇(赣州—崇义)高速公路下关村隧道为背景,通过有限元数值计算,分析浅埋段偏压软弱围岩双连拱隧道不同开挖阶段围岩应力状态、地表变形及衬砌结构内力。

1 工程概况

下关村隧道全长 295 m,为整体式连拱直线短隧道。单洞建筑限界净宽 10.25 m、净高 5 m,隧道最浅埋深 12.27 m。单跨采用曲墙式断面,中隔墙为曲墙。隧道区总体围岩较差,为强风化砂岩、中厚层状构造,节理裂隙发育,岩芯破碎呈碎裂结构,岩体完整性、稳定性较差,成洞条件差。隧道进出口洞口浅埋段围岩为 V 级,洞身为残坡积碎石土,结构松散。隧道上部有明显斜坡,隧道处于偏压状态,为典型的浅埋段软弱偏压围岩隧道。

隧道开挖施工步骤:1)中导坑开挖支护及中隔墙施工;2)右洞外侧导洞开挖;3)左洞外侧导洞开

挖及右洞外侧导洞支护;4)右洞核心区域开挖及左洞外侧导洞支护;5)左洞核心区域开挖支护及右洞核心区域支护;6)隧道二次衬砌施工(见图 1)。

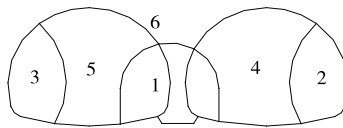


图 1 隧道设计断面与开挖步骤示意图

2 有限元模型

2.1 有限元模型建立

在连拱隧道开挖阶段围岩应力状态会进行多次扰动重分布,使围岩和衬砌结构受力状态始终处于动态变化,采用 ANSYS 有限元软件建立模型模拟连拱隧道不同开挖阶段围岩应力及衬砌结构内力变化。模拟计算基于以下假设:1)围岩均匀、连续,不考虑围岩节理、裂隙、断层等因素,围岩各向为同性材料;2)模型同区域材料性质一致且均匀、连续;3)由于所选研究对象实际为浅埋偏压状态,模拟计算时仅选取围岩的自重应力,不考虑构造应力和动力荷载及地下水对施工的影响;4)围岩和衬砌模型采用 Drucker-Prager 理想弹塑性模型。

根据施工图设计中连拱隧道断面尺寸建立二维有限元模型。该模型沿水平方向隧道两侧距离大于 3 倍洞跨,垂直方向隧道底部距离大于 3 倍洞高,模型顶面为地表(见图 2)。模型网格划分遵循隧道开挖断面周围关键部位网格密、远离隧道开挖断面的非关键部分逐渐稀疏的原则,共划分为 9 752 个单元、9 619 个节点。模型边界条件为底边竖向位移约束,前后左右水平法向约束,顶部为自由边界。

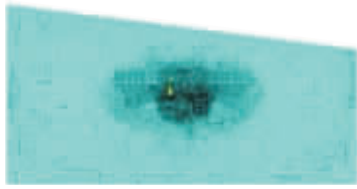


图2 偏压连拱隧道有限元计算模型

2.2 材料物理力学参数选取

ANSYS 程序利用生死单元功能模拟隧道开挖衬砌施工过程,隧道开挖采用 kill(杀死)单元模拟,中隔墙及衬砌结构施工采用 activate(激活)单元模拟。围岩及中隔墙采用实体单元 plane42;隧道衬砌结构采用梁单元 beam4,梁单元厚度为 0.5 m。围岩与衬砌结构物理力学参数取值见表 1。

表1 材料的物理力学参数

材料类型	弹性模量/GPa	泊松比	容重/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
V类围岩	0.6	0.4	1 900	0.12	22
中隔墙	29.5	0.2	2 500	2.42	54
衬砌	29.5	0.2	2 500	2.42	54

3 有限元数值计算结果分析

根据现场实际情况对隧道开挖施工阶段进行模拟,对比分析各开挖阶段围岩应力,分析隧道衬砌结构弯矩、轴力、剪应力变化情况。同时设置地表监测点对各开挖阶段地表沉降和水平位移进行分析。

3.1 围岩应力场分析

通过数值计算,得到隧道各开挖阶段围岩应力分布云图(见图 3)。

由图 3 可知:1) 隧道开挖过程中,围岩应力变化区域主要分布在中隔墙顶、底部,各开挖导洞拱顶、拱脚及两主洞的拱顶、拱脚。虽然在不同开挖阶段围岩应力有所不同,但出现明显变化的区域一般在隧道开挖一侧,对没有开挖的另一侧主洞影响不大。2) 各阶段开挖后,隧道围岩应力产生释放和重分布,围岩应力集中区最大值主要产生在中隔墙顶、底部及各导洞的拱肩和拱脚位置。由于隧道处于偏压状态,在隧道全部断面开挖结束后,应力最大值产生于中隔墙左底角,中隔墙应力以弧形分布,墙体顶部和底部应力大于墙体中部,应力最小值分别产生

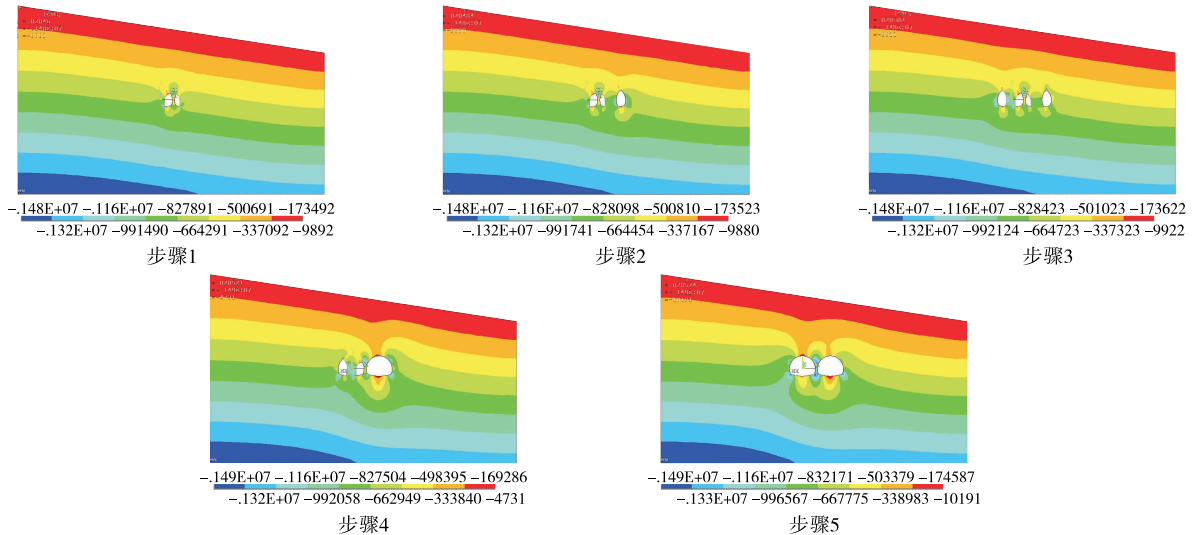


图3 隧道各开挖阶段围岩应力分布云图(单位:Pa)

于左洞的拱顶中心和右洞的拱底中心。3) 随着隧道开挖断面的增大,各阶段围岩应力逐渐增大。各开挖阶段隧道围岩应力最大值见表 2。

表2 隧道各开挖阶段围岩应力最大值

开挖阶段	围岩应力值/MPa	开挖阶段	围岩应力值/MPa
步骤 1	0.991	步骤 4	1.480
步骤 2	1.160	步骤 5	1.490
步骤 3	1.320		

3.2 地表变形分析

针对隧道开挖地表变形的分析,多数只关注地表沉降,而忽略地表水平位移。在遇到严重浅埋偏压段,特别是处于古滑坡体地段、山体横坡较陡峭时,地表沉降和水平位移过大会导致边坡抗滑防护难度增大,且极易造成原山体扰动,诱发滑坡体复活,对隧道造成破坏性的严重后果。图 4 为隧道各开挖阶段地表累计沉降与水平位移。

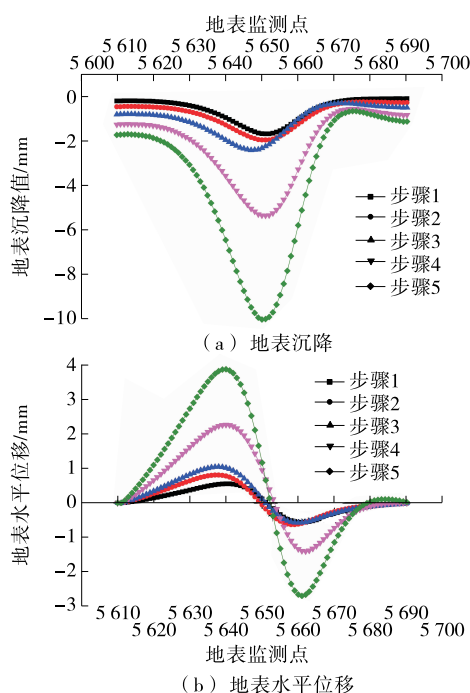


图 4 隧道各开挖阶段地表变形

从图 4 可看出:1) 地层偏压造成地表沉降和地表水平位移不对称,以中隔墙为对称轴,左侧埋深较大处地表沉降和水平位移较大,右侧埋深较浅处较小。在前 3 个开挖阶段,地表沉降和水平位移均较小,而后 2 个开挖阶段出现跳跃式上升,这主要与隧道各阶段开挖断面形状和大小相关。2) 右侧隧道上方有隆起部分,该处边坡高程低于左侧,由于左侧边坡较高,在侧向应力影响下,边坡较低处地表略有上抬。以中隔墙为分界,左侧地表水平位移为正值,右侧为负值,主要是由于地表沉降导致中隔墙左侧地表顺坡向右滑动、右侧地表逆坡向左滑动。地表沉降最大值为 10.04 mm,水平位移最大值为 3.87 mm。在进行步骤 4 和步骤 5 主洞开挖后需及时进行支护,必要时减小导洞开挖断面和改变断面形状,施工中对隧道埋深较浅的隧道上方地表进行填土等以减小偏压的影响,并进行地表加固防止变形过大引发滑坡。

3.3 衬砌结构内力分析

对于浅埋段软弱偏压围岩隧道,由于不同阶段开挖扰动,围岩原始应力平衡状态被破坏而不断发生重分布,导致衬砌结构所受荷载不断转移。确定双连拱隧道在开挖衬砌后衬砌结构内力大小及危险截面对优化隧道衬砌结构和保持隧道的稳定性十分重要。图 5 为衬砌结构内力云图。

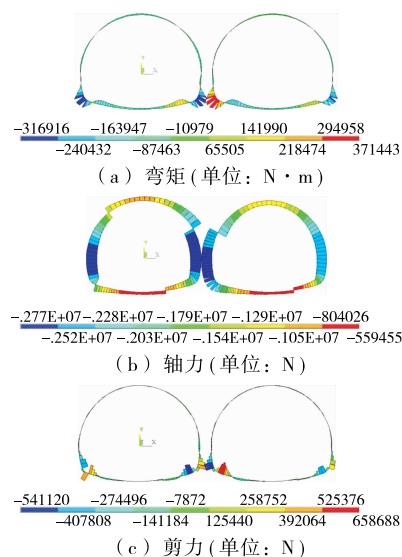


图 5 隧道衬砌结构内力云图

受地层偏压的影响,左右两侧隧道在开挖衬砌后衬砌结构内力存在较大差别。由图 5 可知:1) 弯矩较大值均产生于左右两侧隧道的拱脚位置,其中最大值位于右侧隧道中隔墙底部与衬砌结构相连处,为 371 443 N·m。2) 轴力较大值均产生于左侧隧道拱墙位置和右侧隧道左拱墙位置,轴力最大值为 2.77×10^6 N。3) 剪力较大值均产生于左右两侧隧道的拱脚位置,其中最大值位于右侧隧道中隔墙底部与衬砌结构相连处,为 658 688 N。

4 结论

通过对浅埋段偏压软弱围岩双连拱隧道进行二维有限元数值模拟,分析不同开挖阶段围岩的应力状态、地表变形及隧道衬砌结构内力,结论如下:

(1) 隧道开挖过程中,围岩应力在不同开挖阶段会产生不同变化,但出现明显变化的区域一般在隧道开挖一侧,对没有开挖的另一侧主洞影响不大;围岩应力集中区最大值主要产生在中隔墙顶、底部及各导洞的拱肩和拱脚位置,中隔墙应力以弧形分布,墙体顶部和底部应力大于墙体中部;随着隧道开挖断面的增大,各阶段围岩应力逐渐增大。

(2) 地层偏压造成地表沉降和水平位移的不对称,以中隔墙为对称轴,左侧埋深较大处地表变形大于右侧埋深较浅处,地表变形大小主要与隧道各阶段开挖断面形状和大小相关。

(3) 受地层偏压的影响,左右两侧隧道在开挖衬砌后衬砌结构内力存在较大差别,衬砌危险截面

(下转第 152 页)

改造为城市道路的费用和收费站迁建费用。

4.3.1 改造为城市道路的费用

根据文献[7]规划的衔接路网,两项目改造为城市道路仅需破除原高速公路两侧护栏、拆除中央分隔带、安装两侧路灯,不需进行路面改造。参考同类项目建设期投资情况,结合项目改造特点,按500万元/km计,改造A高速公路城区段约17 km需投资8 500万元,改造B高速公路城区段约7 km需投资3 500万元,合计12 000万元。

4.3.2 收费站迁建费用

要实施置换,A高速公路需拆除苏家桥收费站并扩容改造樺木收费站,B高速公路需拆除白马收费站并新建城区南收费站。

(1) A高速公路新增收费站建设费用。A高速公路扩容改造樺木收费站按“8进8出”人工收费车道标准考虑,依据文献[6],新建12车道城区南收费站需投资5 750万元,按照车道数投资比例估算A高速公路16车道收费站建设成本,即 $5\,750 \times 16/12 = 7\,667$ 万元。由于苏家桥收费规模较小,拆除费用较低,暂不计其拆除费用。

(2) B高速公路迁建收费站投资费用。新建城区南收费站的建设投资取文献[6]中的投资估算5 750万元。由于白马收费规模较小,拆除费用较低,暂不计其拆除费用。

综上,置换建设投资约25 417万元,其中置换A高速公路需投资约16 167万元,置换B高速公路需投资9 250万元。

4.3.3 置换的经济成本

如表4所示,置换A高速公路城区段的投资额约39 593万元,置换B高速公路城区段的投资额约45 223万元,共计约84 816万元。

5 结语

A、B高速公路属于国家高速公路网,置换国家高速公路为城市道路尚无先例,根据现有政策,按照

表4 置换A、B高速公路建设投资总成本 万元

项目	补偿剩余经营 收费期损失	置换改造 建设投资	合计
置换A高速公路城区段	23 426	16 167	39 593
置换B高速公路城区段	35 973	9 250	45 223
合计	59 399	25 417	84 816

“谁主导谁审批”的原则,置换国道需报交通运输部审批,为简化审批程序,建议地方政府进一步加强与上级有关部门的沟通、协调。

随着经济和城镇的快速发展,高速公路线形走向由绕城变为穿城现象越来越多,由此引起的问题(交通拥堵、土地开发、交通组织优化受限、交通安全等)也越来越多。该文仅从技术层面分析解决问题方式的可行性,主要基于现阶段所收集的相关基础资料进行成本分析,方法可借鉴,估算出的成本仅供决策参考。

参考文献:

- [1] JTJ D20—2006,公路路线设计规范[S].
- [2] 国务院令(2004)第417号,中华人民共和国收费公路管理实施条例[S].
- [3] 国家发展改革委,建设部.建设项目经济评价方法与参数[M].第三版.北京:中国计划出版社,2006.
- [4] 四川公路工程咨询监理公司.A、B高速公路城区段改造为城市主干道经济可行性分析报告[R].成都:四川公路工程咨询监理公司,2017.
- [5] 某市交通运输局.某市交通运输局玉王庙收费站运营成本测算表[R].某市交通运输局,2015.
- [6] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院.城区南收费站改建工程[R].成都:四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院,2015.
- [7] 四川省城乡规划设计研究院.某市市域城镇体系规划和城市总体规划(2014—2030年)[R].成都:四川省城乡规划设计研究院,2016.

收稿日期:2018—01—04

(上接第145页)

主要位于埋深较浅的右侧隧道拱脚与中隔墙底部相连的位置。

参考文献:

- [1] 姚振凯,黄运平,彭立敏.公路连拱隧道工程技术[M].北京:人民交通出版社,2006.

- [2] 高峰,薛佃立.大跨偏压软弱围岩双连拱隧道施工过程研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2014,33(2).
- [3] 季毛伟,吴顺川,高永涛,等.双连拱隧道施工监测及数值模拟研究[J].岩土力学,2011,32(12).
- [4] 聂善文,张端良,樊帅,等.非对称连拱隧道不同开挖方案的比较分析[J].矿冶工程,2012,32(5).

收稿日期:2018—03—21