

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.007

浅埋隧道复杂交叉口变形的数值分析

黄乐, 万文, 党超

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 以重庆轨道交通六号线曹家湾站为工程依托, 基于岩体非线性弹塑性理论, 对浅埋隧道施工通道交叉段进行数值分析及力学特性研究。运用有限差分数值软件FLAC3D建立了浅埋隧道复杂交叉段的三维模型, 研究了隧道交叉口3个不同截面的拱顶沉降和围岩收敛, 以及初期支护钢筋的内力变化特征, 并与现场监控量测数据变化情况进行对比分析。研究表明: 主、支通道交叉区域段受力存在相互影响; 3个截面的拱顶、内空位移均有明显变化; 在交叉隧道拱顶、拱肩区域, 初支钢筋受应力影响较大。

关键词: 浅埋隧道; 交叉口; 数值分析; 现场监测

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)01-0028-05

Numerical Analysis of Complex Intersections Deformation of Shallow Tunnel

Huang Le, Wan Wen, Dang Chao

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Based on the rock nonlinear elastic-plastic theory and with the Caojiawan station of Chongqing Rail Transit line 6 as an engineering case, makes numerical analysis and mechanical properties study on the channel cross section of shallow tunnel. Establishes a three-dimensional model of the complicated cross section of shallow tunnel by the finite element numerical software FLAC3D, studies the vault sedimentation and surrounding rock convergence of three different sections of the tunnel crossing as well as the variable characteristics of internal force of primary support steel, and compares with the data from field monitoring and measuring. The results show that the interrelationship exists in main channel cross section and secondary channel cross section; the vault and vacancy shift of three sections obviously changes; the initial branch bars are subjected to stress influences in the cross tunnel vault and arch area.

Keywords: shallow tunnel; intersection; numerical analysis; field monitoring

0 引言

目前, 国内外学者对隧道施工中围岩力学特性的研究已取得了较多成果^[1-8]: Marc Panet^[1]通过引入释放系数, 对模拟开挖引起的弹性介质围岩的应力变化进行了研究; R. B. Peck^[2]研究了隧道开挖面

推进过程中围岩的力学响应, 提出隧道横断面上地层的位移呈正态分布曲线模式; K. Najm 等人^[3]应用消极抵抗方法, 对隧道施工中围岩的变形情况进行了分析; 申艳军等人^[4]基于 Hoek-Brown 准则, 研究了开挖扰动引起的围岩变形特性; 杨小军^[5]以海印隧道为例, 分析了施工过程中, 围岩变形与施工时

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174088)

作者简介: 黄乐(1986-), 男, 陕西蒲城人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土工程,

E-mail: 342230839@qq.com

间及开挖面之间的变化关系; 吉小明^[6]分析了隧道开挖损伤扰动带的范围及力学特征。但在隧道施工中, 对交叉隧道围岩的研究较少, 还不成熟, 对浅埋隧道交叉段的研究更少。

浅埋隧道交叉段的结构受力比较复杂, 给施工和监测带来很大困难。因此, 本文拟针对特定的3个不同截面, 分析隧道开挖过程中交叉口围岩的力学特性, 以期为以后同类浅埋隧道的设计与施工提供有益的基础性资料。

1 隧道交叉段三维有限模型

1.1 岩体的力学模型

由于岩体力学具有不确定性和复杂性, 而力学模型能客观反映多变和不确定性的岩体力学本质。因此, 本文基于弹塑性理论模型, 采用 Drucker 公设进行计算分析。Drucker-Prager 应力模型由剪切应力 τ 和法向应力 σ 两个应力分量表示:

$$\begin{cases} \tau = \sqrt{J_2}; \\ \sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, J_2 为偏应力张量第二不变量, 可表示为

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2] + \sigma_{12}^2 \quad (2)$$

与剪切应力 τ 和法向应力 σ 有关的剪应变增量 $\Delta\gamma$ 和体积应变增量 Δe 可表示为:

$$\begin{cases} \Delta\gamma = 2\sqrt{\Delta J_2}, \\ \Delta e = \frac{1}{3}(\Delta e_{11} + \Delta e_{22} + \Delta e_{33}) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, ΔJ_2 为偏应变张量增量, 可表示为

$$\Delta J_2 = \frac{1}{6}[(\Delta e_{11} - \Delta e_{22})^2 + (\Delta e_{22} - \Delta e_{33})^2 + (\Delta e_{11} - \Delta e_{33})^2] + \Delta e_{12}^2 \quad (4)$$

应变增量可分解为:

$$\begin{cases} \Delta\gamma = \Delta\gamma_e + \Delta\gamma_p; \\ \Delta e = \Delta e_e + \Delta e_p \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中的下标 e 和 p 分别表示弹性和塑性部分, 且塑性分量仅在塑性流动阶段不为零。对于弹性部分, 由胡克定律, 可得其应力应变关系为^[9]:

$$\begin{cases} \Delta\tau = G\Delta\gamma_e; \\ \Delta\sigma = K\Delta e_e \end{cases} \quad (6)$$

式中: G 为剪切模量;

K 为体积模量。

围岩受力的变形主要由岩石母体的线弹性应变和微裂隙引起的非弹性应变组成, 有

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^m \quad (7)$$

式中: $d\varepsilon_{ij}$ 为围岩受力过程中的变形;

$d\varepsilon_{ij}^e$ 为岩石母体的变形;

$d\varepsilon_{ij}^m$ 为微裂纹的变形。

至于围岩受力状态下岩石母体和微裂纹的变形理论, 可参考文献[10], 笔者在此不予讨论。

1.2 交叉段有限元计算模型

1) 模型的建立

本文的研究对象为曹家湾站施工通道交叉段, 地层上覆第四系残积层, 以粉质黏土为主; 下伏侏罗系中统上沙溪庙组沉积岩, 主要为砂质泥岩, 围岩级别IV~V级。主通道设计起讫里程为AK0+000~AK0+271.609, 支通道起讫里程为BK0+000~BK0+089.281; 主、支通道标准段净宽6.00 m, 高5.50 m, 交叉口加强段净宽9.15 m, 高7.20 m, 最小埋深13.22 m, 整体呈C形结构, 属于暗挖法施工的直墙型浅埋隧道。

采用FLAC3D软件模拟分析暗挖隧道施工中交叉口围岩的变形特性, 数值分析范围取隧道交叉口的3倍洞径, 基本满足计算分析要求。隧道初期支护结构采用壳体结构单元(shell)进行模拟。壳体结构单元的力学性质主要包括壳体材料自身的结构响应和壳体与岩土介质的相互效应2个方面。壳体结构单元被认为是一个在3个节点上具有统一厚度的三角形, 其特点是任意弯曲成的壳体结构可用具有多个小块的平面来模拟, 每个壳体单元可视为各向同性或各向异性的线弹性材料, 且没有破坏极限。为了考虑每个壳体单元在网格中不同的相互作用方式, 采用分配到SEL中的有限单元来控制壳体结构的响应^[11]。壳体结构单元SEL拥有质量密度 ρ , 各向同性材料参数杨氏模量 E 和泊松比 ν 或各向异性材料参数 \overline{e}_{11} , \overline{e}_{12} , \overline{e}_{22} , \overline{e}_{33} , 热膨胀系数 α_t 以及材料厚度 t 4个参数。计算模型如图1所示。

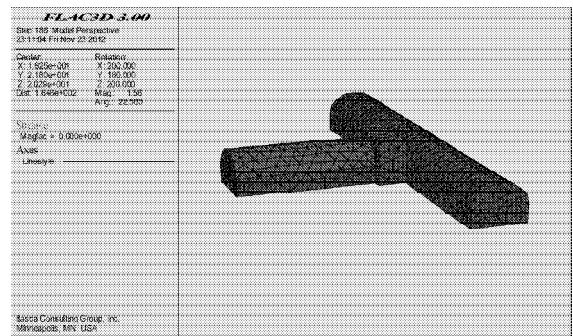


图1 隧道交叉口结构模型

Fig. 1 Tunnel crossing structure model

2) 参数的计算

结合本工程地质勘察报告, 可得如表 1 所示的相关计算参数。

表 1 地质参数取值

Table 1 Geological parameter selection

岩土名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / MP	泊松比 μ	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$
砂质泥岩	25.7	1 100	0.37	600	32
砂岩	24.9	3 970	0.11	1 890	42
粉质粘土	20.0	17	0.23	20	12
初支	22.0	30 000	0.20	-	-

2 计算结果分析

针对隧道交叉段 3 个特定截面分别取 3 个测点, 对拱顶点 A_1, B_1, C_1 及收敛线 A_2A_3, B_2B_3, C_2C_3 的变化情况进行比较, 分析交叉段围岩对初支钢筋应力影响范围及程度, 总结洞内变形与围岩应力之间的关系。图 2 为隧道交叉段 3 个特定截面测点布置。

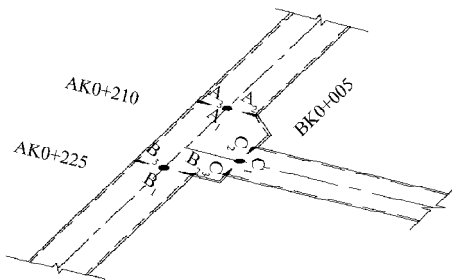


图 2 不同特定截面测点布置

Fig. 2 The layout of measuring points for different specific sections

2.1 洞内拱顶沉降对比分析

图 3 所示为围岩拱顶沉降数值模拟结果分析图, 它反映了 3 个断面拱顶点 A_1, B_1, C_1 的变化规律。

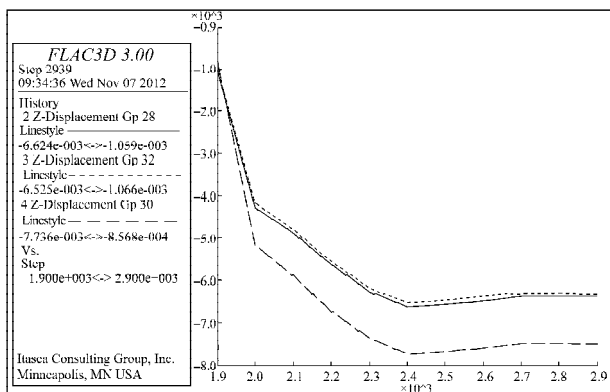


图 3 围岩拱顶沉降数值模拟结果分析图

Fig. 3 The numerical simulated results of vault settlement

由图 3 可以看出, 随着隧道开挖的进行, 3 个断面的拱顶都发生了较大的沉降; 相比之下, 支通道

C_1 的沉降量比主通道 A_1 和 B_1 的变化更为明显, 而 A_1 和 B_1 的沉降量相差不大。可见, 交叉隧道最大的拱顶沉降点位于隧道相交的不规则截面上, 其沉降值大于其余规则部分, 而主通道截面之间的拱顶沉降影响不大。其原因在于支通道的开挖使得主通道的围岩应力重新分布, 交叉区域围岩拱顶的位移变化以支通道径向移动为主。

2.2 围岩净空收敛对比分析

图 4 所示为围岩净空收敛数值模拟结果分析图, 它反映了 3 个断面围岩水平收敛情况。

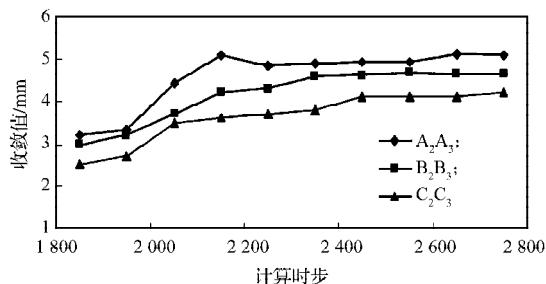


图 4 围岩净空收敛数值模拟结果分析图

Fig. 4 The numerical simulated results of surrounding rock convergence

从图 4 可看出, A_2A_3, B_2B_3, C_2C_3 水平距离逐渐增大, 且 A_2A_3 和 B_2B_3 累计增加值大于 C_2C_3 , 而 A_2A_3 和 B_2B_3 相对变化不大。这说明主、支通道间围岩相互影响, 水平位移均呈扩张趋势; 主通道围岩收敛在内空位移变化量较大的部位。其变形原因可能是支通道开挖使得围岩应力突然释放, 整个交叉环口变成单轴受力, 无塑性区在受到单向轴力和主通道拱形围岩压力的作用下, 主通道拱顶和交叉口拱顶区域受侧向应力降低, 向支通道方向发生形变^[12]。

2.3 交叉段围岩应力分析

图 5 和 6 分别为数据模拟所得主通道围岩和支通道围岩的应力云图, 它们反映了隧道交叉段围岩的应力特征。

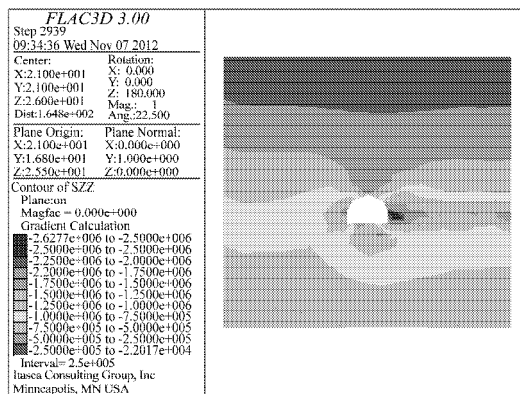


图 5 主通道围岩应力云图

Fig. 5 The stress nephogram of main channel surrounding rock

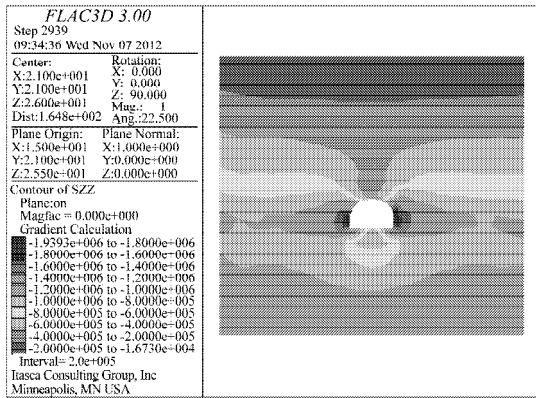


图 6 支通道围岩应力云图

Fig. 6 The stress nephogram of branch channel surrounding rock

从图 5 和 6 所示应力云图中可以看出, 主通道拱顶到直墙顶部区域受压, 直墙下半部分和底部出现压应力集中的现象; 而对于支通道, 几乎整个隧道围岩均处于受压状态, 其中交叉截面拱顶和拱肩部位围岩受压应力影响最大。这与上述所得结论对应, 也正好解释了洞内围岩的变形情况。

3 现场监测对比分析

监控量测能够有效、直接地反映隧道施工效果, 本研究主要对工程施工通道交叉段围岩内空收敛和拱顶沉降进行监测。图 7 和 8 为 3 个特定断面的内空收敛变化曲线图, 其中, 正值表示扩张或上升, 负值是收缩或沉降。

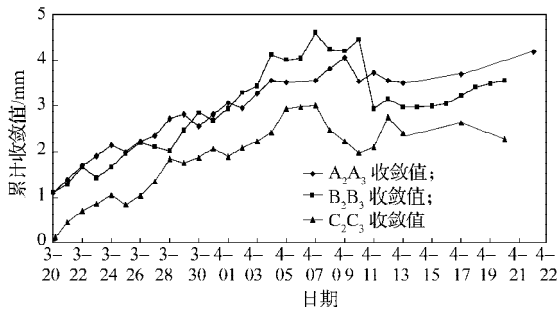


图 7 交叉段不同断面内空收敛曲线

Fig. 7 The vacancy convergence curve for different sections of cross section

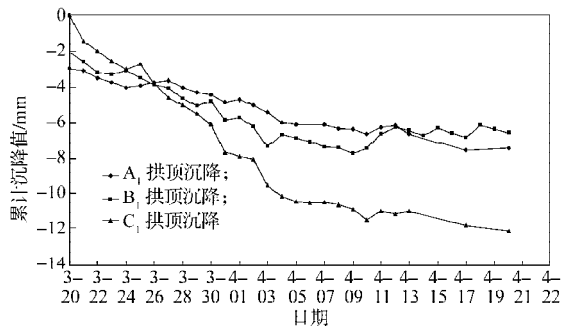


图 8 交叉段不同断面拱顶下沉曲线

Fig. 8 The vault settlement curve for different sections of cross section

通过对图 7 和 8 所示监测曲线及监测数据进行分析, 可得出以下结论:

1) 在隧道开挖初期, 隧道拱顶下沉与围岩收敛变化明显, 且变化速率较快; 随着时间的推移, 洞内围岩变化量逐渐减小, 最终趋于稳定。这是由于隧道开挖后, 应力得到了释放, 从而破坏了原有结构的平衡; 随着支护逐渐发挥作用, 应力得到了重新分布, 使得围岩受力再次趋于平衡。

2) 隧道拱顶均显现沉降变化, 支通道 C_1 为最大变化测点, 累计沉降值达 12 mm; 主通道 A_1 和 B_1 的沉降变化较小, 累计位移分别为 7.4 mm 和 6.5 mm。这一结果说明, 隧道交叉段拱顶围岩出现受压应力; 沉降变化最大的部位在隧道相交的截面上, 这与模拟分析所得结论一致。

3) 隧道交叉段 3 个断面的围岩位移变化都呈现出扩张状态, 最大日变化量达 1.53 mm/d。可见, 在初期支护作用下, 交叉口拱腰两侧出现受拉应力, 受力方向背向洞径。

4) 基于弹塑性理论的应力增量 $d\sigma$ 和应变增量 $d\varepsilon$ 之间的关系为 $d\sigma = E_0 d\varepsilon$, 对监测数据和模拟围岩应力进行比较, 可知现场监测的围岩变化量大于计算应力引起的应变, 且两者之间的变化规律相一致。具体计算方法可参考文献[12]。

5) 监测数据与模拟数据相比, 洞内变形的实测数据要大于模拟数据。这可能是由以下 2 个方面的原因造成的: 一方面, 由于岩体力学性质的不确定性和复杂性, 造成了对岩体的非均匀性、非线性、非连续性认识不全面; 另一方面, 计算软件具有局限性, 模拟分析时没有考虑隧道自身因素 (如地质断层、节理、围岩级别等) 引起的变形, 也没考虑外界因素 (如施工、爆破等) 造成的影响。

4 结论

隧道交叉口围岩受力比较复杂, 是工程施工中的一个难点, 受施工环境和经济条件的限制, 要精确地对围岩进行监测也是一大考验。本文通过对施工通道交叉段进行模拟分析, 并将模拟结果与实测数据对比, 可知:

1) 相比一般单端面隧道开挖, 隧道交叉口开挖时, 洞室周边围岩变形显著增大, 施工单位更应选择合理的施工方法, 并及时加强支护。

2) 隧道交叉口开挖时, 会在两个断面相接触所形成的交叉线上产生相对较大的应力集中, 此处围岩的承载力较低, 且相比单断面隧道, 在开挖后达到二次应力平衡状态的时间更长, 针对此变形敏感

区域,施工过程中若不周密考虑,不及时封闭,轻则发生掉块,重则引起小范围内的塌方,因此,在施工过程中,施作单位务必要高度重视,制定详细的施工方案,并及早有序作业。

参考文献:

- [1] Marc Panet. Rock Mass Reinforcement by Passive Anchors [G]. International Conference on Anchoring & Grouting towards the New Century, 1999: 6-12.
- [2] Peck R B. Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground [C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: Thomas Telford, 1969: 225-290.
- [3] Najm K, Ishijima Y. Back Analysis of Tunnel Lining Deformation: Development and Application of Passive Resistance Method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(2): 71-79.
- [4] 申艳军,徐光攀,张璐,等.基于Hoek-Brown准则的开挖扰动引起围岩变形特性研究[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1355-1362.
Shen Yanjun, Xu Guangpan, Zhang Lu, et al. Research on Characteristics of Rock Deformation Caused by Excavation Disturbance Based on Hoek-Brown Criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1355-1362.
- [5] 杨小军.铁路隧道围岩变形特征及稳定性判据研究:以海印隧道为例[D].西安:长安大学, 2010.
Yang Xiaojun. On Study of the Deformation Characteristics and Stability of the Railway Tunnel Surrounding Rock: Taking Hai Yin Tunnel as Example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [6] 吉小明.隧道开挖的围岩损伤扰动带分析[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1697-1702.
Ji Xiaoming. Study on Mechanical and Hydraulic Behavior of Tunnel Surrounding Rock Masses in Excavation-Disturbed Zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1697-1702.
- [7] 谢韬.张集铁路旧堡隧道复杂地质段施工方法[J].山西建筑, 2012, 38(3): 198-199.
Xie Tao. On Construction of Jiubao Tunnel at Sections with Complicated Geology along Zhangjiakou-Jining Railway[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(3): 198-199.
- [8] 齐万鹏,张德华,严竞雄,等.软弱千枚岩地层围岩亚分级及支护方式研究[J].中国工程科学, 2012, 14(1): 98-104.
Qi Wanpeng, Zhang Dehua, Yan Jingxiong, et al. Research on Supporting Methods and Sub-Classification of Complex Phyllite Rock Layer in Baojiashan Tunnel[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(1): 98-104.
- [9] 刘波,韩彦辉.FLAC原理实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社, 2005: 21-25.
Liu Bo, Han Yanhui. FLAC Principle Examples and Application Guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 21-25.
- [10] 周小平,张永兴.卸荷岩体本构理论及其应用[M].北京:科学出版社, 2007: 12-22.
Zhou Xiaoping, Zhang Yongxing. Unloading Rock Mass Constitutive Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2007: 12-22.
- [11] 彭文斌.FLAC3D实用教程[M].北京:机械工业出版社, 2008: 191-196.
Peng Wenbin. The Practical FLAC3D[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 191-196.
- [12] 王先义,彭波,吴文忠.大跨径地铁车站交叉口数值模拟[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2012, 31(3): 389-393.
Wang Xianyi, Peng Bo, Wu Wenzhong. Numerical Analysis of Intersection of Long-Span Subway Station[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(3): 389-393.

(责任编辑:廖友媛)