

文章编号:1671-6833(2011)02-0066-05

黄土地铁三连拱隧道中隔墙受力体系转换研究

郑甲佳¹, 范俊玲²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团 西商分公司, 陕西 西安 710500)

摘 要: 选择西安地铁二号线草场坡—小寨区间三连拱隧道, 借助有限元软件 Ansys11.0 模拟其施工过程, 同时结合现场监测数据, 对黄土地铁三连拱隧道中隔墙的受力变化及分布进行研究。分析结果表明: 中隔墙受力大小变化突出的阶段主要集中在侧洞开挖到侧洞二衬施工之间; 受力分布变化主要集中在侧洞上台阶开挖, 侧洞仰拱二衬施工, 中洞开挖和中洞二衬施工四个阶段。施工过程中, 中隔墙的受力变化相对稳定, 受力也控制在相对安全的范围内, 认为双洞法+台阶法施工可以在黄土地铁三连拱隧道的施工中推广使用。

关键词: 隧道工程; 黄土地铁; 三连拱隧道; 数值模拟; 现场监测; 受力体系转换

中图分类号: U451.4 **文献标志码:** A

0 引言

连拱隧道由于其低成本、高空间利用率、自然环保等特有的优势, 随着实践的积累、理论的发展和计算手段的提高, 已日益受到国内外工程师的重视和应用。为了适应地形地质情况, 同时满足列车可以在不同位置实现同时发车的目的, 在西安地铁区间隧道的部分位置采用三连拱隧道设计方案^[1]。

早期连拱隧道的设计完全是凭经验进行的, 直到十九世纪初才逐渐形成一些计算理论用以指导设计施工。日本在连拱隧道建设和科学研究中积累了大量经验和研究成果, 在国际上处于领先地位。相比之下, 我国在这方面起步较晚, 从20世纪90年代开始采用连拱隧道方案, 但到目前为止已建和在建的总数却位居世界之首^[2]。

目前国内外在连拱隧道的现场施工监测、施工方法和施工工序、施工时空效应、施工拱效应、施工动力空间效应^[3-5]等方面进行了大量有益的研究, 但是国内对于黄土地区浅埋暗挖三连拱地铁隧道结构体系受力特征的研究不多, 因此对其施工过程中力学行为进行系统研究有十分重要的现实意义。

1 依托工程概况

西安地铁二号线草场坡—小寨区间起点里程为YDK16+459.796, 终点里程YDK17+356.144, 隧道总长度896.348 m, 围岩等级为V级^[6]。

测试断面为F型断面, 结构形式为三连拱结构, 三连拱段长14 m, 跨度19.7 m。结构采用复合式多跨连拱衬砌+中隔墙+锚杆结构衬砌^[7](如图1所示)。

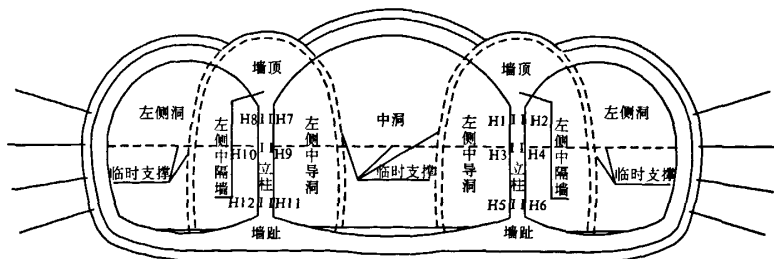


图1 三连拱地铁隧道结构图

Fig.1 Structure drawing of three-arch tunnel

收稿日期:2010-10-24;修订日期:2010-11-16

基金项目:西安市地铁办资助项目(D2-YJ-022008204)

作者简介:郑甲佳(1984-),男,河南新野人,长安大学博士研究生,主要研究方向为隧道及地下工程结构等。

初期支护由格栅、拱架、钢筋网、C25 混凝土及砂浆锚杆组成,二衬由防水钢筋混凝土、左右线中隔墙组成,超前预加固采用 108 大管棚配合注浆小导管。

三连拱地铁隧道采用双洞法+台阶法相结合的施工方法,严格按照“管(杆)超前、少扰动、短进尺、强支护、留核心、勤量测、早封闭”的施工原则进行施工。具体施工步骤见表 1^[8]。

表 1 三连拱地铁隧道施工工序表

Tab. 1 Construction schedule of three-arch tunnel

| 施工步骤 | 施工工序说明 |
|------|--|
| 1 | ① 断面开挖前,沿隧道外轮廓线打设 $\phi 108$ 大管棚超前支护;② 中导洞分上下台阶开挖;③ 中导洞临时支护;④ 施作中隔墙钢筋混凝土、加临时支撑 |
| 2 | ① 左、右侧洞上台阶开挖(留核心土);② 左、右侧洞上台阶初期支护(包括临时仰拱) |
| 3 | ① 左、右侧洞下台阶开挖;② 左、右侧洞下台阶初期支护 |
| 4 | 左、右侧洞隧道仰拱二次衬砌及底板回填层施工 |
| 5 | 左、右侧洞隧道拱墙二次衬砌施工 |
| 6 | ① 中洞上台阶开挖(留核心土);② 中洞上台阶初期支护;③ 中洞临时支护 |
| 7 | ① 中洞下台阶开挖;② 中洞下台阶初期支护 |
| 8 | ① 中洞隧道仰拱二次衬砌及底板回填层施工;② 中洞隧道拱墙二次衬砌施工 |

2 数值模拟分析

2.1 有限元计算模型

根据隧道围岩的工程地质条件与力学特性,采用平面弹塑性有限元法进行模拟计算,计算中采用 D-P 屈服准则。模型边界的计算范围为水平方向洞室两边各取 40 m,竖直方向仰拱以下取 30 m,拱顶以上取至原地面线,模型埋深 10 m。

有限元计算采用隧道与地层共同作用的受力模式,将不同地层的土体视为均质介质,围岩和支护都采用平面等参单元模拟,砂浆锚杆采用杆单元模拟,长度为 2.5 m,换算直径 8 cm;初期支护采用梁单元模拟,厚度 30 cm;超前支护厚度 30 cm、二次衬砌厚度 50 cm 和围岩采用平面单位模拟。模型共划分为 4 763 个单元,4 540 个节点。

数值模拟的施工步骤参考现场施工步骤分为 19 步:①自重应力计算;②右侧中导洞上台阶开挖;③右侧中导洞下台阶开挖;④右侧中隔墙施工;⑤左侧中导洞上台阶开挖;⑥左侧中导洞下台阶开挖;⑦左侧中隔墙施工;⑧右侧洞上台阶开挖;⑨左侧洞上台阶开挖;⑩右侧洞下台阶开挖;⑪左侧洞下台阶开挖;⑫右侧洞仰拱二衬施工;⑬左侧洞仰拱二衬施工;⑭右侧洞拱墙二衬施工;⑮左侧洞拱墙二衬施工;⑯中洞上台阶开挖;⑰中洞下台阶开挖;⑱中洞仰拱二衬施工;⑲中洞拱墙二衬施工。围岩及支护结构参数见表 2^[7]。

2.2 有限元计算结果及分析

2.2.1 中隔墙施工

数值模拟中隔墙施工后计算云图如图 2 所示。可以看出,右侧中隔墙基本受压,随着左侧中

导洞的开挖,最大压应力由立柱底部转移至底部左侧,随着左侧中隔墙的施工,最大压应力又从立柱底部左侧转移到右侧;拉力主要分布在墙顶部位,且随着施工的进展,拉应力的分布和数值均有所减小。

左侧中隔墙的受力状态类似于右侧中隔墙刚施工完成后的受力状态。

表 2 围岩及支护结构参数

Tab. 2 Parameters of surrounding rock and support structure

| 类别 | 重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ 泊松比 | 黏聚力/ MPa | 内摩擦 角/($^{\circ}$) |
|------|--|--------------|-------------|-------------------------|
| 围岩 | 19.0 | 0.6 | 0.30 | 30 |
| 超前支护 | 22.0 | 3.2 | 0.32 | 0.50 |
| 初期支护 | 25.0 | 30.0 | 0.20 | 2.42 |
| 二次衬砌 | 26.0 | 32.0 | 0.20 | 3.00 |
| 砂浆锚杆 | 52.3 | 100.0 | 0.25 | — |



图 2 数值模拟中隔墙施工后计算云图

Fig. 2 Calculation nephogram after midboard construction

2.2.2 侧洞开挖

侧洞开挖后计算云图如图 3 所示。可以看出,右侧中隔墙在右侧洞上台阶开挖后,最大压应力位于立柱底部右侧;最大拉应力位于立柱底部左

侧;右侧洞下台阶开挖后,在中隔墙右侧墙趾处出现部分拉应力;而左侧洞的开挖对右侧中隔墙的影响不大。

左侧中隔墙在右侧洞上台阶开挖后,最大压应力移至立柱底部左侧;最大拉应力位置变化到了立柱与墙顶交界处的左侧;左侧洞上台阶开挖后的情况类似于右侧中隔墙在右侧洞上台阶开挖后的情况;左右两侧洞的下台阶开挖对左侧中隔墙的影响不大。

由于侧洞上台阶开挖作了临时仰拱,因此在立柱的中部出现了应力集中的现象。



图3 数值模拟侧洞开挖后计算云图

Fig.3 Calculation nephogram after side-cave excavation

2.2.3 侧洞二衬施工

侧洞二衬施工后如图4所示。可以看出,右侧洞仰拱二衬施工使右侧中隔墙压应力主要集中在

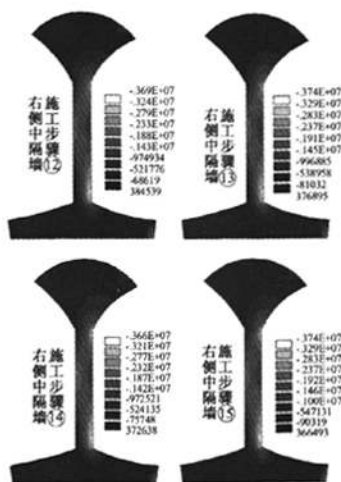


图4 数值模拟侧洞二衬施工后计算云图

Fig.4 Calculation nephogram after side-cave secondary lining construction

立柱部位,最大压应力出现在立柱与墙趾交界的右侧;拉应力分布减少,主要分布在墙顶和墙趾的四角上;右侧洞拱墙二衬施工和左侧洞二衬施工对右侧中隔墙的影响不大。

左侧中隔墙的受力情况与右侧中隔墙类似。

2.2.4 中洞开挖和二衬施工

中洞开挖后,右侧中隔墙的最大压应力不是集中分布在立柱底部,而是沿竖向均匀分布在立柱的整个右侧,分布面积扩大,墙顶的拉应力消失,最大拉应力出现在中隔墙左侧墙趾靠近中洞的位置;二衬施工后,最大压应力转移到立柱左侧沿竖向分布,面积扩大并且数值也增大,整个立柱承受较大的压应力,拉应力再一次出现在中隔墙的四角。左侧中隔墙的情况与右侧中隔墙类似。

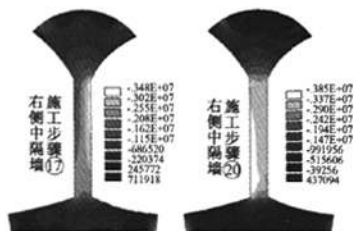


图5 模拟中洞开挖及二衬施工后计算云图

Fig.5 Calculation nephogram after middle-cave excavation and secondary lining construction

各施工阶段的最大压应力值和最大拉应力值分布曲线如图6所示。从最大值变化曲线中可以发现:

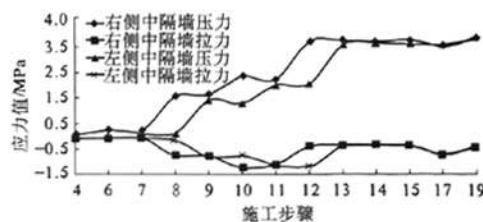


图6 中隔墙最大应力时程曲线

Fig.6 Time-history curve of maximum stress in midboard

(1)最大压应力在整个施工过程中有两次较大的突变,第一次是侧洞上台阶开挖,第二次是侧洞仰拱二衬施工,另外还有一次较小的突变出现在侧洞下台阶开挖;压应力的整体趋势是不断增大的。

(2)最大拉应力在整个施工过程中有3次明显的突变,第一次是侧洞上台阶开挖,拉应力增大,第二次是侧洞下台阶开挖,拉应力增大,第三

次是侧洞仰拱二衬施工,拉应力减小。经过两次突变增大和一次突变减小,在左侧侧洞仰拱施工结束后,拉应力基本恢复到侧洞开挖前的较低水平。

(3)整个施工过程中,压应力最大值在中洞二衬施工后,右侧最大值为3.85 MPa,左侧最大值为3.80 MPa;右侧最大拉应力出现在右侧洞下台阶开挖,为1.24 MPa,左侧最大拉应力出现在右侧洞仰拱二衬施工,为1.18 MPa。

3 现场监测分析

选择区间ZDK17+095断面,作为监测断面埋设监测元件,监测项目包括地表沉降、一衬二衬接触压力和二衬内力。这里仅列出中隔墙立柱部位混凝土应变计监测数据进行分析。元件布置如图1所示,其中H1~H12为布置在中隔墙立柱中的12个混凝土土计测点。测试数据整理如图7所示,从中可以看出:

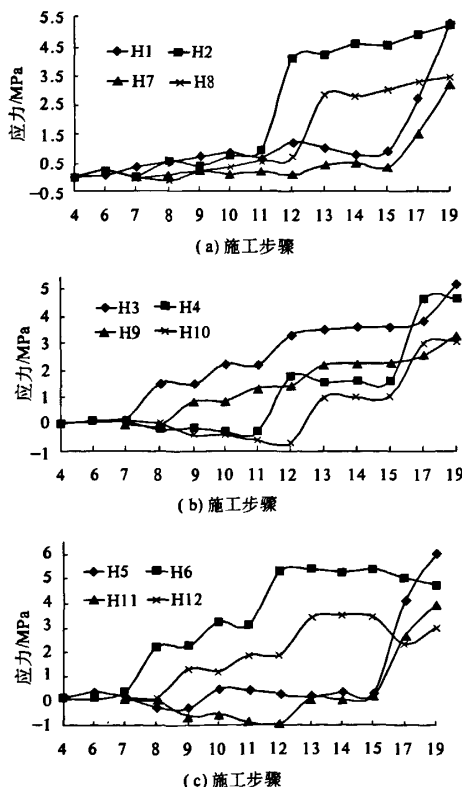


图7 二衬内力时程曲线

Fig.7 Time-history curve of second lining internal force

(1)整体上立柱承受压应力,左侧受力小于右侧,左右两侧在相同位置的测点受力情况相似,

实测结果与数值模拟的结果基本吻合,只是数值上实测值较大。

(2)立柱顶部承受的压应力整体呈上升趋势,4个测点在二衬施作以前受力都较小,但缓慢上升。H1和H7在中洞开挖和中洞二衬施工时,压力突然增大;而H2和H8在侧洞仰拱二衬施工时,压力有较大增长,随后平稳上升。

(3)立柱中部受力变化较大呈现阶段性的特点。H3和H9的压力在侧洞上台阶开挖,侧洞下台阶开挖,侧洞仰拱二衬施工和中洞二衬施工时都有增大的趋势;而H4和H10的压力则有两次较大的增大过程,分别是侧洞仰拱二衬和中洞开挖后,且在侧洞开挖的整个过程中,部分承受拉力。

(4)立柱底部在整个施工过程中是受力最大的部位之一,规律性也比较明显。4个测点的受力情况与立柱中部受力类似,只是数值上立柱底部的增长幅度更大。H5和H11的压力在中洞开挖时突然增大,随着中洞二衬的施工,压力继续增大;而H6和H12的压力在侧洞上台阶开挖,侧洞下台阶开挖,侧洞仰拱二衬施工3个阶段有增大,甚至H12在中洞开挖的时候压力还有所下降。

4 结论

(1)立柱是中隔墙主要的受力部位,其与墙顶和左右墙趾连接的地方容易出现应力集中,因此施工中要严格控制立柱的施工质量以及做好连接处的圆滑过渡。

(2)除了右侧洞上台阶开挖对左侧中隔墙的受力分布有影响以外,其他施工阶段,另一侧的施工对于本侧中隔墙的影响比较小,且左侧中隔墙受力略小于右侧。

(3)施工过程中,中隔墙的受力变化呈现较强的规律性,受力大小变化突出的阶段主要集中在侧洞开挖到侧洞二衬施工之间;受力分布变化主要集中在侧洞上台阶开挖、侧洞仰拱二衬施工、中洞开挖和中洞二衬施工4个阶段。

(4)通过现场监测与数值模拟对比发现,采用双洞法+台阶法相结合的施工过程中,中隔墙的受力变化相对稳定,受力也控制在相对安全的范围内,认为这种方法可以在黄土地铁连拱隧道的施工中推广使用。

参考文献:

- [1] 刘苗. 黄土地区浅埋暗挖三连拱地铁隧道结构受力

- 体系转换及特征研究[D]. 西安:长安大学公路学院, 2010.
- [2] 吴祥松. 高速公路连拱隧道施工时空效应及动态三维反馈分析[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2007.
- [3] 安永林, 彭立敏, 赵丹, 等. 基于不同地表倾角的连拱隧道施工优化分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2007, 28(2): 39-42.
- [4] 周玉宏, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679-683.
- [5] 彭定超, 袁勇, 章勇武. 开挖施工方式对连拱隧道中墙影响的空间分析[J]. 现在隧道技术, 2002, 39(1): 47-52.
- [6] 西安市城市快速轨道交通二号线一期工程详细勘察阶段草场坡一小寨区间岩土工程勘察报告[R]. 西安:中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 2007.
- [7] 西安市地铁二号线铁路北客站至长延堡段草场坡一小寨区间F型隧道结构断面图[Z]. 西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2007.
- [8] 西安市地铁二号线铁路北客站至长延堡段草场坡一小寨区间区间隧道施工工序图(五)[Z]. 西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2007.

Study of Midboard Stress Transformation in Subway Three-arch Tunnel Around Loess Area

ZHENG Jia-jia¹, FAN Jun-ling²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to understand the stress condition of midboard during the construction of subway three-arch tunnel which is constructed by double-cave method plus bench method, based on the Second Subway Line of Xi'an, with the help of large numerical simulation program and field monitoring data, researchers have studied the stress change and distribution of midboard. It is shown that: the prominent phase of stress numerical changes in midboard is concentrate during side-cave excavation and side-cave secondary lining construction, the prominent phase of stress distribution is concentrate in four phase as follows: side-cave upper bench excavation, side-cave invert secondary lining construction, middle-cave excavation and middle-cave secondary lining construction. In a word, the double-cave method plus bench method is suitable in subway multi-arch tunnel, which deserves to be popularized in loess area.

Key words: tunnel engineering; loess subway; three-arch tunnel; numerical simulation; field monitoring; stress transformation.