

文章编号: 1674-599X(2021)03-0050-08

## 偏压连拱隧道非对称中隔墙施工力学特性研究

刘昶<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 邓小钊<sup>2</sup>, 张艺<sup>1</sup>, 张妞<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙拓正交通科技有限公司, 湖南 长沙 410008)

**摘 要:**为研究偏压连拱隧道非对称中隔墙的施工力学特性,以湖南省安慈高速樟树垭连拱隧道为依托,采用Midas GTS NX有限元软件建立了三维数值模型,分析了7种不同工况的中隔墙在施工过程中的变形及应力规律。研究表明:非对称中隔墙顶部会受到侧向压力作用,当中隔墙顶部倾斜方向与坡面倾斜方向一致时,其稳定性更好;中隔墙往浅埋侧偏移的幅度越大,中隔墙的偏转幅度越小,同时中隔墙浅埋侧的竖向应力逐渐大于深埋侧的,形成与地形相反的偏压;不同方案的中隔墙旋转中心在水平方向的高度基本一致,当中隔墙往浅埋侧发生偏移时,其旋转中心的位置会从浅埋侧移动到深埋侧,加大了中隔墙自身的弯曲程度。

**关键词:**地层偏压;连拱隧道;中隔墙;结构比选;数值模拟

中图分类号: U451

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/t.2021.03.008

## Study on construction mechanical characteristics of unsymmetrical middle wall in biased double-arch tunnel

LIU Chang<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, DENG Xiao-zhao<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Niu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, china;

2. Changsha Tuo Zheng Transportation Technology Co., Ltd., Changsha 410008, china)

**Abstract:** In order to study the construction mechanical characteristics of unsymmetrical middle wall of biased double-arch tunnel. Based on the condition of the Zhangshuya multi-arch tunnel of the An'ci Expressway in Hunan Province, a three-dimensional numerical model was established using the Midas GTS NX finite element software. The deformation and stress laws of middle wall were analyzed under seven working conditions during construction. The results show that, when the inclination direction of the top of the partition wall is consistent with that of the slope, the top of the asymmetric middle wall will be subjected to lateral pressure, and that can be beneficial to the. Furthermore, the larger the offset of the middle wall to the shallow side, the smaller the deflection of the middle wall. And the vertical stress of middle wall at the shallow side is gradually greater than that at the deep side, forming a bias opposite to the terrain. The height of the rotation center of the middle wall in the horizontal direction is basically consistent in different schemes. When the middle wall moves to the shallow buried side, the position of the rotation center will move from the shallow buried side to the deep buried side, increasing the bending degree of the middle wall.

**Key words:** geological eccentric compression; double-arch tunnel; mid-partition wall; selection of structural type; numerical simulation

连拱隧道相较于其他隧道型式,其接线方便、可以避免路基分幅,在公路建设中,常被用于穿越地形陡峭、脊谷相间的“鸡爪”地带<sup>[1-2]</sup>。中隔

墙作为连拱隧道最主要的支承构件,其变形和受力复杂<sup>[3]</sup>,特别是存在地层偏压时,中隔墙的稳定性和不仅与施工的时空顺序有关,还与隧道上覆围

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 长沙理工大学研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJCX201926)

作者简介: 刘昶(1996—),男,长沙理工大学硕士生。

岩的偏压程度有关<sup>[4-5]</sup>。因此, 研究偏压连拱隧道不同型式中隔墙在施工过程中的稳定性具有重要意义。

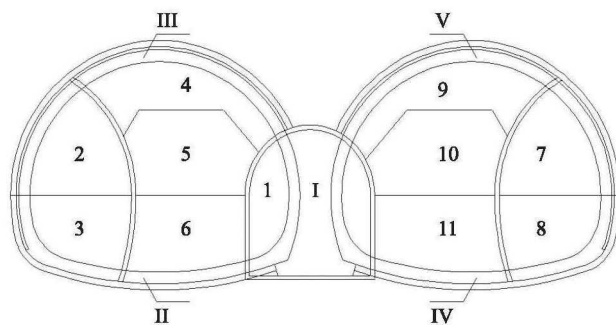
中隔墙是连拱隧道研究的重点, 众多学者采用理论计算、现场监测、模型试验和数值模拟等方法对中隔墙的稳定性展开了研究<sup>[6-9]</sup>。吴梦君等人<sup>[10]</sup>采用数值分析的手段对2种形状的复合式中墙进行了对比分析, 并对中墙的厚度进行了优化。许崇帮等人<sup>[11]</sup>采用力学方法, 分析和确定了中墙偏压的条件, 并对施工工序进行了优化。郑宗溪等人<sup>[12]</sup>对某偏压连拱隧道的施工过程进行了数值模拟, 获得了不同开挖顺序下中隔墙顶部关键点的应力和变形随施工步骤的变化规律。杨果林等人<sup>[13]</sup>采用现场监测的手段对中隔墙的施工力学进行了研究, 得到了中墙在施工过程中应力变化规律。王海强等人<sup>[14]</sup>通过数值模拟得到了不同开挖错距下连拱隧道围岩和中隔墙受力变形及二衬的受力状况。这些研究主要集中于中隔墙施工力学、偏转机制的分析、开挖错距的优化及不同型式中隔墙的比选等方面, 对于地层偏压条件下非对称式曲中墙的施工力学行为的研究少见。因此, 作者依托湖南省安慈高速樟树垭连拱隧道, 指出了中隔墙的偏转机制对2种典型非对称式中隔墙的受力机理进行了对比分析, 采用Midas GTS NX有限元软件对非对称式中隔墙的施工力学行为进行分析, 以期类似工程研究提供理论借鉴。

## 1 工程背景

樟树垭隧道隶属湖南省安慈高速第八标段, 为偏压连拱短隧道, 长度为220 m, 最大埋深为53 m。主线限界宽11.0 m, 净高为5.0 m, 中隔墙厚度为2.4 m (两侧二衬厚度为0.5 m)。地层岩性主要为强、中风化砂质页岩, 围岩分级为IV、V级围岩, 其中, V级围岩占全隧的71.8%。隧道所在山体的自然坡度为25°~40°, 偏压明显, 因此, 考虑采用非对称式复合曲中墙。

隧道支护体系为复合式支护。初期支护包含系统加固锚杆、钢筋网片、钢拱架及喷射混凝土, 二次衬砌为现浇钢筋混凝土。支护结构的预留变形量为12 cm;  $\phi 42$ 超前小导管长 $L$ 为4.0 m, 环

间距4.0 m, 超前小导管钻孔外倾夹角 $\alpha$ 为12°;  $\phi 25$ 中空注浆锚杆长为4.0 m, 间距100×50 cm;  $\phi 6$  mm单层钢筋网为20×20 cm; I20a钢拱架, 纵向间距为50 cm; 喷C25混凝土26 cm; C30钢筋混凝土二次衬砌50 cm。隧道的施工工法为三导洞-侧壁导坑, 其中, 主洞采用先浅后深的施工顺序<sup>[15]</sup>, 具体施工工法如图1所示。



注: 图中阿拉伯数字代表各部分开挖及初期支护, 罗马数字代表二次衬砌和中隔墙施作

图1 隧道施工步骤示意

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel construction steps

## 2 偏压连拱隧道中隔墙力学特性

### 2.1 中隔墙受力机理分析

在连拱隧道施工过程中, 作用于中隔墙的荷载主要包括中隔墙上方的围岩压力 $P_g$ 及左、右洞初期支护荷载 $P_{zs}$ 及 $P_{rs}$ 。中隔墙上方的围岩压力可以认为垂直压力, 该部分荷载不会引起中隔墙发生偏转, 左、右洞初期支护荷载是中隔墙产生偏压的主要原因。当 $P_{zs}=P_{rs}$ , 中隔墙不产生偏转; 当 $P_{zs}>P_{rs}$ , 中隔墙产生向右的偏转; 当 $P_{zs}<P_{rs}$ , 中隔墙产生向左的偏转。

由于偏压连拱隧道左、右洞埋深存在差异, 深埋侧隧道的围岩压力大于浅埋侧的, 如图2所示。在图2中,  $q_i$ 为隧道拱部的垂直围岩压力;  $q'_i$ 为中隔墙与两侧拱肩所夹区域的垂直围岩压力;  $e_i$ 、 $e'_i$ 为内、外侧偏压隧道水平侧压力。因此, 深埋侧初期支护作用在中隔墙的荷载大于浅埋侧的时, 中隔墙会向浅埋侧发生偏转。此外, 隧道左、右洞开挖及支护存在时空效应, 不仅会改变中隔墙上围岩压力的大小及分布, 也会对左、右洞初期支护所承担荷载产生影响。因此, 中隔墙产

生偏转的原因主要有两方面，即由地层偏压产生的偏转和施工时空效应产生的偏转。

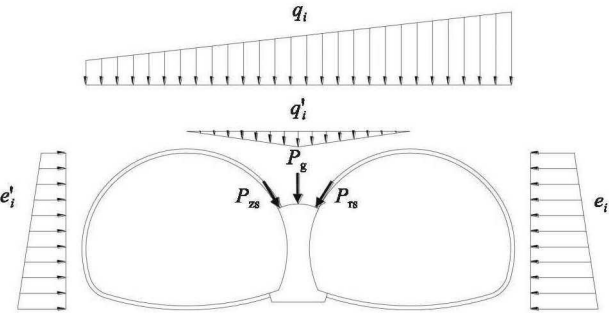


图2 偏压连拱隧道荷载示意  
Fig. 2 Load diagram of biased double-arch tunnel

2.2 偏压下非对称中隔墙受力分析

非对称复合曲中墙可分为两类，如图3所示，二者的主要区别在于其顶部的倾斜方向不同，其中隔墙的受力情况也不同。在图3中， $e_w$ 为中隔顶部的水平侧压力，因中隔墙顶部倾斜，所以作用在中隔墙顶部的围岩压力不仅包括垂直方向的压力，还包括水平方向的侧压力。中隔墙顶部的尺寸一般远小于中隔墙的埋深，根据圣维南原理，可以将作用在中隔墙顶部的梯形荷载等效为矩形均布荷载。其中，竖直方向的压力不会使中隔墙发生偏转，而水平方向的压力则会使中隔墙发生偏转。在地层偏压条件下，中隔墙会向着浅埋侧发生偏转，当中隔墙顶部的倾斜方向与地层倾斜方向相同时，下滑力在水平方向的分力和中隔墙顶部水平方向的围岩压力部分抵消，使中隔墙的

偏转幅度减小；当中隔墙顶部的倾斜方向和地层倾斜方向相反时，这两种力叠加，增加了中隔墙的偏转幅度。因此，当中隔墙顶部倾斜方向和地层倾斜方向一致时，中隔墙顶部的侧压力在一定程度上能减小中隔墙的偏转幅度。

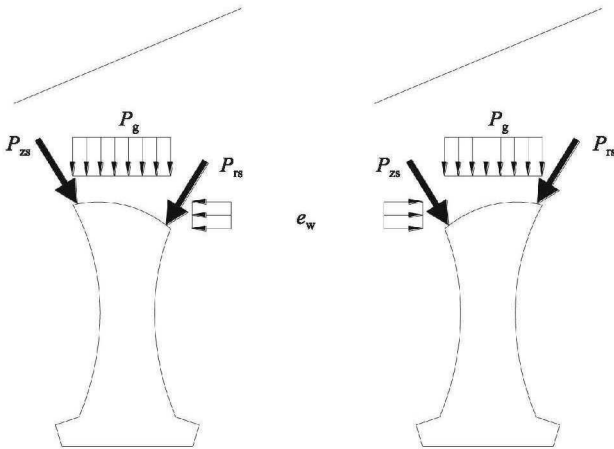


图3 非对称式中隔墙受力  
Fig. 3 Stress diagram of asymmetric middle wall

3 数值模型及模拟方案

3.1 模拟方案

为直观分析非对称中隔墙在施工过程中的偏转机制，针对中隔墙顶部的倾斜程度，选取了7种非对称式中隔墙进行建模，分别对应中导洞左偏移0.75、0.5、0.25 m，不偏移，以及右偏移0.25、0.5、0.75 m，如图4所示。

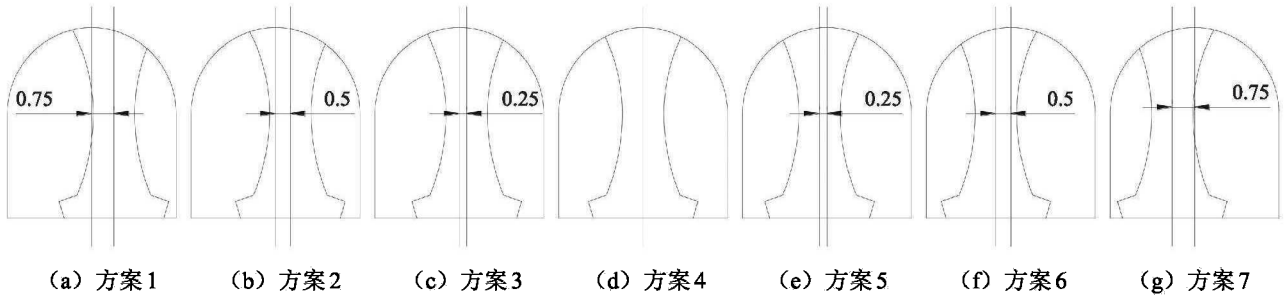


图4 非对称中隔墙形状示意 (单位: m)  
Fig. 4 Shape diagram of asymmetric middle wall(unit: m)

3.2 有限元模型的建立

采用 Midas GTS/NX 软件对该隧道 K115+610~K115+640段建立有限元模型。该处隧道左洞埋深20.9 m，右洞埋深36.7 m，偏压显著。地层岩性为强中风化砂质页岩，强风化层厚3.3~20.6 m。模型左、右边界各取46.5 m，向下取35.0 m，隧道

纵向取30.0 m，向上取至近似地表，模型总宽为120.0 m，左边界高40.6 m，右边界高102.8 m。模型四周为水平约束，下边界为固定边界。考虑到二次衬砌施作时隧道的变形已基本稳定，所以不考虑二次衬砌，仅考虑主洞开挖和初期支护。模型采用的材料参数、本构类型及单元类型见表1。

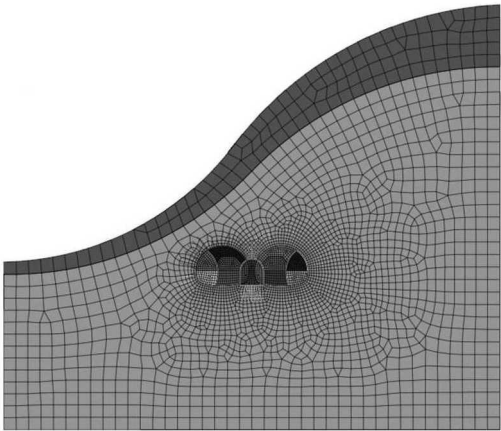
表1 应力分析材料信息表

Table 1 The information of stress analysis material

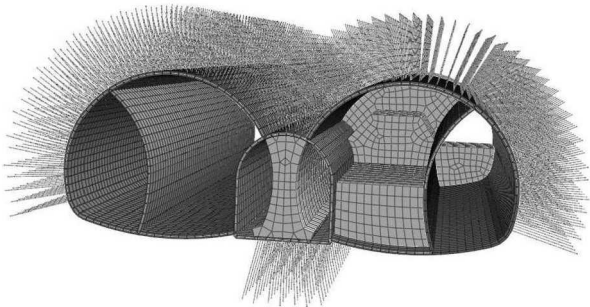
材料类别	单元类型	本构	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
强风化页岩	实体单元	D-P本构	0.65	0.32	23	35	23
中风化页岩	实体单元	D-P本构	1.20	0.30	26	200	25
喷射混凝土	板单元	线弹性本构	28.00	0.20	25		
中隔墙	实体单元	线弹性本构	32.50	0.20	25		
锚杆	桁架单元	线弹性本构	210.00	0.30	79		
钢拱架	梁单元	线弹性本构	210.00	0.30	79		

隧道建模效果如图 5 所示, 主要模拟施工步骤为:

- 1) 中导洞一次性开挖 30 m, 中导洞初期支护为 30 m。
- 2) 中隔墙一次性浇筑 30 m。
- 3) 中隔墙施作完毕后, 开挖浅埋侧(左洞)导洞, 导洞循环进尺为 1 m, 导洞上下台阶的间距为 5 m。
- 4) 浅埋侧导洞下台阶超前 10 m 后, 进行浅埋侧主洞开挖, 循环进尺为 1 m, 主洞上台阶核心土预留长度为 5 m, 上台阶核心土超前 10 m 后开挖浅埋侧下台阶。



(a) 隧道整体模型



(b) 隧道局部模型

图5 隧道数值模型示意

Fig. 5 Numerical model of tunnel

5) 浅埋侧主洞下台阶超前 15 m 后开挖深埋侧导洞, 导洞循环进尺为 1 m, 导洞上、下台阶的间距 5 m。

6) 浅埋侧主洞施工完毕后, 开始开挖深埋侧主洞, 循环进尺为 1 m, 台阶预留长度和浅埋侧保持一致。

4 模拟结果分析

模型监测断面位于  $y=9\text{ m}$ , 选取中隔墙中心线顶点(A)、底部中点(B)、左墙角(C1)及右墙角(C2)作为位移监测点, 选取 A-B 和 D1-D2 线上的节点为应力监测点, 如图 6 所示。

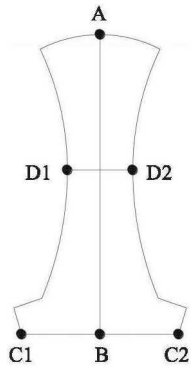


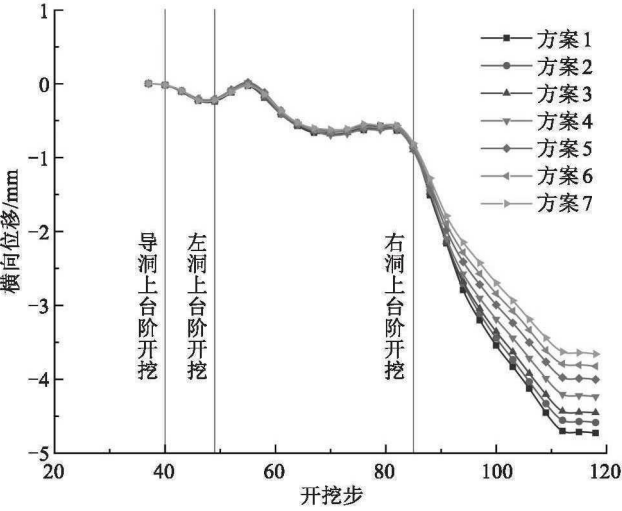
图6 中隔墙位移监测点

Fig. 6 Displacement monitoring point of middle wall

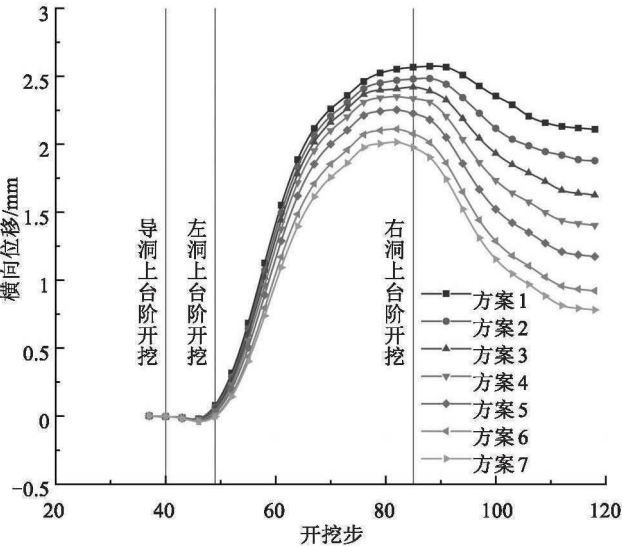
4.1 中隔墙横向位移

不同方案中隔墙中心线顶点A及底部中点B的横向位移随施工的变化曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 不同方案的中隔墙在施工过程中的横向位移变化规律基本一致, 但是位移有区别。方案 1 中 A 点和 B 点的横向位移始终是 7 个方案中最大的, 表明: 中隔墙往深埋侧偏移的幅度越大, 则其横向位移也越大。在左洞开挖阶段, B 点的横向位移大于 A 点的, 而在右洞开挖阶段, 下部的横向位移逐渐减小, 上部的横向位移逐渐增大,

最终A点的横向位移大于B点的。表明：随着施工的进行，中隔墙的旋转中心在逐渐下移。施工结束时，方案1和方案7的中隔墙A点的横向位移分别为-4.728 mm和-3.660 mm，B点的横向位移分别为2.109 mm和0.780 mm，表明：中隔墙底部横向位移对顶部倾斜角度更加敏感。



(a) 中隔墙中心线顶点A



(b) 中隔墙底部中点B

图7 中隔墙横向位移变化

Fig. 7 Transverse displacement curve of middle wall

不同方案的中隔墙中心线A-B在施工结束时的横向位移如图8所示。从图8中可以看出，中隔墙往浅埋侧偏移的幅度越大，中隔墙偏转的幅度越小。不同方案的横向位移线基本交于一点。表明：中隔墙的旋转中心基本在同一条水平线上，中隔墙往深埋侧偏移的幅度越大，则其中心线的横向位移线越接近一条直线。当中隔墙往浅埋侧

偏移时，位移线会发生弯曲。表明：中隔墙自身产生了弯曲变形。

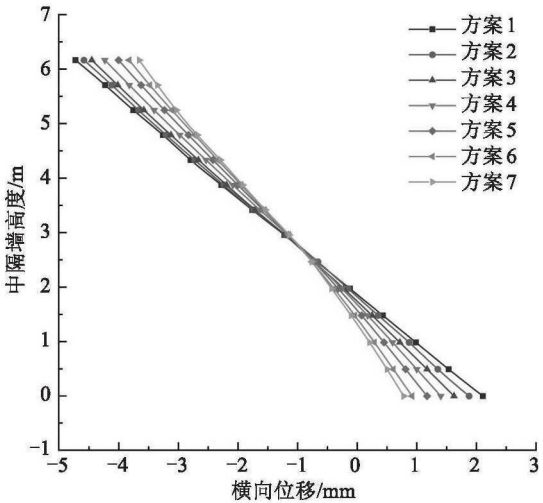


图8 中隔墙中心线横向位移

Fig. 8 Transverse displacement curve of center line of middle wall

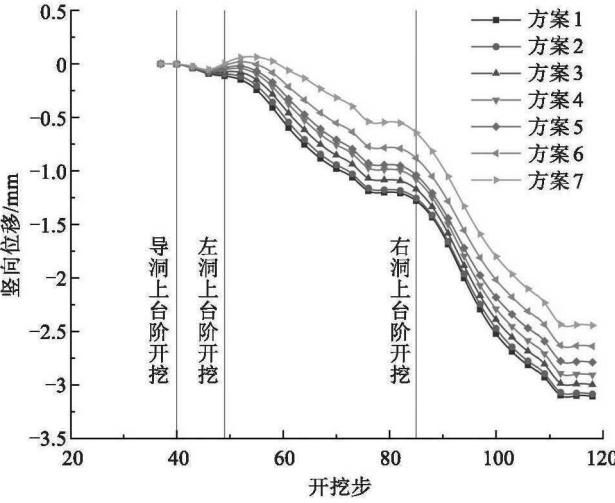
4.2 中隔墙竖向位移

不同形式的中隔墙左墙脚及右墙角的竖向位移随施工工序的变化如图9所示。从图9中可以看出，在两侧主洞开挖至目标断面时，竖向位移会迅速增加，在主洞远离至一定距离后趋于稳定。同时，中隔墙往深埋侧偏移的幅度越大，则C1点的竖向位移也越大。中隔墙右墙角C2点在左洞施工阶段时，竖向位移不断增大，右洞开始施工时，其竖向位移开始慢慢减小，且在左洞施工阶段，不同方案所对应的中隔墙竖向位移大小没有明显规律，进入右洞施工阶段后，C2点的竖向位移曲线开始分化，且中隔墙往深埋侧偏移幅度越大，则竖向位移曲线的斜率也越大。施工结束时，方案1和方案2下C2点的竖向位移为正值，说明实际工程中，中隔墙右墙角很可能和基底脱开。

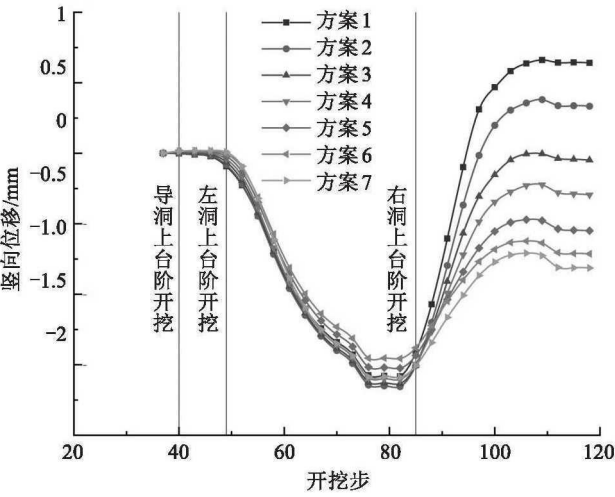
施工结束时，中隔墙基底C1-C2的竖向位移如图10所示。从图10中可以看出，根据前后两个方案中隔墙基底竖向位移曲线的交点，可以判断出中隔墙在水平方向旋转中心的位置，方案1和方案2在基底竖向位移曲线中交点在左墙脚。表明：这2个方案下中隔墙大致是绕着左墙脚某个点进行转动的，此时右墙角可能会与基底脱开。对比不同方案下中隔墙基底竖向位移曲线中的交点可以发现，中隔墙在水平方向的旋转中心的移动规律和中隔墙的位置是相反的，中隔墙往浅埋侧布设时，



其旋转中心会向着深埋侧移动, 而中隔墙在施工过程中会往浅埋侧发生偏转, 中隔墙受到的弯矩会变大, 使中隔墙自身发生弯曲。



(a) 左墙角C1



(b) 右墙角C2

图9 中隔墙竖向位移变化

Fig. 9 Vertical displacement curve of middle wall

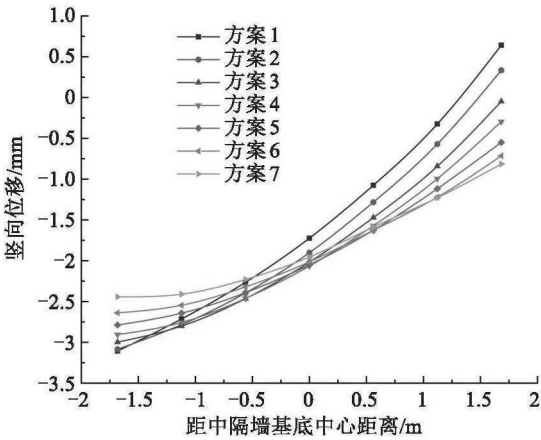
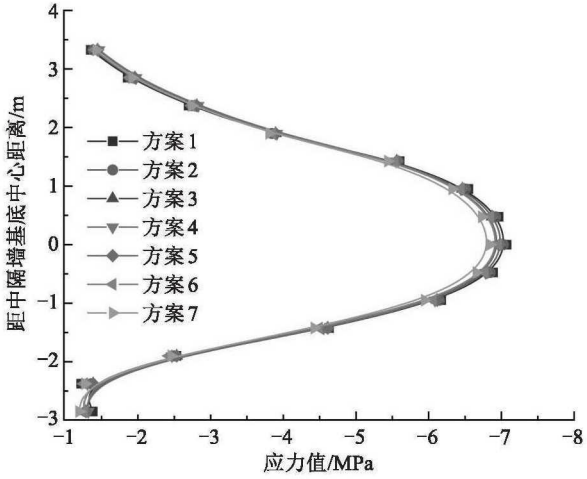


图10 中隔墙基底竖向位移曲线

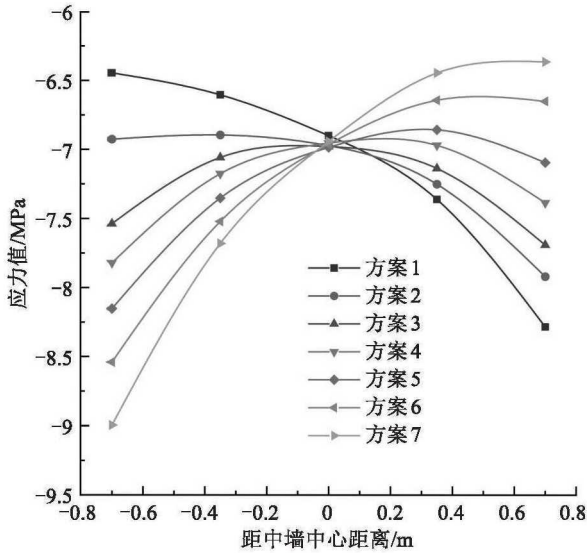
Fig. 10 Vertical displacement curve of middle wall base

4.3 中隔墙应力特征

在施工结束阶段不同方案中, 隔墙竖向中心线A-B及水平中心线D1-D2的竖向应力值分布如图11所示。



(a) A-B线



(b) D1-D2线

图11 中隔墙竖向应力变化

Fig. 11 Vertical stress curve of middle wall

从图11中可以看出, 不同方案的中隔墙竖向中心线的应力差别不大。从图11(a)中可以看出, 中隔墙中心处的竖向应力值约为7 MPa, 上、下两端的应力值约为1.4 MPa。但是不同方案中隔墙水平中心处的应力值有较大区别。从图11(b)可以看出, 当中隔墙竖向中心线和中导洞中心线重合时(不偏移), 中隔墙左侧(浅埋侧)的应力值大于右侧(深埋侧)的, 中隔墙中心处的应力值最小, 即在偏压状态下, 中隔墙水平中线处浅埋侧的竖向应力值大于深埋侧的。当中隔墙向左

侧（浅埋侧）发生偏移时，中隔墙左侧的应力值会逐渐减小，右侧的应力值会逐渐增大。在方案1下，中隔墙左侧应力值最小，右侧应力值最大，应力值差为1.75 MPa。考虑到中隔墙本身会向着浅埋侧发生偏转，但这种偏压可以起到很好的纠偏作用。而当中隔墙向着右侧（深埋侧）偏移时，中隔墙左侧应力值会继续增大，右侧应力值逐渐减小，中隔墙向右偏移0.75 m时，中隔墙左、右应力之差为2.5 MPa。

4.4 隧道拱顶沉降

隧道K115+615断面拱顶实测沉降曲线如图12所示，数值模拟得到的隧道拱顶沉降曲线如图13所示。从图12~13中可以看出，现场监测得到的和数值模拟的结果较为类似，对应主洞开挖的3个阶段，拱顶沉降曲线大致可以分为3个阶段。由于数值模拟没有考虑荷载释放系数，数值模拟得到的曲线变化速率较大，但是二者的累计沉降值基本相同。无论采用哪种方案的中隔墙，浅埋侧（左洞）的拱顶沉降均小于深埋侧（右洞）的，主要是因为深埋侧隧道的围岩压力要大于浅埋侧的；隧道拱顶沉降在开挖至监测断面时会迅速增大，并随开挖面的远离而趋于稳定。在右洞开挖前，不同方案下隧道拱顶沉降曲线基本吻合。在右洞开挖时，右洞拱顶沉降曲线则区别不大，而左洞拱顶沉降曲线出现明显分化，施工结束时方案1最终的拱顶沉降为-6.177 mm，方案7的为-6.512 mm。对比中隔墙偏转幅度的变化，中隔墙的布设位置使隧道拱顶沉降的影响较小。

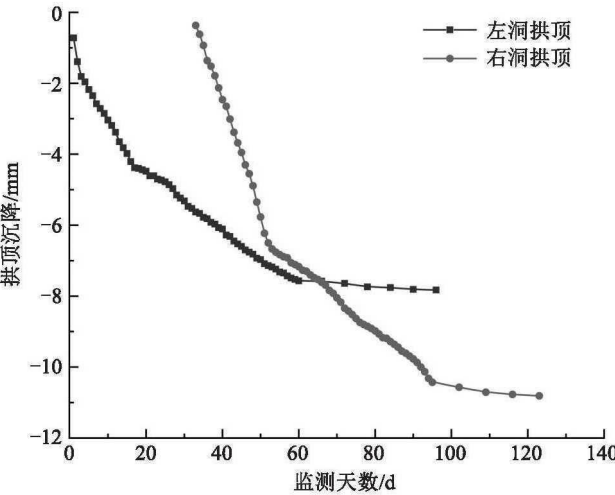
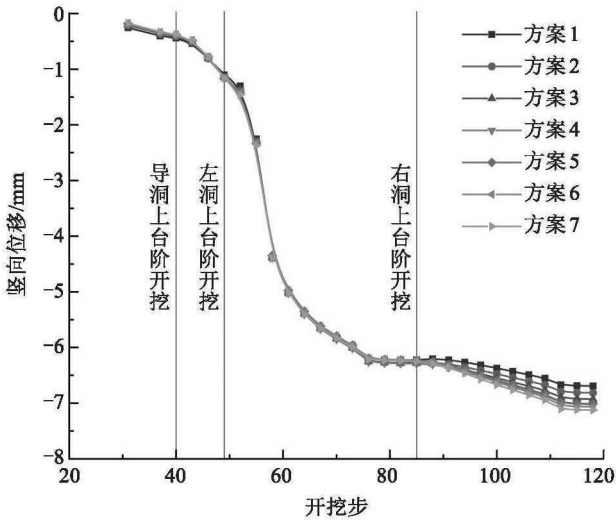
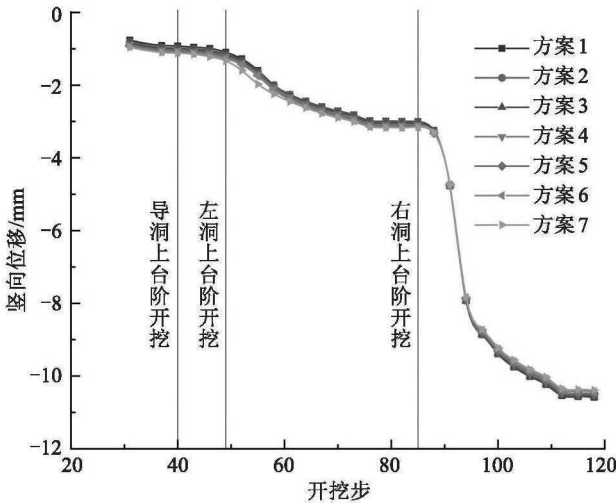


图12 K115+615断面拱顶实测沉降曲线  
Fig. 12 Time-history curve of vault settlement K115+615



(a) 左洞



(b) 右洞

图13 隧道拱顶沉降变化曲线

Fig. 13 Settlement curve of tunnel vault

5 结论

以湖南省安慈高速樟树垭连拱隧道为工程背景，通过Midas GTS/NX 软件建立了数值模拟，对不同结构型式非对称式中隔墙的位移及应力进行了分析，得出结论为：

- 1) 地层偏压条件下，中隔墙会向着浅埋侧发生偏转；非对称式中隔墙顶部会受到侧向压力的作用，当中隔墙顶部倾斜方向和坡面方向一致时，中隔墙的稳定性和更好。
- 2) 不同方案的中隔墙在施工过程中位移及受力规律基本一致，中隔墙顶部倾斜方向和坡面夹角越小，则偏转幅度也越小，同时后行洞对中隔

墙的影响也会减小。

3) 不同方案的中隔墙的旋转中心在水平方向的高度基本一致, 随着其顶部倾斜方向和坡面夹角逐渐减小, 其旋转中心的位置会从浅埋侧移动到深埋侧, 中隔墙自身弯曲程度也会逐渐变大。

4) 中隔墙往浅埋侧偏移幅度越大, 则中隔墙深埋侧的竖向压力越大, 浅埋侧的竖向压力越小, 形成和地层偏压相反的偏压, 可以在一定程度上纠正中隔墙向浅埋侧的偏转。

5) 不同方案下隧道拱顶的沉降区别不大, 相较于中隔墙顶部倾斜角度对中隔墙偏转幅度的影响, 其对隧道拱顶沉降的影响可以忽略不计。

### 参考文献(References):

- [1] Lei M F, Lin D Y, Yan W C, et al. Model test to investigate failure mechanism and loading characteristics of shallow-bias tunnels with small clear distance[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(12): 3312-3321.
- [2] 高红杰, 何平, 陈峥. 深埋非对称连拱隧道过程荷载计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1059-1066. (GAO Hong-jie, HE Ping, CHEN Zheng. Calculation of process load of deep-buried asymmetric multi-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1059-1066. (in Chinese))
- [3] 雷金山, 阳军生, 杨峰, 等. 大跨度偏压连拱隧道现场监测与受力分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(4): 31-36. (LEI Jin-shan, YANG Jun-sheng, YANG Feng, et al. In-situ monitoring and mechanical analysis of large-span unsymmetrical loading multi-arch tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(4): 31-36. (in Chinese))
- [4] 赵金鹏, 王秀英, 谭忠盛, 等. 软弱围岩偏压连拱隧道正洞合理施工布局研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 66-74. (ZHAO Jin-peng, WANG Xiu-ying, TAN Zhong-sheng, et al. Study on the reasonable construction layout of main tunnel in unsymmetrical loading multi-arch tunnel with weak rock[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 66-74. (in Chinese))
- [5] Xiao Z, Dai F C, Wei Y Q, et al. Analysis of mechanical behavior in a pipe roof during excavation of a shallow bias tunnel in loose deposits[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 1-18.
- [6] Huang R Q, Xiao H B. Deformation mechanism of a shallow double-arch tunnel in a sloping rock mass[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69(1): 89-97.
- [7] 曹媛媛, 刘辉, 刘耀坤, 等. 基于流固耦合作用的偏压连拱隧道稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 56-61. (CAO Yuan-yuan, LIU Hui, LIU Yao-kun. Analysis on the stability of fluid-solid coupling in a bias double-arch tunnel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 56-61. (in Chinese))
- [8] YU Q Y, Song Z Y, DU C, et al. Analysis of asymmetric stress ratio in shallow buried tunnels[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(6): 1924-1931.
- [9] 邱长林, 刘彬, 何林生, 等. 整体式中隔墙连拱隧道模型试验及现场监测[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2625-2631. (QIU Chang-lin, LIU Bin, HE Lin-sheng et al. Model test and in-situ monitoring of double-arch tunnel with integrated middle wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2625-2631. (in Chinese))
- [10] 吴梦军, 蒋树屏, 张永兴, 等. 大跨扁平连拱隧道复合式中墙优化研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(2): 85-90. (WU Meng-jun, JIANG Shu-ping, ZHANG Yong-xing, et al. Study of optimization of composite middle wall in large span and flat multi-arch tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(2): 85-90. (in Chinese))
- [11] 许崇帮, 夏才初, 王华牢. 特大断面连拱隧道中墙偏压机制及施工影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2819-2826. (XU Chong-bang, XIA Cai-chu, WANG Hua-lao. Analysis of mechanism of mid-partition eccentric compression and construction effect on super-large section multi-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2819-2826. (in Chinese))
- [12] 郑宗溪, 孙其清. 不对称双连拱偏压铁路隧道修建技术研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(8): 60-65. (ZHENG Zong-xi, SUN Qi-qing. Research on construction technology for unsymmetrical multi-arch and unsymmetrically loaded railway tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(8): 60-65. (in Chinese))
- [13] 杨果林, 胡敏, 申宗球, 等. 大跨连拱隧道复合式中墙承载模式研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 136-141. (YANG Guo-lin, HU Min, SHEN Zong-qiu, et al.

(下转第77页)



- [9] 严永阳. 悬臂施工中连续钢桁梁桥结构性能分析与控制技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. (YAN Yong-yang. Structural performance analysis and control technology of continuous steel truss bridge during cantilever construction[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese))
- [10] 但启联. 基于无应力状态控制法的分阶段成形桥梁结构线形控制理论及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (DAN Qi-lian. Alignment controlling theory and application of bridge structure formed in stages based on unstressed state control method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [11] 吕毅刚, 余钱华, 张建仁. 高墩大跨桥梁空间几何非线性分析[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004, 1(2): 28-33. (LYU Yi-gang, YU Qian-hua, ZHANG Jian-ren. Spatial geometrical nonlinear analysis of large-span bridge with high-pier[J]. Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2004, 1(2): 28-33. (in Chinese))
- [12] 彭召明, 余钱华. 张罗公路河溪镇石拱桥贝雷拼装拱支架设计与施工[J]. 长沙交通学院学报, 2004, 20(2): 30-33. (PENG Zhao-ming, YU Qian-hua. Design and construction of arch bracket through steel joist in constructing stone arch bridge at Zhangluo road, Hexi town[J]. Journal of Changsha Communications University, 2004, 20(2): 30-33. (in Chinese))
- [11] 吕毅刚, 余钱华, 张建仁. 高墩大跨桥梁空间几何非线性

---

(上接第 57 页)

- Research on bearing modes of compound middle-wall of multi-arch tunnels with large spans[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(1): 136-141. (in Chinese))
- [14] 王海强, 张成良, 刘忠强, 等. 不同开挖错距条件下偏压连拱隧道围岩及中隔墙应力变化规律分析[J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38(5): 1024-1028, 1066. (WANG Hai-qiang, ZHANG Cheng-liang, LIU Zhong-qiang, et al. Analysis on stress variation rules of bias multi-arch tunnel surrounding rock and middle partition wall under different excavation conditions[J]. World Sci-Tech R & D, 2016, 38(5): 1024-1028, 1066. (in Chinese))
- [15] 庄宁, 朱苦竹, 李军伟. 偏压连拱隧道施工的动态模拟及最优化分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2875-2880. (ZHUANG Ning, ZHU Ku-zhu, LI Jun-wei. Research on partial pressure joint arch tunnel's dynamic simulation and optimum analysis of construction process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2875-2880. (in Chinese))