

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210308001

文章编号: 1674-599X(2023)01-0068-08

偏压小净距隧道开挖方式优化的研究

李茂, 费维水, 杨文广, 王太明, 赵新宏

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为研究不同开挖方式对偏压小净距隧道的影响。本研究以重庆杨家坪隧道工程为依托, 运用Midas GTS NX软件对其建立有限元模型, 研究偏压小净距隧道的不同开挖方式在中岩墙加固前后对围岩应力、拱顶沉降和仰拱隆起等方面的影响。研究表明: 对小净距隧道的中岩墙进行注浆加固, 提高了土体强度, 避免了中岩墙错动。在小净距隧道中岩墙开挖的各种方法中, 采用CD法开挖的水平位移、拱顶下沉和仰拱隆起均优于CRD法和环形开挖留核心土法的。采取CD法开挖偏压小净距隧道可有效减小后行洞开挖对先行洞的影响。

关键词: 偏压小净距隧道; Midas GTS NX; 合理净距; 中岩墙加固

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

Research on optimization of excavation method for small interval tunnel under biased pressure

LI Mao, FEI Weishui, YANG Wenguang, WANG Taiming, ZHAO Xinhong

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the influence of different excavation on small interval tunnels under bias pressure, based on the Yangjiaping tunnel project in Chongqing, this study used Midas-GTS NX software to establish a finite element model of the tunnel and investigated the effects of different excavation methods for small interval tunnels under biased pressure on surrounding rock stress, arch settling, and abutment uplift before and after the reinforcement of the middle rock wall. The research results showed that grouting reinforcement of the middle rock wall of the small interval tunnel can improve the soil strength and avoid the dislocation of the middle rock wall. The horizontal displacement of the middle rock wall, arch settling, and abutment uplift of the small interval tunnel excavated using the CD method were better than those of the CRD method and the annular excavation method with the core soil. The excavation of the small interval tunnel under biased pressure using CD method can effectively reduce the influence of the trailing hole excavation on the leading hole.

Key words: small interval tunnel under biased pressure; midas GTS NX; reasonable clear distance; middle rock wall reinforcement

近年来,随着中国经济的飞速发展和“十四五”规划的提出,隧道工程建设进入了一个蓬勃发展的阶段。在中国的云贵川等地质条件复杂的山岭公路建设中,隧道工程很常见。小净距隧道能克服复杂地形条件的限制,满足线路的总体线形要求,且节约用地、施工简单、工程风险小、造价较低。因此,小净距隧道在这些地区得到了广泛的应用^[1]。

目前,中国众多学者针对不同地质条件及不同

施工设计的小净距隧道进行了研究。张海兵等^[2]运用离散元的数值方法,在考虑岩层结构面的基础上,研究了鲁班亭小净距隧道的合理净距,得出了鲁班亭隧道合理净距为隧道开挖断面宽度60%的结论。绍珠山等^[3-4]通过FLAC^{3D}有限差分软件对不同方案下的小净距隧道开挖进行了动态模拟,发现当隧道净距较大时,在开挖过程中围岩的最大剪应力会显著增加,且中间土柱部位会产生较大的相

收稿日期: 2022-03-08

作者简介: 李茂(1997—),男,昆明理工大学硕士研究生。

对位移,该情况不利于围岩的稳定。与常规分离隧道开挖相比,小净距隧道开挖对邻洞的影响增加了 50%。龚建伍等^[5]计算了浅埋小净距隧道的围岩压力特征,发现当隧道净距小于隧道开挖断面宽度的 50% 时,内侧的围岩压力将极大地受到净距的影响。凌同华等^[6]对偏压小净距隧道的施工顺序进行了研究,发现在 V 级围岩条件下的合理净距为 10 m,且净距越大施工顺序对围岩稳定的影响越小。叶冬明等^[7]对不同围岩类别的小净距隧道施工进行了数值仿真,发现当隧道埋深大于 20 m 时,地表变化造成的偏压对隧道开挖的影响并不明显,只有当埋深小于 20 m 时,偏压的影响才逐渐显现。

这些研究多围绕小净距隧道的合理净距、围岩应力、开挖顺序和埋深展开,鲜有学者研究不同开挖方式在中岩墙加固前后对偏压小净距隧道围岩应力和位移的影响。本研究以重庆杨家坪隧道工程为依托,在确定最佳合理净距的基础上,拟对中心隔壁法(center diaphragm, CD 法)、交叉中心隔壁法, (center cross diaphragm, CRD 法)和环形开挖留核心土法这 3 种不同开挖方法进行有限元数值模拟,分析和对比不同开挖方式在中岩墙加固前后对偏压小净距隧道围岩应力和位移的影响,以为类似工程实践提供参考。

1 工程概况

重庆杨家坪隧道断面尺寸为 16.14 m(宽)× 8.3 m(高),左线的起点里程桩号为 ZK101+126,终点的里程桩号为 ZK101+643,全长为 517 m;右线的起点里程桩号为 K101+113,终点的里程桩号为 K101+651,全长为 538 m。

表 1 不同开挖方式计算工况表

Table 1 Procedures for different excavation methods

开挖步骤	CD 法	CRD 法	环形开挖留核心土法
步骤 1	开挖左洞右侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖左洞右侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	左洞上部环形导坑开挖-施作锚杆-初期支护
步骤 2	开挖左洞右侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖左洞右侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	左洞左侧导坑开挖-施作锚杆-初期支护
步骤 3	开挖左洞右侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖左洞左侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	左洞右侧导坑开挖-施作锚杆-初期支护
步骤 4	开挖左洞左侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖左洞左侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	核心土开挖

该隧道位于扬子准地台上的扬子台坳渝东南褶皱束的黔江凹褶皱束,构造线呈北北东向。该隧道区位于宜居背斜东翼,隧道进口西距背斜核部约 1.4 km。岩层呈单斜产出,岩层产状走向为 100°~110°,倾角为 42°~67°,其间未发现断层。

隧道穿越围岩为强风化页岩夹砂岩和中风化页岩夹砂岩,围岩等级为Ⅳ~Ⅴ级。Ⅴ级围岩约占洞身段左洞的 80%,Ⅳ级围岩的占洞身段右洞的 80%,如图 1 所示。《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—208)规定,当围岩等级为Ⅳ级且围岩净距小于隧道开挖断面宽度的 2.5 倍时,或当围岩等级为Ⅴ级且围岩净距小于隧道开挖断面宽度的 3.5 倍时,该隧道为小净距隧道。

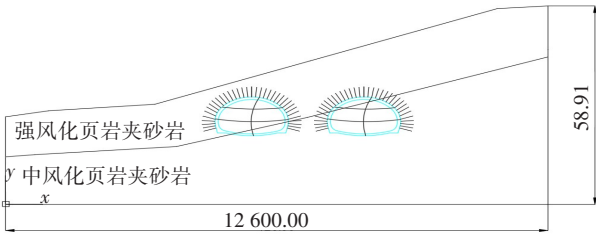


图 1 岩层分布简化图(单位:m)

Fig. 1 Simplified diagram of rock formation distribution (unit:m)

2 不同施工方法的数值模拟

2.1 工法概况

根据地质条件、断面形状和施工条件等因素,本研究分别采用 CD 法、CRD 法和环形开挖留核心土法对其进行施工,并对不同净距下 3 种开挖方法施工阶段进行数值模拟计算,确定最佳净距和最佳开挖方式。这三种开挖方法的步骤见表 1。

表 1(续)
Table 1(continued)

开挖步骤	CD 法	CRD 法	环形开挖留核心土法
步骤 5	开挖左洞左侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖左洞右侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	仰供开挖-施作锚杆-仰供初期支护
步骤 6	开挖左洞左侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖左洞左侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	施作仰供和二衬衬砌
步骤 7	拆除中隔壁-施作仰供和二次衬砌	拆除中隔壁-施作仰供和二次衬砌	右洞上部环形导坑开挖-施作锚杆-初期支护
步骤 8	开挖右洞右侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖右洞右侧一级台阶-施作锚杆-初期支护	右洞左侧导坑开挖-施作锚杆-初期支护
步骤 9	开挖右洞右侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖右洞右侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	右洞右侧导坑开挖-施作锚杆-初期支护
步骤 10	开挖右洞右侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖右洞左侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	核心土开挖
步骤 11	开挖右洞左侧第一级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖右洞左侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	仰供开挖-施作锚杆-仰供初期支护
步骤 12	开挖右洞左侧第二级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖右洞右侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	施作仰供和二衬衬砌
步骤 13	开挖右洞左侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	开挖右洞左侧第三级台阶-施作锚杆-初期支护	
步骤 14	拆除中隔壁-施作仰供和二次衬砌	拆除中隔壁-施作仰供和二次衬砌	

2.2 模型建立

为研究偏压小净距隧道不同开挖方式和净距对中岩墙的影响,基于 Midas-GTS NX 软件,分别在隧道开挖断面宽度 50%、60%、70%、80% 的净距下,建立 3 种不同开挖方式的有限元隧道模型。采用摩尔库伦模型作为围岩的本构模型,采用梁单元模拟隧道的初衬,采用植入式锚杆模拟隧道锚杆,采用平面应变单元模拟二次衬砌。根据不同净距,每种开挖方式均分别建立 4 个二维隧道模型。采用 CD 法,按隧道开挖断面宽度 80% 的净距进行开挖的局部模型如图 2 所示,图中 b 为隧道开挖断面宽度,下同。

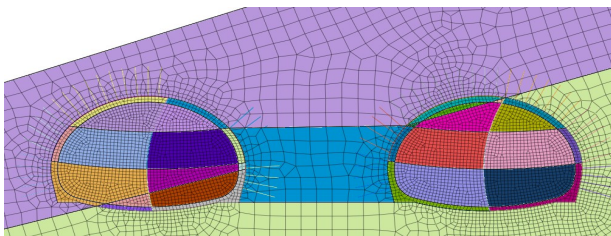


图 2 CD 法模型局部放大(以 $0.8b$ 为例)

Fig. 2 Partial enlarged view of CD method model (taking $0.8b$ as an example)

2.3 计算参数选取

根据重庆彭水至酉阳高速公路一期工程地质勘察报告及文献资料^[8-9],确定该隧道围岩等级为

Ⅳ~Ⅴ级,参考《公路隧道设计规范第一册 土建工程(JTG 3370.1—2018)》和《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020),选定围岩参数,具体见表 2。

表 2 材料参数表

Table 2 Material parameters

材料	泊松比	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
强风化页岩夹砂岩	0.35	20.0	0.56	50	20
中风化页岩夹砂岩	0.35	22.5	1.30	200	27
初衬	0.20	23.0	23.00		
二衬	0.20	25.0	31.50		
锚杆	0.30	78.5	200.00		

3 不同施工方法的数值模拟结果分析

3.1 中岩墙水平位移分析

在本研究的模型计算中,分别在中岩墙的-4、-3、-2、-1、0、1、2、3 和 4 m 的不同高度设置监测点,如图 3 所示。监测中岩墙在不同开挖方式和净距下的水平位移,结果分别如图 4~6 所示。

从图 4~6 中可看出,当 CD 法、CRD 法和环形开挖留核心土法开挖至隧道开挖断面宽度 50% 的净

距时,左向最大位移分别为1.36、1.38和1.47 mm,右向最大位移分别为0.46、0.48和0.51 mm;当CD法、CRD法和环形开挖留核心土法开挖至隧道开挖断面宽度80%的净距时,3种方法的向左向最大位移分别为0.97 mm(较按隧道开挖断面宽度50%净距开挖的减小28.6%)、1.02 mm(较按隧道开挖断面宽度50%净距开挖的减小26%)和1.16 mm(较按隧道开挖断面宽度50%净距开挖的减小21%),右向最大位移分别为0.28 mm(较按隧道开挖断面宽度50%净距开挖的减小39%)、0.32 mm(较按隧道开挖断面宽度50%净距开挖的减小33%)和0.41 mm(较按隧道开挖断面宽度50%净距开挖的减小19.6%)。这些位移模拟值均与现场位移监测值较吻合,满足《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)的要求。由于偏压隧道开挖时扰动过大,边坡有向左侧错动的趋势。随着埋深的增加和围岩等级的增大,岩体逐渐稳定。在3种不同开挖方式下,中岩墙上部 and 下部都出现了错动,整个中岩墙水平位移呈弧型曲线。随着隧道净距的不断增大,中岩墙的水平位移不断减小。其中,采用CD法的中岩墙水平位移比CRD法的和环形开挖留核心土法的更小。

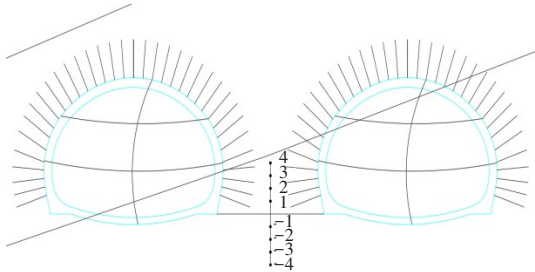


图3 中岩墙水平位移监测点布置图(单位:m)

Fig. 3 Layout of the monitoring points for the horizontal displacement of the middle rock wall(unit:m)

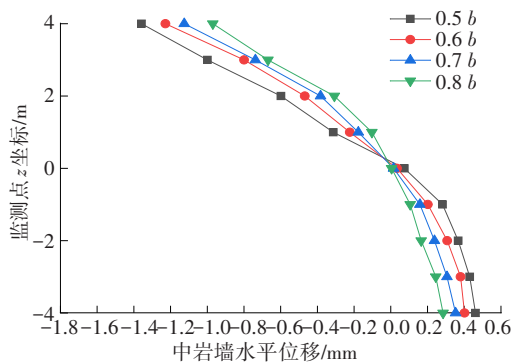


图4 不同净距CD法开挖中岩墙水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement of rock wall during excavation by CD method with different intervals

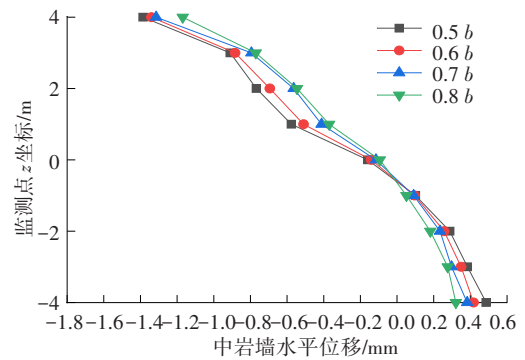


图5 不同净距CRD法开挖中岩墙水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of rock wall during excavation by CRD method with different intervals

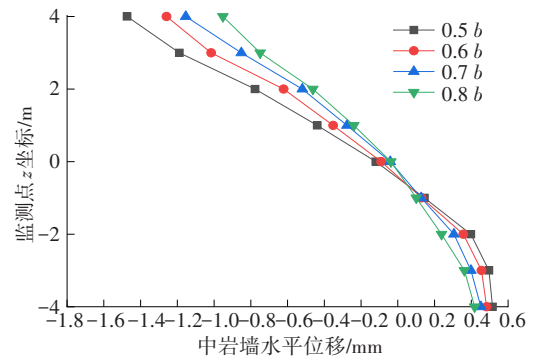


图6 不同净距环形开挖留核心土法中岩墙水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of rock wall in annular excavation with core soil method with different intervals

3.2 中岩墙塑性区分析

《公路小净距隧道》^[10]提出,在塑性应力区域,地基上部荷载产生的压力超过了土体极限承载力,使局部土体产生变形且不可恢复。此时,即使应力不再增加,围岩变形也将继续发展。围岩发生塑性变形,迫使该围岩向洞室内滑移,塑性区内围岩变得松弛,其物理力学性质也会发生改变。

在弹塑性分析中,常假定发生塑性条件的应力圆包络线是一条直线(Mohr-coulomb假定),如图7所示。

设塑性区内的径向应力为 σ_r ,切向应力为 σ_θ ,若 $\lambda = 1$,则此时的最大主应力和最小主应力分别为 σ_θ 和 σ_r ,破坏准则为:

$$\sigma_\theta(1 - \sin \varphi) - \sigma_r(1 + \sin \varphi) - 2C \cos \varphi = 0 \quad (1)$$

式中:C为土体的黏聚力, φ 为土体的摩擦角。若令:

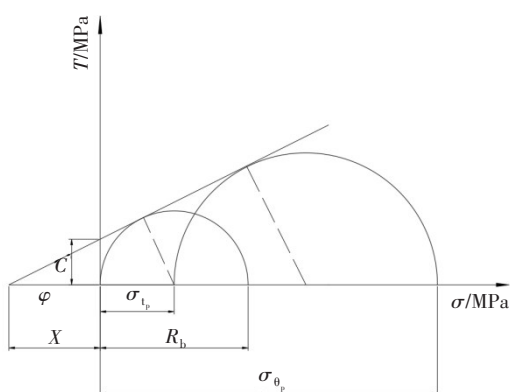


图7 材料强度包络线及应力圆

Fig. 7 Material strength envelope and stress circle

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, R_b = \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} C \quad (2)$$

则式(1)可写为:

$$\sigma_{\theta_r} - \xi \sigma_{t_r} - R_b = 0 \quad (3)$$

将土体破坏判据(3)式代入轴对称塑性区的应力平衡方程,其表达式为:

$$\frac{d\sigma_{t_r}}{dr} + \frac{\sigma_{t_r} - \sigma_{\theta_r}}{r} = 0 \quad (4)$$

可求得轴对称条件下的塑性区内的应力状态。

其中,径向应力 σ_{t_r} 为:

$$\sigma_{t_r} = \frac{R_b}{\xi - 1} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{\xi - 1} - 1 \right] \quad (5)$$

切向应力 σ_{θ_r} 为:

$$\sigma_{\theta_r} = \frac{R_b}{\xi - 1} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{\xi - 1} - 1 \right] \quad (6)$$

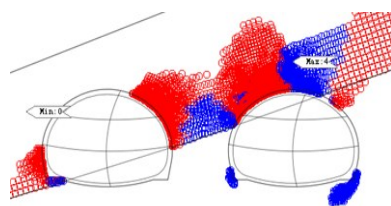
其中: r_0 为隧道开挖半径, r 为围岩中某点到隧道中心的距离。根据弹塑性分界面上的应力协调条件,可求得塑性区范围的大小 R_0 ,其表达式为:

$$R_0 = r_0 \left[\frac{2}{\xi + 1} \cdot \frac{\sigma_y(\xi - 1) + R_b}{R_b} \right]^{\frac{1}{\xi - 1}} \quad (7)$$

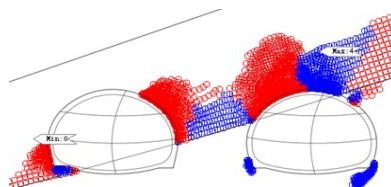
其中: $\sigma_y = \gamma h$, σ_y 为围岩的初始应力, γ 为围岩的容重, h 为隧道理深。式(7)表明,在塑性边界 R_0 与围岩的初始状态(σ_y)下,围岩本身的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与洞室的开挖半径 r_0 有关。洞室半径越大,围岩状态越差,初始应力越大,塑性区也越大^[10]。

偏压小净距隧道在开挖时的塑性区主要分布在洞周、整个开挖面的四个角及中岩墙周围。由于隧道偏压,隧道将出现塑性区不对称的情况。塑性区主要分布于强风化页岩夹砂岩,这说明围岩等级越高,塑性区范围越小。当采取环形开挖留核心土法开挖时,中岩墙的塑性区几乎不随净距变化,图中未予列出。当采取CD法和CRD法开挖时,先开挖浅埋

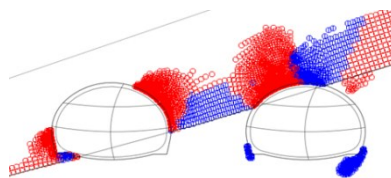
侧(模型中左洞)的塑性区更小,如图8所示,图8中右侧网格区域即为塑性区域。当净距分别为隧道开挖断面宽度的50%、60%时,中岩墙的塑性区范围比较大,且有连在一起的趋势;随着净距越来越宽,中岩墙的塑性区分布范围逐渐变小。当净距为隧道开挖断面宽度的80%时,中岩墙塑性区出现分离的趋势,应力集中区域明显缩小,此时的中岩墙较为安全。当净距为隧道开挖断面宽度的90%时,中岩墙塑性区进一步分离,应力集中区域也进一步缩小。



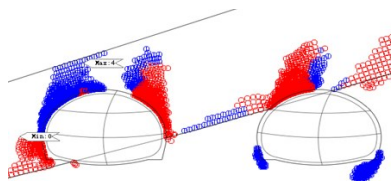
(a) 隧道开挖断面宽度50%的净距



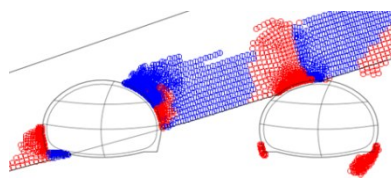
(b) 隧道开挖断面宽度60%的净距



(c) 隧道开挖断面宽度70%的净距



(d) 隧道开挖断面宽度80%的净距



(e) 隧道开挖断面宽度90%的净距

图8 不同净距时的围岩塑性区分布

Fig. 8 Effects of the clear distance on the distribution of surrounding rock plastic zone

3.3 中岩墙加固前后的应力和位移分析

结合对中岩墙变形和塑性区分布分析,可知杨家坪隧道的最佳净距应大于隧道开挖断面宽度的80%。未对中岩墙进行加固时,中岩墙会出现

错动,且中岩墙范围内存在大量塑性区。为避免中岩墙出现错动,在模拟计算中对隧道开挖断面宽度 80% 的净距隧道的中岩墙进行注浆加固,并对加固后不同开挖方式的中岩墙塑性应力云图进行分析,如图 9 所示。从图 9 可以看出,注浆加固后,土体强度显著提高,中岩墙塑性应力区明显分散开来,这说明对中岩墙进行注浆加固处理可以避免中岩墙错动,减小后行洞开挖对先行洞的影响。采用环形开挖留核心土法开挖对中岩墙土体的影响最小,采用 CRD 法开挖的次之,采用 CD 法开挖对中岩墙土体影响最大,且其塑性应力区分布范围也最广。参考小净距隧道中岩墙加固相关文献^[11-13],对加固后的土体力学等效参数进行强度折减后的取值,见表 3。

表 3 按隧道开挖断面宽度 80% 的净距开挖的中岩墙加固后的土体力学等效参数表

Table 3 Equivalent parameters of soil mechanics for rock wall after reinforcement in the case of a 0.8 b interval

加固方案	泊松比	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
注浆加固	0.35	21	0.65	55	27

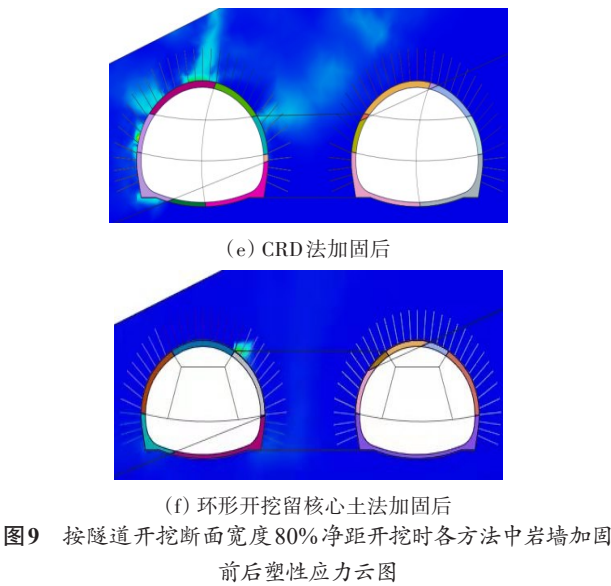
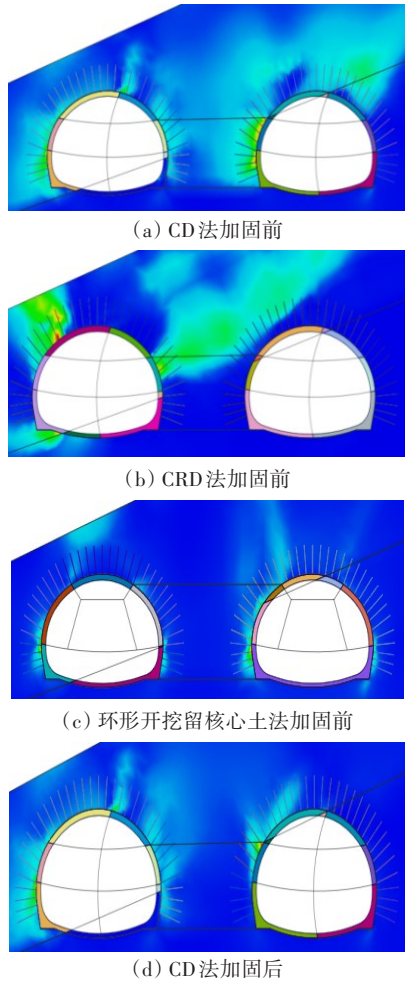


Fig. 9 Plastic stress nephogram of rock wall before and after reinforcement in the case of 0.8 b interval

通过在模型中的衬砌拱顶和仰拱处设置监测点,分别提取了中岩墙加固前后 CD 法、CRD 法和环形开挖留核心土法在不同开挖步骤下的拱顶沉降值和仰拱隆起位移,如图 10 所示。

通过对中岩墙加固前后不同开挖方式的拱顶沉降和仰拱隆起位移进行分析可知:CD 法与 CRD 法的前两步开挖步骤相同,拱顶沉降和仰拱隆起的变形有重叠。在中岩墙加固前,CD 法、CRD 法和环形开挖留核心土法的左洞最大拱顶的沉降值分别为-7.33、-8.73 和-7.63 mm;右洞最大拱顶沉降值分别为-9.37、-9.83 和-9.46 mm;最大仰拱隆起位移值分别为 6.67、7.30 和 7.74 mm。隧道拱顶沉降值、仰拱隆起位移的速率和大小均满足《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)的规定,但数值均偏大,故对中岩墙进行注浆加固处理。在中岩墙加固后,左洞最大拱顶沉降值分别为-5.96、-7.70 和-6.91 mm;右洞最大拱顶沉降值分别为-8.9、-9.30 和-8.99 mm;最大仰拱隆起位移分别为 6.56、7.12 和 7.52 mm,均符合国家标准且与现场监测值相吻合。中岩墙加固后,拱顶沉降明显减小,CD 法、CRD 法和环形开挖留核心土法的最大沉降值降幅分别为 18.0%、12.0% 和 9.5%。中岩墙加固后的仰拱隆起比中岩墙加固前的略有改善,但效果不明显。

采用环形开挖留核心土法开挖遂道左右两侧的导坑时,拱顶沉降值的增幅分别为 40% 和 35%。核心土开挖后,拱顶沉降逐渐减小。在整个开挖过程中,拱顶沉降呈现出先增大、再减小的“V”型曲线型趋势。二次衬砌支护后,仰拱隆起有所减小,降幅为 15%。这些都说明二次衬砌能有效地减小围岩变

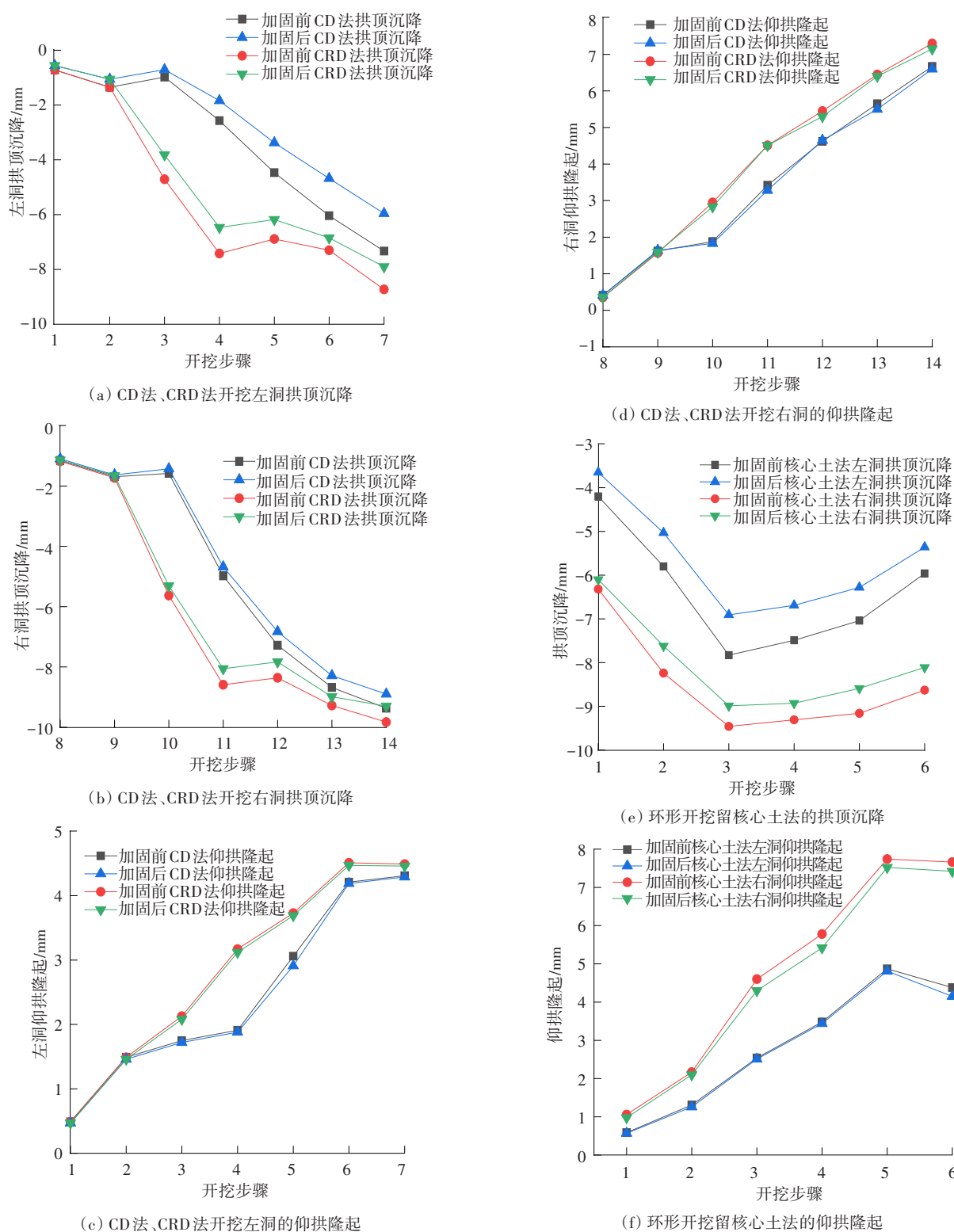


图10 不同开挖方式的拱顶沉降和仰拱隆起图

Fig. 10 Effects of excavation methods on the arch settling, and abutment uplift values

形。

4 结论与建议

本研究通过Midas GTS NX软件进行数值模拟，

以重庆杨家坪浅埋小净距隧道工程为依托，在确定最佳合理净距的基础上，采用不同开挖方式，分析在中岩墙加固前后对偏压小净距隧道围岩应力、位移的影响，得出以下结论：

1) 塑性区主要分布在强风化页岩夹砂岩，围岩

等级对塑性区有很大影响。随着净距的不断增大,塑性区逐渐减小。当净距为隧道开挖断面宽度的80%时,塑性区出现了分离,应力集中区域明显减小。从施工安全角度考虑,建议此类小净距隧道采用大于隧道开挖断面宽度80%的净距进行开挖,且先开挖浅埋侧较为安全。

2) 随着净距的不断增大,中岩墙水平位移逐渐减小。与其他开挖方式相比,采用CD法开挖的位移降幅最大,为39%。

3) 与围岩应力、拱顶沉降相比,中岩墙加固前后仰拱隆起未有明显变化。因此,加固前后的仰拱隆起变化不能评判不同开挖方式的优劣。

4) 塑性应力范围在中岩墙加固后明显减小,这说明对小净距隧道中岩墙进行加固可提高土体强度。与其他开挖方式相比,中岩墙加固后采用CD法开挖的拱顶沉降值最大,为1.37 mm。

5) 综合考虑中岩墙水平位移、塑性应力区变化、拱顶沉降和仰拱隆起,在此类隧道开挖中,CD法优于环形开挖留核心土法和CRD法。选择合理的开挖方式能有效减小后行洞开挖对先行洞的影响。

参考文献(References):

- [1] 夏梦然.小净距隧道围岩稳定性的影响因素[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(5):73-80.
XIA Mengran. Influencing factors of surrounding rock stability of small clear distance tunnels [J]. Chinese Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English), 2021, 43(5): 73-80.
- [2] 张海兵,林锋,秦阳.层状围岩中小净距隧道合理净距研究[J].公路,2020,65(9):309-313.
ZHANG Haibing, LIN Feng, QIN Yang. Study on reasonable clear distance of small and medium clear distance tunnel in layered surrounding rock [J]. Highway, 2020, 65(9): 309-313.
- [3] 邵珠山,王孟辉.黄土地区非对称小净距隧道的合理错距研究[J].长江科学院院报,2022,39(10):80-87.
SHAO Zhushan, WANG Menghui. Reasonable offset of asymmetric tunnel with small clear distance in loess area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10): 80-87.
- [4] 唐勇三.大断面小净距隧道围岩压力的数值模拟研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):69-75.
TANG Yongsan. The ground pressure of neighbor tunnel with large section based on numerical simulations [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 69-75.
- [5] 龚建伍.扁平大断面小净距公路隧道施工力学研究[D].上海:同济大学,2008.
GONG Jianwu. Study on construction mechanical behavior of highway tunnel with large section and small spacing [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [6] 凌同华,谢伟华,周凯,等.施工顺序对浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性影响的分析[J].公路与汽运,2016(4):263-267.
LING Tonghua, XIE Weihua, ZHOU Kai, et al. Analysis of the influence of construction sequence on the stability of surrounding rock of shallow-buried unsymmetrical pressure tunnel with small clear distance [J]. Highways & Automotive Applications, 2016(4): 263-267.
- [7] 叶冬明.不同围岩类别小净距隧道施工数值仿真分析[D].杭州:浙江大学,2010.
YE Dongming. Analysis on numerical simulation of parallel tunnel in different rocks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [8] 彭卫平,廖建三.广州地区建筑桩基设计参数分析与选取[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):1032-1036.
PENG Weiping, LIAO Jiansan. Analysis and selection of building pile design parameter in Guangzhou [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 1032-1036.
- [9] 周波,金福喜,张可能.某公路边坡稳定性分析与支护方案的选择[J].广东建材,2010,26(2):24-27.
ZHOU Bo, JIN Fuxi, ZHANG Keneng. Stability analysis and support scheme a selection of a highway slope [J]. Guangdong Building Materials, 2010, 26(2): 24-27.
- [10] 何川,李玉文,姚勇.公路小净距隧道[M].北京:人民交通出版社,2015.
HE Chuan, LI Yuwen, YAO Yong. Small clear distance highway tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [11] 姚勇,何川,谢卓雄.双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J].岩土力学,2007,28(9):1883-1888.
YAO Yong, HE Chuan, XIE Zhuoxiong. Study of mechanical behavior and reinforcing measures of middle rock wall of parallel tunnel with small interval [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1883-1888.
- [12] 刘芸,周玉兵.软岩小净距隧道中夹岩柱分区及加固方法研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):373-379.
LIU Yun, ZHOU Yubing. Research on the partition and

- YOU Huangyang, XU Lunhui. Optimization on signal timing for preventing urban isolated intersection which contains short sections from overflowing [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(1): 147-152.
- [9] 李伟. 短连线交叉口信号配时优化[J]. 公路, 2017, 62(1): 164-168.
- LI Wei. Optimization of signal timing for short line intersection[J]. Highway, 2017, 62(1): 164-168.
- [10] 杨晓芳, 芮丽丽. 基于车流无缝衔接的短连线交叉口协调控制方法[J]. 系统工程, 2010, 28(11): 116-122.
- YANG Xiaofang, RUI Lili. Control of coordination of short-linked intersections based on the seamless connection [J]. Systems Engineering, 2010, 28(11): 116-122.
- [11] 肖秀春, 徐建闽. 近距离相邻交叉口信号协调控制模型研究[J]. 公路与汽运, 2011(1): 56-59.
- XIAO Xiuchun, XU Jianmin. Research on signal coordination control model of adjacent intersections [J]. Highways & Automotive Applications, 2011(1): 56-59.
- (责任编辑: 李脉; 校对: 罗容; 英文编辑: 刘至真)

(上接第75页)

- reinforcement method of rock pillars in soft rock small clear distance tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 373-379.
- [13] 扈萍, 马梁, 李萌, 王君鹏, 张西文. 小净距隧道后行洞开挖对先行洞的变形影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 246-251, 272.
- HU Ping, MA Liang, LI Meng, WANG Junpeng, ZHANG Xiwen. The influence of the excavation of the trailing hole of the small clear distance tunnel on the deformation of the leading hole [J/OL]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2022(3): 246-251, 272.
- (责任编辑: 李脉; 校对: 罗容; 英文编辑: 李岳林)

(上接第90页)

- 892-899.
- LIANG Minfei, ZHANG Zhe, LI Ce, et al. Three-dimensional mechanical analysis model and verification of shield tunnels with double-layer linings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 892-899.
- [13] 黄戡, 詹艳云, 马启昂, 等. 基于正交设计的IV, V级围岩相似材料[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 92-97.
- HUANG Kan, ZHAN Yanyun, MA Qi'ang, et al. Similar materials of IV, V grade rock based on orthogonal design [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(1): 92-97.
- [14] 邓衍, 刘辉, 刘耀坤, 等. 安平隧道顶端溶洞对其围岩稳定性的影响[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 82-86.
- DENG Yan, LIU Hui, LIU Yaokun, et al. The influence of hidden Karst cave at the top of Anping tunnel on the stability of surrounding rock in Karst area [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 82-86.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 刘至真)