

奔龙坪偏压连拱隧道施工方案比选及监测分析

李 辉¹, 杜莎芳¹, 李 恒¹, 宋战平¹, 师伯泰²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中铁九局集团有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

摘要: 针对在建龙瑞高速公路奔龙坪浅埋傍山大断面双连拱隧道施工稳定性问题, 基于数值仿真模拟试验, 分析了大断面双连拱隧道不同施工方案引起的隧道-支护结构位移及应力的变化, 研究了不同施工步序参数条件下的隧道拱顶沉降、净空收敛位移及连拱隧道中隔墙水平位移的变化特性; 分析了不同施工步序参数条件下的隧道支护结构应力状况的变化。基于隧道-支护结构位移及应力的变化特点, 推荐了隧道最优的施工方案及施工步序参数。跟踪隧道施工进行的现场监测表明: 奔龙坪隧道采用“先浅埋侧而后深埋侧隧道, 先、后行隧道开挖距离相差 2 倍隧道跨度”的施工方案合理、可行, 保证了隧道的施工的安全。

关键词: 双连拱隧道; 浅埋偏压; 数值试验; 施工方案; 现场监测

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0485-07

Construction sequence comparison and numerical analysis of Benlongping shallow and unsymmetrical pressure multi arch tunnel

LI Hui¹, DU Sha fang¹, LI Heng¹, SONG Zhan ping¹, SHI Botai²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Railway No. 9 Group Co, Ltd, Shenyang 110013, China)

Abstract: In the tunnel and underground engineering construction, different construction sequence will cause a huge difference in the tunnel distortion and stress characteristics. For the construction stability problems of Long Rui Highway under construction, Benlongping shallow hillside large cross section double arch tunnel, based on numerical simulation testing, the changes of the support structure displacement and stress of the large span of double-arch tunnel in different construction program are analyzed, the crown settlement, convergence clearance displacement and changing characteristics of the level of the middle partition wall with construction step sequence under different conditions of construction step sequence parameters are analyzed. The variation of tunnel support structure under different conditions of construction step sequence parameters is studied. Based on the variation characteristics of the displacement and stress of the tunnel support structure, the optimal construction scheme of the Ben Long Ping shallow double-arch tunnels under unsymmetrical pressure is recommended, and the construction step sequence parameters are determined. The monitoring of the displacement and stress of the track tunnel construction show that the construction scheme of the shallow double-arch tunnels under unsymmetrical pressure with “first shallow buried tunnel side after the deep side of the tunnel, the excavation distance of the former tunnel and later tunnel difference of 2 times the span of the tunnel” is reasonable and feasible, so the safety of the construction of shallow buried and unsymmetrical large section arch tunnel is guaranteed.

Key words: double-arch tunnel; shallow and unsymmetrical pressure; numerical simulation; construction sequence; monitoring data

连拱隧道具有优化线型、占地面积小的优点^[1-5], 所以在公路隧道的建设过程中, 越来越受到工程师的青睐。浅埋偏压连拱隧道的施工工序比较繁杂, 而且在开挖的过程中, 围岩受到多次扰动, 围岩的应力和支护结构的受力状况较为复杂。虽然现阶段我国在连拱隧道的设计和施工方面^[6-8]

都已经有了了一部分的经验, 并且国内外的一些专家在施工工艺和施工方法上做了很多的调整, 也取得了不少的经济及社会效益。王胜辉以管箕湾连拱隧道为工程依托, 模拟了两种不同的施工工序, 通过支护强度, 围岩变形和整体稳定性三个因素来比较不同工序对中墙的影响。得出非对称开挖会

收稿日期: 2016-08-06

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51578447)

第一作者: 李 辉(1963—), 女, 学士, 副教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。E-mail: lihyt@xauat.edu.cn

通讯作者: 宋战平(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程领域的教学和科研工作。E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

导致中墙产生较大的偏心荷载。胡学兵^[9]以偏压连拱隧道为工程依托,模拟分析了几种不同顺序施工方法的力学特性,得出了先开挖深埋侧后开挖浅埋侧施工顺序最合理的结论。赵丹^[10]对六种不同坡度的连拱隧道二维模型进行对比分析,利用数值模拟软件,建立了 6 种坡度下的连拱隧道二维模型。得出结论,若地表坡度为 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 时,适宜先开挖浅埋侧;若地表坡度达到 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时,依据中墙的稳定确定开挖方案,若中墙稳定,适宜先开挖浅埋侧,若中墙不稳定,适宜先开挖深埋侧。但是以往学者只是研究了偏压地形作用下隧道支护结构受力和围岩变形状况,而没有考虑边坡给连拱隧道带来的影响。然而连拱隧道往往因为选线原因,大多处于高陡边坡附近,存在严重的偏压现象,偏压会影响隧道结构的受力情况,而隧道的开挖情况也会导致边坡的稳定性发生变化^[11-13]。以往对连拱隧道的研究并不一定适用于偏压地形情况,且现场情况复杂多变,不利因素多而不可预见,因此每一个工程实例在交通事业中都具其独特的作用。

论文依托龙瑞高速公路在建奔龙坪隧道工程,根据工程实际的地形地质地貌状况利用 Midas/NX 软件建立非常符合实际情形的三维模型,对四种开挖技术进行模拟对比分析得出最佳开挖技术,结合施工过程中采集的数据和模拟分析得出的数据进行对比,进一步确认选定方案是否合理,为类似工程的设计和施工提供借鉴价值。

1 隧道计算模型及计算参数

奔龙坪隧道为连拱隧道,隧道隧址地形切割强烈,高差极大。隧道自然坡度一般为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,局部大于 50° ,属结构性偏压隧道。地勘报告数据显示,隧道周边的围岩不稳定,岩体破碎,产状凌乱,风化性很强,节理十分发育,经设计取 V 级围岩进行支护,地层岩性为:地表覆盖层为第四系残坡积粉质黏土,下伏基岩为强风化与中风化寒武系砂质板岩、片麻岩。典型断面截面图如图 1 所示。

计算模型范围:依据弹塑性理论知识的界定,所能影响到的范围尺度。结合地形地貌的实际情况,水平方向(X 轴正方向朝深埋侧)长度取隧道跨度的 5 倍,取 175 m,垂直方向(Z 轴正方向朝上)隧道到底部边界约为隧道洞径的 3.5 倍,取 35 m。在静力状态下进行模拟时,只考虑在自重作用下隧道开挖给围岩带来的影响,构造应力作用

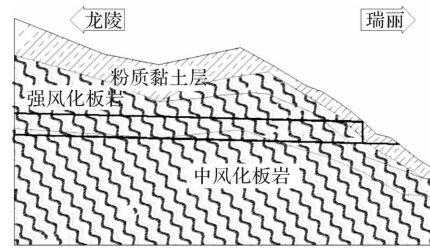
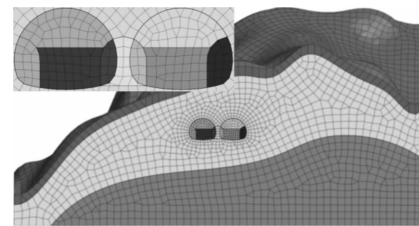


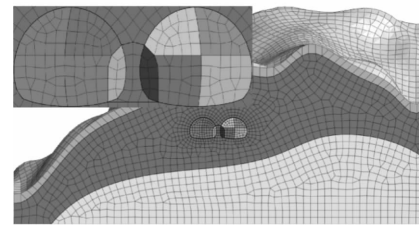
图 1 典型断面截面图

Fig. 1 The typical cross-section

忽略不计,所以模型的四周边界设置为水平约束,底面边界设置为水平和竖直约束。模型选用六面体单元模拟,衬砌结构为二维板单元,锚杆为一维植入式桁架单元;根据实际情况,模型考虑土体的分层,共分为三层。计算模型示意图如图 2。



(a) 方案一、二地形结构模型示意图



(b) 方案三、四地形结构模型示意图

图 2 地形-结构模型

Fig. 2 Layer-structural model

在数值模拟分析过程中,地层与支护结构物理力学参数基于刘可^[14]等相同工程背景下的地层与支护结构物理力学参数,简述如下:围岩材料选用莫尔-库仑模型,衬砌均选用弹性模型,锚杆的设置是为了提高加固区的围岩参数^[15-16]。围岩参数结合奔龙坪隧道设计说明并参照《公路隧道设计规范》(JTGD70-2004)综合考虑确定。地层与支护结构的物理力学性能指标如表 1 所示。

根据奔龙坪隧道实际状况和施工设计方案,本次分析工讨论四种施工方案,具体如下:

方案一:隧道采用三导洞法施工(见图 3(a)),中导洞开挖完成后,左幅正洞先开挖,左幅正洞超前 48 m,开挖顺序为 L1、L2、L3、R1、R2、R3。

方案二:隧道采用三导洞法施工(见图 3(a)),中导洞开挖完成后,右幅正洞先开挖,右幅正洞超前 48 m,开挖顺序为 R1、R2、R3、L1、L2、L3。

表 1 地层与支护结构的物理力学性能指标

Tab. 1 Physico-mechanical parameters of primary support and strata

材料名称	弹性模量/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比	粘聚力/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	内摩擦角/ $(^\circ)$
粉质黏土	1.5E+4	19	0.4	60	19
强风化板岩	1.2E+6	20	0.38	120	20
中风化板岩	1.5E+6	20	0.35	180	25
初期支护	2.85E+7	25	0.2	—	—
二次衬砌	0.2E+9	78	0.3	—	—
锚杆	2.95E+8	25	0.3	—	—
中隔墙	3.25E+7	27	0.2	—	—

方案三：隧道采用中导洞法施工(见图 3(b))，中导洞开挖完成后，正洞下台阶外侧先开挖，开挖顺序为 L1、L2、L3、L4、R1、R2、R3、R4。

方案四：隧道采用中导洞法施工(见图 3(b))，中导洞开挖完成后，正洞下台阶内侧先开挖，开挖顺序为 L1、L2、L4、L3、R1、R2、R4、R3。

隧道工程工作量大，危险系数高，需要的人力物力教多，不可能一次贯通整个隧道，因此在数值模拟过程中，分阶段进行开挖，根据经验值，取 4 m 作为一个开挖阶段，例如，第一个开挖步为：开挖左洞上台阶前 4 m，第二个开挖步为：第一个施工段中开挖过的左洞上台阶部分进行初次支护→开挖下台阶前 4 m→开挖上台阶 5~8 m。等等，以此类推。

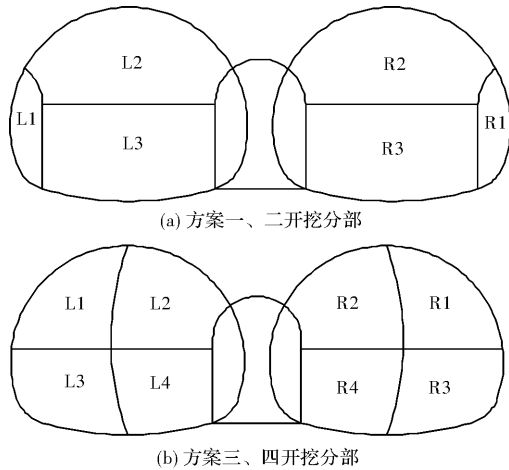


图 3 隧道开挖分部

Fig. 3 Excavation subarea of tunnel

2 计算结果及分析

2.1 位移分析

2.1.1 不同施工方案下主洞拱顶下沉情况

图 4 和图 5 为左右侧正洞的拱顶沉降与开挖步之间的关系曲线，可以看出随着开挖的进行，拱顶发生沉降。对于方案一、方案二，中墙砌筑完成

之前，方案一和方案二的左右洞沉降一致。开挖进行到第 30 步，方案一开挖 L1，左洞拱顶开始迅速沉降，右洞则较为平缓，而方案二开挖 R1，两洞拱顶沉降趋势正好与方案一相反。方案三和方案四对左右侧拱顶沉降的影响基本相同，但方案四略大于方案三。沉降速率变化最大的区域均发生在掌子面附近，掌子面开挖也会影响相邻隧道正洞的拱顶沉降；右洞沉降值大于左洞。从沉降量上来看，四个方案左洞拱顶最大沉降值分别为：-4.43 mm、-4.85 mm、-3.81 mm、-3.88 mm。而右洞拱腰水平收敛最大值分别为：-6.17 mm、-5.89 mm、-4.85 mm、-4.94 mm。由此方案三更合理，即中导洞法先开挖下台阶外侧再开挖下台阶内侧较好。

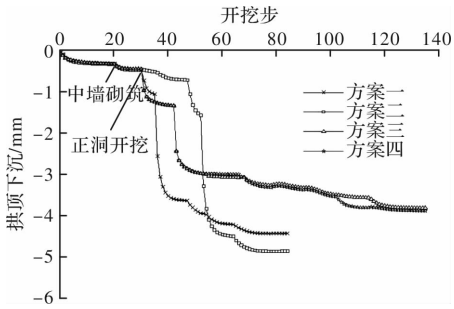


图 4 左洞拱顶沉降与开挖步关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between settlement and excavation step for the left cavern of the tunnel

2.1.2 不同施工方案下主洞水平收敛情况

随着隧道的开挖进行，断面开始向附近的临空面位移收敛。只有围岩本身位移较小或者隧道四周的收敛位移向同一个方向，才能保证隧道及其支护结构安全稳定。由图 6 和图 7 可以很明显的发现，主洞开挖顺序对其水平收敛影响很大，每种开挖顺序都有自己独特的收敛特征。连拱隧道的水平收敛状况明显不同于分离式隧道，连拱隧道的水平收敛波动很显著，且左洞的波动范围均小于右洞。四个方案左洞拱腰水平收敛最大值分别为：

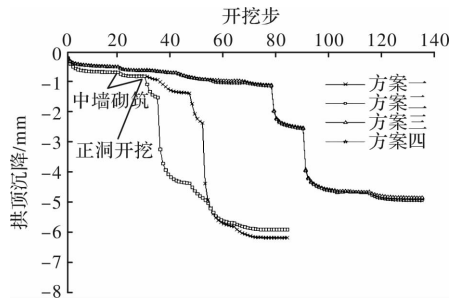


图5 右洞拱顶沉降与开挖步关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between settlement and excavation step for the right cavern of the tunnel

—0.40 mm、—1.31 mm、—1.86 mm、—2.11 mm. 而右洞拱腰水平收敛最大值分别为: 0.97 mm、1.73 mm、2.02 mm、3.87 mm. 方案一左洞围岩位移最小, 且隧道周边位移收敛差异较小. 由此方案一较为合理, 即三导洞法先开挖浅埋侧再开挖深埋侧较好.

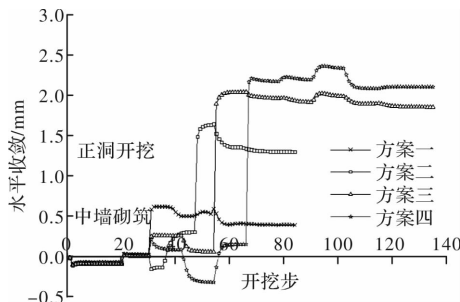


图6 左洞水平收敛与开挖步关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of horizontal convergence and excavation step for the left cavern of the tunnel

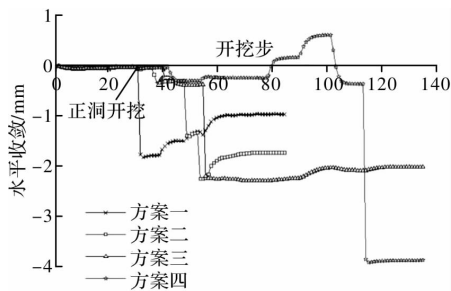


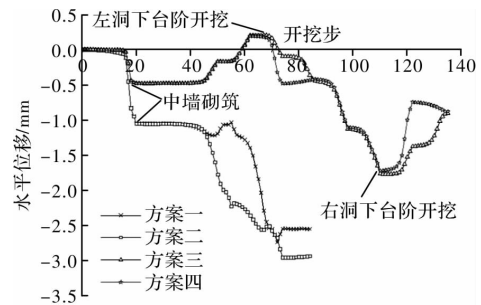
图7 右洞水平收敛与开挖步关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of horizontal convergence and excavation step for the right cavern of the tunnel

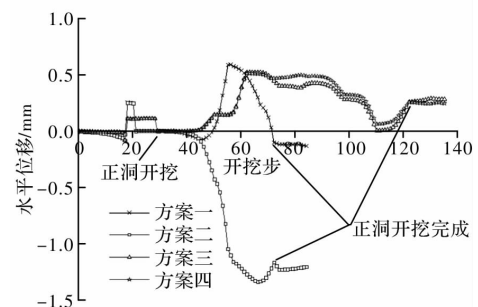
2.1.3 不同施工方案下中隔墙水平侧向位移情况

由图8可以看出, 方案二水平位移量明显大于其他三个方案, 为最不利方案. 方案一、三、四的中隔墙上部水平侧向位移均朝向浅埋侧, 而下部水平侧向位移则朝向深埋侧. 图8也可以发现中隔墙砌筑完成以后, 随着开挖的一步步推进, 位移变化越来越复杂, 但中隔墙两边位移变化越小, 它的受力情况就越小. 中隔墙上部最大位移分别为:

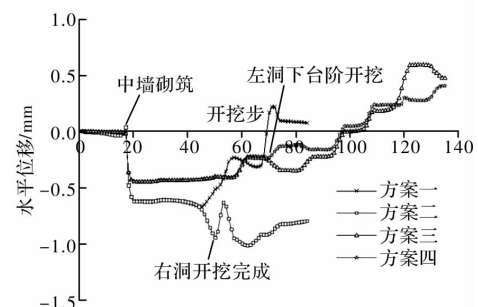
—2.55 mm、—2.93 mm、—0.91 mm、—0.88 mm; 中部分别为: —0.13 mm、—1.20 mm、0.28 mm、0.25 mm; 下边分别为: 0.08 mm、—0.79 mm、0.47 mm、0.41 mm. 由此方案一优于方案二、方案三, 即采用三导洞法, 先开挖浅埋侧主洞, 后开挖深埋侧主洞较好.



(a) 上部



(b) 中部



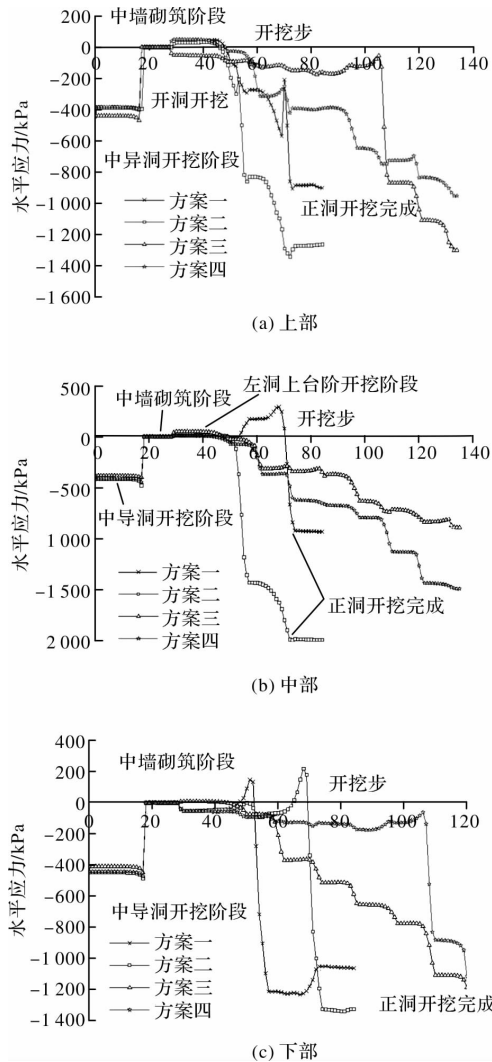
(c) 下部

图8 中隔墙水平侧向位移与开挖步关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of horizontal lateral and excavation step for the middle-wall

2.2 应力分析

对于中隔墙, 方案一、方案二、方案三、方案四的最大主应力分别为: —0.29 MPa、—0.22 MPa、0.05 MPa、0.05 MPa, 最小主应力为: 1.06 MPa、1.99 MPa、1.42 MPa、1.49 MPa. 不管怎样进行开挖, 中隔墙的局部一定会产生拉应力, 若拉应力值超过一定的界限, 中墙的稳定就会受到威胁. 从图9可以看出, 四种施工方案中, 方案一的应力最小, 因此方案一的施工顺序更有利于中墙的稳定, 即采用三导洞法, 先开挖浅埋侧主洞, 后开挖深埋侧主洞较好.

图9 中隔墙内部应力 σ_x 与开挖步关系曲线Fig. 9 Relationship curves of internal forces- σ_x and excavation step for the middle-wall

从隧道围岩、中隔墙的变形情况、支护结构的应力、位移状况等的对比分析,可以认为中导洞法先施工浅埋侧主洞后施工深埋侧主洞方案比其他三种方案更合理,先开挖浅埋侧主洞可以减小地形偏压带来的不利的影响,有利于缓解隧道开挖过程中,中隔墙及其初期支护结构的受力状态,有利于施工安全有序的进行,但不能忽视左洞四周围岩的支护。

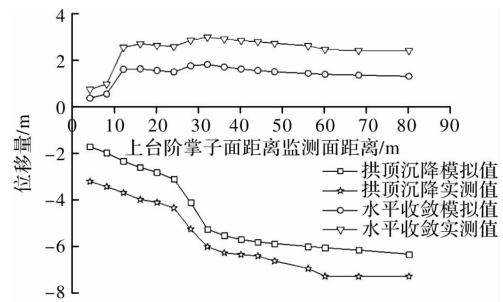
3 监控量测数据分析

3.1 位移比较

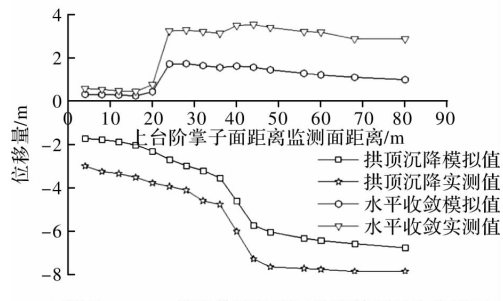
为了保证工程能够安全有序的进行,在施工过程中对各个为了能更好的掌控偏压隧道在施工过程中的变形特点,在施工过程中对各个阶段都进行了相应的监控测量,选取 K21+032、K20+995 断面作为监测断面,对监测断面分别进行了拱顶沉降和水平收敛的监测。拱顶沉降和水平收敛监

测结果和数值模拟的结果进行对比,对比结果如图 10 所示。

由于深埋侧初支受力较大,且应力集中分布在深埋侧,所以对右洞进行监测。虽然数据上有所偏差,但拱顶沉降和拱腰水平收敛的趋势基本一致。在开挖的初始阶段位移曲线基本呈线性变化,开挖进行到一定阶段,不管是拱顶沉降还是拱腰水平收敛都趋于稳定。



(a) 断面K21+032模拟数据和现场监测数据对比曲线图



(b) 断面K20+995模拟数据和现场监测数据对比曲线图

图10 模拟数据和现场监测数据对比曲线图

Fig. 10 Relationship curves of comparison numerical simulation and field monitoring results

3.2 应力比较

在实际施工的过程中,不仅对围岩的变形情况进行监测,而且利用压力盒、应变计对围岩周边的压力以及混凝土衬砌的内力、钢筋计监测钢拱架内力等进行监测。将监测结果整理成受力状态,如下图 11~13 所示。

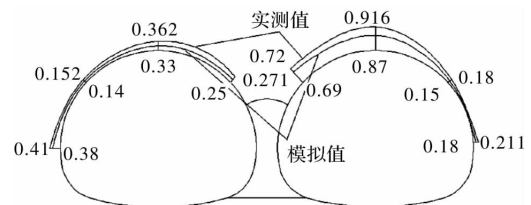


图11 典型断面围岩应力状态(单位: MPa)

Fig. 11 Rock stress state in typical section(unit: MPa)

从图 11~13 可知,围岩应力最大值和混凝土初支内力最大值均出现在右洞拱顶,且右洞的受力情况不均匀,而钢拱架内力最大值则出现在左洞。造成这种受力情况是因为,中墙上部的土层厚

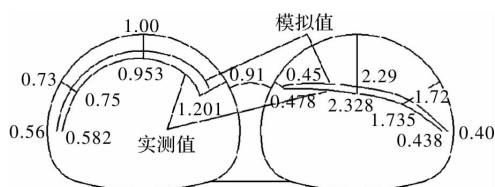


图12 典型断面混凝土初支内力状态(单位: MPa)

Fig. 12 Concrete internal force state in typical section(unit: MPa)

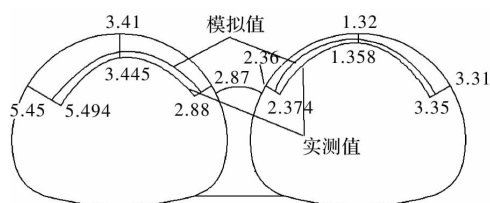


图13 典型断面钢拱架内力状态(单位: MPa)

Fig. 13 Steel arch internal force state in typical section(unit: MPa)

度大于左洞和右洞,而由于地形高差极大,导致围岩受到不均匀的压力。加之,边坡的滑移趋势不仅对衬砌结构造成不均衡的推力,致使右洞混凝土初支应力变大;而且带动着钢拱架一起滑移,对左洞围岩造成挤压,使得左侧钢拱架受力大于右侧。

在数值模拟的过程中,假定是在理想条件下的连续介质的各向同性的弹性体,但在实际的工程中,岩体是属于非连续的各向异性的介质,而且在数值模拟过程中忽略了岩体中裂缝和构造应力,因此模拟结果和实际的监测数据存在一定的差距,但通过把数值模拟结果和监测数据进行对比分析,可知数据上的差距并不影响规律的正确性。

根据《GB50911-2013 城市轨道交通工程监测技术规范》,拱顶沉降控制值为10~20 mm,支护结构净空收敛控制值为30 mm,奔龙坪隧道在模拟和监测过程中所得数据都远远小于控制预警值。

4 结论

针对龙瑞高速公路在建奔龙坪隧道工程开挖顺序的问题,采用数值模拟试验和现场监测相结合的方法,研究浅埋偏压大断面双连拱隧道的施工力学效应和浅埋、偏压双连拱隧道-支护结构的位移变化特性,通过研究的研究,可得出如下的研究结论:

(1)浅埋偏压双连拱隧道,在中导洞施工完成后,先施工浅埋侧主洞后施工深埋侧主洞的施工安全、可行,可满足浅埋偏压双连拱隧道的施工安全。

(2)浅埋偏压大断面连拱隧道施工中,深埋侧主洞的拱顶下沉位移较浅埋侧隧道大,因此,施在深埋侧主洞开挖中需要采用合理、可行的超前支护措施,以控制和减小深埋侧隧道的拱顶沉降位移。

(3)中隔墙是双连拱隧道结构稳定的关键,在施工过程中,中隔墙局部产生了拉应力,为之设计中应加强中隔墙的配筋,确保结构的安全。

跟踪现场施工进行的浅埋偏压连拱隧道变形和受力的监测与数值模拟所反映的规律基本一致,但位移和受力的数值相差较大,为确保浅埋偏压双连拱隧道的设计、施工安全,建议施工加强监测,根据监测数据反馈修改设计和施工。

参考文献 References

- [1] 刘涛,沈明荣,袁勇. 偏压连拱隧道围岩稳定性模型试验与数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(4): 460-465.
LIU Tao, SHEN Mingrong, YUAN Yong. Model test and 3D numerical simulation study on wall rock mass stability of double-arch tunnel subject to partial press[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2008(4): 460-465.
- [2] 段海澎,徐干成,刘保国. 富溪偏压连拱隧道围岩与支护结构变形和受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S2): 3763-3768.
DUAN Haipeng, XU Gancheng, LIU Baoguo. Analysis of deformation of surrounding rock and stress characteristics of supporting structure of FuXi twin tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(S2): 3763-3768.
- [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): 3787-3795.
JI Maowei, WU Shunchuan, GAO Yongtao, et al. Construction monitoring and numerical simulation of multi-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 32(12): 3787-3795.
- [4] 赵阳,王伟笔,杨昌能. 偏压浅埋连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 中南公路工程, 2005, 30(2): 181-184.
ZHAO Yang, WANG Weibi, YANG Changneng. 3D numerical simulation for construction of shallow double arched tunnel under bias pressure[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(2): 181-184.
- [5] 李术才,王书法,朱维申,等. 台湾软弱岩盘隧道变形预估系统数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2001(5): 540-543.

- LI Shucai, WANG Shufa, ZHU Weishen, et al. Research on numerical simulation of deformation of soft rockmass tunnels in Taiwan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(5): 540-543.
- [6] 朱正国, 乔春生, 高保彬. 浅埋偏压连拱隧道的施工优化及支护受力特征分析[J]. 岩土力学, 2008(10): 2747-2752, 2758.
- ZHU Zhengguo, QIAO Chunsheng, GAO Baobin. Analysis of construction optimization and supporting structure under load of shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(10): 2747-2752, 2758.
- [7] 周玉宏, 赵燕明, 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.
- ZHOU Yuhong, ZHAO Yanming, CHENG Chongguo. Optimum analysis on the construction pressure for joint arch tunnels in partial pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 679-683.
- [8] 邓少军, 阳军生, 张学民, 等. 浅埋偏压连拱隧道施工数值模拟及方案比选[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 940-943.
- DENG Shaojun, YANG Junsheng, ZHANG Xuemin, et al. Numerical simulation of construction and excavating scheme for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 940-943.
- [9] 胡学兵, 乔玉英. 偏压连拱隧道施工方法数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 374-378.
- HU Xuebing, QIAO Yuying. Numerical analysis of construction method for partial press double-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(3): 374-378.
- [10] 王胜辉, 杜小平, 袁勇, 等. 不同开挖工序对连拱隧道中墙的影响[J]. 岩土力学, 2004(7): 1102-1106.
- WANG Shenghui, DU Xiaoping, YUAN Yong, et al. Effects of different excavating sequences on mid-partition of double-arched tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(7): 1102-1106.
- [11] 刘元雪, 蒋树屏, 赵尚毅. 浅埋黄土连拱隧道施工方案优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 944-947.
- LIU Yuanxue, JIANG Shuping, ZHAO Shangyi. Optimizing analysis for construction schemes of shallow multi-arch loess tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 944-947.
- [12] 胡庆安, 夏永旭, 王文正. 双连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005(1): 48-50, 76.
- HU Qingan, XIA Yongxu, WANG Wenzheng. 3D numerical simulation on double-arch tunnel's construction process[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2005(1): 48-50, 76.
- [13] 申玉生, 高波. 双连拱隧道施工偏压力学特性的监测与分析研究[J]. 岩土力学, 2006(11): 2061-2065.
- SHEN Yusheng, GAO Bo. Site monitoring and analytical research on mechanical characteristics under construction partial press in double-arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(11): 2061-2065.
- [14] 李辉, 刘可, 宋战平, 等. 偏压连拱隧道结构荷载计算及监测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017(2): 422-427.
- LI Hui, LIU Ke, SONG Zhanping, et al. Calculation of biased arch tunnel structure load and analysis of field monitoring[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017(2): 422-427.
- [15] 张志强, 何川. 偏压连拱隧道优化施工的研究[J]. 岩土力学, 2007(4): 723-727, 732.
- ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Research on optimized construction procedure for double-arched tunnel in unsymmetrical pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(4): 723-727, 732.
- [16] 丁文其, 王晓彤, 李志刚, 等. 龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(22): 4042-4047.
- DING Wenqi, WANG Xiaoxing, LI Zhigang, et al. Optimal analysis of construction schemes for shallow large span longshan twin tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(22): 4042-4047.
- [17] 王述红. 大跨度浅埋隧道工程地质特征及自稳能力分析[J]. 东北大学学报, 2005(11): 94-97.
- WANG Shuhong. Analysis of engineering geological characteristics and self stability of shallow and unsymmetrical pressure tunnel[J]. Journal of Northeastern University, 2005(11): 94-97.
- [18] 许研, 王述红, 朱浮声. 大跨度岩体隧道工程块体滑落的概率分析[J]. 东北大学学报, 2003(6): 593-596.
- XU Yan, WANG Shuhong, ZHU Fusheng. Probability analysis of block sliding in large span rock tunnel engineering[J]. Journal of Northeastern University, 2003(6): 593-596.

(编辑 桂智刚)