

浅埋偏压大断面隧道施工优化及受力特征分析^{*}

宋战平^{1,2}, 王童¹, 周建军², 于文山²

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2.中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘 要:大断面浅埋偏压隧道洞口段施工困难, 风险高; 且受洞口复杂地质条件和施工空间效应影响, 隧道支护结构变形和受力特性复杂, 施工控制难度高。针对在建的宝兰客专小垭坪隧道出口浅埋偏压段的施工稳定性问题, 采用数值模拟试验分析方法, 研究了三台阶+临时横撑施工中不同上、中、下台阶错开距离时隧道的施工动态特性, 分析了不同错开距离时隧道支护结构的变形和受力特点; 基于数值模拟试验确定了大断面偏压隧道洞口段的施工方案, 跟踪隧道施工进行的变形监测验证了推荐的三台阶+临时横撑施工中上台阶与中台阶错开 5 m, 中台阶与下台阶错开 10~15 m (即 1 倍洞径) 距离的施工参数经济、合理、可行, 保证了隧道施工的安全, 也为同类隧道工程的建设提供有益的借鉴和指导。

关键词:隧道工程; 偏压浅埋洞口; 数值分析; 施工参数; 变形特性

中图分类号: U25

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)02-0459-10

Analysis of Construction Optimization and Mechanical Characteristic of Shallow Large Section Tunnel

Song Zhanping^{1,2}, Wang Tong¹, Zhou Jianjun², Yu Wenshan²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, P.R.China; 2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau group Co. Ltd., Tianjing 300300, P.R.China)

Abstract: In the portal section of large section shallow tunnel under unsymmetrical pressure, the construction is hard and high-risk. It is caused by complex geological condition and spatial effect that the characteristics of deformation and stress in tunnel lining structure are complex, and the construction control is difficult. Stability of shallow bias tunnel section of Xiao Man-ping tunnel was analyzed with numerical simulation. Dynamic characteristics of construction and characteristics of deformation and stress in tunnel lining structure with three-step and temporary support method under different step staggered distance were researched. Based on the results of numerical simulation test, the construction scheme of large section biased tunnel entrance was established, the upper step staggers 5 meters with middle step, and the middle step staggers 10 to 15 meters with bottom step (as much as the diameter of the tunnel). Monitoring results of tunnel attest that the construction scheme is economical, reasonable and feasible. The result of the study not only ensures the safety of tunnel construction, but also provides useful reference and guidance for the construction of similar tunnel projects.

Keywords: tunnel engineering; shallow-buried biased opening section; numerical analysis; construction parameter; deformation characteristics

^{*} 收稿日期: 2016-03-14 (修改稿)

作者简介: 宋战平 (1974-), 男, 陕西蒲城县人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、隧道与地下工程方面的研究。

E-mail: songzhp@xauat.edu.cn

基金项目: 国家基金面上项目 (51578447); 渭南市科研发展计划项目 (2015KYJ3-1)

0 引言

近年来,我国隧道建设进入高峰期,出现大量在建和待建的山岭隧道工程,其中有许多隧道洞口的建设面临诸如浅埋、偏压和围岩等级差等工程难题^[1-4]。由于隧道洞口的施工工序较为繁多,在偏压的状态下围岩和隧道衬砌受力复杂^[5],而且围岩压力的变化受施工开挖进尺影响较大,存在明显的时空效应特征^[1],所以研究浅埋偏压大断面隧道洞口段开挖时支护结构和围岩的变形和受力特性,确定隧道经济、合理的建设方案,具有很大的研究价值和现实意义。

目前,国内对于采用 CD 法进行偏压隧道的开挖进行过许多的研究也得出了一套完整的理论体系^[6-7]。但是对于采用三台阶临时横撑法开挖偏压隧道时不同的上、中台阶的距离对围岩变形与支护结构受力影响和围岩变形与支护结构受力在隧道开挖过程中的变化趋势的研究尚属空白。文章以小曼坪隧道出口段为依托通过 MIDAS-NX 数值分析软件建立较为逼真的三维模型来探究采用三台阶临时横撑法进行开挖时不同的上、中台阶距离对围岩变形与支护结构受力的影响,在此基础上确定最优的台阶距离,并对周围岩土体和衬砌的应力分布和变形规律进行总结分析。

1 工程背景

1.1 工程概况

宝兰客专小曼坪隧道位于天水市北道区元龙镇,隧道出口 DK725+980~DK726+090 段,长为 110 m,隧道埋深为 2.2~8.6 m,隧道位于山体斜坡地带,岩等级为 V 级,地表覆盖第四系地层较厚,表层覆盖第四系全新统洪积粘质黄土、细角砾土、卵石土、漂石土及第四系全新统坡积碎石土,完整性较差;基底为燕山期花岗岩。隧道出口段存在隧道断面大、埋深浅、偏压严重、围岩性质差的工程特点,属于隧道与边坡相互影响的耦合地质体系统。隧道出口地形及断面形式如图 1~2 所示。

1.2 偏压隧道施工方案

偏压隧道的施工一般以 CD 法为首选方法,但 CD 法工序繁多、复杂,进度较慢;临时支撑的施作和拆除困难,施工成本较高;而且考虑到隧道所处的围岩的完整性较差,如果一次性开挖断面太大的

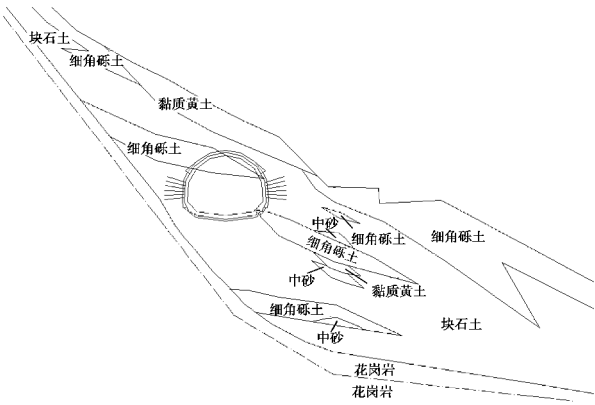


图 1 小曼坪隧道 DK726+030 断面剖面图

Fig.1 The DK726+030 cross-section of Xiao Man-ping tunnel

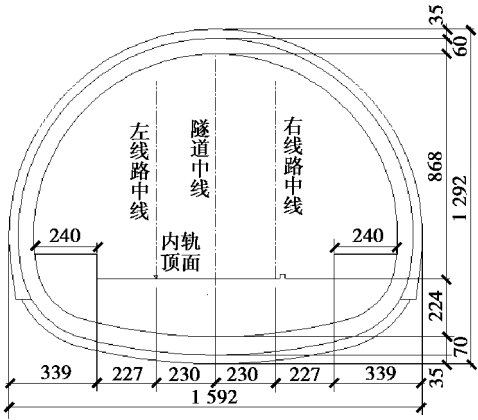


图 2 隧道断面图(单位:cm)

Fig.2 Cross-section of tunnel (unit: cm)

话会使得围岩约束解除的过快,不利控制隧道的变形;特别是在软弱围岩地段开挖时,在上台阶两个下端会产生很大的应力集中,不利于承受外部荷载^[8]。因此,为节约成本,加快施工进度并且保证隧道施工的安全,本次施工选用三台阶临时横撑的方法进行开挖。

具体的施工方法为:

- (1)完成管棚和超前小导管的施工,并注浆加固地层,固结后开挖上台阶 1 部土体,开挖后立即初喷 3 cm 混凝土并安装拱部格栅钢架、施做临时支撑然后复喷混凝土。
- (2)上台阶施工至适当距离后,开挖 2 部台阶,接长格栅钢架,施作洞身结构的初期支护;
- (3)开挖下台阶 3 部分土体,下半断面初支,施工工艺同上半断面。
- (4)对仰拱部分开挖,仰拱支护紧跟拱墙支护及时施做。
- (5)仰拱二次衬砌及底板回填层施做。

(6)拆除临时支撑,施做隧道二次衬砌。施工步骤如图 3 所示。

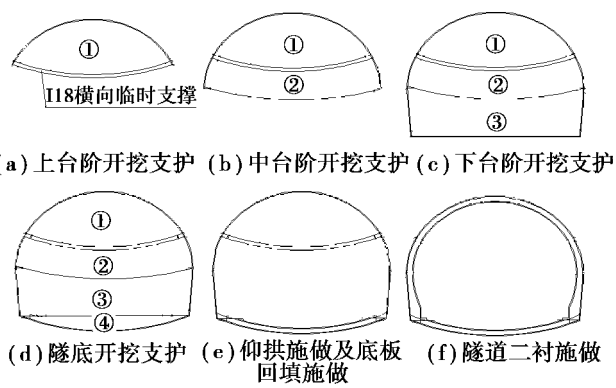


图 3 三台阶+临时横撑法施工步骤

Fig.3 Construction step of three-step+temporary support method

2 隧道施工动态数值模拟

2.1 计算模型

根据小壩坪隧道出口段的地形、地质条件,取 DK726+005~DK726+075 段为研究对象建立三维的数值分析模型^[9]。依据弹性力学和岩石力学相关原理可知^[10]:隧道开挖对围岩应力状态的影响区域为隧道开挖轮廓线外 3 倍洞室宽度。根据地层及山体的实际情况,模型的大小取水平方向(X 轴方向)约为 96 m,沿隧道轴线方向(Y 轴方向)约为 70 m,竖直方向(Z 轴方向)取隧道底部到下边界的距离为 45 m。在静力状态下进行模拟时,只需考虑在自重条件下隧道开挖对边坡的影响,不考虑构造应力的作用,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。为了保证计算精度,在隧道周围采用细密单元,模型共划分 102 111 个单元,20 349 个节点,有限元模型网格划分如图 4 所示。

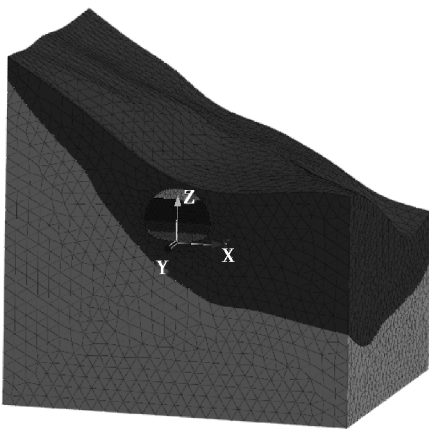


图 4 三维计算模型

Fig.4 Three-dimensional numerical model

根据土力学和岩石力学相关内容可知^[11]:围岩在数值模拟过程中,岩土体选择摩尔-库伦弹塑性模型。对于拱顶上方的加固地层,在计算过程中通过改变隧道顶部土体的单元属性进行模拟。根据工程实践所总结的经验,隧道初支、临时支撑和二次衬砌可以通过析取的方式建立弹性板单元,锚杆设为一维杆单元,模型的材料参数如表 1 所示。考虑到模型为地层结构模型,结合前人的研究经验,假定上中下台阶开挖互不影响,定义每个台阶开挖时释放系数为:隧道开挖时为 0.5,施做初支和锚杆时为 0.3,二衬施做时为 0.2。

表 1 模型的材料参数表

Table 1 Material parameters of model

材料	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(g·cm ⁻³)	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	备注
碎石层	1.5	0.4	19	0.1	30	摩尔-库伦
花岗岩	8	0.3	24	0.8	36	摩尔-库伦
注浆加固	1.5	0.4	22	0.3	32	摩尔-库伦
初支支护	15	0.2	24	—	—	弹性板单元
临时支撑	32.5	0.3	78.5	—	—	弹性板单元
二次衬砌	20	0.2	24	—	—	弹性板单元
锚杆	20	0.3	78.5	—	—	弹性杆单元

2.2 施工方案的动态模拟

本工程选用的是三台阶临时横撑法进行隧道

开挖,如图 5 所示, L_1 为上台阶的距离, L_2 为中台阶的距离, L_3 为下台阶的距离(下同)。根据前人的研

究结果,对于V级围岩,每个台阶的距离不能超过一倍的洞径。以工程中几种常用的台阶距离为例,使 $L_1=3\text{ m}$ 、 5 m 、 10 m 、 15 m , $L_2=3\text{ m}$ 、 5 m 、 10 m 、 15 m , $L_3=5\text{ m}$,并对其进行分配来探究各个台阶距掌子面的距离对围岩变形与支护结构受力的影响。

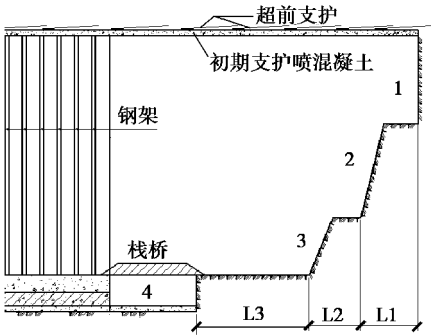


图 5 三台阶临时支撑法工序纵断面图

Fig.5 The process cross-section of three-step+temporary support method

3 计算结果及分析

3.1 施工优化分析

针对隧道洞口浅埋偏压段进行分析,研究其取不同上、中、下台阶错开距离时,隧道支护结构、围岩及地层的受力和变形特性,并以 DK726+035 为特征断面探究不同台阶距离对围岩变形和支护结构受力的影响。

3.1.1 位移分析

(1)拱顶沉降:不同的开挖方案结束后特征断面拱顶的沉降值如表 2 所示。由表可以看出,拱顶的最终沉降值会随上、中台阶的距离的增大而增大,而上台阶每增加 1 m,竖向位移的变化量远大于中台阶所造成的变化量,这是由于在上台阶开挖过程中及时地将开挖面封闭成环,减少了中台阶和下台阶开挖对拱顶的影响。

表 2 拱顶竖向位移值(单位:mm)

Table 2 Vertical displacement of arch crown (unit: mm)

上台阶 距离/m	中台阶距离/m			
	3	5	10	15
3	15.01	16.80	18.70	20.51
5	19.67	20.59	22.62	24.52
10	27.60	29.64	31.78	33.75
15	35.70	37.84	40.07	42.10

(2)水平收敛:数值模拟所得到的不同施工方案使特征断面产生的最终水平收敛值如表 3 和表 4 所示。

表 3 特征断面上部水平收敛值(单位:mm)

Table 3 Upper level convergence value of characteristic section (unit: mm)

上台阶 距离/m	中台阶距离/m			
	3	5	10	15
3	8.73	8.56	8.48	8.44
5	8.84	8.68	8.60	8.53
10	8.48	8.38	8.31	8.25
15	8.47	8.43	8.41	8.37

表 4 特征断面下部水平收敛值(单位:mm)

Table 4 Lower level convergence value of characteristic section (unit: mm)

上台阶 距离/m	中台阶距离/m			
	3	5	10	15
3	10.38	11.94	13.48	14.73
5	10.77	12.35	13.91	15.18
10	11.24	12.84	14.40	15.67
15	11.63	13.22	14.77	16.05

从特征断面最终的水平收敛值可以发现,由于及时地施做临时支撑,所以不管采用哪种方案,进行隧道开挖上部的收敛值都不会出现太大的变化,而隧道下部的水平收敛值却会随着 L_1 、 L_2 的增大而逐渐增加,其中 L_2 的值对隧道下部的最终收敛值影响较大。

3.1.2 应力分析

隧道支护结构拱顶、拱腰和拱脚的最终最大主应力值如表 5~7 所示。

表 5 特征断面拱顶处的最大主应力(单位:kPa)

Table 5 The maximum principal stress in the arch of the characteristic section (unit: kPa)

上台阶 距离/m	中台阶距离/m			
	3	5	10	15
3	-410.68	-411.56	-412.90	-414.51
5	-302.53	-303.72	-305.58	-307.10
10	-308.81	-310.18	-311.79	-313.21
15	-429.47	-430.78	-432.37	-433.45

表6 特征断面拱腰处的最大主应力(单位:kPa)

Table 6 The maximum principal stress in the arch of the characteristic section (unit: kPa)				
上台阶 距离/m	中台阶距离/m			
	3	5	10	15
3	-359.90	-331.69	-305.91	-296.41
5	-331.30	-306.16	-284.98	-279.24
10	-306.27	-284.65	-268.14	-265.77
15	-291.16	-271.96	-258.52	-257.63

表7 特征断面拱脚处的最大主应力(单位:kPa)

Table 7 The maximum principal stress of the arch foot of the characteristic section (unit: kPa)				
上台阶 距离/m	中台阶距离/m			
	3	5	10	15
3	-198.05	-179.28	-147.39	-114.24
5	-190.46	-172.04	-140.72	-110.69
10	-181.06	-163.53	-133.91	-106.41
15	-172.00	-155.16	-128.04	-102.97

隧道初支结构的拱顶、拱腰和拱脚部位,其最终的最大主应力值都为压应力。对于拱顶处的最大主应力值,其大小主要是由 L_1 值的大小所决定的,当 L_1 取5~10 m时,其支护结构所受的应力值较小。而通过对拱腰和拱脚处最终的最大主应力值的对比分析,可以认为, L_1 和 L_2 的大小共同决定了拱腰和拱脚处的应力值的大小,其应力值会随着 L_1 和 L_2 增大而减小。

从围岩的最终变形大小和隧道支护结构的最大主应力大小的对比分析,可以发现,增大 L_1 和 L_2 的值固然可以有效地减小隧道支护结构的应力值,但这也会使得围岩的变形增大,而且当 $L_1=15$ m时隧道拱顶处的竖向位移已经超过了规范所规定的预警值。综合变形和应力大小这两方面的因素考虑,当 L_1 为5 m左右、 L_2 取一倍的洞径时既能保证围岩的变形不会超过规范所要求的预警值,也能有效地减小支护结构所受的应力值。

3.2 变形、受力特征分析

通过以上的分析得出了各个台阶最合适的开挖距离,下面就以 $L_1=5$ m, $L_2=15$ m为例来探究在隧道开挖过程中围岩的变形和支护结构的受力特性。

3.2.1 位移特征分析

由于隧道出口段处于山体斜坡地带,偏压情况较为严重,而且山体的围岩等级较差,所以这对施工过程中围岩的变形有着严格的要求。

(1)隧道施工过程中拱顶沉降分析:选取DK726+060和DK726+030作为特性断面,归纳总结围岩的变形规律和隧道的开挖过程中对掌子面后方的影响范围,所得的沉降曲线如图6所示。

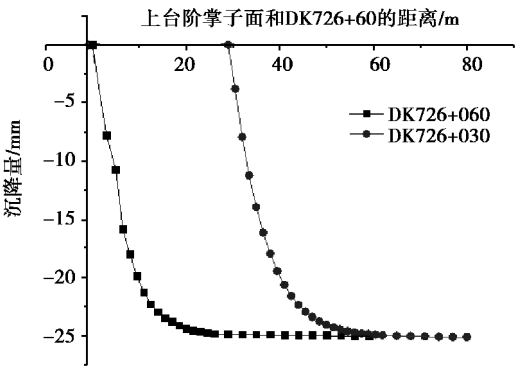


图6 拱顶沉降变化曲线

Fig.6 Crown settlement curve

由图可知,当掌子面到达特征断面时,拱顶会立即产生较大的沉降变形,而后变形会继续增长,当特征断面距上台阶掌子面6.5 m时,拱顶沉降已达到最终沉降的63%。此后沉降量增长的趋势会逐渐缓慢,当特征断面和上台阶掌子面相距15.5 m时,拱顶沉降已完成最终沉降的93%,之后沉降基本稳定。这表明隧道上台阶开挖对掌子面之后(已开挖土体)的影响范围为大约15.5 m,大约为一倍的洞径的距离。而且当中台阶和下台阶开挖时,上台阶掌子面距离特征断面5 m和20 m,从图中可知,拱顶沉降值并没有出现太大的波动,这说明中、下台阶的开挖对拱顶的沉降几乎没有影响。

(2)隧道开挖过程中水平收敛分析:取DK726+030作为特性断面,隧道在开挖过程中对周围岩体水平位移的影响如图7所示。

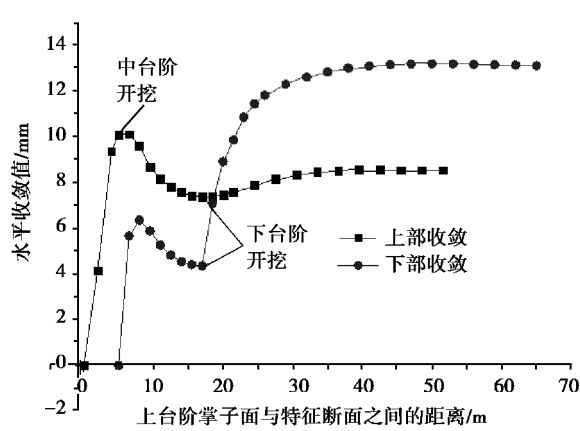


图 7 水平收敛变化曲线

Fig.7 Horizontal convergence curve

由图可知,对于隧道上部收敛,在上台阶刚通过特征断面时变化速率较快,当上台阶掌子面距特征断面 6.5 m 时,水平收敛值最大约为 10.09 mm,此后收敛值逐渐减小,当掌子面和特征断面相距 16 m 时,水平收敛减小至 7.8 mm,大约为最终收敛值的 91%,之后收敛值基本稳定。隧道的下部收敛在下台阶开挖之前的变化趋势和上部的变化趋势相同,当上台阶掌子面距离特征断面 20 m(下台阶开始开挖),隧道下部的水平收敛值约为 4.34 mm,之后下水平收敛值会迅速增加,当上台阶掌子面和特征断面相距 25 m(下台阶向前开挖 5 m)时,收敛值增大至 11.81 mm,大约为最终收敛值的 90%,在此之后收敛的增长速率逐渐减小直至稳定。这说明中台阶和下台阶的开挖对隧道上部收敛几乎没有影响。这是由于临时支撑的施做限制了隧道的变形,而下台阶的开挖会使隧道下部的收敛增大,影响范围大约 6 m。

(3)开挖结束后地表的变形分析:隧道开挖完成以后竖向位移的云图如图 8 所示。由图可见,竖直方向的最大位移主要分布在拱顶靠近偏压的一侧,对于同一断面,随着地表点距离拱顶的距离增大竖向位移逐渐减小。选取 DK726+030 断面为研究对象,DK726+030 断面上地表的沉降情况如图 9 所示,其中,坐标原点为隧道拱顶上方的地表点,X 轴为地表点距离隧道中心线的距离,Y 轴为沉降值。由图 9 可知,地表沉降曲线和 Peck 曲线大致相同,但由于隧道竖直方向的位移受重力和偏压共同影响,使得隧道拱顶的左侧位移值最大,最大值为 17.1 mm。所以,在施工过程中需要加强拱顶左侧处的支护,以防止出现洞顶开裂现象的发生。

3.2.2 受力特征分析

在隧道开挖过程中,其支护结构对隧道的稳定

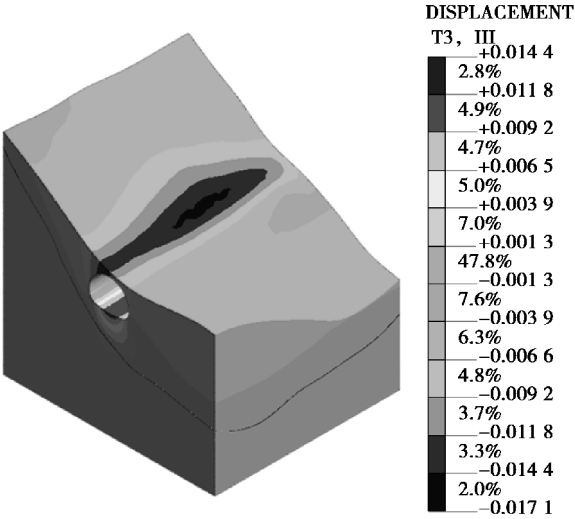


图 8 地表竖向位移云图

Fig.8 Vertical displacement nephogram of ground surface

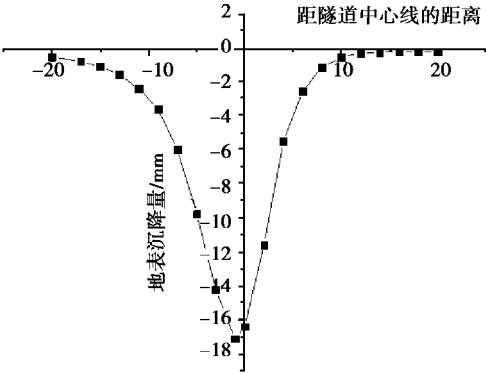


图 9 DK726+030 断面地表的沉降

Fig.9 Surface settlement of DK726+030 section

性起着非常重要的作用,所以探讨支护结构随时间的应力变化的关系有着非常重要的意义。本文针对 DK726+030 断面的拱腰处最大主应力进行分析,应力结果如图 10 所示。

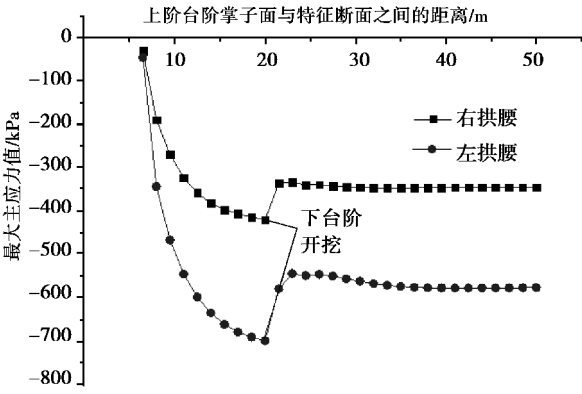


图 10 拱顶处最大主应力变化曲线

Fig.10 Curve of the maximum principal stress at arch crown

由图 10 可知,隧道支护结构刚施做完成时左右拱腰处的最大主应力相差不大,随着中台阶掌子面的向前推进,左右拱腰处的最大主应力值逐渐增大,而且左拱腰应力值的增长速度要大于右拱腰。对于右拱腰,从特征断面施做支护结构至下台阶掌子面到达特征断面的过程中,最大主应力由 31.4 kPa 迅速增长到 420.5 kPa,增大了约 12 倍,此时拱腰处所受的应力最大。在下台阶掌子面到达及通过特征断面 6 m 的过程中,该处的最大主应力由 420.5 kPa 减小至 339.2 kPa,减大幅度约为 19%,之后应力值趋于稳定。对隧道支护结构的左拱腰处,最大主应力也存在相似的发展变化规律,两次变化分别增大了 14 倍和减小 21%。这

说明,隧道的开挖对靠近偏压一侧的隧道支护结构的最大主应力影响比较大,而且下台阶的开挖可以有效地减小支护结构所受的应力,而影响的范围大约为下台阶掌子面到达时和掌子面之后(已开挖土体)6 m 范围内;当应力值稳定以后,靠近偏压一侧的最大主应力值要大于远离偏压一侧的应力值。

3.3 围岩塑性区分析

隧道的开挖是对隧道周围围岩体的一个不断的扰动过程,因此,为了确保隧道施工过程的安全性,需要对开挖过程中的塑性区变化进行了解分析。隧道不同开挖阶段的塑性区分布如图 11 所示。

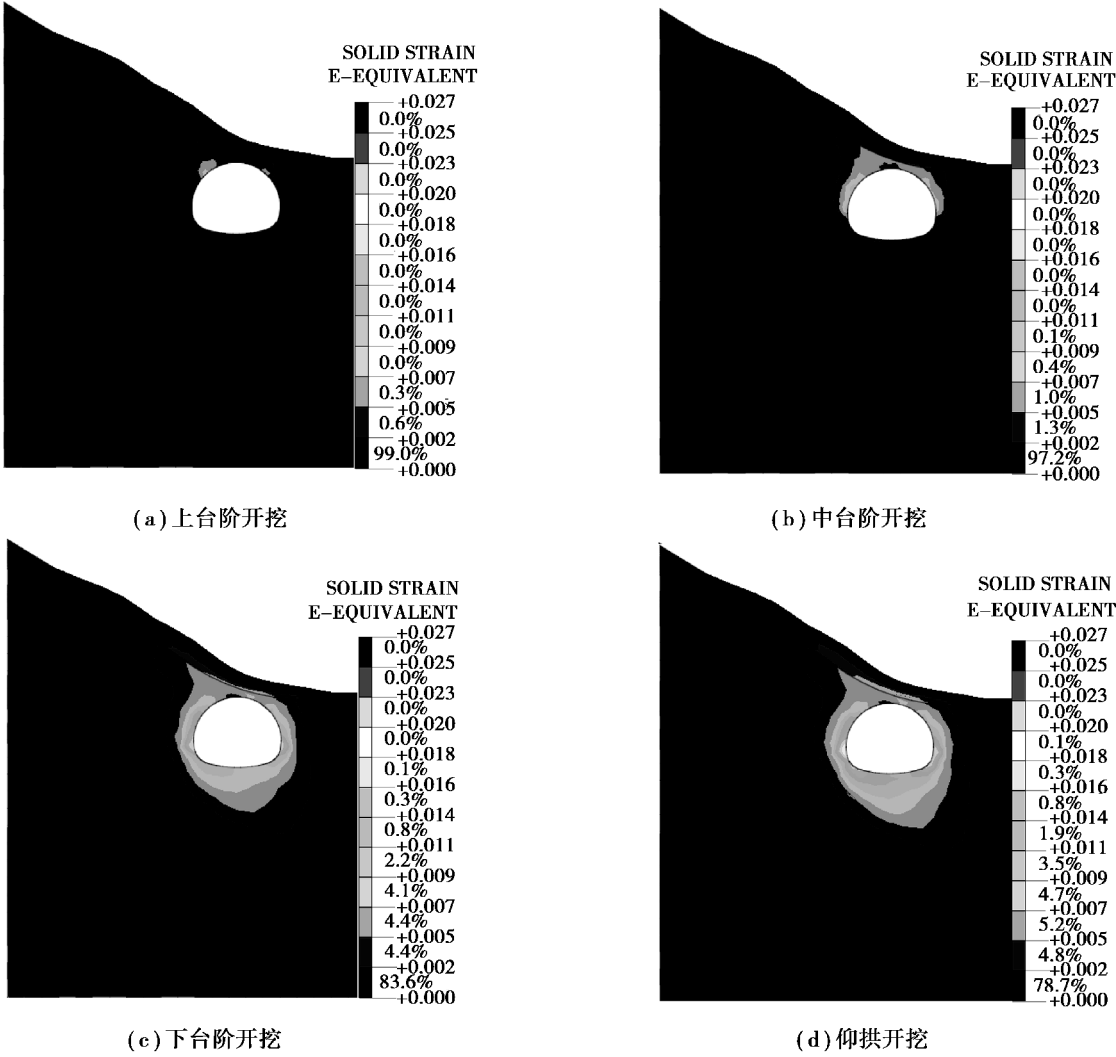


图 11 不同阶段围岩塑性区的分布

Fig.11 Distribution of plastic zone of surrounding rock at different stages

由图 11 可知,上台阶开挖完成后塑性区主要分布在拱顶的两侧,随着中台阶、下台阶和仰拱的开挖,塑性区逐渐从拱顶向下发展最后呈环形分布在隧道的周边,塑性应变的最大值由 0.005 增大到 0.018。同时,隧道两侧的塑性应变的分布区域和量值均不对称,呈现出靠近偏压一侧的塑性应变分布区域和大小均大于另一侧。最重要的是,当开挖结束后塑性区已经发展至岩土分界面上,所以施工过程中要采取必要的措施防止出现滑坡等地质灾害。

4 现场监测资料分析

为了更好地掌控偏压隧道在施工过程的变形特点,在施工过程中对各个阶段都进行了相应的监控测量。选取洞口段 DK726 + 005 和

DK726+025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,监测点的布置如图 12 所示。

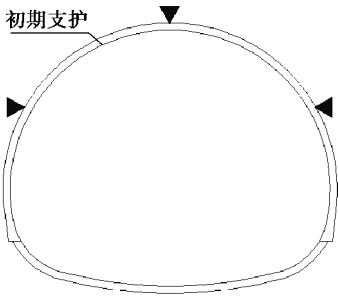


图 12 断面监测点布置图

Fig.12 Layout of surveying points on section

拱顶沉降和水平收敛的监测结果与数值模拟的结果进行对比,对比结果如表 8 所示。

表 8 数值模拟和现场监测结果对比

Table 8 Comparison of numerical simulation and field monitoring results

上台阶掌子面距离特征 断面的距离/m	DK726+005 拱顶沉降		DK726+025 拱顶沉降		DK726+005 水平收敛		DK726+025 水平收敛	
	数值模拟结果/mm	监测结果/mm	数值模拟结果/mm	监测结果/mm	数值模拟结果/mm	监测结果/mm	数值模拟结果/mm	监测结果/mm
2	-3.57	-4.6	-3.66	-4.5	4.36	5.21	4.27	5.17
5	-7.56	-7.9	-7.69	-8.1	10.09	10.45	10.26	10.34
8	-10.76	-12.7	-10.88	-13.4	9.60	9.78	9.77	9.86
10	-15.48	-16.8	-15.64	-17.8	8.69	9.03	8.87	9.15
13	-19.76	-20.5	-18.84	-21.3	7.54	8.57	7.81	8.45
16	-21.41	-22.8	-22.66	-23.7	8.07	8.23	8.22	8.34
22	-22.42	-25.9	-23.03	-27.0	8.43	8.22	8.64	8.36
29	-23.33	-26.6	-23.86	-27.3	8.54	8.24	8.60	8.33
36	-23.65	-26.9	-24.34	-27.5	8.53	8.25	8.59	8.35
43	-23.64	-26.9	-24.33	-27.4	8.53	8.25	8.58	8.34
50	-23.63	-26.9	-24.33	-27.4	8.52	8.25	8.58	8.34

对于偏压浅埋隧道进行数值模拟分析,假定是在理想条件下的连续介质的各向同性的弹性体^[12],但是现实中的岩体属于非连续的各向异性的介质,而且在数值模拟的过程中忽略了岩体中裂隙和构造应力,这使得模拟结果和现实情况存在有一定的差距^[13-18]。但通过对后期监测结果

的对比分析可知,结果上的差距并不影响规律的正确性。

在现场施工过程中,为了防止在隧道开挖过程中出现山体滑坡等地质灾害,在偏压较为严重的区域每隔 5 m 施做一个抗滑桩,根据后期监测的结果可以发现,施做了抗滑桩区域的隧道的水平

位移值比没有施做抗滑桩区域隧道的水平位移值小20%~30%。这表明抗滑桩可以有效地减小围岩水平方向的变形。此类方案在偏压隧道的成功运用,可以为以后同类的工程提供理论和实践上的依据。

5 结论

针对在建宝兰客专小垵坪隧道浅埋偏压洞口段施工优化的数值分析和隧道结构受力特性的数值模拟试验分析可得出如下的研究结论及施工建议:

(1)采用三台阶+临时横撑法进行浅埋偏压大断面隧道施工中,隧道围岩拱顶沉降位移和拱腰处的水平收敛位移随上台阶与中台阶间错开距离的增大而增加。隧道支护结构的受力,在拱腰和拱脚处最大主应力随上台阶与中台阶错开距离的增大而减小,而拱顶处的最大主应力在两台阶间错开距离5.0 m时最小。因此,建议隧道上台阶与中台阶间错开距离以5.0 m为宜,中台阶与下台阶间的距离可控制在1倍洞径范围内为宜。

(2)隧道上台阶的开挖对拱顶沉降和隧道上部水平收敛的纵向影响主要体现在掌子面后方1倍洞径的范围内;而且由于临时支撑的施做,中台阶和下台阶的开挖对拱顶和隧道上部的变形几乎不产生影响。但下台阶的开挖会使隧道下部的收敛增大,影响的范围主要表现在掌子面后方6.0 m范围内。

(3)隧道支护结构受偏压的影响,左拱腰处的最大主应力大于右拱腰处的应力值,下台阶的开挖会使拱腰处的应力值减小;支护结构的影响范围主要是从下台阶掌子面到达特征断面通过的6.0 m的过程中。

(4)对小垵坪隧道洞口段进行的不同台阶距离开挖的数值模拟分析,选出了浅埋偏压大断面隧道洞口段开挖时最合适的三台阶临时仰拱法上、中和下台阶的施工错开距离;跟踪施工进行的变形监测验证了分析方法的合理、可行性,为今后类似工程的建设提供了科学的依据。但由于实际工程地质条件的复杂性,需要在理论分析基础上结合现场的监控量测等,灵活进行设计、施工。

参考文献(References)

- [1] 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, 29(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, 29(10): 2747-2752, 2758. (in Chinese))
- [2] 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, 24(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, 24(22): 4042-4047. (in Chinese))
- [3] 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, 25(增2): 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, 25(Supp.2): 3763-3768. (in Chinese))
- [4] 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, 36(4): 460-465. (Liu Tao, Shen Mingrong, Yuan Yong. Model test and 3-D numerical simulation study on wall rock mass stability of double-arch tunnel subject to partial press[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(4): 460-465. (in Chinese))
- [5] 刘小军, 张永兴. 浅埋偏压隧道洞口段合理开挖工序及受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 3066-3073. (Liu Xiaojun, Zhang Yongxing. Analysis of reasonable excavation sequence and stress characteristics of portal of shallow tunnel with unsymmetrical loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.1): 3066-3073. (in Chinese))
- [6] 张辉, 张子新, 黄宏伟, 等. 偏压错台小净距隧道力学性态相似模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学

- 版), 2009, 37(2): 169-172. (Zhang Hui, Zhang Zixin, Huang Hongwei, et al. Model test on mechanical behavior of two shallow-buried closely-spaced tunnels at different elevations under unsymmetrical load [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(2): 169-172. (in Chinese))
- [7] 王立川. 浅埋偏压隧道围岩压力与开挖进尺优化的极限分析方法[D]. 长沙:中南大学, 2011. (Wang Lichuan. Limit analysis method of surrounding rock pressure and excavation progress optimization of unsymmetrical pressure and shallow tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese))
- [8] 龚建伍, 夏才初, 朱合华, 等. 鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 236-240. (Gong Jianwu, Xia Caichu, Zhu Hehua, et al. Optimal analysis of construction schemes for Heshang small-space tunnels with large section [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 236-240. (in Chinese))
- [9] Soliman E, Duddeck H, Ahrens H. Two-and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1993, 8(1): 13-18.
- [10] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982. (Xu Zhilun. Elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1982. (in Chinese))
- [11] 张永兴. 岩石力学[M]. 重庆: 中国建筑工业出版社, 2008. (Zhang Yongxing. Rock mechanics [M]. Chongqing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [12] 孔祥兴, 夏才初, 仇玉良, 等. 平行小净距盾构与CRD法黄土地铁隧道施工力学研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 516-524. (Kong Xiangxing, Xia Caichu, Qiu Yuliang, et al. Study of construction mechanical behavior of parallel-small spacing metro tunnels excavated by shield method and cross diaphragm (CRD) method in loess region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 516-524. (in Chinese))
- [13] 凌昌荣, 张子新. 偏压小间距隧道荷载结构计算模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1148-1153. (Ling Changrong, Zhang Zixin. A study of computation model with load-structure method for unsymmetrically loaded closely-spaced tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1148-1153. (in Chinese))
- [14] 何山. 浅埋大跨度偏压隧道动态施工数值模拟和施工工序比选研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. (He Shan. Research on numerical simulation of dynamic construction of shallow buried large span unsymmetrical pressure tunnel and the selection of construction working procedure [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [15] 宋战平, 杨腾添, 张丹锋, 等. 溶洞对隧道(洞)稳定性影响的数值试验及现场监测分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 484-491. (Song Zhanping, Yang Tengtian, Zhang Danfeng, et al. Experiments and field monitoring and analysis about the impact of existing cave to stability of tunnel [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 484-491. (in Chinese))
- [16] 李栋梁, 刘新荣, 杨欣, 等. 地震力作用下浅埋双侧偏压隧道松动的围岩压力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3483-3490. (Li Dongliang, Liu Xinrong, Yang Xin, et al. Loosening earth pressure of shallow bilateral bias tunnel under earthquake force [J]. Journal of Central South University, 2016, 47(10): 3483-3490. (in Chinese))
- [17] 钟祖良, 刘新荣, 刘元雪, 等. 浅埋双侧偏压小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 63-68. (Zhong Zuliang, Liu Xinrong, Liu Yuanxue, et al. Theoretical calculation and monitoring on rock pressure of shallow-buried bilateral bias neighborhood tunnel [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 63-68. (in Chinese))
- [18] 石建勋, 刘新荣, 马丽娜, 等. 软土地区浅埋偏压小净距隧道空间效应研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(05): 2248-2255. (Shi Jianxun, Liu Xinrong, Ma Lina, et al. Study on spatial effects shallow bias in soft soil tunnel of the small spacing [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(05): 2248-2255. (in Chinese))