

四车道隧道洞口浅埋偏压段施工力学响应特征分析

朱 峰

(辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 由于四车道隧道断面跨度大且扁平, 施工断面多, 施工工序繁杂, 衬砌结构及围岩受到多次扰动, 导致其力学特性较小跨度隧道有明显不同。文章借助有限元分析软件, 以仁遵高速公路青山隧道为工程背景, 对洞口浅埋偏压段的施工过程进行模拟, 研究隧道拱顶沉降、水平收敛和围岩塑性区的分布与发展规律。通过总结与分析计算结果, 得到四车道隧道洞口浅埋偏压段施工力学响应特征, 并根据其不同的特征提出相应的合理的施工优化措施, 以提高施工安全性与隧道工程质量。研究方法及其结果可为类似隧道工程设计与施工提供指导与借鉴。

关键词: 四车道隧道; 浅埋偏压; 力学响应特征; 数值模拟

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)04-0012-08

doi:10.13402/j.gcjs.2024.04.044

Characteristics analysis of construction mechanical response of shallow buried bias section at the entrance of four-lane tunnel

ZHU Feng

(Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: Due to the large-span and flat-section of the four-lane tunnel, which have many construction sections and complicated construction procedures, the lining structure and surrounding rock have been disturbed for many times, resulting in significant differences in mechanical characteristics to the small-span tunnel. In this paper, by using the software of finite element analysis, based on Qingshan tunnel of renzun expressway, the construction process of shallow buried partial pressure section of the entrance was simulated, and the settlement of tunnel vault, horizontal convergence and distribution and development of plastic zone of surrounding rock are studied, by summarizing and analyzing the calculation results, the construction mechanical response characteristics of the shallow buried bias section at the entrance of the four-lane tunnel are obtained, and the corresponding reasonable construction optimization measures are proposed according to the different characteristics, so as to improve the construction safety and tunnel engineering quality. The research methods and results can provide guidance and reference for similar tunnel engineering design and construction.

Key words: four-lane tunnel; shallow buried bias section; mechanical response characteristics; numerical simulation

我国自 20 世纪 80 年代开始修建高速公路以来, 全国高速公路规模发展迅速, 高速公路里程逐年上升, 截至 2021 年底, 全国高速公路总里程达到 16.12 万公里。道路的畅通对地方经济的发展和人民群众生活改善有了极大程度的提高, 目前高速新

建规划向着带动更多偏远地区的方向发展, 随之出现的是高速公路建设面对的工程难度越来越大, 受立交展线等影响, 隧道工程出现了洞口浅埋地层施作四线隧道的工程情况, 极大地增加了隧道设计与施工的难度。

收稿日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52108385)

作者简介: 朱 峰(1987—), 男, 高级工程师, 从事地下工程方面的设计工作。

李凌志等^[1]基于层次分析法对不同矢跨比的大断面隧道进行数值分析,得出对于大断面隧道而言矢跨比为 0.43 的断面为适合依托工程的最佳断面;燕新等^[2]通过数值分析的方法以得出 CRD 开挖工法对于单洞四车道隧道进口浅埋段围岩变形有明显的控制作用;刘夏冰等^[3]综合数值模拟和现场监测,得出双侧壁导坑法开挖下的初期支护体系力学特性,推导出考虑导坑掌子面三维开挖影响的围岩压力计算方法;后续众多学者又借助计算软件对大断面隧道不同施工工法下围岩力学特性的变化过程及分布规律进行了专项研究,如屈慧森^[4]通过理论分析、数值模拟和现场监测三种方法,对超大断面公路隧道的围岩松散压力、施工工法和支护参数进行了研究。

前人对大断面隧道力学体系、工法影响等方面进行了大量研究,但是研究背景主要集中于均匀地层条件下,对洞口段浅埋偏压条件下的大断面隧道施工力学研究尚显不足。本文以实际工程为依托,通过对洞口段浅埋偏压条件下的大断面隧道施工过程研究,隧道受力及变形规律,以期可为相似工程的设计和施工提供参考。

1 工程概况

以仁遵高速公路青山隧道右线出口为工程背景,对浅埋偏压四车道隧道的力学响应特征进行分析研究。青山隧道地处贵州省遵义市红花岗区巷口镇沙坪村附近,全长为 2 427.2 m,为分离式三车道隧道。受巷口立交减速车道长度的影响,青山隧道遵义端右线洞口段 400 m 加宽为四车道隧道断面。

洞口段属缓坡地貌,隧道洞口埋深最浅处位于左拱肩处,埋深约为 2 m,横向坡度约为 37°,四车道断面最大埋深约为 45 m,四车道断面均处于浅埋地层,其中洞口段 50 m 范围内存在偏压情况。地表为①粉质黏土:黄色,饱和,可塑,碎石含量占 15%。②3 中风化泥灰岩:灰色,碎屑结构,层状构造,节理裂隙发育,岩芯呈碎块状,柱状, R_c (岩石单轴饱和抗压强度)值取 26.18 MPa, $V_{pm} = 2\ 465$ m/s(剪切波速),计算 K_v (岩石完整性系数)值为 0.34。地下水以第四系孔隙水及基岩裂隙水为主,水量随大气降水量及节理裂隙变化而变化,岩

体节理裂隙发育,围岩富水性不均一,透水性较弱。洞口处围岩为较软岩,岩体极破碎—较破碎,结构面极发育,碎、裂状结构,地下水修正系数 $K_1 = 0.5$,软弱结构面 $K_2 = 0.20$,不存在高应力 $K_3 = 0$,计算 $[BQ] = 184.65$ (岩体修正质量指标),属 V 级围岩,且存在一定的浅埋、偏压影响,围岩和临时开挖边坡整体稳定性差,成洞困难,施工安全风险高。

隧道建筑限界宽度为 19.62 m,高度为 11.36 m。洞口段采用三层衬砌,初期支护采用 300 mm 厚 C25 喷射混凝土 + I22b@500 mm 钢拱架;一次衬砌采用 300 mm 厚 C25 模喷混凝土;二次衬砌采用 750 mm 厚 C30 钢筋混凝土,预留变形量为 200 mm,如图 1 所示。采用双侧壁导坑法施工,如图 2 所示。

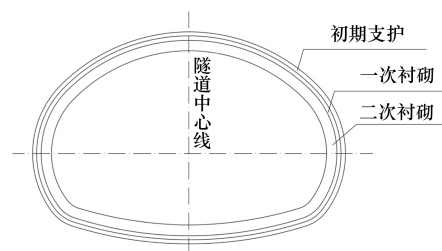


图 1 衬砌结构断面

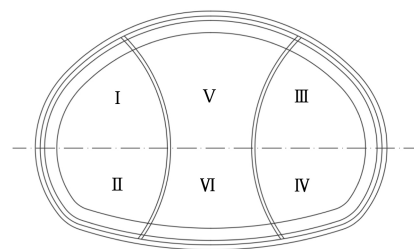


图 2 施工工序

2 施工过程模拟

采用 Midas GTS NX 软件建立三维地层—结构模型,模型横向取隧道两侧各 35 m,横向宽度共为 92 m,纵向长度为 68 m,竖向取隧道仰拱以下 40 m 至地表,地表根据真实地形图 1:1 等比例建模。围岩采用摩尔—库伦弹塑性准则的实体单元,初期支护、一次衬砌和二次衬砌均采用弹性实体单元,临时支撑采用板单元,管棚采用植入式梁单元,隧道及周边围岩采用尺寸长度为 1 m 的六面体单元划分网格,随着围岩远离隧道网格尺寸逐渐增大,网格划分越来越疏松,如图 3 所示。

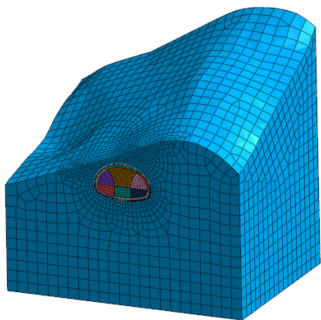


图 3 计算模型

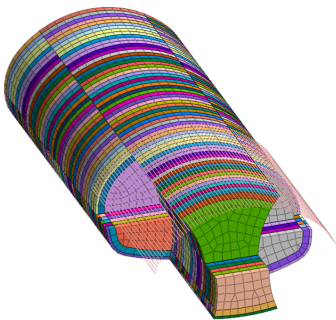


图 4 开挖步序示意

模型边界采用位移约束，模型四周约束横向位移，模型底部约束竖向位移，模型顶部为自由面。施工过程按照左上导洞→左下导洞→右上导洞→右下导洞→中上导洞→中下导洞的顺序进行模拟，每次开挖进尺 1 m，初期支护滞后开挖 1 m，各导洞均滞后前一导洞 5 m，拆除临时支撑按照每次 10 m 进行，拆除一段临时支撑后下一施工步进行一次衬砌施做和下一段临时支撑的拆除，待一次衬砌全部施做完成后，按照每次 10 m 的长度进行二次衬砌施做，各施工过程对应施工步如表 1 所示，开挖步序示意如图 4 所示。

根据地质勘察资料及《公路隧道设计规范第一册土建工程》(JTG 3370.1—2018)^[5]相关内容选择计算参数，计算参数如表 2 所示。

3 隧道及围岩响应特征分析

3.1 隧道结构变形分析

3.1.1 隧道沉降分析

为避免边界效应影响，同时考虑模型长度对施工过程模拟的影响，分别选择模型距洞口 10、20、30 m 断面作为监测断面，对施工过程中的变形趋势进行分析。

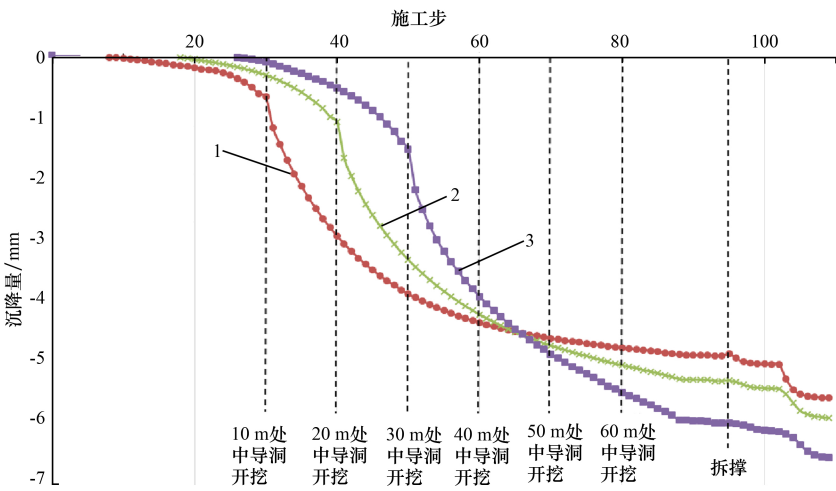
选择每个断面初期支护拱顶点作为沉降监测点，绘制施工过程的沉降时程曲线，如图 5 所示。分别选择掌子面施工至监测断面前、初期支护全部施工完成时和三次衬砌全部施工完成时 3 个典型阶段的沉降量，编制典型阶段沉降量表 3 所示。

表 1 施工过程模拟步序

序号	施工步	施工阶段	序号	施工步	施工阶段
1	0	初始应力场计算	9	17 ~ 84	右下台阶支护
2	1 ~ 68	左上台阶开挖	10	21 ~ 88	中上台阶开挖
3	2 ~ 69	左上台阶支护	11	22 ~ 89	中上台阶支护
4	6 ~ 73	左下台阶开挖	12	26 ~ 93	中下台阶开挖
5	7 ~ 74	左下台阶支护	13	27 ~ 94	中下台阶支护
6	11 ~ 78	右上台阶开挖	14	95 ~ 101	拆除临时支撑
7	12 ~ 79	右上台阶支护	15	96 ~ 102	施做二衬
8	16 ~ 83	右下台阶开挖	16	103 ~ 109	施做三衬

表 2 围岩及支护参数

材料	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
碎石土	14.0	0.8	0.40	10	20
强风化白云岩	20.0	2.0	0.30	500	35
管棚	78.5	210.0	0.25	—	—
初期支护	22.0	28.0	0.20	—	—
二次衬砌	22.0	28.0	0.20	—	—
三次衬砌	25.0	31.5	0.20	—	—
临时支撑	22.0	28.0	0.20	—	—



监测断面深度/m：1—10；2—20；3—30。

图 5 拱顶沉降时程曲线

表 3 典型阶段沉降量

监测断面/m	最终沉降量/mm	工前沉降比		初支全部施工完成沉降	
		沉降量/mm	占比/%	沉降量/mm	占比/%
10	-5.34	-0.57	10.70	-4.68	87.70
20	-5.65	-0.93	16.44	-5.08	89.80
30	-6.28	-1.32	21.00	-5.73	91.30

注：占比为典型阶段沉降量与最终沉降量的比值。

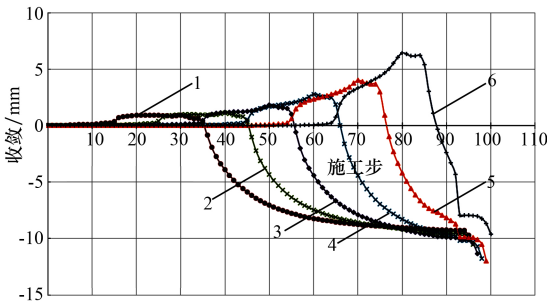
由图 5 可知：整体上，随着监测断面侧导洞的掘进，拱顶即出现沉降，当中导洞上台阶掘进至监测断面时，沉降速率明显增大，拱顶呈现快速的沉降过程，随着中导洞下台阶施工完成并远离监测断面，拱顶沉降速率逐渐降低。拆除临时支撑施工导致初期支护结构受力重新分布，出现阶段性的快速沉降后，拱顶沉降趋于稳定。

由表 3 可知：10、20、30 m 处监测断面分别在左侧导洞施工至 8、18、27 m 处时受到开挖影响开始出现拱顶沉降，即在浅埋段先向导洞掌子面开挖会对其前方 2~3 m 的距离产生拱顶沉降影响。随着掌子面的掘进，各监测断面拱顶沉降逐渐增大，掌子面施工至监测断面时，各监测断面的沉降量占最终沉降量的占比分别为 10.70%、16.44%、21.00%，至岩体全部挖除、初期支护全部闭合成环时，各监测断面的沉降量占最终沉降量的占比分别为 87.70%、89.80%、91.30%，施工过程中主要沉降发生在自掌子面开挖至之后 40 m 范围内。最终沉降量受隧道埋深影响明显，

浅埋段埋深越大，拱顶以上围岩的竖向压力越大，导致拱顶的沉降越大。

3.1.2 隧道收敛分析

选择模型距洞口 10、20、30、40、50、60 m 断面作为监测断面，分别对左、右导洞的收敛趋势进行分析。以收敛为正，扩展为负，绘制收敛时程曲线如图 6、7 所示，收敛峰值及最终扩展值如表 4 所示。



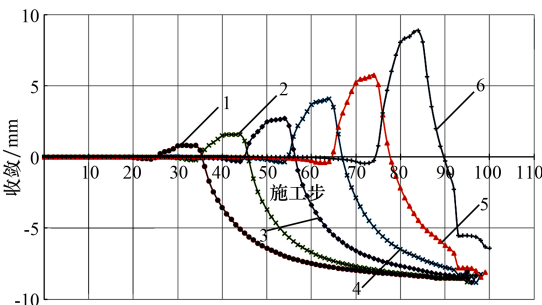
监测断面深度/m：1—10；2—20；3—30；

4—40；5—50；6—60。

图 6 左侧导洞收敛时程曲线

表 4 监测断面水平收敛值

左导洞监测断面/m	收敛峰值/mm	最终扩展值/mm	右导洞监测断面/m	收敛峰值/mm	最终扩展值/mm
10	0.93	-9.71	10	0.80	-8.02
20	1.00	-10.54	20	1.59	-8.33
30	1.81	-11.33	30	2.70	-8.33
40	2.78	-11.76	40	4.07	-8.23
50	4.01	-11.99	50	5.76	-8.10
60	6.20	-9.62	60	8.86	-6.42



监测断面/m: 1—10; 2—20; 3—30;
4—40; 5—50; 6—60。

图 7 右侧导洞收敛时程曲线

由图 6、7 可知，整体上，左、右导洞各监测断面都呈现出先收敛后扩展的趋势，收敛峰值随着监测断面埋深的增加而增大，但是各监测断面最终的水平扩展变形值趋于一致。这说明浅埋段隧道水平变形受埋深影响明显。当仅完成导洞上台阶施工时，因断面较小，在初期支护结构的支撑下，围岩未产生明显的收敛变形；随着导洞下台阶的开挖，导洞侧向高度明显增高，围岩侧向压力增大，监测断面出现收敛趋势；当中导洞开挖完成后，隧道成洞，围岩竖向压力施作于初期支护结构，且浅埋竖向压力明显大于水平压力，因此导洞出现水平扩展的趋势。但是最终变形取决于初期支护材料的性能。拆除临时支撑施工导致初期支护结构受力重新分布，出现阶段性的扩展变形后，水平收敛变形趋于稳定。

3.1.3 围岩变形分析

提取 0、68 m 断面地层沉降云图分别如图 8、9 所示，水平位移云图如图 10、11 所示。

根据围岩沉降云图可见，受施工开挖影响，隧道洞顶上方地层沉降较大，最大沉降可达到 7.28 mm。因隧道处于浅埋偏压地形，地形整体呈左低右高的趋势，沉降等值线有向左偏移的趋势，

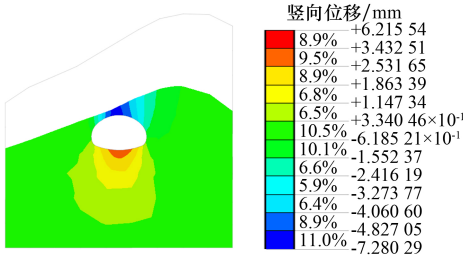


图 8 0 m 断面地层沉降云图

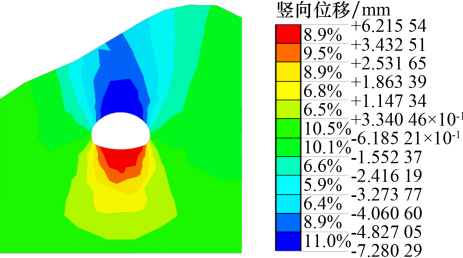


图 9 68 m 断面地层沉降云图

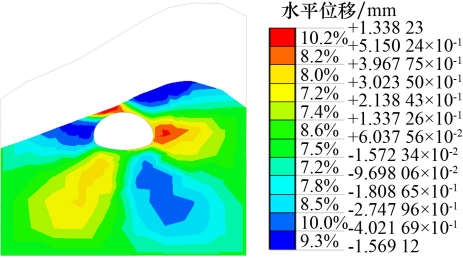


图 10 0 m 断面地层水平位移云图

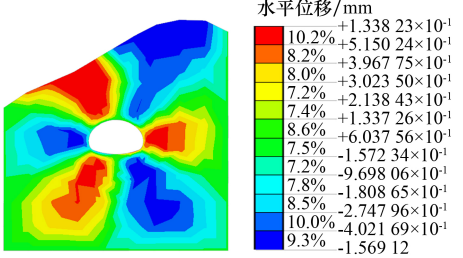


图 11 68 m 断面地层水平位移云图

说明浅埋地层隧道上方围岩的沉降受到埋深及自重的影响，埋深越浅越容易产生沉降。位移沉降主要发生区域为隧道起拱线以上的围岩，埋深越深影响范围越大，其中拱肩以上围岩沉降变形

较大。

根据围岩水平位移云图可见，偏压地形对围岩水平位移分布影响明显。隧道周围围岩产生负向水平位移的面积大于产生正向水平位移的面积，说明在浅埋偏压地形条件下，围岩水平位移的分布呈不对称分布，并有顺着地形变化方向变形的趋势。

3.2 围岩塑性区分析

沿模型纵向每 10 m 截取一个塑性变形云图断面，如图 12~18 所示。从云图可见，浅埋段隧道周围塑性区的分布受埋深影响明显，在洞口位置塑性区主要出现在边墙两侧拱肩至拱脚范围，由于地形为左低右高的趋势，隧道右侧塑性区范围明显大于左侧。随着埋深的增加，塑性区范围逐渐增大，并先在仰拱下方联通，随着埋深进一步增大，拱顶上方埋深约 20 m 时，塑性区在隧道上方联通，隧道边墙两侧塑性区的塑性变形逐步变大，在模型埋深最深处的断面，形成了一个以隧道为中心上下各一倍隧道高度、左右各一倍导洞跨度的塑性变形区域。从施工完成后塑性应变区三维图可见，如图 19 所示，围岩塑性区随着隧道埋深的增加由边墙起拱线位置逐渐向拱肩和拱脚扩大，且受偏压影响出现了明显的非对称性。施工过程中可通过打设锁脚锚杆控制围岩塑性区域对隧道结构的影响，提高隧道施工过程中的安全性。

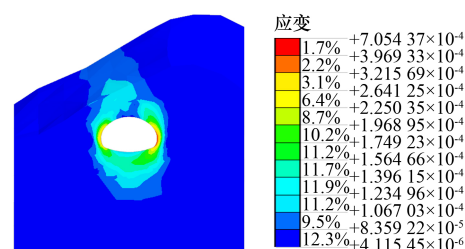


图 14 20 m 断面塑性应变云图

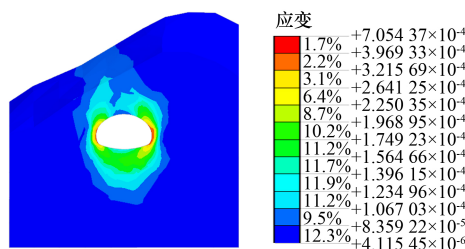


图 15 30 m 断面塑性应变云图

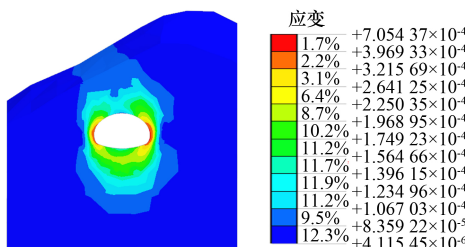


图 16 40 m 断面塑性应变云图

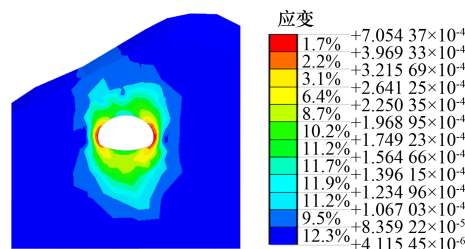


图 17 50 m 断面塑性应变云图

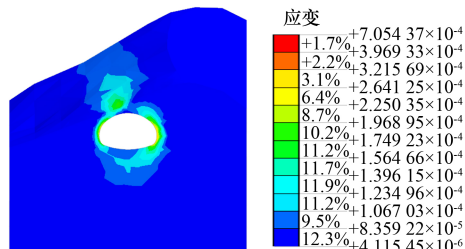


图 12 0 m 断面塑性应变云图

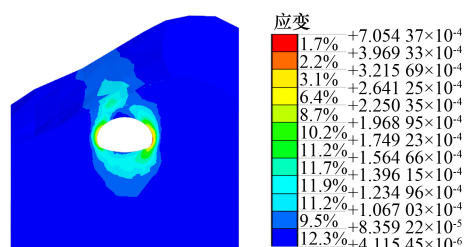


图 13 10 m 断面塑性应变云图

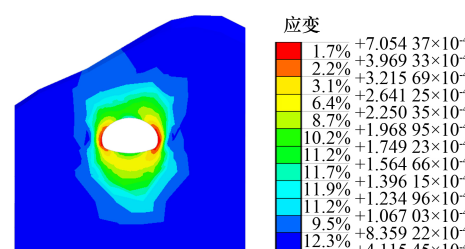


图 18 60 m 断面塑性应变云图

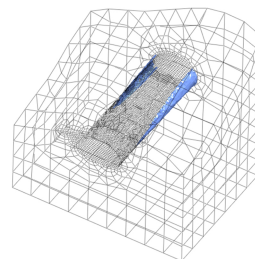


图 19 施工完成后塑性应变区三维图

以施工过程中第 65 步为例,截取围岩塑性变形横剖图和纵剖图,如图 20、21 所示,左右导洞的相继开挖对中导洞未开挖围岩产生较大的影响,出现明显的塑性变形区域,考虑到掌子面受到背后岩体向隧道内的推力,且浅埋地层围岩较差,中导洞掘进时容易发生掌子面垮塌。在左、右导洞施工时,对临时支撑背后打设锚杆或注浆小导管以加固中导洞围岩的措施显得尤为重要。

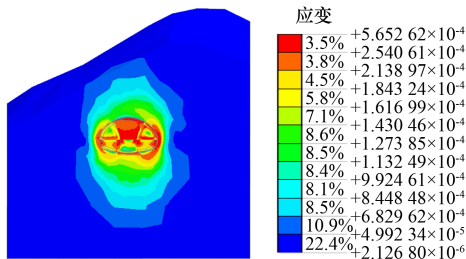


图 20 施工过程中围岩塑性应变区横剖图

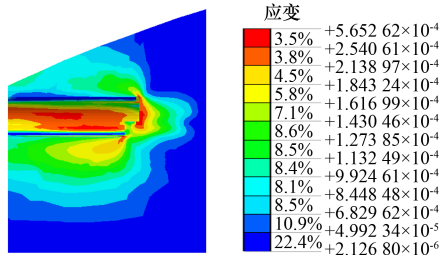


图 21 施工过程中围岩塑性应变区纵剖图

4 现场监测结果

结合新奥法的理念,施工现场对隧道上方的地表沉降和洞内的拱顶沉降、水平收敛情况进行监测,并根据监测结果对施工进行优化调整,施工现场按照每 10 m 布置一个监测断面,监测点布置如图 22、23 所示。

选取距洞口 10、20、30 m 共 3 处监测断面的监测数据进行整理,绘制变形时程曲线如图 24 ~ 27 所示。

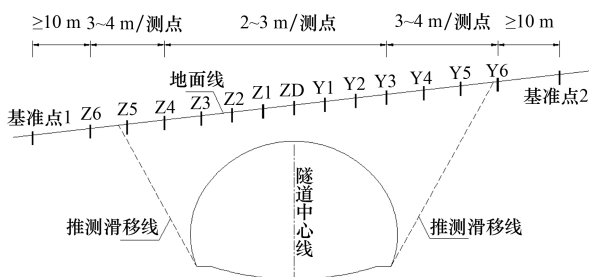


图 22 地表沉降监测布置

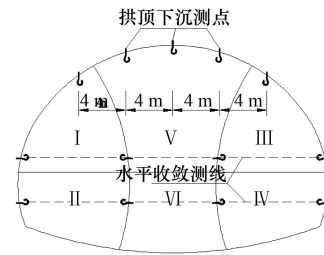
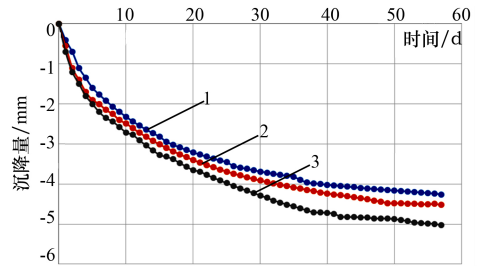
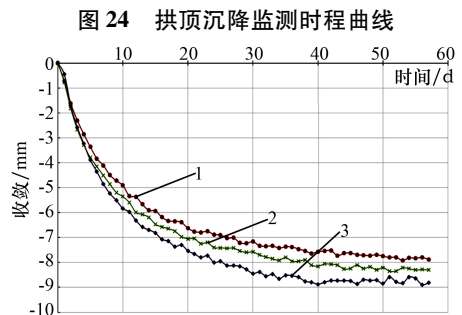


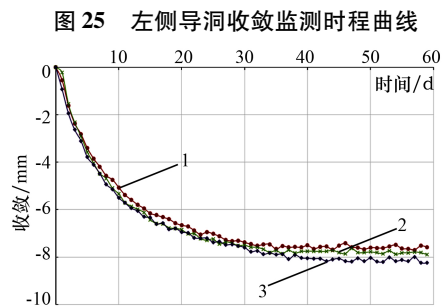
图 23 洞内监测布置



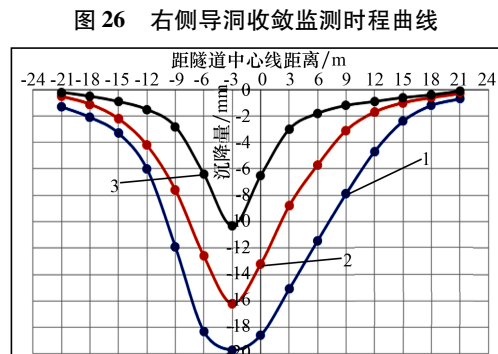
监测断面/m: 1—10; 2—20; 3—30。



监测断面/m: 1—10; 2—20; 3—30。



监测断面/m: 1—10; 2—20; 3—30。



监测断面/m: 1—10; 2—20; 3—30。

图 27 地表沉降监测曲线

(1) 根据现场洞内监测结果显示, 3个监测断面初期支护的拱顶沉降和水平收敛变形趋势与数值模拟结果整体相似, 但是监测结果均略小于数值模拟结果, 这是由于现场爆破施工完成到初期支护施作完成的阶段无法进行监测工作, 导致这一阶段监测数据的缺失, 并且拱顶工前沉降现场无法进行监测。

(2) 根据现场地表监测结果显示, 3个监测断面的地表整体上呈现出沉降槽形状, 沉降槽最大沉降处向偏压方向偏移, 随着埋深的增加, 最大沉降量逐渐减小。

(3) 设计阶段结合数值模拟结果对隧道衬砌参数和施工作业要求进行了优化, 目前该隧道已完成施工并顺利通车。

5 结 论

(1) 施工过程中主要沉降发生在自掌子面开挖至之后 40 m 范围内, 通过加强超前支护控制围岩预沉降和及时打设系统锚杆等措施可有效控制拱顶沉降; 水平变形受埋深影响明显, 但是最终变形取决于初期支护材料的性能。对于围岩较差的浅埋段, 采用更大型号的工字钢以及更密的间距可有效控制隧道变形。

(2) 围岩塑性区随着隧道埋深的增加由边墙起拱线位置逐渐向拱肩和拱脚扩大, 且受偏压影响出现了明显的非对称性。施工过程中可通过打设锁脚锚杆控制围岩塑性区域对隧道结构的影响, 提高隧道施工过程中的安全性。

(3) 左右导洞的相继开挖对中导洞未开挖围岩产生较大的影响, 在左、右导洞施工时, 对临时支撑背后打设锚杆或注浆小导管可以加固中导洞围岩, 减小边导洞开挖对中导洞的影响。

参考文献:

- [1] 李凌志, 周骏, 滕鸣翰, 等. 基于层次分析法的超大隧道断面多准则优化分析[J]. 交通科技, 2022(4): 119-124.
- [2] 燕新, 焦云成, 高明明. 基于西山隧道对单洞四车道隧道支护结构受力分析[J]. 山东交通科技, 2021(3): 43-45.
- [3] 刘夏冰, 贺少辉, 汪大海, 等. 浅埋超大跨四线高铁隧道施工期初期支护体系的力学特性[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 90-102.
- [4] 屈慧森. 超大断面公路隧道施工力学行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [5] 公路隧道设计规范 第一册土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.