

文章编号:1673-9469(2024)04-0073-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.010

基于数值模拟的浅埋偏压小净距隧道施工顺序影响研究

姚宇¹,李威^{2*},严晟³,管海进³,陈浩¹

(1. 华设设计集团股份有限公司,江苏南京 210014;2. 南京水利科学研究院,江苏南京 210029;
3. 苏州市吴中区交通工程建设服务中心,江苏苏州 215128)

摘要: 针对七子山浅埋偏压小净距隧道,选取隧道典型位置,建立精细化三维模型,对不同施工顺序下隧道施工过程进行模拟,研究偏压侧先行、偏压侧后行及同时施工三种不同施工顺序对地层变形及结构受力的影响,为施工顺序的确定提供依据。结果表明:偏压侧先行施工工况引起地层位移最大,其次为同时施工工况,偏压侧后行施工工况最小,施工顺序引起地层竖向及水平位移最大变幅分别为15.50%及62.50%,引起支护结构内力最大变幅为22.63%;考虑施工顺序改变引起的地层位移及结构受力变幅在允许范围内,七子山隧道现场施工采取了左右线同时进洞方案,施工过程和监测数据验证了其合理性。

关键词: 岩土工程;施工顺序;数值模拟;偏压隧道;小净距;地层变形

中图分类号: TU997

文献标识码: A

Study on Influence of Construction Sequence in Shallow Tunnel with Bias and Small Net Distance Based on Numerical Simulation

YAO Yu¹, LI Wei^{2*}, YAN Sheng³, GUAN Haijin³, CHEN Hao¹

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

3. Suzhou Wuzhong District Transportation Engineering Construction Service Center, Suzhou, Jiangsu 215128, China)

Abstract: For the shallow tunnel of Qizishan with small net distance bias, the typical locations of the tunnel were selected to establish a fine three-dimensional model, and the tunnel construction process under different construction sequences was simulated. The effects of three different construction sequences of bias side first, bias side second and simultaneous construction on the formation deformation and structural stress were studied, which provided a basis for the determination of construction sequence. The results show that the first construction on the bias side causes the largest stratum displacement, followed by the simultaneous construction, and the last is the backward construction on the bias side. The maximum variation of the vertical and horizontal displacement of the stratum caused by the construction sequence is 15.50% and 62.50% respectively, and the maximum variation of the internal force of the supporting structure is 22.63%. Considering that the formation displacement and structural force variation caused by the change of construction sequence are within the allowable range, the on-site construction of Qizishan tunnel adopts the scheme of simultaneous tunneling of left and right lines, and the construction process and monitoring data verify its rationality.

Key words: geotechnical engineering; construction sequence; numerical simulation; bias tunnel; small span; formation deformation

收稿日期:2023-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378358);中央高校基本科研业务费专项项目(Y321002,Y324001);江苏省交通运输科技项目计划(2022Y20-2)

作者简介:姚宇(1978-),男,江苏南京人,硕士,教授级高级工程师,从事隧道智能设计与养护、交通工程方面的研究。

*通信作者:李威(1994-),男,安徽泗县人,硕士,工程师,从事岩土工程数值计算方面的研究。

随着城市交通基础设施建设的快速发展,高速公路、城市快速路等交通干线在修建过程中不可避免地需要穿越城市建筑密集区、山岭、水道等。由于地下空间、地质状况等因素的限制,浅埋小净距双孔乃至多孔隧道工程实例也越来越多^[1-2]。由于浅埋小净距隧道埋深较浅,隧道间中岩柱厚度较小,隧洞之间施工存在相互干扰,隧道施工对地表影响较大,由此导致浅埋小净距隧道施工难度、工程风险及工程工期较常规隧道明显增加^[3-4]。因此,针对浅埋小净距隧道开展施工方案影响研究,对浅埋小净距隧道的建设具有重要意义。

众多学者通过物理模型试验及数值模拟等方法对浅埋小净距隧道施工过程开展研究。扈萍等^[5]通过建立有限元模型研究小净距隧道施工过程中后行洞开挖对先行洞的影响;李志南等^[6]运用有限元方法研究肩驮式双隧洞布置间距及施工顺序对地表变形的影响;夏梦然^[7]通过建立浅埋小净距隧道开挖物理模型试验系统,研究了小净距隧道不同开挖阶段对地层变形的影响;金大龙等^[8]通过离心模型试验方法,分析了小净距隧道群施工对周围土体的影响。上述研究表明,立体交叉、重叠、并行等不同空间位置关系的浅埋小净距隧道工程,施工方案的选择不同,对地表及隧道结构影响不同,但尚未形成统一结论,针对特定工程仍需根据实际工程设计、工程环境等进行具体分析。相比物理模型试验,数值模拟具有更高的灵活性及经济性。为减少计算量,上述研究采用有限元方法时常采用平面模型或简化隧道施工过程,忽略隧道延伸方向施工影响及施工工序影响,导致计算结果与实际情况有一定的出入。本文以苏州长江路南延工程七子山隧道为工程背景,针

对浅埋偏压小净距非对称隧道暗挖施工段建立精细化三维模型,以隧道地表变形、支护结构受力等作为影响判据,研究左右线不同施工顺序影响,为合理确定隧道施工顺序提供参考。

1 工程概况及数值模型

1.1 三维模型建立

七子山隧道项目是构成苏州市“八纵八横”主干路网的关键控制性工程,总长达 6.18 km,为国内最长城市山岭隧道。隧道采用两端明挖与穿山暗挖施工形式,两端设置匝道进出隧道主线,形成 30.6 m 超大跨度断面。隧道进口段以暗挖隧道方式由北向南下穿七子山公墓,下穿公墓段长约 640 m,左右隧道最小净距约 7.1 m,隧道拱顶与公墓最小距离为 4.3 m,且进口段约 80 m 主要处于 VI 级围岩区域。

根据设计及地勘资料建立地层-结构精细化三维有限元模型,模型上边界为地表,竖向高度为 60.0 m,隧道延伸方向取 80.0 m,垂直隧道延伸方向为 150.0 m。土体、支护结构及衬砌结构均采用实体建模,考虑模型较为复杂,玻璃纤维锚杆对掌子面的加固作用及搅拌桩对地基的加固作用通过提高加固区域土体参数进行考虑^[9-10]。模型共剖分单元 536 608 个,节点 610 280 个,整体有限元模型如图 1(a) 所示,衬砌及初期支护结构模型如图 1(b) 所示。模型地表为自由边界,四周进行法向约束,底部进行三个方向约束。

1.2 本构模型及参数取值

非线性材料土体的本构模型采用了南水双屈服面弹塑性模型^[11](简称南水模型),南水模型兼顾了邓肯模型和剑桥模型的优点,服从广义塑性

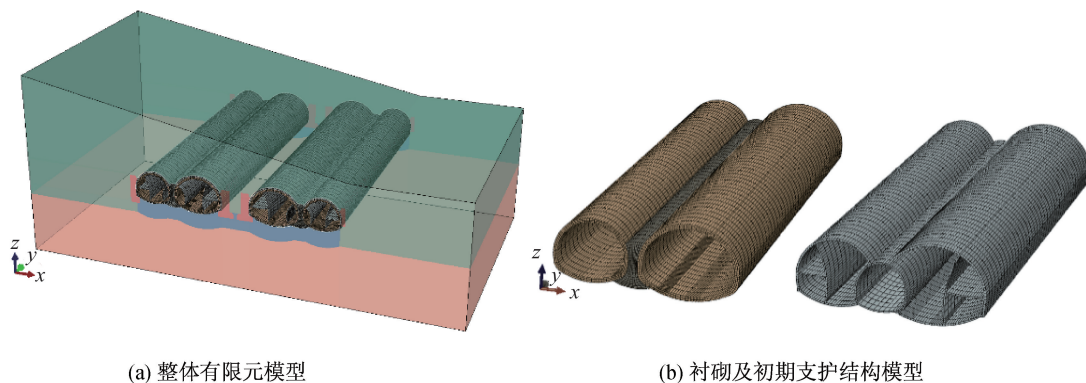


图 1 隧道有限元计算模型

Fig. 1 Finite element mesh of the tunnel

力学理论。该模型把屈服面看作是弹性区域的边界,采用塑性系数的概念代替传统的硬化参数的概念,南水模型采用双屈服面来描述土体的屈服特性,两个屈服面分别由椭圆函数和幂函数组成:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p^2 + r^2 q^2 \\ F_2 &= q^s / p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $q = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} / \sqrt{2}$; r 为椭圆的长短轴之比, s 为幂次; σ 为主应力。

南水模型包括模量 K 、黏聚力 c 、试验常数 n 、破坏比 R_f 、内摩擦角 φ_0 、内摩擦角变化量 $\Delta\varphi$ 、回弹模量 K_{ur} 、最大收缩体应变 C_d 、幂函数 n_d 、剪胀比 R_d 共计 10 个参数,前 6 个参数的整理方法与邓肯-张模型参数整理方法相同。南水模型参数中, K_{ur} 一般取 $(2\sim 3)K$ 。

地层土体南水模型参数根据现场取样进行室内三轴排水剪试验确定,加固区域土体参数在地层土体参数的基础上进行提高^[12],管幕加固区、初期支护及二次衬砌均采用线弹性本构模型,弹性模量分别取值为 44、23 以及 33 GPa,泊松比取 0.2,土体本构模型参数取值如表 1 所示。

1.3 计算工况

现场施工原计划左右线隧道顺序施工,后因项目工期紧张,考虑采用左右线并行推进的施工顺序。浅埋偏压小净距隧道开挖施工在力学上是不可逆的弹塑性应力重分布的过程,左右线施工顺序的不同将对地层及支护结构带来不同的影响。为分析浅埋偏压小净距左右线并行隧道施工

顺序对地表、中岩柱变形及结构受力影响,设计三种施工顺序工况。

工况一:左线隧道施工完成后施工右线隧道,即偏压侧先行;工况二:右线隧道施工完成后施工左线隧道,即偏压侧后行;工况三:左线隧道及右线隧道同时施工,即同时施工。计算过程中不考虑锚杆、管幕及搅拌桩等加固措施的施工对地层的影响,假定加固措施在开挖施工前已经形成。左右线隧道开挖顺序如图 2 所示。

断面具体施工顺序为:先采用短台阶法开挖中导洞,与中导洞掌子面错开 30 m,开挖左线匝道(右线主线)侧导洞;左线匝道侧导洞(右线主线侧导洞)开挖完成 30 m 后,进行左线主线(右线匝道)侧导洞开挖;左线(右线)中导洞开挖完成后,进行中隔墙施工,自大里程向小里程方向进行衬砌施工;左线(右线)中隔墙施工完成后开挖左线匝道(右线主线);左线匝道(右线主线)二次衬砌滞后掌子面 30 m;左线匝道(右线主线)二次衬砌完成 30 m 后,开挖左线主线(右线匝道)主洞;左线主线(右线匝道)二次衬砌滞后掌子面 30 m。

2 施工顺序对变形影响分析

2.1 地层竖向变形分析

为分析左右线隧道不同施工顺序对地层竖向变形的影响,选取隧道延伸 10 m 处断面,绘制隧道施工完成时断面竖向位移等值线图,如图 3 所示。由图可知,三种工况下,地层竖向变形分布规律基本一致,隧道结构上部地层主要表现为沉降,下部地层表现为卸载回弹,左右线匝道与主线之间中

表 1 土体本构模型参数

Tab. 1 Parameters of soil constitutive model

土样	K	n	R_f	c/kPa	φ_0	$\Delta\varphi$	$C_d/\%$	n_d	R_d
土层一	68.9	0.58	0.75	36	30.6	4.5	2.63	0.67	0.72
土层二	95.2	0.49	0.55	64	38.5	12.1	1.43	0.83	0.52
加固区域	300.0	0.42	0.70	35	36.0	12.5	3.30	1.36	0.57

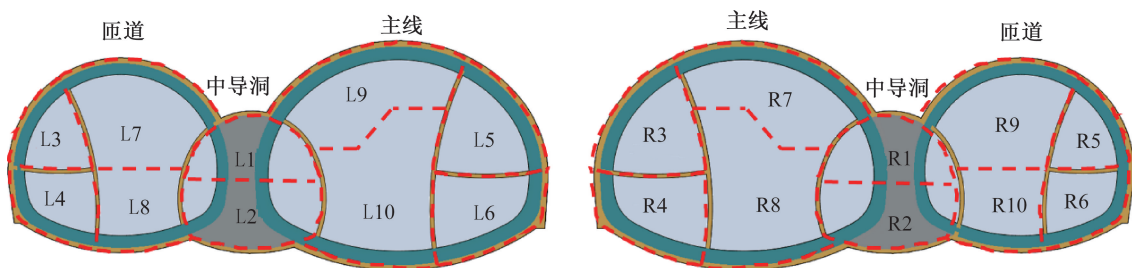


图 2 隧道断面施工顺序

Fig. 2 Construction sequence of tunnel cross-section

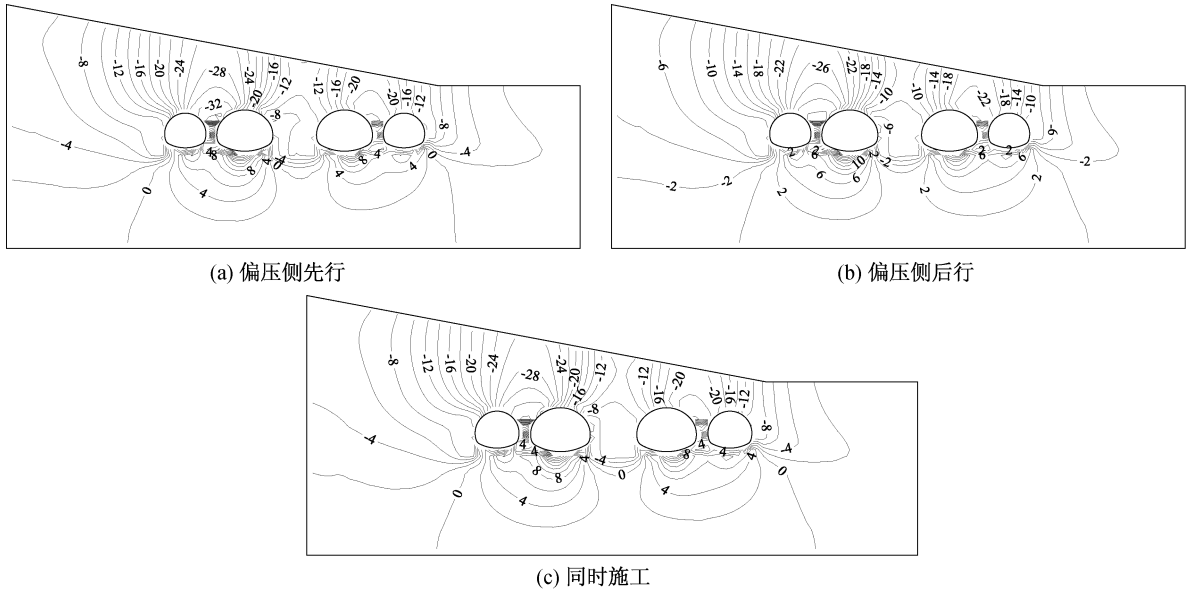


图3 地层竖向变形分布等值线图(单位:mm)

Fig. 3 Contour map of vertical deformation distribution of strata (unit: mm)

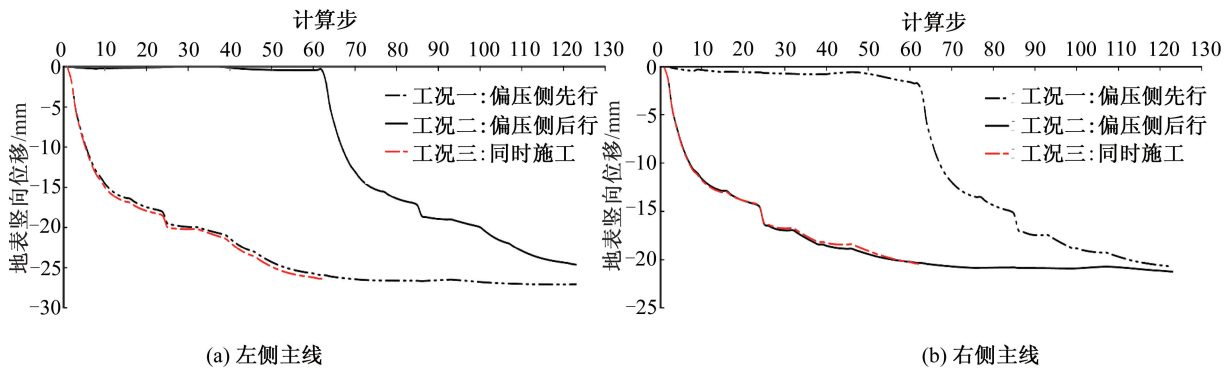


图4 地表竖向位移变化曲线

Fig. 4 Variation curve of vertical displacement of the surface

隔墙上部竖向变形大于两侧,左侧偏压侧竖向变形大于右侧非偏压侧。

2.2 地表变形分析

图4为三种工况下,隧道延伸10 m处左侧主线及右侧主线顶部地表竖向位移随施工过程变化曲线,由图可知,左右侧主线顶部地表竖向位移主要发生在相应位置下部开挖阶段,且随着掌子面的远离,竖向位移变化速率减小且趋于稳定;同时施工工况下,左侧及右侧主线顶部地表竖向位移变化规律分别与偏压侧先行工况下左侧主线顶部地表及偏压侧后行工况下右侧主线顶部地表竖向位移变化规律相同。

选取隧道延伸10 m处断面,绘制施工完成时三种工况下沿垂直隧道延伸方向地表竖向位移及水平位移变化曲线,分别如图5(a)及图5(b)所

示。由图5可知,三种工况下,沿垂直隧道延伸方向地表位移变化规律基本相同,地表竖向位移呈“W”型,地表水平位移呈“M”型,即左右线隧道顶部地表位移大于隧道两侧及中间位置地表位移;隧道区域地表位移受施工顺序影响幅度大小排序为:偏压侧隧道顶部地表位移受施工顺序影响幅度>中岩柱位置顶部地表位移受影响幅度>非偏压侧隧道顶部地表位移受影响幅度,且三种施工顺序下相同位置竖向位移及水平位移在偏压侧先行工况下最大,其次为同时施工工况,偏压侧后行工况下最小。

选取左、右线隧道中间位置,绘制施工完成时三种工况下沿隧道延伸方向地表竖向位移及水平位移变化曲线分别如图6(a)及图6(b)所示。由图可知,沿隧道延伸方向,地表竖向位移呈减小趋势,但变化幅度较小,水平位移较为稳定;竖向位

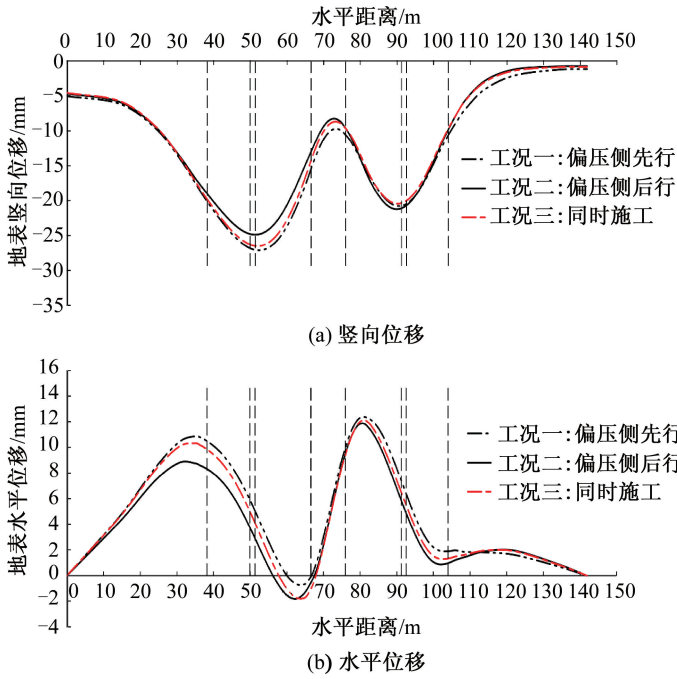


图 5 沿垂直隧道延伸方向地表位移变化曲线

Fig. 5 Variation curve of the surface displacement along the direction perpendicular to the tunnel extension

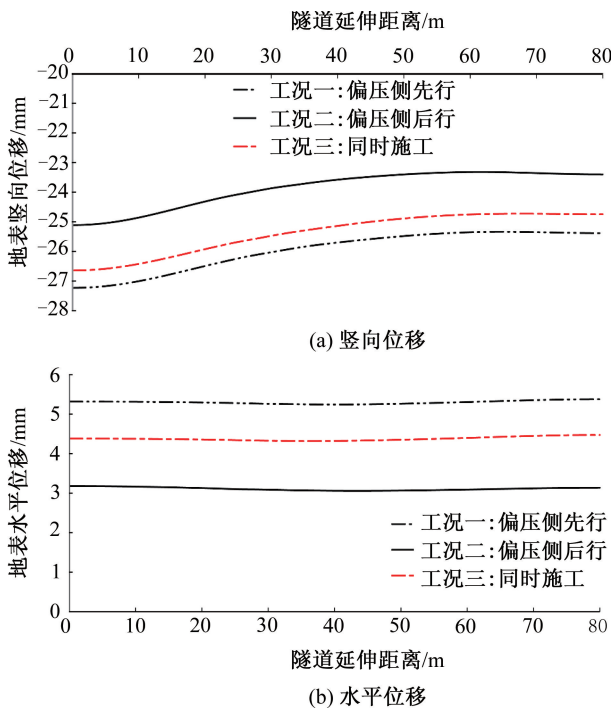


图 6 沿隧道延伸方向地表位移变化曲线

Fig. 6 Variation curve of the surface displacement along the extension direction of the tunnel

移及水平位移均在偏压侧先行工况下最大,同时施工工况下次之,偏压侧后行工况下最小。以偏压侧后行工况为基准,同时施工工况下竖向位移及水平位移增加分别为 6.80% 及 34.40%,偏压侧

先行工况下竖向位移及水平位移增加分别为 8.40% 及 62.50%。

2.3 中岩柱变形分析

对不同施工顺序下中岩柱位置地层位移进行分析,绘制施工完成时隧道延伸 10 m 处中岩柱中心位置沿高度方向地层竖向位移及水平位移分布曲线分别如图 7(a) 及图 7(b) 所示。由图可知,三种工况下,中岩柱地层沿高程方向位移分布规律相同,中岩柱位置地层位移主要发生在衬砌拱底高程以上,最大竖向位移发生在地表以下 2 m 左右,最大水平位移发生在衬砌拱顶高程附近。三种工况下,竖向位移最大值及水平位移最大值排序为偏压侧先行工况最大,其次为同时施工工况,偏压侧后行工况最小。以偏压侧后行工况为基准,同时施工工况下竖向位移及水平位移增加分别为 5.20% 及 18.80%,偏压侧先行工况下竖向位移及水平位移增加分别为 15.50% 及 39.10%。

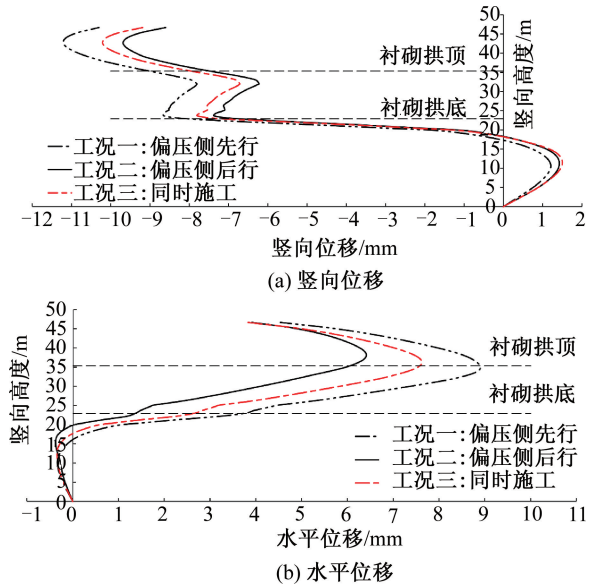


图 7 沿高程方向中岩柱位移变化曲线

Fig. 7 Variation curve of the middle rock column displacement along the elevation direction

3 施工顺序对支护结构受力影响分析

3.1 支护结构受力分析

为分析不同施工顺序对施工过程中初期支护结构受力影响,对隧道延伸 10 m 处初期支护结构不同位置轴力及弯矩进行分析,左、右线隧道各取 10 个分析点,不同点位置分布如图 8 所示。

因分析点位较多,选取左线隧道四个点(LC1、LC3、LC8 及 LC9)以及右线隧道四个点(RC1、

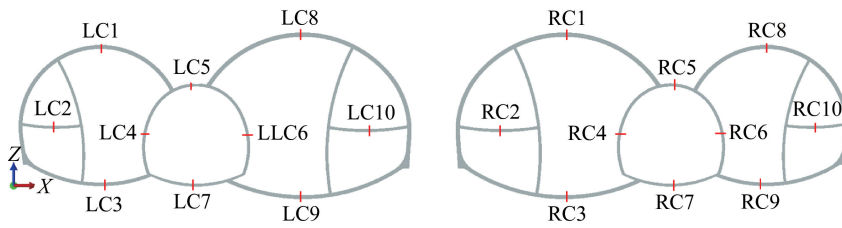


图8 初期支护结构受力分析点分布图

Fig. 8 Distribution diagram of initial supporting structure stress analysis points

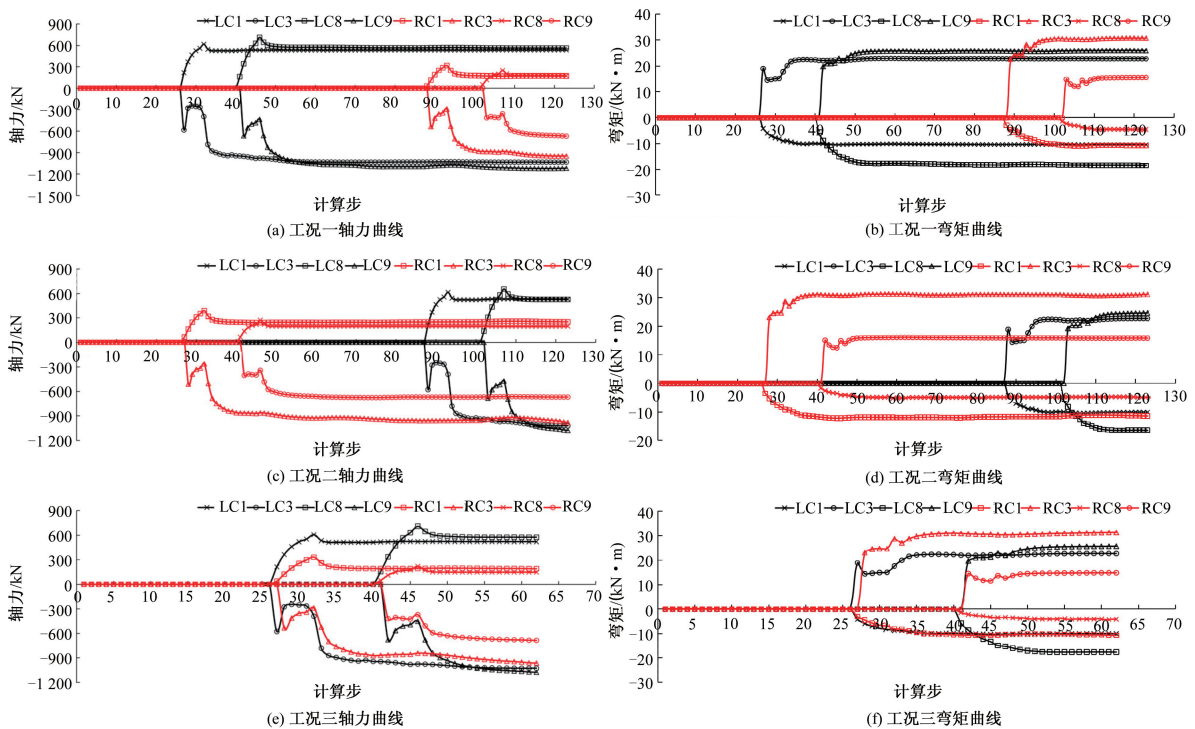


图9 初期支护结构受力变化曲线

Fig. 9 Variation curve of the stress on the initial support structure

RC3、RC8及RC9)绘制不同工况下对应位置轴力及弯矩随施工过程变化曲线,如图9所示。由图9可知,三种不同施工顺序下,初期支护结构自激活后,随着施工的推进,结构轴力及弯矩总体上均呈现先增加后保持稳定的趋势,左右线隧道相同位置(LC1与RC8,LC3与RC9,LC8与RC1,LC9与RC3)除RC3处弯矩大于LC9处弯矩外,其余点轴力及弯矩均为左线隧道大于右线隧道。

对不同工况下初期支护结构不同位置施工全过程中最大轴力及弯矩进行统计,结果如表2所示。

由表2可知,对于左线隧道初期支护结构各受力分析点,其在工况一即偏压侧先行施工下对应轴力及弯矩总体上最大,其次是工况三,工况二最小。以最小值作为基准,施工顺序改变引起左线隧道初期支护结构轴力最大变幅为8.30%,平均

变幅为2.99%;引起对应弯矩最大变幅为14.01%,平均变幅为4.61%。

对于右线隧道初期支护结构各受力分析点,其在工况二即偏压侧后行施工下对应轴力及弯矩总体上最大,其次是工况三,工况一最小。以最小值作为基准,施工顺序改变引起右线隧道初期支护结构轴力最大变幅为22.63%,平均变幅为7.91%;引起对应弯矩最大变幅为19.07%,平均变幅为6.51%。

3.2 衬砌结构受力分析

对隧道延伸10 m处衬砌结构不同位置轴力及弯矩进行分析,左右线隧道各取8个分析点,分析点位置分布如图10所示。

对不同工况下衬砌结构不同位置施工全过程中最大轴力及最大弯矩进行统计,结果如表3所示。

表 2 初期支护结构施工全过程内力最值统计表

Tab.2 Maximum force during the entire construction process of the initial support structure

隧道点	轴力/kN			轴力最大 变幅/%	弯矩/(kN·m)			弯矩最大 变幅/%
	工况一	工况二	工况三		工况一	工况二	工况三	
LC1	618.50	615.90	606.80	1.93	10.48	10.44	10.34	1.35
LC2	475.60	471.40	467.10	1.82	6.24	6.10	6.01	3.85
LC3	1 036.00	1021.00	1 029.00	1.47	22.88	22.75	22.79	0.57
LC4	964.00	951.00	958.00	1.37	15.00	14.80	14.90	1.35
LC5	1 470.00	1 451.00	1 409.00	4.33	19.43	19.98	19.03	4.99
LC6	1 016.00	1 005.00	1 018.00	1.29	193.20	190.80	193.40	1.36
LC7	1 029.00	1 019.00	1 023.00	0.98	40.94	40.20	40.76	1.84
LC8	711.20	656.70	709.50	8.30	18.48	16.50	17.57	12.00
LC9	1 124.00	1 077.00	1 075.00	4.56	25.93	24.74	25.73	4.81
LC10	621.50	645.30	644.90	3.83	11.25	12.53	10.99	14.01
RC1	319.40	390.10	333.10	22.14	11.01	12.28	10.76	14.13
RC2	392.40	346.20	380.40	13.34	12.34	11.30	11.75	9.20
RC3	949.30	983.80	965.70	3.63	30.79	31.36	31.25	1.85
RC4	618.00	638.10	630.50	3.25	96.72	97.77	98.04	1.36
RC5	860.70	879.30	872.50	2.16	10.45	10.66	10.86	3.92
RC6	758.80	768.80	767.80	1.32	63.73	63.95	64.09	0.56
RC7	676.10	693.80	664.70	4.38	25.33	26.15	25.75	3.24
RC8	248.30	272.60	222.30	22.63	4.57	5.00	4.20	19.07
RC9	671.50	676.60	686.90	2.29	15.54	16.14	14.84	8.76
RC10	310.90	299.00	309.80	3.98	5.06	4.93	5.08	2.96

注:LC 代表左侧隧道初期支护结构,RC 代表右侧隧道初期支护结构。

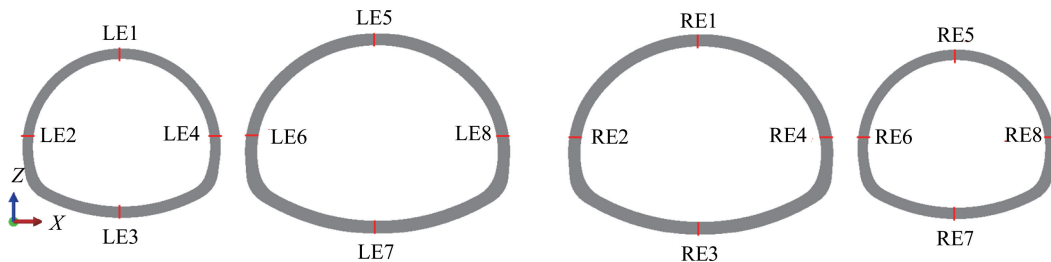


图 10 衬砌结构受力分析点分布图

Fig. 10 Location distribution of stress analysis points for lining structures

由表 3 可知,对于左线隧道衬砌结构各受力分析点,其在工况一即偏压侧先行施工的工况下对应轴力及弯矩总体上最大,其次是工况三,工况二最小。以最小值作为基准,施工顺序改变引起左线隧道衬砌结构轴力最大变幅为 36.65%,平均变幅为 10.45%;引起对应弯矩最大变幅为 31.74%,平均变幅为 11.43%。

对于右线隧道衬砌结构各受力分析点,其在工况二即偏压侧后行施工的工况下对应轴力及弯矩总体上最大,其次是工况一,工况三最小。以最小值作为基准,施工顺序改变引起右线隧道衬砌结构轴力最大变幅为 24.12%,平均变幅为 11.22%;引起对应弯矩最大变幅为 25.70%,平均变幅为 9.75%。

4 现场实施与监测

考虑施工顺序改变引起的地层位移变幅及结构受力变幅在安全范围以内,七子山隧道浅埋偏压小净距段进洞顺序按工况三即左右线同时进洞的顺序施工,且顺利完工。

图 11(a)为现场左线主洞监测点位置分布情况,其中监测点 G1 位于拱顶中间位置,监测点 G2 位于 G1 邻近中导洞一侧;图 11(b)为监测点累积竖向位移随时间变化曲线,由监测数据可知,G2 沉降量总体上略大于 G1,拱顶最大沉降量约为 2.5 cm,对比图 3 计算结果,计算变形规律与量值与现场监测结果一致。

表3 衬砌结构施工全过程内力最大值统计表

Tab. 3 Maximum force during the entire construction process of the lining structure

隧道点	轴力/kN			轴力最大 变幅/%	弯矩/(kN·m)			弯矩最大 变幅/%
	工况一	工况二	工况三		工况一	工况二	工况三	
LE1	756.90	748.30	763.00	1.96	50.62	50.08	50.97	1.78
LE2	831.40	816.80	830.60	1.79	27.27	26.46	26.95	3.06
LE3	812.00	807.70	802.80	1.15	156.20	152.80	154.10	2.23
LE4	853.40	845.50	855.50	1.18	34.62	33.31	34.18	3.93
LE5	1 048.00	766.90	815.40	36.65	99.11	75.23	79.66	31.74
LE6	849.10	758.20	779.20	11.99	29.85	26.38	27.31	13.15
LE7	958.70	934.00	943.30	2.64	202.30	187.60	192.30	7.84
LE8	915.60	725.30	763.40	26.24	33.46	26.20	28.42	27.71
LE9	878.10	887.60	734.90	20.78	79.97	80.53	67.76	18.85
LE10	749.10	833.30	748.80	11.28	27.81	29.88	27.73	7.75
RE1	834.20	844.70	819.70	3.05	176.30	176.00	176.60	0.34
RE2	840.80	864.10	845.20	2.77	39.42	40.48	39.70	2.69
RE3	294.00	319.20	275.10	16.03	23.46	24.93	22.22	12.20
RE4	366.40	432.20	348.20	24.12	9.30	11.38	9.05	25.70
RE5	593.80	605.10	565.50	7.00	104.90	107.40	102.40	4.88
RE6	625.70	644.50	615.30	4.75	30.18	31.13	29.48	5.60
RE7	756.90	748.30	763.00	1.96	50.62	50.08	50.97	1.78
RE8	831.40	816.80	830.60	1.79	27.27	26.46	26.95	3.06
RE9	812.00	807.70	802.80	1.15	156.20	152.80	154.10	2.23
RE10	853.40	845.50	855.50	1.18	34.62	33.31	34.18	3.93

注:LE代表左侧隧道二次衬砌结构,RE代表右侧隧道二次衬砌结构。

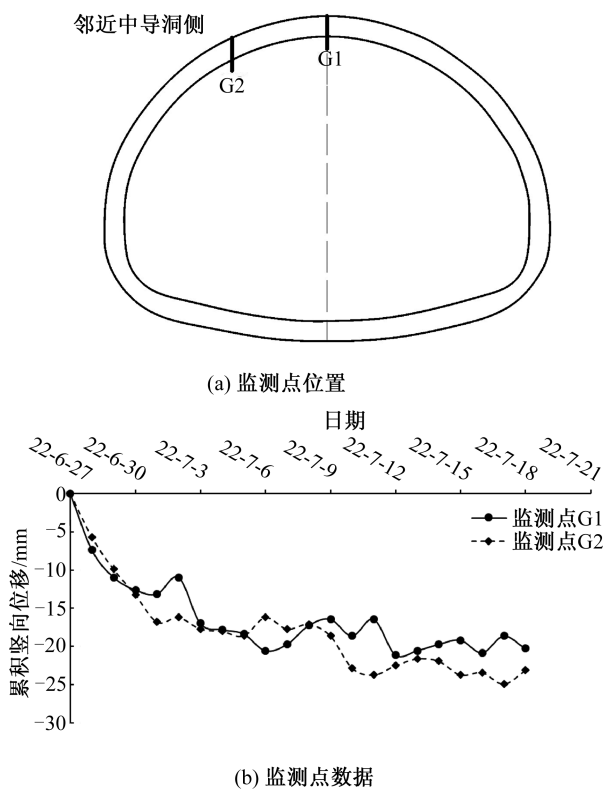


图11 现场监测结果

Fig. 11 Results of site monitoring

5 结论

1) 针对浅埋偏压小净距隧道,不同施工顺序引起隧道结构周边地层变形规律基本相同,总体上偏压侧先行施工工况引起地层位移最大,其次为同时施工工况,偏压侧后行施工工况最小,施工顺序引起地层竖向位移及水平位移最大变幅分别为15.50%及62.50%。

2) 施工顺序的改变会引起初期支护结构及衬砌结构受力的改变,对非偏压侧结构影响大于偏压侧结构,且偏压侧结构受力在偏压侧先行施工工况下最大,非偏压侧结构受力在偏压侧后行施工工况下最大,施工顺序改变引起支护结构内力最大变幅为22.63%。

3) 七子山浅埋偏压小净距段隧道采用左右线同时进洞施工方案可满足施工安全要求,现场监测数据验证了该方案的可行性,研究方法和结论可为类似隧道进洞设计和施工提供参考。

参考文献:

[1] 肖昭然,胡娟,刘克瑾.小净距隧道施工对地下管线性

- 状影响的数值分析[J]. 公路, 2019(12): 286-292.
- [2] 丰土根, 况梦祥, 沈正伟, 等. 双线盾构隧道侧穿既有桥桩影响分析及加固优化[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 55-62.
- [3] 黎春林, 张际鑫. 盾构隧道施工临近建筑物风险等级评估方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 40-45.
- [4] 冯慧君. 新建地铁隧道近距离下穿运营地铁线路施工及安全管控[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 220-226.
- [5] 扈萍, 马梁, 李萌, 等. 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.
- [6] 李志南, 潘珂, 王位赢, 等. 双隧道开挖对地表沉降及埋管的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(3): 588-597.
- [7] 夏梦然. 城市浅埋小净距隧道开挖诱发地表沉降及控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [8] 金大龙, 袁大军, 韦家昕, 等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1507-1514.
- [9] 方勇, 何川. 平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1402-1406.
- [10] 江华, 殷明伦, 江玉生, 等. 深圳地铁盾构隧道近距离上跨既有有线引起的结构变形研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 94-202.
- [11] 司海宝, 化西婷. 南水模型在ABAQUS中的实现及在工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 52-55.
- [12] 秦网根, 蔡正银, 关云飞, 等. 不同地基处理方式下组合式板桩码头结构的受力变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 158-162.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第72页)

筋应力计等传感器开展了现场试验, 研究了公路黄土隧道仰拱初期支护和二次衬砌力学特性, 得到主要结论如下:

1) 黄土隧道仰拱受力状态受黄土隧道埋深影响显著。埋深较小的隧道仰拱拱底主要承受压应力, 而埋深较大的隧道仰拱拱底主要承受拉应力。

2) 黄土隧道仰拱受力特征受埋深、地基沉降和施工扰动的影响。黄土隧道埋深较小时, 仰拱结构受力状态复杂, 受压和受拉区域没有显著规律。隧道埋深较大时, 仰拱结构表现出上部受压下部受拉。

3) 黄土隧道仰拱施作完毕后, 仰拱结构受力不断调整, 最终逐渐趋于稳定。二衬施作完毕后一个月左右, 仰拱结构应力基本进入稳定状态。

参考文献:

- [1] 刘耿仁, 龙称心. 甜永高速公路某黄土隧道仰拱开裂原因分析及处置措施[J]. 路基工程, 2020, (03): 230-234.
- [2] 赖金星, 余德强, 冯志华, 等. 黄土连拱隧道支护结构力学特性现场试验[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(05): 180-191.
- [3] 王明年, 翁汉民, 李志业. 隧道仰拱的力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 1996, (01): 46-53.
- [4] 张双苗. 浅埋黄土隧道塌方破坏模式及处置技术[J]. 河北工程大学自然版, 2024, 41(01): 62-71.
- [5] 柳锐锋, 范祺. 新建黄土隧道仰拱开裂原因与处治技术[J]. 山西交通科技, 2022, (02): 90-92.
- [6] 孔恒, 王梦恕, 张德华. 隧道底板隆起的成因、分类与控制[J]. 中国安全科学学报, 2003, (01): 33-36.
- [7] 杨川福, 陈铖. 黄土隧道仰拱填充层致裂原因及处治措施研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(4): 151-159.
- [8] 宋建强. 隧道仰拱及二衬拱脚渗水的处置技术[J]. 中国公路, 2021, (07): 114-115.
- [9] 李林毅, 阳军生, 王立川, 等. 强降雨作用下高速铁路隧道仰拱隆起原因分析及整治[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 27-36.
- [10] 李健. 大断面黄土隧道初支作用机理及变形控制技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [11] 任越, 祝华杰. 黄土公路隧道仰拱曲率对结构受力的影响分析[J]. 山西交通科技, 2023, (03): 104-106+114.
- [12] 季伟伟, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 软塑黄土地区隧道仰拱热力响应特性现场试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(02): 558-564.
- [13] 王传武, 陈丽俊, 陈建勋, 等. 大跨度软岩公路隧道仰拱承载性能及安全性研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 203-215.
- (责任编辑 周雪梅)