

四洞分离式隧道洞口施工影响研究

肖长进¹, 路祥², 严为孝¹

(1. 福州左海建设投资有限公司, 福建 福州 350007; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 随着日益增长的公共交通需求, 四洞分离式隧道逐渐成为隧道工程领域关注的对象。隧道洞口段由于围岩风化严重, 整体强度较低等原因, 实际隧道洞口施工难免会遇到各种挑战。为分析四洞隧道洞口段开挖对结构稳定性的影响, 基于福州董峰山隧道工程, 采用有限元法进行数值模拟计算, 分析隧道群不同开挖工序和隧道掌子面错距等因素对隧道洞室与围岩的整体稳定性。结果表明: 隧道开挖次序对隧道稳定性与围岩自稳能力有显著影响, 采用两侧辅路隧道先行开挖, 后开挖中间两主路隧道的方案更为合理; 隧道掌子面错距对辅洞拱顶沉降影响不大, 对隧道中夹土柱与隧道拱腰变形影响显著。实际工程中可考虑采用隧道掌子面错距8 m的方案进行施工, 并重点监控隧道拱腰处的土体应力与位移变化。

关键词: 四洞隧道; 隧道洞口; 隧道掘进; 数值模拟; 衬砌稳定

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0111-08

Construction Stability Influence of Four-bore Separated Tunnel Portals

XIAO Changjin¹, LU Xiang², YAN Weixiao¹

(1. Fuzhou Zuohai Construction Investment Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: To meet the growing demand for public transportation, four-bore separated tunnels have gradually attracted attention in the engineering field. Additionally, due to severe weathering of the surrounding rock and overall low strength at the tunnel portal sections, various challenges are inevitably encountered in actual tunnel engineering. To analyze the impact of excavation on the structural stability of the portal section of four-bore tunnels, based on the Dongfengshan Tunnel project in Fuzhou, this work employs the finite element method for numerical simulation calculations. The overall stability of the tunnel chambers and surrounding rock under different excavation sequences of tunnel groups and stagger distances of tunnel faces was analyzed. The results indicate that the excavation sequence significantly affects the stability of the tunnel and the self-stability of the surrounding rock. The approach of first excavating the auxiliary roads on both sides, followed by the excavation of the two main road tunnels in the middle, is deemed more rational. The stagger distance of the tunnel faces has a minor impact on the settlement of the auxiliary tunnel crowns but significantly affects the deformation of the soil pillars between tunnels and the tunnel arch waists. In practical engineering, a construction scheme with a stagger distance of 8 meters for the tunnel faces can be considered, with a focus on monitoring the stress and displacement changes in the soil at the tunnel arch waists.

Keywords: four-bore tunnel; tunnel portal; tunnel excavation; numerical simulation; lining stability

进入二十一世纪以来,我国经济社会的快速发展,离不开对运输交通网的完善。然而我国多山地分布,不可避免地需要加大对山岭隧道的建设。同

时,常见的单线隧道与双线隧道已难以满足城市间运输需求,越来越多的三洞隧道与多洞隧道建设被提上日程。

目前单线隧道逐渐被多隧道群所取代,国内外众多学者针对小净距双隧道掘进的相互扰动展开研究。Aygar 等^[1]对洞口段隧道的破坏机理进行了解释与分析,对洞口支护进行了优化,明确洞口段设计与隧道的开挖不应该分开考虑,对软弱围岩区域应该重点考虑。Aygar 等^[2]根据土耳其北部某隧道工程,研究隧道洞口段施工时隧道的破坏机制,对支护系统展开数值分析,提出在软弱围岩情况下洞口段施工应充分考虑上覆土层的稳定性。Can 等^[3]展开了土耳其某铁路位于某地震高活跃地区隧道洞出口边坡稳定性研究。Nematollahi 等^[4]运用 Plaxis2D 有限元软件将双线小净距盾构隧道体系拓展到成几何分布的三平行隧道群,对三孔隧道施工次序进行优化分析。

国内外学者的研究基本集中在单线隧道与双线隧道方面,值得注意的是近些年来,部分学者如 Luo 等^[5]对三洞隧道的复杂扰动展开了研究分析。针对特大跨小净间距四洞隧道群施工研究较少的问题,本文采用有限元数值模拟方法对福州董奉山隧道工程洞口段展开研究分析。重点研究隧道开挖次序和掌子面错距等不同工况对隧道与围岩稳定性的影响。研究成果将为董奉山隧道洞口段工程提出最适宜的施工工况,可为此类工程施工提供参考。

1 工程概况

董奉山隧道是国道 G316 线项目的控制性工程,进口位于长乐市青山村。隧道穿越山体,出口位于长乐市岱边村。隧道设计为 1 座 4 洞分离式隧道,全长 4.07 km,主路隧道为双向八车道,辅路隧道为双向四车道。董奉山隧道入口段地貌实景图如图 1 所示。

拟建隧道进洞口及明挖段属于坡积平原地貌单元,坡度约 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$,上覆坡积黏性土、强风化凝灰熔岩。洞身段属于剥蚀残丘低山地貌单元,起伏变化大,洞身段地面高程 25.0 ~ 420.0 m,相对高差约 395.0 m。隧道天然山坡坡度约 $10^{\circ} \sim 60^{\circ}$,局部达 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,山脊(顶)陡峭。地层断面主要地质条件自上而下依次为:①(含碎石)坡积粉质黏土:灰黄、褐黄色,可塑~硬塑状。含高岭土、粗中砂、碎块石等,稍有光泽,捻面稍光滑,干强度及韧性均为中等。②全风化花岗岩:灰白色、灰黄、褐红,原岩结构已基本破坏,岩体完整程度属极破碎,岩体基本质量等级为 V 类。③砂土状强风化花岗岩,原岩结构已大部分破坏,但尚可辨认,岩体极破碎,呈散体状结构,岩

芯呈砂土状,遇水易软化,手可捏碎。



图 1 董奉山隧道入口段地貌实景图

2 数值分析模型

2.1 小应变土体硬化模型

如图 2 所示,小应变土体硬化模型(简称 HSS 模型)是 Benz^[6]在硬化土模型(简称 HS 模型)^[7]的基础上考虑了土体小应变阶段特点、土体剪切硬化和压缩硬化的特性改进而来。近年来,不少学者如戴轩等^[8],白时雨等^[9]运用小应变土体硬化本构模型在实际隧道掘进施工中进行分析,发现运用此本构模型的计算结果与实际工程监测数据基本一致。

小应变土体硬化模型的硬化屈服面在主应力空间中不是完全固定的,通常会伴随塑性应变同时增大,此现象用剪切屈服函数表达式为:

$$f_{12}^s = \frac{2q_a}{E_{50} q_a - (\sigma_1 - \sigma_2)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{E_{ur}} - \gamma^p \quad (1)$$

$$f_{13}^s = \frac{2q_a}{E_{50} q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_{ur}} - \gamma^p \quad (2)$$

式中: f_{12}^s 为 HSS 模型中与主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 相对应的剪切屈服函数; q_a 为应力应变关系曲线中的渐近偏应力; E_{50} 为 50% 极限强度处的割线模量; σ_1 和 σ_2 分别为最大和中间主应力; E_{ur} 为卸载再加载模量; γ^p 为塑性剪应变; f_{13}^s 为 HSS 模型中与主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 相对应的剪切屈服函数; σ_3 为最小主应力。

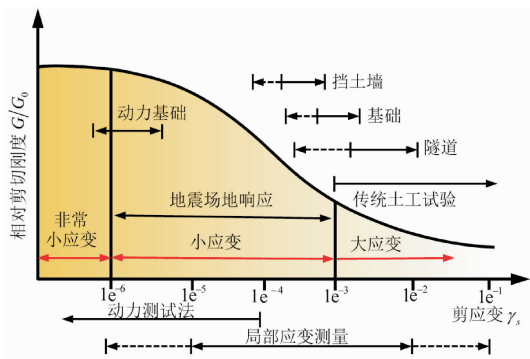


图 2 经典岩土工程中土体应变值取值范围

HSS 本构模型中的参数与 HS 模型基本相同,增加两个参数用于描述小应变刚度:初始小应变模量 G_0 ;剪切应变水平 $\gamma_{0.7}$,这在一定程度上解释了刚度对小应变状态的依赖性。其中正常固结条件下的静止侧压力系数 K_0 可根据 Mayne 等^[10] 的建议确定;Brinkgreve 等^[11] 的研究提出卸载泊松比 ν_{ur} 可以

通过三轴排水加卸载试验确定;Bolton 等^[12] 提出了对于剪胀角 ψ 的确定方法;其余参数可通过固结仪、应力路径三轴仪和共振仪测量取得。

综上,所取材料模型参数均参照地勘底料报告与相关已有文献[13]选取,三种土层关于 HSS 模型完整的参数如表 1 所示。

表 1 土体材料参数汇总表

岩样	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{ur}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\psi/(\text{^\circ})$	$C_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$	m
坡积粉质黏土(含碎石)	26	18.0	3.85	26.9	3.50	0	84.9	3.0×10^{-4}	0.62
全风化花岗岩	160	35.0	5.04	25.2	3.88	0	62.9	2.9×10^{-4}	0.94
砂土状强风化花岗岩	690	39.3	6.61	23.1	4.13	0	55.5	3.0×10^{-4}	0.72

注: c 为有效黏聚力; φ 为有效内摩擦角; E_{50}^{ref} 为三轴固结排水剪切试验测定的参考割线模量; E_{ur}^{ref} 为卸载加载模量; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为标准固结试验测定的参考应力下的切线模量; ψ 为剪胀角; C_0^{ref} 为初始小应变模量; $\gamma_{0.7}$ 为剪切应变水平; m 为应力水平相关幂指数。

2.2 超前管棚的模拟

近些年来,在超前支护方式中,超前管棚支护由于在实际工程中施工方便、性价比高,吸引大量学者参与研究,如许晓静等^[14] 和 Heng 等^[15]。该结构可以承受来自超前管棚上部的荷载,通过钢管的梅花形布置的注浆孔加压向围岩注浆,用以加固软弱围岩区域,提高围岩自稳能力。为了考虑超前管棚在拱顶注浆固结形成壳结构而产生的壳效应,在 PLAXIS 3D 数值分析软件中采用实体单元模拟超前管棚,如图 3 所示。

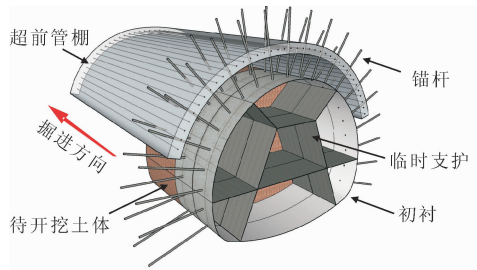


图 3 超前管棚示意图

为了考虑数值计算时钢筋混凝土起到的作用,采用等效弹性模量进行换算,具体公式为:

$$E = \frac{E_0 S_0 + E_g S_g + E_s S_s}{S} \tag{3}$$

式中: E 为换算后管棚弹性模量; S 为管棚截面面积; E_0 为管棚钢管弹性模量; S_0 为管棚钢管截面面积; S_g 为混凝土截面面积; E_g 为混凝土弹性模量; S_s 为钢筋截面面积; E_s 为钢筋弹性模量。

超前管棚注浆固结后在拱顶形成壳结构,在数值计算时为了考虑这种壳效应,需要增大结构参数,注浆厚度具体公式为:

$$D = 2 \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \tag{4}$$

式中: D 为注浆厚度; R 为注浆扩散半径; L 为相邻注浆孔间距。

2.3 分析模型与边界条件

为模拟实际工程情况,采用 Plaxis3D 有限元数值软件建立有限元模型,如图 4 所示。四洞分离式隧道洞口浅埋段轴线延 y 轴方向开挖,计算模型范围为长 300 m(沿 x 轴方向) $\times$ 宽 160 m(沿 y 轴方向) $\times$ 高 100 m(沿 z 轴方向)。有限元计算过程中,模型边界条件对计算结果的准确性有非常重要的作用,Su 等^[16] 提出左右边界最优取 7 倍洞径,下边界取 5 倍洞径。隧道的四周与底部边界均承受岩土的约束,因此有限元模型四周设置法向固定边界,只产生竖向位移(水平位移 $x=0, y=0$)。底部边界设置完全固定边界,限制所有方向上的位移(水平位移 $x=0, y=0$,竖向位移 $z=0$)。顶部设置自由边界,不对上部土体位移进行约束。同时为便于展开分析,对四洞隧道从左至右命名为 Z1 线(Z1 线隧道)、C1 线(C1 线隧道)、C2 线(右路主洞)和 Z2 线(Z2 线隧道)。

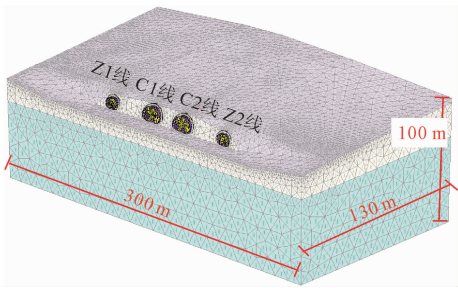


图 4 有限元模型图

3 群洞隧道开挖次序影响

依托福州市董奉山隧道洞口段所处实际工况,提出了图 5 所示五种不同四洞分离式隧道掘进次序方案。在此基础上展开不同掘进次序对四洞隧道影响程度的研究。暂不考虑超前管棚长度、隧道开挖进尺和隧道错距等不同设计方案对四洞隧道的影响,均选择超前管棚长度为 40 m、开进尺为 2 m 和隧道错距为 10 m 的基础工况。图中 Z1 线为 Z1 线隧道两车道隧道、C1 线为 C1 线隧道三车道隧道、C2 线为右路主洞三车道隧道以及 Z2 线为 Z2 线隧道两车道隧道。

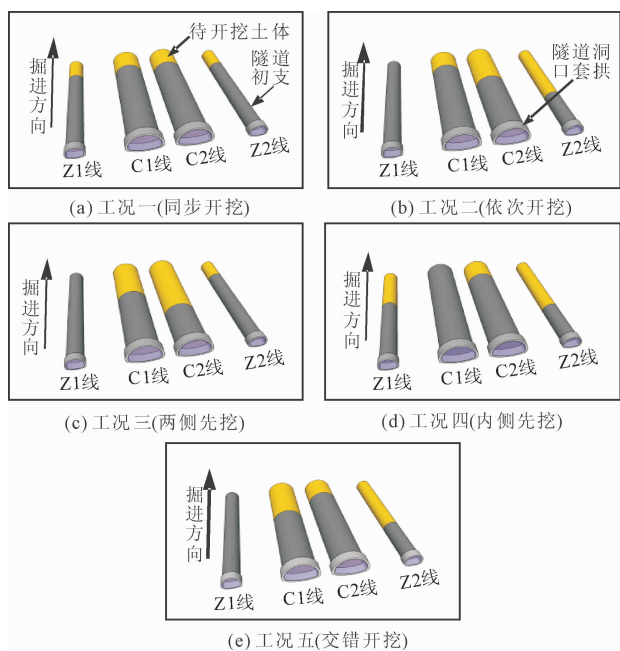


图 5 四洞隧道不同掘进次序方案

3.1 隧道初支径向位移变化规律

通过控制隧道错距、开挖进尺和超前管棚长度等因素的影响,图 6 给出了不同开挖次序下隧道初支位于监控断面($y = 50$ m)的径向位移变化曲线。隧道初支若向隧道中心发生变形则以正号表示,反之则以负号表示。采用公式(5)求得隧道左拱肩所对应的径向位移(左拱脚、右拱肩和右拱脚依此类推)。

$$U_r = \sin\left(\theta - \arctan \frac{U_y}{U_x}\right) \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (5)$$

式中: U_r 为隧道径向位移; θ 为该点所在半径与竖直方向夹角; U_x 为 x 方向总位移; U_y 为 y 方向上的总位移。

从图 6 初支关键位置变化规律来看,四洞隧道在同步开挖(工况一)下各隧道左右拱肩、拱脚处径向位移较大,拱顶处沉降更为显著。考虑原因是该

工况没有考虑相邻隧道掌子面错距,致使各隧道开挖过程中互相扰动程度最大。从图 6(a)和图 6(b)发现不同开挖次序对左右辅洞的影响差异不大,考虑是由于辅洞位于隧道群两侧,与两主洞距离较远且开挖断面远小于中间主洞开挖断面,受相邻隧道掘进影响较小。

Vitali 等^[17]总结绘制出新奥法隧道拱顶、拱肩和拱腰的应力路径图,当掌子面开挖至监控断面之前,平均应力与最大剪应力均向着开挖方向增大。当土体开挖还未施作初支时,土体发生卸荷,最大剪应力与平均应力都大幅度减小。当隧道施作初支后,最大剪应力与平均应力均增加并在掌子面远离监控断面过程中逐渐稳定。可见隧道初支水平收敛是评判小净距隧道安全性的重要指标之一,在相邻隧道开挖产生相互扰动时更为明显。此外拱腰水平收敛表现与拱顶沉降类似,当后行洞开挖经过先行洞监测断面时,会对先行洞产生较大程度的扰动,此现象在中间大断面小间距主洞隧道之间表现尤为明显。

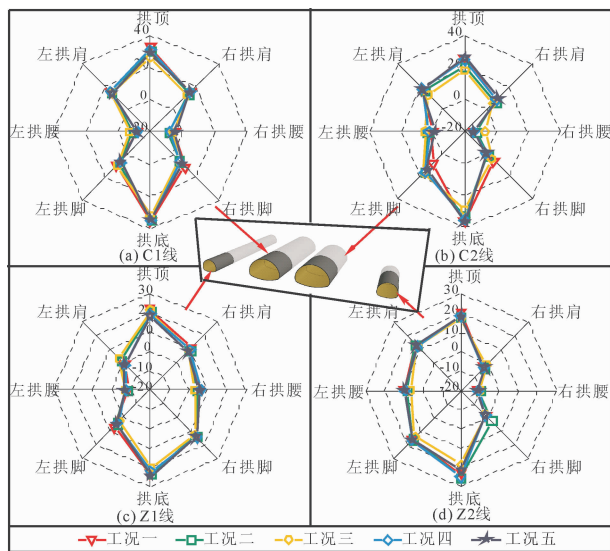


图 6 四洞隧道径向位移变化规律

3.2 隧道初支径向应力变化规律

图 7 为不同开挖次序工况下位于隧道监控断面($y = 50$ m)处关键部位的径向应力释放率变化图。式(6)为隧道监控断面初支左拱肩径向应力的计算公式(左拱脚、右拱肩和右拱脚依此类推)。

$$\sigma_r = \sin\left(\theta - \arctan \frac{\sigma'_y}{\sigma'_x}\right) \sqrt{\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2} \quad (6)$$

式中: σ_r 为隧道径向应力; σ'_x 为 x 方向上的有效应力; σ'_y 为 y 方向上的有效应力。

将隧道径向位移释放率定义为隧道开挖扰动后

隧道监控断面初支径向应力减少值与原未开挖扰动时该监控断面径向应力之比,用式(7)表示。

$$\lambda = \frac{\sigma_{0r} - \sigma_r}{\sigma_{0r}} \tag{7}$$

式中: λ 为隧道径向应力释放率; σ_{0r} 为隧道未开挖时监控断面径向应力; σ_r 为隧道开挖后监控断面径向应力。

从图 7 中关键部位径向应力变化规律来看,隧道掘进过程中会破坏周围土体原有的应力平衡状态,土体会在地应力作用下发生变形并使土体应力重新分布。由于大断面隧道支护强度相对较高,开挖过程对小断面隧道周围土体应力状态影响不大,但小断面隧道支护强度相对较低,在相邻隧道开挖过程中不可避免会对其周围土体产生二次扰动,导致周围土应力进一步释放。图 7(c)和图 7(d)中可以发现不同开挖工况下左右两侧辅洞监控断面处径向应力减小幅度略有差异,但差异并不足以支持左右两侧辅洞径向位移产生较大差异,此结论与上节结论一致,考虑原因是左右小断面辅洞与中间大断面主洞距离较大,受相邻主洞掘进扰动影响较小。图 7(a)和图 7(b)中可以观察到采用工况三时左右主路隧道在拱顶与左右拱腰处的径向应力减小程度较小,表明在该工况下左右主路隧道受相邻隧道开挖扰动影响程度最小,同时验证了上节图 6(a)和图 6(b)中工况三下主路隧道拱顶沉降与水平收敛程度最小的结论。

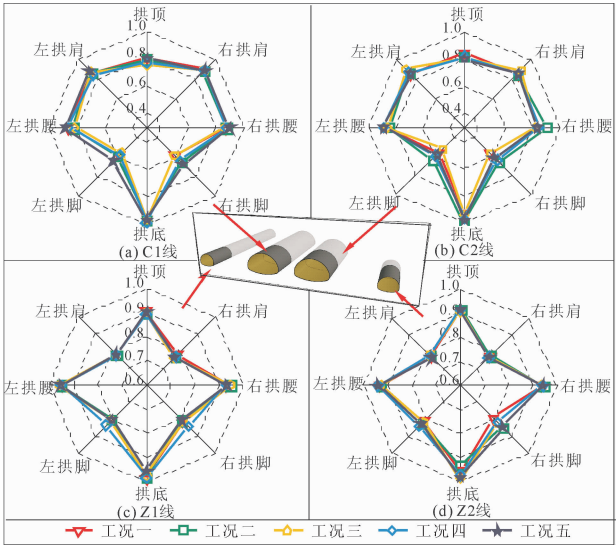


图 7 四洞隧道径向应力变化规律

4 隧道掌子面错距围岩响应特征

隧道掌子面错距是隧道群开挖过程中需要考虑

的重要影响因素,实际工程中为了减少相邻隧道开挖对围岩稳定性的影响,必须选取合适的隧道掌子面错开距离。对于四洞隧道纵向施工确定合理的掌子面错距,以控制隧道洞室与围岩的整体稳定性。为了确定实际工况下合理的掌子面错距,选取上节内容中两侧隧道先行开挖的对应工况,对相邻掌子面错距 L_f 为 4、8、12、16 和 20 m 六种工况进行数值模拟分析。

4.1 隧道拱顶沉降

隧道拱顶沉降的演变过程很大程度上可以反映掌子面错距对隧道与围岩稳定性的影响,是体现隧道与围岩稳定的重要指标之一。图 8 是四洞隧道相邻掌子面错距 8 m,距离拱顶 1 m 处的地层沉降值随着掘进深度的变化曲线图。四孔隧道拱顶沉降曲线形态均表现为平稳小幅下垂、快速下降、平稳小幅上扬和快速上扬最后逐渐收敛的发展阶段。其中平稳小幅下垂阶段处于洞口处施工的 40 m 超前管棚区域,超前管棚在纵横方向上等效形成“简支梁”与“承载拱”结构,很大程度上承载了上覆软弱破碎围岩形成的大部分压应力,提高其自稳能力,抵抗了拱顶过大的沉降变形。超前管棚后方拱顶的快速下降、平稳小幅上扬和快速上扬均属于单洞隧道开挖模式下的拱顶沉降正常变形。分析表明,C1 线隧道的拱顶沉降值最大,达到 22.3 mm,可见研究主洞隧道的拱顶沉降位移更具有代表性。掌子面后的逐渐收敛阶段为超前沉降阶段,此发展阶段表示隧道洞室开挖前拱顶已产生较大沉降。超前沉降及当前沉降如表 2 所示,由表 2 可知,C1 线隧道当前的超前沉降率为 25.60%,超过四分之一的超前拱顶沉降发生在隧道掌子面之前。原因是左右主洞为后行洞,在开挖之前就受到了左右先行辅洞施工的影响。左右主洞采用双侧壁导坑工法施工,受到了左右侧上台阶导坑先行掘进的影响,表明小间距隧道的相互扰动非常显著。

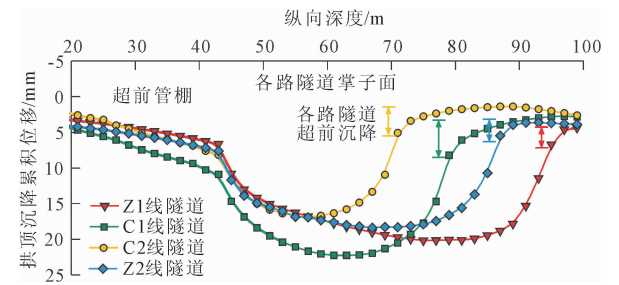


图 8 四洞隧道拱顶沉降

表 2 超前沉降及当前沉降

隧道拱顶沉降	Z1 线隧道	C1 线隧道	C2 线隧道	Z2 线隧道
超前沉降/mm	2.32	4.98	2.47	1.84
当前沉降/mm	15.8	19.45	14.11	14.32

图 9 为 C1 线隧道掌子面位于 $y = 74\text{ m}$ 时,不同开挖错距下 C1 线隧道的拱顶沉降随掘进深度变化的曲线。研究表明,五种不同开挖错距下的主洞沉降曲线趋势基本一致,都渡过了五个不同的发展阶段。主洞拱顶累计沉降最大值位于 $y = 60\text{ m}$ 处,当隧道掌子面错距为 4 m 时其累计沉降为 20.85 mm 。相比于错距 20 m 时累计沉降 22.8 mm 减少约 8.6% 。不同隧道开挖错距引起的隧道拱顶超前沉降均由掌子面前方 15 m 处开始出现。实际工程中的左右主洞隧道掘进时,需要着重注意掌子面前方 15 m 围岩的扰动程度,以保证隧道洞室的整体稳定性。从控制四洞隧道拱顶沉降的角度来看,隧道掌子面错距应不超过 8 m 最为合适。

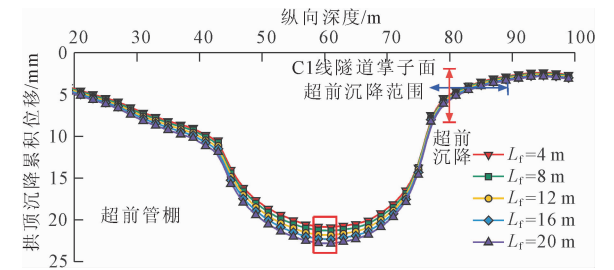


图 9 C1 线隧道拱顶沉降

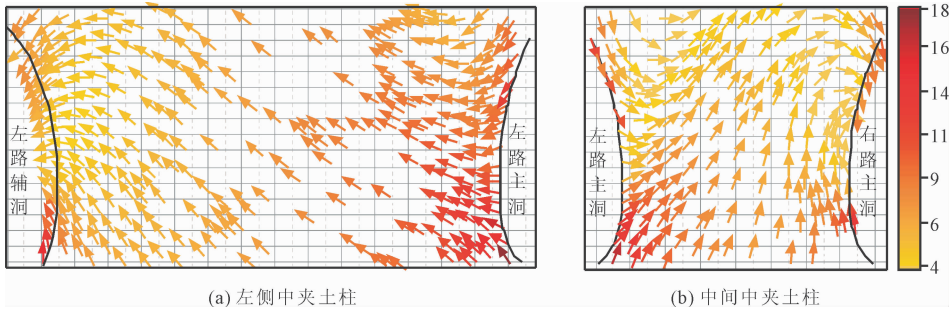


图 10 中夹土柱土体位移 (mm)

4.3 中夹土柱变形特征分析

隧道在初期支护完成后发生的应力集中分布具有一定规律性。随着隧道洞室的开挖,土体应力发生释放。由于双侧壁导坑工法的中隔墙结构具有较强的支撑能力与大断面隧道衬砌材料具有较强的刚度,大部分的最大主应力通过大断面隧道衬砌体由拱顶区域的竖向应力向拱腰区域的侧向应力发生转移。隧道衬砌体整体变形过程中对中夹土柱的挤压

4.2 隧道拱顶沉降

小净距隧道掌子面贯通后围岩发生软化,结构进一步松散,致使围岩自稳能力大幅度降低。隧道开挖后对周围土体的扰动造成土体中应力释放并重新分布,围岩将沿着较大刚度的衬砌体向下滑动。并将土体中一部分的自重与下滑力转移到衬砌体与中夹土柱中,可见在贯通过程中对中夹土柱的力学分析必不可少。

图 10 为隧道掌子面错距 4 m , 监控断面 $y = 51\text{ m}$ 处左侧与中间中夹土柱变形矢量图。分析表明, Z1 线隧道的先行开挖引起土体卸荷与土体应力降低。此过程引起左侧中夹土柱靠近隧道土体区域向左上方发生移动,且靠近 Z1 线隧道右拱腰的位置该土体位移越发明显。左侧中夹土柱远离隧道的土体主要表现为水平方向上的位移,可以归因于初始土体压力系数较高,水平应力减小对中夹土柱的影响略大于竖向应力的减小,此现象与中间中夹土柱略显不同。图 10(b) 中夹土柱位移基本以竖向位移为主,水平位移很小。考虑是由于中间两主洞为小净距大断面隧道体系,土体位移会随着隧道之间的顺序开挖引发围岩的强烈扰动。C2 线隧道采用双侧壁导坑工法施工,土体会向右上方导坑发生较大竖向的位移。研究表明隧道间的中夹土柱位移大部分集中在隧道拱腰周围,因此,有必要对隧道拱腰处的水平位移进行分析。

造成隧道拱腰在中夹土柱附近区域发生应力集中,因此监控隧道拱腰处的水平位移变化对保证中夹土柱与隧道整体稳定性具有重要的参考意义。

图 11 表示相邻隧道掌子面不同错距工况下随四洞分离式隧道顺序开挖引起的隧道拱腰处水平位移变化曲线,图中水平位移以 x 轴方向为正。分析表明, Z1 线隧道Ⅲ号导坑开挖引发隧道拱腰处土体卸荷,右侧拱腰快速向洞室内侧发生水平位移。由

于及时施作较大刚度初衬体,右侧拱腰结构向右侧土体发生挤压,Ⅵ号导坑开挖后隧道支护与围岩发生与上阶段基本相同的变形过程。后续 Z1 线隧道右拱腰由缓慢下降发展为快速下降,是由于相邻的 C1 线隧道掌子面开挖至监控断面,从而将左侧中夹土柱向左挤压。图中可以发现当错距小于 12 m 时掌子面尚未到达监控面曲线便开始快速下降(图 11 中箭头所示),考虑其原因为掌子面错距较小时相邻隧道顺序开挖引起中夹土柱强烈扰动从而引起围

岩提前发生变形。当隧道掌子面距离监控断面一定距离后隧道整体趋于稳定。对比可以发现,隧道掌子面错距越大,Z1 线隧道右拱腰向左快速变形经历的施工步骤越多,变形量越大,隧道整体的稳定性也相对较低。图 11(b)可以发现由于 C1 线隧道相邻Ⅱ号导坑的开挖,隧道左拱腰发生向洞内快速坍塌。随着初期支护及时施作,拱腰水平位移快速稳定并进入向左侧挤压的发展阶段,最终隧道拱腰在掌子面距离监控断面 20 m 后开始整体进入为稳定阶段。

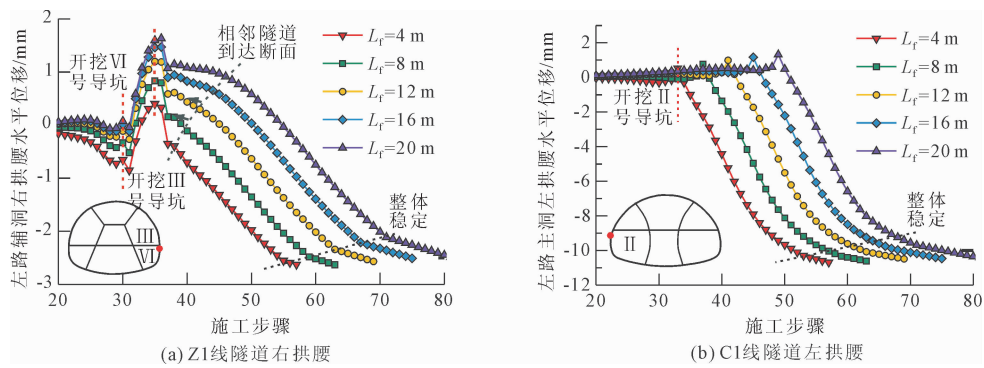


图 11 左侧中夹岩柱拱腰水平位移

中间中夹岩柱拱腰水平位移如图 12 所示,图 12(a)表明,由于掌子面错距越小,相邻隧道开挖对中夹土柱扰动程度越大;同时土体自稳能力越低,C1 线隧道Ⅳ号导坑开挖引起的土体卸荷程度也随之越大。支护施作后,拱腰向右侧发生快速变形。由于 C2 线隧道相继开挖至监控断面,中间中夹土柱受到右路隧道的影 响逐渐大于左路隧道的影响,致使 C1 线隧道右拱腰缓慢向左发生变形,同时明

确隧道右拱腰发展至该转折点水平位移量的增长趋势随着掌子面错距的增加而减缓。由图 12(b)可知,C2 线隧道左拱腰位置土体在左路隧道开挖过程中向右持续发生挤压变形,隧道掌子面错距越大,该发展阶段经历施工步骤越多,累计水平位移越大。在 C2 线隧道Ⅱ号导坑支护施作后拱腰快速向左发生挤压,并在掌子面距离监控断面 25 m 后整体进入稳定阶段。

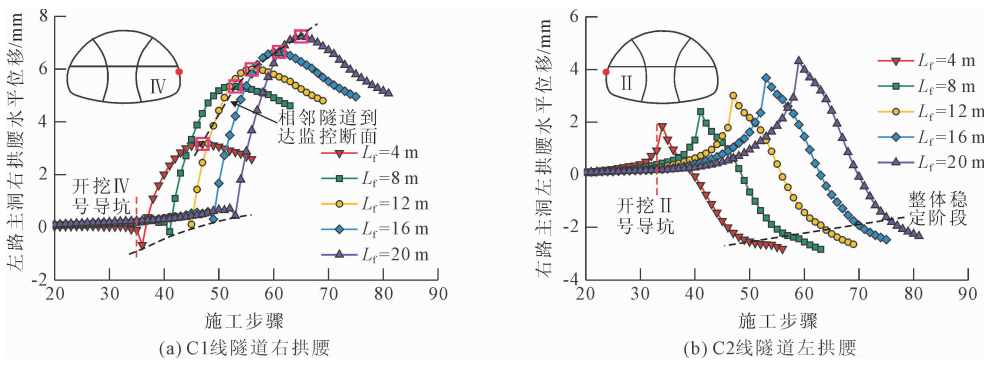


图 12 中间中夹岩柱拱腰水平位移

右侧中夹岩柱拱腰水平位移如图 13 所示,由图 13(a)可知,C2 线隧道右拱腰位置的土体在相邻导坑开挖前由于 C1 线隧道隧道的开挖整体向右侧发生位移,并在支护施作完成后由快速上升发展为逐渐收敛阶段。图 13(b)表明 Z2 线隧道左拱腰由于

Ⅱ号导坑的开挖向右侧突变后,向左侧发生变形。考虑原因一方面是拱腰处初衬被向左侧挤压,另一方面是由于该隧道采用三台阶七步预留核心土工法,中间Ⅳ号核心土同时将左侧土体向左侧挤压发生变形。当Ⅴ号导坑开挖左拱腰快速向洞室内坍

塌,初衬及时施作后向右变形的趋势逐渐放缓。若 Z2 线隧道为单体隧道开挖拱腰水平位移理论上应在掌子面距离监控断面 25 m 左右时进入收敛阶段,

但由于相邻隧道开挖至监控断面对右侧中夹土柱施加强烈的扰动,Z2 线隧道左拱腰水平向右位移持续维持在快速增长阶段。

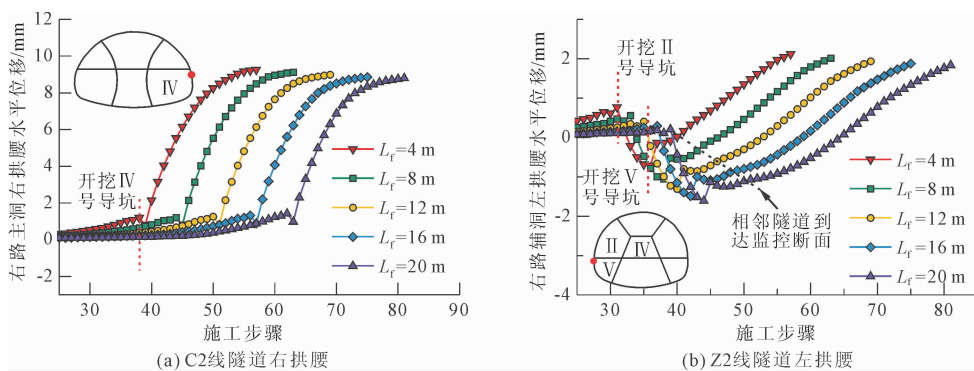


图 13 右侧中夹岩柱拱腰水平位移

5 结 论

(1) 四洞分离式隧道群开挖过程中,隧道开挖次序对隧道稳定性与围岩自稳能力有非常大的影响。四洞隧道开挖采用两侧辅路先行开挖,后开挖中间两主路隧道的方案最为合理。小净距主路隧道开挖掘进过程中相互扰动非常剧烈,并在隧道掌子面通过监控断面 30 m 时趋于稳定。

(2) 四隧道拱顶沉降曲线形态均表现为平稳小幅下垂、快速下降、平稳小幅上扬和快速上扬,最后逐渐收敛的发展阶段。其中掌子面错距对辅洞拱顶沉降影响不大,主洞拱顶沉降伴随掌子面错距变大而增大。掌子面错距对隧道中夹土柱与隧道拱腰的位移影响较大。实际施工中可采用掌子面错距 8 m 掘进开挖,并着重监控隧道拱腰处的土体应力与位移变化。

(3) 隧道开挖进尺越小,隧道拱顶沉降与竖向应力减小程度也随之减小。在实际工程中可采用“预支护、快挖、快支、快闭合”的设计基本原则,并可采用开挖进尺约 2.5 m 掘进施工。

参考文献:

- [1] Aygar E, Gokceoglu C. Effects of portal failure on tunnel support systems in a highway tunnel [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(8): 5707-5726.
- [2] Aygar E, Gokceoglu. Problems encountered during a railway tunnel excavation in squeezing and swelling materials and possible engineering measures: a case study from turkey [J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1166.
- [3] Can A, Baskose Y, Gokceoglu C. Stability assessments of a triple-tunnel portal with numerical analysis (South of

Turkey) [J]. Geotechnical Research, 2022, 9(2): 116-128.

- [4] Nematollahi M, Dias D. Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction-case of the shiraz subway line [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 75-88.
- [5] Luo Jiwei, Zhang Dingli, Fang Qian, et al. Mechanical responses of surrounding rock mass and tunnel linings in large-span triple-arch tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103971.
- [6] Benz T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2007.
- [7] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. The hardening soil model: formulation and verification [C]//Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years PLAXIS. Rotterdam: Balkema, 1999: 281-296.
- [8] 戴 轩, 郭 旺, 程雪松, 等. 盾构隧道平行侧穿诱发的建筑纵向沉降实测与模拟分析 [J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 233-244.
- [9] 白时雨, 王文军, 谢新宇, 等. 考虑扰动影响的土体小应变硬化模型参数试验研究及其在基坑工程中的应用 [J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 206-216.
- [10] Mayne P W, Kulhawy F H. Ko-Ocr relationships in soil [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108(6): 851-872.
- [11] Brinkgreve R B J, Vermeer P A. PLAXIS 3D Reference Manual Connect Edition V20 [R]. Delft, The Netherlands: PLAXIS Company, 2019.
- [12] Bolton M. Discussion: The strength and dilatancy of sands [J]. Géotechnique, 1987, 37(2): 219-226.

(下转第 135 页)

- 关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3491-3509.
- [8] 孙冠华, 易琪, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站大罐式地下内衬硐库上覆岩体稳定性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 2377-2391.
- [9] 徐英俊, 夏才初, 周舒威, 等. 基于极限分析上限定理的压气储能洞室抗隆起破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 1971-1980.
- [10] 饶虎, 王瑞. 压缩空气储能电站人工洞室储气库选址及主要设计原则[J]. 电力勘测设计, 2024(S2): 64-71.
- [11] 张国华, 相月, 王薪锦, 等. 压气储能地下内衬储气库结构荷载分担解析解及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2): 3633-3650.
- [12] 王其宽, 张彬, 王汉勋, 等. 内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1123-1131.
- [13] 何灏典, 唐欣薇, 严振瑞, 等. 复合式衬砌结构联合承载的原位试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 560-568.
- [14] Damasceno D R, Spross J, Johansson F. Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 119-129.
- [15] Qin Shikang, Xia Caichu, Zhou Shuwei. Air tightness of compressed air storage energy caverns with polymer sealing layer subjected to various air pressures [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(8): 2015-2116.
- [16] 周瑜, 夏才初, 周舒威, 等. 压气储能内衬洞室高分子密封层的气密与力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2685-2696.
- [17] 周瑜, 夏才初, 赵海斌, 等. 压气储能内衬洞室的空气泄漏率及围岩力学响应估算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 297-309.
- [18] 蒋中明, 李鹏, 赵海斌, 等. 压气储能浅埋地下储气库性能试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 235-241, 252.
- [19] 蒋中明, 秦双专, 唐栋. 压气储能地下储气库围岩累积损伤特性数值研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 230-238.
- [20] 赵凯, 马洪岭, 施锡林, 等. 基于蠕变疲劳本构模型的压气蓄能盐穴长期稳定性评估[J]. 岩土力学, 2025, 46(S1): 1-12.
- [21] 孙冠华, 王娇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下内衬硐库基本原理与分析方法研究进展[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 1-25.
- [22] DL/T 5893—2025 压缩空气储能电站地下储气库设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2025.
- [23] GB/T 50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [24] NB/T 10391—2020 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [25] NB/T 35056—2015 水电站压力钢管设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

(上接第118页)

- [13] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
- [14] 许晓静, 宋战平, 李辉, 等. 考虑拱效应的隧道管棚力学模型与参数分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 95-106, 132.
- [15] Heng Chaoyang, Sun Song, Zhang Jiantao, et al. Calculation method of underground passage excavation on interactive effects among pipe-roof, steel bracing and foundation soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 26(1): 448-459.
- [16] Su Kai, Zhang Yanjun, Chang Zhihui, et al. Transverse extent of numerical model for deep buried tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 373-380.
- [17] Vitali O P, Celestino T B, Bobet A. Construction strategies for a natm tunnel in São Paulo, Brazil, in Residual Soil[J]. Underground Space, 2022, 7(1): 1-18.