

无中导连拱隧道施工掌子面纵向合理间距研究

茶增云^{1,2}, 肖振江^{1,2}, 姜成业^{3,4}, 和振海^{1,5}, 孙印国^{1,5}

(1. 云南勐绿高速公路投资开发有限公司, 云南 普洱 665000;

2. 云南交投集团投资有限公司, 云南 昆明 650000;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

4. 中国科学院大学, 北京 100000; 5. 中铁开发投资集团有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要: 基于单洞工法施工的无中导连拱隧道后行洞施工紧邻先行洞, 后行洞和先行洞施工时掌子面的纵向间距对围岩变形及支护结构受力的影响不可忽视。以云南省某隧道为工程依托, 建立三维弹塑性模型采用数值计算方法开展了连拱隧道动态施工的仿真研究, 对连拱隧道开挖中监测断面拱顶沉降以及支护结构受力的空间影响效应、左右洞的相互影响效应进行分析。为避免施工中两洞影响区域的叠加, 从先行洞拱顶沉降变化得出合理间距不小于 32 m (约 2.5D), 根据支护结构受力得出合理间距不小于 28 m (约 2.2D)。综合来看, 两开挖面的合理间距应控制在 32 m (约 2.5D) 左右。

关键词: 隧道工程; 数值模拟; 连拱隧道; 影响效应; 合理间距

中图分类号: U455.6

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0184—05

Reasonable Distance Between Excavation Faces of Double Arch Tunnel without Middle Wall

CHA Zengyun^{1,2}, XIAO Zhenjiang^{1,2}, JIANG Chengye^{3,4}, HE Zhenhai^{1,5}, SUN Yinguo^{1,5}

(1. Yunnan Menglv Highway Investment and Development Co., Ltd., Pu'er, Yunnan 665000, China;

2. Yunnan Communications Investment Group Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;

5. China Railway Development and Investment Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: Based on the single-hole construction method in which the construction method of the second tunnel of a double-arch tunnel without middle wall is adjacent to the first tunnel. The distance between the excavation faces on the influence of the deformation of surrounding rock and supporting structure cannot be ignored. A tunnel in Yunnan Province was taken as an example in this paper, and a three-dimensional elastoplastic model is developed to carry out multi-arch tunnel dynamic construction simulation research. The space influence effect, mutual influence effect between the two tunnels of the vault subsidence and supporting structure force during construction were analyzed. In order to avoid the superposition of the affected areas of the two holes during construction, from the change in the settlement of the arch top of the advance tunnel, the reasonable distance should not be less than 32 m (about 2.5D), and the reasonable distance is not less than 28 m (about 2.2D) according to the force of the supporting structure. In general, the reasonable distance between two excavation faces should be controlled at about 32 m (about 2.5D).

Keywords: double-arch tunnel; numerical simulation; multi-arch tunnel; influence effect; reasonable distance

无中导连拱隧道无需施作中导洞,除了具备传统连拱隧道布线方便、对两端接线区域地形要求低、避免洞口路基分幅的优势外,能加快施工进度节约工程造价^[1],近些年来,在西南区域基础设施建设当中被广泛采用。

由于无中导连拱隧道后行洞施工紧邻先行洞,施工时不再单独施作中隔墙而是共用两洞拱腰处支护结构作为中间中隔墙,隧道围岩和支护结构在开挖过程中将受到荷载的反复作用,因此后行洞施工对先行洞施工的影响不可忽视^[2]。近些年来,许多学者通过采取数值模拟、理论分析和相似模型实验等研究手段对连拱隧道的变形及受力机理进行了相关研究^[3-6]。谢永利等^[2]以黄延高速公路连拱隧道为例,针对提出的无中导施工方法进行了施工过程的数值仿真,获得了各阶段的围岩应力、应变状态以及初期支护和二次衬砌的受力状态。张国庆^[7]首先对整体式中墙和复合式中墙连拱隧道技术特点进行总结,从中隔墙的受力特征、施工流程以及防排水措施三个方面将两者作了对比。并以梧村山隧道为工程背景,对无中隔墙连拱隧道结构进行研究,通过数值模拟的方法比较分析了两洞初期支护不同搭接位置下的受力差异,最后比较了不同施工工序下的围岩及支护结构的受力响应特征。洪永佳^[8]以福州市区某无中导连拱隧道为工程依托,采用有限差分软件分析了三维开挖过程中围岩和中隔墙的位移变形、应力的发展规律。杨学奇、王明年等^[9]为了研究无中导连拱隧道在软弱地层的适用性,依托平文高速土基冲连拱隧道采用数值模拟方法比较了传统三导洞工法和无中导工法在地表沉降、拱顶下沉、支护结构主应力和围岩稳定性等方面的差异,并结合工程实例和现场监测数据验证了无中墙单洞法的可行性。然而上述研究主要集中于工法的适用性及某一横截面上的位移应力特征,而关于无中导连拱隧道两洞纵向间距对隧道稳定性的影响还未见涉及。

隧道左右幅掌子面纵向间距过大或过小都会对隧道稳定性造成影响。如果后行洞距离先行洞掌子面间距过小,爆破振动或者掌子面暴露表面积过大可能危及先行洞掌子面的稳定^[10-11];如果间距过大,先行洞支护结构由于缺少围岩约束,后行洞施工亦会对其造成损伤,同时两洞间距过大,不利于加快施工进度。因此研究施工过程中两洞掌子面的纵向合理间距是必要的。

本文依托云南省某在建高速公路控制性隧道工程,利用三维模拟分析,通过获取先行洞和后行洞掘进过程中围岩变形及支护结构受力变化过程,从避免两洞施工时影响区域的叠加的角度讨论探究两洞施工过程中相邻掌子面的纵向合理间距,可为无中导连拱隧道施工时合理间距的选取提供一定的参考依据。

1 工程概况

1.1 工程背景

某高速公路起于西双版纳州勐腊县,全长约213 km,主线按双向四车道高速公路标准建设,设计行车速度80 km/h,路基宽度25.5 m。该高速公路是连接云南南部边疆少数民族贫困地区的一条重要经济干线,也是我国中西部地区和云南内地州市通向南亚、东南亚各国的重要陆路通道之一,见图1。本研究依托工程为该高速公路建设的重要控制性工程—1号隧道工程。



图1 某高速公路路线规划图

1.2 工程地质条件

隧道隧址区属于构造、剥蚀低中山地貌。隧道穿越区海拔高程介于1 026.4 m~1 050.6 m之间,相对高差24.2 m。根据地质调查揭露结果,隧道区内主要地层为白垩系上统曼宽河组(K2m)地层。隧道围岩以碎石土、粉砂岩、石英砂岩为主,呈强—中风化,中厚层状构造,节理裂隙发育,岩体破碎,多呈碎石状体结构,围岩分级为V级。隧道开挖时存在较少量的滴水、渗水等现象。

2 隧道结构计算模型

2.1 基本假设

本文以岩土工程专业大型通用有限差分软件FLAC^{3D}来进行数值计算,在针对无中导连拱隧道施工过程中模拟时,计算基于以下假设:

- (1) 围岩视为各向同性材料。
- (2) 由于隧道地表起伏不大,计算模型中地表视为水平,且隧道埋深较小,岩体初始地应力仅考虑自重应力,不考虑构造应力^[12-15]。
- (3) 施工过程中仅考虑初支支护作用。
- (4) 经过试算,对于单洞而言,当掌子面超前一定距离后,对监测断面基本已无影响。因此在后行洞开挖时先行洞不再开挖。

2.2 计算方案及参数选取

基于地层结构模型,采用有限差分法开展隧道开挖数值模拟,建立的无中导连拱隧道地质模型如图 2 所示。隧道断面尺寸按隧道实际施工断面选取,即先行洞和后行洞开挖跨度均为 12 m,模型计算范围水平方向左右均取隧道外侧 85 m,埋深依据现场地质条件取 40 m。沿洞轴 80 m 范围为计算域,模型左右边界设置为水平约束,底部为竖直约束,顶部为自由面^[13-14]。初衬采用实体单元进行模拟。数值计算结构参数见表 1,围岩采用的是摩尔-库仑模型,衬砌采用的是弹性模型。

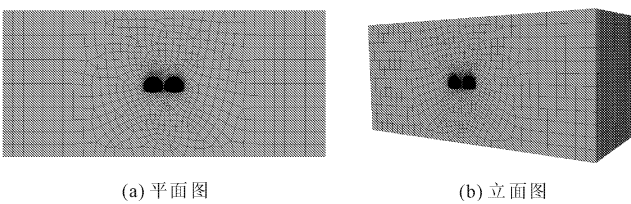


图 2 无中导连拱隧道数值计算模型示意图

表 1 数值计算物理力学参数表

岩土材料	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /Pa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
围岩	2450	1.5	0.35	1.0×10^5	22
衬砌	2800	28.0	0.20	—	—

2.3 施工模拟步骤

考虑到现场施工方案复杂,为突出研究目的,选取先行洞 $Y=40\text{ m}$ 作为监测断面。经过试算,对于单洞而言,当掌子面超前监测断面 40 m 时对监测断面的拱顶位移和支护结构受力基本已无影响。因此先行洞在开挖超前监测断面 40 m 时不再开挖,此时再开挖后行洞。将计算工序简化如下:

自重应力场计算;先行洞全断面开挖并及时支护直到超前监测断面 40 m;后行洞全断面开挖并及时支护直到超前监测断面 40 m;图 3 为计算工序的示意图,图中的数字表示计算的步骤。

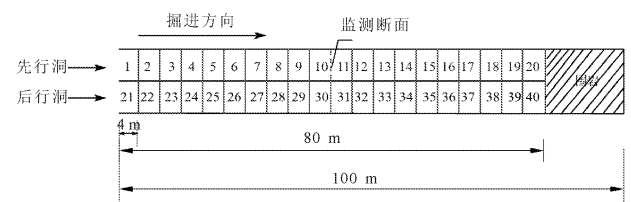


图 3 施工步骤示意图

3 数值计算成果及分析

3.1 先行洞开挖拱顶下沉分析

选取先行洞 $Y=40\text{ m}$ 截面拱顶作为监测点,得到监测断面拱顶随着施工步的进行其沉降曲线如图 4 所示。

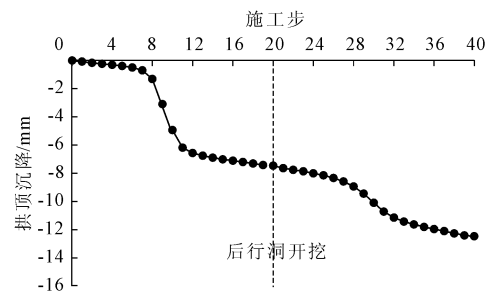


图 4 监测断面拱顶沉降随施工步变化曲线

从图 4 中可以看出,监测断面拱顶位移均是随着隧道开挖进行而呈现增大趋势。当先行洞和后行洞开挖到该监测断面附近时拱顶沉降急剧变化,而后趋于缓和;将后行洞开挖至 80 m 的拱顶沉降作为最终变形,则在先行洞开挖完成后控制断面沉降量占总沉降量的 60%;在右洞开挖过程中,拱顶沉降量完成了剩余的 40%,说明后行洞临近开挖对先行洞的影响不可忽视,显然这也与计算中未考虑先行洞二衬支护有关。

以先行洞开挖到距离监测断面 32 m 时的拱顶沉降为基准值,以先行洞开挖到超前监测断面 32 m 时的拱顶沉降为最终值,得到控制断面不同进尺下的拱顶沉降值如图 5 所示,其沉降百分比如表 2 所示。从表 2 中可以看出在先行洞开挖后,距离控制断面 $-32\text{ m} \sim -12\text{ m}$ 范围内,拱顶沉降变化值很小,当掌子面距离控制断面 -8 m 时,拱顶下沉也仅达到了总沉降量的 16%,掌子面到达该研究断面后,拱顶沉降达到了总沉降量的 66.8%,当掌子面超过该监测断面 16 m 时,拱顶沉降完成量为 94.3%,而后趋于稳定。由上可知,监测断面受先行洞开挖影响较大的围岩区域为掌子面前方 12 m (未开挖)(约 $1.0D$)和后方 16 m (已开挖)(约 $1.2D$)。

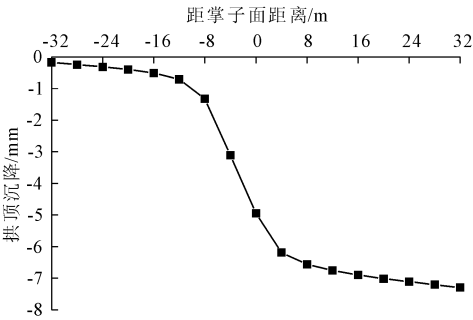


图5 控制截面拱顶沉降随先行洞开挖沉降曲线

表 2 控制断面拱顶沉降量

研究面距离 掌子面距离/m	拱顶位移 /mm	位移完成量 /%	累计位移完 成量/%
-32	-0.17384	0.000000	0.000
-28	-0.24228	0.959432	0.959
-24	-0.31447	1.012053	1.970
-20	-0.39656	1.150819	3.120
-16	-0.50533	1.524764	4.650
-12	-0.70855	2.848788	7.500
-8	-1.32324	8.616988	16.110
-4	-3.10579	24.988700	41.100
0	-4.94353	25.762270	66.800
4	-6.18910	17.461100	84.320
8	-6.56153	5.220903	89.500
12	-6.75775	2.750650	92.300
16	-6.89812	1.967732	94.300
20	-7.01311	1.612041	95.900
24	-7.11224	1.389638	97.300
28	-7.20406	1.287219	98.600
32	-7.30728	1.446946	100.000

3.2 后行洞开挖拱顶下沉分析

图 6 为 Y = 40 m 监测断面随着后行洞开挖其拱顶沉降变化曲线。

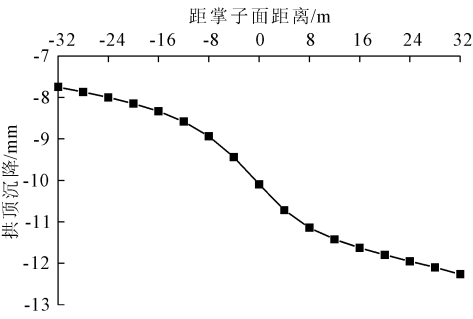


图6 控制截面拱顶沉降随后行洞开挖沉降曲线

由图 6 可知,后行洞开挖过程中监测断面拱顶沉降的变化规律和先行洞开挖时规律类似,仅是先

行洞开挖时的变化幅度要大。同样拱顶沉降随着掌子面的掘进逐渐增大,且在掌子面通过前后一定范围内拱顶沉降速率较大。受开挖面影响较大的区域约为掌子面前方 16 m(未开挖)(约 1.2D)和后方 16 m(已开挖)(约 1.2D)。

因此,综合考虑先行洞和后行洞开挖面的影响,为了避免现场两洞同时施工影响区域的叠加,就本文所建立的数值模型来看,先行洞和后行洞掌子面应至少保持 32 m(约 2.5D)的施工间距。

3.3 支护结构受力变化分析

施工过程中,随着掌子面的推进,应力不断释放,支护结构受力逐渐增大。同时后行洞开挖扰动也会对先行洞支护结构受力产生影响。因此选取先行洞 Y = 40 m 监测断面其支护结构随着施工进行下的最大主应力变化曲线如图 7 所示。

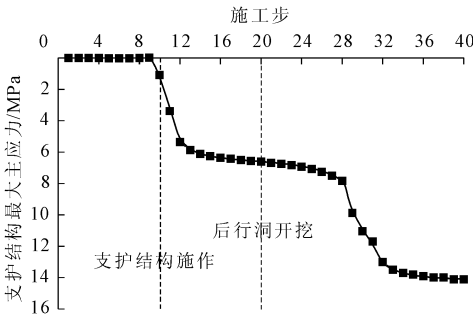


图7 支护结构最大主应力随着施工步变化曲线

从图 7 中可以看出:先行洞 Y = 40 m 监测断面支护结构受力在施作前期经历了急剧增长阶段随后随着掌子面的掘进其增长速率逐渐变慢。当后行洞开挖到监测断面附近时,支护结构受力增长变快,之后又趋于稳定。如图 8 和图 9 所示,先行洞开挖完毕后支护结构最大主应力为 6.6 MPa,位置在左侧拱腰位置处,后行洞开挖完毕后支护结构最大主应力为 14.4 MPa,位置在右侧拱腰处。

选取先行洞 Y = 40 m 断面初支结构最大主应力值作为监测对象,为探究单洞隧道开挖对掌子面后方支护结构受力的纵向影响范围,以先行洞 Y = 40 m 断面初支结构施作后支护结构最大主应力为基准值,以先行洞开挖完毕后支护结构的最大主应力值为最终值,绘制出随着掌子面掘进,监测断面支护结构的最大主应力变化百分比曲线如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,该断面支护结构施作后,其最大主应力值还不占先行洞贯通后的 20%,随着掌子面的掘进,其受力逐渐变大,而后趋于稳定。从图中可以看出,当掌子面超前监测断面 16 m 时,监

测断面应力已经达到最大应力的 92%。说明隧道开挖对掌子面后方支护结构受力的纵向影响范围约为 16 m(约 1.2D)。



图 8 先行洞贯通后监测断面支护结构受力云图



图 9 后行洞开挖贯通后支护结构受力云图

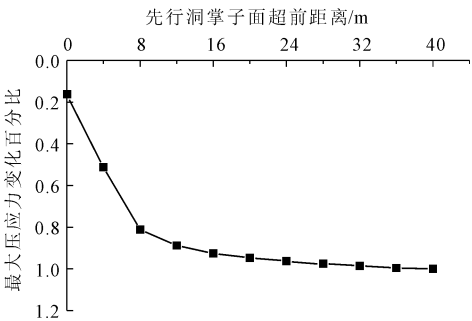


图 10 先行洞开挖监测断面支护结构受力变化百分比曲线

同样的选取先行洞 $Y=40\text{ m}$ 断面初支结构最大主应力值作为监测对象,探究后行洞开挖对其受力的影响范围,以先行洞开挖完毕后监测断面的最大主应力值作为基准值,以后行洞开挖完毕后监测断面的最大主应力值作为最终应力值,绘制监测断面支护结构受力的变化百分比曲线如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,随着后行洞的开挖掘进,监测断面支护受力逐渐增大,当后行洞开挖 28 m 时,此时距离监测断面 12 m,此时支护结构最大受力增大百分比约占总量的 12%,而后随着后行洞开挖,此时支护结构受力增加速率迅速增大,说明后行洞开挖对支护结构监测断面后方的影响范围为 12 m(约 1.0D)之内。当后行洞开挖到该监测断面时,支护结构最大主应力已增加 60%,而后继续增大,

当后行洞掌子面超前监测断面 12 m 时,支护结构受力已增长 92%,之后增长缓慢,逐渐趋于稳定。说明后行洞开挖对支护结构监测断面前方的影响距离约为 12 m(约 1.0D)。

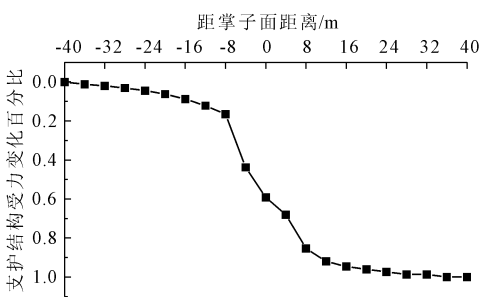


图 11 支护结构最大主应力随后行洞开挖变化百分比曲线

综合来看,从支护结构受力的角度去分析先行洞和后行洞施工的纵向合理间距,为避免先行洞和后行洞施工对支护结构受力的叠加效应,两洞掌子面的施工间距应控制在 28 m(约 2.2D)范围以外。

4 结 论

为了研究无中导连拱隧道施工过程中纵向受力影响情况,本文依托某隧道建立了三维网格模型采用有限差分软件 FLAC^{3D} 软件进行了模拟分析,从施工过程中监测断面拱顶沉降和支护结构受力相互影响的角度去分析,得出如下结论:

(1) 从监测断面拱顶沉降来看,左洞开挖时,受开挖面影响较大的围岩区域是掌子面前方 12 m(约 1.0D)和后方 16 m(约 1.2D),右洞开挖时,对监测断面拱顶沉降影响较大的区域为监测断面前后 16 m。

(2) 从支护结构受力来看,监测断面支护结构受力随着掌子面的推进逐渐增大,左洞开挖时受开挖面影响较大的围岩区域为掌子面后方 16 m(约 1.2D),右洞开挖时,对支护结构受力影响较大的范围为监测断面前后 12 m(约 1.0D)。

(3) 为了避免现场左右幅两洞施工影响区域的叠加,从拱顶沉降的角度来看左右洞掌子面应保持 32 m 的纵向范围,从支护结构受力的角度来看,左右洞掌子面应至少保持 28 m(约 2.2D)的纵向间距。综合来看,两开挖面的合理间距应控制在 32 m(约 2.5D)左右。

参考文献:

[1] 刘仁阳.单洞法施工双连拱公路隧道的探索[J].公路,2007(2):177-182.