

城市小半径浅埋螺旋连拱隧道安全施工优化

高峰¹, 黄磊¹, 张龙潇¹, 贾山²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海市 200135)

摘要: 由于复杂的施工步序、线形以及开挖对围岩的多次扰动, 山地城市小半径浅埋螺旋连拱隧道开挖顺序和支护结构一直是设计中的一个难点。该文基于有限差分软件 FLAC^{3D} 对小半径浅埋螺旋连拱隧道的动态施工过程进行三维数值模拟, 从不同施工顺序、开挖步距等方面分析开挖面空间效应、左右两洞的相互影响以及中隔墙的稳定。结果表明: 小半径螺旋连拱隧道先开挖靠外侧主洞对围岩扰动更小, 螺旋半径为 30 m 时左右洞最优施工步距为 1.5B (B 为隧道半跨宽度), 在先行洞施工时中隔墙向先行洞偏转, 后行洞施工时中隔墙又向后行洞偏转, 且垂直于中隔墙走向方向上的位移最大, 在施工中有必要对中隔墙进行加固和支护以防止倾覆。计算结果对山地城市小半径浅埋螺旋连拱隧道的设计具有一定的参考价值。

关键词: 连拱隧道; 小半径; 螺旋; FLAC^{3D}

中图分类号: U455.4 **文献标志码:** A

随着城市地下空间的大规模开发利用, 城市隧道群或交通网工程已经成为城市地下工程设计的大趋势。当地形复杂, 线路布设极为困难时, 小半径浅埋螺旋连拱隧道由于位置选择自由度大, 对于合理高效利用城市地下空间资源具有明显优势。

目前, 小半径螺旋形展线隧道在中国已有部分工程应用, 如云南水麻高速公路老店子 1 号隧道、水富至绥江新安隧道、重庆大化路隧道、四川雅安至攀枝花高速公路干海子隧道等。国内外学者也进行了许多关于连拱隧道和小半径隧道的研究。刘义虎等^[1]以停车视距作为安全性指标得到合理的小半径隧道线形参数; 杨果林等^[2]通过对中隔墙的现场监测分析, 发现在左右洞的非对称开挖阶段中隔墙向后行洞方向发生偏转, 此时中隔墙处于最不稳定状态; 肖勇刚^[3]以厦门国际旅游码头的实际工程为依托, 研究了在 V 级围岩下小半径大断面隧道的开挖方法, 通过三维数值模拟发现中导坑法比 CD 法更利于隧道稳定; 董江桃^[4]基于重庆市渝中区大化路螺旋隧道工程背景, 采用 Ansys 有限元分析软件对全断面法、台阶法及 CD 法施工下的围岩和初支结构的变形及受力进行了对比分析, 结果表明 CD 法开挖时围岩及初支结构的变形略小; 谢春华^[5]对无中导洞连拱隧道在施工过程中的围岩力学特征及衬砌受力机理进行了分析, 结果表明在拱底和加强区采用锚杆注浆及增加锁脚锚杆的措施有助于隧道的稳定。

目前学者们的研究对象仅仅是连拱隧道或螺旋隧道, 对于将两者结合在一起, 即小半径螺旋连拱隧道的研究较少, 然而在城市复杂环境制约下, 小半径螺旋连拱隧道的修建必将是大势所趋。由于城市交通网工程一般地处城市核心商圈, 所以小半径螺旋连拱隧道施工空间有限且施工周期不宜过长。该文借助重庆市渝中区解放碑地下停车库及连接通道三期工程, 通过数值模拟, 对城市小半径浅埋螺旋连拱隧道的快速安全施工方案进行优化研究, 为该工程施工提供指导, 并为以后类似工程提供设计与施工借鉴。

1 工程概况及模型建立

1.1 工程概况

渝中区解放碑地下车库及连接通道三期工程位于重庆市解放碑商圈, 工程竣工后将连通已完成的一、二期工程, 形成地下“一环七线”的交通循环, 对改善区域内交通状况意义重大。工程主要包括主通道 (K2+320.000~K2+817.884 段)、嘉滨路连接道 (K0+000~K0+702.684)、国泰广场连接道 (K0+017.892~K0+132.233) 及还建电缆隧道 (总长约 499 m)。隧道基本为螺旋状的上、中、下 3 层结构, 施工地质条件特别复杂, 有小净距及浅埋单洞单线隧道和双连拱隧道 3 种结构形式, 衬砌类型多种多样。

1.2 模型建立

通过对嘉滨路连接道小半径浅埋螺旋连拱隧道的实际动态施工过程选取 95 m 洞身段进行三维弹塑性分析,隧道螺旋半径为 30 m。

考虑边界效应对计算精度的影响,隧道半跨宽 10 m,覆盖土层厚度 31.6 m,模型尺寸取距隧道边界 6 倍半跨,模型宽 194 m,高 80 m,纵向深度 70 m。中隔墙最窄处宽 1.5 m,底板宽度 4.5 m。模型左右面约束水平(X 方向)位移,底面约束竖向(Z 方向)位移,前后面约束 Y 方向位移。围岩、中隔墙及二衬单元采用 Zone 单元,初期支护采用 Shell 单元,共划分 133 598 个单元,模型如图 1 所示。

计算初始应力场时对所有模型采用弹性本构,施加重力进行计算,待模型达到平衡后清空位移,得到初始应力场,然后进行施工阶段模拟。隧道开挖通过将开挖土体单元类型转变为空单元实现,空单元的应力被设置为 0,并且不受体力作用^[6],在模拟的后续阶段

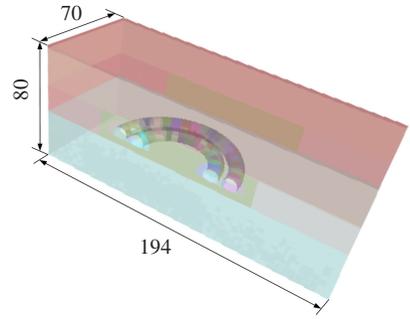


图 1 模型透视图(单位:m)

可将空单元修改为中隔墙或二衬的单元类型。

1.3 计算参数选取

该文中围岩本构模型采用 Mohr-Coulomb (莫尔-库仑) 准则,中隔墙及二衬采用各向同性弹性体本构模型。隧道的初始应力只考虑自重应力,注浆锚杆的加固效果根据作用等效原则来改变加固圈围岩参数的方法考虑^[7-8],钢支撑等材料折算进喷射混凝土参数中^[9]。支护、围岩以及加固区围岩参数见表 1。

表 1 围岩及衬砌材料物理力学参数

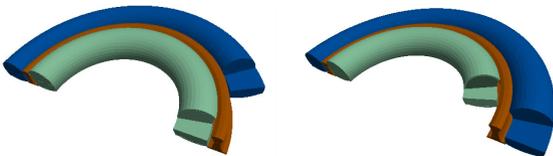
项目	材料	计算模型	弹性模量/ kPa	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
岩土	填土	莫尔-库仑	8×10^4	2.000	0.38	10.00	25.00
	泥岩		1.2×10^6	2.510	0.32	206.73	31.73
	砂岩		1.3×10^6	2.450	0.25	1 220.90	33.63
隧道结构	锚杆加固圈		1.56×10^6	2.500	0.25	1 320.00	38.00
	初期支护	弹性	3.08×10^7	2.397	0.20	—	—
	C30 混凝土		3.00×10^7	2.500	0.20	—	—
	C35 混凝土		3.15×10^7	2.500	0.20	—	—

2 开挖顺序研究

2.1 开挖方案

方案 1: 中导洞开挖后先开挖右洞(外侧洞)后开挖左洞(里侧洞),如图 2(a)所示。

方案 2: 中导洞开挖后先开挖左洞(里侧洞)后开挖右洞(外侧洞),如图 2(b)所示。



(a) 方案 1

(b) 方案 2

图 2 开挖方案示意图

两种方案中主洞均采用上下台阶法开挖,初支施作延后 $0.5B$ 即 5 m,中隔墙和二衬施作距离掌子面 $4B$ 即 20 m,其他施工步掌子面相距 $1B$ 即 10 m。施工步序如下:① 开挖中导洞并施作初支;② 施作中隔墙;③ 待中导洞贯通并且中隔墙施作完毕后进行先行洞超前支护;④ 开挖先行洞上台阶并及时施作初支;⑤ 开挖先行洞下台阶并施作初支;⑥ 后行洞超前支护;⑦ 开挖后行洞上台阶并及时施作初支;⑧ 开挖后行洞下台阶并施作初支;⑨ 施作先行洞二衬;⑩ 施作后行洞二衬。

2.2 位移分析

图 3 为小半径曲线连拱隧道按方案 1 和方案 2 施工后距离进口和出口所在断面 10 m 处($y=10$ m 断面)的水平和竖向位移云图。

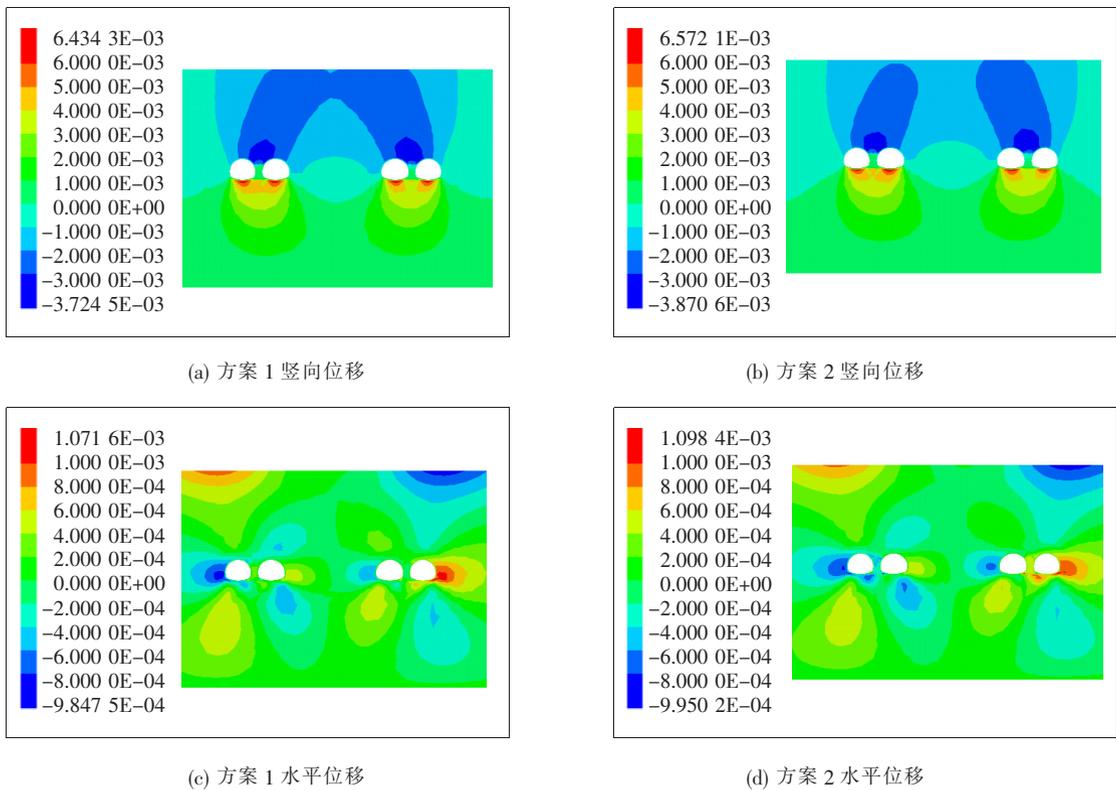


图3 $y=10\text{ m}$ 断面水平和竖向位移云图(单位:m)

开挖后由于对地层的扰动以及地应力的释放,隧道的上方形成了沉降槽。在左右洞注浆锚杆加固的影响下,沉降槽仅形成于中导洞上方且偏向于左洞拱顶,进口段和出口段隧道中间的地层受扰动较严重。从图3(a)、(b)可以看出:方案1、2施工完成后拱顶的最大沉降分别为 3.72 mm 、 3.87 mm ,两者相差 0.15 mm ;方案1、2施工完成后仰拱隆起的最小值分别为 6.43 mm 、 6.57 mm ,两者相差 0.14 mm 。

由于螺旋隧道进口段隧道和出口段隧道的相互扰动,隧道在水平方向处于偏压状态,边墙均呈现向外扩张的趋势。从图3(c)、(d)可以看出:方案1、2隧道拱腰最大水平位移分别为 1.07 mm 、 1.10 mm ,两者相差 0.03 mm ;按两种方案施工结束后中隔墙的最大水平位移均位于中隔墙底部。

综上所述,方案2对围岩的扰动更为显著,引起的拱顶沉降、仰拱隆起更大,偏压效应更为显著,因此从减小支护结构及围岩变形的角度来说,方案1更为合理。

2.3 围岩及支护结构应力分析

围岩和支护结构的应力如表2所示。按两种方案施工后围岩均处于受压状态,最大主压应力集中在隧道边墙,按方案1施工后围岩主压应力比方案2小

0.14 MPa 。中隔墙顶部和底部存在应力集中现象,且按方案2施工时应力集中现象更为明显。二衬由于施作较晚,仅作为强度储备,故应力相差不大。因此从围岩稳定性和衬砌及中隔墙受力状态来看,方案1更为合理。

表2 围岩及支护结构应力结果

方案	最大主压应力/MPa				最大主拉应力/MPa			
	围岩	初支	二衬	中墙	围岩	初支	二衬	中墙
1	4.11	7.79	0.44	8.9	0	2.04	0.13	10.3
2	4.25	9.58	0.46	10.2	0	2.09	0.14	15.5

3 小半径螺旋隧道动态施工过程研究

3.1 研究方案

小半径螺旋隧道施工过程中,由于中导洞开挖的群洞效应、中隔墙的支撑作用以及进口段和出口段的相互影响,使得掌子面在纵向和横向上的约束作用与一般连拱隧道不同。该节对施工进尺为 $0.5B$ 即 5 m 时,直线连拱隧道(围岩条件和施工方法均与小半径螺旋隧道开挖方法相同)和小半径螺旋连拱隧道掌子面间距分别为 $0.5B$ 、 $1B$ 、 $1.5B$ 、 $2B$ 共8种工况进行对比

研究。在该文第 2 节对于开挖顺序的研究中,已经得出采用方案 1 施工比较有利的结论,因此在该节的模拟中,均采用方案 1 进行开挖,即中导洞开挖后先右洞后左洞施工。

3.2 结果分析

3.2.1 开挖面空间效应研究

取距离进洞口 45 m 处截面为研究对象,选取螺旋隧道右洞拱顶特征点为监测点 A,选取直线连拱隧道右洞拱顶特征点为监测点 B。图 4 为 A 点和 B 点沉降位移释放率(不计中隔墙施工产生的竖向位移)随距掌子面距离的关系图。

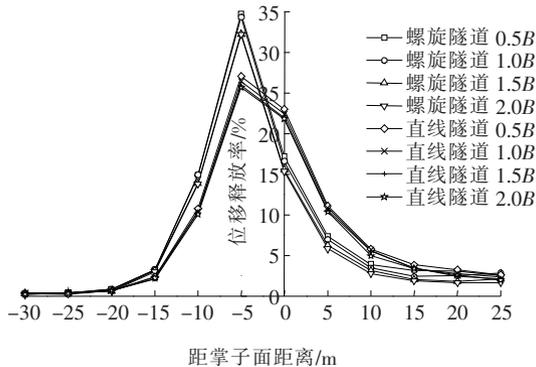


图 4 A 点和 B 点竖向位移释放率曲线

从图 4 可以看出:

(1) 中导洞的开挖和中隔墙的施作对隧道围岩产生了不同程度的扰动,因此右洞在开挖前就已经发生了沉降,且螺旋隧道和直线连拱隧道位移释放系数基本相同,说明中导洞的开挖支护以及中隔墙的施作对隧道围岩释放率的影响与隧道是否螺旋无关。

(2) 隧道施工对右洞围岩的稳定性在掌子面前 1.5B 范围内影响较大,通过掌子面后,由于左洞和右洞施工的共同影响,监测点围岩竖向位移持续释放,在掌子面距离监测点 15 m 后位移释放趋于缓和。

(3) 螺旋隧道施工中施工步距对掌子面位移释放的影响较为明显,步距为 0.5B 和 1B 时的位移释放率比步距为 1.5B 和 2B 时大得多,而直线连拱隧道施工中施工步距对掌子面位移释放率则影响不大,且总体呈现步距越大,位移释放率越小的规律。

(4) 在监测点前 0.5B 处,由于此时监测点处还未施作超前加固,因此螺旋连拱隧道和直线连拱隧道的位移释放率均在此处达到最大,此时螺旋隧道、直线连拱隧道最大位移释放率分别为 29.56%、23.03%;在掌子面未到达监测点前 0.5B 处时,螺旋隧道的位移释放率大于直线连拱隧道,在掌子面通过监测点前

0.5B 处后直线连拱隧道的位移释放率大于螺旋隧道。

综上所述,螺旋隧道受开挖面影响较大的区域为掌子面前(已开挖)1.5B 和掌子面后(待开挖)1B 范围内的围岩,且掌子面前(待开挖)1.5B 区域内的围岩受扰动最为明显。因此,从开挖面空间效应的角度来说,小半径螺旋隧道开挖步距应不小于 1.5B。

3.2.2 左右洞相互影响研究

不同步距下监测点 A 和 B 的拱顶竖向位移随掌子面推进的变化曲线如图 5 所示。

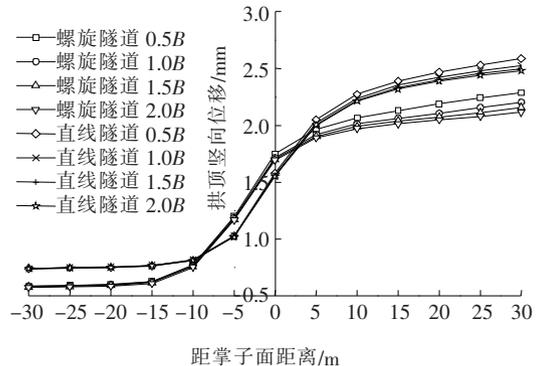


图 5 右洞竖向位移变化图

从图 5 可以看出:

(1) 中导洞开挖和中隔墙施作对隧道围岩产生了不同程度的扰动,因此右洞在开挖前就已经产生了沉降,而螺旋隧道的沉降更大,说明中导洞的开挖支护以及中隔墙的施作对螺旋隧道围岩的扰动更为明显。

(2) 当右洞掌子面通过监测点时各方案拱顶沉降比较接近,但随着左洞掌子面通过监测点所在截面后左洞对右洞的影响逐渐显现,左洞围岩可以抑制右洞侧竖向位移的发展,但随着左、右洞掌子面距离的减小,这种抑制作用逐渐减弱,当左、右洞掌子面间距为 0.5B 时右洞位移增长速度明显更快。

因此,从减小左、右洞相互影响的角度来说,施工步距最小值为 1B 即 10 m。

3.2.3 中隔墙变形及稳定性分析

小半径螺旋连拱隧道的受力极为复杂,不仅受左右洞施工步距、开挖进尺、开挖顺序的影响,还受隧道线形的影响。1.5B(15 m)步距下中隔墙的水平位移云图如图 6 所示。

从图 6 可以看出:螺旋隧道的中隔墙中部位移与中隔墙走向有关,垂直于中隔墙走向方向上的位移最大,在研究模型中最大 x 向水平位移位于进洞口和出洞口段,最大 y 向水平位移位于模型中段(弧顶段)。

中隔墙在 $x=90$ m(弧顶)处观测面的最终竖向位

移随施工工序的变化曲线如图7所示(正值表示位移向上,负值表示位移向下)。

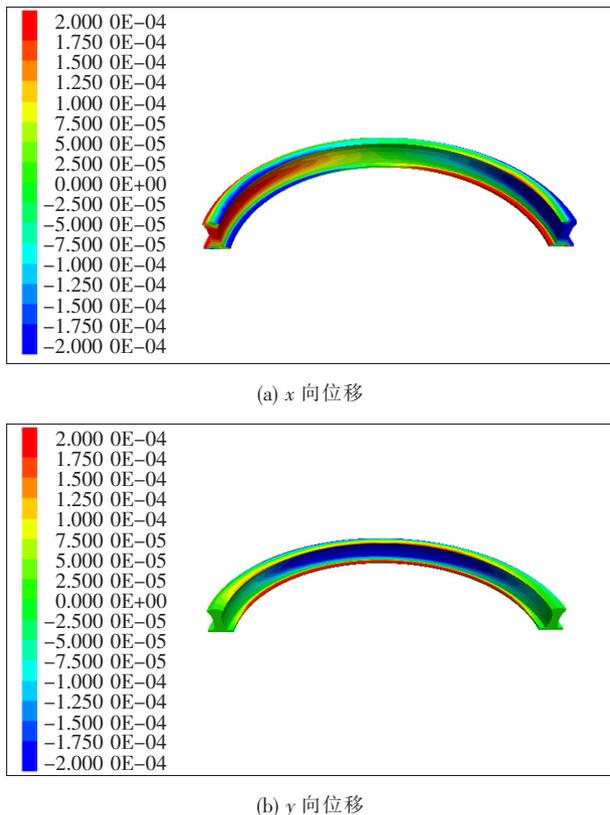


图6 中隔墙水平位移云图(单位:m)

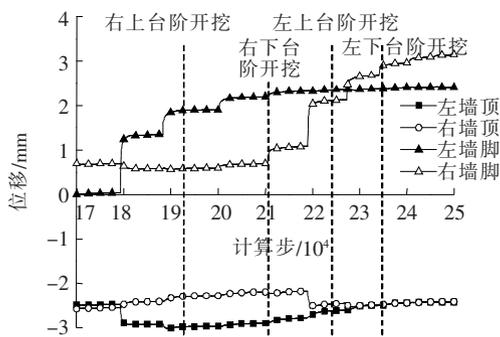


图7 中隔墙竖向位移变化曲线图

从图7中可以看出:

(1) 中隔墙墙顶处的竖向位移大于墙脚,中隔墙的受力随开挖步的进行共经历了两个阶段:右洞开挖使中隔墙左墙顶向下位移,右墙顶向上位移,左墙脚向上位移,右墙脚略向下位移,说明此时中隔墙正处于严重的偏压状态。

(2) 左洞开挖后左墙脚位移趋于不变,右墙脚位移上升,左右墙顶位移逐渐接近,说明此时中隔墙墙顶趋于水平,而右墙脚位移逐渐上升直至超过左墙脚的位移并趋于不变,说明施工结束的最终状态中墙底部

存在偏压现象。

中隔墙在 $x=90\text{ m}$ (弧顶)处观测面的最终水平位移随施工工序的变化曲线如图8所示(正值表示位移向右,负值表示位移向左)。

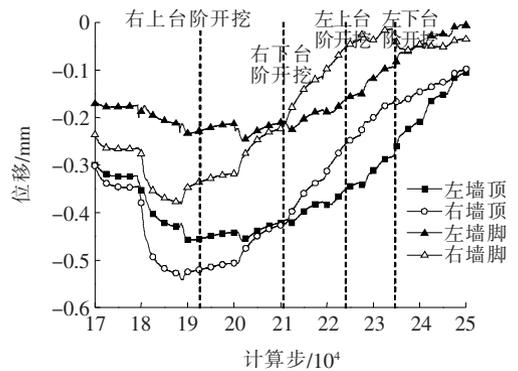


图8 中隔墙水平位移变化曲线图

从图8可以看出:

(1) 隧道右洞的开挖使中隔墙产生了向右的偏移,且整个墙体呈现逆时针偏转的趋势;左洞的开挖使墙体产生了向左的偏移,且整个墙体呈现顺时针偏转的趋势。

(2) 螺旋连拱隧道施工结束后中隔墙的偏转方向是向左洞(里侧洞),而对于直线连拱隧道,隧道后行洞的施工虽然对中隔墙的偏转有逆转作用,但中隔墙总的偏转方向还是向先行洞一侧^[10]。

因此,在施工右洞(先行洞)时有必要对左洞(后行洞)一侧进行回填或横撑加固;在施工左洞(里侧洞)前要对右洞(外侧洞)进行支护,防止中隔墙倾覆。

4 结论

(1) 先开挖小半径螺旋隧道右洞(靠外侧洞)对围岩扰动更小,衬砌结构受力更为合理。

(2) 和直线连拱隧道相比,螺旋隧道受开挖面影响较大的区域为掌子面前(已开挖) $1.5B$ 和掌子面后(待开挖) $1B$ 范围内的围岩。因此从开挖面空间效应考虑,小半径螺旋隧道开挖步距应不小于 $1.5B(15\text{ m})$ 。

(3) 左洞围岩可以抑制右洞侧竖向位移的发展,但随着左右洞掌子面距离的减小,这种抑制作用逐渐减弱。当左右洞掌子面间距小于 $1B$ 时右洞位移增长速度明显更快。因此从左右洞相互影响的角度来说,施工步距最小值为 $1B(10\text{ m})$ 。

(4) 随着主洞的施工,中隔墙先向先行洞一侧偏转而后行洞一侧偏转,施工结束后中隔墙向左洞(里

基于分形理论的隧道沿线溶洞注浆量预估方法

崔庆龙

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:针对溶洞因分布分散、形状各异而在实践中难以确定体积的问题,利用分形理论找到隧道沿线区域溶洞发育的分形规律。根据地质勘察报告数据求得溶洞分布的分形维数,利用分形参数计算溶洞体积;再根据现场溶洞注浆量得到溶洞注浆量和溶洞体积的比例系数,即溶洞注浆量系数;进而根据溶洞体积和溶洞注浆量系数计算整个隧道沿线区域溶洞注浆量。基于上述研究提出了采用地质勘察报告数据估算隧道沿线区域溶洞注浆量的理论与修正系数。

关键词:盾构隧道;分形理论;溶洞体积;溶洞注浆量;预估方法

中图分类号: U455

文献标志码: A

覆盖型岩溶地层大量分布于中国的华南、西南地区^[1-2]。在华南地区分布有典型的上覆砂土或粉质黏土的覆盖型岩溶地层,在该地层进行盾构法施工会产生很多施工难题与突发地质灾害灾变,溶洞处理是施工设计阶段工程师关注的问题之一。目前溶洞处理方法主要是通过注单液水泥浆或双液水泥水玻璃浆来填充溶洞,该方法已成功应用于工程实践^[3]。目前针对岩溶地层隧道的研究主要集中于溶洞处理技术、溶洞突水、岩溶坍塌等^[4-11]方面,而关于溶洞数量和规模以及溶洞处理所需注浆量预估的研究还较少。

溶洞注浆量的预估是建立溶洞体积与所需注浆量

的关系。主要涉及两方面:①提出溶洞体积预估的方法;②基于现场注浆数据建立溶洞体积和溶洞注浆量的关系,从而提出溶洞注浆量的预估方法。然而溶洞的数量和规模等在各个地区是不同的,即使在同一区域,也不尽相同,很难得到一个类似于立方体体积、球的体积等的计算公式。Mandelbrot^[12]于20世纪90年代创建了分形理论;Wang等^[13]基于分形理论提出了矿石储量估算的分形模型。对岩溶地区溶洞探测的手段包括CT探测、瑞雷波、地质雷达探测、地质钻探等。工程现场常用的、较经济的手段为地质钻探,即通过钻孔资料得到该工程的溶洞分布情况。如果溶洞四

侧洞)偏转且垂直于中隔墙走向方向上的水平位移最大,在施工中有必要对中隔墙进行加固和支护以防止倾覆。

参考文献:

- [1] 刘义虎,张天乐,张进华,等.基于安全停车视距的螺旋隧道圆曲线方案比选[J].中外公路,2009,29(5):5-8.
- [2] 杨果林,胡敏,阳明,等.连拱隧道复合式中墙偏转机制及其预防措施[J].地下空间与工程学报,2019,15(S1):305-310.
- [3] 肖勇刚.厦门国际旅游码头小半径大断面隧道修建技术研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [4] 董江桃.螺旋隧道开挖方法及设计参数优化研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [5] 谢春华.无中导洞城市连拱隧道施工工法分析研究[J].中外公路,2017,37(4):214-218.

- [6] MOUSIVAND M, MALEKI M, NEKOOEI M, et al. Application of Convergence-Confinement Method in Analysis of Shallow Non-Circular Tunnels[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(3): 1 185-1 198.
- [7] 于学馥,郑颖人.地下工程围岩稳定分析[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [8] 汪海滨,李小春,高波,等.城市浅埋大跨连拱隧道非对称开挖地表沉降偏态性研究及其对策[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):3 203-3 209.
- [9] 王凯,张成平,王梦恕.不对称双连拱海底隧道施工引起的地层变形分析[J].岩土力学,2011,32(9):2 771-2 777.
- [10] 李建宇,杨建辉,王振兴.软弱地层双连拱隧道中隔墙结构型式选择及稳定性研究[J].土木工程学报,2017,50(S2):236-242.

收稿日期:2022-06-03(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52179116);新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(编号:2020A03003-3)

作者简介:崔庆龙,男,博士,高级工程师. E-mail:690239866@qq.com