

小净距隧道施工与临近构筑物影响的数值分析

张晗秋¹ 余俊²

1. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330000

2. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026

[摘要]在小净距隧道的施工过程中, 地表沉降、围岩稳定性及构筑物的沉降倾斜受到地层因素、施工控制因素的影响较大。当不良地层存在时, 较差的地质条件会直接影响围岩的稳定性和地表沉降, 进而影响隧道施工的安全性, 最终危及构筑物使用, 严重时危害构筑物的安全。利用 ABAQUS 软件对隧道洞身进行模拟, 对小净距隧道临近构筑物的相互影响进行数值分析, 从而对施工的安全性和隧道的稳定性提供可靠指导。

[关键词]小净距隧道; 围岩稳定性; 地表沉降; 数值模拟

DOI: 10.33142/ec.v7i11.14231

中图分类号: TU457

文献标识码: A

Numerical Analysis of the Impact of Small Clearance Tunnel Construction on Adjacent Structures

ZHANG Hanqiu¹, YU Jun²

1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

2. Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: In the construction process of small clearance tunnels, surface settlement, surrounding rock stability, and structural settlement and inclination are greatly affected by geological factors and construction control factors. When poor geological conditions exist, they can directly affect the stability of the surrounding rock and surface settlement, thereby affecting the safety of tunnel construction and ultimately endangering the use of structures. In severe cases, it can also endanger the safety of structures. Using ABAQUS software to simulate the tunnel body, numerical analysis is conducted on the mutual influence of adjacent structures in small clearance tunnels, providing reliable guidance for construction safety and tunnel stability.

Keywords: small clear distance tunnel; rock stability; surface subsidence; numerical simulation

引言

在城市建设中, 地下隧道地铁工程不可避免会穿过构筑物, 隧道与临近构筑物相互影响, 且该影响无法被忽略。因此应该使用合理的施工技术, 并分析其的安全性。地铁隧道在开挖建设过程中会影响周围土层的应力状态, 扰动周围土层, 常见的宏观表现为地表沉降和围岩变形。这些表现对周围构筑物的地基产生不利影响, 严重者会影响构筑物的安全或者造成地铁隧道坍塌。其中地表不规则沉降是引起这些不良影响最主要的原因, 因此, 确定一个合理的施工方案是保证地铁隧道施工安全的重要环节。

在国内研究中, 姚勇^[1]等在二维弹塑性数值计算的基础上, 研究了小净距隧道不同洞室宽度时, 左右洞室之间中夹岩柱的应力应变的在开挖过程中的变化规律。孟凡兵^[2]等以大坪山隧道为工程背景, 采用新计算方法, 预测中夹岩柱的累计损伤, 为后继工程中对中夹岩柱安全性的分析提供了依据。张帆^[3]等以新平风岭隧道为工程背景, 从左右洞室中间夹岩柱如何合理设置、后行洞如何开挖如何支护等方面, 采用数值模拟方法, 分析如何对围岩的稳定性进行控制。唐明明^[4]等以依托西康高速公路长哨隧道工程为工程背景, 分析了在选择了台阶法进行施工时, 地

表沉降及围岩稳定性的变化规律。

1 工程概况

嘉陵江路站作为 12 号线和 13 号线换乘车站, 为避免 12 号线后期开挖对车站运营的影响, 嘉陵江路站大里程端预留长度为 6m 的接口, 并施做封堵墙, 待 12 号线修建时再破除。嘉陵江路站~香江路站区间从嘉陵江路站出发, 沿嘉陵江西路向东敷设, 下穿爱思恩梯重工有限公司一座一层厂房和鑫奥特汽车服务有限公司一座砖房后, 线路拐入井冈山路, 最终在香江路路口接入香江路站。该区间由嘉陵江路站引出后, 沿嘉陵江西路敷设, 途经众多小区等建筑物群, 到达香江路站。嘉陵江路站~香江路站区间右线起止点里程为: YSK4+967.876~YSK6+179.000, 右线全长 1211.124m, 左线起止里程为: ZSK4+967.876~ZSK6+179.000, 其中长链 17.103m, 左线全长 1228.227m, 前 407.9m 为单洞双线马蹄形隧道, 后约 803.2m 为单洞单线马蹄形隧道, 区间全线采用矿山法施工。区间埋深 10.56m~21.86m。区间平面共四处平曲线, 其中 ZJD1 半径为 400m, YJD1 半径为 430m, ZJD2 半径为 1200m, YJD2 半径为 1200m, 区间纵坡最大 20.288%。区间在 YSK5+590.000~YSK6+100.000、ZSK5+590.000~ZSK6+100.000 设置高等减振段。

2 隧道与临近构筑物的位置关系

2.1 模型建立

本文以 k7+400 至 k7+450 典型区段作为研究对象,合力文化娱乐广场位于嘉陵江西路以南,武当山路以东,北江支一路以北,该建筑物的建筑总高度为 19.5m,该区段隧道洞身经过围岩等级为 V 级围岩。对此区段利用 ABAQUS 软件进行分析,模型如图 1 所示。

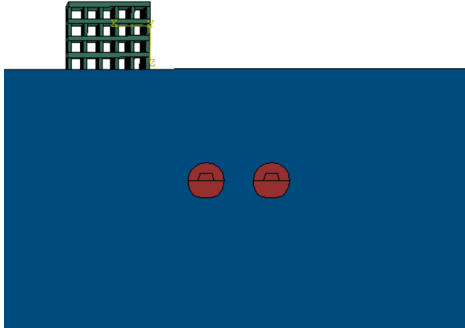


图 1 合力文化娱乐广场模型

2.2 测点布置

本文分别在和隧道平行的基础两侧设置监测点位(图中未标出),并且共计有 12 个监测点位(D1-D12)分布在建筑物的顶端,而地表沉降监测点位则每隔十米左右设置一排,并且监测断面则设置在隧道 Y=30m 处。具体布置方案如下图 2 所示。

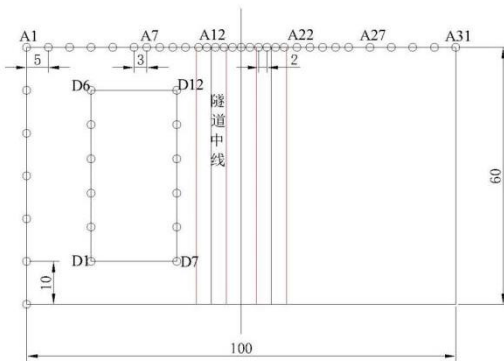


图 2 监测断面俯视图

3 建筑物对隧道开挖的影响

3.1 隧道侧穿建筑物的开挖进尺优化

由于原设计方案中位于左侧隧道的上方有一大型建筑物,所以在对隧道进行开挖时势必会对隧道施工带来不利影响,因此为探究如何对侧穿建筑物的隧道的开挖进尺进行优化,本文利用 Abaqus 有限元分析软件进行建模,分别对位于隧道 1.5m、2m、2.5m、3m 处的拱顶沉降、拱腰变为以及建筑物的地表沉降进行对比研究,从而选出最佳开挖进尺方案,以确保小近距隧道能够在安全经济的双重条件下进行高效开挖。

3.2 不同工况下的隧道拱顶沉降

从图 3 不同开挖进尺下的隧道拱顶沉降 LDP 曲线图中

可以看出,在隧道开挖过程中无论开挖进尺是多少,四种工况的变形规律是不发生改变的。

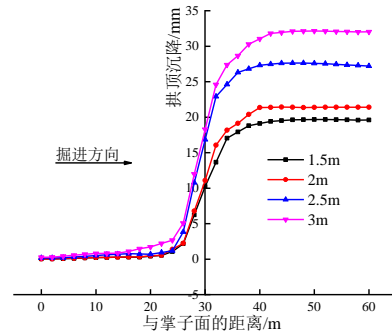


图 3 不同开挖进尺下的隧道拱顶沉降 LDP 曲线图

如图 3 所示拱顶沉降值随着开挖距离的增加而呈现出逐渐增大然后趋于平缓的趋势,究其原因显然是因为在进行隧道开挖后临空面出现卸载,从而导致围岩的初始应力状态遭到破坏。隧道在最开始掘进时,拱顶沉降出现缓慢增加的趋势,而直到位于监测面高度 10m 左右时,拱顶沉降则出现加速增大的趋势,然后到达监测面时,拱顶沉降的增大速度达到最大,此时若继续对隧道进行开挖,拱顶沉降的增加速度则开始减缓,直至远离监测断面 10m 处时,拱顶沉降保持基本稳定。

从图中可以很直观地看出,在工况为 1.5m 时的拱顶沉降为 17.92mm,工况为 2m 时的拱顶沉降为 20.45mm,工况为 2.5m 时的拱顶沉降为 26.62mm,而工况为 3m 时的拱顶沉降为 32.28mm,呈现出拱顶沉降随开挖进尺的增加而增加的趋势,并且这四种工况的拱顶沉降突增点均在离监测面 10m 处。对比分析并结合实际工程情况考虑,选取 2m 为开挖尺寸可以在保证施工的经济安全的同时大幅提高隧道开挖效率。

3.3 不同工况下的隧道拱腰位移

为验证选取的工况 2m 是否为最优,从而对拱腰收敛的 LDP 曲线分别在 1.5m、2m、2.5m、3m 施工工况下的变化进行对比分析。

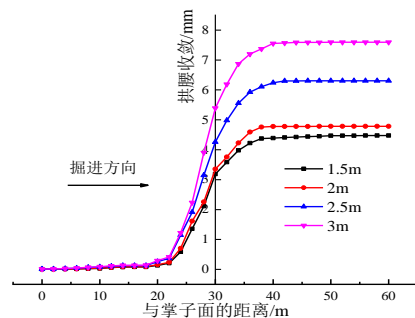


图 4 不同开挖进尺下的拱腰收敛 LDP 曲线图

由图 4 可知在隧道开挖过程中无论开挖进尺是多少,四种工况下的拱腰收敛 LDP 曲线变化规律基本上不随工况的变化而发生变化,但是在与掌子面的距离增加时,收

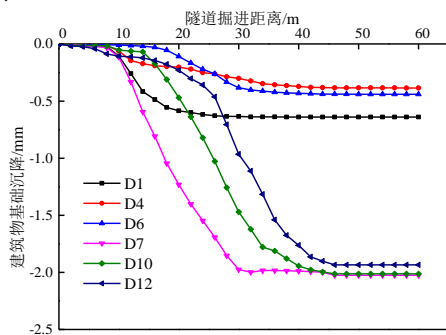
敛值则呈现出先增加后平缓最后不再变化的趋势。

从图中可以很明显的看出，在工况为 1.5m 时的拱腰收敛值为 4.05mm，工况为 2m 时的拱腰收敛值为 4.78mm，工况为 2.5m 时的拱腰收敛值为 6.07mm，而工况为 3m 时的拱腰收敛值为 7.68mm，呈现出拱腰收敛值随开挖进尺的增加而增加的趋势。对比分析并结合实际情况考虑，选取工况为 2m 为开挖尺寸可以在保证施工经济安全的同时大幅提高隧道开挖效率。

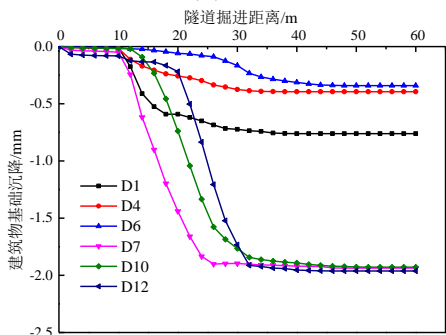
4 隧道开挖对构筑物沉降和倾斜的影响

4.1 隧道开挖对建筑物沉降的影响

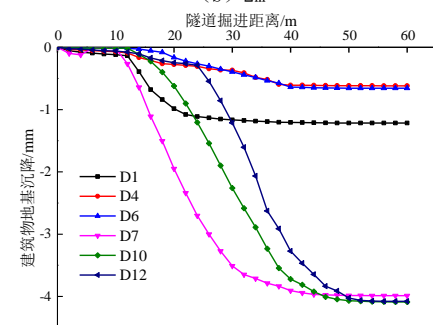
由于隧道左侧上方有一大型建筑物的存在，所以在隧道不断进行掘进的过程中必然会对该建筑物产生不利影响，从而导致其造成一定程度上的破坏。因为地表的不均匀沉降会引发建筑物地基的沉降，而地基的不均匀沉降则会导致建筑物产生差异性沉降，所以建筑物的破坏大小很大程度上在于隧道的掘进引起的地表不均匀沉降的大小。



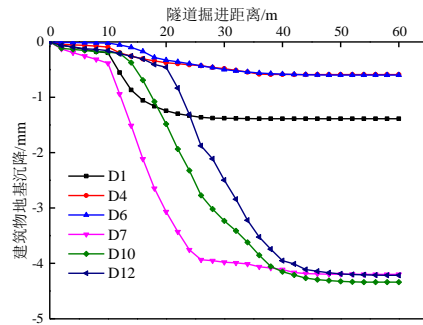
(a) 1.5m



(b) 2m



(c) 2.5m



(d) 3m

图 5 不同开挖进尺的建筑物基础沉降曲线图

进行数值模拟时，在纵向加入对建筑材料的自重的考虑并结合该建筑物所用基础为条形基础，将开挖进尺分别为 1.5m、2m、2.5m、3m 下的监测结果进行归纳总结，得出图 5 中该建筑物地基的沉降变化曲线。

4.2 隧道开挖对建筑物倾斜的影响

从图 5 可以看出，D1-D12 变化规律基本不会随着开挖进尺的改变而发生改变，而是都随着隧道掘进距离的增加，建筑物基础的沉降呈现出一种先急剧增加后趋于平缓的趋势。由于靠近隧道一侧的三个监测点为 D7、D10、D12，所以该三个点所在位置的建筑物基础沉降速度大于 D1、D4、D6 所在点位的建筑物基础沉降速度，因此导致该建筑物两侧产生了相差约 3mm 的差异性沉降。

在工况为 1.5m 时的建筑物基础沉降最大值为 1.9mm，在工况为 2m 时的建筑物基础沉降最大值为 2.05mm，在工况为 2.5m 时的建筑物基础沉降最大值为 4.03mm，而在工况为 3m 时的建筑物基础沉降最大值为 4.24mm，呈现出建筑物基础沉降最大值随着开挖进尺的增加而增加的趋势。而根据相关规范，工况为 3m 与 2.5m 开挖进尺时的建筑物基础沉降最大值并不符合要求，而工况为 2m 与 1.5m 开挖进尺时的建筑物基础沉降最大值满足要求。表 1 为不同开挖进尺下地表建筑物倾斜率。

表 1 不同开挖进尺下的建筑物倾斜率

各工况下倾斜率(%)断面	1.5m	2m	2.5m	3m
D1-D7 断面	0.062	0.051	0.12	0.123
D4-D10 断面	0.073	0.067	0.151	0.164
D6-D12 断面	0.068	0.071	0.154	0.162

从表 1 中大体上可以看出在 1.5m、2m、2.5m、3m 这四种工况下，建筑物基础的监测断面倾斜率最大值为 0.073% 在开挖进尺为 3m 处，最小值为 0.051% 在开挖进尺为 1.5m 处。而在开挖进尺为 1.5m 的工况下 D4-D10 断面的倾斜率最大为 0.073%，在开挖进尺为 2m 的工况下 D6-D12 断面的倾斜率最大为 0.071%，在开挖进尺为 2.5m 的工况下 D6-D12 断面的倾斜率最大为 0.154%，在开挖进尺为 3m 的工况下 D4-D10 断面的倾斜率最大为 0.164%。由各开挖进尺下建筑物基础倾斜率对比可知，开挖进尺为

1.5m 和 2m 时对隧道上方的建筑物影响较低,因此结合工程实际情况,选取 2m 的开进尺比较合适。

5 不同注浆方案对构筑物的影响

5.1 小导管注浆优化

超前注浆优化可以很好地改善围岩结构,保证围岩整体性、提高围岩的自承能力、使隧道开挖既安全高效又经济,超前小导管注浆优化是向隧道周围的土体中打入一定长度和环向布置范围的小导管,向小导管中注入加固浆液,该浆液可以充实围岩周围的各种弱面、起到了二次胶结的作用,从提高物理力学性能的方面改善围岩,围岩的整体稳定性和抗渗性因此有所提升。本篇参考的工程在开挖的过程中对围岩的注浆优化采取了小导管注浆的超前注浆优化方法。小导管超前注浆优化优点众多,在不良地层中体现尤为明显。

5.2 不同长度小导管注浆

图 6 为不同小导管长度方案下的建筑物基础沉降曲线图。从图 6 中可以看出,以 D12 (建筑物基础沉降最大值) 为例进行研究,从大体上来说建筑物基础沉降规律基本相同,都是呈现出随着隧道掘进距离的增加而先增大后趋于平稳的趋势。由于 D12 所在位置为靠近隧道一侧,因此位于 D1、D4、D6 处所监测到的沉降增加速度和最终值小于位于 D12 处所监测到的沉降增加速度和最终值,而正是因为沉降变化的不同,所以引起了隧道上方建筑物的不均匀沉降。

对比分析可知,在 4.5m 长的小导管注浆时建筑物基础的沉降最大值为 1.76mm,在 3.5m 长的小导管注浆时建筑物基础的沉降最大值为 1.79mm,在 2.5m 长的小导管注浆时建筑物基础的沉降最大值 1.88mm,在未加固时建筑物基础的沉降最大值为 1.96mm,呈现出建筑物基础的沉降最大值随着小导管注浆长度增大而增大的趋势。在 4.5m 长的小导管注浆工况和 3.5m 长的小导管注浆工况下,建筑物基础的最终沉降值较小,而 1.5m 长的小导管注浆工况和未加固的工况的最终沉降值较大,并不能符合建筑物对安全的需求。由上文可知,当采取 2.5m 长度进行加固时,建筑物基础沉降发生的改变并不大,但采取 3.5m 长度进行注浆优化时,地表沉降相对于 2.5m 长度减少了 0.09mm 左右;采用 4.5m 长度的小导管进行注浆,效果更加好,但相对 3.5m 长度的注浆优化,它变化并不明显。

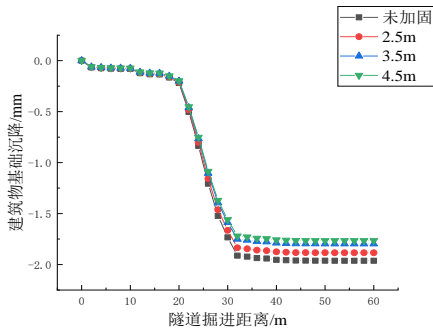


图 6 不同工况的建筑物地基沉降曲线图

各注浆优化方案下的建筑物基础倾斜率如表 2 所示。从表 2 中大体上可以看出在未加固、2.5m 长小导管注浆、3.5m 长小导管注浆、4.5m 长小导管注浆这四种工况下,倾斜率最大值为 0.071% 在未加固时,倾斜率最小值为 0.046% 在 4.5m 长的小导管注浆时。而在未加固时 D6-D12 断面倾斜率最大为 0.071%,2.5m 长小导管注浆时 D6-D12 断面倾斜率最大为 0.068%,3.5m 长小导管注浆时 D6-D12 断面倾斜率最大为 0.065%,4.5m 长小导管注浆时 D6-D12 断面倾斜率最大为 0.064%。由各工况下断面倾斜率对比可知,3.5m 长的小导管进行加固和 4.5m 长的小导管进行加固时,隧道开挖对上方建筑物造成影响较小,结合工程实际,采用 3.5m 长的小导管对隧道周边进行注浆优化合适。

表 2 不同注浆方案的建筑物倾斜率

各工况下倾斜率 (%)	未加固	2.5m	3.5m	4.5m
D1-D7 断面	0.051	0.050	0.047	0.046
D4-D10 断面	0.067	0.064	0.061	0.060
D6-D12 断面	0.071	0.068	0.065	0.064

5.3 不同环向布置范围的小导管注浆

图 7 为不同工况下的建筑物基础沉降曲线图。从图 7 中可以看出,以 D12 (建筑物基础沉降最大值) 为例进行研究,从大体上来说建筑物基础沉降规律基本相同,都是呈现出随着隧道掘进距离的增加而先增大后趋于平稳的趋势。由于 D12 所在位置为靠近隧道一侧,因此位于 D1、D4、D6 处所监测到的沉降增加速度和最终值小于位于 D12 处所监测到的沉降增加速度和最终值,而正是因为沉降变化的不同,所以引起了隧道上方建筑物的不均匀沉降。

通过对四种工况分别对比分析,当采取 120° 环向布置范围进行加固时,地基沉降发生的改变并不大,但采取 150° 环向布置范围进行注浆优化时,建筑物基础沉降相对于 120° 环向布置范围减少了 0.09mm 左右;采用 180° 环向布置范围的小导管进行注浆,效果更加好,但相对 150° 环向布置范围的注浆优化,它变化并不明显。表 3 为不同注浆方案的建筑物倾斜率。图 7 为不同注浆优化方案下的建筑物地基沉降曲线图。

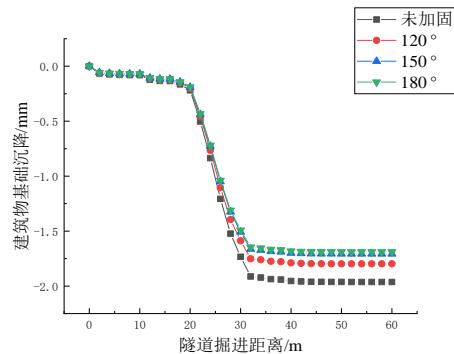


图 7 不同工况的建筑物地基沉降曲线图

表 3 不同注浆方案的建筑物倾斜率

各工况下倾斜率(%)断面	未加固	120°	150°	180°
D1-D7 断面	0.051	0.046	0.045	0.044
D4-D10 断面	0.067	0.060	0.058	0.057
D6-D12 断面	0.071	0.063	0.062	0.061

对于四种工法,未加固时的监测断面倾斜率最大值为 0.071%,采用 120° 环向布置范围进行加固时的监测断面倾斜率最大值为 0.063%,采用 150° 环向布置范围进行加固时的监测断面倾斜率最大值为 0.062%,采用 180° 环向布置范围进行加固时的监测断面倾斜率最大值为 0.061%,四种工况中建筑物基础倾斜率最小的工况为 180° 的环向布置范围,最大的工况为未加固的工况,各环向布置范围进行注浆优化下的建筑物基础倾斜率如表 3 所示。经过四种工况的对比来看,150° 和 180° 工况下开挖对上方建筑物造成影响较小,结合现场实际,用 150° 的环向布置范围的小导管进行注浆优化比较合适。

6 结论

(1) 针对在临近建筑物与隧道相互影响下隧道开挖进尺这一施工因素对地表沉降及围岩稳定性、建筑物的沉降及倾斜的影响进行分析,设立四种工况:1.5m、2m、2.5m、3m。在与实际工程监测数据对比验证可信度的基础上进行

比较讨论,得出采用 2m 的开挖进尺的结论。

(2) 针对临近建筑物与隧道相互影响下的小导管注浆优化这一施工因素对建筑物的沉降及倾斜的影响进行分析,在实际工程取值基础上设立八种工况:未加固、2.5m、3.5m、4.5m 三种长度小导管和未加固、120°、150°、180° 的三种环向布置范围,在与实际工程监测数据对比验证可信度的基础上进行比较讨论,得出采用 3.5m 长度和 150° 环向布置范围的小导管注浆加固更优的结论。

[参考文献]

- [1]姚勇,何川,谢卓雄.双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J].岩土力学,2007,28(9):1883-1888.
 - [2]孟凡兵,林从谋,蔡丽光.小净距隧道爆破开挖中夹岩累积损伤计算方法及其应用[J].岩土力学,2011,32(5):1491-1494.
 - [3]张帆,袁文山,苏逢彬等.邻近既有隧道的新建隧道稳定性控制对策研究[J].铁道标准设计,2013(12):79-882.
 - [4]唐明明,王芝银,李云鹏.穿越公路偏压小净距隧道施工方法探讨[J].岩土力学,2011,32(4):1163-1168.
- 作者简介:张晗秋(1993.9—),男,汉族,江西樟树人,研究生,研究方向:城市轨道交通;余俊(2001.3—),男,汉族,江西乐平人,研究生,研究方向:基坑工程。