

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.03.006

浅埋隧道逆向进站开挖工法及数值分析研究

余继江, 祝方才, 王勤富, 冯祖浚, 谭园辉

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对浅埋隧道开挖工法如何尽快恢复市政道路通行, 变截面开挖步距和开挖角度难以控制的问题, 结合某地铁车站出入口开挖工程, 提出了CRD变截面逆向站内进洞施工技术, 建立了FLAC^{3D}变截面开挖数值模型, 比较了在不同开挖角度和开挖步距下对拱顶沉降和水平收敛的影响; 对隧道变形情况现场监测结果与数值模拟结果进行了对比分析。研究表明: 当开挖角度在30°左右时拱顶沉降和水平收敛控制较好, 结合工程施工因素, 开挖步距推荐为0.5 m; 拱顶沉降值和水平收敛值都经历了增长-平稳阶段, 现场监测与数值模拟结果基本吻合。

关键词: 浅埋隧道; 逆向开挖; 拱顶沉降; 水平收敛

中图分类号: U456.3⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)03-0032-08

Excavation Methods and Numerical Analysis of Shallow Buried Tunnels

YU Jijiang, ZHU Fangcai, WANG QinFu, FENG Zujun, TAN Yuanhui

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to speed up the recovery of municipal road traffic, to effectively control the variable cross-section excavation steps and excavation angles, a method of reverse excavation in shallow buried tunnels with CRD variable cross-section has thus been proposed. A numerical model of FLAC^{3D} variable cross-section excavation is established, and a comparison has been made between the effects of excavation brought about with different angles and excavation steps on the settlement and horizontal convergence of the vaults, followed by a comparative analysis of the field monitoring results and numerical simulation results. The experimental results show that it is easier to control the settlement and horizontal convergence with 30 degrees the excavation angle where, combined with the engineering construction factors, the recommended excavation distance will be 0.5 m. Both the settlement value and the horizontal convergence value have experienced a growth-stationary phase, with the results of field monitoring and numerical simulation basically identical in relevant data.

Keywords: shallow buried tunnel; reverse excavation; vault subsidence; horizontal convergence

0 引言

浅埋暗挖法具有造价低, 拆迁少, 不干扰地面

交通, 不影响周围环境等诸多优点。该工法对地层具有较强适应性和高度灵活性, 在城市地铁修建中得到了广泛应用, 并且由只适用于第四纪地层、无

收稿日期: 2016-11-30

基金项目: 湖南省自然科学基金资助重点项目(13JJ2033), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2015B572), 湖南省教育厅青年基金资助项目(10B025)

作者简介: 余继江(1990-), 男, 安徽黄山人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为隧道与边坡的稳定性, E-mail: yujijiang1990@163.com

水等条件逐步拓展到非第四纪地层、有水、超浅埋(埋深已缩小到 0.5 m)、大跨度等复杂条件下的地下工程中。

浅埋暗挖变截面开挖技术是对浅埋暗挖法的一次技术创新, 对于该工法张继明^[1]研究了北京地铁4号线西直门站西北换乘通道, 由大断面转化为小断面的变截面开挖工程。闫明超等^[2]总结出了超大断面隧道变截面施工中应注意的一些技术要点, 采用了合分修的施工技术, 将隧道断面分成4种不同的形式, 并依次扩大, 在施工过程中采用了变截面模板台车, 既满足了隧道变截面开挖的需求, 又能加快隧道施工进度, 减少支出。张文彦^[3]研究了地铁渡线区群洞隧道施工过程中地表沉降的规律, 群洞隧道施工方案的优化以及地表沉降的影响因素等, 提出纵横导洞法开挖方案, 实际工程证明该方案在工程成本、工期、作业环境等方面与原方案相比具有明显优势。李栋等^[4]对特大跨超浅埋地铁隧道下穿天桥过程稳定性控制进行了分析研究。

对锚杆的模拟研究中, 左乾坤等^[5]利用梁单元研究了钢拱架在隧道施工中的受力特征, 分析了其间距的影响, 认为锚杆在控制围岩变形方面作用有限, 超前小导管在围岩加固中起到了梁效应、拱效应等加强效应, 可采用梁理论、弹性地基梁理论和壳体单元理论进行理论分析, 壳体单元将超前小导管与周围的加固土体视作壳体。刘天宇^[6]利用FLAC^{3D}对超前小导管支护效果进行了计算分析, 得到了超前小导管可显著改善围岩力学性质的结论。

变截面开挖法^[7-8]对浅埋地层不稳定、施工场地小的工程较适用。本文结合某地铁车站出入口工程, 利用FLAC^{3D}软件^[9-10]建立隧道计算模型。从变截面开挖角度、开挖步距等方面分析开挖参数对隧道拱顶沉降、水平收敛变化的影响^[11-12], 并对变截面开挖的支护结构进一步优化, 以期达到最佳效果。

1 浅埋隧道变截面开挖工法的选择

1.1 工程概况和监测点布置

1.1.1 工程概况

本研究依托某地铁车站IV号出入口的实际工程, 该出入口从主体基坑东北侧引出垂直向北, 出入口采用部分暗挖部分明挖施工, 平面及暗挖(阴影)部分如图1所示。

该出入口过街通道拱顶覆土从上至下依次为杂填土, 层厚 1.8~6.3 m; 淤泥质黏土, 层厚 0.7~3.0 m; 粉质黏土, 层厚 1.8~10.1 m; 细砂, 层厚 0.3~2.2 m; 卵石, 层厚 0.1~1.9 m; 粉质黏土, 层厚 0.3~3.3 m;

强风化泥质粉砂岩, 层厚 0.4~9.0 m。通过地质勘探资料和出入口结构设计资料可知, 该出入口暗挖过街通道拱顶有一层厚约 1 m 的淤泥质粉质黏土夹层, 拱底有一层厚约 1 m 的砂卵石层^[13]。

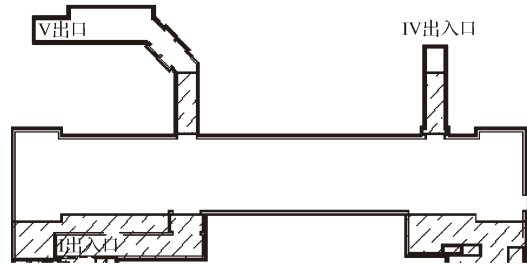
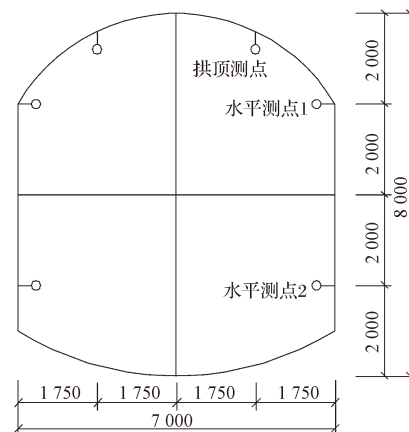


图1 地铁车站出入口布置图

Fig. 1 A lay-out drawing of the subway entrances and exits

1.1.2 监测点布置

该出入口暗挖段长 15.30 m, 标准段开挖断面 6.900 m × 7.741 m, 拱顶覆土厚约为 4.50~5.28 m。为了对开挖过程实时监测, 分别对拱顶、拱侧和地表布设监测点, 3处监测点在同一断面上, 共5个监测断面, 间距为 3 m。测点布置如图2和图3所示。



注: 图中数据单位为 mm, 下同。

图2 拱顶沉降点和水平收敛点布置图

Fig. 2 A lay-out drawing of monitoring points of vault subsidence and horizontal convergence

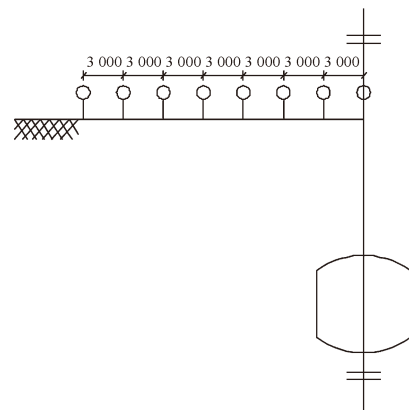


图3 地表监测点布置图

Fig. 3 Surface monitoring points

拱顶沉降观测监测点编号分别为 P4-1, P4-2, P4-3, P4-4, P4-5; 水平收敛监测点编号分别为 M4-1, M4-1.2, M4-2, M4-2.2, M4-3, M4-3.2, M4-4, M4-4.2, M4-5, M4-5.2; 地表点监测断面编号分别为 A4-1, A4-2, A4-3, A4-4, A4-5。

1.2 浅埋暗挖 CRD 法的确定

受交通量大、桥的位置和施工场地的限制,无法进行交通疏解,因此选用浅埋暗挖法进行施工。由于该隧道标准断面尺寸为 $6.900\text{ m} \times 7.741\text{ m}$, 断面面积 53.413 m^2 , 隧道顶端到地表距离为 $4.500\text{--}5.280\text{ m}$, 故该段隧道属于超浅埋超大断面施工范畴。经过对浅埋暗挖施工工法的比选,确定采用交叉中隔壁法 (cross diaphragm, CRD) 开挖工法^[14]以及超前管棚、超前小导管、钢拱架、钢筋网、喷射混凝土组成的联合支护体系,可以保证围岩变形在允许的范围內。

1.3 变截面开挖技术的确定

该出入口过街通道暗挖进洞端设置在车站站厅层预留洞门处,车站施工时,预留洞门为 $5.000\text{ m} \times 4.150\text{ m}$ 的矩形洞口,暗挖段标准开挖断面为 $6.900\text{ m} \times 7.741\text{ m}$, 在开挖进洞时无法一次直接开挖至设计的开挖线,进洞时需设置断面渐变扩大段,因此提出了变截面的施工方法。由进洞时的矩形小断面,渐变为设计的拱形大断面,经过反复讨论确定断面渐变段设置长为 5.000 m ,即进洞后每开挖一榀 (0.500 m),顶部抬高扩大断面约 0.200 m 。渐变段施工完后,再反向回来拆除渐变段初期支护,将渐变段断面扩大至标准断面,开挖示意图如图 4 所示。

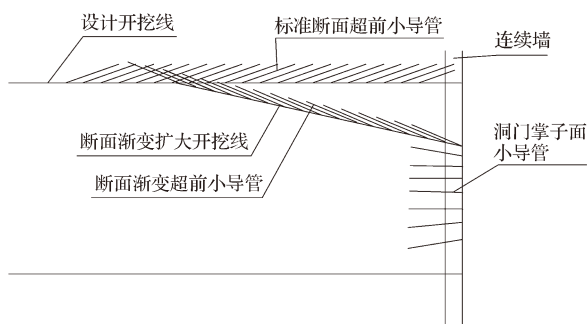


图 4 变截面开挖示意图

Fig. 4 A diagram of variable section excavation

1.4 逆向站内进洞施工技术的确定

一般城市地铁过街通道暗挖施工,是从出地面明挖段(即施工暗挖大管棚端)按照正常顺序进洞施工过街通道暗挖部分。这样,施工的开挖断面从进洞开始就为同一断面尺寸,施工工艺、技术较成熟。本车站出入口施工,决定采用逆向站内进洞技术。将暗挖施工从车站内部开始开挖,在只完成出地面明挖

段和过街通道暗挖段大管棚施工后,就能恢复出入口场地,从而达到尽早恢复道路交通的目的。

综上所述,受制于地铁出入口地质条件、交通状况和开挖断面形式的差异,该工法在纵断面上从车站内部向车站出入洞口开挖,即暗挖逆向站内进洞;隧道前 5.000 m ,每开挖一榀,顶部抬高,断面扩大,直至开挖标准断面,开挖完成之后返回来拆除渐变段初期支护,将渐变段断面扩大至标准断面,即变截面开挖;隧道后 10.000 m ,横断面上采用 CRD 开挖工法并用超前管棚、超前小导管、钢拱架、钢筋网、喷射混凝土组成联合支护体系。本地铁出入口采用的浅埋暗挖逆向站内进洞变截面开挖工法。

2 数值模拟

2.1 模型建立

该工程为软土浅埋隧道,其开挖会对地表建筑物和构筑物造成较大的影响,是一个典型的三维问题。因为本次数值模拟中主要从不同开挖角度和开挖步距来研究该施工工法对拱顶沉降和水平收敛的影响,故对掌子面封堵、隧道涌水、塌方等因素进行简化,不作考虑。计算模型统一采用标准断面。计算模型的周围土体服从 Mohr-Coulomb 准则,其它材料采用弹性模型;不考虑地下水渗流的作用,认为开挖面在地下水位之上;边界条件采用位移边界条件,上边界为自由边界,两侧及底边均约束其法向上的位移,计算时只考虑自重应力场。

隧道开挖的影响范围取决于土质条件、埋深和开挖形状等因素,模型的大小对数值计算结果的影响较大^[15]。影响区域选隧道开挖尺寸的 $3\sim 5$ 倍较合理^[16],其求解精度和计算速度都能较好满足。在 FLAC^{3D} 三维计算模型中,将 xOz 平面设为隧道的横断面, y 轴方向为隧道纵向开挖方向。设预留洞口断面尺寸为 $5.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$,变截面扩大完成后断面尺寸为 $7.0\text{ m} \times 8.0\text{ m}$,隧道两侧各取 24.0 m ,隧道埋深按 5.0 m 计算,隧道下方取 24.0 m ,模型尺寸选取 $55.0\text{ m} \times 15.0\text{ m} \times 37.0\text{ m}$,即横向(x 方向)取 55.0 m ,纵向(y 方向)取 15.0 m ,竖向(z 方向)取 37.0 m 。数值模拟模型和计算模型分别如见图 5 和图 6。隧道前 5.0 m 变截面开挖,后 10.0 m 采用 CRD 法开挖,整个模型共有 $52\ 665$ 个单元, $58\ 693$ 个节点,模型沿 y 方向等分成 30 份,每个单元 0.5 m ,即循环进尺为 0.5 m 。

根据地层实际情况,杂填土选用快剪强度,其它土层选用固结快剪指标,具体计算模拟单元土层参数如表 1 所示。

为简化分析, 在数值模拟中将钢拱架、超前小导管、喷射混凝土和钢筋网看作为注浆加固圈, 采用壳体单元模拟。采用等效刚度的算法得出壳体单元弹性模量为 43.7 GPa, 泊松比为 0.28, 重度为 23 kN/m³。采用张明聚等^[17]提出的桩单元模型模拟管棚。管棚中填充砂浆可提升地层承载力和增加钢管的弹性模量, 故注浆管棚的弹性模量和重度是钢管与砂浆共同作用的结果。径向注浆小导管采用锚杆单元来模拟, 弹性模量取 45.0 GPa, 横截面积为 1.38 × 10⁻³ m²。考虑加固土体作为安全储备, 土体仍采用原有的力学参数, 围岩及支护材料参数如表 2 所示。

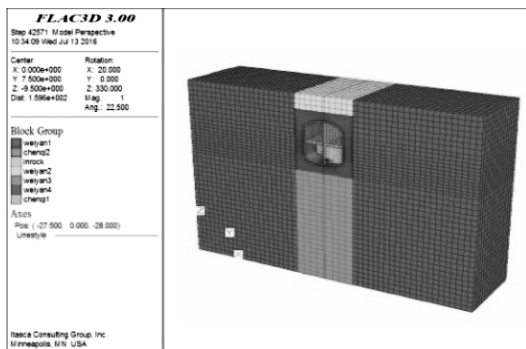
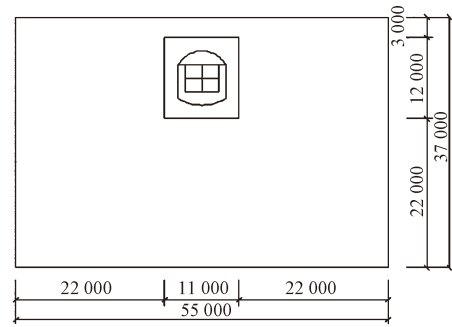
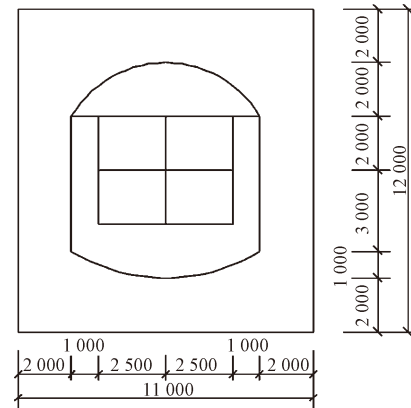


图 5 数值模拟模型三维网格图

Fig. 5 3D mesh of the numerical model



a) 整体图



b) 局部图

图 6 计算模型简图

Fig. 6 A sketch of the computational model

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

岩土序号	岩土层性质	弹性模量 /MPa	泊松比	重度 / (kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	厚度 /m
1	杂填土	5	0.2	20.0	12	10.0	3
2	淤泥质黏土	3	0.2	18.0	21	11.2	2
3	粉质黏土	13	0.2	19.9	40	22.0	2
4	细砂	28	0.2	19.7	0	35.0	1
5	卵石层	40	0.2	20.6	0	40.0	1
6	粉质黏土	20	0.2	19.9	40	20.5	3
7	强风化泥质粉砂岩	100	0.2	20.7	35	25.0	8
8	中风化泥质粉砂岩	2 000	0.2	23.5	110	34.4	15

表 2 围岩及支护材料参数

Table 2 Parameters of surrounding rocks and supporting materials

项 目	重度 / (kN·m ⁻³)	变形模量 /GPa	泊松比	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa
围岩 (填土)	20.00	0.005	0.20	2.770 × 10 ⁻³	2.080 × 10 ⁻³
围岩 (淤泥质黏土)	18.00	0.003	0.20	1.670 × 10 ⁻³	1.250 × 10 ⁻³
初期支护	23.00	43.700	0.28	33.1	17.100
径向小导管	12.79	45.000	0.30	37.5	17.308
填充砂浆的管棚	39.67	128.400	0.30	107.0	49.380

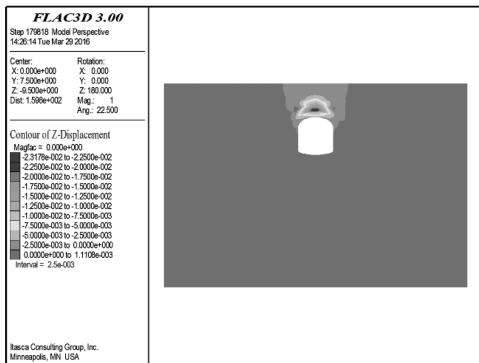
2.2 模拟结果分析

2.2.1 开挖角度对隧道变形的影响

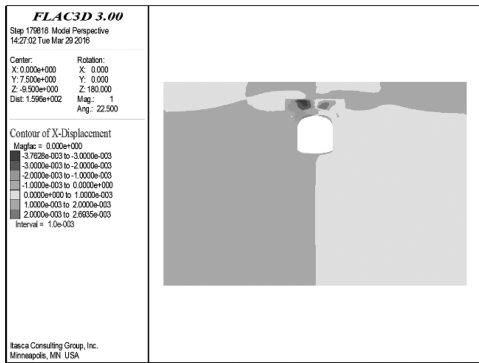
某地铁站 IV 号出入口的实际工程中, 变截面高度为 2.0 m, 开挖进洞时需设置断面渐变扩大段, 由进洞时的矩形小断面渐变为拱形大断面, 达到设计开挖线。为研究开挖角度对隧道变形的影响, 取开挖

步距为 0.5 m, 开挖角的正切 $\tan \alpha$ 分别取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 即每开挖 0.5 m, 隧道顶部分别扩大 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m, 最后外加一种等截面开挖 (即由预留的矩形小断面直接一次性开挖到设计的拱形大断面) 的工况, 相当于开挖角度 α 趋近于 90°。从模拟结果中选出有代表性的 $\tan \alpha=0.6$ 和等截面开挖 ($\alpha \approx 90^\circ$)

进行 z, x 方向位移云图比较, 如图 7~8 所示。

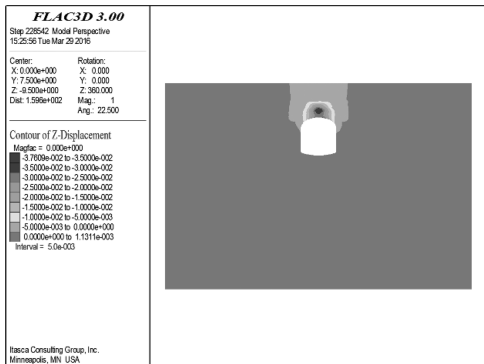


a) z 方向

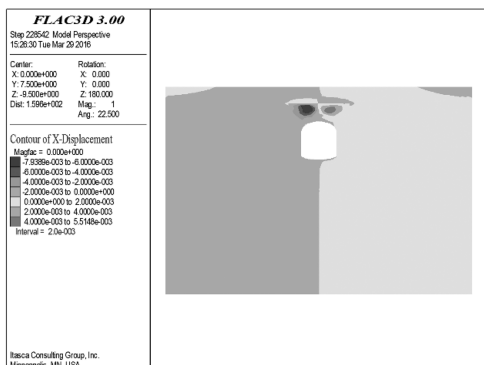


b) x 方向

图 7 $\tan \alpha=0.6$ 时围岩的位移云图
Fig. 7 Displacement nephogram of surrounding rocks with $\tan \alpha=0.6$



a) z 方向



b) x 方向

图 8 等截面开挖时围岩的位移云图
Fig. 8 Displacement nephogram of surrounding rocks during excavation

将模拟结果整理得到不同开挖角度时的围岩变形情况, 如表 3 所示。当 $\tan \alpha$ 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 和等截面时设为工况 1~6。由表可知, 随着开挖倾角的增大, 隧道拱顶沉降、水平位移收敛总体上呈增加趋势, 这说明隧道开挖角度对隧道围岩变形有明显的影响。

表 3 不同开挖角度时围岩的变形情况

Table 3 Displacements of surrounding rocks at different excavation angles

工况	参 数	
	最大拱顶沉降 /mm	最大水平收敛 /mm
1	22.56	4.52
2	22.81	4.29
3	23.17	3.76
4	25.30	5.24
5	29.16	7.39
6	37.61	7.94

工况 2~5 相较工况 1 拱顶沉降分别增加了 1.15%, 2.70%, 12.15%, 29.26%。拱顶沉降随着开挖角度的增加而增大, 这是由于增加开挖角度后, 变截面开挖距离就会缩短, 每次开挖上扩的距离变大, 对围岩的扰动加大, 每个开挖步距的土方量增加且围岩得不到及时的支护, 使拱顶位移增大。工况 2~5 相较工况 1 水平收敛分别增加了 -5.09%, -16.81%, 15.93%, 63.50%。可以看出, 变截面角度一定范围内的增加对围岩水平收敛影响不大, 只有当变截面开挖角度过大时 (工况 5), 围岩水平收敛才会迅速增大。

前 2 种工况围岩位移变化相差不大, 主要原因是工况 1 开挖角度小, 对围岩扰动小, 但由于开挖角度变小会使得开挖步数增加, 增加围岩的扰动次数, 两者相互抵消, 使工况 1 和工况 2 的位移相差不大。工况 3 水平位移值最小, 说明在本工程特定的情况下, 取开挖角度 $\tan \alpha=0.6$ 即每开挖 0.5 m 变截面上扩 0.3 m 时, 对围岩的扰动降到最低, 围岩水平收敛值达到最小。

隧道变截面开挖倾角越小, 则变截面的开挖长度越长, 所花费的资源越多、工期越长。就本工程而言, 工况 2 和工况 3 的取值较为合理, 不仅保证了施工的进度, 又使得隧道变形处于规范允许的范围。

由工况 6 可以得出, 变截面开挖的最大拱顶沉降、最大水平收敛都比等截面开挖有较大幅度减小。这说明了本工程采用的变截面开挖技术在控制围岩变形方面有较大优势, 隧道变截面开挖既方便于不良地质状况下地铁的施工, 又能较好地控制围岩的变形。

2.2.2 变截面开挖步距对隧道变形的影响

在采用浅埋暗挖法修筑地下隧道时, 开挖步距的确定相当重要。当开挖步距取值较小时, 会使隧道的支护

材料增多、工期延长, 隧道的施工成本显著提高。开挖步距小, 必然会增加对围岩的扰动次数, 但小步距能够保证隧道的及时支护, 这样能够缩小隧道塑性区的范围, 隧道拱顶沉降量以及水平收敛值显著减小; 反之, 选用较大的开挖步距时, 施工进度会加快, 但也会使得地表沉降加大, 当隧址区有重要建筑物或地下管线时, 必须谨慎选择开挖步距。本文根据具体情况, 选取开挖步距分别为 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 m 进行模拟研究, 以期得到最佳开挖步距。图 9 是开挖步距为 0.50 m 时, 模拟结果在 z, x 方向的位移云图。

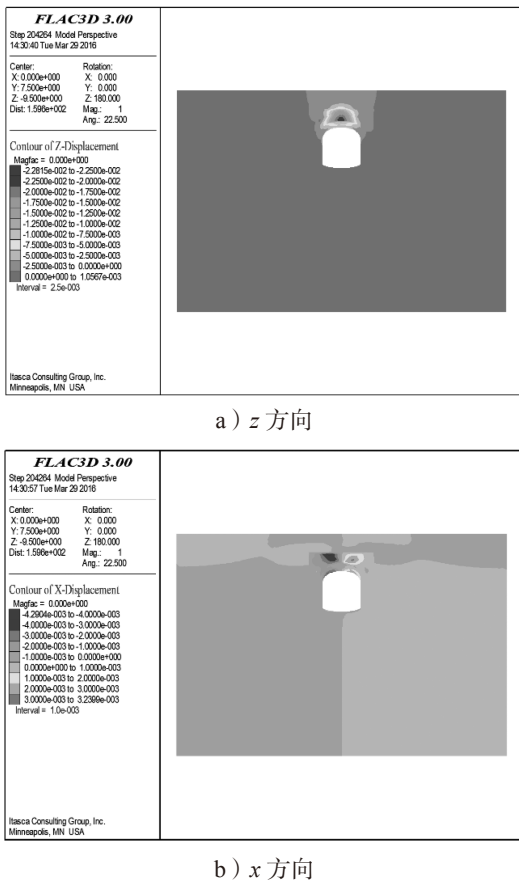


图 9 开挖步距 $d=0.50$ m 时围岩的位移云图

Fig. 9 Displacement nephogram of surrounding rocks with 0.5 m the excavation step

由模拟结果整理得出围岩的变形情况, 如表 4 所示。由表可以看出, 随着开挖步距 d 的增大, 拱顶沉降值、水平收敛值都会明显增大, 以开挖步距 0.25 m 为基准, 开挖步距为 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 m 时, 拱顶沉降值分别增加了 19.86%, 36.89%, 39.88%, 55.23%; 水平收敛值分别增加了 64.37%, 61.30%, 73.18%, 155.94%。可以看出开挖步距对拱顶沉降和水平收敛值都有较大的影响。当开挖步距为 1.25 m 时, 拱顶沉降值接近隧道拱顶沉降的警戒值 35 mm, 故在本工程中, 合适的开挖步距应小于 1.25 m。开挖步距为 0.25 m 时, 拱顶最大沉降值为 19.03 mm,

沉降值较小但施工成本高、工期长, 故在保证沉降值位于工程控制范围的前提下, 尽可能选择较大的开挖步距, 以加快工程的施工进度, 本研究中选用开挖步距为 0.50 m 较合适。

表 4 不同开挖步距时围岩的变形情况

Table 4 Surrounding rock deformation with different excavation steps

开挖步距 /m	参 数	
	最大拱顶沉降 /mm	最大水平收敛 /mm
0.25	19.03	2.61
0.50	22.81	4.29
0.75	26.05	4.21
1.00	26.62	4.52
1.25	29.54	6.68

3 监测与模拟结果对比分析

3.1 拱顶沉降

取洞内拱顶 P4-2 点为研究对象, 对其实测值和 FLAC^{3D} 数值模拟值进行对比, 得出拱顶沉降曲线如图 10 所示。

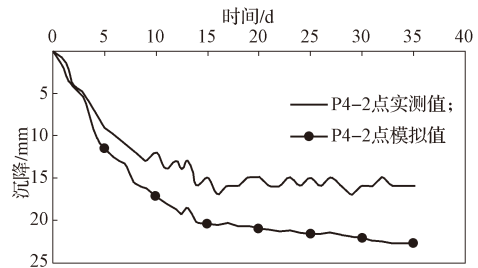


图 10 P4-2 点拱顶沉降对比图

Fig. 10 Comparison of vault subsidence in P4-2

由图 10 可以看出, P4-2 沉降的模拟值和实测值的值都呈抛物线型增加。随着隧道开挖的进行, 围岩土体的平衡被破坏, 拱顶沉降进入快速阶段, 围岩应力得到一定程度的释放; 随后及时的初期支护抑制了围岩的变形, 拱顶位移变化趋于平缓; 随着掌子面的向前推进, 拱顶沉降最终达到稳定。拱顶沉降最大实测值为 16.0 mm, 最大模拟值为 22.8 mm, 模拟值大于实际监测值。造成上述现象的原因可能是隧道监测的滞后性, 在实际监测中很难对监测点进行第一时间布设, 监测点布设完成时围岩本身已经产生一定的变形, 该部分变形很难测出; 另一部分原因可能是由于 FLAC^{3D} 算法造成的, FLAC^{3D} 算法为显式有限差分法, 为了便于计算, 单元格的划分较大, 不平衡力被简化地认为作用在节点上, 土体间的相互约束作用被忽略, 最后导致模拟值较实测值大; 还有可能是模型计算参数简化与实际工况差别较大。总之, 隧道实测数据是多种因素共同作用的结果, 数值模拟值虽不能精

确反映隧道位移的变化,但可以大体反映隧道位移的变化规律。

3.2 水平收敛值

取洞内水平 M4-2 点为研究对象,对其实测值和 FLAC^{3D} 数值模拟值进行对比,得出隧道水平收敛曲线,如图 11 所示。

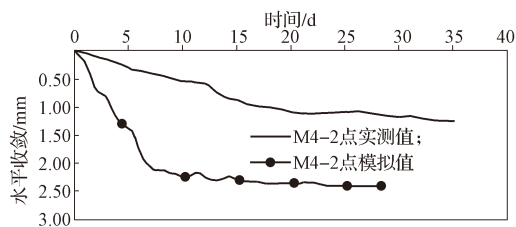


图 11 M4-2 点水平收敛对比图

Fig. 11 Comparison of horizontal convergence in M4-2

由图 11 可以看出, M4-2 点的水平收敛实测最大值约为 1.26 mm, 数值模拟最大值约为 2.50 mm, 模拟值远大于实测值, 约为实测值的 2 倍。水平收敛模拟值大于实测值, 与同拱顶沉降值类似, 可能也是由数据监测结果滞后性或者其他原因造成的。虽然实测值和模拟值有一定的差别, 但二者的变化规律基本一致, 收敛基本都集中在前 15 d 内。水平位移收敛大体经历了迅速增长和达到最终平衡两个阶段。整体上看, 隧道水平收敛值要远小于拱顶沉降值, 故其重要性要小于拱顶沉降。这就是在城市地铁的建设中, 位移控制值一般以拱顶沉降为主的原因。

3.3 地表沉降

选取地表 A4-2 断面为研究对象, 对其沉降实测值和 FLAC^{3D} 数值模拟值进行对比。整个开挖方向由南至北, 横坐标负号表示开挖断面西侧, 正号为断面东侧。隧道地表沉降曲线如图 12 所示。

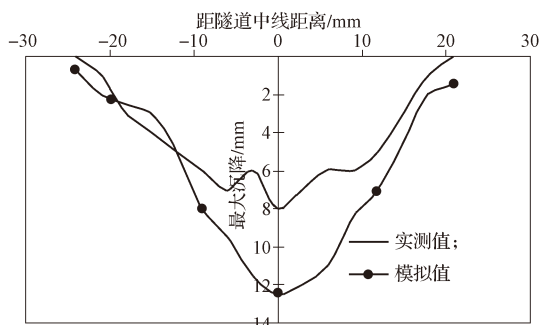


图 12 A4-2 断面地表沉降对比图

Fig. 12 Comparison of surface subsidence in A4-2

由图 12 可以看出, 地表点的沉降模拟值要大于实测值。无论实测值还是模拟值, 地表点的最大沉降值都位于隧道中线正上方, 距离隧道中心线越远的地表点沉降值越小, 沉降槽宽度左右各约 25 m, 模拟结果的最大沉降值为 12.6 mm, 实际监测的最大

沉降值为 8.0 mm。这是由于隧道地质状况较为复杂, 土层参数的选取, 地层间的接触, 开挖过程对围岩的扰动, 以及数值模拟中作近似处理或者忽略等原因, 而导致模拟过程很难与实际相符; 同时由于数值模拟软件 FLAC^{3D} 本身具有一定的局限性, 会使计算结果产生一定的系统误差。由图 12 还可以看出, 中线两侧沉降曲线不完全对称, 这是由于实际工程中影响地表沉降的因素很多, 隧道开挖、初衬的施工质量等因素都会对中线两侧的沉降造成影响。地表点的沉降曲线基本与 Peck 经验公式相吻合, 这既说明了数值模拟结果的正确性, 也表明了 FLAC^{3D} 数值模拟结果能较准确地反映城市地铁开挖所引发的地表沉降规律。

4 结论

根据上述研究可得以下结论:

- 1) 采用浅埋隧道变截面逆向站内进洞施工工法, 可达到少占用市政道路、尽早恢复交通的目的。
- 2) 随着变截面开挖角度的增大, 隧道拱顶沉降和水平收敛都有不同程度的增加, 开挖角度小, 开挖步数少, 对围岩的扰动次数少; 开挖角度大, 开挖步数增多, 对围岩扰动次数较多, 围岩得不到及时的支护, 变形加大; 变截面围岩的位移变化量总体上比等截面的小。这说明本工程采用的变截面开挖技术在控制地表沉降方面有较大优势。
- 3) 开挖步距不同, 对隧道拱顶沉降和水平收敛的影响有明显不同。开挖步距小, 对围岩扰动次数较多, 施工成本较高; 开挖步距大, 不能及时进行初期支护, 围岩变形速度快。所以选择合理的开挖步距对工程施工非常重要。
- 4) 通过对比隧道实际监测结果与 FLAC^{3D} 数值模拟结果, 虽然与围岩变形趋势基本一致, 但拱顶沉降、水平收敛方面的实际监测结果与数值模拟结果有较大偏差, 该数值模拟只能对实际工程开挖做定性的分析。

参考文献:

- [1] 张继明. 复杂条件下暗挖异形隧道变截面施工技术 [J]. 市政技术, 2013, 31(增刊 1): 124-126.
ZHANG Jiming. Construction Technology of Variable Cross-Section Tunnel Under Complex Condition [J]. Municipal Engineering Technology, 2013, 31(S1): 124-126.
- [2] 闫明超, 曾鹏, 何知思, 等. 超大断面隧道变截面段施工技术研究 [J]. 铁道建筑, 2015(7): 43-45.
YAN Mingchao, ZENG Peng, HE Zhisu, et al.

- Large Cross Section Tunnel of Variable Cross-Section Construction Technology Research[J]. *Railway Engineering*, 2015(7): 43-45.
- [3] 张文彦. 城市地铁渡线区变截面群洞隧道施工技术的优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
ZHANG Wenyan. The Optimize Research on Construction Technology for Mutative Transect Multi-Tunnel System of Urban Metro Crossover Area[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [4] 李 栋, 何兴玲, 覃 乐, 等. 特大跨超浅埋地铁隧道下穿天桥过程稳定性控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊2): 3636-3642.
LI Dong, HE Xingling, QIN Le, et al. Stability Control of Ultra Shallow-Buried Metro Tunnel with Super Large-Span in Process of Crossing Bridge[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3636-3642.
- [5] 左乾坤, 李天斌, 孟陆波, 等. 隧道钢拱架支护结构受力特征的数值模拟分析[J]. *中外公路*, 2011, 31(4): 196-199.
ZUO Qiankun, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. Numerical Simulation Analysis of Tunnel Steel Arch Supporting Structure Stress Characteristic[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2011, 31(4): 196-199.
- [6] 刘天宇. 超前小导管在隧道工程中的应用及数值模拟[J]. *土工基础*, 2013, 27(2): 67-70.
LIU Tianyu. Small-Lead-Tube Advanced Slip-Casting Method in Tunnel Construction and Its Numerical Simulations[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2013, 27(2): 67-70.
- [7] 黄林华, 陈秋南. 基于非线性有限元的变截面隧道围岩稳定性研究[J]. *湖南工程学院学报*, 2012, 22(4): 61-64.
HUANG Linhua, CHEN Qiunan. Study on Stability of Underground Cavern in Variablecross Section Based on Nonlinear[J]. *Journal of Hunan Institute of Engineering*, 2012, 22(4): 61-64.
- [8] 凌树云, 陈 鹰. 青岛海底隧道超浅埋变截面特大断面施工技术[J]. *铁道建筑技术*, 2011(9): 80-84.
LING Shuyun, CHEN Ying. Qingdao Underwater Ultra Shallow Buried Tunnel Cross-Section of Heavy Section Construction Technology[J]. *Railway Construction Technology*, 2011(9): 80-84.
- [9] 孙书伟, 林 杭, 任连伟. *FLAC^{3D}在岩土工程中的应用*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 346-385.
SUN Shuwei, LIN Hang, REN Lianwei. The Application of *FLAC^{3D}* in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydro-Power press, 2011: 346-385.
- [10] 彭文斌. *FLAC 3D 实用教程*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 273-277.
PENG Wenbin. *FLAC 3D Practical Tutorial*[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2011: 273-277.
- [11] 姚宣德, 王梦恕. 地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2030-2035.
YAO Xuande, WANG Mengshu. Statistic Analysis of Guideposts for Ground Settlement Induced by Shallow Tunnel Construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2030-2035.
- [12] 王勤富, 祝方才, 余继江, 等. 台阶法施工对隧道变形影响分析[J]. *湖南工业大学学报*, 2015, 29(5): 10-14.
WANG QinFu, ZHU Fangcai, YU Jijiang, et al. Impact Analysis of Bench Method in Construction on Tunnel Distortion[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2015, 29(5): 10-14.
- [13] 徐 瑞. 卵石地层明挖铁路隧道近接施工技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
XU Rui. Research of Railway Tunnel Constructed by Open and Cover Method Adjacent to Existing Structures in Gravel strate[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [14] 刘惠敏, 赵 月, 吴 波. CRD法不同施工工序的比较与分析[J]. *隧道建设*, 2005, 25(5): 6-10, 14.
LIU Huimin, ZHAO Yue, WU Bo. Comparison of and Analysis on Different Working Procedures of CRD Method[J]. *Tunnel Construction*, 2005, 25(5): 6-10, 14.
- [15] 侯公羽, 刘宏伟, 李晶晶, 等. 基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊1): 2915-2924.
HOU Gongyu, LIU Hongwei, LI Jingjing, et al. Numerical Analysis of Subway Tunnel Construction Process Based on Excavation Unloading Effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S1): 2915-2924.
- [16] 苏晓莹. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究[J]. *铁道工程学报*, 2012(3): 64-68.
SU Xiaokun. Research on Choosing Boundary Range of Surrounding Rock in Numerical Simulation of Tunnel Excavation[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2012(3): 64-68.
- [17] 张明聚, 林 毅, 黄明琦, 等. 厦门翔安隧道洞口段管棚设计与施工[J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(10): 1056-1059.
ZHANG Mingju, LIN Yi, HUANG Mingqi, et al. Shed-Pipe Design and Construction of Xiang'an Sub-Sea Tunnel Portal in Xiamen[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(10): 1056-1059.