

文章编号:1673-2049(2014)01-0111-09

CRD 法和台阶法施工对地铁隧道 围岩变形的影响

谷拴成, 黄荣宾

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:以西安地铁三号线太白南路—吉祥村暗挖区间隧道工程为依托,采用台阶法和交叉中隔墙法(CRD法)对隧道施工时的围岩变形进行实时监测,并对数据进行回归处理,应用FLAC3D软件对2种施工方法进行模拟分析,系统研究了2种开挖方法的隧道围岩变形规律。研究表明:采用CRD法能够有效控制拱顶沉降及水平收敛量,减小施工对围岩的扰动程度,对于保持软弱围岩的自持能力及稳定性有明显作用;在进行西安地铁隧道施工时,应采用台阶法实现隧道的快速开挖,而对于地层条件复杂或施工要求较高的区段建议选择CRD法进行施工,以便更好地控制围岩变形,保持围岩稳定性。

关键词:隧道工程;地铁隧道;台阶法;CRD法;变形监测;变形规律

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Influence of Subway Construction by CRD Method and Bench Method on Surrounding Rock Deformation

GU Shuan-cheng, HUANG Rong-bin

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Authors studied the tunnel deformation of South Taibai Road—Auspicious Village Tunnel for Xi'an Metro Line Three during constructed by using bench method and cross diaphragm method (CRD method) through the real-time monitoring and the regression on the data and the simulation analysis of both methods by FLAC3D software. Meanwhile, the change law of surrounding rock deformation of the two excavation method was systematicall studied. Research results show that in Xi'an Metro tunnel construction, the CRD method can effectively control the vault crown settlement and horizontal convergence, effectively reduce the disturbance degree of construction to the surrounding rock, and has the obvious effect to maintain the self-sustaining capability and the stability of soft surrounding rock. In Xi'an Metro tunnel construction, fast excavation in tunnel by bench method is achieved, and it is recommended to choose the CRD method for the construction in complex geological conditions and construction higher requirements, so as to control the deformation of surrounding rock better and maintain the stability of surrounding rock.

Key words: tunnel engineering; subway tunnel; bench method; CRD method; deformation moni-

收稿日期:2014-01-22

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(2013JK0961)

作者简介:谷拴成(1963-),男,陕西扶风人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:446413318@qq.com。

toring; deformation law

0 引言

在中国的地铁隧道施工中,浅埋暗挖法是常见的施工方法之一,其原理是利用土层在开挖过程中短时间的自稳能力,采取适当的支护措施,使围岩或土层表面形成密贴型薄壁支护结构的不开槽施工方法^[1-3]。目前,利用矿山法进行城市地铁修建的开挖方法包括中壁法、双侧导坑开挖法、台阶法等。不同施工方法的适应条件是不同的,在具体选择地铁施工方法时,应根据地质条件、隧道断面及埋深、周围环境条件及工程要求等综合考虑^[4-7]。由于施工方法的差异,在开挖过程中对围岩的影响程度及特点是不同的,通过对不同施工方法下的围岩变形特点进行对比,可以探究不同施工方法在特定环境下的优劣,为施工方法的选择提供依据^[8-9]。

西安市地铁三号线太白南路—吉祥村暗挖区间隧道断面设计结构形式共分为 4 种,针对不同的断面形式分别采用台阶法和交叉中隔墙法(CRD 法)进行施工。本文中笔者对西安地铁三号线 2 种施工方法下的围岩变形特点进行实时监测,并对实测数据进行回归处理,应用 FLAC3D 对 2 种施工方法进行隧道开挖过程模拟。通过对实测数据及模拟结果进行对比分析,总结了应用台阶法和 CRD 法进行地铁隧道施工的围岩变形规律及特点。

1 工程概况

西安市地铁三号线太白南路站—吉祥村站区间,右线起讫桩号为 YDK18+658.726~YDK20+107.867,右线全长 1 449.141 m,左线起讫桩号为 ZDK18+658.726~ZDK20+107.867,左线短链 7.767 m,左线全长为 1 441.465 m。该区间地面标高 408.75~410.75m,全段东高西低,高差为 2.00 m。该区间跨越 2 个地貌单元,分别为皂河一级阶地和黄土洼地,其地貌单元分界线位于永松路与吉祥路十字东约 190 m,位于设计里程 YDK19+473 附近。该区间隧道通过地段岩性复杂,地层以新黄土、古土壤、粉土和细砂、粗砂层为主,主要地层分布见表 1。场地地下水属潜水类型,稳定水位埋深 9.69~12.60 m,相应标高 396.28~399.57 m,高差达 3.29 m,东高西低,地下水流向为自北向西,隧道洞身多在地下水位以下及其附近,受地下水的影响较大。

隧道断面结构形式共分为:标准断面、地裂缝设

表 1 地层分布

Tab. 1 Stratigraphic Distributions

| 地层 | 厚度/m | 特征 |
|------|------------|---|
| 素填土 | 0.80~3.80 | 粉质粘土为主,局部含少量砖块、碎石,稍湿,稍密状态 |
| 黄土状土 | 2.00~8.70 | 大孔隙发育,见虫孔及蜗牛壳碎片,可见红色氧化铁薄膜,属中压缩性土 |
| 细砂 | 2.60~8.50 | 级配不良,主要成分为石英、长石,水位以上呈稍湿—潮湿状态,水位以下呈饱和状态,密实 |
| 新黄土 | 8.10~13.60 | 见针状空隙,可塑状态,属中压缩性土,具有湿陷性 |
| 古土壤 | 1.90~5.80 | 土质较均匀,团粒结构,大孔隙发育,有针孔、虫孔,见白色钙质薄膜及钙质结核 |

防断面、地裂缝调坡断面、人防段断面。标准单线隧道断面及地裂缝调坡断面采用台阶开挖法;地裂缝设防断面及人防段断面采用 CRD 法施工。本文中以右线 YDK19+875.986 及 YDK19+970.986 典型监测断面为例,分别对 CRD 法和台阶法引起的围岩变形规律进行研究。CRD 法和台阶法施工监测断面位置平面如图 1 所示。

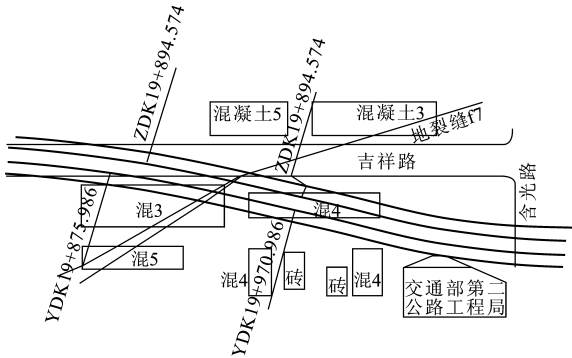


图 1 断面位置平面

Fig. 1 Section Arrangement Plane

2 监测方案

利用 JSS30A 型数显收敛仪进行围岩变形监测,监测的内容主要包括拱顶沉降量测与净空水平收敛量测。针对台阶法与 CRD 法不同的施工特点,测点布置如图 2 所示。由于架设临时横支撑,净空水平收敛设置 2 条测线,分别为 AB 线与 CD 线;在进行拱顶沉降监测时,依据三角形测量原理对拱顶沉降进行实时监测,拱顶沉降量测与净空水平收敛量测的监测工作应在同一断面内进行,并用相同的量测频率,围岩变形监测频率如表 2 所示。

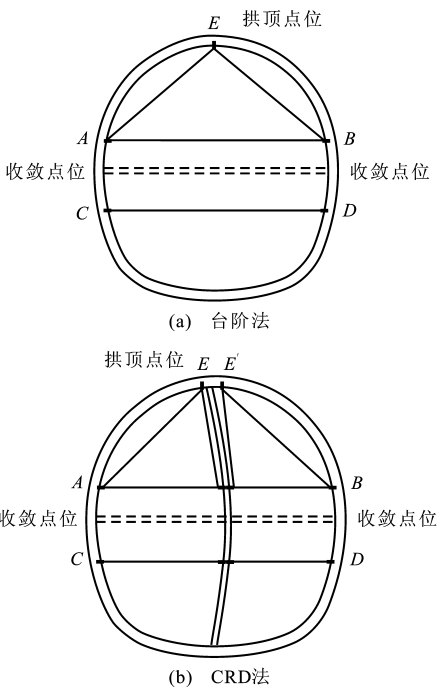


图 2 台阶法和 CRD 法测点布置
Fig. 2 Layouts of Bench Method and
CRD Method Observation Points

表 2 围岩变形监测频率
Tab. 2 Surrounding Rock Deformation
Monitoring Frequencies

| 变形速度/(mm·d ⁻¹) | 量测断面距开挖工作面距离 | 监测频率 |
|----------------------------|--------------|------------------------|
| ≥5.0 | <1L | 2 次·d ⁻¹ |
| 1.0~5.0 | 1L~2L | 1 次·d ⁻¹ |
| 0.2~0.5 | 2L~5L | 1 次·(2d) ⁻¹ |
| <0.2 | >5L | 1 次·周 ⁻¹ |

注:L 为隧道开挖宽度。

3 隧道施工过程数值模拟

为了研究在隧道开挖过程中利用台阶法与 CRD 法对隧道围岩变形的影响特点,本文中利用 FLAC3D 软件对施工过程进行模拟分析。

采用短台阶法开挖的断面,上半断面施工时保留核心土,以发挥掌子面三维支撑作用,保证掌子面稳定,开挖采用人工开挖,台阶长度为 3.6 m,钢拱架间距为 0.6 m。开挖后,及时施做初期支护和临时支护,以便尽早封闭断面,具体施工步骤为:小导管超前注浆—上台阶开挖留核心土—上台阶初期支护—下部开挖—下部初期支护—施工防水层—仰拱先行;先墙后拱法施工二次钢筋混凝土衬砌。

采用 CRD 法进行隧道开挖的工序见图 3,具体步骤为:①拱部超前小导管预注浆,分部开挖左侧导坑第 1 部分土体,架设临时仰拱,施做初期支护;

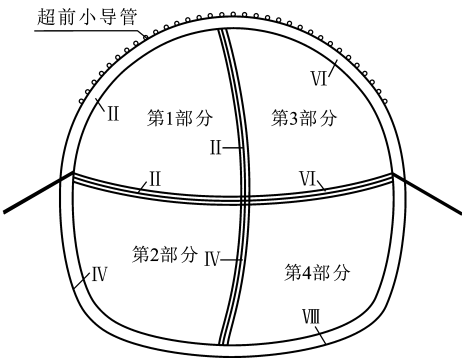


图 3 CRD 法施工工序
Fig. 3 Construction Sequence of CRD Method

②开挖第 2 部分土体,施做初期支护;③拱部超前小导管预注浆,分部开挖右侧导坑上台阶第 3 部分土体,架设临时仰拱,施做初期支护;④开挖第 4 部分土体,施做初期支护。

本文中利用 FLAC3D 对台阶法和 CRD 法的隧道开挖过程进行模拟。为了研究 2 种方法对围岩变形不同的影响特点,两者建立的模型相似,模型长为 100 m,宽为 100.8 m,高为 61.8 m,模型如图 4 所示。模拟开挖按照实际的施工工序进行,同时按照实际的支护方法进行模拟,其中,1 个循环的施工进尺为 1.8 m,钢拱架的间距为 0.6 m,上台阶宽度为 3.6 m。在各自的模拟过程中分别设置 3 个监测点,分别为拱顶沉降监测点、左拱腰水平收敛监测点、右拱腰水平收敛监测点,同时对整体的围岩变形进行分析研究。

4 围岩变形实测及模拟分析

隧道的拱顶沉降及水平收敛是隧道围岩变形的最直接反映,为判断隧道空间的稳定性提供可靠的信息^[10-15]。隧道施工过程中,应在设计断面及时布置监测点并进行实时监测,得到拱顶沉降随时间的变化规律。在进行拱顶沉降规律分析时,同时借助 FLAC3D 软件对整个施工过程进行模拟。通过 2 种分析途径的对比验证,进一步研究采用台阶法与 CRD 法 2 种施工方法的围岩变形规律。

4.1 实测数据回归分析

对隧道进行每次沉降量或收敛量观测后,应对各量测断面内每条测线分别进行回归分析,求出各自回归精度最高的收敛-时间或沉降-时间回归方程,以此进一步研究围岩变形特点,掌握变形规律。

在对台阶法拱顶沉降实测数据进行回归分析时,首先应根据实测数据曲线与标准函数曲线相关程度,确定出最优的回归曲线函数形式。常用的回

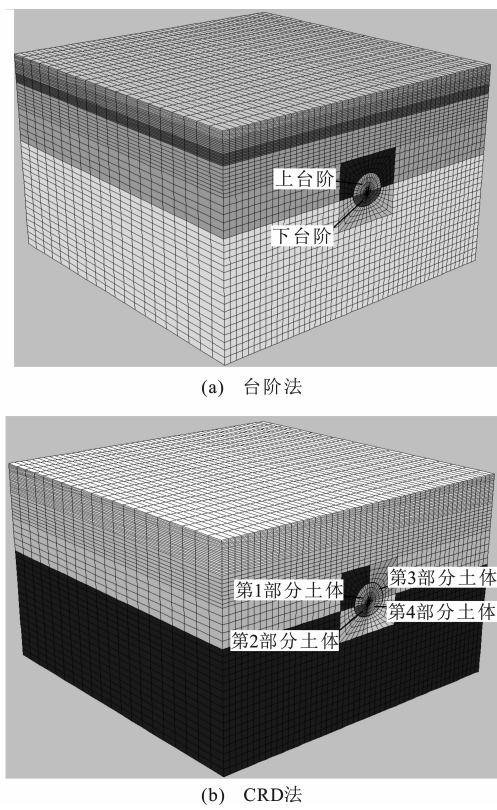


图 4 台阶法和 CRD 法施工模型
Fig. 4 Models of Bench Method and CRD Method Construction

归曲线为指数函数,其表达式为

$$u = ce^{b/t} \tag{1}$$

式中: u 为拱顶沉降量; t 为时间; c, b 均为待定系数。

对式(1)进行函数变换,则有

$$\ln(u) = \ln(c) + b/t \tag{2}$$

令 $y = \ln(u)$, $x = 1/t$, 待定系数 $a = \ln(c)$, 则

表 3 回归分析数据处理结果

Tab. 3 Data Processing Results of Regression Analysis

| 测量时间 t/d | 拱顶沉降量实测值 u/mm | $y = \ln(u)$ | $x = 1/t$ | y^2 | x^2 | xy | 回归值 y_i | $(u - y_i)^2$ |
|------------|-----------------|--------------|-----------|-------|-------|-------|-----------|---------------|
| 1 | 2.62 | 0.963 | 1.000 | 0.928 | 1.000 | 0.963 | 0.552 | 0.169 |
| 2 | 4.75 | 1.558 | 0.500 | 2.428 | 0.250 | 0.779 | 1.909 | 0.123 |
| 3 | 7.91 | 2.068 | 0.333 | 4.277 | 0.111 | 0.689 | 2.361 | 0.086 |
| 4 | 10.24 | 2.326 | 0.250 | 5.412 | 0.063 | 0.582 | 2.587 | 0.068 |
| 5 | 11.86 | 2.473 | 0.200 | 6.117 | 0.040 | 0.495 | 2.723 | 0.062 |
| 6 | 13.87 | 2.630 | 0.167 | 6.915 | 0.028 | 0.438 | 2.813 | 0.034 |
| 7 | 16.25 | 2.788 | 0.143 | 7.773 | 0.020 | 0.398 | 2.878 | 0.008 |
| 8 | 17.52 | 2.863 | 0.125 | 8.199 | 0.016 | 0.358 | 2.926 | 0.004 |
| 9 | 19.10 | 2.950 | 0.111 | 8.701 | 0.012 | 0.328 | 2.964 | 0.000 |
| 10 | 19.24 | 2.957 | 0.100 | 8.744 | 0.010 | 0.296 | 2.994 | 0.001 |
| 11 | 19.82 | 2.987 | 0.091 | 8.920 | 0.008 | 0.272 | 3.019 | 0.001 |
| 12 | 20.28 | 3.010 | 0.083 | 9.058 | 0.007 | 0.251 | 3.040 | 0.001 |
| 13 | 21.25 | 3.056 | 0.077 | 9.341 | 0.006 | 0.235 | 3.057 | 0.000 |

式(2)化简为

$$y = a + bx \tag{3}$$

利用一元线性回归分析法求解待定系数 a, b , 求解过程如下

$$S_{xx} = \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n = 1.182$$

$$S_{yy} = \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2/n = 9.289$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i/n = -3.207$$

式中: S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} 均为中间计算变量。

从而可以计算得到待定系数 b

$$b = S_{xy}/S_{xx} = -2.713$$

将求得的 b 值代入式(3)中,可得

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 3.266$$

从而式(3)变为

$$y = 3.266 - 2.713x$$

即拱顶沉降回归曲线方程为

$$u = 26.198e^{-2.713/t} \tag{4}$$

计算回归曲线的剩余标准差 S

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum (y_i - \bar{y})^2} = 0.123$$

计算线性相关系数 r

$$r = \left| \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \right| = 0.966$$

由此可知,所得的回归曲线与实测数据相关性
及准确性较好,能够较准确地反映出拱顶沉降的变
化趋势。台阶法拱顶沉降实测数据的回归分析中的
数据处理结果见表 3。其他实测数据处理过程与上
述类似,本文中不再赘述。各监测数据回归分析结
果见表 4。

续表 1

| 测量时间 t/d | 拱顶沉降量实测值 u/mm | $y=\ln(u)$ | $x=1/t$ | y^2 | x^2 | xy | 回归值 y_i | $(u-y_i)^2$ |
|-------------------|------------------------|------------|---------|---------|-------|-------|-----------|-------------|
| 14 | 22.42 | 3.110 | 0.071 | 9.672 | 0.005 | 0.222 | 3.072 | 0.001 |
| 15 | 22.63 | 3.119 | 0.067 | 9.730 | 0.004 | 0.208 | 3.085 | 0.001 |
| 16 | 22.61 | 3.118 | 0.063 | 9.724 | 0.004 | 0.195 | 3.096 | 0.000 |
| 17 | 23.65 | 3.163 | 0.059 | 10.007 | 0.003 | 0.186 | 3.106 | 0.003 |
| 18 | 23.69 | 3.165 | 0.056 | 10.018 | 0.003 | 0.176 | 3.115 | 0.003 |
| 19 | 24.48 | 3.198 | 0.053 | 10.226 | 0.003 | 0.168 | 3.123 | 0.006 |
| 20 | 24.81 | 3.211 | 0.050 | 10.312 | 0.003 | 0.161 | 3.130 | 0.007 |
| 21 | 24.79 | 3.210 | 0.048 | 10.307 | 0.002 | 0.153 | 3.136 | 0.005 |
| 22 | 24.80 | 3.211 | 0.045 | 10.310 | 0.002 | 0.146 | 3.142 | 0.005 |
| 23 | 24.74 | 3.208 | 0.043 | 10.294 | 0.002 | 0.139 | 3.148 | 0.004 |
| 24 | 25.06 | 3.221 | 0.042 | 10.377 | 0.002 | 0.134 | 3.153 | 0.005 |
| 25 | 25.09 | 3.222 | 0.040 | 10.384 | 0.002 | 0.129 | 3.157 | 0.004 |
| 26 | 24.81 | 3.211 | 0.038 | 10.312 | 0.001 | 0.124 | 3.161 | 0.002 |
| 27 | 25.03 | 3.220 | 0.037 | 10.369 | 0.001 | 0.119 | 3.165 | 0.003 |
| 28 | 25.01 | 3.219 | 0.036 | 10.364 | 0.001 | 0.115 | 3.169 | 0.003 |
| 29 | 25.02 | 3.220 | 0.034 | 10.366 | 0.001 | 0.111 | 3.172 | 0.002 |
| 30 | 25.01 | 3.219 | 0.033 | 10.364 | 0.001 | 0.107 | 3.175 | 0.002 |
| 31 | 24.98 | 3.218 | 0.032 | 10.356 | 0.001 | 0.104 | 3.178 | 0.002 |
| 32 | 25.22 | 3.228 | 0.031 | 10.418 | 0.001 | 0.101 | 3.181 | 0.002 |
| 33 | 25.01 | 3.219 | 0.030 | 10.364 | 0.001 | 0.098 | 3.183 | 0.001 |
| 34 | 25.14 | 3.224 | 0.029 | 10.397 | 0.001 | 0.095 | 3.186 | 0.001 |
| 35 | 24.93 | 3.216 | 0.029 | 10.343 | 0.001 | 0.092 | 3.188 | 0.001 |
| 36 | 25.06 | 3.221 | 0.028 | 10.377 | 0.001 | 0.089 | 3.190 | 0.001 |
| 37 | 24.82 | 3.212 | 0.027 | 10.315 | 0.001 | 0.087 | 3.192 | 0.000 |
| 38 | 24.87 | 3.214 | 0.026 | 10.328 | 0.001 | 0.085 | 3.194 | 0.000 |
| 39 | 24.91 | 3.215 | 0.026 | 10.338 | 0.001 | 0.082 | 3.196 | 0.000 |
| 40 | 24.64 | 3.204 | 0.025 | 10.268 | 0.001 | 0.080 | 3.198 | 0.000 |
| 41 | 24.66 | 3.205 | 0.024 | 10.273 | 0.001 | 0.078 | 3.199 | 0.000 |
| 42 | 25.02 | 3.220 | 0.024 | 10.366 | 0.001 | 0.077 | 3.201 | 0.000 |
| 43 | 24.91 | 3.215 | 0.023 | 10.338 | 0.001 | 0.075 | 3.203 | 0.000 |
| 加和 | 922.530 | 128.621 | 4.350 | 394.054 | 1.622 | 9.805 | 128.621 | 0.624 |

表 4 监测数据回归分析结果

Tab. 4 Results of Regression Analysis of Monitoring Data

| 施工方法 | 监测项目 | 回归曲线方程 | S | r |
|-------|---------|-------------------------------|-------|-------|
| 台阶法 | 拱顶沉降 | $u=26.198\text{e}^{-2.713/t}$ | 0.123 | 0.966 |
| | 上测线水平收敛 | $v=14.500\text{e}^{-2.622/t}$ | 0.117 | 0.942 |
| CRD 法 | 下测线水平收敛 | $v=11.554\text{e}^{-3.780/t}$ | 0.141 | 0.947 |
| | 拱顶沉降 | $u=19.085\text{e}^{-2.454/t}$ | 0.193 | 0.958 |
| | 上测线水平收敛 | $v=10.963\text{e}^{-2.200/t}$ | 0.144 | 0.933 |

4.2 拱顶沉降分析

在隧道开挖到设定监测断面位置时,及时进行监测点布置,并随着掌子面推进进行收敛监测,通过引用 2 个监测断面中 E 点的沉降监测数据进行分析。图 5,6 分别为 2 种施工方法进行隧道施工时拱顶沉降量及拱顶沉降速率的实测数据,FLAC3D 模

拟所得的拱顶沉降及水平收敛的计算结果如图 7,8 所示。通过对数据进行分析,应用台阶法及 CRD 法进行隧道施工时的拱顶沉降有以下特点:

(1)拱顶沉降趋于稳定前曲线大致可分为快速增长和缓慢增长 2 个阶段,相应的拱顶沉降速率变化曲线总体上逐渐减小,但都同时伴随着一定的波

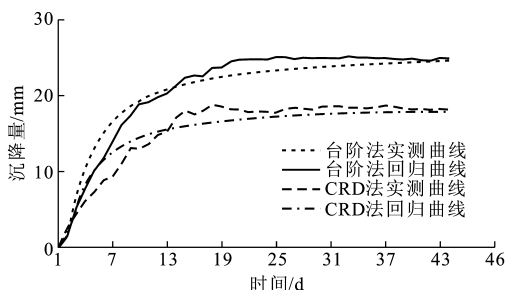


图5 拱顶沉降量

Fig. 5 Vault Settlements

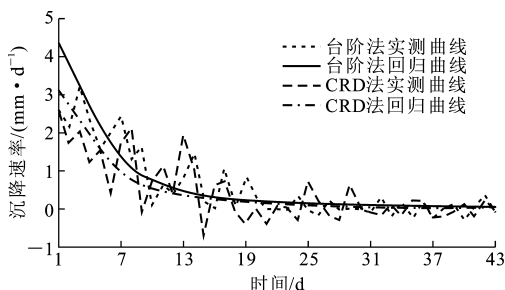


图6 拱顶沉降速率

Fig. 6 Rates of Vault Settlement

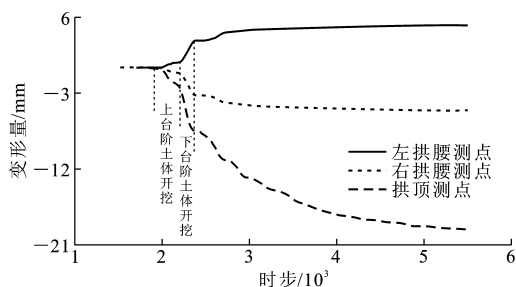


图7 模拟台阶法施工收敛变化曲线

Fig. 7 Convergence Change Curves of Bench Method Construction by Simulation

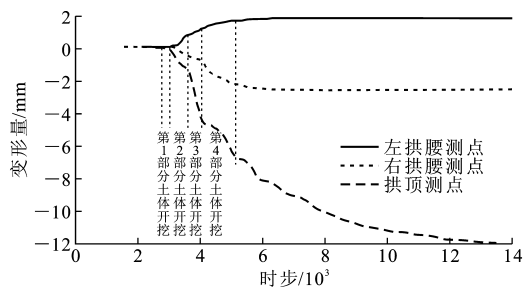


图8 模拟CRD法施工收敛变化曲线

Fig. 8 Convergence Change Curves of CRD Method Construction by Simulation

动。同时,由图7可以看出,随着上台阶的开挖,隧道围岩同时发生明显拱顶沉降。当进行下台阶开挖时,围岩变形速率明显变大,这是由于随着掌子面的开挖,裸露土体不断变大,加大了对土体的扰动,使

得围岩变形速率变大。通过对图8中的分析亦能得出类似结论,此处不再赘述。

(2)利用2种施工方法进行施工时,拱顶沉降的不同发展阶段持续时间有所不同。在利用台阶法进行施工时,快速增长阶段持续时间约为10 d,经过快速增长之后,接下来的13 d拱顶沉降进入缓慢增长阶段,测点埋设23 d后拱顶沉降变化趋于稳定;利用CRD法进行施工时,快速增长阶段持续时间约为7 d,第8~17 d进入缓慢增长阶段,测点埋设17 d后拱顶沉降变化趋于稳定。

(3)利用2种施工方法进行施工时,拱顶沉降在不同发展阶段的沉降幅度及速率不同。由图5,6可以看出:在利用台阶法进行施工时,快速增长阶段平均沉降速率为 $2.18 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最大速率达到了 $3.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,缓慢增长阶段平均沉降速率约为 $0.42 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,总沉降量约为 24.76 mm ;在利用CRD法进行施工时,快速增长阶段平均沉降速率为 $1.57 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最大速率为 $2.12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,缓慢增长阶段平均沉降速率约为 $0.43 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,总沉降量约为 18.32 mm 。同时由实测数据可以发现,应用CRD法与台阶法进行隧道施工时,拱顶沉降速率会出现周期性变化,这是由于应用2种施工方法施工过程中不同的施工工序对拱顶沉降的影响程度有所不同导致的。由图7,8可以看出,利用FLAC3D进行模拟分析所得两者的拱顶最大沉降量分别为 $19.24, 12.76 \text{ mm}$ 。

通过对比分析可以看出,在整个围岩变形过程中CRD法施工所引起的拱顶沉降量比台阶法小约26%,而且CRD法施工的拱顶沉降速率及各个变形阶段持续时间都较小,这说明CRD法进行隧道施工引起的拱顶扰动程度较弱,受扰动后的围岩能够更快地进入稳定阶段。

4.3 水平收敛分析

随着隧道施工对水平收敛进行监测,可以反映围岩变形的主要规律,由于现场条件的限制,无法对拱腰位置进行监测,而是采用双测线法进行水平收敛的监测,图9~12分别为采用2种施工方法进行隧道施工时上测线及下测线的水平收敛量及收敛速率的实测数据。通过对数据分析,应用台阶法及CRD法进行隧道施工时的水平收敛有以下特点:

(1)从图9,11可以看出,采用台阶法及CRD法进行隧道施工所引起的水平收敛变化趋势与拱顶沉降变化趋势大致相同,即总体表现为先急剧收敛后逐渐变缓,最后趋于稳定。通过分析图7,8,同样可

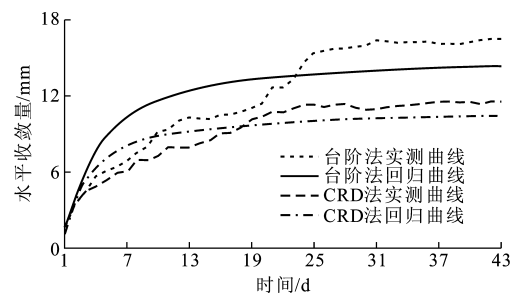


图 9 上测线水平收敛量

Fig. 9 Upper Observation Line Horizontal Convergence

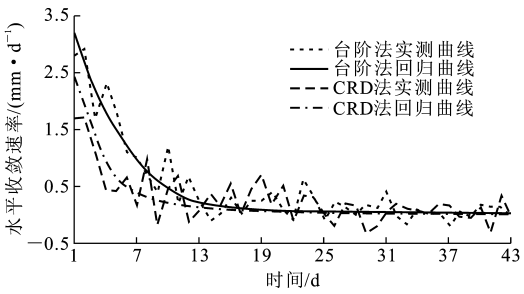


图 10 上测线水平收敛速率

Fig. 10 Rates of Upper Observation Line Horizontal Convergence

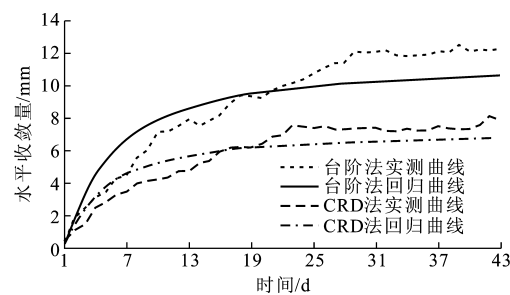


图 11 下测线水平收敛量

Fig. 11 Lower Observation Line Horizontal Convergence

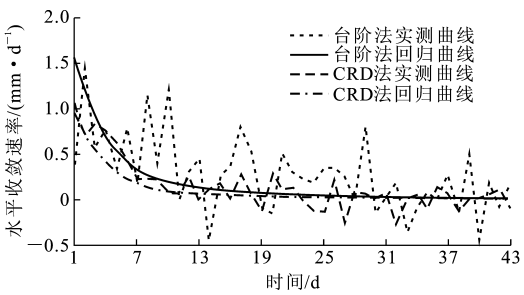


图 12 下测线水平收敛速率

Fig. 12 Rates of Lower Observation Line Horizontal Convergence

以看出,水平收敛会随着开挖阶段的不同而发生有规律的变化。

(2)采用 2 种施工方法进行施工时,水平收敛量不同发展阶段持续时间不同。台阶法施工段上测线

的水平收敛量急剧收敛阶段持续时间为 13 d,在 28 d 之后,隧道的水平收敛趋于稳定;CRD 法施工段上测线的水平收敛量急剧收敛阶段持续时间为 8 d,在 22 d 之后,隧道的水平收敛趋于稳定。

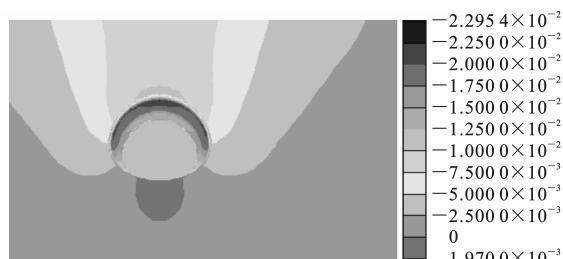
(3)利用 2 种施工方法进行施工时,拱顶沉降在不同发展阶段的收敛幅度及速率不同。由图 9~12 可以看出:台阶法施工段上测线的急剧收敛阶段最大收敛速率为 $1.31 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,平均收敛速率为 $0.59 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,累计收敛量为 16.51 mm;台阶法施工段下测线与上测线所表现的收敛趋势大体相同,但是累计收敛量为 12.23 mm,平均收敛速率为 $0.43 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。CRD 法施工段上测线整个收敛过程最大收敛速率为 $1.05 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,平均收敛速率为 $0.52 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,累计收敛量为 11.45 mm;CRD 法施工段下测线与上测线所表现的收敛趋势大体相同,但是累计收敛量为 7.83 mm,平均收敛速率为 $0.35 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。同时由实测数据可以发现,应用 CRD 法及台阶法进行隧道施工时,水平收敛速率会出现周期性变化,这是由于应用 2 种施工方法施工过程中不同的施工工序对拱腰两侧的影响程度有所不同所导致的。图 7,8 中显示的利用 FLAC3D 进行模拟分析所得两者的最大水平收敛量分别为 9.34,5.28 mm。在台阶法施工过程中,由于采取沿隧道中轴线对称施工,左拱腰与右拱腰测点的水平收敛变化趋势与幅度是相同的,而利用 CRD 法进行隧道施工时,由于采取开挖左侧上部土体—开挖左侧下部土体—开挖右侧上部土体—开挖右侧下部土体的施工工序,使得左右拱腰的水平收敛量不同,变化趋势也有所差异。

通过上述对比分析可知,在开挖过程中 CRD 法所引起的水平收敛量比台阶法减小约 39%。而且由于沉降速率及各个变形阶段持续时间都较小,这说明 CRD 法进行隧道施工更有利于保持围岩的稳定性。

4.4 围岩位移场模拟分析

为了进一步比较分析台阶法与 CRD 法对隧道围岩的影响,利用 FLAC3D 对两者开挖的围岩位移场进行分析,竖向和横向位移云图见图 13,14。

由图 13 可知,当采用台阶法进行隧道施工时围岩竖向位移沿隧道中轴线对称分布,隧道最大沉降发生在顶部位置,其最大沉降量为 19.24 mm,同时,底部位置出现大范围的隆起现象,最大隆起位移为 1.97 mm。图 13(b)中采用 CRD 法施工围岩竖向位移最大值为 17.06 mm,发生在拱顶偏右位置,



(a) 台阶法



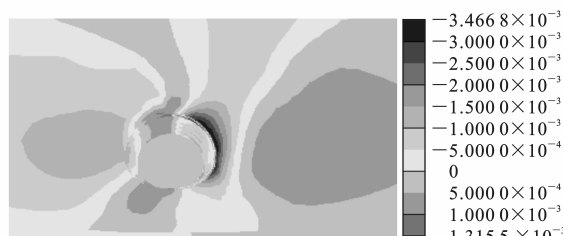
(b) CRD法

图 13 围岩竖向位移云图(单位:mm)

Fig. 13 Contours of z-displacement of Surrounding Rock (Unit:mm)



(a) 台阶法



(b) CRD法

图 14 围岩横向位移云图(单位:mm)

Fig. 14 Contours of x-displacement of Surrounding Rock (Unit:mm)

隧道底部存在两处明显隆起,位置在中部,沿隧道轴线对称,最大隆起值为 1.05 mm。由图 13 还可知,与 CRD 法进行隧道施工相比,利用台阶法引起的竖向位移分布较分散,且整体沉降幅度较大,此外利用台阶法施工所引起的底部隆起范围较大。

由图 14(a)可以看出,当采用台阶法进行隧道施工时围岩横向位移沿隧道中轴线对称分布,隧道最大横向位移发生在拱腰位置,其最大值为 4.67 mm,即最大水平收敛量为 9.34 mm。图 14(b)中采用 CRD 法施工时围岩横向位移最大值为 3.47 mm,发生在右拱腰附近区域。由图 14 还可以看出,CRD 法施工引起的横向位移相对比较分散,台

阶法施工引起的横向位移主要集中在拱腰位置,但是台阶法施工引起的横向位移整体幅度较大。

5 结 语

(1)在利用矿山法进行西安地铁隧道开挖时,隧道围岩周边位移变化一般经过 3 个阶段:第 1 阶段为急剧变形期,第 2 阶段为缓和变形期,第 3 阶段为基本稳定期。通过数值模拟可以看出,在不同的施工阶段,围岩变形呈现不同的变化特点。但是不同的施工方法各阶段持续时间不同:CRD 法下拱顶沉降的急剧变形期持续时间比台阶法减少 30%,并且前者提前 26.1%进入基本稳定期;CRD 法下水平收敛的急剧变形期持续时间比台阶法减少 38.5%,并且前者提前 21.4%进入基本稳定期。

(2)与台阶法相比,CRD 法施工引起的拱顶沉降总量减小了 26%,平均沉降速率与最大沉降速率分别减少了 15.6%和 32.7%;水平收敛量减小 39%,平均水平收敛速率与最大水平收敛速率分别减少了 11.9%和 19.8%。这说明在西安地区利用 CRD 法进行隧道开挖能够明显减小施工对围岩的扰动程度,有效地控制拱顶沉降及水平收敛量。

(3)当应用台阶法进行隧道开挖时,隧道围岩呈现不均匀变形,其中竖向变形主要集中在拱顶及拱底位置,横向变形主要集中在拱腰位置。利用 CRD 法进行施工时,拱顶及拱底较大范围内发生竖向位移,右侧拱壁发生较大横向位移,围岩位移相对较分散。这就要求在施工过程中,根据不同施工方法产生的围岩变形特点,有重点地进行围岩支护工作,以充分保证围岩稳定性。另外,同 CRD 法相比,应用台阶法进行施工时引起明显的底部隆起现象,在施工过程中应采取减小仰拱间距等措施,保证底部围岩稳定性。

(4)在西安地铁隧道施工中,CRD 法比台阶法能够更有效地控制围岩变形,保持围岩的自持能力及稳定性,该优势在软弱地层中表现比较明显。但是台阶法施工方法相对简单,造价低,施工速度快,在选择施工方法时,应该综合考虑地质条件、工程要求、施工条件等因素,选择适合工程特点的施工方法进行施工。

参考文献:

References:

- [1] 向晓辉,王 俐,李春光.复杂地质条件下水底矿山法隧道的围岩位移分析[J].铁道工程学报,2011(2):

- 103-108.
- XIANG Xiao-hui, WANG Li, LI Chun-guang. Analysis of Surrounding Rock Displacement of Subaqueous Tunnel with Complex Geological Condition[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(2): 103-108.
- [2] 张 弥, 刘维宁, 秦淞君. 铁路隧道工程的现状和发展[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 1-7.
- ZHANG Mi, LIU Wei-ning, QIN Song-jun. Railway Tunnelling Today and Its Development [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(2): 1-7.
- [3] 王梦恕. 二十一世纪山岭隧道修建的趋势[R]. 洛阳: 中铁隧道集团有限公司, 2004.
- WANG Meng-shu. Development Tendency of Mountain Tunnelling in the 21st Century [R]. Luoyang: China Railway Tunnel Group Co., Ltd, 2004.
- [4] 于增义. 岩体隧道台阶法施工过程模拟分析研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- YU Zeng-yi. Analysed Study of Process Simulation for Step Excavation Method Construction in Sdjaent Tunnel [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011.
- [5] 王建宇. 隧道工程的技术进步[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(4): 30-36.
- WANG Jian-yu. Progress of Tunneling Technology in China[J]. China Railway Science, 1999, 20(4): 30-36.
- [6] 徐林生. 财神梁隧道台阶法开挖施工数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 548-551.
- XU Lin-sheng. Numerical Simulation Study on Step Excavation Construction of Caishenliang Tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(4): 548-551.
- [7] 肖 翔. 吊沟岭隧道软岩施工方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- XIAO Xiang. Study on Construction Method in Soft Rock of Diaogouling Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [8] 扈世民, 张顶立, 郭 婷, 等. 大断面黄土隧道变形特征分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 117-122.
- HU Shi-min, ZHANG Ding-li, GUO Ting, et al. Analysis on Deformation Characteristics of Large-section Loess Tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(8): 117-122.
- [9] KUMAR P. Infinite Elements for Numerical Analysis of Underground Excavations[J]. Tunnelling and Underground Technology, 2000, 15(1): 117-124.
- [10] 崔小鹏, 孙韶峰, 王广宏, 等. CRD工法及三台阶七步开挖工法的对比和改进[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 131-133, 178.
- CUI Xiao-peng, SUN Shao-feng, WANG Guang-hong, et al. Comparison and Contrast Between CRD Excavation Method and 3-bench 7-step Excavation Method and Their Optimization[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(2): 131-133, 178.
- [11] 刘 波, 曹 波, 刘 芳, 等. 北京地铁暗挖隧道变形监测与稳定性数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 518-525, 540.
- LIU Bo, CAO Bo, LIU Fang, et al. Deformation Monitoring and Numerical Analysis of Stability for Metro Construction with Mining Method in Beijing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 518-525, 540.
- [12] 何 伟, 吴顺川, 孟 霞. 隧道开挖速度与施工优化[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(增1): 115-119.
- HE Wei, WU Shun-chuan, MENG Xia. Optimization of Excavation Speed and Construction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(S1): 115-119.
- [13] PAN Y W, DONG J J. Time-dependent Tunnel Convergence—II. Advance Rate and Tunnel-support Interaction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(6): 477-488.
- [14] 陆 震. 地铁隧道变形监测技术[J]. 施工技术, 2009, 38(增1): 105-106.
- LU Zhen. Detection Technology for Subway Tunnel Deformation[J]. Construction Technology, 2009, 38(S1): 105-106.
- [15] 张云军, 宰金珉, 王旭东. 隧道开挖对周围土体的影响分析[J]. 建筑结构, 2006, 36(增1): 40-42.
- ZHANG Yun-jun, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong. Research on Influence of Soil Due to Tunnel Excavation [J]. Building Structure, 2006, 36(S1): 40-42.

