

## 大断面黄土地铁隧道不同浅埋暗挖施工方法比较分析\*

任建喜 陈 旭 曹西太郎

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安//第一作者, 教授)

**摘 要** 为了确定大断面黄土暗挖地铁隧道的合理施工方法,以西安地铁5号线某区间工程为背景,通过FLAC3D软件对地铁区间隧道采用中隔壁(CD)法、交叉中隔壁(CRD)法及双侧壁导坑法等不同开挖方式下的施工过程进行模拟计算,以期得到合理的施工方法。根据模拟结果及实测内容得出:在地表沉降、拱顶沉降及塑性区分布等方面,双侧壁导坑法较好,CRD法次之,CD法最差。综合考虑安全、经济等因素,确定CRD法为大断面地铁区间隧道的合理施工方法。

**关键词** 黄土地区;隧道;施工工法;地表变形;数值模拟  
**中图分类号** U455.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.028

## Comparative Analysis of Different Shallow Buried Excavation Methods for Large Section Loess Subway Tunnel

REN Jianxi, CHEN Xu, CAO Xitailang

**Abstract** In order to determine the reasonable excavation method of subway tunnel with large section of loess, an interval project on Xi'an metro Line 5 is taken as the background, FLAC3D software is used to simulate and calculate the metro tunnel construction process under different excavation methods, including the center diaphragm (CD) method, cross diaphragm (CRD) method and double wall pilot tunnel method. According to the numerical simulation results and the measured data, the performance of double wall pilot tunnel method in surface subsidence control, arch settlement control and plastic zone distribution is the best, the CRD method is better and the CD method is the worst. Considering the factors such as safety and economy, the CRD method is regarded as a reasonable one in the construction of large section subway tunnel.

**Key words** loess area; tunnel; construction method; surface deformation; numerical simulation

**Author's address** College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China

西安黄土地区由于地裂缝的存在,在地铁区间隧道穿越地裂缝段通常会采用浅埋暗挖法<sup>[1]</sup>。目前,暗挖法地铁隧道施工方法主要包括台阶法、中隔壁法(CD法)、交叉中隔壁法(CRD法)、双侧壁导坑法等。地铁区间施工方法的选取需结合工程及水文地质条件、周围环境、区间埋深及区间断面综合考虑,不同的施工方法引起的地表及围岩变形不同<sup>[2]</sup>。国内对于区间隧道各施工方法研究较多。文献[3]等通过理论分析及现场试验对比研究了不同施工方法在大断面黄土隧道中的适用性。文献[4]等应用数值模拟及现场监测数据的对比分析了台阶法和全断面法施工对地铁隧道围岩变形的影响。文献[5]通过现场试验测量研究了支护结构的受力规律及不同的开挖工序对围岩变形特点的影响。

目前,对于各施工方法在黄土地区大断面隧道的适用性研究很多<sup>[6-7]</sup>,但对于各施工方法在大断面黄土地铁隧道中的对比研究较少。本文以西安地铁某暗挖区间工程为背景,采用FLAC3D软件分析了大断面黄土地铁隧道在CD法、CRD法、双侧壁导坑法等不同开挖方法下的地表及围岩变形特性,为合理施工方法的确定提供理论支撑。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

西安地铁5号线某区间右线长1 188.60 m。区间斜交穿越F10地裂缝,采用浅埋暗挖法进行施工。隧道拱顶埋深16.90~26.00 m。暗挖断面最大跨度为9.00 m,最大高度为9.22 m,最大开挖断面面积达66.73 m<sup>2</sup>。该区间为大断面暗挖区间,具体的隧道断面图见图1。

### 1.2 工程及水文地质条件

该区间穿越的地层较为复杂,以上至下依次为

\* 陕西省科技厅基金项目(2019SF-264)

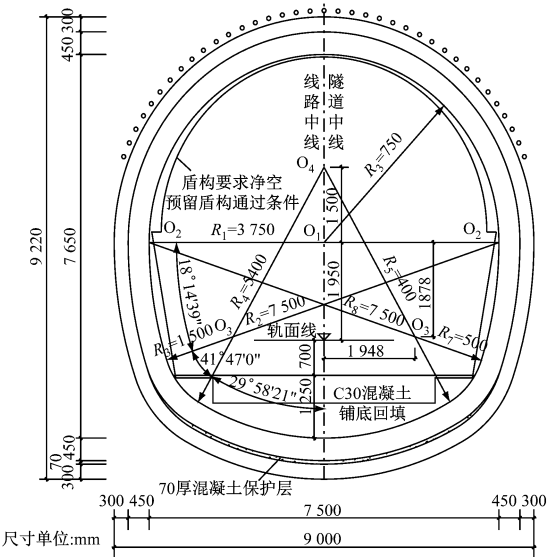


图 1 区间隧道断面图

杂填土、素填土、新黄土、古土壤、老黄土(地下水位之上)以及古土壤(地下水位之上)。工程场地内地下潜水稳定水位埋深为 18.8 ~ 36.7 m 之间,主要含水层为中更新统黄土和古土壤。区间地裂缝暗挖段结构底板位于地下水位附近,故区间施工可能会受到地下水的影响。

1.3 隧道支护方案

隧道支护结构采用复合式衬砌。按照设计要求,沿拱部 150°范围内布设直径为 42 mm、长为 3.0 m、环向间距 0.3 m、纵向间距 0.5 m 的超前注浆小导管。初期支护采用由  $\phi$  22 mm 钢筋焊接而成的纵向间距 0.75 m 的支护格栅钢架;土体与格栅钢架间架设  $\phi$  8 mm@150 mm×150 mm 的双层钢筋网;采用 I20 工字钢为临时支撑;在钢拱架及临时支撑架设置完成后,及时喷射厚度为 300 mm 的 C25 早强混凝土。

2 地铁区间隧道施工动态数值模拟

2.1 拟采用的施工方法

为研究大断面黄土地铁区间在不同施工方法下的地表及围岩变形规律,模拟仿真计算采用 CD 法、CRD 法及双侧壁导坑法等三种不同的开挖方式。

2.2 计算模型及参数

为了减少边界条件对模拟计算结果的影响,考虑监测点的布置,隧道模型左右两边宽度均取 48 m,沿隧道开挖进尺方向取 30 m,距地表以下选取 36 m。通过对左右边界横向位移及底面边界纵

向位移的控制,减少边界条件对于模型计算结果的影响。模型上表面为自由面。具体计算模型如图 2 所示。

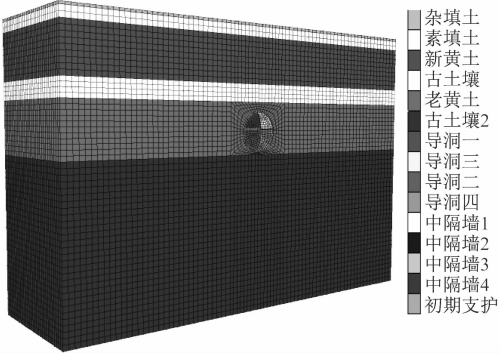


图 2 计算模型

土体采用摩尔-库伦模型,土体及临时支撑采用实体单元模拟,初期支护采用壳单元模拟。二次衬砌作为长期的安全储备,在计算建模时不予考虑<sup>[8]</sup>。具体计算参数见表 1。

表 1 围岩物理力学指标

| 材料类型   | 弹性模量<br>/MPa       | 泊松比  | 重度/<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 黏聚力/<br>(kPa) | 摩擦角<br>/(°) |
|--------|--------------------|------|-----------------------------|---------------|-------------|
| 杂填土 Q4 | 30.0               | 0.41 | 16.0                        | 10            | 15.0        |
| 素填土 Q4 | 32.5               | 0.35 | 16.0                        | 16            | 15.0        |
| 新黄土 Q3 | 40.5               | 0.30 | 16.7                        | 21            | 23.5        |
| 古土壤 Q3 | 40.5               | 0.30 | 18.1                        | 32            | 23.5        |
| 老黄土 Q2 | 48.5               | 0.30 | 17.5                        | 33            | 23.0        |
| 古土壤 Q2 | 58.0               | 0.30 | 17.5                        | 35            | 23.0        |
| 初期支护   | $2.50 \times 10^4$ | 0.17 | 25.0                        |               |             |
| 临时钢支撑  | $5.25 \times 10^3$ | 0.31 | 78.5                        |               |             |

2.3 计算模型的监测点布置

采用 CD 法及 CRD 法进行模拟计算时,洞内监测点及地表监测点布置相同,分别在距离洞口 10 m、15 m 及 20 m 处布置横向的地表监测点及洞内监测点。地表的纵向监测点布置于隧道中线上方地表处。具体监测点布置如图 3 所示。

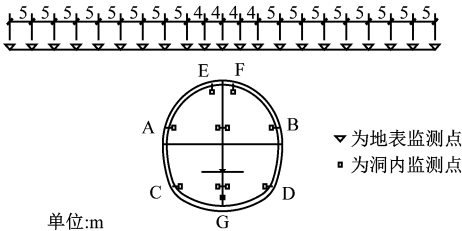


图 3 CD 法及 CRD 法施工时的监测点布置示意图

采用双侧壁导坑法进行模拟计算时,地表监测

点布置与前两种方法相同,洞内监测点分别布置于左、右导洞上方。

### 3 模拟结果及分析

为了降低模型三维边界条件对计算结果的影响,因此选取 15 m 处的断面进行对比分析。

#### 3.1 地表沉降分析

图 4 为三种开挖方法下的地表沉降曲线。由图 4 可以看出,利用 CD 法开挖时地表沉降发展更加迅速,采用 CRD 法施工时地表沉降减少 23.3%,采用双侧壁导坑法施工时地表沉降更减少了 16.6%,说明相对 CRD 法施工,采用双侧壁导坑法对于地表变形控制更加合理可靠。

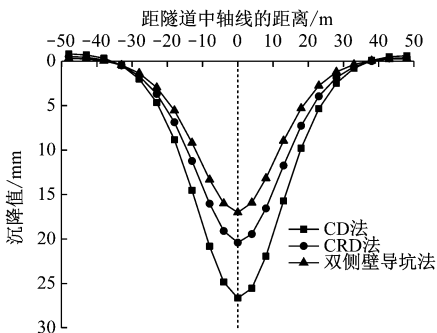


图 4 地表横向沉降曲线对比图

由图 5 可见,三种不同开挖方法下的地表纵向沉降变形趋势基本相同。就地表沉降变形而言,CD 法最大,CRD 法次之,双侧壁导坑法最小。随着开挖进展,最终地表沉降均趋于稳定。地表变形影响范围均为  $2D$  左右 ( $D$  为隧道直径),说明对于降低地表沉降变形,双侧壁导坑法最佳,CRD 法次之,CD 法表现较差。

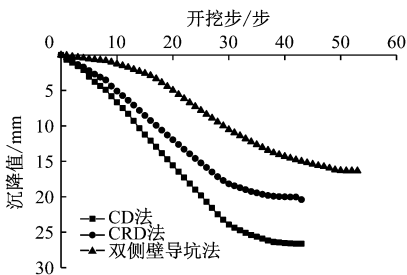


图 5 地表纵向沉降曲线对比图

#### 3.2 围岩变形对比分析

为了比较不同施工方法的可靠性,选取中间断面的拱顶沉降进行分析。三种施工方法下的拱顶监测点(E 点及 F 点)沉降曲线如图 6 所示。

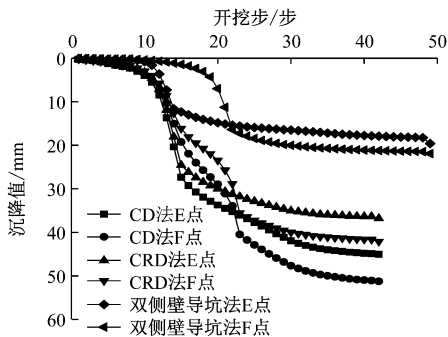


图 6 不同施工方法下的拱顶监测点沉降

由图 6 可见:不同施工方法下的拱顶沉降变形规律基本相同;采用 CD 法进行开挖时,拱顶沉降变形最大;相比于 CD 法施工,采用 CRD 法开挖时拱顶最大沉降变形减少了近 17.86%;采用双侧壁导坑法时,最大的拱顶沉降发生在拱顶中部,沉降最大值为 48.24 mm。相比而言,采用 CRD 法能更有效地控制周围土体的变形发展。

#### 3.3 围岩塑性区对比分析

从图 7 可以看出,不同的开挖方法下,在区间拱肩、拱脚及拱底部的塑性区范围均较大。利用 CRD 法开挖时,拱肩的塑性区范围为 3 m,拱脚处应力集中,塑性区范围为 8 m 左右。利用双侧壁导坑法进行施工时,只有拱脚部位产生较大的塑性变形,塑性区最大范围为 6 m。采用 CD 法开挖时,拱肩的塑性区发展明显,且塑性区已经发展到地面,拱脚处塑性区范围为 10 m。

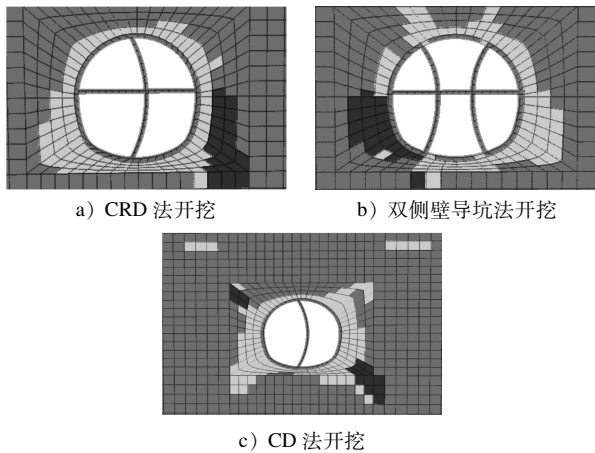


图 7 塑性区范围

相比于 CD 法开挖,采用 CRD 法或双侧壁导坑法时,其分部开挖施作的临时仰拱使得各工作面成环迅速,使土体产生的卸荷作用减少,及时发挥支护结构作用,使周围土体内的塑性区分布范围明显缩小。

## 4 现场实测数据分析

### 4.1 实测数据分析

为了得到 CRD 法施工时的地表变形规律,选取较为典型的 K41+033 断面进行分析。通过现场的实际监测数据绘制得出该断面的地表沉降变形如图 8 所示。

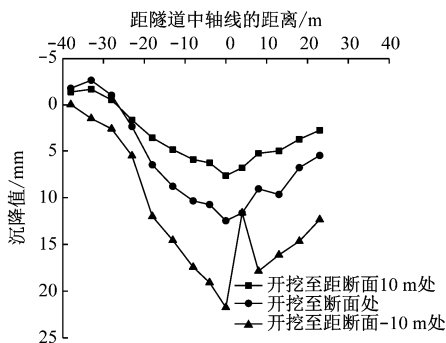


图 8 K41+033 监测断面地表沉降曲线

如图 8 所示:在未开挖至监测断面处时,监测断面地表已发生较为明显的沉降变形,沉降值为 7.23 mm,占最终沉降量的 30% 左右;当开挖至监测断面处时,地表迅速产生大的变形,最大沉降值为 12.47 mm,占最终沉降量的 57.38%;最终地表沉降值为 21.74 mm,模拟计算所得结果与实测结果相近。

### 4.2 模拟与实测值对比分析

由于计算模型土层依据 K41+033 ~ K41+063 间土层进行简化,因而选取两端监测断面的实测值与模型计算值作对比。具体地表沉降对比曲线如图 9 所示。

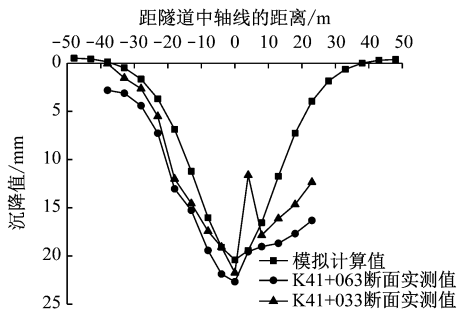


图 9 地表沉降曲线对比图

图 9 中,监测断面 K41+033 单线开挖时最终沉降为 21.74 mm,数值计算模拟沉降值为 20.40 mm,差值为 1.34 mm,相差 6.5%。这说明数值计

算方法及结果可靠。数值计算值均小于实测值,主要原因是采用的计算模拟方法未能考虑土体的蠕变特性,故与现场测试结果有一定误差。

## 5 结论

黄土地区修建大断面区间隧道时会对地层稳定性产生较为明显的影响,利用 FLAC3D 软件对西安地铁某区间隧道进行三种不同施工方法下的数值模拟计算,并结合现场实际监测情况得到以下结论:

1) 根据数值模拟结果可知,采用 CD 法进行施工时,由于其开挖断面大,造成的围岩变形及地表沉降均是最大,而采用双侧壁导坑法和 CRD 法均可以较好地控制土体变形以及塑性区发展,故两种方法均为可行方法。但由于双侧壁导坑法施工步骤繁复,施工进度慢等原因,CRD 法在黄土地区大断面施工中是较为合理的施工方法。

2) 根据实测结果可得:采用 CRD 法施工时,最大的地表沉降变形为 22.68 mm,小于地表监测控制值 30 mm;隧道开挖过后拱顶最大沉降变形为 8.49 mm,满足施工要求。实测结果说明 CRD 法安全合理。

## 参考文献

- [1] 梁永恒,邵生俊,王桃桃. 西安地裂缝活动现状及地铁隧道建设应对措施[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 399.
- [2] 谷拴成,黄荣宾. CRD 法和台阶法施工对地铁隧道围岩变形的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 111.
- [3] 杨建民. 大断面黄土隧道施工方法分析[J]. 铁道工程学报, 2015(10): 86.
- [4] 舒东利,晁峰,王明年,等. 合肥地铁单线膨胀土浅埋暗挖隧道施工工法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017(增刊 2): 726.
- [5] 孟德鑫,谭忠盛. 大断面黄土隧道变形控制技术及其支护受力特征[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 1): 383.
- [6] 凌云鹏,夏志国,陈礼明. 浅埋大跨隧道合理施工方法研究[J]. 铁道勘察, 2015(5): 47.
- [7] 任建喜,王永涛,张扬洋,等. 大断面黄土地铁隧道 CRD 法施工诱发的地表沉降规律[J]. 城市轨道交通研究, 2015(10): 21.
- [8] 贾晓旭,赵玉成. 软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析[J]. 铁道标准设计, 2016(7): 121.

(收稿日期:2018-03-23)