

# 浅埋暗挖地铁隧道施工地表沉降规律分析

李金奎,王飞飞,白会人

(大连大学建筑工程学院,辽宁 大连 116622)

**摘 要:**为了研究大连地铁 202 标段促进路站—春光街站暗挖区间人工素填土地段单双线隧道施工地表沉降规律,通过现场实测和数据分析整理的方法,在地铁隧道开挖期间建立了地表沉降监控量测站,运用精密水准仪进行 3 个月的监测,监测结果表明浅埋暗挖隧道在开挖期间地表沉降最大位置处于隧道中心线的正上方,沉降量约为 25.66~31.82 mm,提出了距跨比  $\beta$  的概念,距跨比  $\beta$  的有效工程取值范围  $-4 < \beta < 4$ ,地表沉降与距跨比  $\beta$  密切相关,其中  $-2 < \beta < 2$  地表沉降剧烈阶段,约占整体变形的 67.5~77.6%,沉降速率约达 0.84~0.93 mm/d,建议应加强监测频率,增加现场巡视,现场测试结果与文克尔地表沉降计算模型相吻合,监测成果对大连地铁及类似的浅埋暗挖隧道建设有借鉴作用。

**关键词:**地铁隧道;人工素填土;地表沉降;文克尔沉降模型

**中图分类号:**U45

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2012.10.014

## 0 引 言

随着社会经济的迅速发展和城市化步伐的加快,我国的地铁建设进入高速发展时期。在地铁隧道施工过程中不可避免地扰动隧道周围的地层,产生地表沉降,严重时将影响到周边建筑物和地下管线的安全<sup>[1-3]</sup>。国内外学者展开了许多地铁隧道施工引起地表沉降变形方面的研究<sup>[4-5]</sup>,对指导工程建设具有重要的理论与实际意义。由于大连地铁 202 标段促进路区间是在人工素填土层中的地铁隧道施工,地层含水量大,地层软弱,地下管线密布,因此,对人工素填土地层中隧道施工引起的地表沉降规律进行总结研究,有着非常重要的理论和现实意义。

## 1 工程背景

大连地铁 202 标段促进路站至春光街站区间设计范围为里程 DK11+365.945~DK12+013.350,区间地貌为剥蚀低丘陵、冲洪积沟谷,地形起伏较大,整体上看中央高,两侧低,地面高程 7.69~22.78 m。沿线穿越街道、工厂、居民住宅区,建筑物密集,管线、管道众多。本文以暗挖区间为主要研究对象,右线先于左线开挖。左、右线隧道长分别为 732.127 m 和 734.273 m。隧道主体横断面为单拱圆形断面,断面尺寸为 6.3×6.5 m。隧

道范围内上覆第四系人工堆积层(人工堆积素填土、杂填土层),第四系全新统冲洪积层(卵石层),第四系上更新统坡洪积层(粉质粘土),下伏震旦系五行山群长岭子组强(全风化岩、强风化岩、中风化岩)。隧道断面范围上方自上而下分别为:素填土(0.50~11.00 m)和杂填土层(1.40~8.50 m),卵石层(0.70~13.30 m),粉质粘土(1.10~11.00 m),全风化岩(2.20~29.60 m)。采用新奥法台阶法施工,上、中、下三个台阶依次进行施工,每次进尺 1 m。暗挖结构超前支护采用超前小导管注浆对地层进行预注浆加固。施工后,及时进行隧道初期支护,支护方式采用立钢拱架和挂钢筋网喷混凝土方法,初期支护贯通后即采用二次衬砌。

## 2 地表沉降监测方案

在隧道地表上方每隔 30 m 布置一个观测断面,每个断面布置 12 个点,沿着隧道轴线垂直方向地表均匀布置,间距为 1.5 m,采用莱卡 DNA03 电子水准仪按照二级水准要求进行地表沉降观测,自从 2011 年 11 月 1 日到 2012 年 1 月 31 日,共计 90 天的观测,为了便于分析,选取 DB03、DB04、DB05 个断面数据进行分析。

## 3 监测结果分析

### 3.1 右线隧道开挖沿着隧道方向地表沉降分析

为了便于分析总结规律,以监测断面为基准,

收稿日期:2012-9-18

基金项目:国家自然科学基金项目(50404007)

作者简介:李金奎(1972-),男,黑龙江安达人,教授,博士,研究方向:地下工程。

当掌子面通过监测断面后,掌子面与监测断面的距离为正值;当掌子面未通过监测断面时,掌子面与监测断面的距离为负值. 设掌子面与监测断面间的距离为  $L$ ,隧道拱径为  $D$ ,即为拱跨,定义  $L/D$  比值为距跨比  $\beta$ ,即

$$\beta = L/D \quad (1)$$

断面间距为 30 m,隧道拱跨距离为 6.3 m,得出距跨比  $\beta$  的取值范围为  $-4.8 < \beta < 4.8$ .

2011 年 11 月 1 日建立测站 DB03、DB04、DB05,随着隧道开挖掌子面逐渐逼近、达到、通过监测断面,地表沉降逐渐发展直至稳定;此后左线开挖,历时 90 天于 2012 年 1 月 31 日通过 DB05 监测站监测的地表最终稳定. 其曲线如图 1 所示,当  $-4 < \beta < -2$  时,各观测断面各监测点出现明显沉降,DB03 最大沉降点位于右线隧道中心线正上方测点 DB0304,量为 4.67 mm,约占总沉降量的 16.6%,DB04 最大沉降点位于右线隧道中心线正上方测点 DB0404,量为 3.43 mm,约占总沉降量的 10.8%,DB05 最大沉降点位于右线隧道中心线正上方测点 DB0504,量为 4.04 mm,约占总沉降量的 15.7%;当  $-2 < \beta < 2$  时,各观测断面各监测点出现急剧沉降,DB03 最大沉降点位于右线隧道中心线正上方测点 DB0304,量为 19.36 mm,沉降速率可达 0.89 mm/d,约占总沉降量的 67.5%;DB04 最大沉降点位于右线隧道中心线正上方测点 DB0404,量为 24.24 mm,沉降速率可达 0.84 mm/d,约占总沉降量的 76.2%;DB05 最大沉降点位于右线隧道中心线正上方测点 DB0504,量为 19.92 mm,沉降速率可达 0.93 mm/d,约占总沉降量的 77.6%;当  $2 < \beta < 4$  时,各观测断面各监测点沉降变化速率开始减缓趋于稳定.

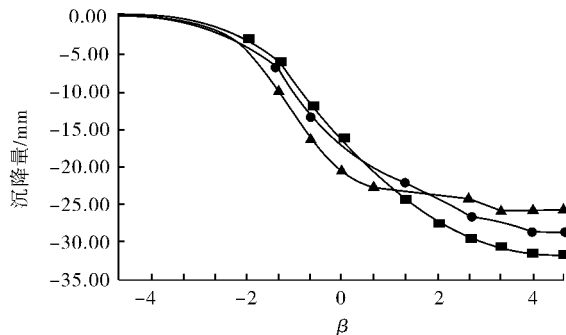


图 1 右线隧道断面地表沉降随掌子面推进变化

Fig. 1 Changes of the ground surface settlement above right tunnel vault with the excavation face

注: —●— DB03 —■— DB04 —▲— DB05

### 3.2 右线隧道开挖垂直于隧道方向地表沉降分析

大连地铁 202 标段促春暗挖区间在掌子面前方 50 m 布置监测断面,右线区间先开挖,左线滞后,根据右线隧道监测结果确定左线隧道开挖的时间. 在右线区间单独开挖期间选择 DB03、DB04 和 DB05 等 3 个监测断面进行地表沉降分析,沉降曲线分布如图 2 所示,3 个监测断面的最大沉降点在隧道中心线上方. 由图 2 可知,DB03、DB04 和 DB05 等右侧有建筑物群,故不能完全布置地表沉降点,该 3 个监测断面的地表沉降隧道中线基本呈半正态分布,变化趋势基本相同.

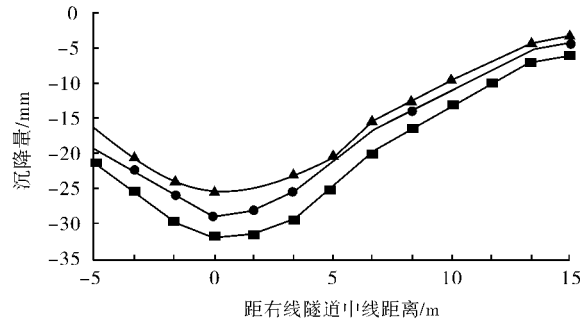


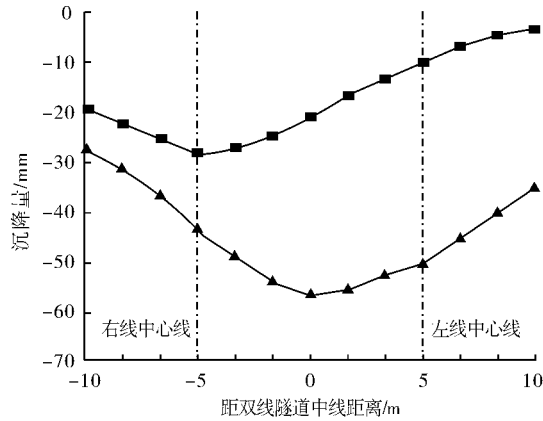
图 2 右线隧道各断面地表沉降分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of ground settlement at the different monitoring Sections of the right tunnel

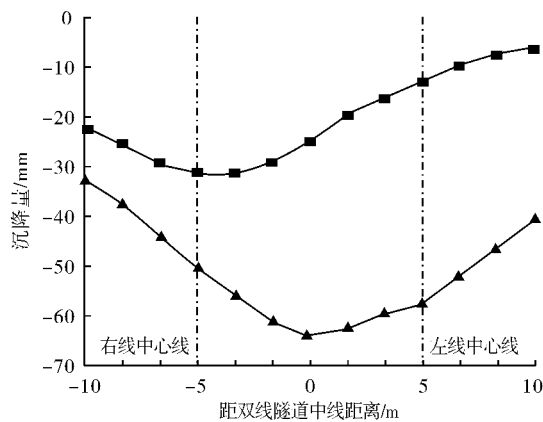
注: —●— DB03 —■— DB04 —▲— DB05

### 3.3 双线隧道开挖引起地表沉降的变形分析

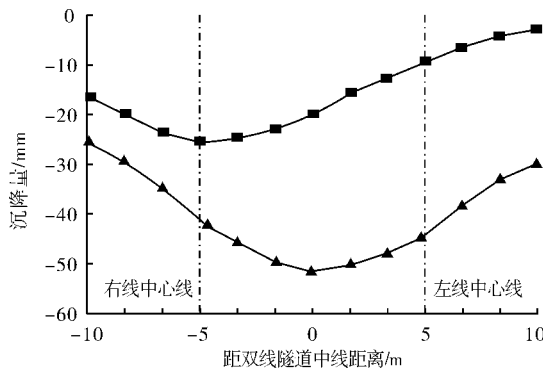
当右线隧道开挖引起地表沉降趋于稳定时,各断面最大沉降曲线见图 3 所示,DB03 断面右线隧道中心线正上方最大沉降量为 28.87 mm, DB04 断面右线隧道中心线正上方最大沉降量为 31.82 mm, DB05 断面右线隧道中心线正上方最大沉降量为 25.66 mm. 左线隧道开始开挖后对已经稳定的隧道围岩产生新的扰动,但其影响程度与距离有关,距离越近,影响约为剧烈. 当左线隧道掌子面通过各断面时最终沉降曲线如图 3 所示. DB03 断面双线隧道中心线正上方最大沉降量为 57.34 mm,约为右线隧道开挖最大沉降量的 1.99 倍;隧道 DB04 断面隧道中心线正上方最大沉降量为 64.86 mm,约为右线隧道开挖最大沉降量的 2.04 倍;DB05 断面隧道中心线正上方最大沉降量为 51.76 mm,约为右线隧道开挖最大沉降量的 2.02 倍. 由此可见,双线隧道开挖较单线隧道开挖引起的地表沉降不仅位置发生了改变,而且最大沉降量也发生较大的改变,约为单线隧道开挖的 1.99~2.04 倍.



(a) DB03断面测点沉降曲线



(b) DB04断面测点沉降曲线



(c) DB05断面测点沉降曲线

图 3 单线及双线开挖各断面测点沉降曲线

Fig. 3 Curves of settlement at different section points of Single line and double line tunnel excavation

注: —■— 右线隧道开挖; —▲— 总沉降值

#### 4 地表沉降验证

运用文克尔模型对右线区间隧道开挖地表沉降进行计算验证. 文克尔模型假设地基表面任意一点的压力  $p$  与该点的位移  $w$  成正比, 如式(2)所示.

$$p(x, y) = k \frac{p\lambda}{2\kappa b} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2)$$

分析式(2)可知, 当  $x = \frac{3\pi}{4\lambda}$  时或  $x \rightarrow \infty$  时,

$w(x) = 0$ , 即实际隧道开挖时地表的影响范围, 根据监测结果, 隧道开挖影响范围为 21 m, 当  $x = 0$  时,  $P(x, y)$  值最大, 即在隧道中心处上方, 根据实测结果为  $-31.82$  mm, 故可得出

$$k = \frac{p\lambda}{2\kappa b} = -31.82, \lambda = \frac{\pi}{28}$$

得出文克尔计算模型预测方程:

$$p(x, y) = -31.82 e^{-\frac{\pi x}{28}} (\cos \frac{\pi x}{28} + \sin \frac{\pi x}{28}) \quad (3)$$

由式(3)计算的文克尔模型沉降数据如表 1 所列. 由图 4 对比可知, 实测数据曲线和文克尔计算模型曲线和沉降趋势吻合, 文克尔计算数值较实际观测值偏小, 仅应用文克尔地表沉降预测模型能够得出地表沉降的趋势, 不能准确得出最大沉降量. 这是由于在实际工程中隧道上方的土层为人工素填土且有少量的建筑垃圾, 理论假设有了一定的差距; 同时在理论计算时没有考虑到流-固耦合条件下土-结构的变形是否符合线弹性性质. 由图 4 对比可知, 实测数据曲线和文克尔计算模型曲线和沉降趋势吻合, 文克尔计算数值较实际观测值偏小, 仅应用文克尔地表沉降预测模型能够得出地表沉降的趋势, 不能准确得出最大沉降量. 这是由于在实际工程中隧道上方的土层为人工素填土且有少量的建筑垃圾, 理论假设有了一定的差距; 同时在理论计算时没有考虑到流-固耦合条件下土-结构的变形不符合线弹性性质.

表 1 文克尔模型沉降数据与 04 断面实测数据

Table 1 Winkler model settlement data and 04 section measured data

计算与测量值	距隧道轴线的距离/m										
	-15.5	-11.5	-8	-4.5	-2	0	2	4.5	8	11.5	15.5
文克尔模型预测值/mm	-2.31	-7.41	-15.48	-22.67	-28.72	-31.82	-28.72	-22.67	-15.48	-7.41	-2.31
04 断面实际沉降值/mm	—	—	—	-25.41	-30.25	-31.82	-29.54	-24.43	-17.25	-12.35	-7.46

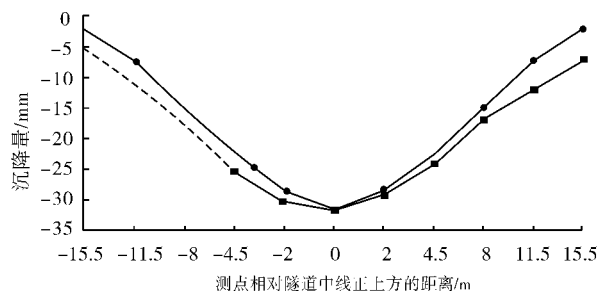


图 4 促春区间隧道地表沉降现场实测与文克尔模型计算曲线对比

Fig. 4 The field measured and winkler model calculation curve contrast

注: —●— 文克尔模型预测值/mm  
—■— 04 断面实际沉降值/mm

## 5 结 语

a. 大连地铁 202 标段促春暗挖区间地表沉降数据分析过程中引进距跨比  $\beta$ , 便于沿着隧道掘进方向地表沉降分析. 地表沉降最大位置处于隧道中心线的正上方, 沉降量约为 25.66~31.82 mm.

随着掌子面推进, 沿隧道纵向地表沉降分为 3 个阶段  $-4 < \beta < -2$  地表沉降加速阶段, 约占整体变形的 10.8%~16.6%;  $-2 < \beta < 2$  地表沉降剧烈阶段, 约占整体变形的 67.5%~77.6%, 沉降速率约达 0.84~0.93 mm/d;  $2 < \beta < 4$ , 地表沉降减速阶段, 沉降变化趋于稳定. 监测结果表明, 人工素填土地段地铁暗挖隧道施工在  $-2 < \beta < 2$  阶段, 应加强监测频率, 建议增加现场巡视.

b. 右线隧道开挖垂直于隧道中线地表沉降曲线基本呈半正态分布, 最大沉降点发生在右线隧道中心线正上方. 文克尔沉降模型的计算曲线与现场实际监测曲线趋势相同, 数值偏小, 主要是由于文克尔预测模型假设所致, 但也可作为人工素填土地段地铁暗挖隧道施工地表沉降的预测手段.

c. 左线隧道开挖造成了已经稳定的右线隧道围岩的二次扰动. 左线隧道的开挖不仅改变了地表最大沉降位置, 由右线隧道中心线正上方改变到双线隧道中线正上方, 而且最大沉降量也发生了改变, 双线隧道开挖最大沉降量约为单线隧道开挖的 1.99~2.04 倍.

## 参考文献:

- [1] 齐振明, 李鹏飞. 地铁区间浅埋暗挖隧道地表沉降的控制标准[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(3): 117-121.
- [2] 王立宏, 张电吉. 浅埋暗挖地铁隧道衬砌的力学行为分析[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(3): 154-156.
- [3] 肖文涛, 肖方芳, 房泽法, 等. 地铁隧道掘进爆破地表震动效应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(10): 113-117.
- [4] 何小龙, 何成乔, 乔春江, 等. 城市复杂地质与环境条件下小净距隧道设计[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(5): 41-45.
- [5] 杨更社, 吴成发, 李瑞强. 西安地铁 1 号线区间特殊地段施工风险评估[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(2): 159-164.

## Analysis of surface subsidence rule of shallow subway tunnel construction

LI Jin-kui, WANG Fei-fei, BAI Hui-ren

(School of Construction Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** To study the Dalian Metro section 202's (Cujin Road station-Chunguang Street station, which is shallowly buried and covered with plain fill) ground surface settlement, the monitoring measuring station was built during the construction. After 3 months' measuring by precision level, the data shows that the maximum point is in the center line of the tunnel of the upper part, the settlement is about 25.66—31.82 mm. we put forward the concept of the distance span ratio  $\beta$ ,  $\beta$  effective value range was  $-4 < \beta < 4$ , surface subsidence was closely related with  $\beta$ , severe surface subsidence stage was  $-2 < \beta < 2$ , which accounted for 67.5—77.6% of the whole deformation, and settlement rate was about 0.84—0.93 mm/d. So the monitoring frequency and site tour should be strengthened. The result of field test is consistent with that of the ground surface settlement calculation model. The monitoring results have reference for Dalian subway and the similar shallow depth excavation tunnel construction.

**Key words:** subway tunnel; artificial grain filling; surface subsidence; winkle subsidence model

本文编辑: 陈小平