

# 大断面矿山法隧道开挖对小净距盾构隧道的影响分析

刘春杰 郭玮卿 欧飞奇

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//第一作者, 工程师)

**摘要** 以厦门地铁1号线集美中心站站后停车线隧道工程为背景, 采用FLAC<sup>3D</sup>三维有限差分软件, 对此大断面矿山法隧道开挖对小净距盾构隧道的影响进行了三维数值分析。分析了CRD(交叉中隔墙)四步开挖法、CRD六步开挖法(靠近盾构隧道部分后开挖)及CRD六步开挖法(靠近盾构隧道部分先开挖)对盾构隧道的影响, 揭示了盾构隧道位移和管片弯矩的变化规律; 大断面矿山法隧道开挖时对先施工的小净距盾构隧道产生4~9 mm的位移值, 盾构管片产生80~170 kN·m的弯矩值。另外, CRD四步开挖对盾构隧道不利, 盾构隧道的位移和弯矩分别增大约33%和6%, 并且靠近盾构隧道的部分对盾构扰动更大, 因此, 推荐使用CRD六步开挖法(靠近盾构隧道部分后开挖)。最后对比分析了盾构隧道的现场监测位移值和数值模拟结果。

**关键词** 矿山法隧道; 盾构隧道; 小净距隧道; 开挖影响

**中图分类号** U456.3<sup>+</sup>1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.05.012

## Analysis of Large Section Mining Excavation Impact on Shield Tunnel with Small Interval

LIU Chunjie, GUO Weiqing, OU Feiqi

**Abstract** In the background of the tunnel project behind Jimei Center Station on Xiamen metro Line 1, a 3D numerical simulation of the impact of large section mining method excavation on shield tunnel with small interval is conducted by means of the finite element program FLAC<sup>3D</sup>. The impacts of the center cross diagram (CRD) four-step excavation method, the CRD six-step excavation method (later excavation near the shield tunnel) and the CRD six-step excavation (first excavation near the shield tunnel) on the shield tunnel are analyzed, the variation law of shield tunnel displacement and bending moment of the segment is revealed. The large-section tunnel excavation with mining method will generate 4~9 mm displacement relative to the previously constructed shield tunnel with small interval, and 80~170 kN·m bending moment to the segment of the shield tunnel. In addition, the four-step excavation is unfavorable to the shield tunnel, because the displacement and the bending mo-

ment of the shield tunnel will increase by 33% and 6% respectively, and the part near the shield tunnel will disturb the shield even greater. Therefore, the CRD six-step excavation of (later excavation near the shield tunnel) is recommended. Finally, the displacements obtained by the on-site monitoring and numerical simulation are compared and analyzed.

**Key words** mining method tunnel; shield tunnel; tunnel with small interval; numerical simulation

**Author's address** Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

厦门地铁1号线集美中心站站后停车线与正线左线一起采用单洞双线大断面矿山法施工(以下简称“矿山法隧道”), 正线右线隧道采用盾构法施工。受工程筹划的影响, 右线盾构法施工隧道(以下简称“盾构隧道”)先于矿山法隧道施工, 且最小净距仅为3.85 m。有必要分析矿山法隧道施工对小净距盾构隧道的影响。

目前, 国内外对类似小净距隧道工程的研究较多<sup>[1-10]</sup>。此外, 文献[11]采用FLAC<sup>3D</sup>软件进行了三维数值模拟, 分析了隧道施工对围岩地层的影响, 揭示了后建隧道对先建隧道结构应力和位移的影响规律; 文献[12]以黄土地区的地铁隧道为研究对象, 通过三维动态数值模拟和施工力学研究, 分析施工引起的地表变形、中间土体应力和围岩塑性区的特征和规律, 从而研究得出CRD(交叉中隔墙)法与盾构隧道先后施工相互影响的规律性成果; 文献[13]结合北京地铁10号线三元桥站—亮马河站区间隧道近接施工的实例, 利用三维有限差分方法进行模拟, 并对对比分析了现场监测数据和数值模拟结果; 文献[14]以北京地铁10号线二期某小净距区间工程为背景, 采用有限差分软件计算分析了不同净距下的小净距隧道施工的影响规律。但是对于具体实际工程, 由于工程地质条件、隧道施工工法、施工工序等工程条件的不同,

\* 广东省城市轨道交通工程建造新技术企业重点实验室资助项目(2017B030302009)

都具有工程本身的特殊性<sup>[15-18]</sup>。

本文采用 FLAC<sup>3D</sup> 三维有限差分软件,对厦门地铁 1 号线集美中心站站后停车线大断面矿山法隧道开挖对小净距盾构隧道的影响进行了三维数值分析,通过盾构隧道的位移和应力变化规律,分析不同工法和不同工序对盾构隧道的影响,并对比分析了现场监测数据和数值模拟结果,可为类似工程设计、施工和风险控制提供参考。

## 1 工程概况

厦门地铁 1 号线集美中心站位于厦门市集美区杏林湾路与和新路交叉口。矿山法隧道(停车线和正线左线)长 332 m,位于集美市民公园山体下方,其隧道拱顶基本位于残积硬塑状砂质黏性土和全风化花岗岩地层中。矿山法隧道与盾构隧道的平面关系如图 1 所示,地质纵断面图如图 2 所示。

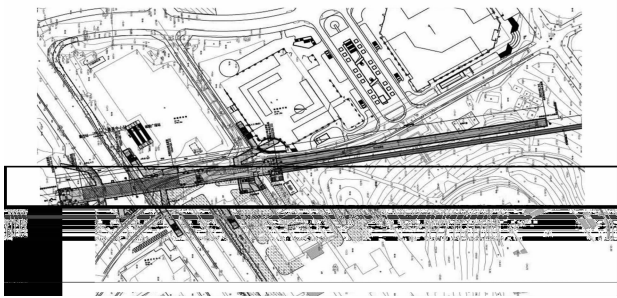


图 1 矿山法隧道与盾构隧道平面关系图

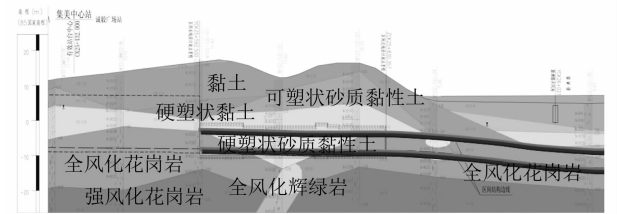


图 2 地质纵断面图

停车线与正线左线的线间距为 4.6 m,二者同位于矿山法隧道内。矿山开挖宽度为 11.530 m、高度为 9.385 m,其拱顶覆土厚为 14.8~23.4 m。矿山法隧道与盾构隧道平行设置,其最小净距为 3.85 m,二者剖面关系如图 3 所示。隧道支护参数设计如表 1 所示。

## 2 计算模型

### 2.1 计算模型及边界条件

采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件建立计算模型。模型长、宽、高分别取为 300 m、100 m、50 m。考虑了拱顶的小导管注浆加固等措施,土体采用摩尔-库伦

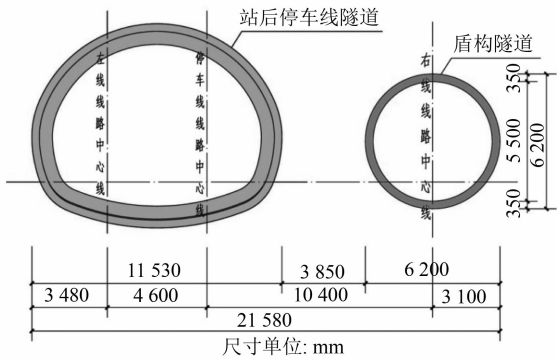


图 3 矿山法隧道与盾构隧道关系图

表 1 隧道支护参数设计

隧道	隧道宽度/mm	隧道高度/mm	初期支护或盾构管片厚度/mm	二次衬砌厚度/mm	支护措施
盾构法隧道	6 200	6 200	350		
矿山法隧道	11 530	9 385	350	600	大管棚+小导管

弹塑性本构模型进行模拟,隧道结构和盾构管片采用壳单元进行模拟。

边界条件:模型侧面和底面为位移边界,侧面采用法相约束,底面采用固定约束,顶面为自由边界。整体模型有限元网格划分如图 4 所示,隧道结构有限元网格划分如图 5 所示。

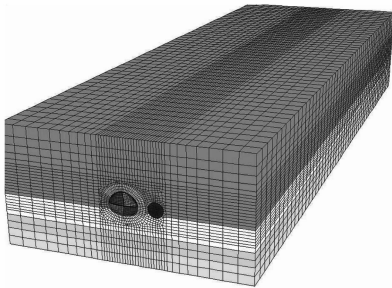


图 4 整体模型有限元网格

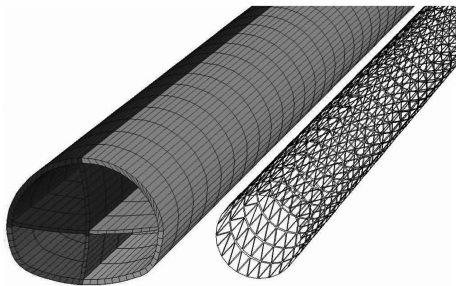


图 5 隧道结构有限元网格

### 2.2 材料物理力学参数的选取

模型范围内各地层的弹性模量  $E$ 、泊松比  $\lambda$ 、重力密度  $\rho_c$ 、黏聚力  $c$ 、摩擦角  $\phi$  等基本物理指标如表

2 所示。隧道结构材料的密度弹性模量  $E_c$ 、 $\lambda$  及  $\rho_c$  等参数见表 3 所示。

表 2 土层参数表					
土层名称	$E/\text{MPa}$	$\lambda$	$\rho_c/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\circ)$
素填土	5	0.3	17.9	20	15
砂质黏土	8	0.3	17.9	28	16
全风化花岗岩	16	0.3	18.5	32	25
强风化花岗岩	50	0.3	19.7	30	30
全风辉绿岩	21	0.3	18.0	30	17

表 3 隧道结构材料参数表				
材料	$\rho_c/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$E_c/\text{MPa}$	$\lambda$	部位
C25 喷射混凝土	25.0	25.0	0.2	初期支护
C40 模筑混凝土	25.0	32.5	0.2	二次衬砌
C50 预制混凝土	25.0	34.5	0.2	盾构法施工隧道

### 3 数值计算结果及分析

#### 3.1 计算工法和工序

结合地质条件和周边环境,本矿山法隧道考虑采用 CRD 四步开挖法或 CRD 六步开挖法。

为了全面分析不同开挖方法和不同开挖顺序下大断面隧道矿山法施工对盾构隧道的影 响,分别选取 CRD 四步开挖法(见图 6)、CRD 六步开挖法 1(靠近盾构隧道部分后开挖,见图 7)、CRD 六步开挖法 2(靠近盾构隧道部分先开挖,见图 8)进行研究。

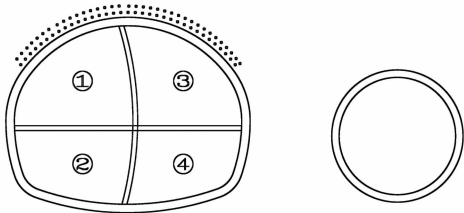


图 6 CRD 四步开挖法

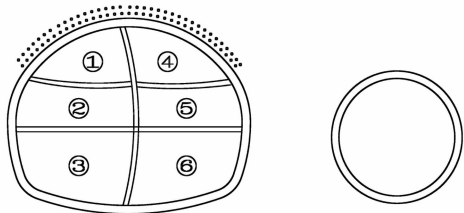


图 7 CRD 六步开挖法 1

根据实际施工工序,模拟工序为:第一步,盾构隧道施工;第二步,矿山法隧道的大管棚和小导管施工,注浆加固;第三步,大断面矿山法隧道按 1、2、

3、4、5、6 步序依次开挖,并施做初期支护;第四步,矿山法隧道的二次衬砌施工。

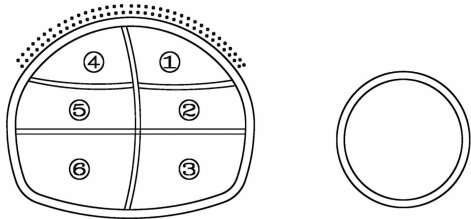


图 8 CRD 六步开挖法 2

#### 3.2 隧道结构变形分析

大断面矿山法隧道开挖过程中,隧道围岩初始应力状态发生改变,围岩松动而形成塑性区,产生塑性变形,由于盾构隧道距离矿山法隧道距离很近,塑性区的发展很快扩散,从而使盾构隧道产生位移和变形。

表 4 为 3 种开挖方法在施工长度  $L$  不同时的盾构隧道累计位移。从表 4 可以看出,大断面矿山法隧道开挖时对先施工的小净距盾构隧道影响较大,使盾构隧道产生 4~9 mm 的位移值。因此,开挖之前应对盾构隧道进行加固处理,保证矿山法隧道的施工安全和盾构隧道结构的安全。

工法	$L$ 不同时的盾构隧道结构位移/mm			
	$L=90\text{ m}$	$L=180\text{ m}$	$L=270\text{ m}$	$L=300\text{ m}$
CRD 四步开挖法	5.7	6.8	8.1	8.5
CRD 六步开挖法 1	4.3	5.1	6.1	6.4
CRD 六步开挖法 2	4.7	5.8	6.9	7.3

$L=180\text{ m}$  时,盾构隧道的位移云图分别如图 9~11 所示。由图 9~11 可见:CRD 六步开挖法 1 的盾构隧道最大位移最小,为 5.1 mm; CRD 四步开挖法的盾构隧道最大位移最大,为 6.8 mm;CRD 六步开挖法 2 的盾构隧道最大位移为 5.8 mm。仿真结果表明,CRD 六步开挖法 1 对小净距盾构隧道影响最小。

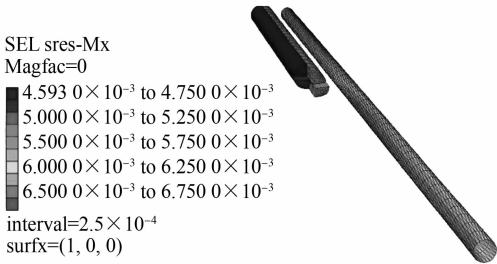


图 9 CRD 四步开挖法  $L=180\text{ m}$  时的管片位移云图

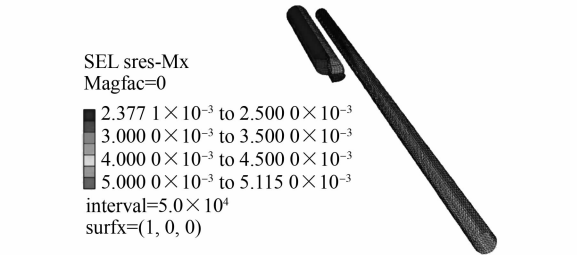


图 10 L=180 m 时 CRD 六步开挖法 1 的管片位移云图

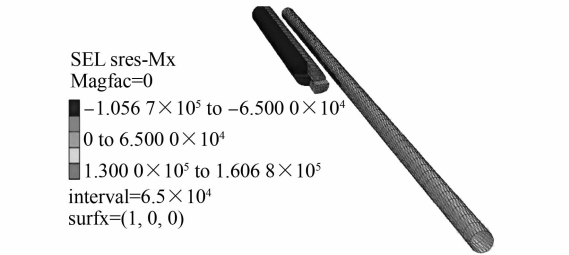


图 12 L=180 m 时 CRD 四步开挖法的管片弯矩云图

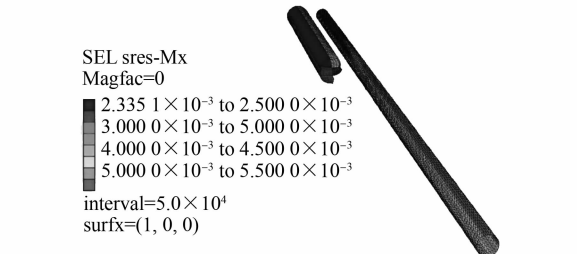


图 11 L=180 m 时 CRD 六步开挖法 2 的管片位移云图

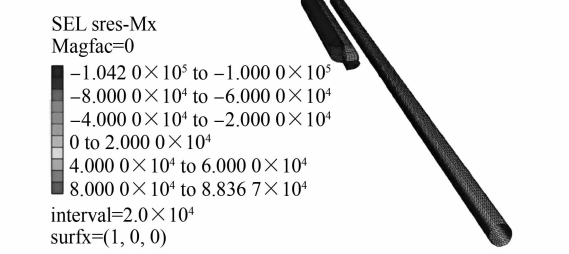


图 13 L=180 m 时 CRD 六步开挖法 1 的管片弯矩云图

### 3.3 隧道结构应力分析

大断面矿山法隧道开挖过程中,围岩初始应力状态发生改变。其应力重分布对已经完成的盾构隧道形成了扰动,使盾构管片的受力状态发生改变。表 5 为 3 种开挖方法在  $L$  不同时的盾构管片弯矩。从表 5 可以看出,盾构管片弯矩均随着开挖进度不断增长;矿山法隧道开挖时对先施工的小净距盾构隧道影响较大,使盾构管片产生 80~170 kN·m 的弯矩值。因此,开挖之前应对盾构隧道进行加固处理。

工法	$L$ 不同时的盾构管片弯矩值/(kN·m)			
	$L=90\text{ m}$	$L=180\text{ m}$	$L=270\text{ m}$	$L=300\text{ m}$
CRD 四步开挖法	83.5	110.7	153.5	160.2
CRD 六步开挖法 1	80.4	104.2	148.9	157.7
CRD 六步开挖法 2	85.3	111.1	161.1	165.0

$L=180\text{ m}$  时的盾构管片弯矩云图如图 12~14 所示。由图 12~14 可见:CRD 六步开挖法 1 的盾构管片最大弯矩最小,仅为 104.20 kN·m; CRD 六步开挖法 2 的盾构管片弯矩最大,为 111.10 kN·m; CRD 四步开挖法的盾构管片弯矩为 110.68 kN·m。因此,从管片弯矩分布来看,CRD 六步开挖法 1 对小净距盾构隧道影响最小。

### 4 数值模拟结果与现场监测值的对比

在厦门地铁 1 号线集美中心站站后停车线大断面矿山法隧道施工过程中,采取了 CRD 六步开挖法

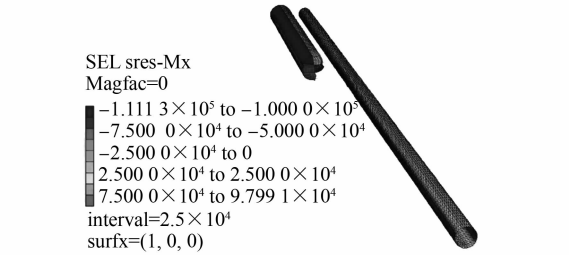


图 14 L=180 m 时 CRD 六步开挖法 2 的管片弯矩云图

1,并委托了第三方监测单位对右线盾构隧道结构位移值进行监测。

盾构隧道结构位移监测值和模拟值的对比如表 6 所示。通过对比分析可以看出:随着矿山法隧道开挖长度的增长,盾构隧道位移不断累积增大;虽然现场实测值大于模拟值,但该盾构隧道位移随  $L$  的变化趋势是基本一致的。

比较项	不同 $L$ 时的盾构隧道结构位移/mm			
	$L=90\text{ m}$	$L=180\text{ m}$	$L=270\text{ m}$	$L=300\text{ m}$
监测值	11.0	15.2	15.9	18.1
模拟值	4.3	5.1	6.1	6.4

### 5 结语

通过厦门地铁 1 号线集美中心站站后停车线大断面矿山法隧道开挖对小净距盾构隧道三维数值模拟计算分析,得到了大断面矿山法隧道开挖过程中小净距盾构隧道的位移和内力结果,对比分析了现场监测位移值和数值模拟结果,主要得到以下

结论:

1) 大断面矿山法隧道开挖对先施工的小净距盾构隧道影响较大,能使盾构隧道发生 4~9 mm 的位移值,使盾构管片产生的弯矩值为 80~170 kN·m。因此,开挖之前应对盾构隧道进行加固处理(如土体加固、洞内增加临时钢支撑等),以保证大断面矿山法隧道的施工安全和盾构隧道结构的安全。

2) 对比盾构隧道位移和管片弯矩的模拟结果发现,CRD 四步开挖法对盾构隧道明显更不利。因此,大断面矿山法隧道开挖时应减小分部开挖的断面,遵循“短开挖、强支护、快封闭”的原则。另外,采用 CRD 六步开挖法时,靠近盾构隧道的部分施工对盾构扰动更大,故推荐靠近盾构隧道一侧后开挖的 CRD 六步开挖法。

3) 当采用靠近盾构隧道一侧先开挖的 CRD 六步开挖法施工时,随着开挖长度的增长,盾构隧道位移逐渐累积增大。盾构隧道结构位移的监测值和模拟值随  $L$  的变化趋势是基本一致的。

## 参考文献

- [1] 蒋彪,肖岩,李凌宜.大跨度超小净距暗挖地铁隧道施工方法模拟优化分析[J].铁道科学与工程学报,2011,8(5): 46.
- [2] 杨会军,刘虹阳.浅埋暗挖小净距隧道应力集中现象分析[J].铁道工程学报,2010,27(1): 42.
- [3] 刘艳青,钟世航,卢汝绥,等.小净距并行隧道力学状态的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5): 590.
- [4] 包德勇.近距离交叠隧道施工影响的数值模拟[J].地下空间

与工程学报,2011,7(1): 127.

- [5] 祝志恒,阳军生,董辉.双洞隧道施工引起地表移动的多参数反分析研究[J].岩土力学,2010,31(1): 293.
- [6] 李文华.大断面超小横净距双线地铁隧道施工控制技术研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [7] 汪敏,廖少明,侯学渊.近距离重叠地铁隧道盾构法施工地面变形预测[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(9): 1141.
- [8] 毕继红,江志峰,常斌.近距离地铁施工的有限元数值模拟[J].岩土力学,2005,26(2): 277.
- [9] 龚建伍.扁平大断面小净距公路隧道施工力学研究[D].上海:同济大学,2008.
- [10] 刘艳青,钟世航,卢汝绥,等.小净距并行隧道力学状态的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5): 590.
- [11] 石祥锋,寇鼎涛.小净距矿山法盾构隧道施工的数值模拟分析[J].华北科技学院学报,2015,12(5): 64.
- [12] 孔祥兴,夏才初,仇玉良,等.平行小净距盾构与 CRD 法黄土地铁隧道施工力学研究[J].岩土力学,2011,32(2): 516.
- [13] 陶连金,孙斌,李晓霖.超近距离双孔并行盾构施工的相互影响分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9): 1856.
- [14] 赵明.小净距盾构隧道施工力学效应现场监测与数值模拟分析[D].北京:北京工业大学,2012.
- [15] 易小明,张顶立,陈铁林.厦门海底隧道地层变形监测与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11): 2302.
- [16] 于宁,朱合华.盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J].岩土力学,2004,25(8): 1330.
- [17] 张冬梅,黄宏伟.盾构推进引起地面沉降的粘弹性分析[J].岩土力学,2001,22(3): 311.
- [18] 王建.地铁盾构隧道结构设计的工况及设计参数研究[J].城市轨道交通研究,2013(8): 70.

(收稿日期:2018-12-11)

(上接第 48 页)

况,评价地面道路及建(构)筑物稳定性,为降水及后续施工提供参考;能够为类似工程提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 李芳,王紫蓼,霍守峰.地铁暗挖区间隧道下穿既有建筑物施工安全分析[J].智能城市,2016(10): 163.
- [2] 王立志.谈城市地铁区间隧道施工方法[J].山西建筑,2012,38(30): 197.
- [3] 秦锋.城市地铁区间隧道施工方法探讨[J].现代城市轨道交通,2017(5): 32.
- [4] 李超人,周传波,陈东,等.双线盾构施工引起地表及建筑物沉降规律研究[J].城市轨道交通研究,2017(6): 108.
- [5] 刘静,田晓艳.地铁浅埋暗挖施工对地表沉降及邻近桥基的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2017,38(3): 60.

- [6] 王亮,袁东.浅埋暗挖施工技术在砂性地层地铁隧道施工中的应用[J].四川水泥,2016(10): 37.
- [7] 徐霖,杨微,张华祥,等.暗挖隧道施工降水引起地层沉降的计算[J].市政技术,2014,32(1): 84.
- [8] 陆云涌,高博,马涛.地铁暗挖法施工中降水引起地面沉降问题的探讨[J].城市地质,2015(增刊2): 12.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部发布.湿陷性黄土地区建筑基坑工程安全技术规程[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 蔡欣.西安地铁施工基坑降水与地面沉降规律研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [11] 漆泰岳.地铁施工引起地层和建筑物沉降特征研究[J].岩土工程学报,2012,34(7): 1283.

(收稿日期:2018-06-28)