

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.002

砂土地区浅埋非对称近接平行隧道 施工地层位移分析

赵文¹, 陈阳¹, 李慎刚¹, 唐志扬², 柏谦¹, 张超哲¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东广州 510010)

摘要: 基于隧道开挖引起地表沉降经典 Peck 公式, 考虑砂土地区浅埋非对称近接平行隧道不同开挖步序, 研究隧道周围土体横向水平位移及工后地表沉降规律。根据沉降叠加原理, 建立考虑隧道内径均匀收敛非对称近接平行隧道修正 Peck 公式, 并进行影响因素讨论。结果表明: 土体横向水平位移集中在横通道转正洞及大直径断面拱脚处; 隧道施工后地表沉降主要发生在小断面区域; 地表横向沉降模拟值与计算值二者吻合较好, 随着隧道圆心距 L 的增大, 土体横向沉降量逐渐减小并由正态分布转变为马鞍形; 隧道埋深 H 越大, 沉降越大; 非对称隧道施工时先开挖小断面隧道优于先开挖大断面隧道。

关键词: 浅埋; 非对称; 平行隧道; 地层位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0012-06

Analysis of Ground Settlement of Parallel Shallow Buried Unsymmetrical Close-spaced Tunnels in Sand Layers

ZHAO Wen¹, CHEN Yang¹, LI Shengang¹, TANG Zhiyang², BAI Qian¹, ZHANG Chaozhe¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: Ground settlement and horizontal displacement were analyzed based on FEM software of different excavation sequences. The modified peck equation was established considering even shrinkage of inner diameter based on superposition principle and different factors. The results showed that displacement was mainly distributed in small cross-section of two tunnels, horizontal displacement was mainly at arch bottom between horizontal passage and main tunnel. The simulation results of ground settlement and calculation results fit well, the displacement became smaller and transformed from normal distribution to saddle-shape with the enlargement of L , the larger settlement, the deeper bury depth H . Tunnel with smaller cross-section should be constructed earlier than large cross-section tunnel.

Keywords: ultra-shallow; unsymmetrical; parallel tunnels; layer displacement

随着人类对城市地下空间的开发, 城市地铁越来越普遍。目前城市地铁大多采用平行双洞或多洞室进行排布, 越来越多的浅埋非对称近接平行隧道被用于地铁施工中。双孔近接平行隧道间距较小, 施工过程中相互影响较大, 使得其开挖对地表及周围岩土体的影响程度和范围比单孔隧道更为显著^[1-2]。隧道开挖地表沉降最典型的计算公式为 Peck^[3]公式, 该公式已经从现场实测和模型实验两

方面得到了验证, 并基于此公式提出了不同的地表沉降的预测公式。随着隧道形式及地层情况的变化, Peck 公式多次被修正以适应不同的地层及施工情况。Segaseta^[4]给出了盾构隧道开挖层状地层引起的地表沉降半弹性解析解。为计算双线盾构隧道施工引起的地层内部土体沉降, 魏纲^[5]建立了修正的二维 Peck 公式, 并探讨了 i_l 和 η_l 的取值方法。陈春来等^[6]利用现有单线盾构施工引起的三维土体

收稿日期: 2018-06-20

修稿日期: 2018-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578116)

作者简介: 赵文(1962—), 男, 内蒙古化德人, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程等方面的教学研究工作。E-mail: wenneu@163.com

通讯作者: 陈阳(1990—), 女, 陕西黄陵人, 博士研究生, 研究方向为地下工程。E-mail: chenyangyang.net@163.com

沉降计算方法,对魏纲二维深层土体沉降公式进行修正,从而拓展得到了双线平行隧道盾构施工引起的三维深层土体沉降计算公式。刘建航等^[7]得出隧道沿纵轴线的纵向地表沉降预测公式提出负地层损失概念。刘波等^[8]应用叠加原理,得出同一埋深双孔平行隧道修正 Peck 公式。张志强等^[9]进行了非对称近接隧道施工力学特性研究,得出了先开挖较小断面隧道优于先开挖较大断面隧道的结论。李鹏飞等^[10]基于塌落拱假定,考虑双线隧洞的不对称性,根据普氏理论推导了深埋情况的围岩压力计算公式。

本文针对砂土地区地铁横通道转两条非对称直径正线隧道项目,采用有限元软件模拟隧道不同开挖阶段工后地表沉降及隧道水平位移;基于 Peck 经验公式,应用叠加原理,得出相同收敛半径下非对称平行双线隧道地表沉降解析解,并与模拟值进行对比。

1 工程实例

1.1 工程基本情况

本文选取沈阳某地铁站横通道正线和渡线断面的施工阶段进行研究,该区间左线长约 1.23 km,右线长约 1.26 km。场地范围内主要为砂岩和黏土互层,双线均采用矿山法施工,隧道顶覆土厚度 6.00 m~18.00 m。

1.2 三维模型建立

1.2.1 隧道尺寸及土体参数

考虑到尺寸效应对研究对象的影响,一般选取模型水平方向 3R~5R(R 为隧道半径),竖直方向隧洞底部向下至少取 1R,隧道纵向长度取 3R。本模型隧道半径 R=6.4 m,13.2 m,模型长宽高分别为 105 m,80 m,33.5 m。各土层地质参数见表 1。

表 1 土层参数^[11]

土层名称	T /m	γ /(kN·m ⁻³)	E_0 /MPa	μ	c /kPa	φ /(°)
MF	1.0	18.3	7.0	0.32	5.0	17.0
SC	2.0	18.9	20.0	0.31	34.0	12.7
C	3.0	18.6	27.0	0.25	1.7	33.6
MS	4.0	17.7	27.0	0.23	2.8	37.3
CS	20.0	19.6	27.0	0.23	2.8	37.3
GS	15.0	19.9	48.5	0.24	1.7	36.7

注:T 为土层厚度;MF 为杂填土;SC 为粉质黏土;C 为黏土;MS 为中砂;CS 为粗砂;GS 为砾砂。

土体本构采用摩尔-库仑(Mohr-Columb)破坏

准则,隧道围岩,土体及初衬均采用有限差分软件 FLAC^{3D}中实体单元进行模拟,锁脚锚杆以及超前小导管采用梁单元模拟。模型材料参数见表 2。

表 2 模型材料参数

材料名称	E /MPa	μ	γ /(kN·m ⁻³)	K /MPa	G /MPa
RR	1.2×10^2	0.30	23	2.50×10^2	1.15×10^2
CL	2.3×10^4	0.25	22	15.33×10^3	9.20×10^3
AP	2.1×10^5	0.26	78	1.46×10^5	8.33×10^4
TS	2.3×10^4	0.25	22	15.33×10^3	9.20×10^3
CRD	2.3×10^3	0.25	22	1.33×10^4	6.20×10^3

注:RR 为加固圈;CL 为格栅混凝土初衬;AP 为锚杆及小导管;TS 为临时支撑;CRD 为中隔壁。

1.2.2 三维模型及施工步骤

由于 FLAC^{3D}前处理功能较弱,运用网格剖分软件 Hypermesh 将研究区三维 CAD 模型划分为 31 万个网格单元。双线隧道及横通道网格见图 1。

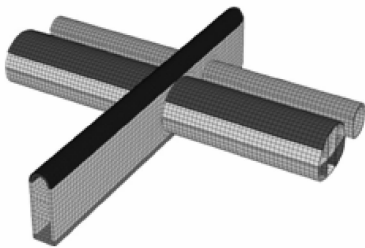


图 1 平行隧道模型网格图

三维土体侧面建立相对的水平约束,地面建立向上的法向约束,地表为自由边界,土体自重应力场进行初始地应力平衡,上部施工和设备荷载简化为均布可变荷载。隧道横截面示意图见图 2。

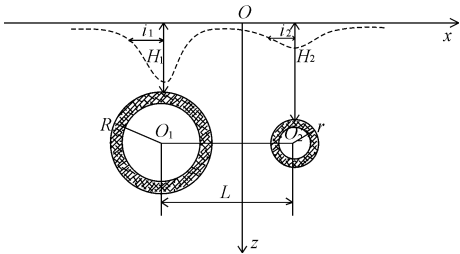


图 2 隧道断面及地表沉降示意图

查阅文献[6]本文隧道开挖后断面半径均匀收缩半径 a 取 0.005 m,各项参数见表 3。

表 3 平行双线隧道基本参数 单位:m

H_1	H_2	L	R	r	a
11.85	15.3	13.85	13.3	6.4	0.005

隧道正线及渡线段分别采用短台阶法开挖,和

双侧壁导坑法开挖,开挖步序见表 4(R 为隧道洞径)。

表 4 隧道断面开挖步骤

断面类型	开挖步骤	洞径	断面类型	开挖步骤	洞径
I	Step0	小管	II	Step70	$0.5R$
	Step10	$0.5R$		Step80	$1.0R$
	⋮			⋮	
	Step60	$3.0R$		Step120	$3.0R$

注:左侧标准断面和右侧大断面为 I,左侧大断面和右侧标准断面为 II。

1.3 计算结果分析

1.3.1 地表沉降分析

在模拟隧道开挖及施作衬砌的同时在模型上方设置地表沉降实时监测点,进行地表沉降监测和分析,图 3 为第 I 阶段隧道开挖结束后地表沉降云图。

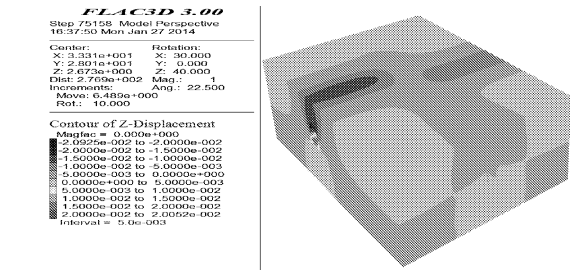


图 3 第 I 阶段地表沉降图

由图 3 可知,第 I 阶段开挖结束后的地表沉降位于小断面隧道洞顶,地表沉降量由洞顶隧道中线至两侧减小,最大沉降量为 13.2 mm,小于控制值;地表沉降最大值出现于小断面跨度范围以内,整体沉降控制在大断面跨度之内,说明隧道整体支护效果良好,有效控制了围岩的变形。

第 II 阶段开挖完成后的地表沉降云图如图 4 所示。由图 4 可知,第 II 阶段开挖完成后的地表沉降最大值为 15.6 mm,在控制范围以内,正线小断面和渡线大断面洞顶均出现沉降极值,沿隧道开挖断面位于双隧道中心距之间,沿隧道纵向方向最大沉降量集中在区间中间部位。右侧隧道先开挖大断面再开挖小断面,土体最大沉降量较小,最大地表沉降量位于小断面隧道顶部,由此看来,加强小断面隧道顶部监测非常必要。

各个施工阶段地表沉降极大值如表 5 所示,第 I 阶段隧道开挖产生的地表沉降较第 II 阶段大,第 I 阶段和第 II 阶段隧道开挖引起的沉降量分别占总沉降量的 68.6% 和 15.4%,说明隧道开挖时,第 I

阶段开挖对地表影响较大,该阶段开挖引起沉降量较第 II 阶段大很多,但第 II 阶段影响范围较大,约为第 I 阶段的 2 倍。

FLAC3D 3.00
Step 138158 Model Perspective
18:41:03 Mon Jan 27 2014

Center: X: 5.201e+001 Y: 0.000 Z: 4.077e+000
Dist: 2.718e+002 Mag: 1
Increments: Move: 0.488e+000 Ang: 22.500 Rot: 10.000

Contour of Z-Displacement
Magfac = 0.000e+000
-2.117e-002 to 2.000e-002
-2.000e-002 to 1.500e-002
1.500e-002 to 1.000e-002
1.000e-002 to 5.000e-003
5.000e-003 to 0.000e+000
0.000e+000 to 5.000e-003
5.000e-003 to 1.000e-002
1.000e-002 to 1.500e-002
1.500e-002 to 2.000e-002
2.000e-002 to 2.042e-002
Interval = 0.5e-003

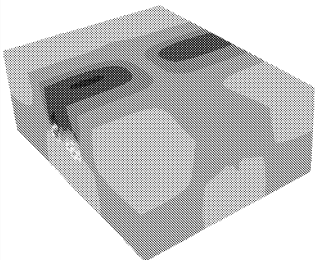


图 4 第 II 阶段地表沉降图

表 5 各开挖步地表沉降量

阶段	第 I 阶段开挖完成	第 II 阶段开挖完成
最大沉降/mm	- 13.2	- 15.6
百分比/%	84.6	100.0

1.3.2 隧洞水平位移分析

图 5、图 6 分别为横通道转正洞时隧道水平位移云图。由图可知隧道施工时横通道水平位移最大值约为 11.98 mm,最大值位于双隧道之间,位于规范控制值之内。正线隧道开挖引起的左右两侧地表水平位移分别为 5.90 mm 和 5.50 mm,位于标准断面隧道的右侧拱脚处,二者大小相当。正线隧道的水平位移小于横通道转正洞的水平位移,分析因为正线隧道拱脚的锁脚锚杆约束了正线隧道向洞内发生位移。

FLAC3D 3.00
Step 138158 Model Perspective
18:55:51 Thu Jan 09 2014

Center: X: 1.043e+001 Y: 1.738e+001 Z: 1.875e+003
Dist: 5.802e+003 Mag: 3.81
Increments: Move: 0.488e+000 Ang: 22.500 Rot: 10.000

Contour of X-Displacement
Magfac = 0.000e+000
-1.1e-002 to 1.000e-002
1.000e-002 to 7.500e-003
7.500e-003 to 5.000e-003
5.000e-003 to 2.500e-003
2.500e-003 to 0.000e+000
0.000e+000 to 2.500e-003
2.500e-003 to 5.000e-003
5.000e-003 to 7.500e-003
7.500e-003 to 1.000e-002
1.000e-002 to 1.198e-002
Interval = 3.75e-003

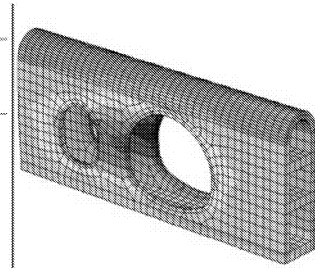


图 5 横通道转正洞水平位移云图

FLAC3D 3.00
Step 138158 Model Perspective
13:24:20 Thu Jan 09 2014

Center: X: 1.043e+001 Y: 1.738e+001 Z: 1.875e+003
Dist: 5.802e+003 Mag: 3.81
Increments: Move: 0.488e+000 Ang: 22.500 Rot: 10.000

Contour of Y-Displacement
Magfac = 0.000e+000
-3.880e-003 to 3.000e-003
3.000e-003 to 3.500e-003
3.500e-003 to 2.500e-003
2.500e-003 to 1.000e-003
1.000e-003 to 0.000e+000
0.000e+000 to 1.000e-003
1.000e-003 to 2.000e-003
2.000e-003 to 3.000e-003
3.000e-003 to 4.000e-003
4.000e-003 to 5.000e-003
5.000e-003 to 5.887e-003
Interval = 1.25e-003

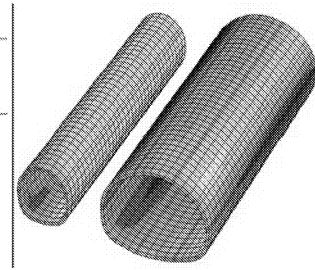


图 6 正线隧道水平位移云图

2 横向地表沉降计算方法

众所周知,盾构隧道开挖引起的地层损失使地表发生沉降非常普遍。盾构开挖引起地层损失主要是由于盾尾间隙和衬砌自收缩的共同作用^[12-13],隧道开挖过程中开挖面土体变形主要由地层损失和收敛变形组成,本文仅考虑径向均匀收缩引起的地表沉降。以 Peck 公式表示地表沉降,其沉降表达式如下^[14-16]:

$$S(x) = S_{\max} \exp[-x^2/(2i^2)] \tag{1}$$

式中: $S_{\max}$ 为隧道轴线对应地表沉降的极大值; x 为测点与隧道重轴线的垂直距离; i 为沉降槽宽度系数,其定义为地表沉降线反弯点与隧道中轴线的水平距离。

$$S_{\max} = \frac{V}{i \sqrt{2\pi}} \tag{2}$$

式中: V 为隧道开挖引起的地层损失体积,单位长度隧道 $V = \pi \times (R - a)^2$,其中 R 为隧道半径; i 为沉降槽宽度系数($i = \frac{H}{\sqrt{2\pi \tan(45^\circ - \varphi/2)}}$)。

本工程实例中双线隧道为圆形断面,初始半径分别为 R, r ,隧道开挖引起断面收缩,均匀收缩半径为 a ,双线隧道埋深分别为 H_1, H_2 ,双洞之间中心距为 L (见图 2),由于双线隧道往往距离较近,由于开挖顺序不同,相互影响也不同,单隧道顶的地表沉降应为双隧道影响的相互叠加。基于 Peck 经验公式,根据叠加原理,得出非对称平行双线隧道地表沉降修正 Peck 公式为:

$$S(x) = S_{\max 1} \exp[-(x - \frac{L}{2})^2/(2i_1^2)] + S_{\max 2} \exp[-(x + \frac{L}{2})^2/(2i_2^2)] \tag{3}$$

式中: $S_{\max 1}$ 为隧道 T_1 中心的地表沉降的最大值; i_1 为隧道 T_1 的沉降槽宽度系数; $S_{\max 2}$ 为隧道 T_2 中心的地表沉降的最大值; i_2 为隧道 T_2 的沉降槽宽度系数。

3 非对称双孔隧道沉降控制因素讨论

双孔隧道开挖引起地表沉降与隧道中心距、隧道直径及隧道开挖次序等因素有关^[17-26]。下面以沈阳地铁九号线工程为例,运用修正 Peck 公式(3),对砂土地区隧道开挖上方土体横向沉降的影响因素进行讨论。

3.1 双隧道中心距 L 改变

图 7 为非对称双线平行隧道先开挖大直径后开

挖小直径隧道施工引起的横向地面沉降曲线,计算参数见表 3,两条隧道的圆心距变化从 1 倍最小洞径到 5 倍最小洞径。图 7 为沿隧道纵向 $x = +B$ (B 为大断面跨度)处的沉降曲线,不同平行隧道中心间距对应不同的地表沉降包络线。图 7 中 y 坐标左侧对应标准断面隧道,右侧为大直径隧道。相同条件下,随着圆心距 L 的增大,地面沉降曲线由正态分布曲线转换为马鞍形沉降曲线,地表最大沉降逐渐减小,地表沉降槽宽度系数随之增大;大直径隧道沉降槽宽度系数 i_1 大于标准断面沉降槽宽度系数 i_2 ;由图 7 看出两条平行隧道距离越远,相互影响越小,产生的最大地表沉降量越小。

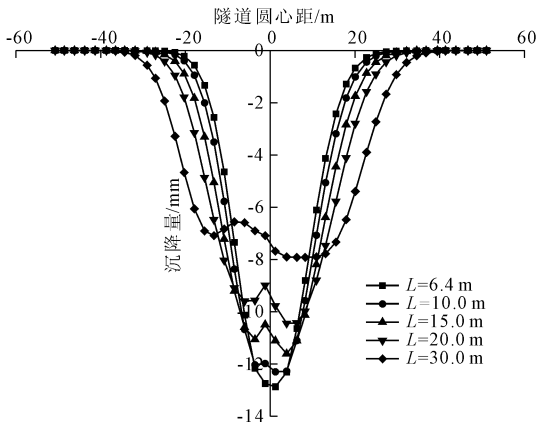


图 7 不同圆心距引起的地表沉降曲线

3.2 隧道埋深 H 改变

取沿隧道开挖方向 $x = -B$ 处 y 轴右侧较大直径隧道为例,改变隧道覆土厚度,研究地层沉降随隧道埋深的变化。图 8 为不同埋深情况下的地表横向沉降曲线图,隧道埋深约从 1 倍洞径至 5 倍洞径。由图看出,随着埋深的增加,土体最大沉降量略有增大,最大沉降量从 12.74 mm 增大到 13.13 mm,均处于控制沉降范围之内;沉降槽范围与埋深呈正相关,随着埋深的增大而增大。

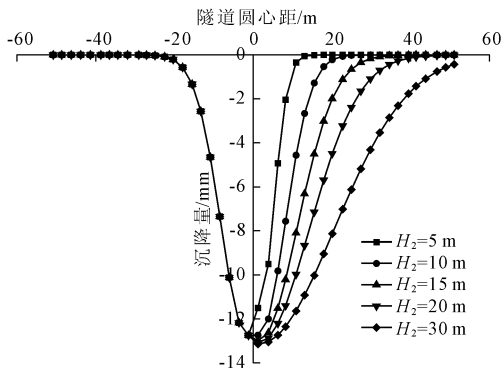


图 8 不同埋深对应的地表沉降曲线

3.3 施工步序改变

图 9 为双线平行隧道开挖先后次序引起的地表横向沉降量图。分别取沿隧道开挖方向 $x = \pm B$ 两个断面隧道断面, $x = -B$ 处先开挖小断面后开挖大断面, $x = +B$ 处相反。由图 9 可看出,隧道圆心距小于 1 倍洞径条件下,先开挖较小断面引起的地表沉降最大值约 7.80 mm,先开挖较大断面引起的地表沉降最大值约 13.11 mm,先开挖较小断面隧道优于先开挖较大断面隧道。

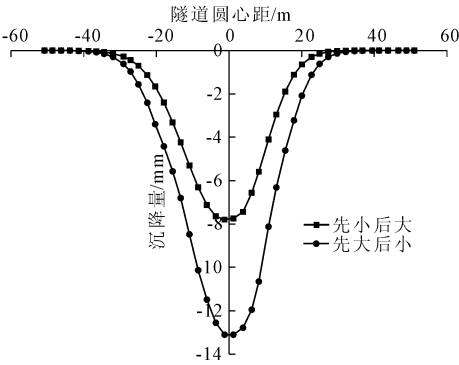


图 9 不同施工次序地表沉降曲线

3.4 模拟沉降与施工步序关系分析

第 I 开挖阶段先行隧道开挖结束后,后行隧道在先行隧道产生沉降的基础上继续对土体产生扰动,不同开挖次序产生的地表沉降量不同。取 $x = \pm B$ 两个断面,分析各施工阶段后地表累计沉降规律,见图 10。假设地层损失为径向均匀收缩 5 mm。

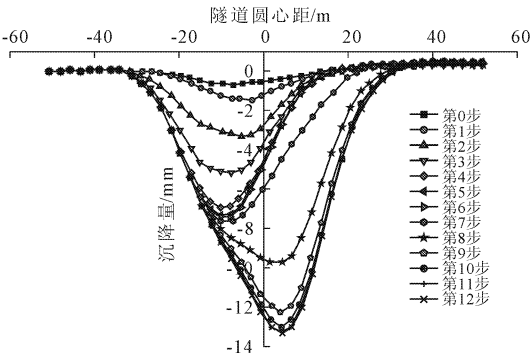


图 10 $x = -B$ 各阶段工后地表沉降曲线(先小后大)

由图 10、图 11 可知,第 0 步代表横通道开挖完成,准备正线隧道开挖。隧道开挖引起的最终沉降量为 13.27 mm,位于大断面顶部正上方。 $x = -B$ 断面代表先标准断面后大断面,第 I 阶段和第 II 阶段盾构开挖引起的地表最大沉降量分别为 7.5 mm 和 5.8 mm,占总沉降量的 56.5% 和 43.5%,发生在标准断面顶部,表明双线隧道施工第 I 阶段开挖引起的沉降量占总沉降的比例较大。

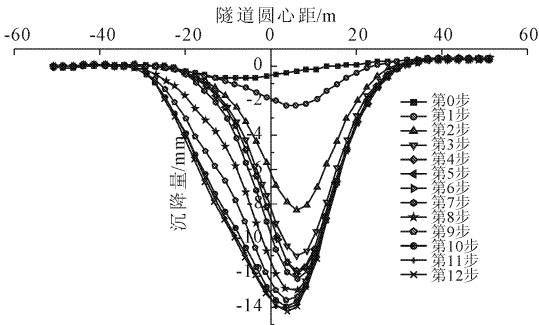


图 11 $x = B$ 各阶段工后地表沉降曲线(先大后小)

在 $x = B$ 断面,开挖顺序为先开挖大断面再开挖小断面,工后最大沉降量为 13.94 mm,其中第 I 阶段和第 II 阶段开挖引起的最大沉降量分别为 12.13 mm 和 1.81 mm,约占总沉降量的 85% 和 15%,最大地表沉降位于大断面隧道中线顶部位置。由此可见,隧道第 II 阶段开挖引起地表产生的沉降量很小。综上可得,非对称双线隧道开挖时,先开挖大后小产生的地表沉降较小。

在断面 $x = B$ 处,施工阶段第 10~20 步和断面 $x = -B$ 处施工阶段第 70~80 步,对应大断面下导洞的开挖,工后地表沉降量为 5.7 mm,约为总沉降的 43%;断面 $x = B$ 处,施工阶段 20~30 步和断面 $x = -B$ 处,施工阶段 80~90 步工后地表沉降量为 2.6 mm,约占地表总沉降量的 20%。说明大断面下导洞及中洞上台阶的开挖均使围岩发生较大的变形,原因是因为隧道开挖使得洞周土体应力释放,因此,使用该方法进行隧道开挖施工时,应加强大断面下导洞和中洞的上台阶监测和支护措施。

4 结 论

- (1) 为减小双隧道相互影响,平行隧道中心距应大于 1 倍洞径,平行双隧道第 II 阶段的开挖对沉降的影响较第 I 阶段小。
- (2) 横通道转隧道正线的水平位移发生在横通道处;隧道间大直径断面拱脚处隧道正线水平位移显著,锁脚锚杆对水平位移的约束效果达 54%。
- (3) 论文给出砂层地区非对称平行隧道修正 Peck 公式,并讨论地表横向沉降影响因素。非对称隧道先开挖小断面再开挖大断面引起的地表沉降量较小。

参考文献:

[1] Chen R P, Zhu J, Liu W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011,26(1):163-171.

- [2] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. *Geotechnique*, 1993, 43(2):361-362.
- [3] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico City, 1969: 225-290.
- [4] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. *Geotechnique*, 1987, 37(3):301-320.
- [5] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2):418-424.
- [6] 陈春来, 赵城丽, 魏纲, 等. 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. *岩土力学*, 2014, 35(8): 2212-2218.
- [7] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [8] 刘波, 陶龙光, 丁城刚, 等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(3):356-361.
- [9] 张志强, 黄朱林, 韩飞. 非对称小净距隧道施工力学特性研究及方案优化[J]. *现代隧道技术*, 2007, 44(6): 22-26.
- [10] 李鹏飞, 王帆, 聂雄, 等. 深埋非对称连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(9): 1625-1629.
- [11] 唐志扬. 沈阳地铁 9 号线吉汪段区间隧道施工稳定性研究及支护结构监测分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [12] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(5): 585-589.
- [13] 张治国, 白乔木, 赵其华. 带衬砌浅埋隧道开挖受非对称收敛变形影响的地层位移和衬砌应力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6):1202-1213.
- [14] 王剑晨, 张顶立, 张成平, 等. 北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5):947-956.
- [15] Wei Gang. Prediction of soil settlement caused by double-line parallel shield tunnel construction[J]. *Disaster Advances*, 2013, 6(6):23-27.
- [16] 韩焯, 李宁, Standing J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1):23-28, 35.
- [17] Peck R B. Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground [M]. New York: Published by ASCE, 1984.
- [18] Sakurai S. Lessons learned from field measurement in tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1997, 12(4):453-460.
- [19] Carranza-Torres C, Fairhurst C. On the stability of tunnels under gravity loading, with post-peak softening of the ground [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1997, 34(3/4):585.
- [20] Wen D, Poh J, Ng Y W. Design considerations for bored tunnels at close proximity[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2004, 19(4/5):468-469.
- [21] Mroueh H, Shahrour I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30(3):245-253.
- [22] Kimura H, Itoh T, Iwata M, et al. Application of new urban tunneling method in Baikoh tunnel excavation[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2005, 20(2): 151-158.
- [23] Perri G. Analysis of the effects of the two new twin tunnels excavation very close to a big diameter tunnel of Caracas, subway[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(3): 138A10.
- [24] Rice P M. Design and construction of washington park station, westside light rail project, portland, oregon[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1997, 34(3/4):589.
- [25] 朱洪高, 郑宜枫, 陈昊. 双圆盾构隧道土体地表沉降特性[J]. *建筑科学与工程学报*, 2006, 23(2):62-67.
- [26] 郝小红, 郭佳. 考虑超大断面顶管施工过程的地层变形数值分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6):66-71, 81.