

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2014.06.004

平行双孔隧道开挖变形三维数值分析

潘钦锋¹, 罗晓东²

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 基于 Gibson 土建立平行双孔隧道的三维实体结构计算模型, 考虑衬砌与周围土体的共同作用, 并在盾构开挖面处施加表面力以模拟切削刀盘的推进力效应, 分析平行双孔隧道同步开挖及不同滞后距离异步开挖时隧道相互作用所引起的周边土体变形及收敛形式。研究表明, 平行双孔隧道异步开挖时, 滞后距离对超前开挖隧道周围的竖直沉降影响微小, 而对后挖隧道断面竖直沉降以及左右隧道水平位移的影响较大; 随两隧道间距的增加, 开挖时相互的影响会随之减小。

关键词: 平行双隧道; 隧道开挖; 数值模拟; 位移

中图分类号: U452.14

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2014)06-0524-07

Numerical simulation on effects of different construction processes on behaviour of parallel twin tunnels

Pan Qinfeng¹, Luo Xiaodong²

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: A 3D entity structure calculation model of parallel twin tunnels was constructed based on Gibson Soil to investigate the effects of different excavation procedures on the soil movements around the twin tunnels. Numerical simulation analysis was performed by using three dimensional finite element analysis. Shield tunnel construction was simulated considering shield excavation face supported by uniform distributed load. The interaction between lining and surrounding soil layers was taken into account. The soil layer displacements around the the twin tunnels and contraction due to simultaneous excavating and different construction procedures were investigated. It shows that the distance between the excavating sites of the twin tunnels with different-step construction procedure has a small effect on the vertical displacement of the formerly excavated tunnel, whereas it has a higher effect on the sectional vertical settlement of the latterly excavated tunnel and the horizontal displacements between the twin tunnels. The interaction between the twin tunnels is lessened with the increase of their space.

Keywords: parallel twin tunnels; tunnel construction; numerical simulation; deformation

随着盾构法施工技术被广泛应用于地铁隧道等工程, 其施工过程中土体的性状成了地下工程

建设中的一个重要问题。地铁隧道常为浅埋近距离双孔隧道, 而人们对其施工过程中土层性状分

收稿日期: 2014-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378124); 省教育厅科技项目(JB10110); 福建工程学院科研发展基金项目(GY-Z09079)

第一作者简介: 潘钦锋(1975-), 男(汉), 福建南安人, 讲师, 硕士, 主要从事结构工程、岩土工程的教学与研究。

析大多停留在单孔上,且有一部分仅限于二维分析。实际上,双孔隧道开挖地层变形性状要比单孔隧道复杂得多。

关于双孔隧道地层位移研究主要有半经验高斯曲线法、随机介质理论法、数值模拟法和模型试验法。半经验高斯曲线法是把两个单孔隧道开挖所产生的地表沉降进行简单叠加;Litwiniszyn提出了随机介质理论法,我国学者阳军生、刘宝深等^[1]也进行了相应的研究;Ghaboussi和Ranken^[2]、Soliman等^[3]、Addenbrooke和Potts^[4]、Hefny等^[5]、Chehade和Shahrour^[6]、林志等^[7]均对该课题做过有限元数值模拟计算,并取得一定的成果,曾小清^[8]以上海地铁一号线盾构施工为实际背景,晏莉^[9]结合双孔并行隧道开挖的实际情况,建立数值模型,对双孔并行隧道施工相互影响的规律进行了研究;Mair和Gunn^[10]对隧道开挖引起的地表沉降进行了模型试验研究,Chung, King Hei^[11]采用模型试验对隧道变形和破坏形态进行了研究,Kim^[12]对小间距隧道盾构施工中的相互影响进行了模型试验研究,并与有限元法进行对比,Chapman等^[13]通过对双孔平行隧道施工产生的短期地表移动规律进行室内模型试验研究,并与改进高斯曲线法进行对比。

已有的研究很少考虑双隧道异步开挖土层性状的相互影响。本文采用瑞士土工有限元软件Z_Soil. PC3D2013版本,建立双孔隧道的合理三维模型,分析平行双孔隧道同步开挖及不同滞后距离异步开挖时,隧道相互作用所引起的地层变形性状。

1 双孔盾构隧道有限元分析

有限元法已被广泛地应用于盾构隧道施工环境影响的模拟分析中,合理对其施工具体细节及盾构推进过程进行模拟是有限元法分析的关键。

1.1 本构模型及基本假定

土体本构关系采用小应变刚度硬化土(HSS)本构模型模拟,该模型可以考虑开挖卸荷效应、土体超固结效应,适合开挖问题的分析。本文主要为研究双隧道开挖的相互影响,不失一般性,假定地层为Gibson土,视为弹塑性材料;盾构、浆液及衬砌变形和受力均在弹性范围内;对于装配式衬砌,按整体结构计算,对接头的刚度进行折减;模拟切削刀盘的推进力效应方法同文献[4-5],同

时用均布荷载模拟注浆压力,取2 MPa;忽略土层和管片衬砌之间的滑动。

1.2 开挖过程模拟

Z_Soil. PC软件对开挖过程可通过卸载函数的设置,模拟土方开挖的速度等与荷载释放速率有关的施工参数,使得数值模拟更加接近实际情况。结构施作的力学模拟主要体现为整体刚度的增加以及施作结构自重对系统的影响;结构拆除的力学模拟,通过施加与节点等效荷载相反的力来实现,并将挖去的单元从有限元计算网格中删除。

1.3 隧道管片模拟

管片采用可以考虑剪切变形的无厚度壳体单元或者有厚度壳实体单元模拟,抗弯刚度按照截面整体抗弯刚度等效的原则转换。

1.4 接触面模拟

接触面单元采用无厚度的Goodman单元及理想弹塑性的Mohr-Coulomb强度准则,为了达到计算收敛和接触面真实位移的平衡,采用Z_Soil. PC软件特有的Augmented Lagrangian Approach算法以消除一般接触面单元“嵌入”结构过大的不良影响。

1.5 应力释放的模拟

通过Z_Soil. PC软件中的Load function来施加虚拟支撑力的命令,完成地应力的逐步释放,来模拟隧道开挖与支护的时空效应。施加虚拟支撑力逐步释放法主要是通过通过在开挖边界施加虚拟支撑力的方法,来模拟围岩的逐步卸载。对于隧道不同施工阶段的地应力释放率,可根据量测资料加以确定,通常近似地将它定为本阶段隧道控制测点的变形值与施工完毕变形稳定以后该控制测点的总变形值的比值。在缺乏实测变形资料的情况下,亦可按工程类比法加以选定,并根据试算结果予以修正。

2 双孔隧道开挖过程性状分析

2.1 计算模型

Z_Soil. PC软件有限元模拟计算所采用三维实体模型及单元网格划分如图1所示。 X 轴、 Y 轴分别表示宽度方向和深度方向, Z 轴为隧道轴线方向,模型 X 方向宽为160 m, Y 方向深为50 m, Z 方向长60 m;两隧道相互平行,直径为 D m($D=6$ m),间距 B m,埋深 H m;土层主要参数如表1

所示。模型边界条件:土层底部为固定边界,限制水平移动和垂直移动;中部限制水平移动;上表面为地表,设为自由边界。模型设 40 个断面,模拟 40 次动态开挖,每次开挖掘进 1.5 m,主要分析盾构推进时,开挖滞后间距对双隧道开挖面周围土体所产生的影响。分析概况如图 2,假定左隧道

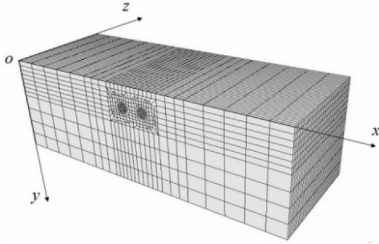


图 1 三维有限元模型

Fig. 1 Scheme of finite element model

先开挖,右隧道后开挖,图中 *ab*、*ac*、*ad*、*ae* 表示右隧道开挖断面与左隧道开挖断面的距离,即滞后距离。

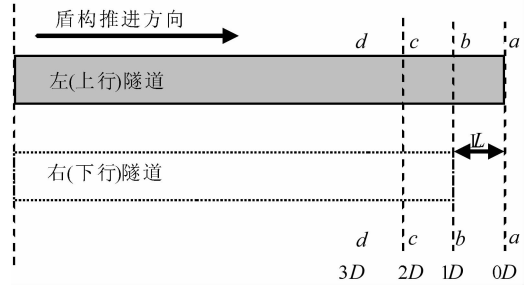


图 2 异步开挖研究工况

Fig. 2 Scheme of different excavation procedure

分析采用极坐标的形式,将隧道开挖断面沿周边分为 20 等份,在圆周上每 18°选取一个点,如图 3 所示。

表 1 土层参数

Tab. 1 Soil layer parameters

重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	含水量	孔隙比	K_0	E_s / kPa	E_{50} / kPa	E_w / kPa	E_0 / kPa
17.8	24.0	16.2	27.5	0.933	0.49	3 500	5 190	13 500	4 400

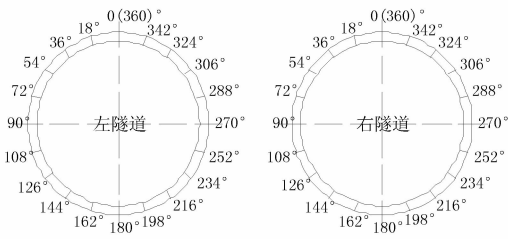


图 3 隧道断面周边位置

Fig. 3 Sectional monitoring points of twin tunnel

2.2 隧道断面周边土层位移

取滞后距离(即同步开挖)为工况 1,运用 Z_Soil. PC 软件进行分析,可分别得到左右隧道开挖断面周边的位移。图 4、图 5 分别为工况 1 左隧道掘进至 60 m 时,左、右隧道开挖断面周边各点的水平位移曲线,图 6 为两隧道的竖直位移对比曲线。结果显示,左右隧道的拱顶部位发生沉降,拱底部位发生隆起,拱腰部位发生较大的向内水平位移。左右两隧道周边最大的竖直沉降均发生在拱顶 0°位置处,最大的隆起发生在拱底 180°位置处;水平位移极值点位于拱腰 54°及 306°附近,

左隧道最大的水平位移发生在 306°附近处,右隧道最大的水平位移发生在 54°附近。

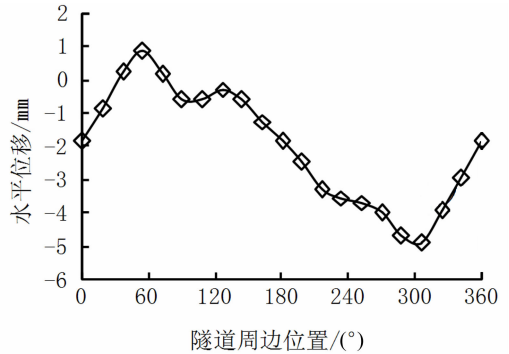


图 4 工况一左隧道周边水平位移

Fig. 4 Lateral displacements of soils around the left tunnel

同理,取滞后距离为工况 2、3、4 分别进行分析,可得到各工况在左隧道掘进至 60 m 时,左、右隧道开挖断面周边各点的水平位移曲线及竖直位移曲线。该位移曲线与工况 1 相应曲线形状相似,仅对应位移值大小各自有所增减。各工况左、右隧道拱顶、拱底竖直位移及拱腰处水平位移的

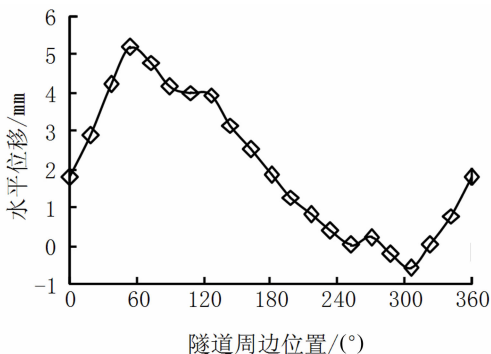


图5 工况一右隧道周边水平位移

Fig.5 Lateral displacements of soils around the right tunnel

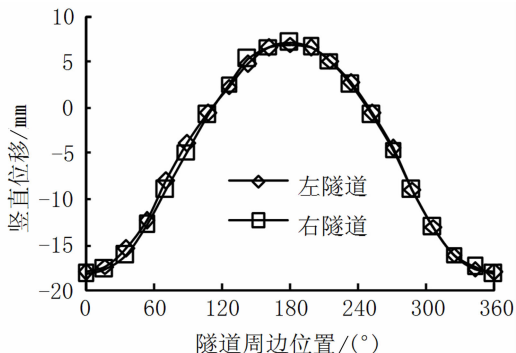


图6 工况一左右隧道开挖断面周边竖直位移

Fig.6 Vertical displacements of soils around twin tunnels

最大值发生位置基本一致,数值如表2所示。

表2 开挖断面拱顶、拱底最大竖直位移及拱腰最大水平位移

Tab. 2 Maximum vertical displacements of arch crowns, arch bottoms and maximum lateral displacement of haunches

工况	左隧道			右隧道		
	拱顶竖 直位移/ mm	拱底竖 直位移/ mm	拱腰水 平位移/ mm	拱顶竖 直位移/ mm	拱底竖 直位移/ mm	拱腰水 平位移/ mm
1	-18.03	9.08	-5.21	-18.36	9.22	5.32
2	-18.05	6.99	-2.67	-11.48	3.34	3.75
3	-17.81	6.91	-2.48	-10.80	3.12	3.38
4	-17.79	6.88	-2.44	-10.64	3.11	3.36

对比工况1和工况2,可知当滞后距离从0D增大到1D后,对左隧道开挖断面周边的竖直位移影响不大,对水平位移影响较大,而对右隧道开挖

断面周边的竖直位移和水平位移影响均较大。当滞后距离增加到1D,右隧道周边土层水平位移减小35.7%,拱顶竖向位移减少37.5%,隧道的隆起值,减小63.8%。

对比工况2和工况3可知,当滞后距离从1D增大到2D后,左右隧道土层位移值均有所减少,其中右隧道的位移减少量更为明显,其水平位移减小5.92%,拱顶竖向位移减少6.59%,隧道的隆起值,减小9.87%。

对比工况3和工况4可知,当滞后距离从2D增大到3D后,隧道周边的水平位移值和竖直位移值几乎不变。

通过上述分析可以推断,滞后距离对左隧道周边的竖直沉降几乎没有影响,而对右隧道周边的竖直沉降以及左右隧道周边的水平位移均有较大影响。双孔平行隧道异步开挖时,当两开挖断面的距离(即滞后距离)较小时,隧道之间的相互影响就越大,而当滞后距离超过3D时,滞后开挖隧道对超前开挖隧道的影响便可以忽略不计,即超前开挖隧道与单孔隧道的开挖情况几乎相同。

2.3 异步开挖对隧道断面地表沉降的影响

取不同滞后距离情况下,左隧道掘进60m处断面的地表沉降曲线如图7所示。当两隧道同步开挖(即L=0)时,地表沉降曲线最大值发生在双孔中心连线竖直轴线上;当两隧道异步开挖时,开挖断面地表沉降曲线的最大值随滞后距离的增大,越往左隧道靠近,地表沉降最大值越小,直到接近左隧道单独开挖的情况,地表沉降曲线的最大值发生在左隧道的中心线上;分析发现,当两隧道开挖面距离为3D时的,左隧道地表沉降曲线与其单孔开挖时近似,表明此时滞后开挖隧道(右隧道)断面和超前开挖隧道(左隧道)断面之间的相互影响变得很小,可以忽略不计。

2.4 异步开挖对断面变形的影响

为进一步分析隧道周边的土层变形,取左隧道贯通时,在左、右隧道开挖断面拱顶、拱底处及双孔断面中心连线的中点对应地表位置设置变形监测点,如图8所示。

取隧道开挖推进1D所需的时间为1个单位时间,观测异步开挖时各监测点的沉降,可得其与推进时间的关系分别如图9~图13所示。从图9可以看出,不同的滞后距离对点A竖向位移有影响,滞后距离越大,影响的程度越来越小。当时,

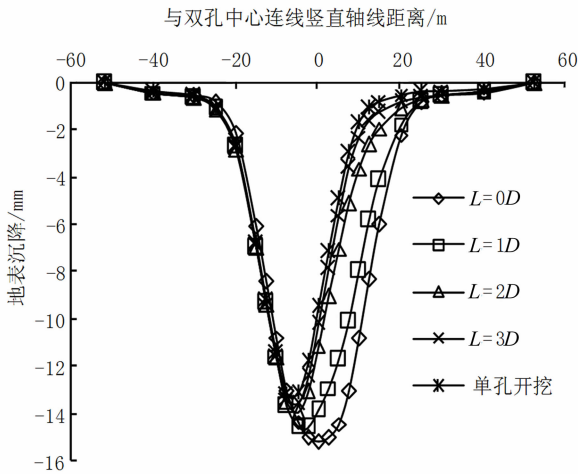


图 7 左隧道开挖断面地表沉降曲线
Fig.7 Surface settlements above the left tunnel

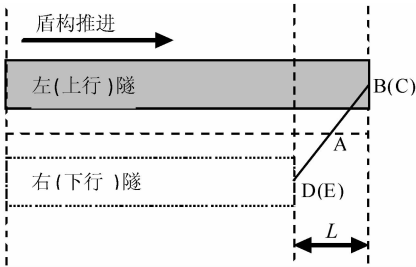
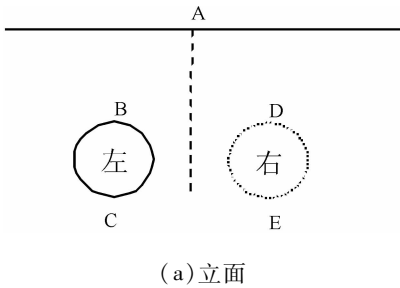


图 8 变形监测点位置
Fig.8 Location of monitoring points

其值与单孔开挖时的数值相近,进一步验证了前述分析的正确性。随着推进时间的增加, A 点的沉降值在不同滞后距离情况下有所不同,但当两隧道贯通后,最终则会趋近于一个固定值。

图 10、图 11 中,不同滞后距离的沉降曲线和单孔开挖时的沉降曲线几乎相同,这表明滞后距离的存在对先行开挖隧道的拱顶和拱底位移不产生影响。图 12、图 13 中,如果忽略掉因不同滞后距离的时长影响后,可以看出,滞后距离对后开挖隧道的拱顶和拱底位移也没有产生影响。

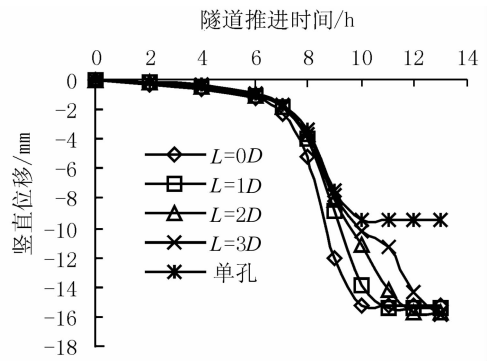


图 9 监测点 A 竖直位移
Fig.9 Vertical displacements of monitoring point A

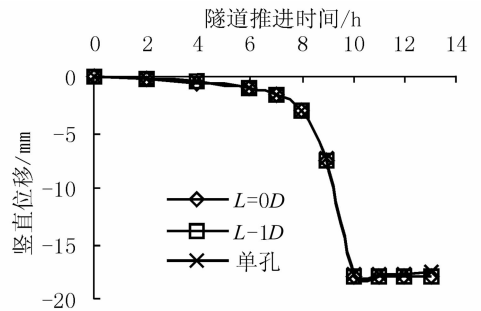


图 10 监测点 B 竖直位移
Fig.10 Vertical displacements of monitoring point B

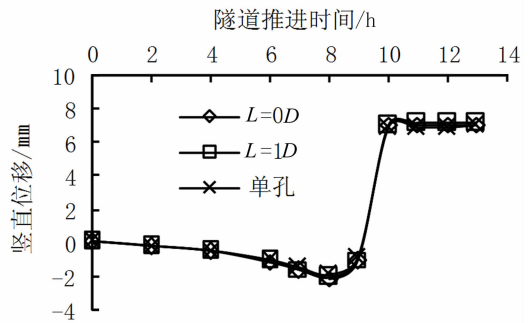


图 11 监测点 C 竖直位移
Fig.11 Vertical displacements of monitoring point C

2.5 不同开挖间距的影响

若改变双隧道的间距,其他条件不变。双孔隧道同步开挖时,左、右隧道周边的水平位移曲线分别如图 14、图 15 所示,竖直位移曲线分别如图 16、图 17 所示。

图 14、图 15 显示,随着隧道间距的增加,对于左隧道,拱腰 54°处的水平位移值增大,而拱腰 306°处的水平位移值减小;对于右隧道,拱腰 54°

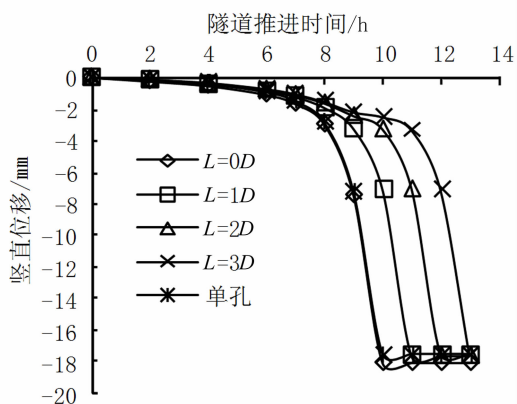


图 12 监测点 D 竖直位移

Fig. 12 Vertical displacements of monitoring point D

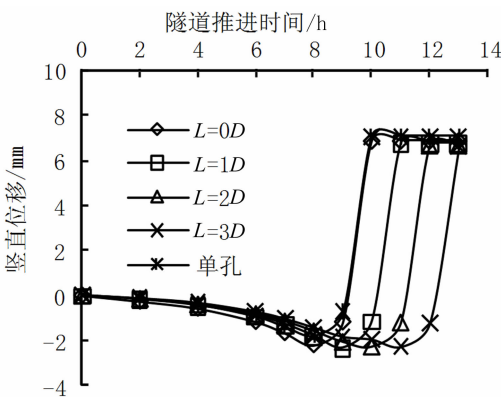


图 13 监测点 E 竖直位移

Fig. 13 Vertical displacements of monitoring point E

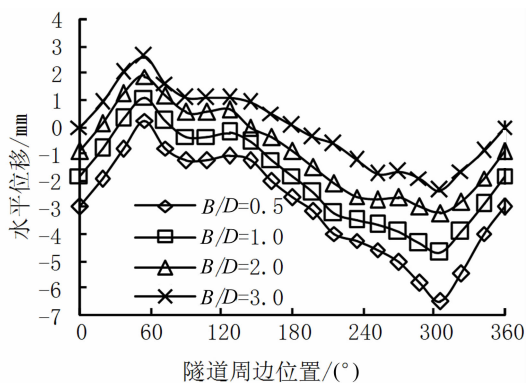


图 14 不同间距左隧道周边水平位移

Fig. 14 Lateral displacements around the left tunnel with different excavation steps

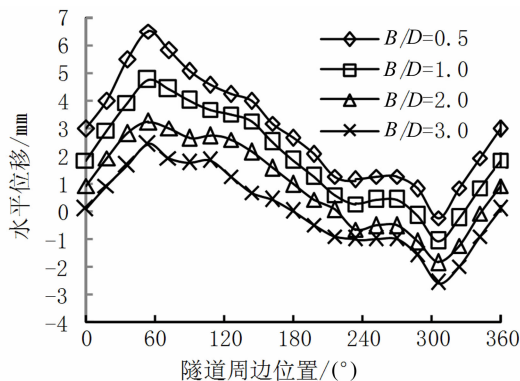


图 15 不同间距右隧道周边水平位移

Fig. 15 Lateral displacements around the right tunnel with different excavation steps

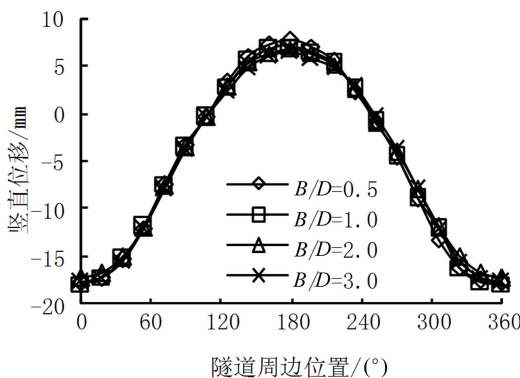


图 16 不同间距左隧道周边竖直位移

Fig. 16 Vertical displacements around the left tunnel with different excavation steps

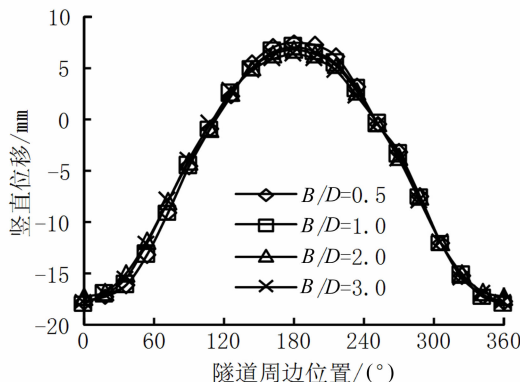


图 17 不同间距右隧道周边竖直位移

Fig. 17 Vertical displacements around the right tunnel with different excavation steps

处的水平位移值减小, 而拱腰 306° 处的水平位移值增大; 当隧道之间的间距大于某一值时, 左右隧道的水平位移将与单孔隧道开挖时趋于一致。说明隧道间距的增加, 将使隧道之间的相互作用

减小。

图 16、图 17 显示, 两隧道的拱顶和拱底的竖直位移较大, 且隧道间距的增加对左右隧道的竖

直位移几乎没有影响。

3 结论

1) 平行双孔隧道异步开挖时, 滞后距离对超前开挖隧道周围的竖直沉降影响较小, 而对后挖隧道断面竖直沉降以及左右隧道水平位移的影响

较大, 该影响随滞后距离的增加而减少, 当滞后距离大于 $3D$ 时, 滞后开挖隧道断面和超前开挖隧道断面之间的相互影响甚微, 可以忽略。

2) 平行双孔隧道同步开挖时, 隧道间距对隧道周围的竖直沉降影响微小, 对左右隧道水平位移的影响较大, 该影响随隧道间距的增加而减小。

参考文献:

- [1] 阳军生, 刘宝深. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [2] Ghaboussi J, Ranken R E. Interaction between two parallel tunnels[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1977, 1(1): 75 - 103.
- [3] Soliman E, Duddeck H, Ahrens H. Two-and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1993, 8(1): 13 - 18.
- [4] Addenbrooke T I, Potts D M. Twin tunnel interaction; surface and subsurface effects[J]. *The International Journal of Geomechanics*, 2001, 2(7): 249 - 271.
- [5] Hefny A M, Chua H C, Zhao J. Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(4): 471.
- [6] Chehade H F, Shahrour I. Numerical analysis of the interaction between twin tunnels; Influence of the relative position and construction procedure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 210 - 214.
- [7] 林志, 朱合华, 夏才初. 双线盾构隧道施工过程相互影响的数值研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(1): 85 - 89.
- [8] 曾小清, 张庆贺, 曹志远. 地铁工程双线盾构平行推进的相互作用[J]. *同济大学学报*, 1997, 25(4): 386 - 389.
- [9] 晏莉. 并行隧道施工相互影响分析及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [10] Mair R J, Gunn M J, O'Reilly M P. Ground movement around shallow tunnels in soft clay[J]. *Tunnels and Tunnelling*, 1982, 14(5): 45 - 48.
- [11] Chung K H. Three-dimensional centrifuge and numerical studies of multiple tunnel interaction[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2004.
- [12] Kim S H. Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(4): 448.
- [13] Chapman D N, Ahn S K, Hunt D V L. Investigating ground movements caused by the construction of multiple tunnels in soft ground using laboratory model tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(6): 631 - 643.

(责任编辑: 陈雯)