

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.025

基坑开挖对坑底已建隧道影响的三维数值分析

魏少伟¹, 张玉芳¹, 郑刚²

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 天津大学 土木工程系, 天津 300072)

摘要:城市地下工程的快速发展, 不可避免地要在地铁隧道附近进行施工活动, 这其中就包括在已建隧道的上方进行基坑开挖。采用三维有限元方法, 对软土地区基坑开挖对坑底已建隧道的影响进行分析, 其中基坑为矩形, 隧道轴线与基坑长边平行, 通过变换隧道横截面的位置来研究开挖对坑底不同位置隧道的影响。数值分析的结果表明, 处于坑底中心的隧道, 其横截面在基坑开挖过程的最大直径改变发生在竖向与水平向, 竖向伸长, 水平向压缩。处于坑底靠近地连墙的隧道, 其横截面在基坑开挖过程的变形与处于坑底中心的隧道相似, 但绕垂直轴向坑内旋转了一定角度。对于同一条隧道, 基坑的空间效应对隧道横截面的变形影响明显。

关键词: 基坑开挖; 地铁隧道; 三维有限元分析; 基坑空间效应

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0112-05

Three Dimensional Numerical Investigation of the Influence of Basement Excavation on Underlying Tunnels

Wei Shaowei¹, Zhang Yufang¹, Zheng Gang²

(1. China Academy of Railway Science, Beijing 100081, P. R. China;

2. Civil Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: Rapid urban development in cities often requires construction activities close to existing tunnels, including basement excavation directly above the tunnels. Based on three dimensional finite element method, the influence of basement excavation on the underlying tunnels was studied. In the numerical model, A tunnel was located under a rectangular excavation with its axes parallel to the long side of the rectangle. The results of numerical analyses indicate that for the tunnel located underneath the centerline of the excavation, overlying excavation will cause the shortening of horizontal diameter and the lengthening of vertical diameter of the tunnel lining. For the tunnel located close to the diaphragm wall, maximum diameter changes often take place in a sub-vertical direction due to the rotation of the tunnel lining during excavation. The spatial effect of the excavation also has an obvious influence on the displacement and distortion of the tunnel cross section.

Key words: basement excavation; tunnel; 3D finite element method; spatial effect of excavation

地铁隧道作为现代城市的交通命脉, 其安全性极为重要。英国伦敦地铁有限公司(London Underground Limit)及我国的上海地区等都制定了严格的隧道变形控制标准^[1-2]来保障地铁隧道的安全运行。随着我国城市地下空间的大规模开发, 不可避免地要在地铁隧道附近进行施工活动, 这其中就包括在已建隧道的上方进行基坑开挖。目前国内外已有不少相关工程的报道, 这些报道表明, 基坑开挖会使坑底隧道产生上抬位移与不可忽视的自身变形, 影响隧道的安全运行; 在软土地区, 基坑开挖对坑底已建隧道的影响更需重点关注。软土地区保护已建隧道在基坑开挖过程的安全运行, 已经成为岩土领域的一个热点工程问题。

目前学者们对这一问题的研究主要可分为以下几个方法: 1) 实测法^[3-5]; 2) 数值方法^[6-11]; 3) 理论分析法^[12-13]; 4) 试验方法^[14]。工程实测数据表明, 当不采取针对性措施时, 软土地区基坑开挖过程坑底隧道产生的上抬位移与自身变形往往不

能满足隧道的变形控制标准要求^[1-2]。而目前针对这一问题的数值分析大多局限于对某个实际工程进行预测; 同时分析也大多采用二维平面模型, 无法反映基坑空间效应的影响。理论研究主要用于预测软土地区隧道在基坑开挖过程的隆起变形, 不能反映隧道管片的自身变形。本文借助三维有限元方法, 对基坑开挖对坑底不同位置隧道(共4种工况)的影响进行分析。对于同一条隧道, 重点研究以下2个方面:

- 1) 通过对比同一条隧道不同位置的横截面在基坑开挖过程的响应, 分析基坑开挖的空间效应对隧道横截面变形的影响。
- 2) 通过三维数值模型分析基坑开挖对隧道纵向变形的影响。

1 数值模型简介

1.1 模型网格划分

建立三维耦合有限元模型对基坑开挖对坑底不同位置

收稿日期: 2013-01-16

作者简介: 魏少伟(1984-), 男, 博士, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) weironi@yahoo.com.cn.

隧道的影响进行分析。如图 1(a)所示,假定基坑的宽度为 $2B_e = 30\text{ m}$,开挖深度为 $h_e = 9\text{ m}$;地连墙厚 800 mm ,插入坑底以下 16 m 。 B_t 、 h_t 分别表示模型横截面上隧道中心距基坑中心(宽度方向)的水平距离与隧道中心距开挖底面的竖直距离。图 1(b)为模型纵剖面图,图中基坑一半长为 54 m , h_{ty} 表示隧道的横截面距长度方向(y 方向)基坑中心面的水平距离;圆圈表示支撑安装位置。从图中可知,支撑分 3 层,安装深度分别为地表面、地表面以下 3 m 及地表面以下 6 m ;支撑水平间距为 6 m 。本研究假定隧道纵轴与基坑长度方向(y 方向)平行,通过变化隧道在模型横剖面中的位置(B_t 、 h_t)来研究不同位置隧道在基坑开挖过程的响应。共进行 4 种工况算例的研究,具体的工程算例如表 1 所示。

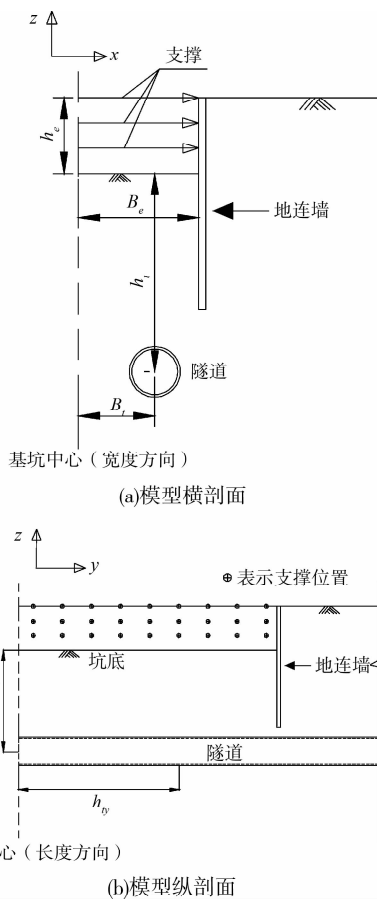


图 1 模型几何构造示意图

表 1 工程算例算例汇总

工况	B_t/h_e	h_t/h_e
A*	0	7/3
B*	1	7/3
C*	0	3
D*	1	3

表中符号 B_t 、 h_t 及 h_e 的意义同图 1(a)。

图 2 为工况 C* 中数值模型的网格划分示意图。网格共 48 744 个节点,43 474 个单元。基坑长 108 m (y 方向),宽 30 m (x 方向);开挖深度为 9 m (z 方向)。由于模型的对称性,数值分析中长度方向(y 方向)取一半进行计算。为消除

边界条件的影响,宽度方向(x 方向)水平边界取至地连墙以外 60 m (超过 5 倍开挖深度);y 方向水平边界取至地连墙以外 90 m (10 倍开挖深度);土体深度取为 80 m 。隧道结构为圆形,外径为 6 m ,厚 300 mm 。模型的位移约束如图 3 所示,左右边界面(与 x 方向垂直)约束 x 方向的位移,前后边界面(与 y 方向垂直)约束 y 方向的位移,底面 3 个方向的位移均受到约束。

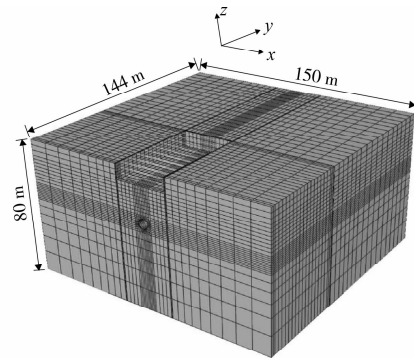


图 2 工况 C* 数值模型的模型网格划分图

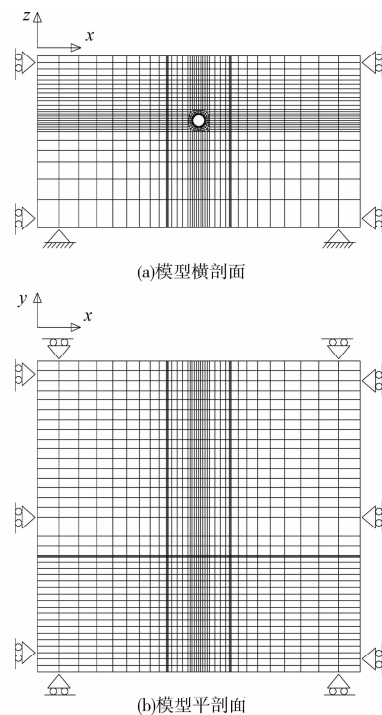


图 3 数值模型横、平剖面位移约束示意图

数值模型采用水土耦合分析,地下水位设在地表面。为模拟开挖过程外来地下水的补给,将模型左右边界面(与 x 方向垂直)的孔压设置为静水压力,在整个分析过程中保持不变;模型的顶面(地表面)设置为自由排水边界(Drain-only 边界),若边界内的孔压为负值,自由排水边界等同于不排水边界;当边界内孔压为正值时,自由排水边界能保证边界内的水按达西定律向外渗出。基坑开挖属临时性工程,假设工期较短,按不排水分析,将各个基坑开挖步的开挖面设置为不排水边界。

1.2 模型力学参数及单元类型选择

为简化研究,本次数值分析选择单一粘土层作为模型的

土体,土体本构模型选择修正剑桥模型。模型的参数 M 、 λ 、 κ 、 e_{cs} 选择台北松山粘土层^[15]已有的剑桥模型参数。松山粘土是国际上比较有代表性的软粘土,其模型参数指标完整,有广泛的认同度。松山粘土的模型参数指标如表 2 所示。Wroth^[16]指出,相对于土体的塑性指数 I_p ,粘土的泊松比变化很小,本次分析假定松山粘土的泊松比保持不变,为 0.3。根据剑桥模型理论,初始孔隙比 e_0 可由下式求得:

$$e_0 = e_{cs} - \kappa \ln p_0 - (\lambda - \kappa) \ln(p_c/2)$$

式中: p_c 为先期固结压力; p_0 为初始固结压力。

表 3 为地下连续墙、隧道结构及支撑的力学参数汇总。分析中假定这些结构均处于弹性阶段。地连墙与隧道采用混凝土结构,弹性模量为 25 GPa,泊松比为 0.2。支撑采用刚度等效,将空间支撑等效至平面。分析中支撑的弹性模量与泊松比分别为 4 GPa 与 0.2。

土体单元采用八节点线性位移移孔压实体单元;地连墙与隧道结构选用八节点线性协调实体单元;基坑工程的水平支撑主要承受水平力,故选用 2 节点线性桁架单元模拟。地连墙与土体及隧道结构与土体之间采用刚性连接,即结构物与土体在模拟过程位移保持一致,不会出现结构与土之间的相互滑动或分离。地连墙与土体之间的这种处理方法对地连墙的位移及坑外土体的沉降预测都有影响,但本研究的重点是基坑坑底隧道的响应,地连墙与土之间采用刚性连接,不会对计算结果造成影响,而且可使数值计算易于收敛。

表 2 松山粘土剑桥模型参数汇总

临界状态线 斜率 M	压缩曲线 斜率 λ	回弹曲线 斜率 κ	e_{cs}	渗透系数 k
1.020	0.152	0.019	1.725	$4 \times 10^{-8} (\text{m/s})$

表 3 地下连续墙、隧道结构及支撑的力学参数汇总

结构类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
隧道结构	25	0.2	2 500
地连墙	25	0.2	2 500
支撑	4.0	0.2	0

1.3 开挖进程模拟及监测面设置

本次分析的重点为基坑开挖对坑底已建隧道的影响,因此对隧道开挖的模拟较为简单。具体的模拟进程为:

- 1) 建立土体初始地应力场;
- 2) 进行隧道开挖模拟,开挖完成后设置 100 D 的固结时间,使周边土体由于开挖产生的有效应力与孔压变化趋于稳定;
- 3) 放置地下连续墙;
- 4) 进行基坑开挖模拟,基坑开挖分 3 步,每步开挖 3 m,开挖时间为 7 d;每步开挖的同时安装支撑。

为更好地处理数值计算结果,设置 5 个隧道横截面监测面,如图 4 所示。截面 A、B、C、D、E 距 y 方向基坑中心面的水平距离 h_x 分别为 9 m ($1h_c$)、27 m ($3h_c$)、45 m ($5h_c$)、63 m ($7h_c$) 及 81 m ($9h_c$)。其中截面 A、B 及 C 处于坑内,截面 D、E 处于坑外。通过设置这五个监测面,能更好地对基坑开挖引起的隧道不同位置横截面的自身变形进行分析,研

究基坑空间效应对坑底隧道的影响。

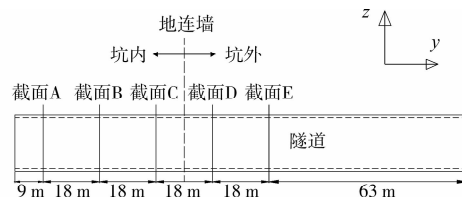


图 4 隧道监测面示意图

2 数值分析结果

2.1 隧道横截面变形分析

图 5 为 4 种工况下隧道管片各横截面在数值模拟进程的自身变形示意图。图中坐标原点代表隧道圆心,变形放大系数为 50。从图中可知,隧道开挖完成(包括 100 d 固结)后,4 种工况下隧道管片均竖向压缩,水平向伸长,隧道被“压扁”;工况 A*、B* 中的隧道 ($h_x/h_c = 7/3$) 竖向压缩量接近,但小于埋深较大的工况 C*、D* 中的隧道 ($h_x/h_c = 3$)。处于坑底中心的隧道(工况 A*、C*, $B_x/h_c = 0$),基坑开挖完成后,靠近 y 方向基坑中心面的隧道横截面(截面 A、B)其最大的直径改变发生在竖向与水平向,竖向伸长,水平向压缩。截面 C 在基坑开挖过程的变形相比较截面 A、B 小。位于坑外的截面 D、E 在基坑开挖过程的自身变形很小,可以忽略。

处于坑底靠近地连墙的隧道(工况 B*、D*, $B_x/h_c = 1$),基坑开挖完成后,靠近 y 方向基坑中心面的隧道截面(截面 A、B)的自身变形与工况 A*、C* 相似,但都绕垂直轴逆时针(向坑内)旋转了一定角度。截面 C 的自身变形相比截面 A、B 小,但也相对垂直轴逆时针(向坑内)旋转了一定角度。截面 D、E 处于坑外,基坑开挖过程对其变形影响很小。

图 6 为 4 种工况下隧道各横截面基坑开挖过程的自身变形图。图中 D 表示隧道直径; ΔD 表示基坑开挖过程隧道管片横截面不同角度的长度改变量, β 为 ΔD 所对应的角度值(顺时针方向)。

从图中可知,4 种工况下,隧道横截面越靠近长度方向基坑中心面,隧道在基坑开挖过程的相对变形越大。处于坑底中心的隧道(工况 A*、C*),其横截面最大的直径改变发生在竖直 ($\beta = 0^\circ$) 与水平方向 ($\beta = 90^\circ$)。工况 A* 中截面 A、B、C 竖直方向的 $\Delta D/D$ 值分别为 0.28%、0.27%、0.19%;截面 D、E 在基坑开挖过程变形很小,其 $\Delta D/D$ 值不超过 0.05%。工况 C* 中截面 A、B、C 竖直方向的 $\Delta D/D$ 值分别为 0.23%、0.22%、0.16%;截面 D、E 在基坑开挖过程变形也很小,其 $\Delta D/D$ 值也不超过 0.05%。

处于坑底靠近地连墙的隧道(工况 B*、D*),其横截面最大的直径增加量发生在与竖直方向逆时针旋转一定角度的方向。工况 B* 中截面 A、B、C 最大的 $\Delta D/D$ 值分别为 0.28%、0.25%、0.18%,且均发生在竖直方向逆时针旋转约 12 度角的方向;截面 D、E 在基坑开挖过程变形很小。工况 D* 中截面 A、B、C 最大的直径改变也发生在竖直方向逆时针旋转约 12 度角的方向,其 $\Delta D/D$ 值分别为 0.21%、0.20%、0.15%,截面 D、E 在基坑开挖过程变形也很小,其 $\Delta D/D$ 值不超过 0.05%。

综上所述,三维数值模型中隧道各横截面中截面 A 在基

坑开挖过程的自身变形量最大,说明越靠近长度方向基坑中心面,隧道截面越接近平面应变状态;各种工况下隧道截面 B ($h_{ty} = 27$ m)的自身变形与截面 A 接近,说明在 $h_{ty} \leq 27$ m (3 倍的开挖深度)范围内,隧道的自身变形变化很少。截面 C ($h_{ty} = 45$ m)的自身变形相对于截面 A、B 已经大幅减小,说明在坑内距离地连墙的水平距离为 9 m (1 倍的开挖深度)的隧道截面其自身变形已经明显受到基坑空间效应的影响。截面 D、E 在开挖过程自身变形很小,说明坑外与地连墙的水平距离超过 9 m 的隧道截面其自身变形受基坑开挖的影响很小。

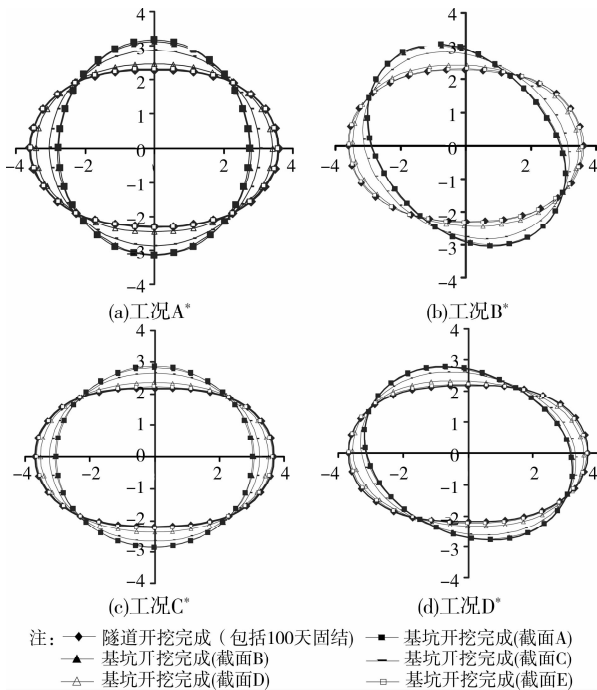


图 5 4 种工况下隧道管片各横截面在数值模拟进程的自身变形示意图 (变形放大系数 50; 单位: m)

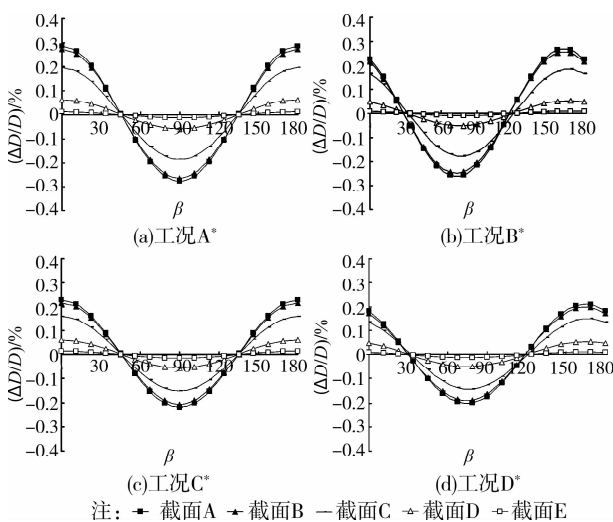


图 6 四种工况下隧道各横截面基坑开挖过程的自身变形图

2.2 隧道纵向变形分析

在岩石甚至在一些软岩非挤压地层的隧道中,沿隧道纵向发生的不均匀变形是很小的;但在沿海软土地区,施工活动会使隧道的纵向不均匀变形的大小及不均匀性达到不可

忽略的程度。本节在三维数值分析的基础上,以工况 A* 为例研究基坑开挖对坑底隧道纵向变形的影响。图 7 为隧道纵向轴线示意图。将隧道的顶部、左右端部及底部的轴线设为监测线,以方便对隧道的轴向变形进行研究。

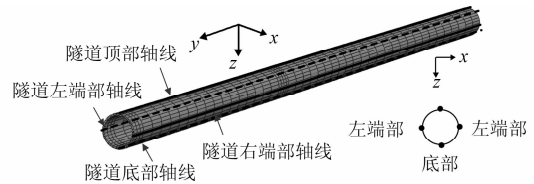


图 7 隧道纵向轴线示意图

图 8 为工况 A* 中基坑开挖引起的隧道纵向轴线的位移图。图中 u_1 、 u_2 分别表示水平及竖向位移, D 为隧道直径。 h_{ty} 表示隧道横截面距 y 方向基坑开挖中心面的水平距离 (见图 1(b))。点划线表示地下连续墙所在位置 ($h_{ty} = 54$ m)。

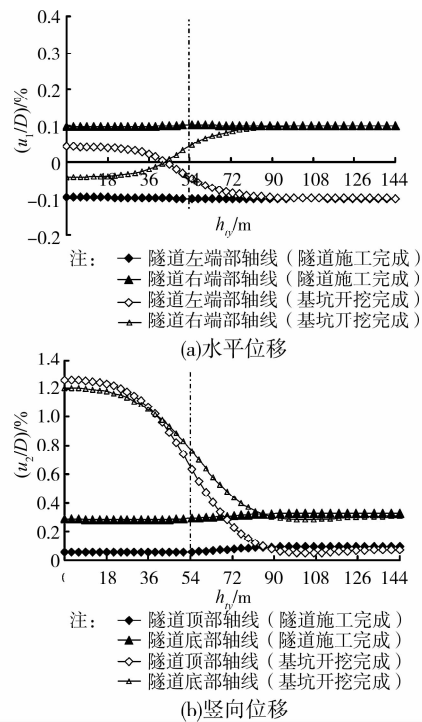


图 8 工况 A* 中基坑开挖引起的隧道纵向轴线的位移图

从图 8 可知,隧道开挖完成后 (包括 100 d 固结), 工况 A* 中隧道左端部轴线上移动, 右端部轴线上移动, 隧道的水平直径伸长; 隧道顶部与底部轴线均向上移动, 但底部轴线的竖向位移较顶部轴线要大, 隧道的竖向直径被压缩。基坑开挖过程, 坑内的隧道左右端部轴线的水平运动方向与隧道开挖完成后相反, 隧道的水平直径被压缩; 隧道顶部轴线的竖向位移较底部轴线大, 隧道的竖向直径伸长。基坑开挖引起的隧道左右端部轴线的水平位移及顶部与底部的竖向位移在 $h_{ty} \leq 18$ m (距 y 方向基坑中心面 2 倍的开挖深度) 的范围内基本不变, 从 $h_{ty} = 18$ m 开始, 隧道轴线的位移由于基坑的空间效应开始减小, h_{ty} 超过 54 m (地连墙所在位置), 位移迅速减小, 至 $h_{ty} = 81$ m (距地连墙的水平距离为 3 倍的开挖深度) 隧道轴线的位移已基本为零。由于隧道轴线的位移可以反映隧道横截面竖向与水平向变形, 数值分析得

到的隧道轴线位移随 h_{iy} 的变化规律与上节所得的隧道横截面的自身变形随 h_{iy} 的变化规律相似。

3 结 论

应用三维有限元方法对基坑开挖引起坑底不同位置隧道的响应进行了分析,重点着眼于以下 2 个方面:1)分析基坑开挖的空间效应对隧道横截面变形的影响;2)通过三维数值模型分析基坑开挖对隧道纵向变形的影响。通过对数值计算结果的分析,得出以下结论:

1)软土地区开挖宽度约为 3 倍开挖深度的矩形基坑中,处于坑底中心的隧道(隧道轴线与基坑长边平行),其靠近长度方向基坑中心横截面(截面 A)的最大直径改变发生在竖向与水平向,竖向伸长,水平向压缩。处于坑底靠近地连墙的隧道,其靠近长度方向基坑中心横截面(截面 A)的自身变形与同一深度处于坑底中心的隧道相似,但都绕垂直轴逆时针向坑内旋转了一定角度。

2)三维数值模型中坑底隧道各横截面中截面 A($h_{iy} = 9$ m)在基坑开挖过程的自身变形量最大,说明越靠近 y 方向基坑中心面,隧道截面越接近平面应变状态;隧道截面 B($h_{iy} = 27$ m)的自身变形与截面 A 接近,说明在 $h_{iy} \leq 27$ m 范围内,隧道各截面的自身变形变化很少。截面 C($h_{iy} = 45$ m)的自身变形相对于截面 A、B 已经大幅度减小,说明在坑内距离地连墙的水平距离为 9 m(1 倍的开挖深度)的隧道截面其自身变形已经明显受到基坑空间效应的影响。截面 D、E 受基坑开挖影响较小,说明坑外与地连墙的水平距离超过 9 m 的隧道截面其自身变形受基坑开挖的影响很小。

3)靠近基坑开挖中心面($h_{iy} = 0$)的隧道截面,开挖引起的上抬位移接近平面应变分析的结果,且在 $h_{iy} \leq 18$ m 范围内隧道各横截面的上抬位移基本相同;从 $h_{iy} = 18$ m 开始,隧道的位移开始减小, h_{iy} 超过 54 m(地连墙所在位置),隧道位移迅速减小, $h_{iy} = 81$ m(距地连墙的水平距离为 3 倍的开挖深度)时隧道横截面的上抬位移基本不受基坑开挖的影响。

参考文献:

- [1] Schroeder F C, Potts D M, Addenbrooke T I. The influence of pile group loading on existing tunnel [J]. *Geotechnique*, 2004, 54(6): 351-362.
- [2] Hu Z F, Yue Z Q, Zhou J, et al. Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(5): 933-948.
- [3] Burford D. Heave of tunnels beneath the Shell Centre, London, 1956-1986 [J]. *Geotechnique*, 1986, 38(1): 155-157.
- [4] Sharma J A, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16: 93-98.
- [5] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁站的变形控制研究 [J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 818-823. Gao M, Gao G Y, Feng S J, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 818-823.
- [6] Lo K Y, Ramsay J A. The effect of construction on existing subway tunnels—a case study from Toronto [J]. *Tunnels and Deep Space*, 1991, 6(3): 287-297.
- [7] Dolezalova M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28: 469-493.
- [8] Jia J. Study of controlling measures on the deflection of metro tunnels due to overlying excavation [J]. *Underground Construction and Ground Movement*, ASCE, 2006, 26 (Sup): 158-163.
- [9] Kasper T, Meschke G. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunneling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33: 234-247.
- [10] Zheng G, Wei S W. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(Sup2): 69-75.
- [11] 汪小兵, 贾坚. 深基坑开挖对既有地铁隧道的影响分析及控制措施 [J]. *城市轨道交通研究*, 2009, 5: 52-57.
- [12] 青二春. 地铁隧道上方大面积卸载下的变形及控制模式研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [13] 刘浩. 地下建构物上方卸荷的影响研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [14] Zheng G, Wei S W, et al. Centrifuge modeling of the influence of basement excavation on existing tunnel [J]. *Physical Modelling in Geotechnics*- Springman, Laue & Seward (eds), 2010, Taylor & Francis Group, London.
- [15] Gordon T C K, Ou C Y, Juang C H. Modelling of small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36, (1/2): 304-319.
- [16] Wroth C P. In situ measurement of initial stresses and deformation characteristics [J]. *Proc. Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties*, 1975, 2: 181-230.

(编辑 王秀玲)