

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.01.010

两明挖隧道基坑先后开挖对其下地铁隧道的影响评价

陈志平¹, 林本海^{1, 2}

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学地下工程与地质灾害研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 基坑开挖会对下卧运营地铁隧道的围岩应力造成重分布, 进而可能引发隧道结构产生变形及内力变化, 影响地铁隧道的正常运行。故一个合理的施工方案以及充足的保护措施对基坑开挖和隧道保护显得尤为重要。以广州某工程为例, 利用有限元软件 Midas GTS 模拟实际施工工况, 动态分析了两明挖隧道基坑先后开挖对其下卧地铁 5 号线隧道的影响。分析结果表明: 两明挖隧道基坑先后开挖所引起的叠加效应会对地铁 5 号线隧道结构造成影响, 但应力变化量均很小, 不足以对地铁隧道的结构安全性造成影响。其分析成果可为优化设计和施工提供有益的参考, 为类似工程提供借鉴。

关键词: 有限元; 叠加效应; 安全性; 施工工况

中图分类号: TU94+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 01-0063-06

Assessment of the Impact of Subway Tunnel under the Two Open-excavated Tunnel after Foundation Pit Excavation

CHEN Zhiping¹, LIN Benhai^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Research Center of Underground Engineering and Geological Hazard, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Foundation pit excavation will cause surrounding rock stress redistribution of the tunnel construction under the metro line, which could change deformation and internal force of the tunnel construction, thus affecting the normal operation of the subway tunnel. Therefore, a rational construction scheme and adequate protection of foundation pit excavation is of great significance as well as the tunnel protection. Taking a project in Guangzhou as an example in this paper, the model simulated the practical construction process and then also dynamic analysis on the affection of two open-excavated tunnels excavating successively on the tunnel construction under the metro line 5 by using large finite element software Midas-GTS. The results show that additive effect caused by the two open-excavated tunnels excavating successively will influence the force and deformation of the tunnel construction under the metro line 5, but its varieties of stress are very small, not enough to affect the structural safety of subway tunnel. The result provides valuable reference for design and construction. It is helpful to other similar projects.

Keywords: Finite element; Superimposed effect; Safety; Construction process

收稿日期: 2013-12-08

作者简介: 陈志平, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事地下工程研究。

E-mail: czp350875025@163.com.

0 引言

随着我国城市化进程的不断加快, 地铁在城市交通运营扮演着越来越重要的角色。自 1969 年北京首条地铁开通以来, 全国范围内已经有 19 个城市相继开通地铁, 其中 20 余座城市地铁正在建设中, 中国正迎来了地下空间开发的新时代。如果说 20 世纪是高楼大厦的年代, 那么 21 世纪必将是隧道及地下空间大发展的年代^[1]。然而随着地下空间的不断开发, 新建地下结构必然会对临近地铁隧道的运行带来一定的影响。因此, 研究基坑开挖对临近运行地铁的影响对城市的建设以及地铁隧道的保护具有重要意义。

目前, 国内外很多学者就基坑开挖对临近地铁隧道影响展开了许多研究。文献[2]以某已经营运地铁隧道上方基坑开挖为背景, 采用数值方法分析了基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道变形和应力的影响。文献[3]考虑基坑开挖引起的坑底和四周坑壁土体同时卸荷产生的影响, 提出了基坑开挖对临近地铁隧道纵向变形影响的两阶段分析方法。文献[4]以工程实例为依托, 利用有限元方法从基坑开挖的施工过程、基坑开挖的空间作用、盾构隧道等效刚度折算系数大小、隧道所处土层弹性模量大小等来研究基坑开挖对下方盾构隧道变形的影响。文献[5]通过有限元软件模拟不同的施工方法、隧道埋深、连续墙入土深度、连续墙厚度及底板厚度、地基土改良和二维与三维之间的对比, 分析了基坑开挖对下卧隧道产生的位移和内力的影响, 得出了相应的规律。

然而, 众多学者大部分研究都集中于单个基坑开挖对其下或其侧隧道的影响, 对于两个基坑或多个基坑先后开挖或同时开挖对其下或其侧隧道的影响的研究比较鲜见。本文以实际工程为例分析了两明挖隧道基坑先后开挖对其下卧地铁隧道的影响。为了模型更贴近实际情况, 本模型沿地铁影响范围建立且充分考虑基坑周边环境的差异以及不同分段处的支护形式和开挖深度的变化, 对车行隧道基坑及电力管沟隧道基坑先后开挖对邻近地铁 5 号线的施工影响进行了全过程的模拟分析, 分析得出各个工况下隧道的水平位移, 垂直位移, 总位移, 结构轴力以及支护结构的位移, 依据相应规范^[6]对基坑支护方案进行评估, 以保证基坑开挖和地铁隧道运行的安全。

1 工程概况

花城大道东延线车行隧道和电力管沟隧道工

程项目, 位于广州市天河区珠江新城东侧潭村至员村的花城大道东延长线的沿线上。两项目均采用明挖基坑法施工。拟建车行隧道下穿华南快速路, 受华南快速路桥墩的影响, 闭口段分左右幅设计左线全长 664.194 m, 右线全长 702.205 m, 其中闭口段全长 240 m, 已投入运营的广州地铁五号线盾构区间隧道从其下方穿过, 车行隧道基坑深度 1.0~10.0 m, 泵房基坑深度约 13.65 m, 车行隧道基坑距地铁隧道净间距为 9.0~20.0 m。该基坑除东段下坡段尚未施工完成, 其他主体结构现已完工。车行隧道南侧开挖一电力管沟隧道基坑, 拟建电力管沟隧道西端起始端与已建珠江新城电缆隧道连接(对应道路中心线里程为 K0+014.70)。自西向东依次下穿潭村涌、华南大桥北引桥等重要地段, 沿花城大道东延线和地铁五号线走向铺设, 整体位于地铁五号线南侧边附近或上方。东端设在花城大道东延线工程终点的道路中间绿化带位置(对应道路中心线里程为 K0+914.30), 全长约 900 m。同时在隧道的东端和西段各设置一个工作井。该电力管沟处于已经运营的地铁五号线隧道的保护范围以内, 电力隧道基坑底距地铁隧道净间距为 8.0~17.0 m。

电力管沟的基坑工程平面几何形状属于长条形的基坑, 基坑东西长约 900 m, 基坑南北宽度大部分为 6 m 左右, 局部位置加宽至 9.4~15.8 m; 基坑开挖深度为 5.3~9.0 m, 纵向坡度 0.5%~3.0%; 电力管沟东西两端各设置一个工作井, 开挖深度分别为 11.35 m 和 8.05 m。具体位置见图 1。

花城大道车行隧道支护结构及部分主体结构已经竣工。因此, 在车行隧道范围内, 可充分利用已竣工的构筑物作为电力管沟隧道基坑北侧支护结构。车行隧道闭口段顶板和华快桥下车行隧道基坑支护桩还可以作为基坑内支撑的支点。车行隧道开口段侧墙由于是悬臂受力结构, 对应位置的基坑应采用悬臂支护形式。同时, 鉴于上述电力管沟基坑长度超长, 不仅地质条件变化差异大, 而且沿隧道两侧的环境差异也较大。因此, 对电力管沟基坑支护进行分段优化设计, 采用不同的支护形式, 具体支护形式详见图 1。场地岩土工程特性和岩土设计参数取值见表 1。

2 有限元几何模型的建立

地铁五号线隧道为盾构隧道, 隧道衬砌外径 6 000 mm, 内径 5 400 mm, 建筑限界 φ 5 200 mm, 衬砌环宽度 1 200 mm, 厚度 300 mm, 楔形量 41

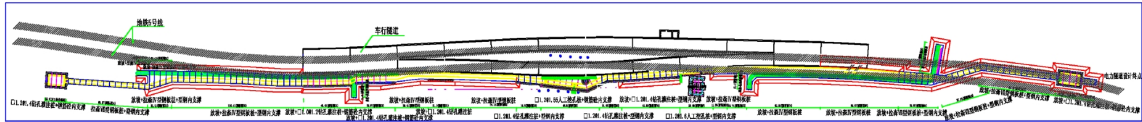


图 1 基坑平面图

Fig. 1 The foundation pit floor plan

表 1 场地岩土工程特性和岩土设计参数建议值表

Table 1 The characteristic of geotechnical engineering and geotechnical design parameters recommended value table

土层名称	重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	变形模量 $E(\text{MPa})$	泊松比 μ	含水量 $W(\%)$	凝聚力 $C(\text{kPa})$	内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	侧压力系数
人工填土(稍压实)	17.0	8	0.38	22	10	8	0.61
淤泥、淤泥质土(流塑)	16.5	2	0.45	55.2	7	6	0.72
粉质粘土(可塑)	19.0	25	0.32	15	20	19	0.47
残积粉质粘土(可塑)	19.0	25	0.32	15	20	19	0.47
残积粉质粘土(硬塑)	20.0	40	0.30	17	35	25	0.45
全风化泥质粉砂岩(坚硬土状)	20.0	50	0.28	15	45	26	0.43
强风化泥质粉砂岩(半岩半土状)	20.5	120	0.25	22	60	28	0.33
混凝土	25	31 000	0.15				
型钢	78.5	206 000	0.20				

mm, 最小回转半径 175 mm, 采用右转弯楔形衬砌环[Y]作为通用环的组合形式, 通过在 360°范围内旋转衬砌环以拟合隧道曲线。衬砌环由一块封顶块(夹角 15°)、两块邻接块(夹角 64.5°)、三块标准块(夹角 72°)组成, 封顶块位于楔形量最小位置, 封顶块、邻接块及标准块均采用钢筋混凝土制作。管片环采用错缝拼装, 管片可以出现通缝, 但通缝环最多两环。拼装时, 封顶块先径向搭接 2/3, 径向推上, 然后纵向插入, 衬砌环间错缝拼装。

封顶块、邻接块与标准块环向面上设 M24 接头螺栓 2 只, 邻接块与标准块纵向面上设 M24 接头螺栓 2 只, 所有螺栓机械强度等级 6.8 级。

根据本项目电力管沟基坑支护设计的平、剖面图及其与地铁五号线隧道的空间关系, 选取的分析模型边界为基坑边线外三倍基坑深度范围, 最终确定分析模型的规模大小(长×宽×高)为 961 m×102 m×41 m, 考虑岩土体为空间半无限体, 以及基坑的影响范围一般为 3~5 倍基坑深度, 分析模型以外岩土体不再考虑变形的影响, 即设定为固定边界。对模型底部约束 Z 方向位移, 模型前后约束 Y 方向位移, 左右面约束 X 方向位移。对地面活动荷载按 20 kN/m² 考虑。同时按城-A 级汽车荷载等级考虑花城大道下沉道路隧道顺轮胎着地宽度对地铁隧道的最不利影响, 将地面车辆荷载对地铁盾构隧道的作用简化为静力荷载, 施加在车行隧道路面上。建立的整体三维有限元数值分析计算模型如下图 2、3。

2.1 本构关系选择

考虑土体应力-应变关系的非线性, 本文土体采用德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)屈服准则。

2.2 施工工况模拟

根据电力管沟基坑支护设计图, 结合基坑施工的工况顺序, 在对分析的计算模型施加场地初始地应力和确定地铁隧道结构后, 进行初始位移场和初始应力场的清零。然后再进行花城大道下穿华快的车行隧道的明挖基坑施工、电力管沟基坑明挖开挖和内支撑结构施工。因此主要对地铁隧道产生影响的三维模拟工况流程共分 5 步, 为:

- (1) 施工花城大道车行隧道基坑开挖, 首先得到对地铁隧道的影响结果。
- (2) 电力管沟隧道基坑土方的第一步开挖至冠梁底(-1.5 m)并施工冠梁和内支撑。
- (3) 电力管沟隧道基坑土方的第二步开挖至冠梁底(-3.0 m)并施工冠(腰)梁和内支撑。
- (4) 土方第二步开挖至基坑底(-6.0 m、-7.8 m 和 -9.0 m)。
- (5) 1# 工作井开挖至基坑底(-11.35m)。

3 数值分析结果

由上述基坑开挖的各工况分别计算分析的结果整理得到如下的有关结果, 见表 2、3。基坑开挖至基坑底地铁隧道结构的总位移, 基坑支护结构最大位移, 隧道的轴力、弯矩云图详见图 4~9。

- (1) 由表 1 可知, 因基坑开挖卸载作用使得土压力减小造成坑底土体的回弹隆起, 自然引起

地铁隧道的微量隆起，计算分析得到地铁隧道的最大垂直隆起位移为 6.025 mm(垂直位移为正表示隧道向上隆起)，发生部位为车行隧道下坡段。这个结果包含车行隧道引起地铁隧道的隆起位移

4.025 mm 和本次电力隧道基坑开挖造成的隆起位移 1.972 mm 结果的叠加量。

(2) 基坑开挖导致地铁隧道结构最大轴力由开挖前的-1 124.68 kN/m 减少至开挖后的-1

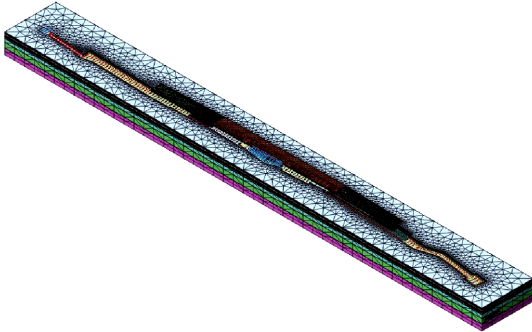


图 2 三维有限元模型
Fig.2 Three-dimensional finite element model

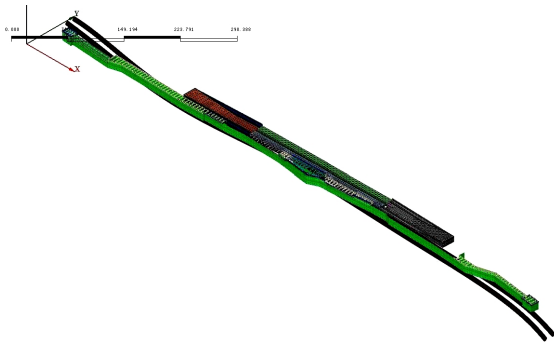


图 3 电力管沟基坑支护结构与车行隧道、地铁隧道的有限元三维轴视图
Fig.3 The finite element three-dimensional axial view of power pipeline foundation pit supporting structure and the dealership in tunnel, subway tunnel

表 2 地铁隧道结构及电力管沟基坑支护结构最大位移变化汇总表(mm)
Table 2 Subway tunnel structure and power pipeline summary table of the maximal displacement change of foundation pit supporting structure (mm)

计算工况	地铁隧道结构最大位移			基坑支护结构最大位移
	水平位移(DXY)	竖向位移(DZ)	总位移(DXYZ)	水平位移(DY)
车行隧道施工	1.332	4.053	4.090	/
第一次土方开挖并施工内支撑	1.358	4.174	4.213	4.183
第二次土方开挖并施工内支撑	1.471	4.346	4.431	9.034
第三次土方开挖至基坑底	2.382	6.023	6.257	40.531
1# 工作井开挖至基坑底	2.383	6.025	6.258	45.223
地下水位下降到基坑底	2.532	3.453	4.022	48.584

注：DZ 为“-”表示地铁隧道发生沉降，“+”表示地铁隧道发生隆起

080.07 kN/m，轴力减少了 144.61 kN/m；隧道结构最小轴力由开挖前的-24.14 kN/m 增加至开挖后的 138.06 kN/m，轴力增加了 113.92 kN/m。隧道管片属偏压构件，较小的轴力变化对隧道管片内力影响不明显，不会对隧道结构造成不利影响。

地铁隧道的最大弯矩变化量由开挖前的-33.94

kN·m/m 增加至开挖后的-37.01 kN·m/m，弯矩增加了 3.07 kN·m/m，仅占此处原始弯矩的 9%，弯矩增量较小且隧道处于较小的受力状态，不会对隧道结构造成不利影响。

同时，因地铁隧道围岩为全风化泥质粉砂岩，总体的工程力学性质较好，地铁隧道管片的结构

表 3 电力管沟基坑开挖前后地铁隧道结构受力变化汇总表

Table 3 The summary table of subway tunnel structure changes before and after power trench excavation

计算工况	隧道结构受力情况	
	xx 方向	yy 方向
基坑开挖前隧道最大/最小轴力(kN/m)	-1 224.68/-24.14	-1 231.81/-56.82
基坑开挖后隧道最大/最小轴力(kN/m)	-1 080.07/138.06	-1 098.70/122.02
基坑开挖前后隧道轴力变化量(kN/m)	-1 44.61/113.92	-133.11/66.84
基坑开挖前隧道最大/最小弯矩(kN·m/m)	33.15/-33.94	32.56/-37.68
基坑开挖后隧道最大/最小弯矩(kN·m/m)	34.51/-37.01	32.91/-39.60
基坑开挖前后隧道弯矩变化量(kN·m/m)	0.36/3.07	0.35/1.92

注：内力的" + "、" - " 与大小无关，只表示方向。内力变化量的" + " 表示内力增加；" - " 表示内力减少。

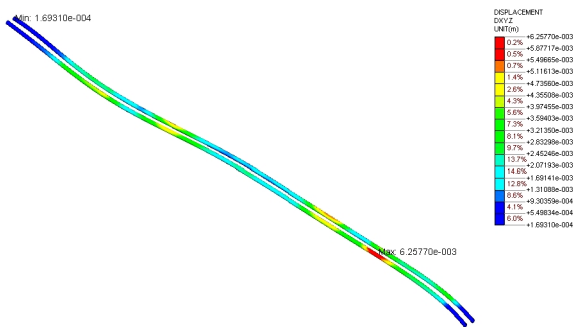


图 4 开挖至基坑底地铁隧道结构的总位移图

Fig.4 The total displacement diagram of metro tunnel structure with excavating to the bottom

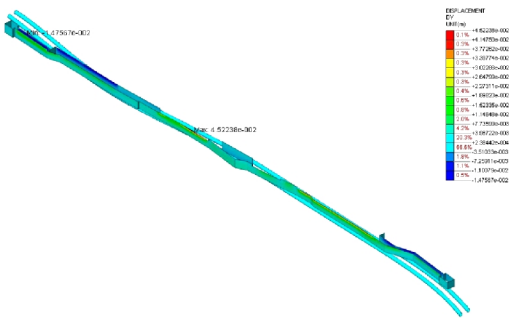


图 5 开挖至基坑底基坑支护结构最大位移图

Fig.5 The maximum displacement diagram of supporting structure of foundation pit with excavating to the bottom

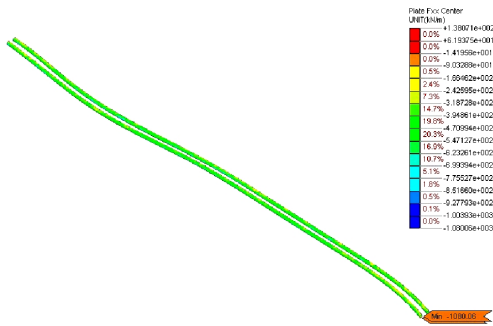


图 6 开挖至基坑底地铁隧道结构轴力 F_x 图

Fig. 6 The axial force F_x diagram of metro tunnel structure with excavating to the bottom

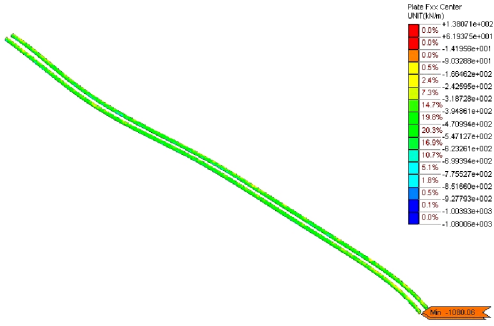


图 7 开挖至基坑底地铁隧道结构轴力 F_y 图

Fig. 7 The axial force F_y diagram of metro tunnel structure with excavating to the bottom

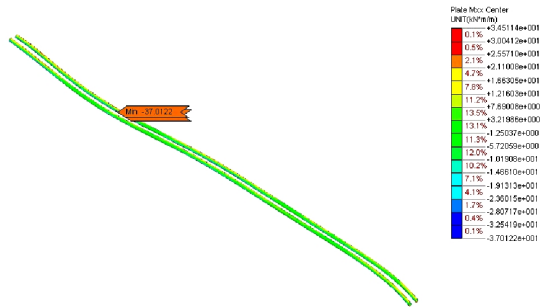


图 8 开挖至基坑底地铁隧道结构弯矩 M_x 图

Fig.8 The moment M_x diagram of metro tunnel structure with

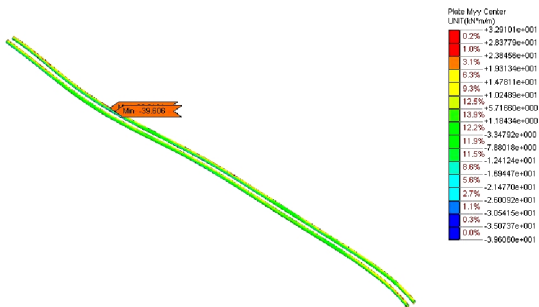


图 9 开挖至基坑底地铁隧道结构弯矩 M_y 图

Fig.9 The moment M_y diagram of metro tunnel structure with excavating to the bottom

也有较大的整体刚度,因此电力管沟基坑开挖不会对地铁隧道结构的应力产生明显改变。

总之,电力管沟基坑开挖对地铁五号线的隧道结构造成的应力变化也是微量的,可以认为地铁隧道结构在基坑开挖过程中是安全的。

3 地铁隧道结构的相对曲率半径变化

由于前面已将地铁隧道沿电力管沟基坑全长各点的位移分析计算求得,因此分别将隧道水平位移和垂直位移时的地铁隧道中部的最大位移,及两侧的最小位移提取出来,可利用作图法,将经过这三点的弧线圆画出。此时即可得到隧道变形的相对曲率半径。

电力管沟全长约 900 m,取地铁隧道变形量最大的一段即由下穿华快行隧道和电力管沟基坑叠加作用的一段进行分析,该段长 141 m。地铁隧道的中部的最大水平位移为 2.382 3 mm,隧道两端的水平位移分别为 0.894 0 mm、1.3397 mm。隧道中部的最大垂直位移为 6.024 14 mm,隧道两端的垂直位移分别为 3.146 4 mm、2.397 3 mm。最后得到地铁隧道的最不利影响状态下的最小曲率半径:水平方向隧道变形曲率半径为 6 147 km,垂直方向隧道变形曲率半径为 764 km(水位在地表面附近)。

由此可见,由电力管沟基坑开挖引起的地铁五号线隧道变形的曲率半径远大于地铁隧道保护条例规定^[6]的最小曲率半径 15 000 m。

4 结语

通过三维有限元数值模拟和对计算结果的分析,认为虽然花城大道东延线(首期)工程电力管沟的基坑施工会对地铁五号线隧道结构造成变形和受力产生影响,但其变化量均很小,不足以对地铁隧道的结构安全性造成影响。

但鉴于在进行三维有限元数值模型建立时所作的假设和适当的简化,为确保本电力管沟基坑施工时地铁五号线隧道结构的安全及正常运营,给出注意事项和建议如下:

(1) 本分析的假定为车行隧道已经全部完工,但由于车行隧道东段尚未施工进行中,因此该段电力隧道的施工还是与车行隧道的施工分开进行施工,以符合分析假定;同步施工振动的叠加效应可能会增强。

(2) 电力隧道基坑施工应避免引起较大的振动,支护桩的施工应严格限制使用冲孔成桩,建

议采用非振动的旋挖成桩;钢板桩的施工也不得使用锤击或振动压桩,建议使用静压法成桩。

(3) 有限元三维动态施工模拟过程将开挖和支撑施工放在同一工况,但实际施工过程中这两个工况是有一定的时间差,因此为了较好的控制基坑位移,基坑土方开挖到内支撑设计标高后应及时施工内支撑,切不可超挖。

(4) 由计算分析可知,若地下水不发生明显下降,则隧道的位移大部分是来自基坑开挖卸土发生隆起的影响,待电力管沟结构砼浇筑完成及地下电力管沟施工完后,结构重度对基坑底土体的反压作用,使得隆起土体产生回降,此时地铁隧道的隆起位移值也有所减小,隧道内力也往趋于其初始值方向变化,这对隧道安全性是有利的。因此,应对基坑支护的止水效果加以重视,在基坑开挖过程中应尽量不造成地下水位的变化,做好止水帷幕可能渗漏时的封堵处理和应急处理。对地下水位的变化也应加强监测。

同时要做好基坑的施工组织,缩短总体施工时间尽快实现基坑回填。即在施工时应尽量减少坑底暴露时间,对垫层浇注、底板钢筋绑扎和混凝土浇注的时间也需严格要求,基坑开挖到底时应加快施工进度,尽量缩短基坑施工与后续主体结构施工的间歇期,尽早浇筑底板和主体结构,尽量缩短对地铁隧道施工扰动时间。

(5) 由于基坑围护结构的侧向位移及坑底隆起与紧邻的地铁隧道区间结构的水平侧向与隆起位移密切相关,因此建议电力管沟基坑开挖过程中还应加强对地铁隧道结构的变形监测工作,必要时可根据监控信息调整基坑支护结构的施工方案和施工步骤。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 21 世纪是隧道及地下空间大发展的年代[J]. 西部探矿工程, 2000, 12 (01): 7-8.
- [2] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (S1): 109-115.
- [3] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (07): 2085-2092.
- [4] 汪彬彬. 基坑开挖对下方盾构隧道变形的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [5] 师晓权. 基坑开挖对下卧隧道影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] 上海市市政工程管理局. 上海市政法(94)第 854 号上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S]. 上海: 上海市市政工程管理局, 1994.