

DOI: 10.11779/CJGE2014S2068

深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析

左殿军^{1, 2}, 史林³, 李铭铭¹, 纪文栋¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;

3. 深圳市岩土工程有限公司, 广东 深圳 518028)

摘要: 基于招商银行深圳分行大厦深基坑开挖工程, 考虑隧道衬砌与土的相互作用, 采用 ABAQUS 数值模拟研究了基坑开挖对邻近地铁隧道的影响。计算分析结果表明: 基坑开挖对邻近地铁盾构区间产生一定影响, 但影响程度较小, 沉降与位移值均在规范要求范围之内; 地表沉降、隧道衬砌位移随基坑开挖深度加深逐渐变大, 在内支撑间距离较大时, 沉降与位移增加速率较大; 考虑衬砌与土的相互作用, 隧道的水平位移值明显低于支护桩, 基坑开挖对大直径管道影响计算分析中, 应考虑管-土的相互作用。

关键词: 深基坑开挖; 地铁隧道; 衬砌-土相互作用; 数值计算分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0391-05

作者简介: 左殿军(1983-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 工程师, 主要从事软土地基加固处理技术、重金属污染土治理与控制技术方面的研究。E-mail: zdj647@163.com。

Numerical analysis of influence of deep excavations on adjacent subway tunnels

ZUO Dian-jun^{1, 2}, SHI Lin³, LI Ming-ming¹, JI Wen-dong¹

(1. Geotechnical Engineering Research Center, Tianjin Research Institute for water transport engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shenzhen Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518028, China)

Abstract: Based on the deep excavation of the building of Shenzhen Branch of China Merchants Bank, considering the interaction between soils and tunnel linings, the impact of excavation on the adjacent subway tunnels is studied by using the finite element software ABAQUS. The calculated results indicate that the influence of foundation excavation on the adjacent subway shield zone is small, and the surface settlement and displacement of values linings are in the limited range. The surface settlement and tunnel lining displacement become larger with the deeper excavation, which have a higher growth rate with the larger distance between the inner support. The horizontal displacement of tunnels is significantly lower than that of the retaining piles considering the interaction between soils and linings. Therefore, the pipe-soil interaction should be considered when analyzing the impact of excavation on large-diameter pipes.

Key words: deep excavation; subway tunnel; lining-soil interaction; numerical analysis

0 引言

随着城市建设的快速发展, 基坑开挖导致相邻建筑物开裂、道路塌陷、管线破裂等一系列严重影响社会的事件屡见不鲜。其本质在于基坑开挖破坏了岩土介质原有的应力平衡状态, 不可避免地对周围地层产生扰动, 引起地表沉降和地层移动, 进而对相邻建(构)筑物、道路及地下管线产生不利影响。因此, 深基坑开挖对邻近管线的影响已成为基坑开挖必须研究的一个重要课题^[1-2]。

孔祥鹏等^[3]研究了明珠二号线上海体育馆地铁站穿越施工对地铁一号线车站的影响, 认为施工穿越破坏了原有土体应力平衡, 对老车站的地基土体产生

了扰动, 会引起车站的新的不均匀沉降; 段绍伟等^[4]采用非线性有限元方法研究了深基坑开挖对邻近地下管线破裂的影响, 当地表最大沉降量达到一定值时, 将会引起地下管线的竖向拉裂破坏, 当支护墙体侧向挠度达到一定值时将会引起地下管线的水平拉裂破坏; 杜金龙等^[5]研究了管径大小对地下管线的影响, 认为当管径小于 400 mm 时, 管线基本与土体具有相同的位移; 管径大于 400 mm 时, 应考虑管-土相互作用; 魏纲^[6-7]对杭州市延安路地下通道基坑工程沉降数值模拟与现场观测分析, 表明当盾构隧道在基坑下方

时,开挖卸载导致隧道上方压力减小,使隧道产生竖向隆起(上浮),在基坑开挖结束时隆起达到峰值;郑刚等^[8-9]根据实际工程研究了基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响,提高各加固参数能减小箱体轨道上抬及变形缝处的箱体间差异变形,但其加固效果却随着参数的增加而减弱;姜兆华等^[10]根据重庆临江门岩质深基坑开挖数值模拟计算结果,认为受连续介质及隧道几何形态的影响,隧道会改变位移场传递的方向,并且垂直方向改变大于水平方向,隧道主要表现为横向变形,隧道具有明显的偏压效应;胡琦等^[11]研究了软黏土地基中深基坑开挖土体扰动对地铁隧道受力变形的影响,当基底土受到扰动,围护结构与邻近的地铁隧道结构受力变形均会呈现出加速发展的趋势,直至发生破坏。针对深基坑开挖全过程施工对地铁盾构隧道的影响研究相对较少,同时,不同于小直径管线,地铁盾构隧道直径较大,计算中应考虑衬砌与土的相互作用。

基于以上,本文根据招商银行深圳市分行基坑开挖工程,考虑隧道衬砌与土的相互作用,采用数值模拟研究了基坑开挖施工对已建地铁 3 号线盾构隧道的影响,分析了区间隧道基坑支护结构受力与变形,隧道顶部地表沉降,衬砌位移随基坑开挖深度的变化趋势。

1 工程概况

1.1 基坑支护结构总体布置

招商银行深圳市分行基坑开挖项目位于深圳市福田区中心区鹏程一路与深南大道交汇处东北侧;东侧面南半段紧挨着深圳地铁 3 号线福田车站、东侧面北半段为已完工的少年宫—福田双线盾构轨道区间,南侧为深南大道辅道;西侧为鹏程一路;北侧为建设银行待建用地。

图 1(a)为基坑开挖支护结构平面布置图,图 1(b)为地铁盾构区间基坑支护结构典型剖面图。如图 1 所示:①基坑东西向开挖宽度约 69 m,南北向开挖宽度约 95 m,基坑设计开挖深度 20.75 m,基坑支护采用围护结构+三道钢筋砼内支撑的桩撑,紧邻地铁盾构隧道区间段采用旋挖咬合桩+三道内支撑结构体系;②基坑开挖施工先进行支护桩、截水帷幕等施工;开挖至第一道支撑底及坑内降水,浇筑第一道支撑;待第一道支撑体系强度达到设计强度的 80%后,对称开挖至第二道支撑底及坑内降水;第二、三道支撑施工与第一道支撑相同,最后开挖至基坑底及坑内降水;③地铁隧道中心标高-15.14 m,外径 6.62 m,隧道衬砌采用 C60 钢筋混凝土,厚度 0.3 m,隧道距离基坑

支护结构边缘 6.658 m。点 C1~C3 为本文数值模拟结果提取布置点,其中 C1 点位于地表,距离支护结构边缘 9.968 m,C2、C3 点分别位于 3 号线①、②隧道衬砌顶部。表 1 基坑支护各构件设计尺寸表。

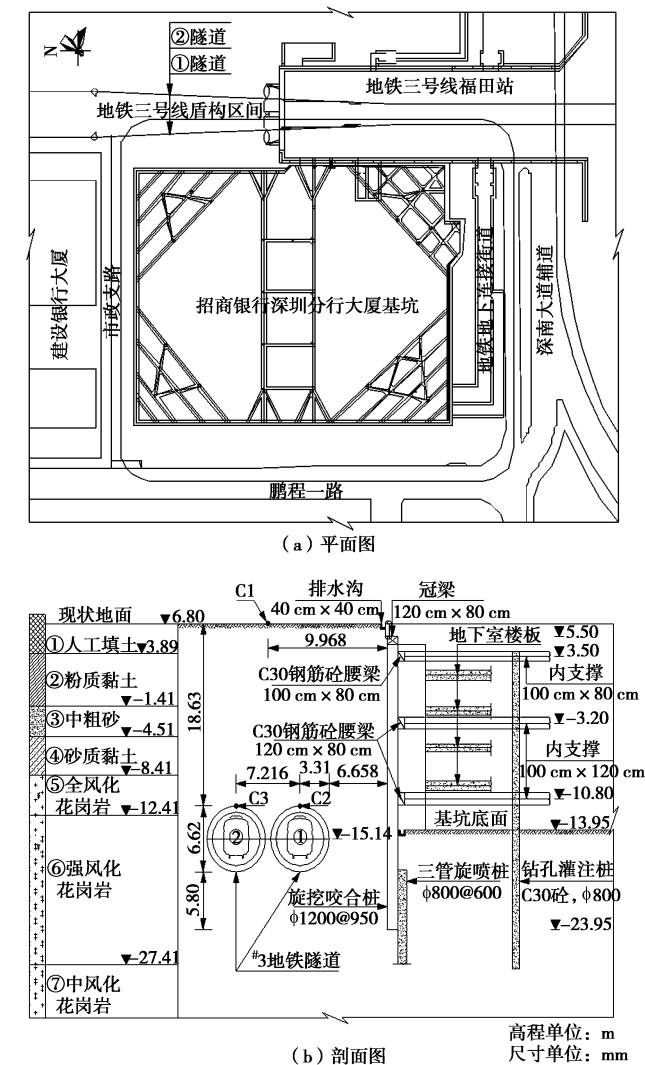


图 1 基坑支护结构布置图

Fig. 1 Layout of supporting structure of foundation pit

表 1 基坑支护结构各构件设计参数表

Table 1 Design parameters of supporting structure

序号	腰梁		对撑、斜撑、联系梁		立柱桩
	高 H/mm	宽 B/mm	高 H/mm	宽 B/mm	直径 D/mm
①	800	1000	800	1000	800
②	800	1200	1000	1200	800
③	800	1200	1000	1200	800

1.2 工程地质条件

基坑地基土层分布如下:①6.80~3.89 m,人工填土;②3.89~-1.41 m,粉质黏土;③-1.41~-4.51 m,中粗砂;④-4.51~-8.41 m:砂质黏土;⑤-8.41~-12.41 m,全风化花岗岩;⑥-12.41~-27.41 m,强风化花岗岩;⑦-27.41~未揭穿,中风化花岗岩,表 2

总结了地基各土层物理力学指标。

表 2 各土层物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indices of soils					
编号	密度 (g·cm ⁻³)	渗透系数 (cm·s ⁻¹)	变形模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 (°)
①	1.90	5.5×10 ⁻⁵	10	12	10
②	1.90	8.0×10 ⁻⁶	12	20	15
③	2.00	6.0×10 ⁻³	17	—	25
④	1.95	4.2×10 ⁻⁵	19	25	20
⑤	2.00	9.0×10 ⁻⁴	35	35	25
⑥	2.00	2.0×10 ⁻⁴	60	—	—
⑦	—	2.0×10 ⁻⁴	—	—	—

2 三维数值模型的建立

2.1 模型尺寸及计算参数选取

为避免模型边界条件约束对计算结果产生较大的影响，结合基坑的开挖深度、周边建（构）筑物的布置，基坑支护结构边线距离模型边界约为 100 m，以开挖深度 20.75 m 计算，距离模型边界约为 5 倍开挖深度。因此，计算区域为 270 m×295 m×50 m。

图 2 为基于 ABAQUS 有限元软件数值计算模型图，模型坐标原点位于基坑支护结构几何中心处，围护结构及地铁隧道衬砌采用 shell 单元，支撑采用 beam 单元，地基土体采用三维十节点协调单元（C3D10I），共建立 78568 个单元，84576 个节点。模型四周限制水平方向的位移，底部同时限制水平和竖直方向的位移。

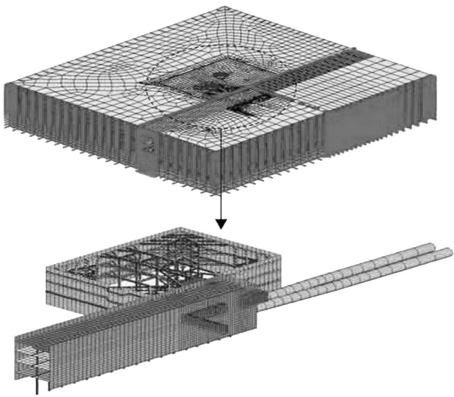


图 2 基坑支护结构与地铁隧道数值计算模型

Fig. 2 Numerical model for supporting structure and tunnel

土体、支护结构、地铁隧道衬砌本构模型均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。土层计算参数采用表 2 数值，其他结构数值计算参数如表 3 所示。衬砌与土体，桩 - 土接触模型采用面 - 面有限滑移计算模型^[12]，摩擦角按下式计算：

$$\delta = \tan^{-1}(\sin \varphi \cdot \cos \varphi / (1 + \sin^2 \varphi)) \quad , \quad (1)$$

式中， φ 为土体内摩擦角。

表 3 数值模拟计算参数表

Table 3 Numerical parameters of supporting structure					
名称	密度 (g·cm ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa
支护桩	2500	30	0.2	25	11.54
支撑	2500	30	0.2	25	11.54
立柱桩	2500	30	0.2	25	11.54
衬砌	2500	30	0.2	25	11.54

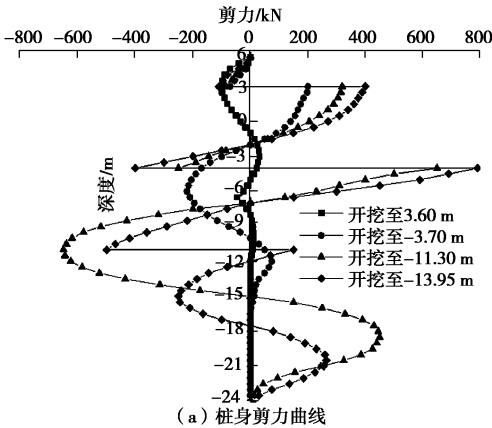
2.2 数值计算过程

- (1) 生成地铁隧道及基坑开挖初始网格、建立初始计算模型，并在边界处施加位移约束边界条件，在初始应力及孔隙水压力条件下进行迭代计算使系统达到初始应力平衡。
- (2) 施工支护结构、立柱、立柱桩及截水帷幕。
- (3) 开挖第一层土及降水，施工第一道支撑。
- (4) 开挖第二层土及降水，施工第二道支撑。
- (5) 开挖第三层土及降水，施工第三道支撑。
- (6) 开挖第四层土、基坑开挖到底及降水。

3 结果分析

3.1 地铁盾构区间基坑支护桩受力与变形分析

图 3 为地铁盾构区间基坑支护结构支护桩的受力与变形沿桩身变化曲线。从图中可以看出，随着基坑开挖深度逐渐加深，基坑支护桩受力与变形逐渐增大，在内支撑设置处，支护桩桩身剪力分布出现突变。基坑开挖至 -3.70 m 时，支护桩受力与变形急剧增大；开挖至坑底时，第二道支撑处剪力值最大，为 753.5 kN；第二道支撑与第三道支撑之间弯矩值最大，为 1180 kN·m；咬合桩桩顶水平位移值 7.05 mm，桩顶以下 13.8 m 处水平位移值最大，为 14.57 mm，约为基坑开挖深度 0.07%。分析其主要原因在于，基坑中下段第二道支撑与第三道支撑间距较大，地基土层主要为砂质黏土，基坑开挖至该土层时，围护结构后土体产生的主动土压力比较大。



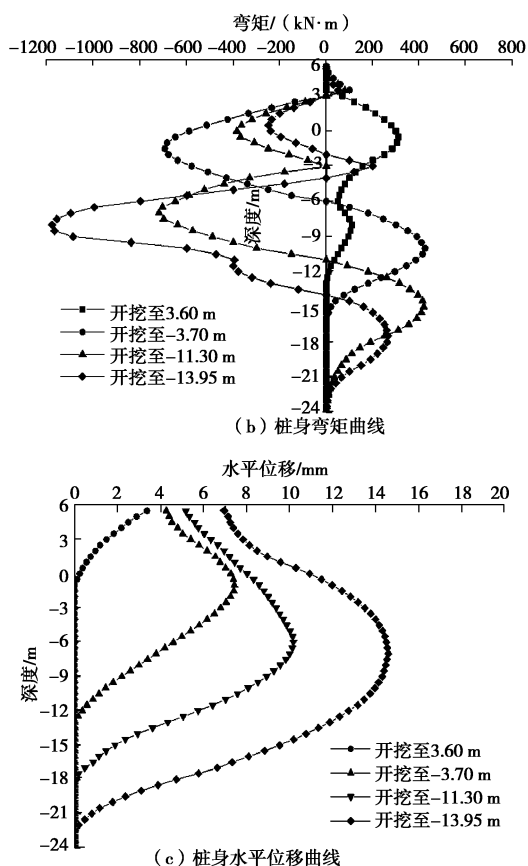


图3 地铁盾构区间支护桩水平位移、剪力、弯矩变化曲线

Fig. 3 Curves of horizontal displacement, shear and bending moment of supporting piles of foundation pit adjacent to subway tunnel

3.2 地铁盾构区间地表沉降分析

图4为地铁盾构区间地表沉降(C1点)随基坑开挖深度变化曲线图。从图中可以看出,地铁盾构区间地表沉降随基坑开挖的深度增加逐渐变大,地表沉降最大值14.55 mm,约为基坑开挖深度0.07%。基坑开挖到3.60, -3.70, -11.30, -13.95 m时,地表沉降值分别为4.25, 7.42, 13.56, 14.55 mm,第二道支撑开挖至第三道支撑底部地表沉降速率最大,数值模拟计算结果比实测值大12%~15%。其原因在于:基坑开挖对地基土层产生扰动,周围土体水平应力动态卸载,不可避免产生地表沉降,与其他支撑间距相比,第二道支撑开挖至第三道支撑间距较大,应力卸载量大,其引起地表沉降速率也相应会变大。

3.3 地铁盾构区间衬砌位移分析

图5为地铁盾构隧道衬砌(C2、C3点)位移随基坑开挖深度变化曲线图。如图5所示,地铁盾构隧道衬砌位移随基坑开挖深度变大逐渐增大。开挖至坑底时,距离基坑边缘距离较近的①号隧道衬砌竖向和水平向位移最大值分别为5.13 mm, 7.30 mm; 较远的②号隧道衬砌竖向和水平向位移最大值分别为3.24 mm, 4.20 mm; 说明邻近深基坑开挖对3号线地铁盾

构隧道产生一定影响,但影响程度较小;比较而言,距离基坑距离较近的隧道衬砌受到影响程度略大。基坑由第二道支撑开挖至第三道支撑底部时,隧道衬砌位移增加速率最大,这与支护结构咬合桩桩身水平位移变化趋势一致。同时,考虑隧道衬砌与土的相互作用,隧道衬砌水平位移值明显小于支护桩,与实测值对比,C2点水平位移、竖向位移数值计算值分别大5%, 11%; C3点水平位移、竖向位移数值计算值分别大3%, 7%,误差较小;两者反映基坑开挖引起隧道衬砌位移变化趋势具有一致性,说明在基坑开挖对地下管线的影响分析中,当管道直径较大时,应考虑管-土相互作用。

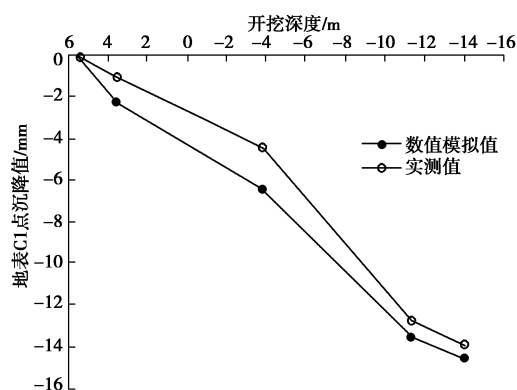


图4 地铁盾构区间地表沉降变化曲线

Fig. 4 Curves of surface settlement adjacent to subway tunnel

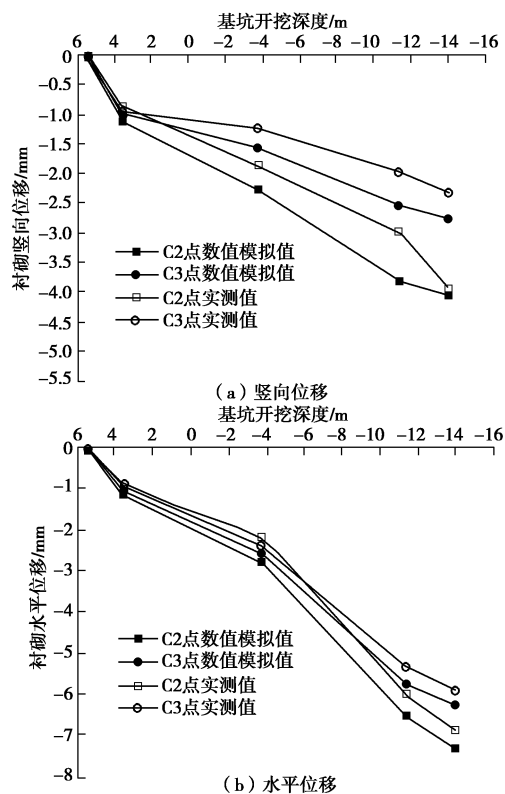


图5 地铁盾构隧道衬砌位移变化曲线

Fig. 5 Displacements of shield tunnel lining

4 结论及建议

(1) 深基坑开挖支护结构受力与变形随开挖深度的增大逐渐变大, 桩身水平位移、弯矩最大值出现在支撑间距较大区间, 桩身水平位移最大值约为开挖深度的 0.07%, 在基坑设计中应合理布置内支撑间距。

(2) 基坑开挖对邻近地铁盾构区间产生一定影响, 但影响程度较小, 沉降与位移值均在规范要求范围之内; 地表沉降、隧道衬砌位移随基坑开挖深度加深逐渐变大。

(3) 考虑衬砌与土的相互作用, 隧道水平位移值明显小于支护桩, 说明在基坑开挖对大直径管道影响分析中, 应考虑管-土的相互作用。

参考文献:

- [1] 李佳川, 夏明耀. 地下连续墙深基坑开挖与纵向地下管线保护[J]. 同济大学学报, 1995, **23**(5): 499 - 506. (LI Jia-chuan, XIA Ming-yao. Protection of longitudinal underground pipe lines during the diaphragm wall deep excavation[J]. Journal of Tongji University, 1995, **23**(5): 499 - 506. (in Chinese))
- [2] 李大勇, 龚晓南. 深基坑开挖对周围地下管线影响因素分析[J]. 建筑技术, 2003, **34**(2): 94 - 96. (LI Da-yong, GONG Xiao-nan. Analysis on impact of excavation of deep foundation pits on buried pipelines[J]. Architecture Technology, 2003, **34**(2): 94 - 96. (in Chinese))
- [3] 孔祥鹏, 刘国彬, 廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁站穿越施工对地铁一号线车站的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(5): 821 - 824. (KONG Xiang-peng, LIU Guo-bin, LIAO Shao-ming. Influence of construction of Shanghai stadium transverse station of pearl line phase II on station of metro line NO.1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(5): 821 - 824. (in Chinese))
- [4] 段绍伟, 沈蒲生. 深基坑开挖引起邻近管线破坏分析[J]. 工程力学, 2005, **22**(4): 80 - 83. (DUAN Shao-wei, SHEN Pu-sheng. Analysis of nearby pipeline damage induced by deep excavation[J]. Engineering Mechanics, 2005, **22**(4): 80 - 83. (in Chinese))
- [5] 杜金龙, 杨敏. 深基坑开挖对邻近地埋管线影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 3016 - 3020. (DU Jin-long, YANG Min. Influence analysis of excavation of deep pit on adjacent buried pipe lines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3016 - 3020. (in Chinese))
- [6] 魏纲, 魏新江, 裘新谷, 等. 过街隧道施工对地下管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2853 - 2859. (WEI Gang, WEI Xin-jiang, QIU Xin-gu, et al. 3D Numerical simulation of effect of underground urban street-passage tunnel construction on adjacent pipeline[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2853 - 2859. (in Chinese))
- [7] 魏刚. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (in Chinese))
- [8] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1109 - 1117. (ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xiu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **33**(4): 1109 - 1117. (in Chinese))
- [9] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1459 - 1468. (ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xiu. Numerical analysis of effect of excavation on underlying existing metro tunnel and deformation control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **34**(5): 1459 - 1468. (in Chinese))
- [10] 姜兆华, 张永兴, 蔡宇. 邻近隧道的岩质深基坑开挖影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 2): 3520 - 3526. (JIANG Zhao-hua, ZHANG Yong-xing, CAI Yu. Influence study of deep rock foundation pit excavation on adjacent tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3520 - 3526. (in Chinese))
- [11] 胡琦, 许四法, 陈仁朋, 等. 深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 537 - 541. (HU Qi, XU Si-fa, CHEN Ren-peng, et al. Influence of soil disturbance on metro tunnel in soft clay due to excavation of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 537 - 541. (in Chinese))
- [12] RANDOLPH M F, WORTH C P. Application of the failure state in undrained single shear to shaft capacity of driven piles[J]. Géotechnique, 1981, **31**(1): 143 - 157.