

紧邻地铁设施大型基坑工程施工方案研究

陈俊生^{1, 2}, 刘叔灼¹, 莫海鸿^{1, 2}, 王一兆¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州, 510640; 2. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州, 510640)

摘要: 以广州一紧邻地铁隧道的大型基坑工程为例, 结合该基坑工程与地铁隧道的竖向及水平空间关系, 介绍了紧邻地铁隧道大型基坑工程施工过程中需要注意的控制性因素, 通过讨论基坑不同开挖顺序的优势和缺点, 探讨了不同顺序的可行性。通过建立三维有限元模型, 分别评价了两个施工方案对地铁隧道的影响。通过施工方案讨论及有限元分析, 认为紧邻地铁隧道大型基坑工程施工方案应先施工与地铁隧道距离较远或不相关的基坑部分, 以避免过早扰动地铁隧道周边的土体; 在地铁隧道上方开挖, 采用分段分块逐步推进的方式, 充分利用地铁隧道结构自身的刚度; 在地铁隧道两侧开挖, 需注意不平衡开挖对产生的偏压影响。

关键词: 深基坑工程; 地铁设施; 施工方案; 三维有限元

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0377-06

作者简介: 陈俊生(1979-), 男, 广东广州人, 博士, 讲师, 主要从事地下结构的教学与研究工作。E-mail: jschen@scut.edu.cn。

Construction schemes for large excavations near subway facilities

CHEN Jun-sheng^{1, 2}, LIU Shu-zhuo¹, MO Hai-hong^{1, 2}, WANG Yi-zhao¹

(1. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A large excavation in Guangzhou is taken as an example. Through the spatial relation between the excavation and subway tunnel, the control factors during its construction are introduced. By discussing their advantages and disadvantages, the feasibility of different excavation sequences is studied. A 3D finite element model is established to evaluate the effect of the excavation on the subway tunnel due to different construction schemes. The results indicate that the construction process the excavation should start from the section far away from the subway tunnel to avoid disturbing the soil surrounding the tunnel. For the construction over subway tunnel, the piecewise and block excavation method is favorable for controlling the subway tunnel. For the construction at both sides of subway tunnel, the eccentric earth pressure due to unbalance excavation should be considered.

Key words: deep excavation; subway facility; construction scheme; 3D FEM

0 引言

随地下空间的大规模开发, 较多的基坑工程紧邻或位于地铁隧道上方。基坑开挖使相邻地铁隧道的原有受力平衡被打破, 必然引起地应力的重分布, 从而引起地铁隧道产生相应的内力和变形。已运营地铁线路对变形要求极为严格: 结构最大位移不超过 20 mm, 隧道变形曲率半径必须大于 15000 m, 相对弯曲不大于 1/2500。因此, 基坑施工过程中必须采取严格工程措施, 否则将影响地铁车站的正常使用和安全^[1]。因此, 在基坑设计和施工过程中, 如何有效地控制基坑开挖引起临近地层变形量对于地铁隧道的安全运营是至关重要的^[2]。

近年来, 众多专家学者、工程人员对邻近基坑工程施工对已有地铁设施的影响进行了大量的研究工作, 从变形计算方法、施工中变形控制等角度出发, 研究了紧贴运营地铁隧道基坑施工变形控制的相关问题, 取得了一系列的成果^[3-8]。

本文以广州一大型基坑工程为例, 综合前述研究的基础上, 探讨了避免影响地铁隧道运营基础上的大型基坑工程的施工方案制定, 并采用 Midas/GTS 软件, 建立三维模型对不同施工方案进行了数值模拟, 总结出相关工程经验, 为今后相关工程的分析提供参考。

1 工程概况

拟建新鸿基广州宏城商业发展项目建设场地位于广州市天河区天河城东侧，西邻六运三街、南邻天河南一路，北邻天河路，东邻正佳大街，地下3层，用地面积约为47550 m²（图1）。

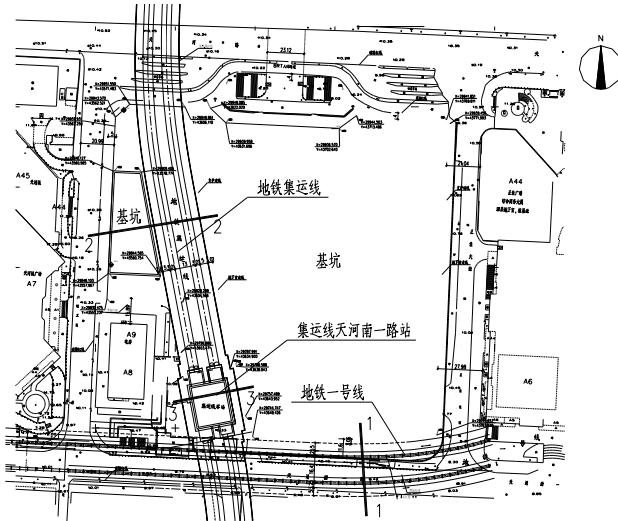


图1 场地总平面图

Fig. 1 General layout

场地周边存在较多的多层建筑与地下管线，且项目南侧紧邻东西走向的地铁1号线（新奥法隧道），与地铁最近的距离为5.80 m，典型剖面图见图2(a)（图1的1-1剖面）。项目西侧被地铁APM（简称APM，下同。盾构法隧道）分割为两块，部分地下室结构位于APM隧道之上，APM西侧隧道距基坑边最近的距离为6.78 m，东侧隧道距基坑边最近的距离为7.00 m，隧道顶部距离基坑底部最近距离为6.239 m，典型剖面图见图2(b)（图1的2-2剖面）。项目西南侧为APM车站，车站与地下室边线的最近距离为8 m，典型剖面图见图2(c)（图1的3-3剖面）。

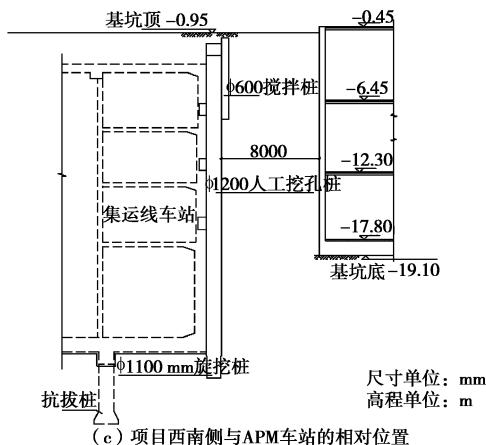
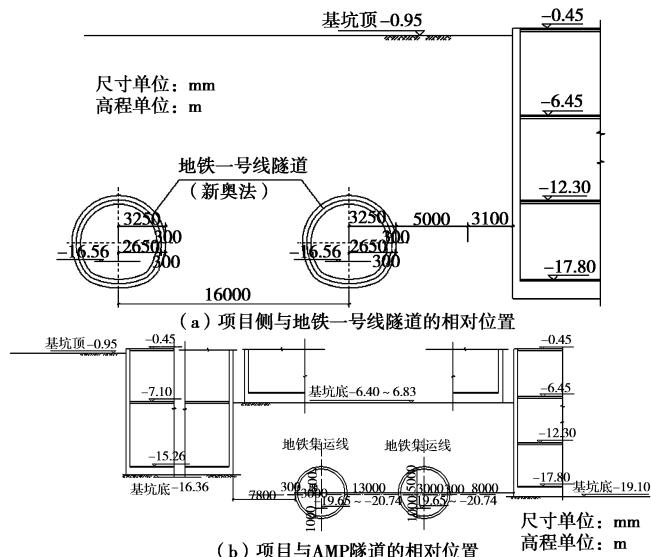


图2 项目与周边地铁设施的相对位置

Fig. 2 Relative position between excavation and subway tunnel
场地基坑支护设计参数如表1所示。

表1 土层物理力学性质表

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

地层名称	直剪快剪		孔隙比e	重度γ/(kN·m ⁻³)
	c/kPa	φ/(°)		
<1>杂填土	10	12	—	18.5
<2-1>粉质黏土	18	16	0.782	19.5
<2-2>中砂	0	30	—	20
<3>粉质黏土	20	17	0.774	19.5
<4-2>强风化泥质粉砂岩	40	21	—	19.5
<4-3>中风化泥质粉砂岩	200	28	—	23.5
<4-4>微风化泥质粉砂岩	500	35	—	25

2 总体设计及施工方案

2.1 控制性因素

本项目紧邻两条隧道，一个车站，对基坑施工引起的地层变形、坑底隆起的控制要求十分严格。因此，本项目的主要控制性因素是紧邻地铁设施的安全。根据广州地铁总公司提供的资料，存在如下问题：①地铁1号线：地铁1号线采用新奥法设计理念，隧道周边土层都属于承载圈，若周边土层受基坑施工的影响而松动，必将影响隧道的安全性。②地铁APM：地铁APM在2010年通车使用，属于新建盾构隧道，隧道结构本身具有一定的承受周边土层位移扰动的能力，但其整体式道床结构使得轨道适应变形或不均匀沉降的能力有所降低。③地铁APM车站：地铁APM车站属于整体框架式结构，平面尺寸较小，刚度较大，适应周围地层扰动的能力较强。

从图1可知：基坑南侧对地铁1号线隧道的保护方案单一，采用内支撑或中心岛法开挖基坑，只要支撑体系刚度足够，能够很好地保护地铁1号线隧道的安全；基坑西南侧的地铁APM车站整体刚度大，基

坑采用内支撑方案能够很好地保护其安全; 本项目的最大的难点是如何保证 APM 隧道的安全。从图 2(b)可知, APM 隧道的上部、东侧、西侧均需要开挖, 由此可能带来一是隧道上抬、二是东西两侧不均匀开挖导致的偏压, 两种情况均对隧道的使用产生影响。如何通过施工措施解决 APM 隧道的上抬和偏压问题, 是本项目的关键。

2.2 设计及施工方案

本项目平面面积较大, 整个基坑分为 10 个区(图 3), 其中 A1~A3 区在 APM 隧道的西侧, B1~B3 区在 APM 隧道的上方, C1~C2 区在 APM 隧道的东侧, A4、C3 区在一号线隧道的北侧, B3、C3 区紧邻 APM 车站。

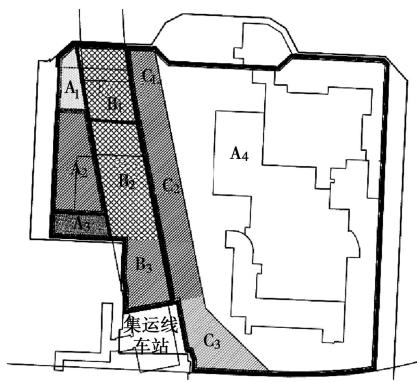


图 3 基坑分区开挖示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layered and blocked excavation

在考虑地铁保护、施工难易程度的前提下, 初步确定了如下两个施工方案:

(1) 方案一

a) 以坡比 1:1 两边放坡开挖至集运线上部基坑(即 B1~B3 区)底部以及 C1~C3 区一部分土方, 并在 APM 线右侧预留 15 m 宽的平台(图 4)。该方案的有利之处在于: ①APM 隧道上方的主体结构较为简单, 可迅速完成施工, 尽量缩短 APM 隧道上方卸荷的时间; ②15 m 宽平台可作为 A4 区在西边的施工通道, 施工车辆不直接压在 APM 隧道上。

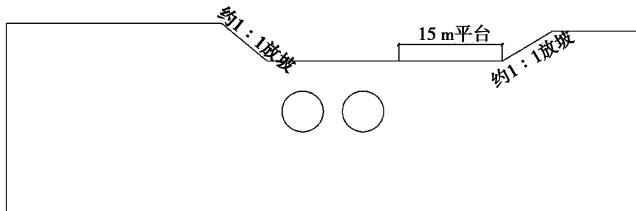


图 4 方案一基坑第一步施工剖面图

Fig. 4 Profile of first construction step of scheme 1

b) 施工 APM 隧道附近的支护桩、止水桩及集运线顶部横撑, 并以 15m 平台为反压土, 开挖东侧基坑

(C1~C3 区一部分土方及 A4 区, 图 5)。

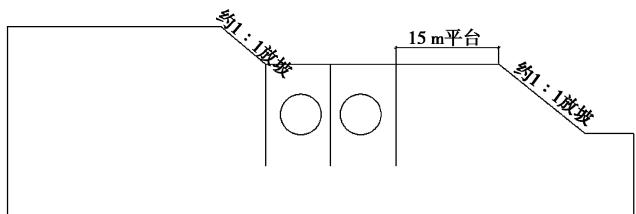


图 5 方案一第二步施工剖面图

Fig. 5 Profile of second construction step of scheme 1

c) 开挖西侧基坑(A1~A3 区), 并相应支撑。

(2) 方案二

a) 开挖 APM 线左右侧基坑(即 A1~A3 区), 并同时在 APM 线东侧预留 15 m 宽的平台(即保留 B1~B3 区), 以坡比 1:1 两级放坡开挖 A4 区域基坑(图 6, 类似于中心岛法)。该方案的有利之处在于: ①APM 隧道两边对称开挖, 尽量避免偏压对隧道结构产生影响; ②所留的 15 m 宽平台, 具有反压土的性质, 使得 A4 区开挖不影响 APM 隧道结构; ③15 m 宽平台可作为 A4 区在西边的施工通道, 施工车辆不直接压在 APM 隧道上。

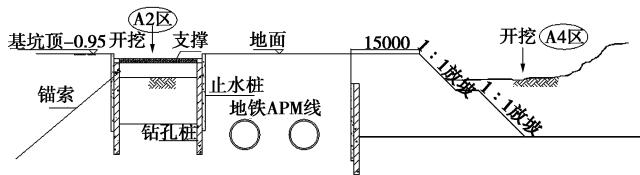


图 6 方案二第一步施工剖面图

Fig. 6 Profile of first construction step of scheme 2

b) 待 A1~A3 区开挖至基坑底, 并做好相应的支护结构后, 分层分段开挖 APM 线上部基坑 B1 区的土方(以放坡形式由北往南开挖, 每段南北向长度不超过 15 m)。将 APM 隧道上方的土体分为三大块开挖的好处在于使 APM 隧道上方土体不会一次性被卸掉, B2、B3 区的土体仍旧压着隧道, 利用隧道结构具有的一定纵向刚度, 尽量减少隧道上抬。

c) 待 B1 区浇筑底板后, 分层分段开挖 B2 区域的土方至基坑底(以放坡形式由北往南开挖, 每段南北向长度不超过 15 m), 并同时开始开挖 C1 区。

d) 待 B2 区浇筑底板后, 分层分段开挖 B3 区域的土方至基坑底(以放坡形式由北往南开挖, 每段南北向长度不超过 15 m), 并同时开始开挖 C2 区。

e) 待 B3 底板及负一层楼板浇筑后, 开始开挖 C3 区。B3 与 C3 从施工角度将并无直接关联, 但是从整个基坑的布置看, 若 B3 与 C3 同时施工, 则形成了一个大的阳角, 并不利于控制支护结构的位移。

在整个施工方案中, B1~B3 区的土方是最后才

开挖的，目的在于尽量减少对APM隧道的影响。

(3) 支护方案

根据上述施工方案一、二，制定了如下支护结构方案：

a) A1~A3区、B3、C3区采用钻孔桩+钢筋混凝土内支撑支护。

b) A1~A3区采用水平支撑与B1、B2的区的“门式结构”(图7)连接，C2区采用斜支撑结构，支撑一端与A4区地下室底板连接，另一端与B1、B2的区的“门式结构”连接。门式结构的好处在于：①在施工阶段，门式结构两侧的支护桩以及连接的混凝土板起到抗拔的作用，可有效减少APM线隧道因上方土体开挖而上抬；②防止因APM隧道因两侧不平衡开挖造成隧道受偏压；③在项目建成并使用阶段，避免上部结构荷载直接作用于隧道顶部。

c) A4区南侧(与一号线隧道邻近)采用角撑+咬合旋挖桩；A4区东侧、北侧采用桩锚支护。图8为整个基坑支护的平面布置图。

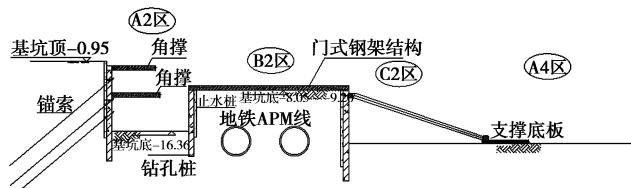


图7 门式结构

Fig. 7 Gate structure

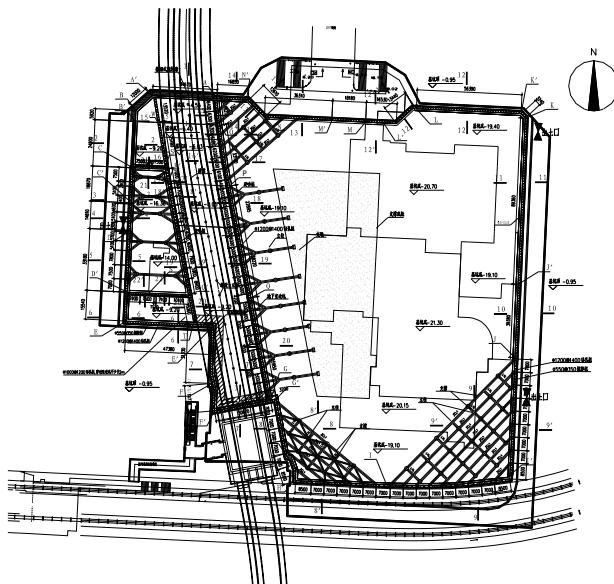


图8 基坑支护平面图

Fig. 8 General layout of excavation support

3 两个施工方案的评价与比较

对比方案一和方案二，两个方案均能保证基坑本

身的安全。方案一施工工序相对简单，施工速度较快；方案二施工工序较复杂，充分考虑了对地铁隧道的保护，但施工速度慢，开挖暴露时间长也带来一定的施工风险。从保护地铁设施的角度看，方案二更合适。在最终确定采用哪个方案前，利用Midas/GTS软件，建立三维有限元模型，分别评价两个施工方案对地铁隧道的影响。

3.1 三维有限元模型的建立

基坑的平面开挖尺寸约220 m×220 m，开挖深度为4.55~21.3 m。考虑基坑的开挖对周围土体及地铁隧道的扰动，三维模型取为440 m×440 m×70 m的区域，计算模型的上边界为自由边界，底部全约束，各侧边限制向基坑方向的水平位移。除本项目基坑外，模拟分析对象完整包含了宏城广场基坑、地铁一号线、APM和APM车站。三维有限元模型见图9和图10，共有439276个单元，83109个节点。

计算工况按2.2节所述，分开两个施工方案进行，每个计算模型的工况均严格按照施工步骤设定，图11为开挖B3区到基坑底，并施工C1区支撑或锚索时候的有限元网格。土体本构模型采用莫尔-库仑模型，具体参数见表1。

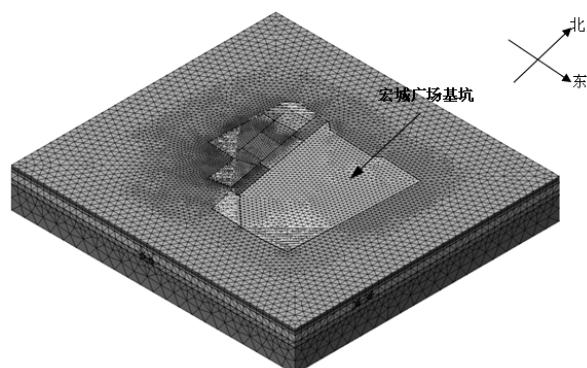


图9 整体模型有限元网格

Fig. 9 Finite element mesh of whole model

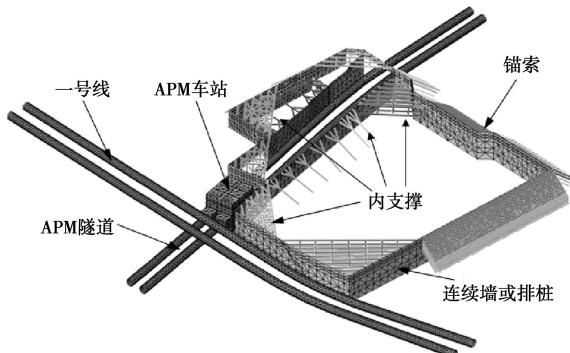


图10 支护结构、车站及隧道放大图

Fig. 10 Excavation support, subway station and tunnel

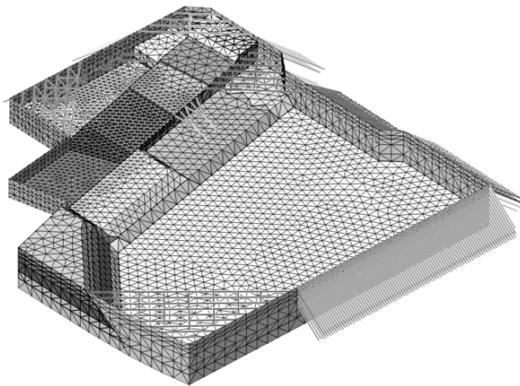


图 11 开挖 B3 区到基坑底, 并施工 C1 区支撑或锚索

Fig. 11 Excavation of B3 district to pit bottom and construction support or anchor cable of C1 district

3.2 计算结果及分析

表 2 中支护结构的位移方向均向坑内; 隧道(一号线、APM 隧道)水平向位移方向均向坑内, 坚直向位移均为上抬; 车站位移方向均向坑内。

表 2 计算结果

Table 2 Computed results mm

结构	位移方向	方案一	方案二
基坑支护结 构	东西向	6.95	7.16
	南北向	5.87	5.56
	总位移	7.20	7.36
APM 隧道	水平向	2.18	2.71
	竖直向	9.25	4.58
	底部水平	2.06	1.98
	底部竖向	2.22	3.15
APM 车站	东西向	1.35	1.39
	南北向	1.08	1.07
	总位移	1.69	1.68
一号线隧道	水平向	3.74	3.11
	竖直向	2.57	1.11
	底部水平	2.41	2.47
	底部竖向	0.69	1.11

从表 2 可知, 基坑支护结构与 APM 车站自身的刚度较大, 受不同开挖顺序的影响较小, 故采用方案一或二均没有太大的影响, 一号线隧道受到不同开挖顺序的影响也较小。APM 隧道受到基坑开挖顺序的影响较大, 方案一的最大竖向位移接近方案二的两倍, 由于两个方案都注意了避免对基坑产生偏压, 故隧道水平位移相近, 且量值不大。从 2.2 节可知, 方案一与方案二最大的区别在于 APM 隧道上方土体的开挖时机, 方案一是两边放坡开挖至 APM 隧道上方的基坑底部, 争取尽快施工地下结构, 方便施工单位施工, 方案二以由北往南的方式, 分块分步开挖, 有利于地铁隧道的保护, 对地铁的影响也就有所减少。

上述方案一、方案二均提交广州市地下铁道总公司地铁设施保护办公室评审。虽然两个方案都能保证地铁设施的安全, 但从可靠性角度, 最终选择了方案二

作为施工方案。

4 结语

本文以广州一大型基坑工程为例, 探讨了紧邻地铁隧道大型基坑工程施工方案的制定, 在定性讨论的基础上, 建立三维有限元模型对不同施工方案进行了定量分析, 得到的结论如下。

(1) 基坑施工存在一定的不确定因素, 故一般情况下, 应先施工与地铁隧道距离较远或不相关的基坑部分, 以避免过早扰动地铁隧道周边的土体。

(2) 地铁隧道本身具有一定的纵向刚度。在地铁隧道上方开挖, 采用分段分块逐步推进的方式, 充分利用地铁隧道结构自身的刚度, 使得基坑开挖影响的隧道结构的位移受到前、后隧道结构的约束, 整体位移受到限制。分段分块的长度应根据现场施工情况及计算分析的结果确定。在地铁隧道两侧开挖, 需注意不平衡开挖对产生的偏压影响。

(3) 在隧道上方开挖基坑, 隧道上抬不可避免, 采用结语第(2)点提到的分段分块逐步推进的开挖方法, 再配合类似于门式刚架的结构(图 7), 将地铁隧道结构固定。同时, 今后的上部结构荷载, 也通过门式刚架结构的水平厚板传递至两侧的桩, 避免荷载直接作用在隧道顶部。门式刚架的结构也可大大减小由于隧道两侧不平衡开挖带来的影响。

参考文献:

- [1] 高广运, 高盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453 - 459. (GAO Guang-yun, GAO Meng, YANG Cheng-bin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453 - 459. (in Chinese))
- [2] 陈忠汉, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. (CHEN Zhong-han, CHENG Li-ping. Deep excavation engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818 - 823. (GAO Meng, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, 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. (in Chinese))
- [4] 孔祥鹏, 刘国彬, 廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁车

- 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 - 825. (KONG Xiang-peng, LIU Guo-bin, LIAO Shao-ming. Influence fo 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 - 825. (in Chinese))
- [5] 李志高, 曾远, 刘国彬. 邻近地铁车站基坑开挖位移传递规律数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 3104 - 3108. (LI Zhi-gao, ZENG Yuan, LIU Guo-bin. Numerical simulation of displacement transfer law of excavation adjacent metro station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 3104 - 3108. (in Chinese))
- [6] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 251 - 255. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 251 - 255. (in Chinese))
- [7] 谢弘帅. 紧贴运营地铁车站深基坑施工变形控制研究(博士学位论文)[D]. 上海: 同济大学, 2005. (XIE Hong-shuai. Study on displacement control of metro station due to ajacent deep excavation[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [8] 姚燕明, 孙巍. 深基坑开挖对共用连续墙的既有车站结构内力影响的空间分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1411 - 1414. (YAO Yan-ming, SUN Wei. Spatial calculation analysis on internal forces of the existing metro stations having common walls with a deep pit excavation[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1411 - 1414. (in Chinese))

(本文责编 明经平)