

基坑工程对深圳地铁的结构变形影响和风险控制技术

刘树亚，欧阳蓉

(深圳市地铁集团有限公司，广东 深圳 518026)

摘要：地铁是城市重要基础设施，周边基坑工程必须采取措施保护地铁，并按照地下工程特点控制工程风险。本文通过工程实例和监测数据分析与地铁不同位置关系的基坑工程对深圳地铁结构的变形影响。结合地区特点和经验，提出地铁附近基坑施工引起地铁变形的风险控制技术，风险控制技术包括采用有安全冗余的地铁结构变形控制标准、按照基坑可能影响地铁结构安全的危害程度将基坑分级并有区别管理、监控量测和过程监管、事后评估等方面。实践显示所有基坑未对地铁运营造成影响。

关键词：基坑工程；地铁保护；变形；控制

中图分类号：TU47 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2012)S0-0638-06

作者简介：刘树亚(1968-)，男，辽宁海城人，博士，高级工程师，主要从事地铁技术管理工作。E-mail: liushy@shenzhenmc.com。

Deformation of Shenzhen subway aroused by deep excavations and its risk control technology

LIU Shu-ya, OUYANG-Rong

(Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: Because the subway is the most important infrastructure in a city, effective design and construction measures of nearby deep excavations must be adopted to protect it. The rules of deformation aroused by deep excavations near the subway are gained according to case studies and practical deformation data. Based on the regional experience, the risk control technologies for deep excavations include deformation control standards of subway structure with proper safety redundancy, risk classification of deep excavations according to the possible influence level on subway, different technical demands according to the classification, survey technology, supervision during the construction process and the back-evaluation after the completion of excavation. The results indicate that all the nearby excavations do not disturb the normal operation of subway.

Key words: excavation; subway protection; deformation; control

0 引言

深圳市地铁网络运营里程达到 178 km，其中地下线约 135 km，地面和高架线约 43 km，日均运载旅客约 200 万人。地铁因其准时、便捷已成为深圳市民出行的重要交通工具，是确保城市正常运行的重要基础设施，因此为地铁提供外部的运营安全保障至关重要。

地铁沿线土地开发、城市更新建设都会对地铁结构产生一定的影响，基坑工程施工中的开挖卸载和降水往往引起周围土体变形，而深圳地铁地下线的车站和隧道对荷载变化和地下水位变动影响非常敏感，如果没有可靠的控制措施，将产生地铁设施变形、结构损伤甚至可能影响到运营安全。本文分析与地铁不同位置关系的基坑工程对深圳地铁结构的变形影响，结合地区特点和经验，提出地铁附近基坑施工引起地铁变

形的风险控制技术。

1 深圳基坑施工对地铁的变形影响性状

地铁安全保护区基坑对地铁的影响因其与地铁相对位置关系不同而异。

位于地铁结构上方的带地下室建筑工程，对地铁的影响表现为基坑开挖卸载引起地铁结构隆起和上部结构加载后引起的地铁结构下沉。

图 1, 2 为某办公楼与地铁结构相对位置关系。基坑开挖和房屋结构加载对地铁变形影响采用 ADINA 有限元程序进行三维有限元分析，并进行了常规的规范方法计算。可以看出，基坑开挖卸载引起地铁隧道隆起量约为 6 mm，计算值与实测值相差不大。但结

构荷载施加之后地铁隧道下沉, 下沉量计算值远大于实测值。实测值为从最大隆起的 6 mm 下沉到 3.2 mm。说明若需控制地铁结构隆起, 必须在基坑施工之前和过程中采取措施, 只能部分寄希望于结构荷载施加之后的下沉。其它同类工程引起的地铁隆起和下沉显示同样规律。

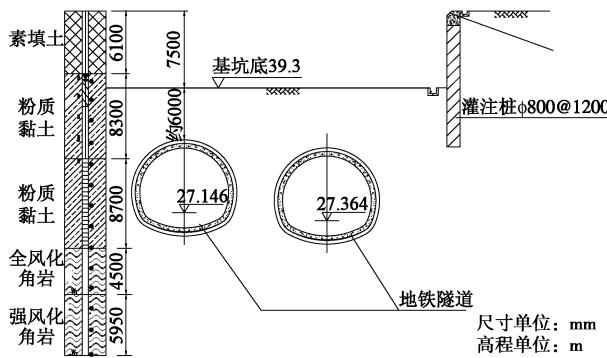


图 1 位于地铁结构上方的某基坑

Fig. 1 Deep excavation above subway

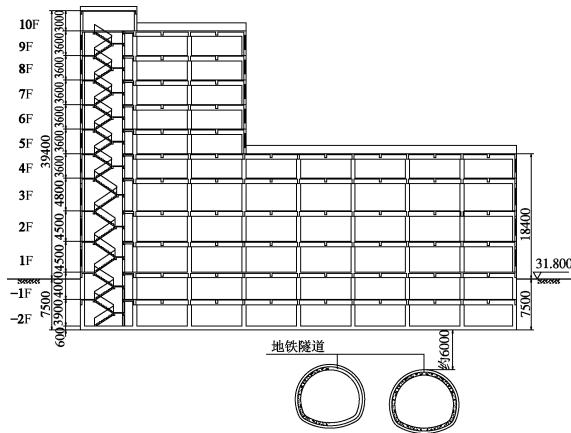


图 2 图 1 基坑主体结构完成后剖面图

Fig. 1 Section of main structure of deep excavation

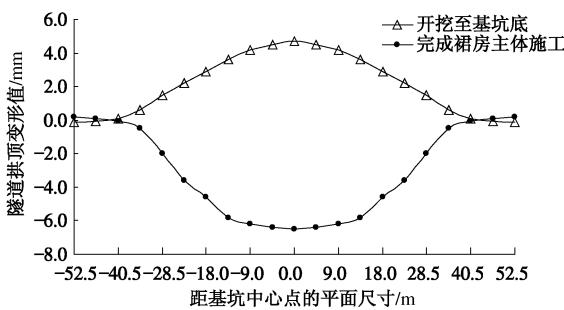


图 3 图 1, 2 工程引起地铁隆沉数值计算值

Fig. 3 Calculated values of vertical deformation aroused by deep excavation

图 5 为位于地铁车站结构侧面、深度超过地铁结构底板埋深的某基坑工程。安全评估时采用 FLAC^{3D} 软件进行三维数值分析, 并进行了常规规范方法计算。

基坑开挖、地下水位大幅下降引起地铁结构沉降实测变形曲线如图 6 示。可以看出, 基坑开挖深度在地铁底板以上或附近时, 地铁结构的变形不显著, 小于 5 mm; 当挖深超过地铁结构底板且地下水位大幅下降时, 地铁结构的变形速率增大; 为控制上述变形新增的止水帷幕竣工后, 地铁结构变形基本稳定。

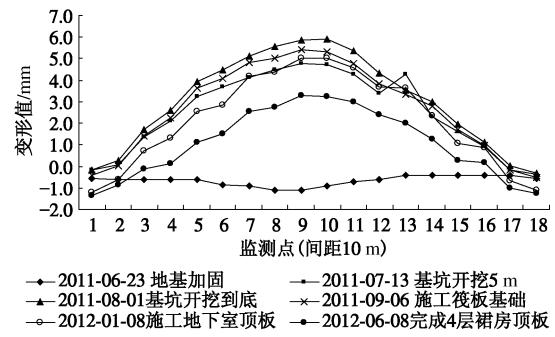


图 4 图 1, 2 工程引起地铁隆沉实测值

Fig. 4 Observed values of vertical deformation aroused by deep excavation

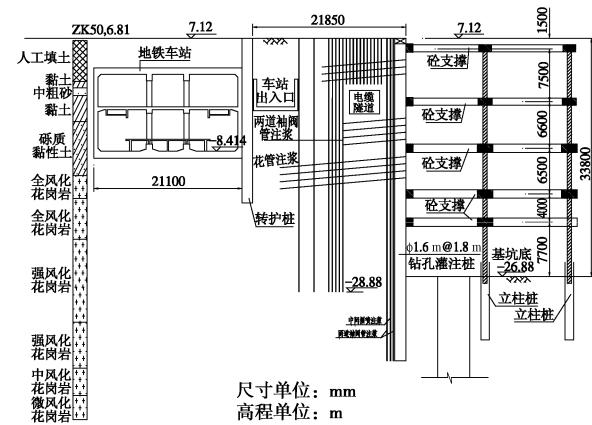


图 5 某基坑与地铁相对位置关系

Fig. 5 Spatial relationship between excavation and subway

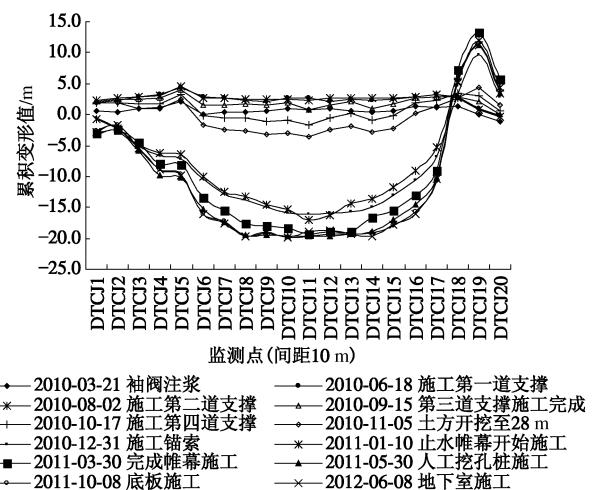


图 6 基坑引起地铁结构沉降实测值

Fig. 6 Observed values of vertical deformation aroused by deep excavation

图7为位于地铁结构侧面、深度与地铁结构底板标高基本相同的基坑工程。安全评估时采用Midas软件进行三维有限元分析，并进行了常规规范方法计算。基坑开挖引起地铁结构沉降和水平位移的实际变形曲线如图8、9示。可以看出，地铁隧道隆沉和收敛变形都很小。虽然地铁隧道处于强、中风化岩中对限制变形有利，但从图8、9所显示出的变形规律看，深度与地铁结构底板标高基本相同的基坑工程变形控制相对容易。

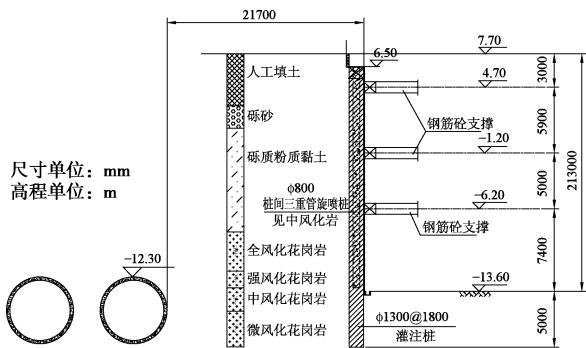


图7 地铁侧面某基坑工程

Fig. 7 Deep excavation near subway tunnel

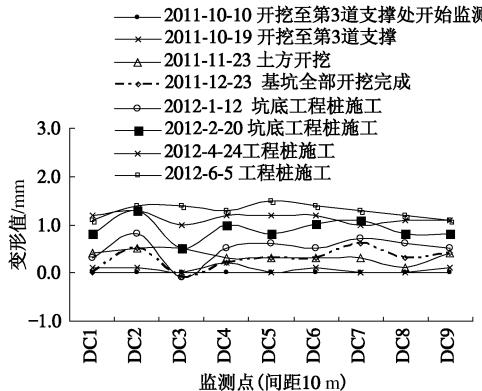


图8 图7工程对地铁隧道隆沉影响

Fig. 8 Effect of excavation on vertical deformation of tunnel

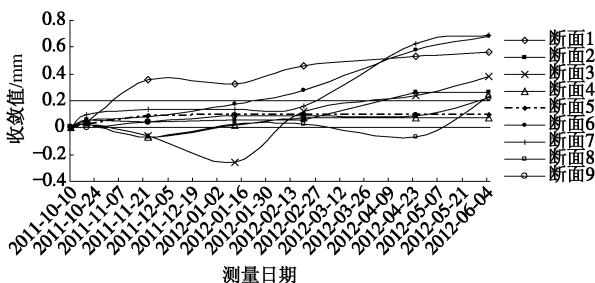


图9 图7工程对地铁隧道收敛影响

Fig. 9 Effect of excavation convergence of tunnel

图10为位于地铁结构侧面、深度小于地铁埋深的基坑工程。基坑开挖引起地铁隧道收敛和隆沉实测变形曲线分别如图11、12示。可以看出，尽管基坑工程

位于淤泥质地层，但地铁隧道收敛、隆沉数量很小。

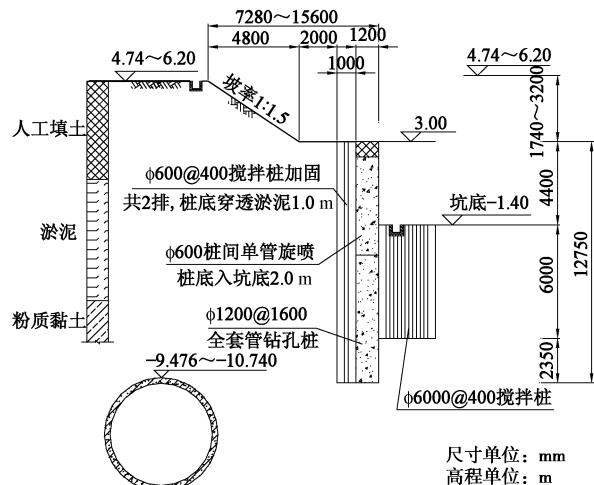


图10 地铁侧某基坑工程

Fig. 10 Deep excavation near subway tunnel

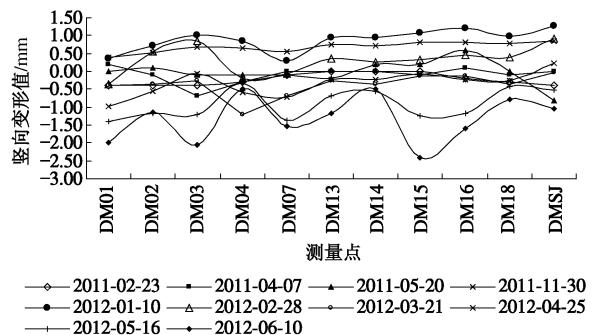


图11 图10工程对地铁隧道隆沉影响

Fig. 11 Effect of excavation vertical deformation of tunnel

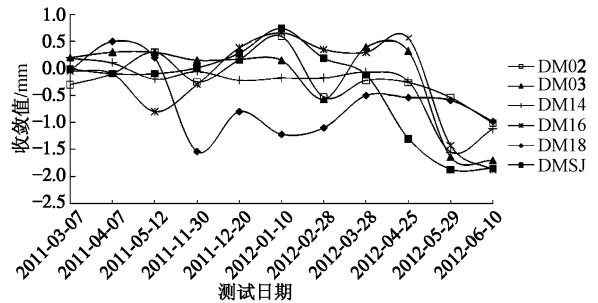
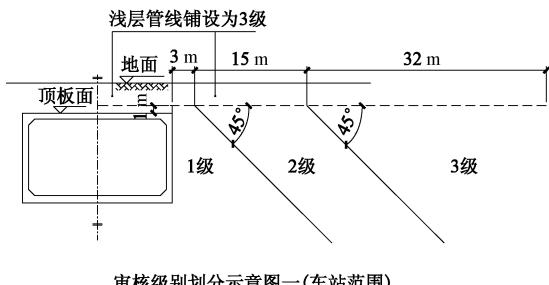


图12 图10工程对地铁隧道收敛影响

Fig. 12 Effect of excavation on convergence of tunnel



审核级别划分示意图一(车站范围)

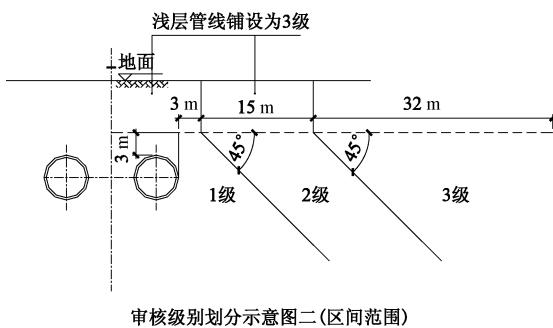


图 13 基坑对地铁影响程度分级示意图

Fig. 13 Subway risk classification aroused by deep excavations

2 风险控制技术

2.1 采用有安全冗余的地铁变形控制标准

地铁变形控制标准既即受控于列车安全运行所需要的轨道、供电接触网耐受误差要求,也受制于地铁车站、隧道结构安全要求。根据理论分析和长期经验,变形控制标准^[1]见表 1。

表 1 地铁变形控制标准

Table 1 Subway deformation control standards

项目	绝对控制值	使用控制值
轨道竖向变形	±4 mm	±2 mm
轨道横向高差	≤4 mm	≤2 mm
道三角坑	≤4 mm/18 m	≤2 mm/18 m
结轨距	+6/-2 mm	+3/-1 mm
相对变形	≤1/2500	≤1/5000
隆沉	≤20 mm	≤5 mm
水平位移	≤20 mm	≤5 mm

地铁变形控制标准值并不能在单个工程使用完毕,原因如下:①高密度浅层地下空间开发在不同时期的施工可能造成地铁结构的叠加变形;②目前地铁和其它地下工程均属于城市浅层地下空间利用,单个工程对地铁变形造成的是短期影响,从地铁百年服役年限的长期影响角度出发,需考虑到周边将来必将进行的深层地下空间开发影响;③地下工程一旦损伤难以修复,一般不得牺牲地铁结构损伤换取基坑工程支撑措施的减弱;④地铁每日运营时间长,仅有约 3 小时维修时间;若损伤严重,则需占用运营时间修复,社会影响严重。鉴于此,有必要给未来不可预见变形留有余量,应采用有安全冗余的地铁变形控制标准进行基坑支撑设计。目前地铁结构变形按照表 1 中的使用控制值标准进行控制。

2.2 按基坑对地铁影响程度分级管理

(1) 级别划分

根据基坑与地铁的相对空间位置关系、地铁结构

部位、地铁所处围岩级别、深圳地区一般性工程地质和水文地质条件,以及地铁周边基坑的环境影响统计规律,将地铁安全保护区内的基坑按其对地铁安全的影响程度,分为 1, 2, 3 三个危险性由高到低的技术控制级别,详见图 13。

1 级基坑工程,基坑位于地铁上部时,开挖可能引起地铁隆起变形过大和整体抗浮失稳;当基坑位于地铁结构侧面时,基坑的稳定性直接决定地铁结构的稳定性。因此,基坑的技术措施必须绝对得当并有安全冗余。

2 级基坑工程,在深圳一般工程地质和水文地质条件下(非岩石和淤泥质土),基坑失稳后可能会造成地铁结构出现较大变形,但由于基坑失稳破裂面距离地铁结构尚有 5m(约一倍地铁隧道直径),一般不至于造成地铁出现灾难性事故。

3 级基坑工程,基坑失稳后一般不会造成地铁结构出现较大变形,基坑失稳破裂面距离地铁结构尚有 20 m(约 3 倍地铁隧道直径),不会造成地铁出现灾难性事故。

(2) 不同级别基坑的安全风险管理

不同级别基坑在对地铁影响评估分析方法、分析工况、监测要求、过程控制等方面均有所区别,详见表 2。

2.3 基坑引起地铁变形的控制技术

深圳地区控制基坑施工引起的地铁结构变形,主要从 3 方面考虑^[2]:①控制基坑围护结构侧向变形;②控制地铁结构处地下水位下降;③控制坑底下部土体抗隆起性能。

(1) 控制基坑围护结构侧向变形技术

基坑围护结构侧向变形量直接影响临近地铁结构的变形量。控制地铁结构变形,必须控制围护结构选型、围护桩/墙的嵌入深度、截面抗弯刚度和支撑体系或锚拉体系刚度。

a) 围护结构选型

地铁侧围护结构宜选择挡土挡水合一的地下连续墙;当围护桩深度在 25 m 以内时,可选择钻孔咬合桩;当地层渗透性较小且基坑开挖深度在 20 m 以内时,可选用钻孔灌注密排加桩间止水,或单独的止水帷幕。

根据变形发展过程和量值控制角度考虑,围护桩/墙的抗弯刚度应足够强,以使每一层土方开挖时形成的变形在控制范围之内,并进而使总变形量也能控制在设定范围。与此同时,支撑体系的刚度也应与围护桩/墙的刚度相匹配。撑强桩弱,在第二道和后面各道支撑未施加时,桩/墙的侧向变形已经完成绝大部分。

对于基坑深度在 6~10 m 之间,内支撑难以架设

又无法打设锚索的基坑，双排桩在控制变形方面效果较好。

表 2 不同级别基坑的安全风险管理方法

Table 2 Safety Management methods for different deep excavations

	1 级基坑	2 级基坑	3 级基坑
分析法	基坑结构计算软件 工程类比和经验判断 有限元或有限差分 正常开挖工况 超挖或侧壁渗漏水或 坑顶超载等非正常工 况分析 围护、支撑体系质量 异常等极端情况安全 冗余度分析	基坑结构计算软件 工程类比和经验判 断 有限元或有限差分 正常开挖工况 超挖或侧壁渗漏水 或坑顶超载等非正 常工况分析	基坑结构计 算软件 工程类比和 经验判断 — 正常开挖 工况 — — —
监	隧道内自动化监测且 要必须两套监测系统。	隧道内自动化 监测系统。	隧道内一般 监测或根据 围护桩/墙 变形、土体 变形判断。
过 程 控 制	作为重点项目 严格监控。	作为次重点项目 监控。	一般监控。

对与地铁相对位置关系无法调整的基坑，经计算分析可采用预留台阶的基坑形式。

b) 土方开挖方法

按照“时空效应”原理要求的土方分段分层开挖、挖后即刻支撑、支撑后才能开挖下方土体的原则^[3]，同样适合深圳地区的基坑工程。

c) 逆作法技术

对于与地铁距离过近或直接接触的地下结构基坑，逆作法可以有效控制土体变形和地铁结构变形^[4]。地铁 3 号线老街站与已运营的 1 号线老街站延车站纵向全长接驳，3 号线老街站采用逆作法，成功地使 1 号线老街站结构变形控制在 5 mm 以内。

(2) 控制地下水位下降

深圳地区地下水埋藏浅，地下水下降对填土、花岗岩残积土和淤泥质土固结沉降影响显著。控制地铁沉降变形必须控制地铁处地下水位下降幅度。对 1、2 级基坑，优选围护桩墙与截水合二为一的地下连续墙结构；若围护桩长度小于 25 m，可采用钻孔咬合桩作围护结构；当围护结构施工会对地铁结构变形产生较大影响时，可选择围护桩。对 3 级基坑，若不具备地下连续墙或钻孔咬合桩条件，可选用密排桩加截水帷幕或单独节水帷幕。在围护截水墙无法满足地下水控制要求时，应采用独立的截水帷幕。

(3) 控制地铁结构隆起

有效而又简洁的方法是降水并分段开挖，分段完成混凝土主体结构。若仍不满足地铁变形要求，则应视地质条件、相对位置关系采取特别措施。

2.4 监测和过程控制

地铁结构变形监测基本上采用自动化监测技术手段。测量仪器主要有自动化全站仪、光栅光纤变形测量仪、静力水准仪。由于自动化全站仪优越的工作性能，深圳基坑多采用之。光栅光纤可设置在预估变形量在其量程范围内的工程，且需与人工测量数据对照；静力水准可设置在结构水平位移可忽略的工程。1，2 级基坑施工过程中，深圳地铁对地铁结构变形、变形缝变形进行监测；3 级基坑一般根据基坑围护体系变形和设于基坑与地铁之间的土体测斜判断地铁结构受影响程度，在地铁结构内设少量测点。

地铁结构变形监测数据每周送地铁公司审阅，出现变形绝对值和相对值异常，技术人员会综合分析基坑支护施工过程、外界环境变化、基坑变形性状、隧道变形发展过程和趋势，结合隧道内结构、道床、行车等各种检查结果，作出综合判断。

2.5 后评估

为总结与评估数值计算方法、其他方法的预评估效果，总结基坑工程保护周边环境的经验，应在基坑工程基本竣工后进行后评估。后评估主要内容包括：①预评估方法的合适性；②数值计算的准确性和原因分析；③地铁隧道受损情况；④经验教训总结。

3 结语和需进一步研究的问题

深圳地铁运营至今，采用上述风险控制技术基本使地铁结构变形控制在安全范围之内，所有基坑未对地铁运营造成影响。根据运营以来的地铁安保区工程案例，95%以上基坑引起地铁结构变形在控制范围之内。但若在地铁安全与经济合理的基坑支护之间的寻找最佳的技术平衡点，还有一些问题亟待研究：

(1) 可靠的流固耦合的预测变形方法和地下水下降对地铁变形的影响和下降控制标准制定。

(2) 以变形控制为目标的基坑最优化设计理论和方法。

(3) 紧邻地铁的超深基坑设计与施工技术。

(4) 更加详细、合理的地铁结构变形控制标准。

参考文献：

- [1] 王如路, 刘建航. 上海地铁监护实践[J]. 施工技术, 2004(1): 24 - 35. (WANG Ru-lu, LIU Jian-hang. Practice of Shanghai metro monitoring[J]. Construction Technology, 2004(1): 24 -

35. (in Chinese))
- [2] 王卫东, 朱合华, 李耀良. 城市岩土工程与新技术[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 1): 1274 - 1291. (WANG Wei-dong, ZHU He-hua, LI Yao-liang. Urban geotechnical engineering and new technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1274 - 1291. (in Chinese))
- [3] 邵 华, 王 蓉. 基坑开挖施工对临近地铁的影响的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 1): 1403 - 1408. (SHAO Hua, WANG Rong. Monitoring results analysis on subway influenced by nearby deep foundation excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S1): 1403 - 1408. (in Chinese))
- [4] 朱 蕾, 王如路. 轨道交通安全保护区内的深基坑逆作法施工技术[J]. 铁道建筑, 2007(3): 49 - 50. (ZHU Lei, WANG Ru-lu. Top-down construction technology of deep foundation pit in subway safety protection area[J]. Railway Engineering, 2007(3): 49 - 50. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)