

DOI: 10.11779/CJGE2015S2016

软土地区地铁隧道不均匀沉降特征及分区控制

狄宏规, 周顺华, 官全美, 王培鑫, 肖军华

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 基于南京地铁 1 号线西延线地下段运营后约 4 年的沉降观测数据, 分析其沉降发展的时空变化特征。将西延线工程地质条件、沿线周边邻近建筑工程活动与结构沉降进行对比分析, 研究地铁结构产生不均匀沉降的原因。结果表明: 运营 4 年后隧道最大累积沉降达 122 mm, 沿线形成了 4 个沉降槽, 且沉降槽有向两边扩展的趋势。地铁结构下卧软土层分布不均和周边近距离工程活动是导致西延线结构不均匀沉降的主要原因。针对软土地区地铁隧道的不均匀沉降问题, 应结合工程地质条件和周边建筑开发程度, 进行分区预控制。

关键词: 地铁隧道; 长期沉降; 不均匀沉降; 分区控制

中图分类号: U231 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0074-06

作者简介: 狄宏规 (1985-), 男, 博士研究生, 主要从事铁道与轨道工程方面的研究。E-mail: dihongguila@126.com。

Differential settlement of metro tunnels and its zonal control in soft deposits

DI Hong-gui, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, WANG Pei-xin, XIAO Jun-hua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the measured settlement (a period of 4 years after operation) of West Extension Line of Nanjing Metro Line 1, the differential settlement characteristics of this line are analyzed. After 4 years' operation, the cumulative settlement reaches the maximum value of 122 mm, and 4 settlement troughs are formed along the line and each settlement trough has the trend to be wider. By comparing the cumulative settlement to the geological conditions and the adjacent construction activities along the line, the reasons for the differential settlement of the line are investigated. The results show that the non-uniform distribution of the soft soil layer under the metro tunnel and the adjacent construction activities are the main causes for the differential settlement. For the problem of differential settlement of the metro tunnels in soft soil area, the zonal control of the metro line should be adopted by considering the engineering geological conditions and the development intensity of the surrounding projects.

Key words: metro tunnel; long-term settlement; differential settlement; zonal control

0 引言

近年来, 我国上海、南京等城市的地铁隧道在建设和运营中均受到长期沉降的困扰。如上海地铁 1、2 号线运营后不久结构即发生了大范围的沉降与不均匀沉降, 且沉降一直在发展^[1-3]。南京地铁 1 号线西延线部分区段由于不均匀沉降过大而不得不对其地基进行加固。地铁结构过大的不均匀沉降会导致轨道变形超标、轮轨磨耗加大、车轨振动加剧, 还会引起隧道结构的开裂破损、渗水漏泥, 不但增加养护维修费用, 而且危及轨道交通系统的安全。随着我国长三角地区地铁结构越来越多的修建并投入使用, 地铁隧道的长期沉降问题将日益突出。

文献[1, 2]分析指出抽取地下水引起的第 4 含水层的压缩是引起上海地铁隧道长期沉降的主要原因。文献[4, 5]分析了南京地铁 1 号线西延线地下段运营后约 3 年的沉降规律及其对地铁结构安全的影响, 但

对沉降原因的分析仍有待深入。文献[6]对英国 Grimsby 隧道进行长达 11 年的沉降观察, 发现隧道沉降历时 10 年才达到稳定。文献[7, 8]总结了引起隧道纵向不均匀沉降的可能因素, 包括隧道下卧土层差异、邻近隧道建筑施工的加卸载、隧道渗漏造成地基水土的流失等。文献[9]提出了隧道长期不均匀沉降预测的蚁群算法, 但该预测方法需基于现场实测数据, 且无法从根本上解决隧道的长期沉降问题。文献[10]等提出微扰动注浆技术, 并成功运用于上海地铁隧道不均匀沉降的治理。然而, 由于运营地铁隧道天窗时间短、维修空间小, 在运营阶段进行沉降治理是较为困难的。因此, 进行长期沉降的分区预控是解决这一问题最经济有效的手段。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478353, 51008158); 上海市科委重点支撑项目 (13231200200)

收稿日期: 2015-03-26

本文基于南京市河西地区地铁结构面临的长期沉降问题, 通过对南京地铁 1 号线西延线(下称西延线)地下段运营后 4 年的沉降观测数据进行分析, 研究其沉降发展规律。综合西延线工程地质条件、周边近距离建筑工程活动情况, 分析结构产生不均匀沉降的原因, 并提出分区控制对策, 可为软土地区地铁结构的长期沉降防控提供参考。

1 西延线简介

南京市河西地区位于南京主城西部, 东依秦淮河, 西临长江, 北起三汊河口, 南到秦淮新河, 见图 1。河西地区属于长江漫滩区, 其新近沉积的漫滩软土极为软弱, 且分布不均匀^[11]。目前, 南京地铁 2、10 号线均有部分区段穿越河西地区, 运营后局部区段产生了较大的沉降与不均匀沉降。其中地铁 10 号线奥体中心站—小行站原为南京地铁 1 号线西延线, 而本文主要分析西延线地下段(奥体中心站—中胜隧洞口, 长 3.94 km) 的长期沉降规律及原因。

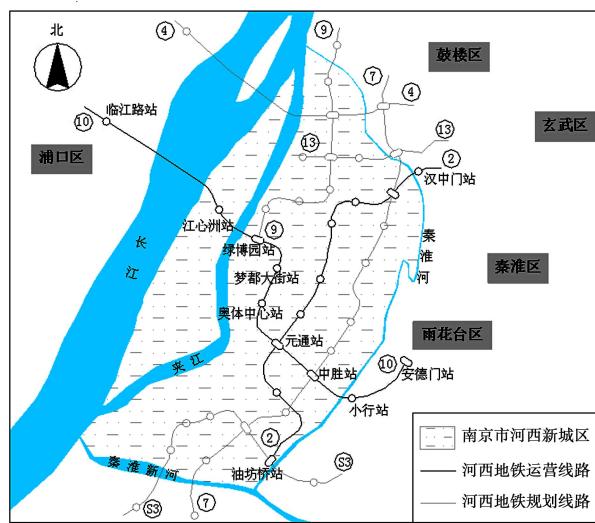


图 1 南京市河西地区地铁线路分布图

Fig. 1 Distribution of rail track system in Hexi area of Nanjing

表 1 各土层主要物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层	含水率 /%	重度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比	塑性指数	液性指数	压缩模量 /MPa	承载力标准值/kPa
杂填土	范围	22.7~26.1	19.2~20.0	0.64~0.76	11.8~15.2	0.48~0.71	6.27~8.61
	均值	24.9	19.6	0.70	13.4	0.56	7.44
粉质黏土	范围	25.8~42.8	17.8~19.9	0.74~1.16	13.0~24.0	0.31~0.86	2.76~7.85
	均值	33.1	18.9	0.91	17.2	0.65	4.96
淤泥质粉质黏土	范围	31.9~51.4	16.4~18.7	0.97~1.16	10.0~22.0	1.01~2.15	1.85~5.71
	均值	41.7	18.1	1.18	14.3	1.45	3.16
粉土	范围	25.1~39.4	17.7~19.7	0.71~1.13	6.0~12.0	0.80~2.57	4.40~12.38
	均值	32.4	18.6	0.93	9.5	1.44	7.53
粉砂	范围	12.0~26.6	18.9~20.6	0.45~0.77	—	—	15.60~35.21
	均值	19.1	20.0	0.60	—	—	22.41
粉细砂	范围	23.0~43.4	17.3~19.5	0.73~1.23	—	—	10.17~24.67
	均值	28.4	18.7	0.87	—	—	15.57

1.1 隧道断面及地基加固形式

西延线隧道采用明挖法施工, 隧道地基采用搅拌桩满堂加固, 桩径 0.5 m, 桩间距 0.75 m, 加固深度为隧道底板以下 5 m 左右, 西延线矩形隧道单洞净宽 4.4 m, 净高 5.16 m, 如图 2 所示。

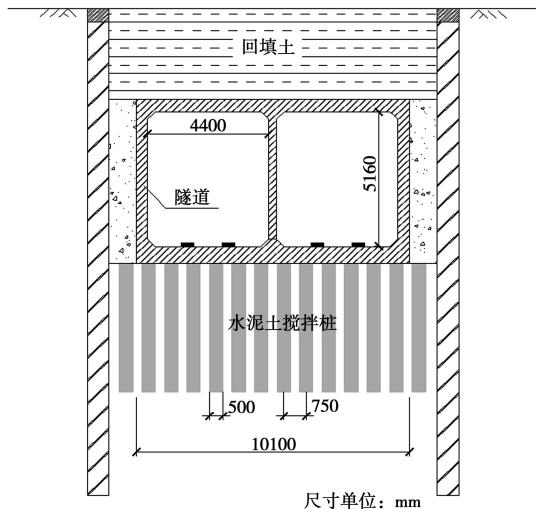


图 2 隧道横断面及地基加固示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tunnel cross-section and foundation improvement

1.2 工程地质条件

图 3 为西延线奥体中心—中胜洞口区段工程地质剖面图, 由图 3 可知, 区间隧道主要穿越淤泥质粉质黏土层, 局部穿越粉土层, 隧道底板主要坐落在淤泥质粉质黏土层中, 且结构下卧淤泥质粉质黏土厚度分布不均匀。表 1 为各土层的主要物理力学指标, 从中可以看到, 淤泥质粉质黏土呈软一流塑状态, 平均含水率达 40% 以上, 平均压缩模量小于 3.2 MPa, 地基承载力标准值为 60~80 kPa, 具有高含水率、高压缩性、低承载力等特征, 修建于此种地层中的隧道施工完成后易产生较大的沉降与不均匀沉降。

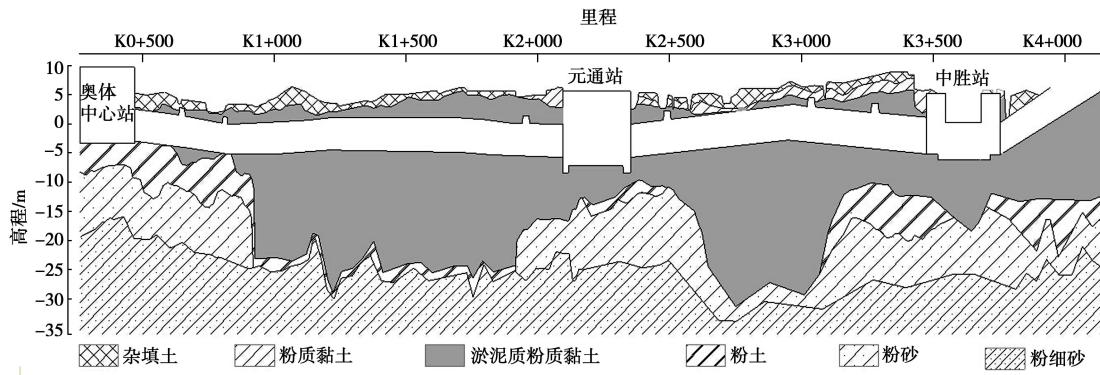


图 3 西延线工程地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of West Extension Line

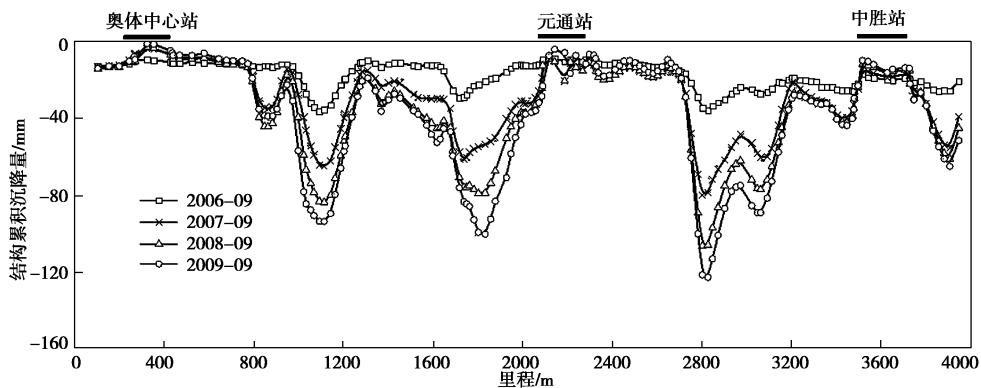


图 4 西延线运营后结构累积沉降曲线 (上行线)

Fig. 4 Observed cumulative settlements of West Extension Line since operation

2 结构不均匀沉降特征

西延线于 2005 年 9 月通车运营。图 4 为西延线相对运营期初值的结构累积沉降曲线 (上行线)，从图 4 可知，西延线运营 4 年后最大累积沉降达 122 mm。车站沉降量相对较小，隧道沉降量较大。沿线形成了 4 个沉降槽，且沉降槽有向两边扩展的趋势。选取 6 个典型断面 (K0+575、K2+500、K3+775、K1+090、K1+830、K2+800)，绘制隧道沉降随时间发展曲线如图 5 所示。从图 5 可知，位于非沉降槽区段的典型断面 (K0+575、K2+500、K3+775) 沉降发展较慢，沉降呈收敛趋势。而位于沉降槽区段的典型断面 (K1+090、K1+830、K2+800) 沉降发展较快，目前尚未收敛。

3 不均匀沉降原因分析

3.1 工程地质条件

考虑到西延线沿线软土层分布不均，进一步绘制西延线结构累积沉降量与下卧淤泥质粉质黏土层厚度的对比图，如图 6 所示。从中可以看出，西延线沉降槽段结构下卧软土层厚度明显大于非沉降槽段，沉降

槽段结构下卧软土层厚度基本大于 20 m。地铁结构下卧软土层分布不均是西延线结构空间不均匀沉降的基本原因。

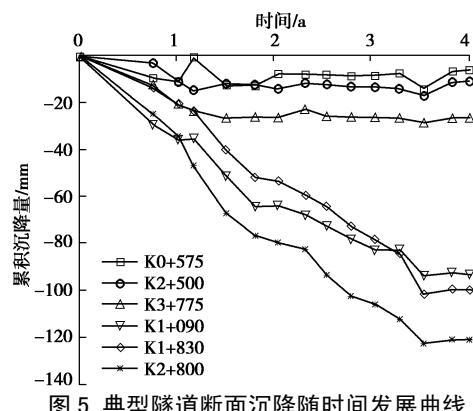


图 5 典型隧道断面沉降随时间发展曲线

Fig. 5 Variation of measured tunnel settlement with time

3.2 地铁周边近距离建筑工程活动

图 7 为西延线地下段自 2005 年 9 月至 2009 年 9 月沿线近距离建筑工程与沉降槽区段位置分布对比图，周边建筑工程基本情况统计见表 2。从图 7 中可以看到，西延线周边建筑活动主要集中在沉降槽区段，区间隧道沉降量与其周边建筑活动在空间分布上有很好的对应关系，沿线周边建筑活动对地铁结构的不均

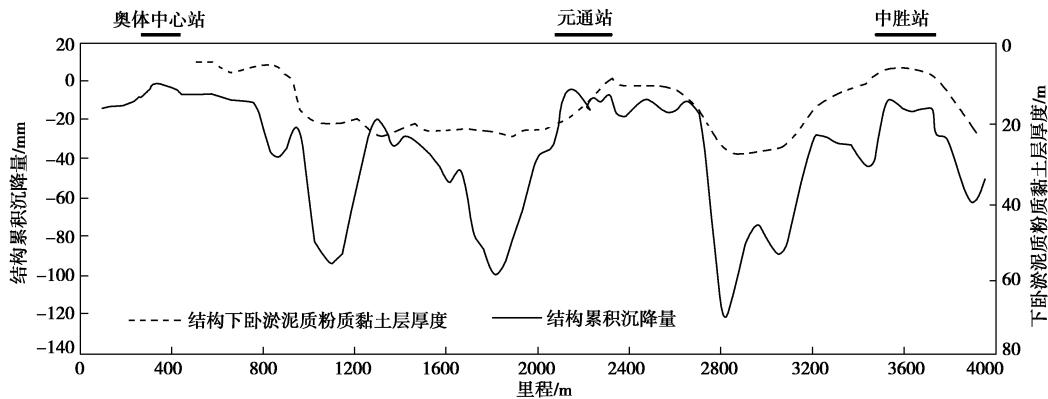


图 6 结构累积沉降量与下卧软土层厚度对比图

Fig. 6 Comparison between cumulative settlement and thickness of soft soils under structures

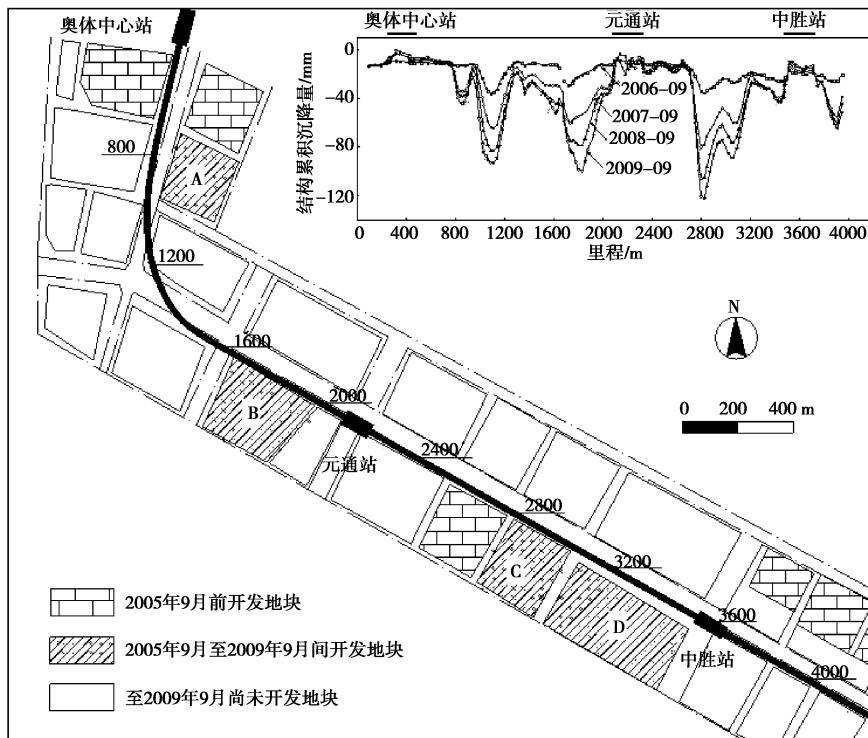


图 7 西延线沿线建筑工程与沉降槽区段分布对比图

Fig. 7 Comparison between settlement trough and adjacent construction activities

匀沉降产生了较大的影响。分析认为,由于西延线周边物业开发主要集中在沿线软土层较厚的区段,施工过程中的降水、加卸载及对土体的扰动等进一步加速和加剧了土体和隧道的局部沉降,导致西延线形成了多个沉降槽。

表 2 西延线周边建筑开发情况统计

Table 2 Adjacent construction activities along West Extension Line

地块	建筑名称	距地铁中心线平均距离/m	楼层
A	碧瑶花园东园	65	5~9 层
B	博览中心会议中心	15	3 层
C	宋都美域和试验小学	15	7~16 层
D	明基医院	60	2~16 层

综上分析,导致西延线地下段产生较大不均匀沉降的基本因素是工程地质条件差,地铁结构下卧软土层沿线分布不均匀。另一方面,西延线运营后周边物业开发密集,且主要集中在沿线软土层较厚的区段,施工过程中的降水、加卸载、土体扰动等进一步加速和加剧了土体和隧道的局部沉降,导致沿线形成了多个沉降槽。在上述因素的基础上,隧道的局部渗漏和循环车载作用则将不利因素的影响进一步放大,使结构的不均匀沉降更加突出。

4 地铁结构不均匀沉降的分区控制

在结构沉降现状和原因分析的基础上,综合西延

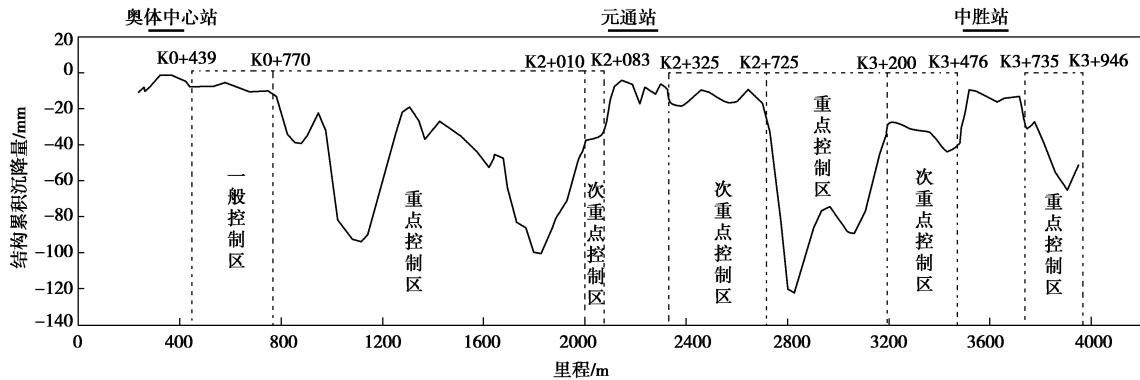


图 8 西延线不均匀沉降控制分区

Fig. 8 Partition of differential settlement of West Extension Line

线工程地质条件、地铁沿线周边地块开发程度等，将西延线区间隧道分3类沉降控制区，分别为重点控制区、次重点控制区和一般控制区。图8为西延线不均匀沉降控制分区图。分区依据如下：西延线沉降槽K0+770—K2+010、K2+725—K3+200、K3+735—K3+946区段结构下卧软土层厚度基本大于20 m，结构累积沉降量基本大于20 mm，结构病害严重，均为重点控制区；非沉降槽段结构下卧软土层厚度基本小于20 m，结构累积沉降量在0~40 mm之间，其中K2+010—K2+083、K2+325—K2+725、K3+200—K3+478区段周边地块当前开发较少，后期可能开发程度较大，为次重点控制区；而K0+439—K0+770区段两侧周边地块开发已基本完成，后期可能开发程度小，为一般控制区。针对不同的控制区，应采取不同的沉降监测频率和结构养护维修措施。

事实上，对于地铁结构的长期沉降问题，应从“设计—施工—运营”一体化的角度来进行控制。在规划设计阶段，应充分考虑线路地质条件，尽量避免隧道下卧软土层较厚的情况，对于必须经过厚软土层地区的线路，则应尽可能的采取预处理措施。施工阶段，应保证施工质量，尽量减小施工对隧道周围土体的扰动。运营阶段，除应严格控制地下水的开采和地铁隧道近距离工程活动外，还应加强渗漏水等结构病害的修复处理，从而实现长期沉降的分区预控制。

5 结 论

(1) 西延线运营4年后，隧道最大累积沉降达122 mm，沿线形成了4个沉降槽，且沉降槽有向两边扩展的趋势。

(2) 地铁结构下卧软土层分布不均和地铁结构周边近距离建筑活动(局部)是导致西延线地下段空间不均匀沉降的主要原因。

(3) 针对软土地区地铁隧道的不均匀沉降问题，

应结合地铁线路的工程地质条件和周边建筑开发程度，进行分区预控制。

参 考 文 献:

- [1] 刘国彬, 李青, 吴宏伟. 地下水开采引起的次压缩对隧道长期沉降的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 3729–3735. (LIU Guo-bin, LI Qing, NG C W W. Influence of secondary compression due to groundwater mining on long-term tunnel settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 3729 – 3735. (in Chinese))
- [2] NG C W W, LIU G B, LI Q. Investigation of the long-term tunnel settlement mechanisms of the first metro line in Shanghai. Can Geotech J, 2013, 50: 674–684.
- [3] 黄大维, 周顺华, 宫全美, 等. 软土地区地铁不同结构间差异沉降特点分析[J]. 同济大学学报(自然科学版) 2013, 41(1): 95–100. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Characteristic analysis of non-uniform settlement for different structures of metro in soft soil districts[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(1): 95 – 100. (in Chinese))
- [4] 刘峰. 软土地区地铁隧道长期沉降及对地铁安全的影响[D]. 南京: 南京大学, 2013. (LIU Feng. Long-term settlement of metro in soft ground and its influence on safety[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese))
- [5] 黄广龙, 卫敏, 韩爱民, 等. 南京长江漫滩地层中地铁结构的沉降分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(3): 112–116. (HUANG Guang-long, WEI Min, HAN Ai-min, et al. Analysis on the subsidence of tunnel foundation in Nanjing Yangtze River valley flat[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(3): 112 – 116. (in Chinese))
- [6] O'REILLY M, MAIR R, ALDERMAN G. Long-term settlements over tunnels: an eleven-year study at Grimsby[C]// Proceedings of Conference Tunneling. London:

- Institution of Mining and Metallurgy, 1991: 55 - 64.
- [7] 林永国, 廖少明, 刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨[J]. 地下空间, 2000, 20(4): 264 - 267, 289. (LIN Yong-guo, LIAO Shao-ming, LIU Guo-bin. A discussion of the factors effecting on longitudinal deformation of subway tunnel[J]. Underground Space, 2000, 20(4): 264 - 267, 289. (in Chinese))
- [8] SHEN Shui-Long, WU Huai-Na, CUI Yu-Jun, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 40: 309 - 323.
- [9] 韦 凯, 宫全美, 周顺华. 隧道长期不均匀沉降预测的蚁群算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 993 - 998. (WEI Kai, GONG Quan-me, ZHOU Shun-hua. Ant colony algorithms of long-term uneven settlement prediction in tunnel[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37(8): 993 - 998. (in Chinese))
- [10] 汪小兵, 王如路, 刘建航. 上海软土地层中运营地铁隧道不均匀沉降的治理方法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 26 - 31. (WANG Xiao-bing, WANG Ru-lu, LIU Jian-hang. Disposal method of unequal settlement of metro tunnel in operation in Shanghai soft ground[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(1): 26 - 31. (in Chinese))
- [11] 侯晓亮, 赵晓豹, 李晓昭, 等. 南京河西地区软土地层特征及工程特性研究[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 600 - 608. (HOU Xiao-liang, ZHAO Xiao-bao, LI Xiao-zhao, et al. Research on engineering properties of flood plain soft soil in Hexi area, Nanjing[J]. Geological Review, 2011, 57(4): 600 - 608. (in Chinese))

(本文责编 明经平)