

DOI: 10.11779/CJGE2015S1022

隧道下穿施工诱发框架结构建筑物变形规律研究

周 智^{1, 2}, 衡朝阳^{1, 2}, 孙曦源^{1, 2}

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2. 建研地基基础工程有限责任公司, 北京 100013)

摘 要: 隧道下穿既有高大建筑物越来越多的出现在城市地铁建设中, 有必要对建筑物受地铁隧道下穿影响发生变形的规律进行研究。采用 FLAC^{3D} 软件, 考虑建筑物-土体-隧道共同作用, 模拟了双线暗挖隧道先后穿越独立基础框架结构建筑物的工况。模拟结果表明框架结构的存在对隧道开挖引发的沉降位移曲线形状有明显影响, 沉降槽深度明显减小, 宽度有所增加。在垂直于隧道方向, 上部结构的存在减小了柱间沉降差, 使框架结构柱间基础沉降趋于平缓。最终柱间沉降差较大值出现在沉降槽曲线拐点两侧框架柱间。在平行于隧道方向, 建筑物柱间沉降差与隧道掌子面位置密切相关, 掌子面位置前后两柱间沉降差较大。隧道通过后, 该方向上最终柱间沉降差将很小。

关键词: 下穿隧道; 框架结构; 共同作用; 沉降; 柱基沉降差

中图分类号: TU43; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0110-05

作者简介: 周 智(1982 -), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的设计、科研和施工。E-mail: zhouzhouz@foxmail.com。

Simulation study of deformation of frame structure caused by construction of under-crossing tunnels

ZHOU Zhi^{1, 2}, HENG Chao-yang^{1, 2}, SUN Xi-yuan^{1, 2}

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 10013, China; 2. CABR Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Considering the interaction of building-soil-tunnel, the case of frame building with independent foundation undercrossed by double-line parallel shallow embedded tunnel is simulated by FLAC^{3D}. The results show that the stiffness of frame structure has a remarkable effect on foundation settling tank of the upper building. In the direction of perpendicular to the tunnel axis, the largest differential settlement between two frame columns usually happens around the inflection point of settlement curve, and the existence of the upper structure reduces the differential settlement between columns. The differential settlement relates to the relative position of tunnel face in the direction of parallel to tunnel axis, while it will be a very small value when the tunnel face is far away enough.

Key words: under-crossing tunnel; frame structure; interaction; settlement; differential settlement

0 引 言

隧道下穿既有高大建筑物越来越多的出现在城市地铁建设中, 隧道施工引起建筑物沉降变形, 致使建筑物结构内部产生附加内应力, 对建筑物产生不利影响^[1-3]。由于建筑物结构的共同作用导致建筑物基础的变形规律与空旷场地的地表变形规律不再一致, 有必要对建筑物受地铁隧道下穿影响发生变形的规律进行研究。目前关于建筑在隧道下穿时变形预测方法主要有基于 Peck 公式考虑建筑物结构刚度的建筑物沉降曲线预测方法刚度修正法^[4-5]及采用有限元或有限差分软件模拟的数值模拟法^[6-7]。刚度修正法基于实测资料给出了计算系数 K 和结构剪切刚度经验关系, 可预测建筑物最终沉降曲线。但地铁隧道施工是一个动态

过程, 建筑物的变形在该过程中也始终处于动态变化中。建筑物最终变形, 并不一定是建筑物各变形指标最不利情况。因此有必要对建筑物因地铁施工发生变形的动态过程进一步研究。数值分析方法可以较好的对这一动态过程进行分析, 但由于问题的复杂性, 目前的研究多为隧道穿越空旷场地的情形, 或模型中虽然考虑了上部建筑但模型中仅建立建筑物基础而未建立上部结构。以上两种方法均不能体现隧道-土体-结构共同作用效果, 与隧道下穿建筑物的实际情况差别较大。在考虑了隧道-土体-结构共同作用下, 漆泰

基金项目: 住房和城乡建设部课题 (2013-K3-22)

收稿日期: 2015-03-26

岳^[8]分析了盾构隧道穿越砖混结构时, 建筑物及地层变形特征以及隧道距离对建筑物影响的效果。

本文以北京地铁十号线二期前泥洼站—西局站区间隧道为典型地段, 采用 FLAC^{3D} 软件, 模拟了双线平行暗挖隧道垂直穿越独立基础框架结构建筑物的工况, 研究了由隧道开挖引起的框架结构建筑物变形规律。

1 模型建立

该区段典型地层根据钻探揭露, 按照沉积年代、成因类型及岩性, 勘察深度范围内 (42 m) 自上而下的地层划分为人工堆积层、新近沉积层和第四纪晚更新世冲洪积层、第三纪基岩 4 类, 并按地层岩性及其物理力学性质进一步分为 6 个大层及若干亚层。本文简化为 4 个岩组, 分别是: 填土、卵石—圆砾、卵石、卵石。

计算模型尺寸为: 200 m×100 m×50 m, 双线隧道, 隧道中心深 14 m, 直径约 6 m, 隧道中心距 16 m。采用暗挖法施工, 先开挖左侧隧道, 在左侧隧道挖通后开挖右侧隧道, 开挖过程中对隧道拱顶及掌子面采取注浆加固措施, 加固暗挖通道轮廓线外 3 m 及轮廓线内土体, 洞内深孔超前注浆循环段长度为 6~8 m, 搭接长度不小于 2~3 m。模拟中每步开挖长度 4 m, 待计算稳定后继续开挖, 每侧隧道开挖 25 步。土体及注浆加固土体采用莫尔—库仑本构模型, 支护结构采用弹性本构模型。土层及支护结构材料参数见表 1。

表 1 模型材料基本参数

Table 1 Parameters of model materials

材料	厚度 /m	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量 /Pa
填土	2.7	1900	0.33	10	15	5.0×10 ⁶
卵石—圆砾	3.0	2100	0.27	0	30	3.0×10 ⁷
卵石	18.3	2100	0.25	0	35	4.0×10 ⁷
卵石	26.0	2100	0.25	0	40	4.5×10 ⁷
注浆后土体	—	2200	0.23	40	37	4.2×10 ⁷
C25 混凝土	—	2500	0.2	—	—	2.8×10 ¹⁰
C30 混凝土	—	2500	0.2	—	—	3.0×10 ¹⁰

框架结构为 7 层, 框架柱间距 8 m×8 m, 柱截面尺寸 0.9 m×0.9 m, 框架梁截面尺寸 0.4 m×0.8 m, 梁柱混凝土强度等级 C30。梁和柱均采用 beam 单元模拟。独立基础平面尺寸 4 m×4 m, 厚 1.2 m, 基础埋深 2.7 m, 混凝土强度等级 C25。楼层高 3.5 m, 楼板厚 0.15 m, 混凝土强度等级 C25。除自重外, 楼面装修荷载及活荷载总和按 4 kN/m² 计。楼板及基础均

采用 shell 单元模拟。框架平面及与隧道位置关系见图 1。计算模型见图 2。模型在计算得到初始应力并将所有位移清零后开挖隧道, 仅考虑隧道开挖引起的附加变形。

为体现出上部结构对基础沉降的影响, 将无上部框架结构的模型作为对比模型, 该模型仅建立基础未建立上部结构, 如图 3。基础顶部竖向力由框架模型计算初始应力后传递至对比模型, 故两者初始应力一致, 区别仅在于有无上部框架。由此对比分析框架结构参与共同作用的影响。

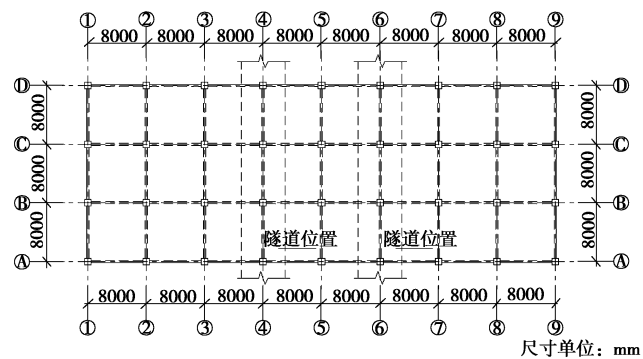


图 1 框架平面图

Fig. 1 Structural plan of frame

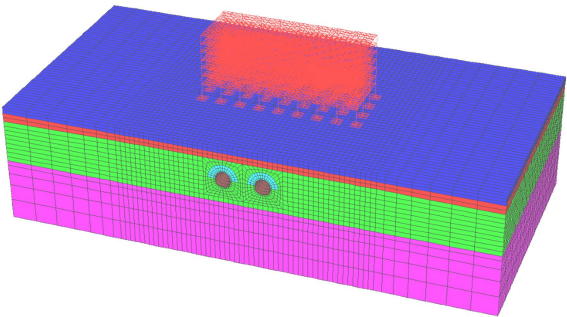


图 2 7 层框架计算模型

Fig. 2 Numerical model of frame with 7 layers

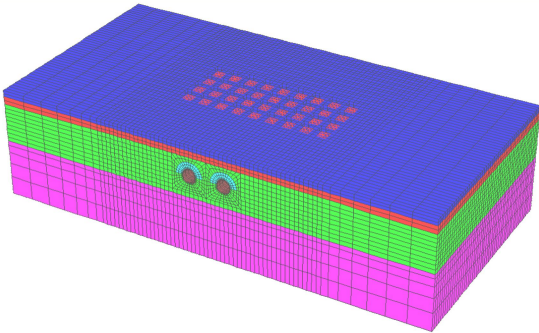


图 3 无框架计算模型

Fig. 3 Numerical model of no frame

2 模拟结果分析

2.1 框架结构对基础沉降的影响

根据模拟计算结果,左线隧道挖通后 A 轴及 B 轴基础沉降曲线分别见图 4 及图 5。左线隧道挖通后 B 轴柱间沉降差曲线见图 6。以上所述图中均将 7 层框架模型同无框架模型及 greenfield (既无结构也无荷载) 模型计算结果进行了对比。

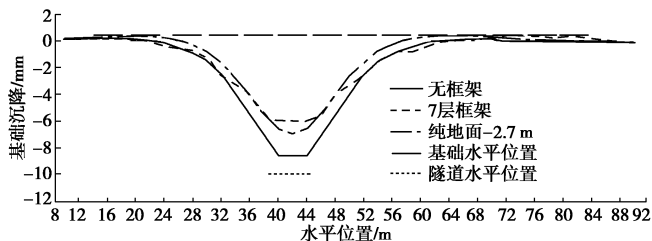


图 4 A 轴基础沉降曲线图 (左线挖通)

Fig. 4 Curves of A-axis foundation settlement (After excavation of left tunnel)

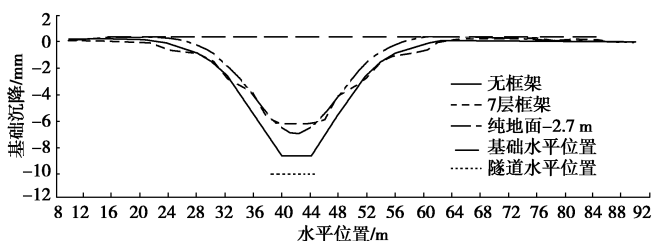


图 5 B 轴基础沉降曲线图 (左线挖通)

Fig. 5 Curves of B-axis foundation settlement (After excavation of left tunnel)

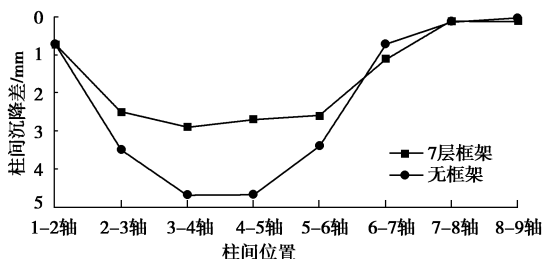


图 6 B 轴柱间沉降差曲线图 (左线挖通)

Fig. 6 Curves of B-axis differential settlement (After excavation of left tunnel)

由图 4 及图 5 可见,在上部框架结构参与共同作用后,单线隧道开挖时基础沉降不再是平滑曲线,曲线形状与 Peck 公式曲线相近。同无框架模型相比上部框架结构的存在减小了基础的最大沉降。由于框架结构对荷载的分担作用,基础沉降槽宽度有所增加,但增加幅度不大。因柱底荷载不同,荷载较大的 B 轴基础沉降略大于 A 轴。沉降最大值位于隧道拱顶上基础位置。对于框架结构,柱间沉降差是较沉降值更为重要的地基基础的变形指标。由图 6 可以看出框架的存在显著地减小了柱间沉降差,使建筑物的沉降趋于平缓。结合图 5 及图 6 可以看出,该框架沉降差较大值出现在沉降槽曲线拐点两侧的柱间。

根据计算结果,双线隧道挖通后 A 轴及 B 轴基础沉降曲线分别见图 7, 8。双线隧道挖通后 B 轴柱间沉降差曲线见图 9。以上所述图中均将 7 层框架模型同无框架模型及 greenfield (既无结构也无荷载) 模型计算结果进行了对比。

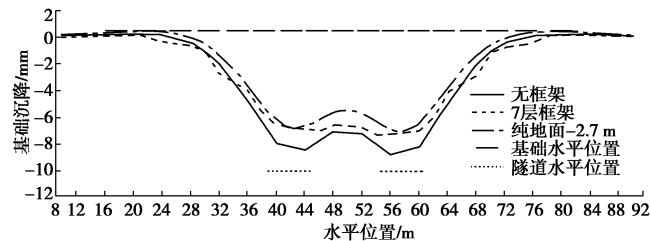


图 7 A 轴基础沉降曲线图 (双线挖通)

Fig. 7 Curves of A-axis foundation settlement (After excavation of both tunnel)

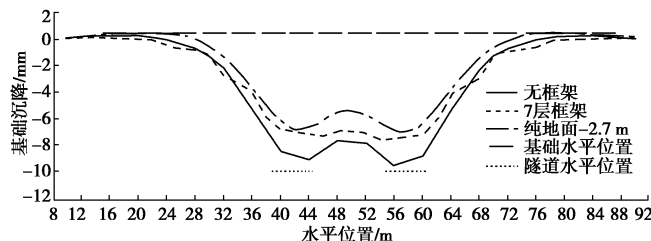


图 8 B 轴基础沉降曲线图 (双线挖通)

Fig. 8 Curves of B-axis Foundation settlement (After excavation of both tunnel)

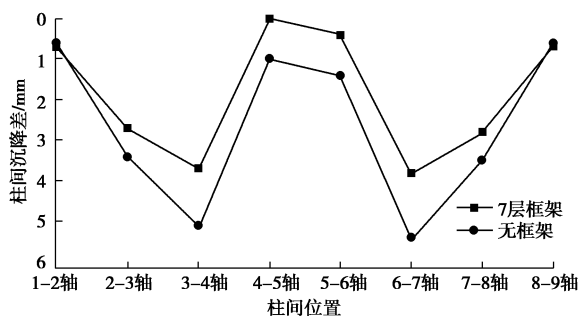


图 9 B 轴柱间沉降差曲线图 (双线挖通)

Fig. 9 Curves of B-axis differential settlement (After excavation of both tunnel)

由图 7 及图 8 可见,与单线隧道时相同,双线隧道挖通时,同无框架模型相比上部框架结构的存在减小了基础的最大沉降。由于框架结构对荷载的分担作用,基础沉降槽宽度有所增加,但增加幅度不大。沉降较大值位于两隧道拱顶上基础位置。由图 9 可以看出框架的存在减小了柱间沉降差,使建筑物的沉降趋于平缓。结合图 8 及图 9 可以看出,双线隧道开挖时,框架最终沉降差较大值出现在沉降槽曲线拐点两侧的柱间,沉降槽中部最终沉降差较小。

2.2 隧道开挖过程中框架结构沉降变化规律

结构的沉降在隧道开挖过程中处于动态变化,过

程中的沉降变形情况同最终沉降有较大区别, 因此有必要对该动态过程做进一步分析。根据模型模拟结果, A 轴基础沉降曲线, 左右线掘进过程中 A 轴-4 轴与 A 轴-5 轴基础间沉降差时程曲线, 4 轴基础沉降曲线及 4 轴基础沉降差时程曲线分别见图 10~13。

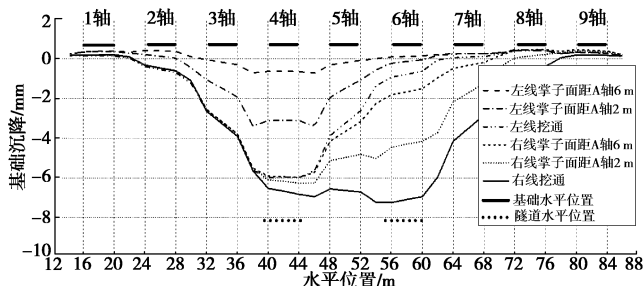


图 10 A 轴基础沉降曲线

Fig. 10 Curves of A-axis foundation settlement

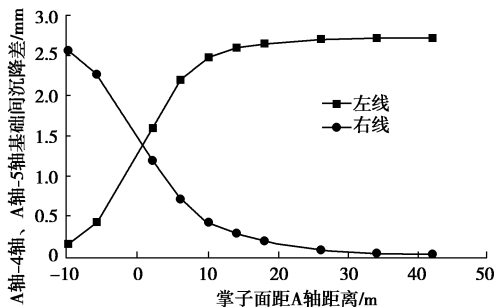


图 11 A 轴-4 轴与 A 轴-5 轴基础间沉降差曲线

Fig. 11 Curves of A-4-axis and A-5-axis differential settlements

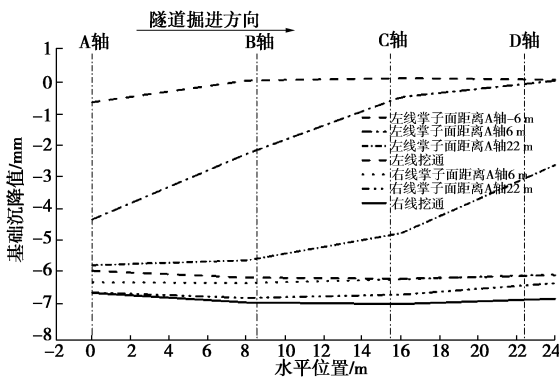


图 12 4 轴基础沉降曲线

Fig. 12 Curves of 4-axis foundation settlement

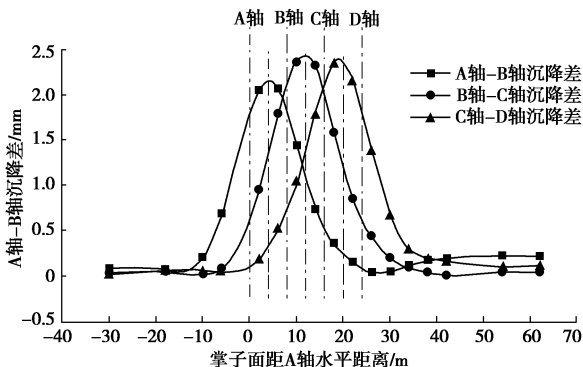


图 13 4 轴基础沉降差时程曲线 (左线开挖)

Fig. 13 Time-history curves of 4-axis differential settlement (After excavation of left tunnel)

由图 10 可以看出, 随着隧道左右线隧道的分别掘进, 建筑基础沉降逐步发展, 右线隧道的开挖将进一步增加建筑物的基础沉降, 该增加区域主要在左线隧道以右部分, 对左线隧道中线以左的建筑物沉降增加很小。由图 11 可见随着左线隧道的开挖, A 轴-4 轴与 A 轴-5 轴基础间柱间沉降差逐渐增大, 当左线隧道贯通后达到最大值, 在该过程中呈单向增加变化。随着右线隧道的开挖, 该沉降差开始逐步减小, 当右线隧道通过后此沉降差接近于零。因此在分析隧道开挖对框架建筑物变形影响时, 不应仅关注基础的最终沉降值与最终沉降差, 应充分认识到建筑物基础变形随着隧道施工处于动态变化中, 各变形指标并非单调增加。隧道掘进过程中出现的较大变形值应予以足够重视。就本算例而言, 在垂直于隧道方向上, 单线隧道开挖时, 基础沉降逐渐增大, 沉降差开始出现并逐步增大。第二条隧道的开挖将进一步增加基础的沉降, 柱间沉降差出现部分区域增加, 部分区域减小。柱间沉降差双向变化范围主要位于两隧道中间区域。

由图 12 及图 13 可见, 在平行于隧道方向, 随着隧道分别掘进, 建筑基础沉降逐步发展。随着左线隧道的开挖接近, 其上方框架基础沉降沿隧道掘进方向依次增加, 该方向上柱间沉降差表现出由小增大, 再由大到小, 最终接近于零的趋势。开挖隧道正上方基础沉降差最大值通常出现在掌子面掘进至两框架柱中间位置时。当右线隧道开挖后, 左线隧道上方框架基础沉降再次随隧道掘进依次增加, 但增加值仅为右线隧道掘进时的约 15%, 基础间沉降差同样表现为先增加后减小的趋势, 最终柱间沉降差很小。故在该方向上应重点关注最终沉降值及隧道掘进过程中可能出现的较大沉降差。

3 结论与建议

本文通过模拟双线平行暗挖隧道垂直穿越独立基础框架结构建筑物的工况, 研究了由隧道开挖引起的框架结构建筑物变形规律。结论与建议如下:

(1) 框架结构的存在对隧道开挖引发的沉降位移曲线形状有明显影响, 上部结构的存在减小了柱间沉降差, 使框架结构柱间基础沉降趋于平缓。沉降槽深度明显减小, 宽度有所增加, 且在隧道穿越框架建筑时, 中间框架沉降大于边框架沉降。

(2) 在垂直于隧道方向上, 最终柱间沉降差较大值出现在沉降槽曲线拐点两侧垂直于隧道方向框架柱间。

(3) 在平行于隧道方向, 建筑物柱间沉降差与隧道掌子面位置密切相关, 掌子面位置前后柱间沉降

差较大。隧道通过后,该方向上最终柱间沉降差将很小。

(4) 分析隧道开挖对框架建筑物变形影响时,不应仅关注基础的最终沉降值与最终沉降差,应充分认识到建筑物基础变形随着隧道施工处于动态变化中,各变形指标并非单调增加。隧道掘进过程中出现的较大变形值应予以足够重视。

参考文献:

- [1] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3310 - 3316. (SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LIU Bao-chen. Influence of shallow tunnel excavation on ground surface buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3310 - 3316. (in Chinese))
- [2] 李进军, 王卫东, 黄茂松, 等. 地铁盾构隧道穿越对建筑物桩基础的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 166 - 170. (LI Jin-jun, WANG Wei-dong, HUANG Mao-song, et al. Influence of piles of structure induced by crossing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 166 - 170. (in Chinese))
- [3] 覃卫民, 赵荣生, 王浩, 等. 浅埋大跨隧道下穿建筑物的安全影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3762 - 3768. (QIN Wei-min, ZHAO Rong-sheng, WANG Hao, et al. Study of building safety during shallow-buried large-span tunnel underpassing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3762 - 3768. (in Chinese))
- [4] 韩焯, STANDING J R, 李 宁. 隧道施工引起建筑物变形预测的刚度修正法[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 539 - 545. (HANG Xuan, STANDING J R, LI Ning. Modified stiffness approach to predict deformation of building induced by tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 539 - 545. (in Chinese))
- [5] 韩焯, 李 宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(1): 23 - 35. (HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 23 - 35. (in Chinese))
- [6] 刘 波, 陶龙光, 李希平, 等. 地铁盾构隧道下穿建筑基础诱发地层变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(4): 621 - 626. (LIU Bo, TAO Long-guang, LI Xi-ping, et al. Research of ground settlement induced by metro shield tunnel beneath building foundations[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(4): 621 - 626. (in Chinese))
- [7] 于 宁, 朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(8): 1330 - 1334. (YU Ning, ZHU He-hua. Analysis of earth deformation caused by shield tunnel construction and 3D-FEM simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(8): 1330 - 1334. (in Chinese))
- [8] 漆泰岳. 地铁施工引起地层和建筑物沉降特征研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1283 - 1290. (QI Tai-yue. Settlement characteristics of strata and buildings caused by metro tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1283 - 1290. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)