

DOI: 10.11779/CJGE2017S1049

地下洞室开挖对地表建筑的影响

李云屹, 王 昊, 贡嘎顿珠, 张 嘎

(水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学), 北京 100084)

摘 要: 针对地下洞室开挖可能会对地表建筑产生的影响, 通过离心模型试验研究了开挖后附近土体的沉降情况, 并通过数值模拟研究了地表建筑物的位置、高度和宽度对这种沉降的影响。试验得到了土体中的标志点在开挖过程中的时程曲线, 并得到了最终地表的沉降曲线与沉降云图。数值模拟得到了地表建筑物的最大相对沉降和最大水平应变与其位置、高度和宽度的关系。结果显示, 当地下隧道恰好从建筑物正下方穿过时, 地下隧道顶部的沉降量与水平应变最大; 但当地下隧道从建筑物附近穿过时, 地表建筑基础的倾斜率可能会更大。

关键词: 地下洞室; 地表建筑; 离心模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU761.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0246-05

作者简介: 李云屹(1994-), 男, 湖北襄阳人, 在读博士生, 主要从事土工抗震方面的研究。E-mail: liyunyi1994@126.com。

Influences of excavation of underground carvens on surface buildings

LI Yun-yi, WANG Hao, Kunga-dondrob, ZHANG Ga

(State Key Laboratory of Hydrosience & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The centrifugal model tests and finite element models are conducted to investigate the influences of excavation of underground carvens on surface buildings. The time-history curves of index points and the settlement curves of the surface are acquired by centrifugal model tests. The effects of width, weight and location of the buildings on the interaction are discussed. It is found that the horizontal strain of the building foundation is the maximum when the underground tunnel crosses the middle of the surface buildings. And while the underground tunnel is near the surface buildings instead of crossing exactly under the buildings, the non-uniform settlement of buildings is more severe.

Key words: underground cavern; surface building; centrifugal model test; numerical simulation

0 引 言

随着我国城市化进程的加快, 虽然居民的生活水平得到了巨大的提升, 却也带来了一系列的问题, 比如地表空间日趋紧张。为了解决空间紧张的问题, 除了修建高楼与扩大城市面积外, 开发地下空间也不失为一个良策。但与此同时, 因修建地下工程而引起的诸如地面塌陷、房屋损坏等工程问题也层出不穷。

目前, 国内外对于地下洞室开挖的研究, 主要可分为经验预测、理论分析、试验模拟和数值模拟这四个方面。在地下洞室开挖方面, 有许多实用性很强的结论源自于对实际工程的经验总结, 如 Peck 公式及其修正公式^[1-3], 通过对实际工程的观测与研究, 许多学者也总结出了一些实用的规律^[4-6]。在理论分析方面, 基于随机介质理论, 建立了不少地面沉降的模型^[7-9]。离心模型试验也是常用的研究手段, 通过小型盾构机、离心振动台等设备, 可以研究多种开挖工况^[10-12]。有限元法、有限差分法等数值方法也被大量应用到地下洞室开挖的研究当中^[13-14]。

本文通过离心模型试验与数值模拟相结合的方法, 研究了地下洞室开挖后附近土体的沉降情况, 并考虑了附近地表建筑物的位置、高度和宽度对沉降的大小与分布的影响, 最后讨论了地下洞室开挖对附近地表建筑物安全性的影响。

1 试验原理和设备

进行地下洞室开挖时, 附近土体的沉降主要由土体中原有的应力控制, 在平原地区主要是自重应力。因此, 若要比准确地模拟附近土体的变形情况, 必须保证模型中的自重应力与天然情况下相近。本文试验利用清华大学土工离心机实验室的土工离心机完成, 离心机容量为 50 g·t, 最大离心加速度为 50g。

对隧道开挖过程的模拟, 则要求尽量接近于实际工况下的加荷与卸荷规律。对隧道开挖方式的模拟,

基金项目: 清华大学本科生学术研究基金项目(20141081231)

收稿日期: 2016-11-28

目前已有许多处理方法, 如机械开挖、水溶法、玻璃熔融法、微型爆破法等。本试验选用了水溶法, 先在乳胶管中装入易溶于水的硝酸钾, 再将乳胶管埋入模型箱中的土样里。待离心机加速至 50g 且土样固结完成后, 将水泵入乳胶管中, 使内部的硝酸钾溶解并随水流带出模型箱, 从而模拟开挖过程。

2 试验方案

2.1 地基土的制备

试验土样选用北京本地的砂壤土, 试验时土壤含水率为 16%, 土壤的天然重度为 17.5 kN/m³, 地基厚度为 20 cm, 分 4 层击实, 每层 5 cm。

2.2 隧道开挖模型

模型箱共分为两层, 上层为地基土模型, 隧道开挖模型被安置在模型箱上层底部, 如图 1 所示。



图 1 隧道开挖模型

Fig. 1 Model of tunnel excavation

模型箱下层为水循环装置, 包括储水箱、过滤设备与水泵。试验中, 使用镶嵌在地基土中的白色石子跟踪测量地基土的沉降量。整个试验模型如图 2 所示。



图 2 完整的离心机试验模型

Fig. 2 Centrifuge model

2.3 试验安排

本文共开展了 3 组试验, 分别为模型箱中无建筑、

建筑在隧道正上方和建筑在隧道侧上方。建筑模型为一铝盒, 因为铝的密度与混凝土接近。

3 试验结果

3.1 标志点的时程曲线

以无建筑物的工况为例, 可在接近地表的位置选择 3 个标志点, 分别表示距开挖处较远的位置 (1 号点)、开挖处正上方 (2 号点) 和距开挖处较近的位置 (3 号点), 如图 3 所示。

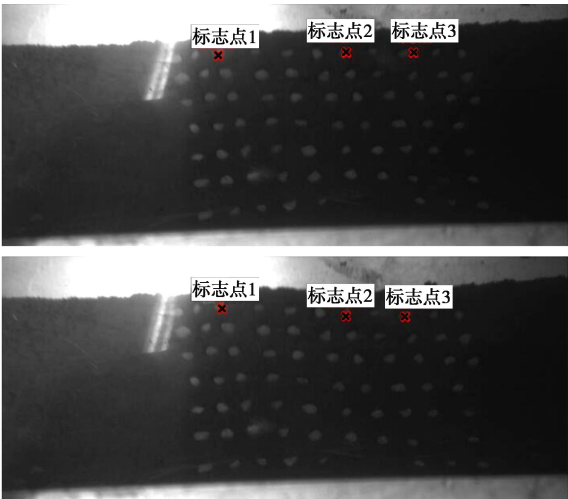


图 3 标志点的选取

Fig. 3 Selection of index points

跟踪这三个标志点的位移, 可以得到它们的时程曲线, 如图 4 所示。可以发现, 较边缘的点不仅沉降量小, 开始发生明显沉降的时间也比较晚。

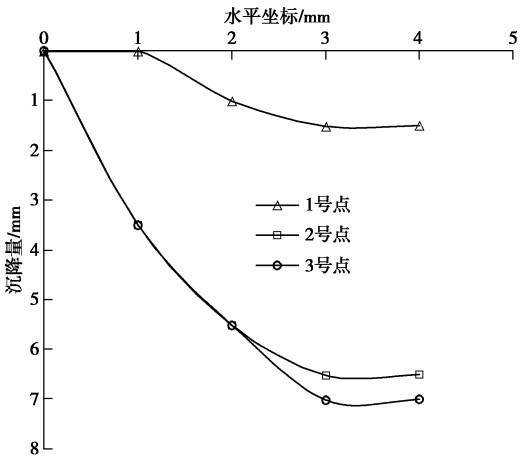


图 4 标志点的时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of index points

3.2 最终地表沉降曲线

对比三种工况开挖前后标记物的坐标, 可以得到最上层的位移分布, 进而近似推出地表的沉降曲线, 如图 5 所示。曲线大体为单峰曲线, 部分地区出现小的峰值, 应与乳胶管的进出水口带来的干扰有关。整

体而言，存在建筑物时沉降量会大一些，且峰值更加集中，曲线的斜率较大，说明不均匀沉降也较严重。

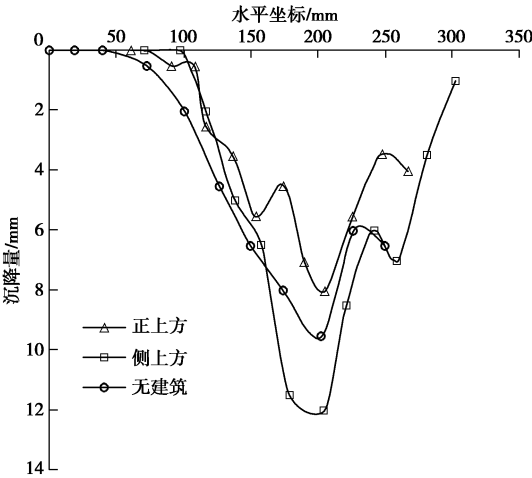
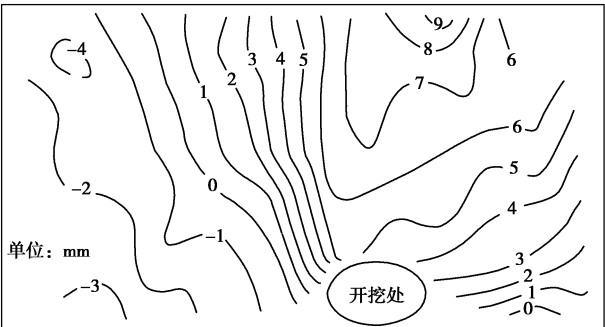


图 5 不同工况下的地表沉降曲线

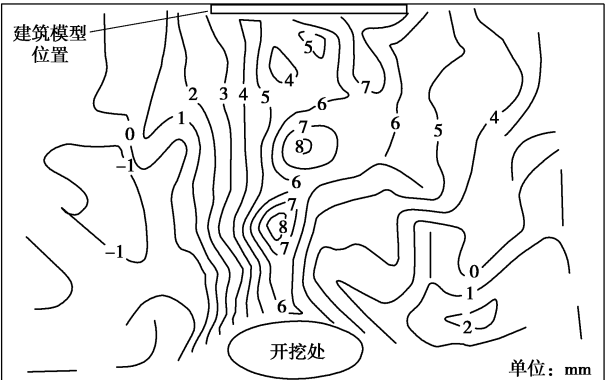
Fig. 5 Settlement curves under different conditions

3.3 沉降云图

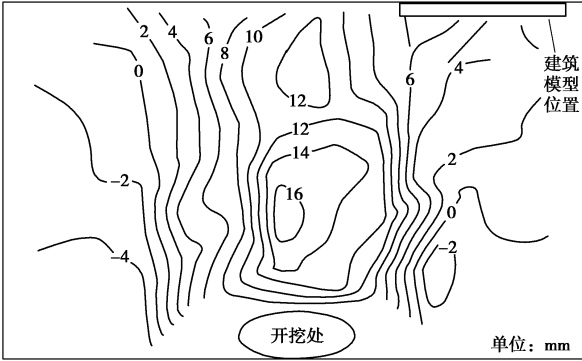
跟踪试验中各个标记点的位移，并进行三次样条插值，可以得到整个区域的沉降云图，如图 6 所示，图 6 (a) ~ (c) 依次为无建筑、建筑在正上方以及建筑在侧上方三种不同的工况。通过比较可以发现，地表无建筑时最大沉降地点位于地表，而当地表有建筑时，地下的沉降量可能会大于地表。与建筑物在开挖处正上方比较，当建筑物位于侧上方时，最大沉降区域会朝建筑物所在的方向偏移。



(a) 无建筑



(b) 建筑在正上方



(c) 建筑在侧上方

图 6 不同工况下的沉降云图

Fig. 6 Settlement contours under different conditions

4 数值模拟

4.1 数值模拟的实现

为了更方便地讨论更多种工况，以便于寻找更广泛的规律，可以在离心模型试验的基础上使用数值模拟方法。地下洞室开挖可等效为在洞壁上施加与原始应力大小相等、方向相反的面荷载，如图 7 所示。可以看出，对洞室上方的土体而言，整个开挖过程可以等效为一个施加荷载的过程，故可以使用较为简便的分层线弹性模型。

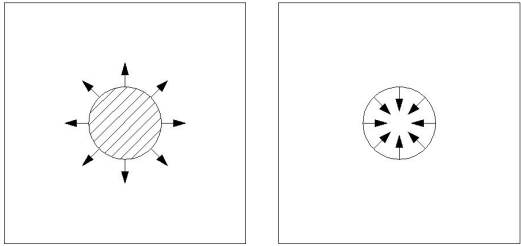


图 7 洞室开挖的等效荷载

Fig. 7 Equivalent load for carved excavation

使用该模型来模拟无建筑工况下的模型试验，可以得到如图 8 所示的沉降云图（等值线单位为 mm）。与图 6 (a) 对比，排除角点的影响，模拟结果是可以接受的。

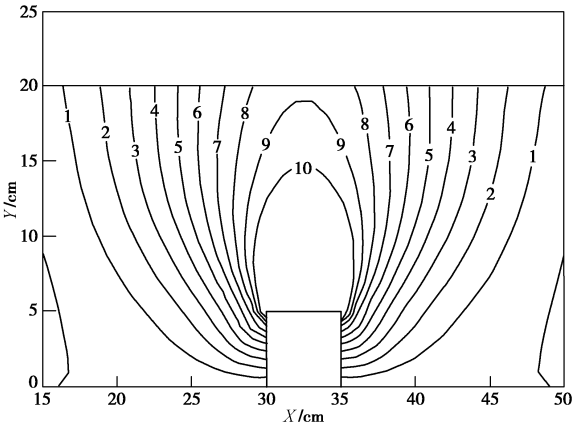


图 8 数值模拟得到的沉降云图

Fig. 8 Settlement contours simulated by numerical analysis

数值模型的计算域为 $150\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的矩形, 洞室深 30 m , 边长为 10 m 的正方形。土体的浮重度力为 10 kN/m^3 , 地表土的弹性模量为 10 MPa , 深度每增加 1 m , 则土的弹性模量增加 0.1 MPa , 泊松比固定为 0.4 。根据相关规范, 每层建筑物施加给地面的附加荷载为 25 kPa 。整个计算域划分为 7500 个单元, 每个单元为边长为 1 m 的正方形, 采用有限单元法计算, 如图 9 所示。

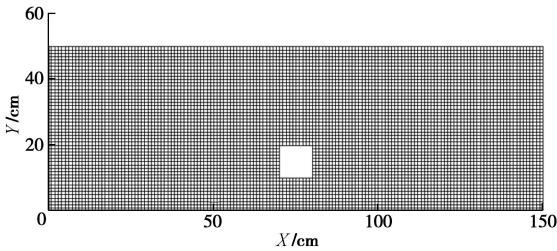


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

4.2 建筑物各参数的影响

最大倾斜率(即发生沉降后地面曲线切线斜率的最大值)与建筑物位置的关系如图 10 所示。最大倾斜率与建筑物的位置呈现为单峰函数关系, 在距洞室开挖处有一定距离的地方取最大值, 且这个距离随建筑物的加宽而变小, 随建筑物的加高而变大。

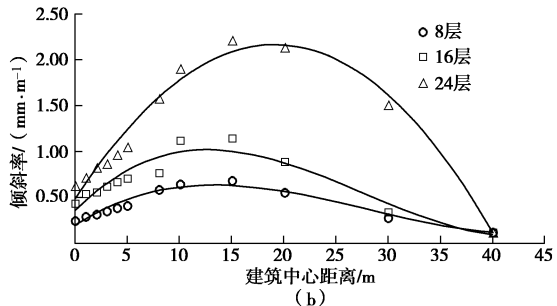
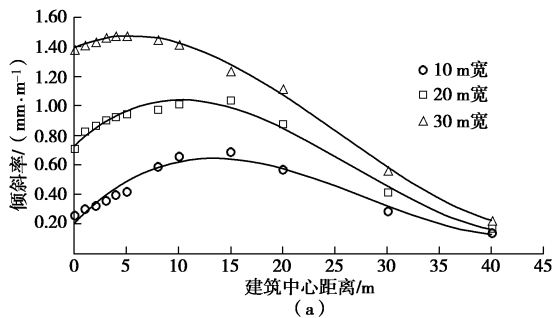


图 10 最大倾斜率与建筑物位置之间的关系

Fig. 10 Relationship between slope rates and architectural location

最大竖向应变与建筑物位置的关系如图 11 所示。随着建筑物的远离, 地表的水平应变越来越小, 且最终会由拉应变转换为压应变。

4.3 建筑物的安全性分析

当地面发生不均匀沉降时, 建筑物可能发生的破坏形式主要有倾斜与拉裂两种^[10]。由图 10~11 可知,

建筑物倾斜率最大与水平应变最大的位置是不同的。对于图 12 所示的两种开挖情况, 可以得到如下结论: 对于图 12 (a) 所示的情况, 建筑物会取得最大的绝对沉降量, 洞室的顶部变形也最严重。此时洞室顶部最有可能发生坍塌等事故, 而建筑物自身的水平变形会最严重, 可能导致地面和承重墙开裂, 影响建筑物的耐久性和稳定性。对于图 12 (b) 所示的情况, 洞室顶部的最大变形量与地表的最大沉降量均只有图 12 (a) 情况的三分之二, 但建筑的倾斜率最大。此时, 对于砖混结构以及其他抗剪强度不高的建筑而言, 承重墙的顶部可能会发生剪切破坏。而对于框架式结构等整体性较好的建筑, 则更可能发生倾倒失稳。

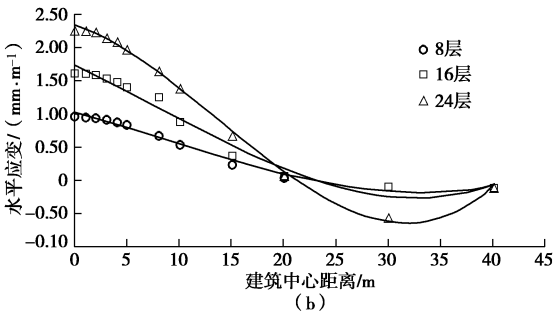
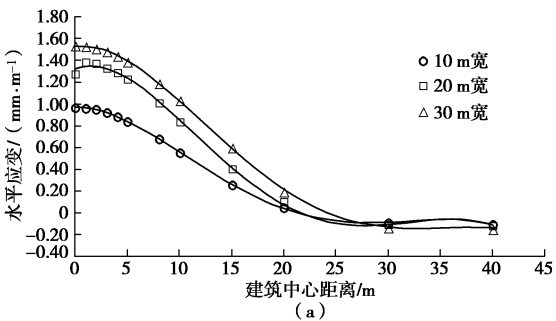


图 11 最大水平应变与建筑物位置之间的关系

Fig. 11 Relationship between horizontal strains and architectural location

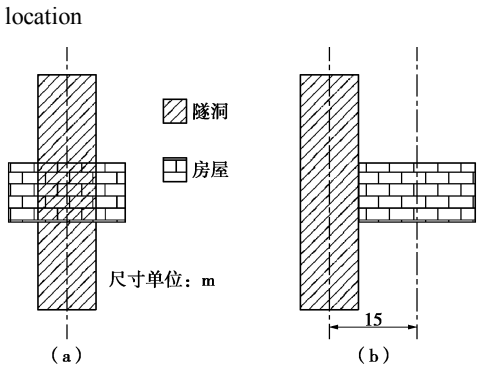


图 12 两种开挖情况

Fig. 12 Two situations of excavation

5 结论与建议

通过离心模型试验与数值模拟方法研究了地下洞室开挖对地表建筑的影响, 探讨了建筑物的位置、高度和宽度与附近土体变形量之间的关系。初步结论

与建议如下:

(1) 开挖地下洞室时, 施工场所周围的建筑物会对附近土体的变形产生较为显著的影响。

(2) 建筑物底部会产生拉应变, 可能会导致建筑物的地基和承重墙发生拉裂。该应变值的大小随建筑与洞室间距离的增大而减小, 随建筑物的高度与宽度的增大而增大。

(3) 洞室开挖后, 建筑物会发生不均匀沉降, 可能导致建筑物的承重墙发生剪切破坏, 或导致建筑物倾斜。不均匀沉降的程度可以用倾斜率来描述, 该值的大小与建筑物和洞室间的距离呈现为单峰曲线, 且随着建筑物高度与宽度的增大, 倾斜率也会增大。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]// Proc 7th Int Conf on SMFE, 1969: 225 - 290.
- [2] ATTEWELL P B, WOODMAN J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil[J]. Ground Engineering, 1982, **15**(8): 13 - 20, 36.
- [3] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Géotechnique, 1993, **43**(2): 315 - 320.
- [4] 宋强辉, 赵尚毅, 刘东升, 等. 城市地下轻轨隧道与上部建筑物相互作用及稳定性实例分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊): 423 - 429. (SONG Qiang-hi, ZHAO Shang-yi, LIU Dong-sheng, et al. Analysis of the interaction and influence between urban underground tunnel and adjacent structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 423 - 429. (in Chinese))
- [5] 刘影, 王旭东. 地下开挖对临近建筑物损害影响评估综述[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(4): 841 - 847. (LIU Ying, WANG Xu-dong. Overview of the assessment on the damage from underground excavation on adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(4): 841 - 847. (in Chinese))
- [6] 丁祖德, 彭立敏, 黄娟, 等. 大跨地铁隧道穿越建筑施工变形监测与控制[C]// 地下交通工程与工程安全——第五届中国国际隧道工程研讨会文集. 2011. (DING Zu-de, PENG Li-min, HUANG Juan, et al. Deformation monitoring and control of large span metro tunnel crossing under buildings[C]// Underground Transportation Projects and Work Safety: Proceedings of China's 5th International Symposium on Tunneling. 2011. (in Chinese))
- [7] LITWINISZYN J. Fundamental principles of the mechanics of stochastic media[M]. 1957.
- [8] 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))
- [9] 陈秋南, 张永兴, 任伯帜. 地下洞室地表非线性沉降模型参数确定新方法[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 55 - 58. (CHEN Qiu-nan, ZHANG Yong-xing, REN Bo-zhi. Study on the new method to determine parameters of the nonlinear model of subsidence for underground cave surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 55 - 58. (in Chinese))
- [10] IMAMURA S, HAGIWARA T, MITO K, et al. Settlement trough above a model shield observed in a centrifuge[C]// Centrifuge. 1998, **98**: 23 - 25.
- [11] 朱术云, 刘德乾, 孙强, 等. 深部开采煤层顶板聚压规律的离心试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(增刊 1): 36 - 41. (ZHU Shu-yun, LIU De-qian, SUN Qiang, et al. Research on the law of underground pressure accumulation of complete roof in deep mining coal seam by centrifuge test[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(S1): 36 - 41. (in Chinese))
- [12] 凌道盛, 郭恒, 蔡武军, 等. 地铁车站地震破坏离心机振动台模型试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, **46**(12): 2202 - 2209. (LING Dao-shen, GUO Heng, CAI Wu-jun, et al. Research on seismic damage of metro station with centrifuge shaking table model test[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, **46**(12): 2202 - 2209. (in Chinese))
- [13] 吴波, 高波, 索晓明, 等. 城市地铁隧道施工对管线的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 657 - 662. (WU Bo, GAO Bo, SUO Xiao-ming, et al. Study on influence of metro tunnel excavation on buried pipelines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(4): 657 - 662. (in Chinese))
- [14] 王绍君, 刘宗仁, 陶夏新. 浅埋暗挖隧道施工性态的数值模拟与分析[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(6): 75 - 79. (WANG Shao-jun, LIU Zong-ren, TAO Xia-xin. Numerical simulation and analysis of construction behavior of shallow tunneling by excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(6): 75 - 79. (in Chinese))

(本文责编 明经平)