

【工程应用】

# 软土地区深基坑施工对邻近地铁隧道的影响

于涛

(中邮通建设咨询有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为改善软土地区深基坑施工引起邻近地铁隧道变形的问题, 结合现场监测数据, 利用有限元软件 PLAXIS 3D 建立深基坑-地铁隧道数值模型分析深基坑施工引起邻近地铁隧道的变形。研究了基坑与隧道间水平距离和地连墙嵌固深度的影响。研究表明, 在一定范围内, 增加基坑与隧道间的水平距离和地连墙嵌固深度可以有效控制隧道结构和基坑的变形, 确定本工程基坑与地铁隧道的安全水平距离为 8 m 和合理地连墙嵌固深度为 7 m; 本工程的支护结构和施工方案能有效控制隧道结构变形在规范限制要求, 但地铁荷载对基坑开挖引起邻近隧道竖向位移的影响不可忽视。

**关键词:** 软土地区; 数值模拟; 深基坑; 地铁隧道

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0427-06

## Influence of deep foundation pit construction on adjacent subway tunnels in soft soil

YU Tao

(China Post Construction Consulting Co., Ltd., Nanjing 210003, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to improve the problem of deformation of adjacent subway tunnel caused by deep foundation pit construction in soft soil area, a deep foundation pit and subway tunnel numerical model is established. Using the finite element software PLAXIS 3D, the deformation of adjacent subway tunnel caused by deep foundation pit construction is analyzed and compared with the field monitoring data. The effects of horizontal distance between the foundation pit and the tunnel, and the embedded depth of diaphragm wall are studied. The results show that the deformation of tunnel structure and foundation pit can be effectively controlled by increasing the horizontal distance between the foundation pit and the tunnel and the embedded depth of the diaphragm wall within a certain range. It is founded that the safe horizontal distance between the foundation pit and the subway tunnel is about 8 m and the reasonable embedded depth of diaphragm wall is about 7 m. The supporting structure and construction scheme of this project can control effectively the deformation of tunnel structure in the standard limit requirements, but the influence of subway load on the vertical displacement of adjacent tunnels caused by foundation pit excavation can not be ignored.

**Key words:** soft soil area; numerical simulation; deep foundation pit; subway tunnel

## 0 引 言

随着城市建设进入高速发展阶段, 城市轨道交通的不断完善, 高层建筑不断涌现。地铁运行势必会受到周边深基坑工程施工的一些影响。深基坑施工实为卸载过程, 对周边环境有显著影响, 尤其是邻近地铁, 而地铁隧道对变形控制要求极其严格。

针对深基坑施工对邻近地铁隧道影响的问题, 众多学者做了一系列的研究, 并取得了丰硕的成

果。周建昆等<sup>[1]</sup>通过数值模拟手段, 对邻近地铁隧道旁的基坑施工进行分析, 研究了深基坑开挖时地铁隧道的变形规律。杜金龙等<sup>[2]</sup>建立三维数值模型, 详细分析了深基坑施工全过程对邻近地下管线的变形和应力影响。张治国等<sup>[3]</sup>基于某基坑工程分析了邻近地铁隧道基坑施工过程, 将基坑施工过程中地铁隧道的变形分为两个阶段。伍尚勇等<sup>[4]</sup>利用有限元软件建立三维模型, 分析了双侧深基坑各施工工况下中间地铁隧道变形, 对地铁的安全性进行

了评估。张明远等<sup>[5]</sup>以实际工程为背景,研究了深基坑不同施工方案对地铁隧道的影响,确定了该过程最为合理的施工方案。况龙川<sup>[6]</sup>、吉茂杰等<sup>[7]</sup>和葛世平等<sup>[8]</sup>同样研究了开挖卸载引起隧道变形。

本文结合某邻近地铁隧道的深基坑工程,利用有限元软件PLAXIS 3D建立三维模型,研究了基坑与隧道间水平距离和地连墙嵌固深度对隧道变形的影响,并明确了考虑地铁运行荷载的必要性。

### 1 工程背景

某大厦项目为沿海地区某城市地标性建筑物。该大厦的高度为450 m,基坑开挖深度为24 m,电梯井部最大深度为30 m,基坑的面积达到13 500 m<sup>2</sup>,土方的量高达35万m<sup>3</sup>,地下室的建筑面积65 000 m<sup>2</sup>。该大厦周围人流量很大,交通管线相当复杂。其中最重要的是紧邻地铁1号线,距地铁隧道最近距离仅为8 m,地铁结构的底部高于基坑底部4 m。图1给出了基坑平面位置图。

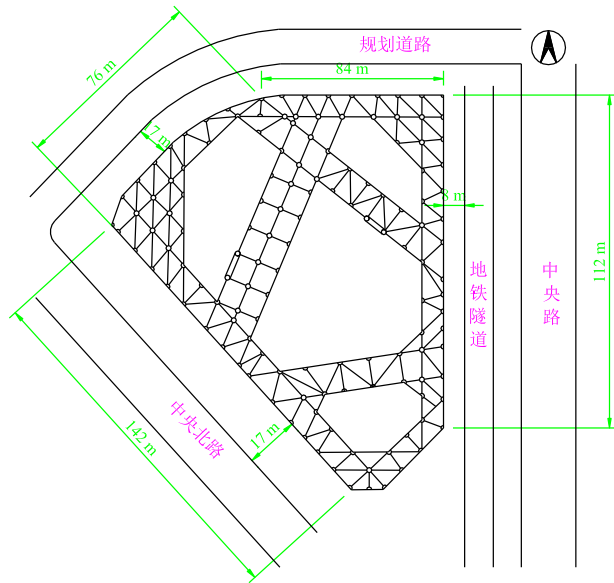


图1 基坑平面位置图  
Fig. 1 Plan of foundation pit

### 2 数值模型的建立

#### 2.1 三维模型及边界条件

图2为邻近地铁隧道的基坑三维有限元模型,模型尺寸为200 m×200 m×50 m,其中X轴、Y轴、Z轴以及原点如图所示。隧道直径8 m,隧道中心线埋深为16 m。采用正四面体单作为网格单元,采用GOODMAN单元放于接触面。模型底面各向和侧面法向受约束,自由面在表面,隧道的两端作了固定约束。在PLAXIS 3D软件中,设置荷载移动速度为80 km/h,考虑列车的每小时最大通过列车数为30,两列列车的时间间隔为2 min,列车荷载简化为75 m长幅值为20 kN/m的线荷载在隧道底部移动,荷载激振频率为8 Hz。

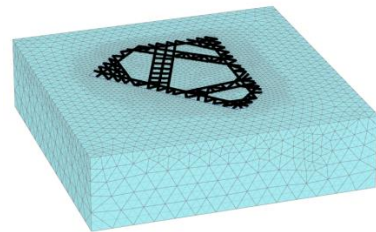


图2 计算网格模型  
Fig. 2 Computation grid model

#### 2.2 材料参数

土体本构模型采用小应变土体硬化模型(HSS模型)。它能更好的反应土体在小应变范围内的特性,同时还能考虑应力路径相关性。支护结构及衬砌结构详细参数如表1所示。根据现场勘查报告,岩土体参数如表2所示。

表1 支护结构参数  
Table 1 Supporting structure parameters

结构名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ (kN/m <sup>2</sup> )	泊松比
地下连续墙	25	3.0×10 <sup>7</sup>	0.20
内支撑	24	3.2×10 <sup>7</sup>	0.15
衬砌	24	3.0×10 <sup>7</sup>	0.20

表2 岩土体参数

Table 2 Rock and soil parameters

土质	H/m	E <sub>50</sub> <sup>ref</sup> /MPa	E <sub>oed</sub> <sup>ref</sup> /MPa	E <sub>ur</sub> <sup>ref</sup> /MPa	c/kPa	φ/(°)	γ <sub>0.7</sub> /10 <sup>-4</sup>	G <sub>ref0</sub> /MPa	K <sub>0</sub>	R <sub>f</sub>
填土	2	4.5	3.0	24	5.0	20.0	3	85	0.5	0.9
粉质黏土	13	4.0	6.0	28	35.6	14.3	3	80	0.6	0.9
残积土	3	10.0	10.0	30	45.0	20.6	3	50	0.6	0.9
强风化安山岩	12	25.0	25.0	25	60.0	40.0	3	52	0.8	0.9

### 2.3 控制标准

《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)从隧道水平位移、竖向位移、径向收敛和隧道变形曲率半径4个方面给出了城市轨道交通结构安全控制指标值,详见表3。

表3 城市轨道交通结构安全控制指标值

Table 3 Safety control index values of urban rail transit structure

安全控制指标	预警值/mm	控制值
隧道水平位移	<10	<20 mm
隧道竖向位移	<10	<20 mm
隧道径向收敛	—	>15 000
隧道变形曲率半径	—	<1/2 500

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 基坑与隧道间水平距离的影响

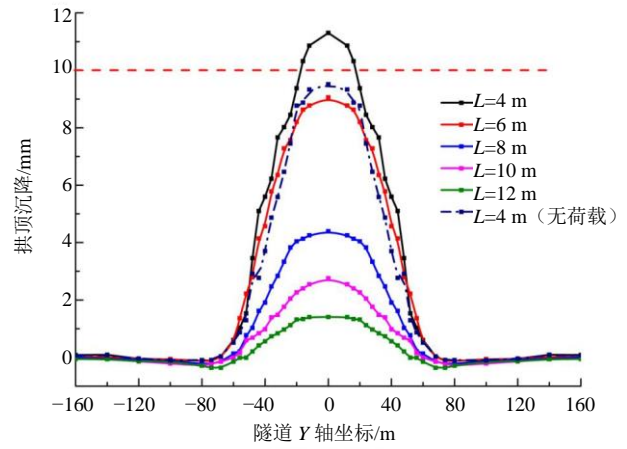
为研究地铁隧道与基坑间的水平距离  $L$  对基坑开挖引起邻近地铁隧道变形的影响,建立5种不同水平距离的工况:4、6、8、10、12 m。隧道拱顶沉降和左侧拱腰水平位移曲线如图3所示。

从图3(a)中可以看出,隧道拱顶沉降随着隧道进深迅速增大,并在基坑中部沉降达到最大值,随后迅速减小直至趋于稳定。同时,拱顶沉降随着基坑与隧道间的水平距离的增长而减小。当水平距离分别为4、6、8、10、12 m时,拱顶最大沉降对应值为11.4、8.2、4.0、2.3、1.3 mm。可见,当水平距离达到8 m后,水平距离的增大对拱顶沉降影响有限。图3(b)中可以看出,左侧拱腰水平位移主要发生在隧道邻近基坑范围内,然而最大值自始至终改变在基坑中部。同样拱腰水平位移随着基坑与隧道间水平距离的增大而减小。

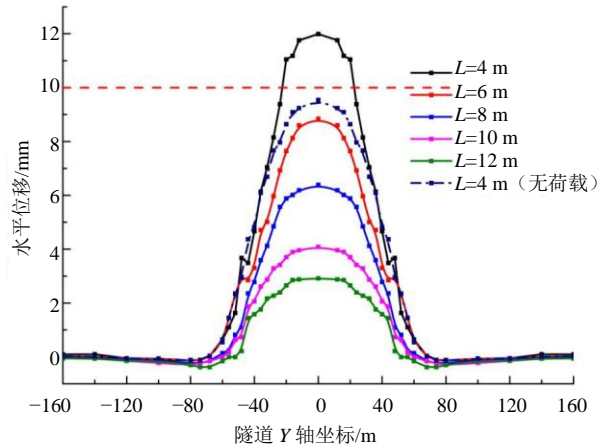
综合图3,当基坑与隧道间的水平距离为4 m时,隧道运营期隧道拱顶位移和水平位移均超过规范规定的预警值,而非运营期隧道拱顶沉降和水平位移均小于规范规定的预警值。

图4给出了靠近地铁隧道侧坑底上部地连墙的水平位移随着地下连续墙深度的变化曲线。从图中可以看出,地下连续墙水平位移总是随着地下连续墙深度迅速增大随后迅速减小至零,并在基坑深度一半处达到峰值。当基坑与隧道间的水平距离分别为4、6、8、10、12 m时,地下连续墙水平位移对应值为16.1、13.2、11.6、10.1、9.4 mm。可见,地下连续墙水平位移随着基坑与隧道间水平距离的

增大逐渐减小,且随着基坑与隧道间水平距离的增大,这种影响也越来越小。综上所述,确定基坑与地铁隧道的安全水平距离为8 m。



(a) 拱顶沉降



(b) 左侧拱腰水平位移

图3 基坑与隧道不同水平距离下衬砌隧道变形  
Fig. 3 Deformations of lining tunnel under different horizontal distances between foundation and tunnel

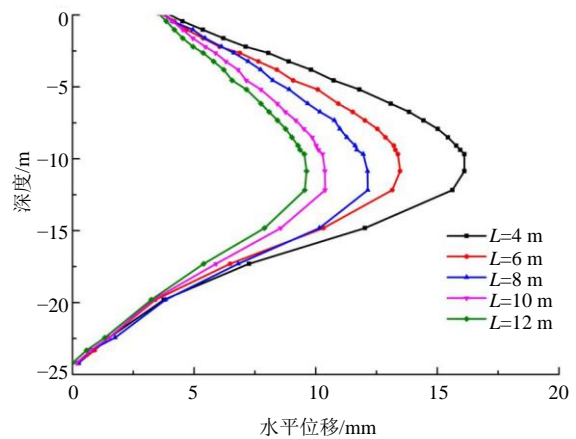


图4 地下连续墙水平位移

Fig. 4 Horizontal displacements of diaphragm walls

### 3.2 地连墙嵌固深度的影响

为研究地连墙嵌固深度  $d$  对基坑开挖引起邻近地铁隧道变形的影响, 建立 4 种不同地连墙嵌固深度工况: 1、4、7 m 和 10 m。图 5 给出了不同地连墙嵌固深度下拱顶沉降和左侧拱腰水平位移的变化曲线。

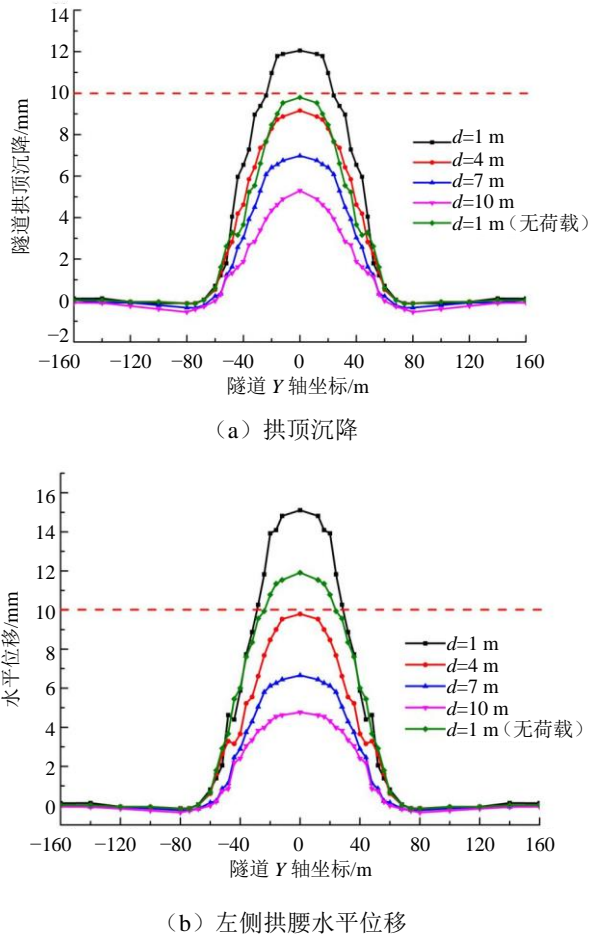


图 5 基坑与隧道不同水平距离下衬砌隧道变形

Fig. 5 Deformations of lining tunnel under different horizontal distances between foundation pit and tunnel

从图 5 (a) 中可以看出, 隧道拱顶沉降主要发生在隧道邻近基坑范围内。地连墙嵌固深度自 1 m 增加到 10 m, 拱顶最大沉降分别减小了 2.9、2.2、1.6 m, 可见拱顶沉降随着地连墙嵌固深度增大而减小。图 5 (b) 中同样可以看出, 左侧拱腰水平位移最大值始终发生在基坑中部。同样左侧拱腰水平位移随着地连墙嵌固深度增大而减小。

进一步观察图 5 可知, 地连墙嵌固深度增大到 7 m 时, 支护结构对隧道变形控制效果提升显著, 但进一步增大地连墙嵌固深度, 这种影响有限。另外, 当地连墙嵌固深度为 1 m 时, 隧道运营期隧道拱顶沉降为 12 mm, 水平位移为 15.1 m, 均大于

10 mm 的预警值; 而非运营期拱顶沉降为 9.8 mm, 水平位移为 11.9 m。

图 6 给出了不同地连墙嵌固深度  $d$  时, 邻近隧道侧坑底上部地连墙水平位移的变化规律。从图中还可以看出, 地连墙嵌固深度的增加可有效控制基坑变形。但是随着地连墙嵌固深度的增加, 这种影响逐渐减小。综上所述, 地连墙合理嵌固深度为 7 m。

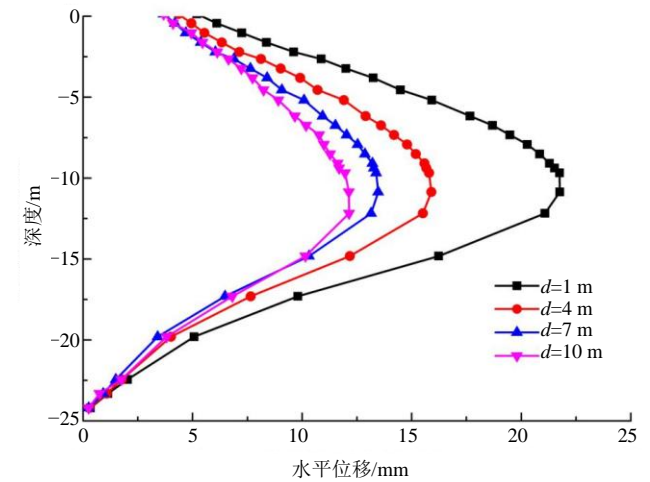


图 6 地下连续墙水平位移

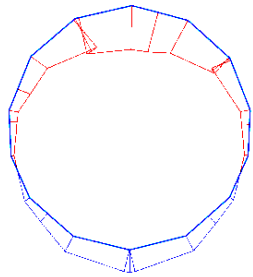
Fig. 6 Horizontal displacements of diaphragm walls

### 3.3 非运营阶段和运营阶段的隧道变形比较

地铁隧道无论是对沉降还是水平位移的控制标准都是毫米级的。为此本节对比地铁非运营和运营期对隧道变形影响。图 7 和图 8 给出了两个阶段的衬砌圆环竖向位移和水平位移图。

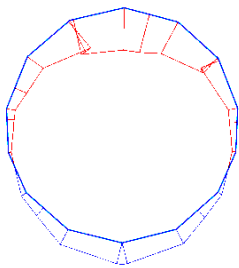
如图 7 (a) 所示, 隧道非运营期拱底位移约为 4.5 mm, 拱顶沉降位移约为 7.7 mm, 可见竖直方向的隧道径向收敛值约为 12.2 mm。图 7 (b) 可以看出, 隧道运营期拱底位移约为 5.2 mm, 较非运营期的隧道拱顶沉降增大 15%; 隧道运营期的拱顶沉降位移约为 9.0 mm, 较非运营期的隧道拱顶沉降增大 17%; 此时竖直方向的隧道径向收敛值约为 14.2 mm, 较非运营期增大 15%。

如图 8 (a) 所示, 受基坑开挖卸载的影响, 隧道左侧拱腰处有向基坑方向的水平位移, 约为 8.6 mm; 隧道右侧拱腰处的水平位移约为 2 mm。因此水平方向的隧道径向收敛值约为 6.6 mm。图 8 (b) 可以看出, 隧道运营期的左侧拱腰处的水平位移约为 9.8 mm, 较非运营期增大约 15%; 隧道右侧拱腰处的水平位移约为 3.2 mm, 较非运营期增大近 60%; 此时水平方向的隧道径向收敛值约为 6.6 mm。



总位移  $U_z$  (放大 50.0 倍)  
最大值=0.007 12 m  
最小值=-0.004 51 m

(a) 地铁非运营阶段

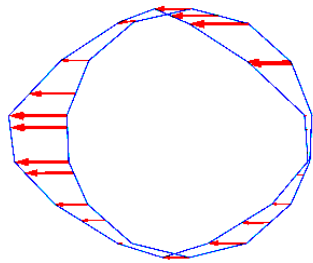


总位移  $U_z$  (放大 50.0 倍)  
最大值=0.009 12 m  
最小值=-0.005 26 m

(b) 地铁运营阶段

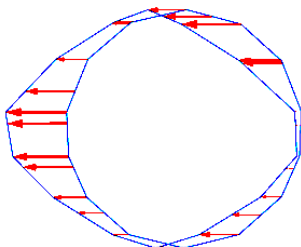
图 7 不同阶段衬砌圆环竖向位移图

Fig. 7 Vertical displacement diagrams of lining ring at different stages



总位移  $U_x$  (放大 200 倍)  
最大值=-0.002 04 m  
最小值=-0.008 68 m

(a) 地铁非运营阶段



总位移  $U_x$  (放大 200 倍)  
最大值=-0.003 24 m  
最小值=-0.009 84 m

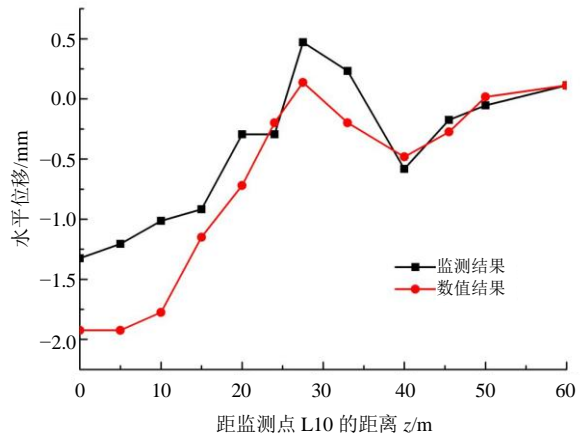
(b) 地铁运营阶段

图 8 不同阶段衬砌圆环水平位移图

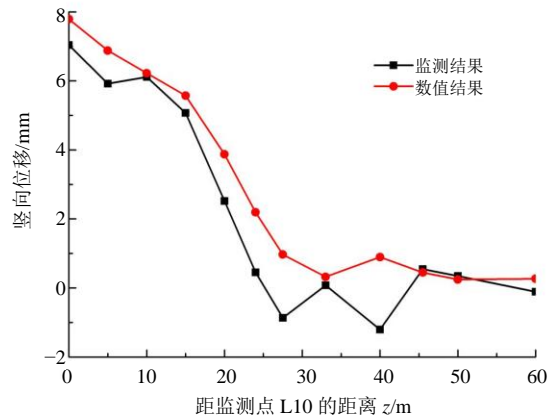
Fig. 8 Horizontal displacement diagrams of lining ring at different stages

### 4 现场实测与数值模拟结果的对比

图 9 给出了隧道拱顶竖向位移和水平位移随着距监测点距离变化曲线的对比。从图中可以看出，数值模拟和现场监测的拱顶竖向位移和水平位移变化规律一致。且数值模拟和现场监测的结果相差 10% 左右，在合理范围，验证了模型的正确性。



(a) 左侧拱腰水平位移



(b) 拱顶竖向位移

图 9 隧道位移随着距监测点 L10 距离变化曲线

Fig. 9 Variation curves of tunnel displacement with distance from monitoring point L10

### 5 结 论

本文基于某紧邻地铁隧道的深基坑工程，利用 PLAXIS 3D 软件建立三维模型模拟分析，研究了基坑与隧道间水平距离和地连墙嵌固深度对隧道变形的影响，并明确了考虑地铁运行荷载的必要性。主要得到以下结论：

(1) 地铁隧道和基坑的变形随着基坑与隧道间的水平距离的增大而减小，但当水平距离达到 8 m 后，减小趋势变缓。确定本工程基坑与地铁隧

道的安全水平距离为8 m。

(2) 地连墙嵌固深度的增加可以有效控制地铁隧道和基坑的变形,但随着地连墙嵌固深度的增加,这种改善效果逐渐减弱。确定本工程地连墙合理嵌固深度为7 m。

(3) 本深基坑工程的支护结构和施工方案能有效控制隧道结构变形,满足规范限制要求。但地铁荷载对基坑开挖引起邻近隧道竖向位移的影响不可忽视。

## 参考文献

- [1] 周建昆,李志宏. 紧邻地铁隧道基坑工程对隧道变形影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S1): 1398-1403.  
ZHOU Jian-kun, LI Zhi-hong. Numerical analysis on deformation effect of metro tunnels due to adjacent excavation project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S1): 1398-1403.
- [2] 杜金龙,杨敏. 深基坑开挖对邻近埋地管线影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3015-3020.  
DU Jin-long, YANG Min. Influence analysis of excavation of deep pit on adjacent buried pipelines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3015-3020.
- [3] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.  
ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [4] 伍尚勇,杨小平,刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3452-3458.  
WU Shang-yong, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Analysis of influence on deformation of adjacent subway tunnel due to bilateral deep excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3452-3458.
- [5] 张明远,杨小平,刘庭金,等. 临近地铁隧道的基坑施工方案对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1203-1208.  
ZHANG Ming-yuan, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin, et al. Comparative analysis of construction schemes for foundation pit excavation adjacent to subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1203-1208.
- [6] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 500-504.  
KUANG Long-chuan. Influence of deep foundation pit construction on subway tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 500-504.
- [7] 吉茂杰,刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移的预测方法[J]. 同济大学学报, 2001, 29(5): 531-535.  
JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(5): 531-535.
- [8] 葛世平,谢东武,丁文其. 大面积加卸载对软土地铁隧道的影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S): 127-130.  
GE Shi-ping, XIE Dong-wu, DING Wen-qi. Effects of loading and unloading large-scale area load acting on soft soil metro line[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S): 127-130.