

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.018

基坑相邻地铁隧道变形与应力控制措施

徐长节^{1,2}, 孙凤明^{1,2}, 陈金友³, 徐礼阁^{1,2}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058;

2. 浙江大学 软土与环境工程教育部重点实验室, 杭州 310058;

3. 杭州市城东新城建设投资有限公司, 杭州 310021)

摘要: 基坑开挖对周边环境的影响已经成为很普遍的现象, 如何在设计和施工中采取相应措施来保证在建和已有工程的安全成为关键部分。本文针对某邻近已建隧道的基坑, 运用有限元软件 plaxis 对其施工对隧道的影响进行了数值分析研究。分析结果表明采取加强有关围护结构刚度以及分块对称开挖等措施能显著控制已建隧道的变形, 通过和常规设计施工方法比较研究, 证明了该工程的设计和施工能够保证已建隧道的安全, 同时说明在基坑开挖前对其对邻近的地下建筑物的影响进行预研是十分必要的。

关键词: plaxis; 基坑开挖; 地铁隧道; 影响分析

中图分类号: TU 459 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0075-06

Analysis on the Deformation and Stress Control Measures of Metro Tunnel Near a Foundation Pit

Xu Changjie^{1,2}, Sun Fengming^{1,2}, Chen Jinyou³, Xu Lige^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;

2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;

3. Hangzhou East New City Construction Investment Co. Ltd., Hangzhou 310021, P. R. China)

Abstract: It has become a very common phenomenon that the influence of pit excavation to the adjacent environment, what corresponding measures should be taken in design and construction to ensure the safety of construction in process and existing has become a key part. This Paper analyses the influence of pit construction to adjacent tunnel by using the finite element software plaxis. The analysis results show that strengthening the palisade structure stiffness and partitioning symmetric excavation can significantly control the deformation of the existing tunnel. The design and construction of the engineering can ensure the safety of the existing tunnel compared with the conventional construction methods, and it also shows that preliminary analysis of influence to the adjacent underground building before pit excavation is very necessary.

Key words: plaxis; excavation; metro tunnel; influence analysis

近年来中国在地下工程建设方面十分活跃, 很多大中型城市都在不断的积极利用地下空间。城市中的地下工程主要为地下室的建筑, 同时以地铁和地下通道等带状分布的地下空间也十分常见。由于城市用地的紧张, 这必然导致相邻工程的相互影响越发突出。这种相互影响的方式以及影响程度应该是分析一个工程问题的焦点。

目前主要以各种位移量的大小作为安全指标, 但其大小的界定还没有统一说法。

文献[1]通过现场实测资料从隧道沉降, 水平位移以及横向变形等角度探讨了基坑开挖对临近地铁隧道的影响。文献[2]利用经验分析和数值分析方法分析了基坑开挖对地铁隧道沉降及变形影响并提出了合理的保护措施。文献[3]利用三维有限元法详细讨论了基坑开挖影响车站变形的几

项主要施工措施, 并指出基坑开挖时合理设置托换桩, 进行土体加固和分块开挖是控制变形的有效措施。文献[4]利用 plaxis 模拟了某一临近地铁隧道深基坑的开挖, 总结了不同工况以及不同施工方式对结构物产生的不同影响。文献[5][6]采用整体有限元法分析了深基坑开挖卸荷对临近已建隧道的影响。文献[7]通过有限差分数值模拟方法, 得到了邻近大刚度地铁车站的基坑开挖位移传递规律, 分析表明了车站结构的存在对基坑变形产生了遮挡作用以及基坑开挖对车站产生背向倾斜等实用结果。文献[8]详细介绍了利用 plaxis 进行基坑开挖模拟的适用性并探讨了相关适用条件。

1 工程概况及周边情况

工程位于杭州市下沙经济开发区。该基坑东西向长约

收稿日期: 2013-04-19

作者简介: 徐长节(1972-), 男, 博士, 主要从事岩土工程土动力学及软土力学、饱和土及非饱和土中的波的传播及动力响应研究, (E-mail) sunfengming126@126.com。

200 m,南北走向约 80 ~ 100 m,如图 1 所示。工程±0.000 相当于黄海高程 6.800 m,场地相对标高以-0.400 m计。地下为 2 层汽车车库,基坑设计开挖总深度为-11.800 m。一共分 3 层开挖,第 1 次开挖至-2.300 m,第 2 次开挖至-8.900 m,第 3 次开挖至坑底。由于工程的重要性以及周边环境的复杂性,基坑安全等级确定为一级。

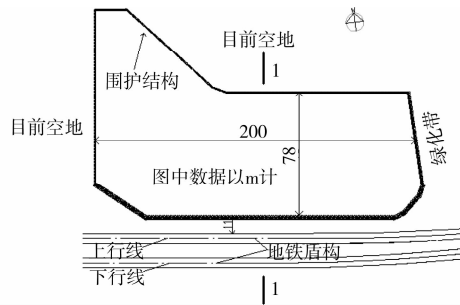


图 1 基坑及地铁位置关系图

在基坑的北面和西面目前为空地,在基坑南面有一已运行的上下行地铁隧道。基坑围护结构距盾构边缘最近距离约 11 m,基坑底距盾构隧道顶约 2 m,如图 2 所示。由于基坑开挖导致围护结构变形而对临近地铁隧道产生不利影响。为了确保地铁隧道的安全,设计中采取了加强地铁隧道一侧围护结构刚度,并拟在施工中采取分块对称开挖方法。本文利用 plaxis 有限元软件动态的模拟整个设计及施工过程,预先分析研究基坑开挖可能对地铁隧道产生的影响。最后通过和常规施工方法进行对比揭示了基坑所采用的设计和施工方法是合理可行的。

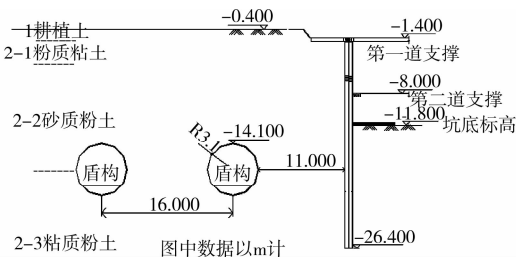


图 2 邻近隧道的基坑剖面

表 1 土层物理力学指标

土层	层厚/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	E_{50}/MPa	$E_{\text{sed}}/\text{MPa}$	E_{ur}/MPa
杂填土	1.4	18.6	4.0	13.0	6.8	6.8	20.4
粘质粉土①	3.0	18.4	11.7	26.9	22.8	22.8	68.4
砂质粉土	13.0	18.9	9.4	27.7	22.0	22.0	66.0
粘质粉土②	15.0	18.3	11.4	19.9	16.4	16.4	49.2
粘土	15.0	16.8	16.1	7.1	7.0	7.0	21.0

每层土体参数选取由地勘报告确定,见表 1。围护结构和隧道衬砌通过 plate 单元模拟,内支撑采用 Anchor 单元模拟,最后将结构实际尺寸和材料性质换算成相应的计算参数,详见表 2。

2 基坑围护结构

2.1 挡土结构的确定

基坑大部分区域采用型钢水泥搅拌墙作为挡土结构兼止水帷幕,同时考虑对南侧地铁隧道保护,该侧采用大直径钻孔灌注桩排桩结合双排三轴水泥搅拌桩作为止水帷幕,如图 3 所示。型钢水泥搅拌墙采用进口三轴搅拌设备,桩径为 850 mm,中心距为 600 mm。钻孔灌注桩桩身混凝土强度等级 C25,桩径 1 000 mm,中心距 1 150 mm。

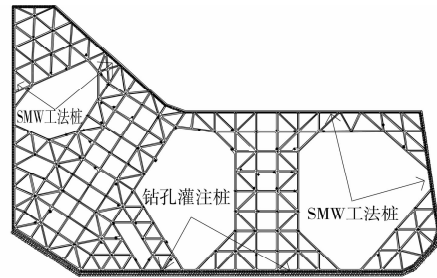


图 3 基坑围护结构平面图

2.2 支撑体系的确定

考虑到基坑的开挖深度及周边环境条件,最终采用两层钢筋混凝土内支撑。第 1 道支撑中心标高-1.80 m,第 2 道支撑中心标高-8.40 m,第 1 道支撑截面为 900(b)×800(h)mm,第 2 道支撑截面为 1 000(b)×900(h)mm,均采用 C30 混凝土。

2.3 地下水控制方面

主要采用设置三轴搅拌作止水帷幕进行控制,同时根据相关工程经验,采用简易深井降低基坑内外的地下水位。

3 数值分析

采用 plaxis 有限元软件对其进行二维模拟分析,所选截面为基坑邻近隧道侧的长边中点位置的剖面(图 1)。根据所选基坑剖面尺寸大小以及相邻隧道位置,最终取模型水平向长度为 200 m,竖向深度为 40 m。土体的本构模型采用了可以考虑卸载,再加载和初次加载时土体模量不同 Hardening-Soil 模型(E_{50} 为标准排水三轴试验中的割线刚度, E_{sed} 为主固结仪加载中的切线刚度, E_{ur} 为卸载/重新加载刚度)。

表 2 围护结构及隧道衬砌相关参数

围护结构刚度	$EA/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1})$
钻孔灌注桩	1.60×10^7	8.50×10^5
SMW 工法桩	5.85×10^6	2.74×10^5

续表 2

围护结构刚度	EA/(kN·m ⁻¹)	EI/(kN·m ² ·m ⁻¹)
第 1 道支撑	2.16×10 ⁷	
第 2 道支撑	2.70×10 ⁷	
隧道衬砌	1.40×10 ⁷	1.43×10 ⁵

3.1 两种不同施工模型的建立

首先模拟了常规施工过程,如表 3 所示,即采用整体开挖方案。通过先挖土后支撑的分层开挖方式如图 4 所示,采用消灭和激活相关单元体来实现此过程。最后模拟了本工程现场实际施工过程,如表 4 所示,采用分块对称开挖每层土体以及快速施工底板等措施来保证工程的安全性。有关文献以及工程实践都指出了时空效应原理对工程影响的重要性,因此在每一层土体开挖时,都采用了先挖基坑中间块土体然后再对称挖除左右两块土体,如图 5~6 所示。基坑开挖到坑底时,加速底板施工对保障工程安全性也是十分重要的。

表 3 常规施工过程

施工步	相关模拟内容
1	生成初始水压力,冻结结构单元并生成初始地应力
2	挖除隧道内土体并安装隧道衬砌
3	激活基坑两侧围护桩并施加坑边荷载
4	整体挖掉第 1 层土体
5	安装第 1 道支撑
6	整体挖掉第 2 层土体
7	安装第 2 道支撑
8	整体挖掉第 3 层土体
9	施工垫层及底板

表 4 工程现场施工过程

施工步	相关模拟内容
1,2,3	同常规施工 1,2,3
4	挖除第 1 层土体的中间块
5	对称挖除第 1 层土体的左块及右块
6	安装第 1 道支撑
7	挖除第 2 层土体的中间块
8	对称挖除第 2 层土体的左块及右块
9	安装第 2 道支撑
10	挖除第 3 层土体中间块 施工坑底中间底板
11	对称挖除第 3 层土体的左块及右块并施工相应底板

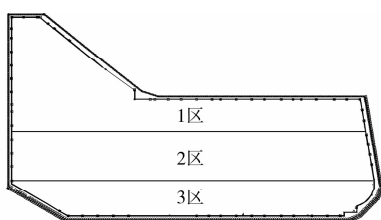


图 4 分区开挖平面图

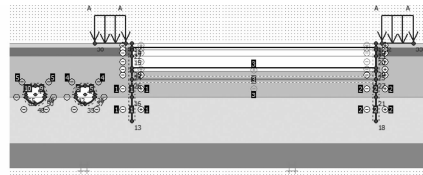


图 5 钻孔桩-常规开挖施工步 8

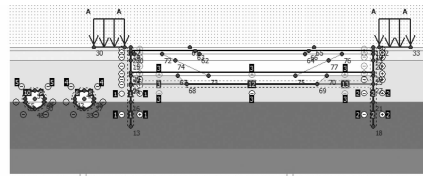


图 6 钻孔桩-分块开挖施工步 10

3.2 对比两种数值分析结果

通过定义相关施工步,2种施工方法的最终变形图,如图 7~8 所示。由图可知正是因为基坑开挖卸荷作用,从而使围护结构发生侧向变形,坑底发生隆起以及隧道也产生了相应位移。通过比较 2 个变形图,可以看出本工程所采用的分块对称开挖施工方法能够显著的减小相应变形。由于基坑两侧的环境条件以及相应围护结构刚度的不同,导致两侧围护结构的侧移量也有所差异。

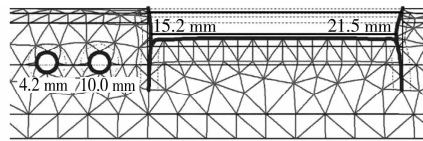


图 7 钻孔桩-常规开挖最终变形图

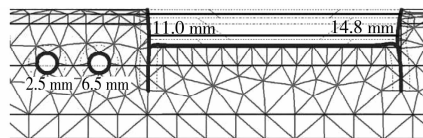


图 8 钻孔桩-分块开挖最终变形图

图 9 表达了桩在不同数值分析模式以及实测情况下最终变形。从图中 5 条变形曲线可以看出,桩发生最大位移处基本都位于坑底附近。桩的最大位移量在实测,采用钻孔桩一(分块开挖:常规开挖)以及采用 SMW 工法桩-(分块开挖:常规开挖)分析模式下分别为 9.5,11.0,15.2,22.8 及 26.7 mm。实测数据和采用钻孔桩一分块开挖分析模式结果具有较好的吻合性,间接证明了本工程所采用的设计和施工方法是安全合理的。由 4 种不同设计施工方法结果对比得出,采用钻孔桩一分块对称开挖可以显著的减少围护结构变形,同时也说明了不同的围护结构刚度和施工方法的选择将对结构最终变形影响程度是不同的。相对施工方法而言,采用加强围护结构刚度能更好的控制其最终变形,所以合理地选择有关围护结构形式对工程的安全性是十分重要的。同样,基于时空效应原理来选择合理的开挖方式可以进一步减小结构变形,如图 10 所示。由图 10、11 对比可知基坑两侧的

围护结构变形是不一样的,原因在于基坑两侧的环境是不一样的,其中一侧围护结构受地铁隧道的影响。

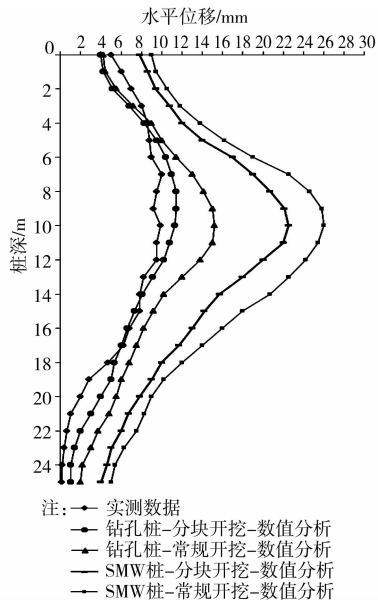


图 9 临近隧道围护结构最终变形有限元计算结果及实测对比图

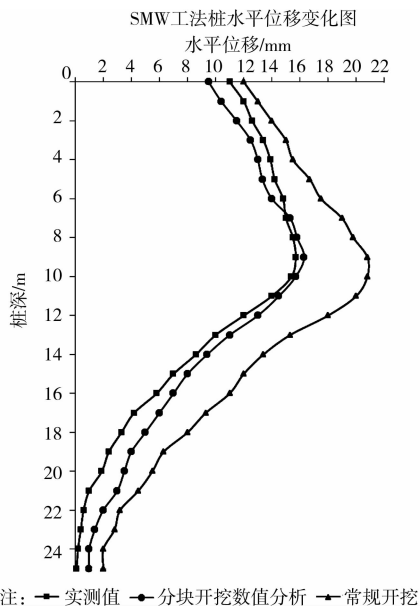


图 10 远离隧道侧 SMW 工法桩最终变形有限元计算结果及实测对比图

围护结构和隧道水平位移随开挖步变化见图 11,从该图可以总结出以下几点:采用分块对称开挖时各个结构的最终水平位移值要远小于整体开挖方式,同时分块对称开挖下结构的变形发展速度也相应降低了许多。从不同挖土阶段的变形量来看,两种施工方法都是在开挖第 2 层土体时产生的变形增量最大,原因在于第 2 层土体比较厚,开挖卸荷量大所致。由图 12 可知,上行隧道最大水平位移在实测,采用钻孔桩-(分块开挖:常规开挖)以及采用 SMW 工法桩-(分块开挖:常规开挖)分析模式下分别为 7.0,6.0,10.1,21.2 及 23.1 mm。从数据结果来看,采用钻孔桩-分块开挖数值分析不仅和真实设计施工相吻合而且也证明了此法在基坑开

挖时可以很好的控制其变形。从施工现场来看,当该基坑底板施工完毕后,整个基坑围护结构以及邻近地铁隧道的位移得到了很好的控制,由此证明该基坑设计施工是一个成功的例子。

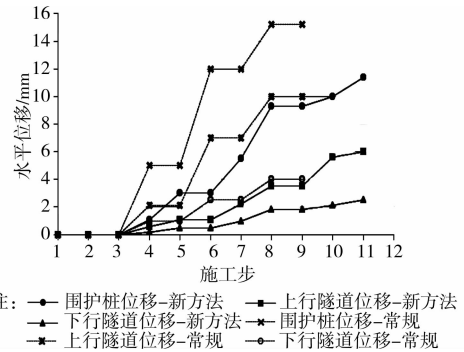


图 11 结构位移随施工步变化图

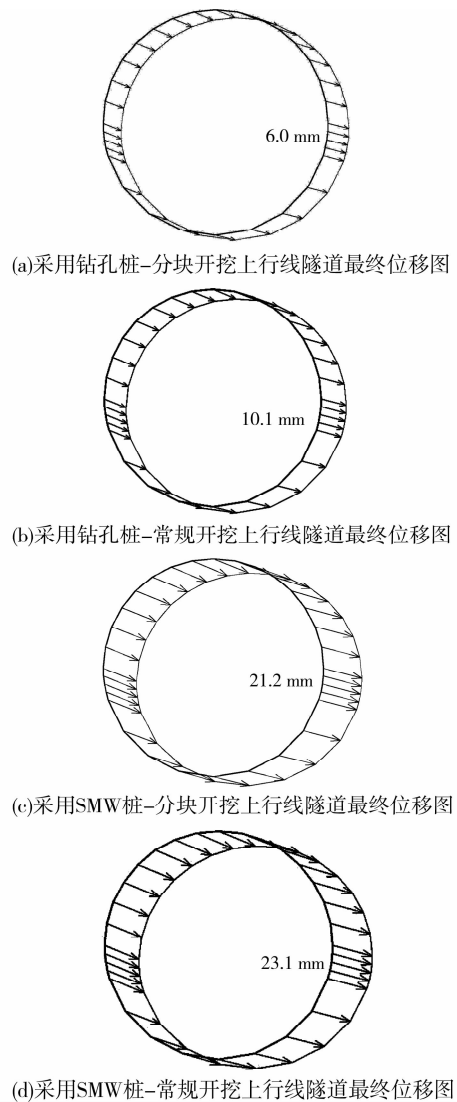


图 12

由于上行线隧道距离基坑最近,所以选其最终变形进行分析。如图 12(a)所示,隧道产生了近似刚体位移,原因在于隧道衬砌刚度要远大于其周围土体刚度。隧道产生变形的根源在于其周围应力场发生了变化,由于基坑开挖打破了原

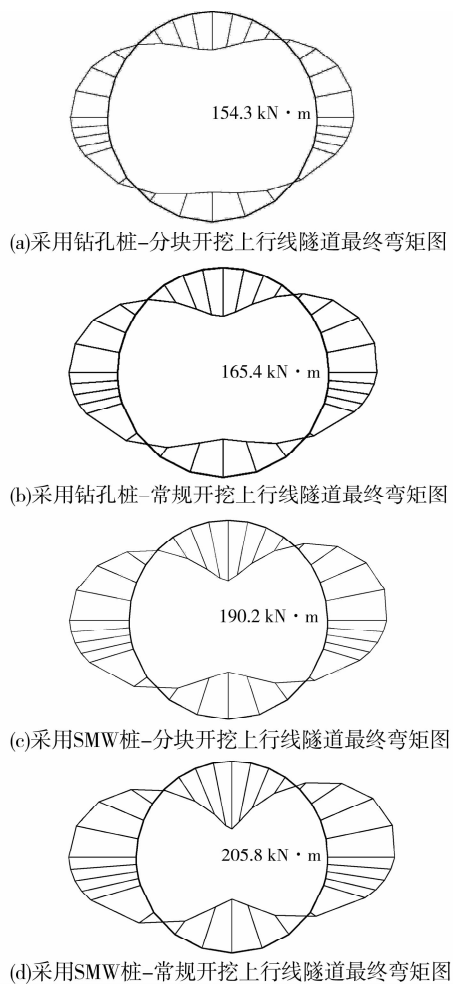


图 13

有应力场,隧道为适应新的应力场必须在位移和内力上有所调整。由图 13 可以看出 4 种不同设计施工方法分别使隧道管片产生了 154.3,165.4,190.2,205.8 kN·m 的弯矩,通过和管片设计容许弯矩 180.0 kN·m 进行对比,说明了目前管片的强度是满足要求的。

由于基坑开挖导致邻近隧道产生了位移和附加内力。通过和管片设计容许弯矩值比较,该隧道管片结构强度是安全可靠的。根据实际观测,在整个地下室施工期间,隧道结构未出现任何裂缝,轨道也未出现明显变形,证明本工程采取的措施是安全得当的。

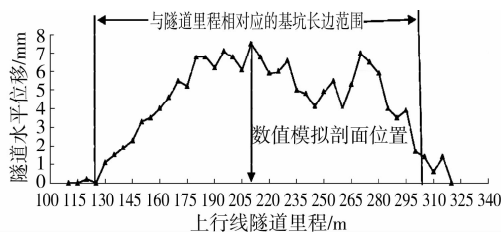


图 14 实测隧道沿基坑长边方向水平位移变化图

图 14 为现场实测上行地铁隧道沿纵向产生的不同水平位移量,从整体上可以看出位于基坑中部一定范围内的地铁隧道产生明显位移,随着远离基坑核心区,隧道的变形也相应的显著减弱。隧道水平位移的不均匀性将导致其产生弯

曲变形,从而使隧道衬砌产生附加内力。目前关于地铁隧道附加变形警戒值还没有在相应规范中确定,现在主要还是是一些参考类似工程的经验数据。参照《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》对地铁安全保护区内的施工项目的要求,地铁隧道结构绝对沉降量及水平位移不大于 20 mm。但如何准确合理的确定新建工程对已有建筑物和构筑物的影响成为目前城市建设中很棘手的问题。这个问题不仅关系到工程的安全性,同时也和工程的造价紧密相关。我们认为位移允许值一方面受到正常使用的要求控制,另一方面也应该由结构内力不超过结构设计强度的准则来控制。

4 结 论

以某一相邻地铁深基坑为背景,利用有限元软件对其施工过程进行了数值模拟,通过比较模拟不同施工方法所产生的结果以及和现场实测资料对比,总结出了以下几点认识。

- 1) 利用数值分析软件合理模拟现场施工状况,不仅能够很好的预测工程安全与否而且可以为设计提供参考;
- 2) 基坑开挖施工中,合理采用分块对称开挖方法和加强有关围护结构刚度能够很好的控制基坑变形。对于变形控制严格的工程来说,采用多种方法联合使用是十分有效的;
- 3) 关于开挖地下空间对已有建筑物或构筑物的影响,一方面受到正常使用的要求控制,另一方面还应该由结构内力不超过结构设计强度的准则来控制。

参考文献:

- [1] 蒋洪胜,侯学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影响[J]. 工业建筑, 2002,32(5): 53-56.
Jiang H S, Hou X Y. The influence of deep excavation on adjacent metro tunnel in soft ground [J]. Industrial Construction, 2002,32(5): 53-56.
- [2] 许俊超. 深基坑开挖对临近地铁隧道影响分析[J]. 山西建筑, 2012,38(17): 93-94.
Xu J C. Analysis on the impacts of deep foundation pit excavation upon subway tunnel [J]. Shanxi Architecture, 2012,38(17): 93-94.
- [3] 高盟,高广运,冯世进,等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008,30(6): 818-823.
Gao M, Gao G Y, Feng S J, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(6): 818-823.
- [4] 戚科骏,王旭东,蒋刚,等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(s2): 5485-5489.
Qi K J, Wang X D, Jiang G, et al. Analysis of deep pit excavation adjacent to tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(s2): 5485-5489.
- [5] Dolezalova M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28 (3): 469-493.
- [6] Sharma J S, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001,16(2): 93-98.
- [7] 李志高,曾远,刘国彬. 邻近地铁车站基坑开挖位移传递规律数

- 值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3104-3108.
- Li Z G, Zeng Y, Liu Guobin, et al. Numerical simulation of displacement transfer law of excavation adjacent metro station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3104-3108.
- [8] 刘小丽, 马悦, 郭冠群, 等. PLAXIS 2D 模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(4): 19-25.
- Liu X L, Ma Y, Guo G Q, et al. Applicability of PLAXIS 2D used for numerical simulation in foundation pit excavation [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(4): 19-25.
- [9] Hsieh P G, Ou C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [10] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground. Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. Mexico City: [s. n.], 1969: 225-290.
- [11] Kuesel T R. Tunnel engineering handbook [M]. New York: N. Y. Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1982.
- [12] Crofts J E, Menziest B K, Tarzi A I. Lateral displacement of shallow buried pipe lines due to adjacent deep trench excavation [J]. Geotechnique, 1977, 15(2): 161-179.
- [13] Kojima, Yoshiyuki. Tunnel deformation behavior due to ground surface excavation above the tunnel. [J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2003, 52(8): 958-965.
- [14] Sharma J S, Hefny A M, haob J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 93-98.
- [15] 孔令荣, 崔永高, 隋海波. 基坑开挖对邻近地铁变形的影响分析 [J]. 工程勘察, 2010(6): 15-20.
- Kong L R, Cui Y G, Sui H B. The influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnel [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(6): 15-20.

(编辑 吕建斌)

(上接第 69 页)

方向位移响应曲线和加速度响应曲线与竖向地震波曲线趋势基本一致。考虑隔振 Y 方向位移最大响应和最大加速度相比未考虑隔振要大。

5) 通过对华联商厦框架结构动力特性分析可知, 采用叠层橡胶支座后结构的各项性能较未考虑隔振有明显提高, 验证了叠层橡胶支座的隔振效果, 对于工程实践有理论的指导意义。

参考文献:

- [1] 王闯. 叠层橡胶支座基础隔振结构应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [2] 宋刚. 叠层橡胶垫基础隔振的应用研究[D]. 东南大学, 2006.
- [3] 刘文光. 橡胶隔振支座位学性能及隔振结构地震反应分析研究 [D]. 北京工业大学, 2003.

- [4] 刘伟庆, 王曙光. 建筑结构隔振减震设计的现状与发展趋势 [C]//第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集, 2007.
- [5] 张雄, 刘浩吾. 隔振支座的稳定性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(3): 114-119.
- [6] 许斌, 唐家祥. 基础隔振叠层橡胶支座耐久性试验研究[J]. 工程抗震, 1995(4): 41-44.
- [7] 邓雪松. 隔振结构的设计与分析方法[J]世界地震工程, 2000, 16(4): 118-123.
- [8] 徐忠根, 胡敏茵, 周福霖. 房屋建筑中间层隔振研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2004(5): 23-28.
- [9] 白举科, 陈龙珠, 赵荣欣. 叠层橡胶支座位置对结构地震响应的影响分析[C]//第三届全国防震减灾工程学术研讨会论文集, 2007.

(编辑 薛婧媛)