

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2013.06.019

轨道交通基坑工程变形监测控制指标

吴锋波^{1,2} 金 淮^{1,3} 张健全¹ 刘永勤¹ 任 干¹ 钟巧荣³

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司 北京 100101; 2. 北京科技大学土木与环境
工程学院 北京 100083; 3. 北京安捷工程咨询有限公司 北京 100037)

摘 要 通过全国各地城市轨道交通基坑工程实测案例分析,研究基坑围护桩(墙)及周边地表的变形特点和监控要求。对不同监测项目的实测结果进行数理统计分析,结合相关研究成果和技术规范要求、分场地土类型给出变形监测控制指标的建议数值,合理评价基坑工程的安全状态。基坑工程变形监测控制指标的影响因素众多,工程实际应继续深入开展相关研究,以提高基坑工程的安全风险管控水平。

关键词 城市轨道交通;基坑工程;变形;控制指标

中图分类号 U239.5 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)06-0078-06

国内外在基坑工程变形特性和监测控制指标研究方面积累了一些研究成果。国外的 Yoo、Moormann、Leung 等分析了大量基坑的实测数据,根据地层条件的不同给出了基坑围(支)护结构和地表沉降的控制指标^[1-3]。国内的江晓峰、徐中华、郑刚等^[4-6],收集分析了上海、天津等软土地区的基坑工程实测资料,统计分析了基坑的变形情况,给出了相应的控制值。

国内颁布的 GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》、DB 11/490—2007《地铁工程监控量测技术规程》、DG/T J08—2001—2006《基坑工程施工监测规程》等,国家、地方标准以及其他一些基坑技术规范中给出了一些监测控制指标,但大多根据房建基坑或有限的地铁基坑案例制定,工程应用受到限制。工程实际监测数据超过控制值的现象时有发生,预警、报警数量不断增加,工程安全风险管控长期处于紧张状态,难免衍生各类其他问题。确定适宜的监测项目控制值

是目前工程监测面临的重要问题,也是难点问题。

1 工程监测控制指标

目前,对于环境条件较为复杂的基坑工程,其工程设计主要依据变形控制指标进行变形控制,以保证工程自身和周边环境的安全。基坑工程变形控制指标主要为变形监测项目的累计变化值和变化速率值,在相关技术规范中给出了一些数值。根据国家标准《城市轨道交通工程监测技术规范》的要求开展了专题研究,通过对大量基坑工程的实测结果进行统计分析,以确定合理的变形控制值。

研究所收集的工程案例主要包括北京、上海、广州等 14 个城市的 25 条线路、87 个基坑工程的第三方监测资料,具有较强的真实性。其中,地表沉降主要统计邻近基坑周边的两排监测点的实测结果,可以反映基坑工程周边地表的最大变形情况。

根据实测结果初步分析,基坑工程周边地质条件对其变形有很大的影响。参照 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》的工程场地土类型划分标准,将所收集各地工点的地层条件分为中软-软弱土和坚硬-中硬土两大类,分别进行统计和分析^[7]。其中,中软-软弱土是指稍密的砾、粗、中砂,松散的砂, f_{ak} (地基承载力特征值) ≤ 150 kPa 或新近沉积的黏性土和粉土,填土,可塑新黄土,流塑黄土,淤泥和淤泥质土, V_s (岩土剪切波速) ≤ 250 m/s;坚硬土-中硬土是指稍密-密实的碎石土,密实、中密的砾、粗、中砂, $f_{ak} > 150$ kPa 的黏性土和粉土, $800 \geq V_s > 250$ m/s 的坚硬黄土等。

1.1 桩(墙)顶竖向位移

基坑灌注桩、地下连续墙等在竖向可出现上浮和沉降两个方向的位移,基坑开挖造成的岩土体自重应力释放,可使桩(墙)体出现上浮,支撑、楼板的重量施加又会使桩(墙)体出现下沉。地下连续墙底部清孔不净存在沉渣时,也会使其出现下沉。

收稿日期: 2013-02-20 修回日期: 2013-03-14

作者简介: 吴锋波,男,博士后,从事城市轨道交通工程监测和风险评估的研究,wufengbo820424@163.com

基金项目: 北京市优秀人才培养资助个人项目(2012ZG-40)

GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》规定的桩(墙)顶竖向位移控制值为 10 ~ 40 mm,北京地区为 10 mm^[8-9]。在中软—软弱土地区,基坑工程多进行围护桩(墙)顶竖向位移监测,29 个工点的桩(墙)顶竖向位移实测结果见图 1。由图 1(a)可知,303 个桩(墙)顶竖向位移监测点的实测结果基本符合正态分布的特点(图中拟合线为正态分布曲线),上浮监测点占总数的 53.1%,沉降监测点占总数的 46.9%。上浮监测点的平均值为 9.7 mm,标准差为 6.1 mm,建议控制值取 15.8 mm;沉降监测点的平均值为 -10.7 mm,标准差为 -10.0 mm,建议控制值取 -20.7 mm。图 1(b)中列出了每个工点的统计结果,包括监测点的最大值、最小值和平均值。在 29 个工点中,监测点全部沉降的有 8 个,全部上浮的有 13 个,既有上浮又有沉降的有 8 个。

统计结果表明,桩(墙)顶竖向位移最大变化速率多在 -2 ~ +2 mm/d。

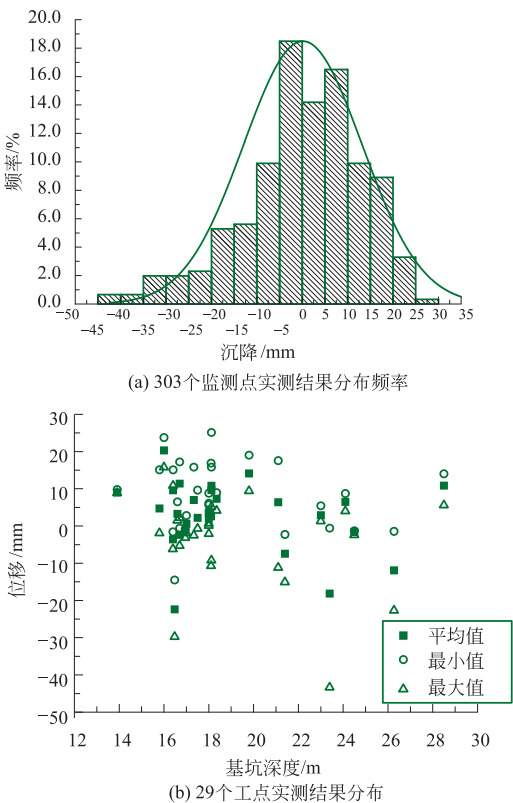


图 1 桩(墙)顶竖向位移统计结果

1.2 桩(墙)顶水平位移

随着基坑的开挖,桩(墙)顶部出现向水平方向的位移。一般基坑开挖较浅时,桩(墙)顶部向基坑内部的水平位移最大,可出现悬臂式位移。有多道内支撑的深基坑,第一道支撑接近地表且内力较大时,可使桩

(墙)顶部出现向基坑外侧的水平位移。

GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》规定的桩(墙)顶水平位移控制值为 25 ~ 70 mm,上海地区为 25 ~ 60 mm^[8-10]。73 个工点的围护桩(墙)顶水平位移监测统计结果见图 2、3。中软—软弱土地区的桩(墙)顶水平位移实测变形多大于坚硬—中硬土地区的实测值,桩(墙)顶均出现向基坑内、外的水平位移,且其位移量的大小与基坑深度的关系不大。一般桩(墙)顶向基坑内的水平位移大于向基坑外的水平位移,建议基坑工程桩(墙)顶应给出两个方向的水平位移监测控制值。

由图 2 可知,在中软—软弱土地区 24 个工点的 311 个监测点中,向基坑外水平位移监测点的平均值为 -9.6 mm,标准差为 -6.9 mm,建议控制值取 -16.5 mm;向基坑内水平位移监测点的平均值为 9.4 mm,标准差为 8.9 mm,建议控制值取 18.3 mm。

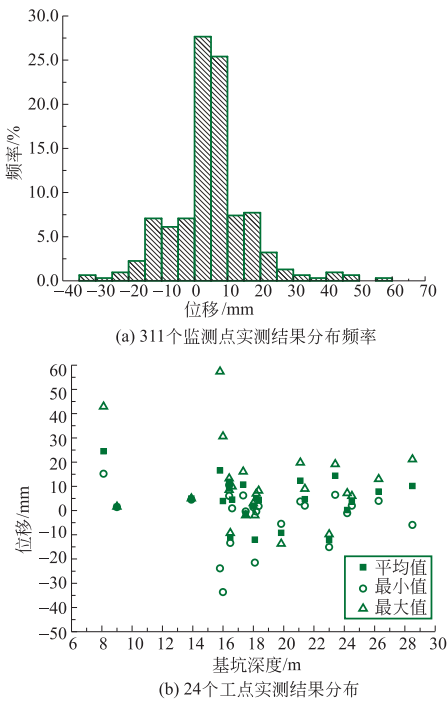


图 2 中软—软弱土地区桩(墙)顶水平位移统计结果

由图 3 可知,在坚硬—中硬土地区 49 个工点的 592 个监测点中,向基坑外水平位移监测点的平均值为 -6.5 mm,标准差为 -4.4 mm,建议控制值取 -10.9 mm;向基坑内水平位移监测点的平均值为 8.4 mm,标准差为 5.5 mm,建议控制值取 13.9 mm。

统计结果表明,各地桩(墙)顶水平位移的最大变化速率一般在 -2 ~ +2 mm/d。基坑工程桩(墙)顶部变形较小,这与各地根据工程实际采用合适的围(支)护结构形式有很大关系,例如,上海的中软—软弱土地区首道

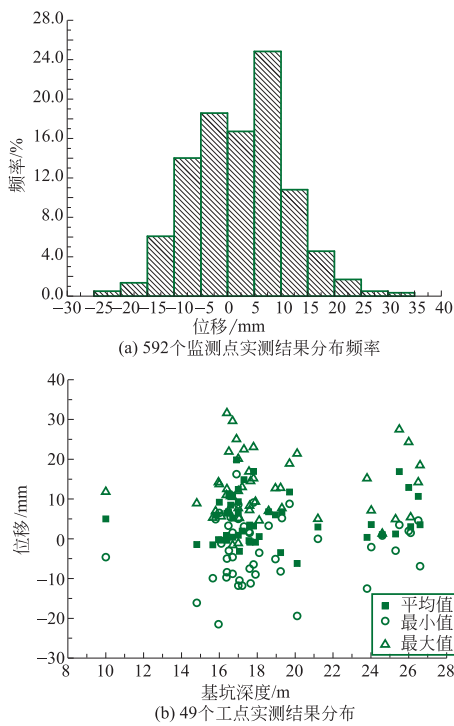


图3 坚硬—中硬土地区桩(墙)顶水平位移统计结果

支撑多采用混凝土支撑,北京的坚硬—中硬土地区首道支撑多采用钢支撑。第一道支撑接近地表且发挥了很好的支护作用,对围护桩(墙)顶部变形有很好的控制。

1.3 桩(墙)体水平位移

基坑开挖深度较大时,围护桩(墙)体水平位移逐渐增大,桩(墙)体腹部向基坑内突出,可形成抛物线形位移。

GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》规定的桩(墙)体水平位移控制值:地下连续墙为40~90 mm,灌注桩为45~80 mm;北京地区为30~50 mm,上海地区为45~80 mm,广东地区为30~150 mm^[8-11]。

76个工点的围护桩(墙)体水平位移监测统计结果见图4、图5。由图可知,中软—软弱土地区的实测变形多大于坚硬—中硬土地区,中软—软弱土地区的桩(墙)体主要表现为向基坑内的水平位移;坚硬—中硬土地区的桩(墙)体出现向基坑内、外的水平位移,一般桩(墙)体向基坑内的水平位移大于向基坑外的水平位移。

由图4可知,中软—软弱土地区的桩(墙)体水平位移较大,多超过了设计控制值(30~40 mm)。实测结果表明,29个工点282个监测点的平均值为44.1 mm,标准差为31.0 mm,建议控制值取75.1 mm。该地区实测最大变化速率多在5 mm/d以内。由图5可知,坚硬—中硬土地区桩(墙)体有向基坑外部的水平位移,该地区大部分基坑变形在设计控制值(30~40 mm)以内,

部分工点的监测点超过了控制值。

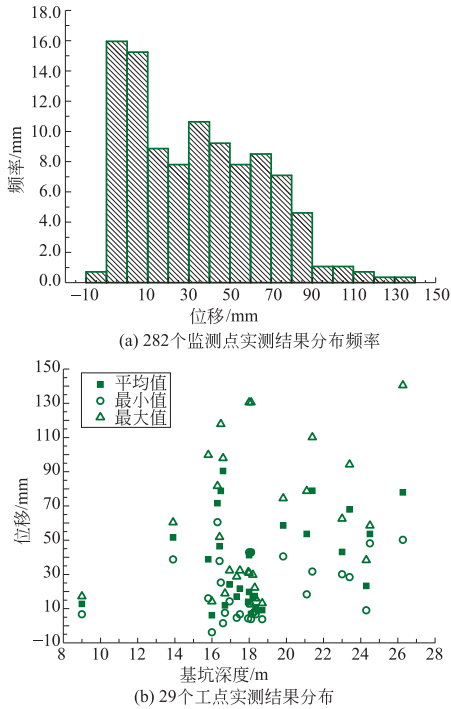


图4 中软—软弱土地区桩(墙)体水平位移统计结果

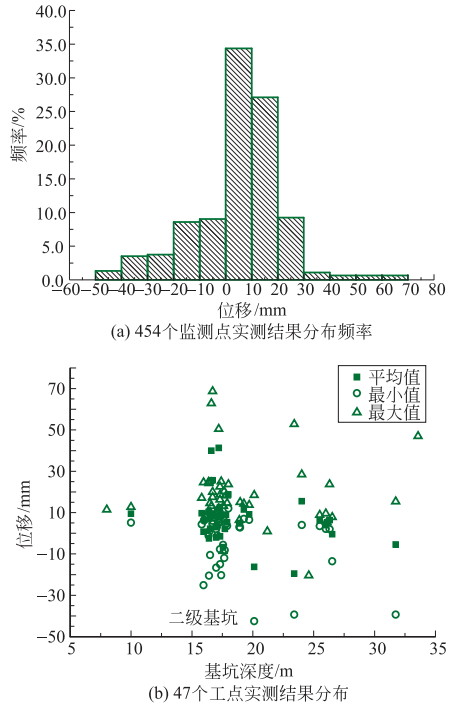


图5 坚硬—中硬土地区桩(墙)体水平位移统计结果

统计表明,47个工点454个监测点中向基坑外水平位移监测点的平均值为-16.8 mm,标准差为-12.2 mm,建议控制值取-29.0 mm;向基坑内水平位移监测点的平均值为12.9 mm,标准差为10.0 mm,建议控制值取22.9 mm。该地区实测最大变化速率多在2~3 mm/d。

中软-软弱土地区基坑围护结构多采用地下连续墙,在支撑作用下的基坑侧壁土体难以出现挤出现象,因此其墙体变形主要为向基坑内的水平位移。而坚硬-中硬土地区的基坑围护结构多采用灌注桩,在支撑作用下基坑侧壁土体可通过桩间裂缝挤出,致使桩体出现向基坑外侧的变形。

1.4 地表沉降

基坑工程围护桩(墙)的变形可引发周围地层位移和地表沉降,地表沉降形态与围护桩(墙)的变形形态密切相关,一般可分为拱肩型和凹槽型两种。开挖初期即产生较大的围护体变形,而后续开挖变形较小,地表最大沉降发生于紧贴围护桩(墙)处,为拱肩形曲线。开挖初期产生的围护体变形和周边地表沉降均不大,后续支撑作用围护结构发生较大的深层变形,为凹槽形曲线,凹槽形地表沉降最大位置一般距离桩(墙)有一定距离,约在0.4~0.7倍开挖深度处。

GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》规定的地表沉降控制值为25~65 mm,北京地区为30~50 mm,上海地区为25~60 mm,广东地区为20~40 mm^[8-11]。

67个工点的地表沉降监测统计结果见图6、图7。中软-软弱土地区的实测变形多大于坚硬-中硬土地区。中软-软弱土地区基坑周边地表变形主要为沉降,坚硬-中硬土地区基坑周边地表出现了沉降和上浮现象。由图6可知,中软-软弱土地区基坑地表沉降大部分监测点的实测值超过了30 mm的设计控制值,部分工点实测值较大,最大沉降量达到-224.2 mm。统计结果表明,31个工点646个监测点的平均值为32.0 mm,标准差为31.8 mm,建议控制值取63.8 mm。地表沉降的最大变化速率多在2~3 mm/d。由图7可知,坚硬土-中硬土地区除4个基坑的地表沉降较大外(最大值为-94.5 mm),大部分基坑的地表沉降在30 mm的设计控制值以内。开挖深度为14~22 m的基坑周边地表上浮量较大,最大值达到19.8 mm。

统计结果表明,在36个工点912个监测点中,上浮监测点的平均值为5.9 mm,标准差为4.3 mm,建议控制值取10.2 mm;沉降监测点的平均值为-9.7 mm,标准差为-11.6 mm,建议控制值取-21.3 mm。地表沉降的最大变化速率多在2~3 mm/d。

2 基坑变形相关性分析

2.1 桩(墙)顶竖向位移与基坑深度的关系

29个工点最大桩(墙)顶竖向位移与基坑深度H的关系见图8。桩(墙)顶最大上浮约为0.14% H,最大沉降约为0.18% H。

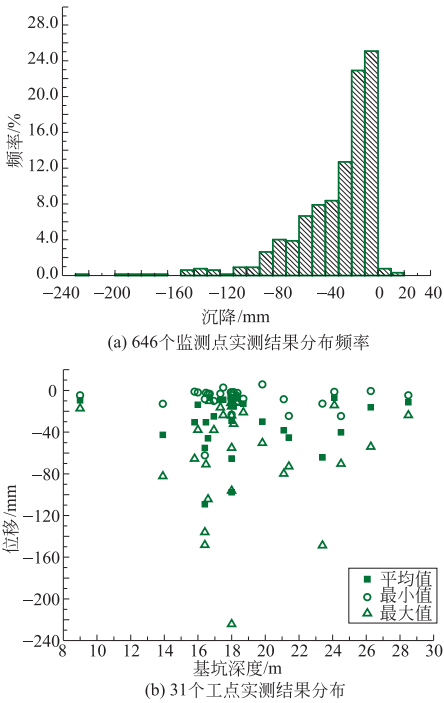


图6 中软-软弱土地区地表沉降统计结果

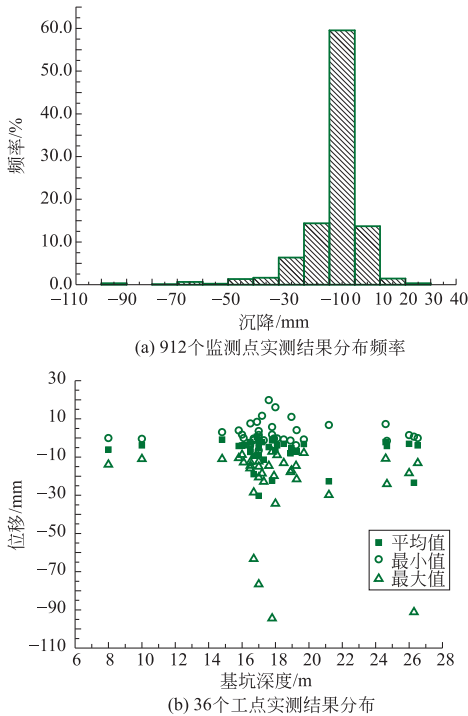


图7 坚硬-中硬土地区地表沉降统计结果

2.2 桩(墙)水平位移与基坑深度的关系

取不同基坑围护桩(墙)顶部和桩(墙)体向基坑内部的最大水平位移进行研究,桩(墙)水平位移与基坑深度H的关系见图9。中软-软弱土地区21个工点的实测结果较大,最大桩(墙)水平位移变化范围为(0.16%~0.73%)H,平均值约为0.40% H。

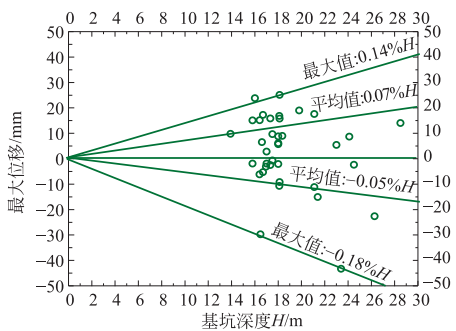


图8 桩(墙)顶竖向位移与基坑深度的关系

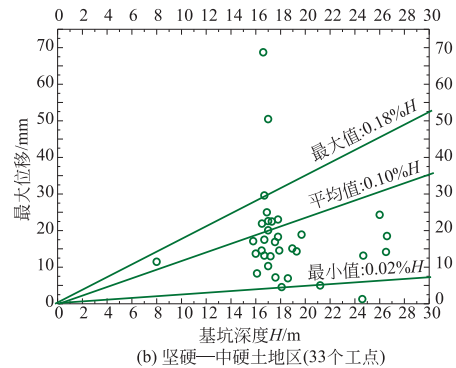
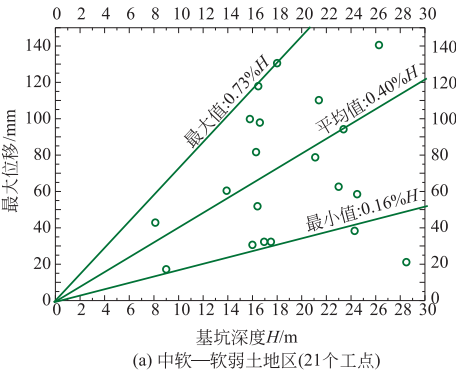


图9 桩(墙)水平位移与基坑深度的关系

坚硬—中硬土地区 33 个工点的实测结果表明,最大桩(墙)水平位移的平均值约为 $0.10\% H$,最大值约为 $0.18\% H$ 。

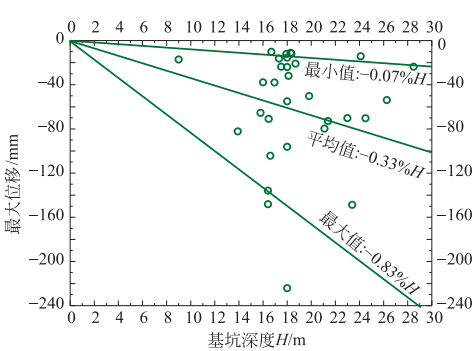
2.3 地表沉降与基坑深度的关系

最大地表沉降与基坑深度 H 的关系见图 10。中软—软弱土地区 31 个工点的实测结果较大,最大地表沉降变化范围为 $(0.07\% \sim 0.83\%) H$,平均值约为 $0.33\% H$ 。

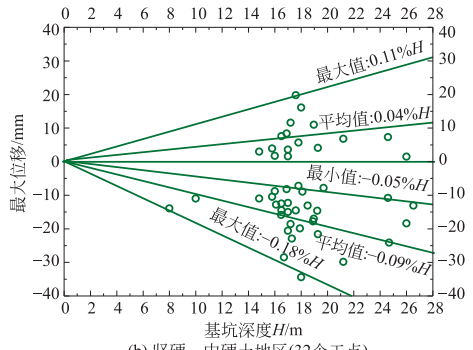
在坚硬—中硬土地区未考虑 4 个最大沉降超过 60 mm 的工点,32 个工点的实测结果表明最大地表上浮约为 $0.11\% H$,最大地表沉降的平均值约为 $0.09\% H$,最大值约为 $0.18\% H$ 。

2.4 桩(墙)水平位移与地表沉降的关系

无量纲化最大桩(墙)水平位移(δ_{hm})与最大地表沉降(δ_{vm})的关系见图 11。中软—软弱土地区 21 个工



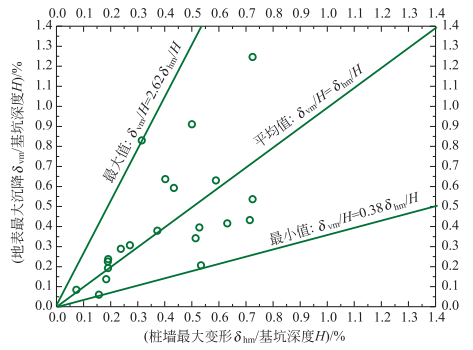
(a) 中软—软弱土地区(31个工点)



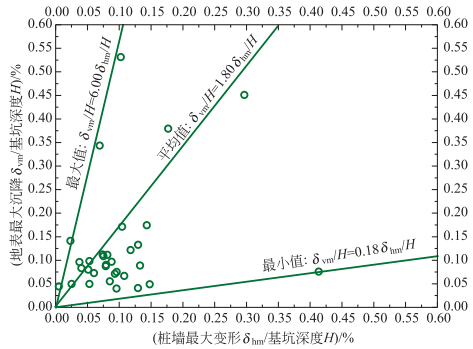
(b) 坚硬—中硬土地区(32个工点)

图 10 地表沉降与基坑深度的关系

点的实测结果表明, δ_{vm} 为 $0.38 \sim 2.62 \delta_{hm}$,平均值为 $1.00 \delta_{hm}$;坚硬—中硬土地区 32 个工点的实测结果表明, δ_{vm} 为 $0.18 \sim 6.00 \delta_{hm}$,平均值为 $1.80 \delta_{hm}$, δ_{vm} 与 δ_{hm} 之间的离散性相对较大。



(a) 中软—软弱土地区(21个工点)



(b) 坚硬—中硬土地区(32个工点)

图 11 桩(墙)水平位移与地表沉降的关系

坚硬—中硬土地区无量纲化桩(墙)向基坑外最大水平位移(δ'_{hm})与最大地表上浮(δ'_{vm})的关系见图12。7个工点的实测结果表明, δ'_{vm} 为0.14~2.43 δ'_{hm} ,平均值为1.12 δ'_{hm} 。桩(墙)顶和桩(墙)体向基坑外的水平位移均出现地表上浮量较大的现象。

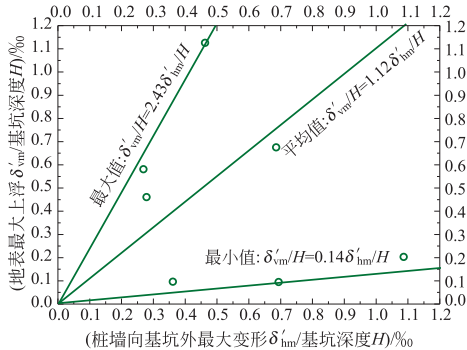


图12 桩(墙)向基坑外水平位移与地表上浮的关系

3 结语

1) 城市轨道交通基坑工程变形监测控制指标是衡量工程安全与否的重要标准,应深入研究各类影响因素,结合大量实测案例的统计分析确定适宜的控制值。

2) 87个基坑工程的实测结果表明,场地地质条件对变形有较大差异,可根据工程场地地层性质的不同对应给出监测控制值。

3) 围护桩(墙)顶部竖向位移包括沉降和上浮两种,水平方向有向基坑内外的位移。中软—软弱土地区的地下连续墙体主要为向基坑内部的变形,地表主要为沉降,变形较大;坚硬土—中硬土地区的灌注桩体存在向基坑外部的水平位移,地表部分出现上浮。根据统计分析结果,给出了这些监测项目的建议控制值。

4) 基于工程实测案例的经验总结是确定基坑工程变形控制指标的重要方法,各地应注重实测资料的

积累,不断深入开展变形监测控制指标的研究。

参考文献

- [1] YOO C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127 (3): 225 - 233.
- [2] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database [J]. Soils and Foundations, 2004, 44 (1): 87 - 98.
- [3] LEUNG E H Y, CHARLES. W. W. NG. Wall and ground movements associated with excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (2): 129 - 143.
- [4] 江晓峰, 刘国彬, 张伟立, 等. 基于实测数据的上海地区超深基坑变形特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (增刊2): 570 - 573.
- [5] 徐中华, 王卫东. 深基坑变形控制指标研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (3): 619 - 626.
- [6] 郑刚, 焦莹, 李竹. 软土地区深基坑工程存在的变形与稳定问题及其控制: 基坑变形的控制指标及控制值的若干问题 [J]. 施工技术, 2011, 40 (339): 8 - 14.
- [7] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] GB 50497—2009 建筑基坑工程监测技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [9] DB 11/490—2007 地铁工程监控量测技术规程 [S]. 北京: 北京城建科技促进会, 2007.
- [10] DG/TJ 08—2001—2006 基坑工程施工监测规程 [S]. 上海: 上海市新闻出版局, 2006.
- [11] DBJ/T 15—20—97 建筑基坑支护工程技术规程 [S]. 广州: 广东省建设委员会, 1997.

(编辑: 郝京红)

Deformation Monitoring Controlled Indexes of Urban Rail Transit Foundation Pit Engineering

Wu Fengbo^{1,2} Jin Huai^{1,3} Zhang Jianquan¹ Liu Yongqin¹ Ren Gan¹ Zhong Qiaorong³

(1. Beijing Urban Construction Exploration, Surveying, Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101;

2. Civil and Environmental Engineering Institute, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083;

3. Agiletec Engineering Consultants Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: Based on the actual cases study of many cities in China, authors analysed the deformation characteristics and control indexes of retaining structure and surrounding ground of the foundation pit engineering of urban rail transit. Measured results were processed by statistical analysis. According to related research results and technical codes, the recommended controlled values for deformation were given for different soils which can reasonably evaluate the safety state of foundation pit engineering. Deformation monitoring controlled indexes are affected by many factors and in - depth research should be carried out to improve the safety risk control level of foundation pit engineering.

Key words: urban rail transit; foundation pit engineering; deformation; controlled index