

DOI: 10.11779/CJGE2014S2072

# 双排桩隔离位移场防护邻近基坑高楼监测研究

李东海<sup>1,2</sup>, 王梦恕<sup>1</sup>, 杨广武<sup>3</sup>, 刘军<sup>4</sup>, 张顶立<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京市市政工程研究院, 北京 100037;

3. 北京市重大项目建设指挥部办公室, 北京 100029; 4. 北京建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 邻近基坑的既有建筑物由于基坑开挖引起的土体位移作用而产生附加变形甚至造成严重损伤。双排桩作为一种刚度较大的隔离措施成为当前的研究热点。以北京某地铁深基坑邻近高层居民楼为实例, 对双排桩的桩排距、冠梁连接、桩间土处理等关键设计参数进行了有针对性的优化。采用数值模拟计算和现场监测, 对双排桩、桩后土体及高层建筑等组成的位移场进行了分析, 并进一步总结了双排桩、桩后土体及高层建筑的变形规律。同时, 通过双排桩与单排桩的变形对比分析, 验证了双排桩对位移场的隔离效果明显, 围护结构背后土体的水平位移由 17 mm 降低到 8 mm, 减少了 53%。有效控制了既有建筑的损伤程度, 居民楼的最终最大差异沉降为 6.9 mm, 角变量为 0.33%, 确保了邻近基坑居民楼的使用安全。为后续类似工程提供了有益的参考。

**关键词:** 深基坑; 双排桩; 位移场; 既有建筑; 监测

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0412-06

**作者简介:** 李东海(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程研究与监测工作。E-mail: sidenli2000@163.com。

## Monitoring of double-row piles and high buildings adjacent to deep foundation pits

LI Dong-hai<sup>1,2</sup>, WANG Meng-shu<sup>1</sup>, YANG Guang-wu<sup>3</sup>, LIU Jun<sup>4</sup>, ZHANG Ding-li<sup>1</sup>

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China; 3. Beijing major Projects Construction Headquarters Office, Beijing 100029, China; 4. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The existing buildings adjacent to a deep foundation pit will be damaged seriously or additionally deformed when the foundation pit is excavated, and it will lead to motion of soils. The double-row piles as one of shielding measures are studied. Based on a deep foundation pit adjacent to high buildings in Beijing, the key design parameters of double-row piles such as distance of row piles, distance of piles, link of top beam, and strength of soils between the piles are analyzed. Through the numerical simulation and in-situ monitoring, the displacement field grouped by the double-row piles, soils after the piles and high buildings is analyzed. The deformation laws of the double-row piles, soils after the piles and high buildings are concluded. At the same time, it is proved that the double-row piles can reduce the displacement field obviously by comparing the double-row piles to the single-row ones. The horizontal displacement of soils after the piles decreases from 17 mm to 8 mm, with a percent of about 53%. The maximum differential settlement of high buildings is 6.9 mm and the angle variance is 0.33%. In a word, the safety of buildings is ensured by monitoring during the excavation of the deep foundation pit. It may be useful reference to the similar engineering in future.

**Key words:** deep foundation pit; double-row pile; displacement field; existing building; monitoring

## 0 引言

随着城市地铁及地下工程的蓬勃发展, 深基坑工程的开挖引起的环境问题日益突出。在繁华的城市中心, 大量的基坑开挖使的邻近的地铁结构、地下管线、工民建筑等既有建筑物产生附加变形, 当附加变形量和既有变形量的合计值累积到某一较高水平时, 就会影响到建筑物的使用功能, 若变形量继续增加则对

结构形成不可逆转的损伤甚至造成结构破坏。在以往的工程实践中, 大多采取隔离或者加固措施控制附加变形量。应宏伟等采用 ABAQUS 深入分析了隔断墙各设计参数对保护基坑邻近建筑物效果的影响, 得出隔断墙的深度存在一个合理值<sup>[1]</sup>。黄茂松等结合建筑物自身承载力采用基坑开挖对邻近既有建筑物影响的

位移控制有限元分析方法(DCFEM), 提出了基于周边建筑物承载能力的基坑变形控制标准<sup>[2]</sup>。郑刚等在考虑初始沉降的基础上结合坑外沉降的规律对建筑物的影响程度进行了分析, 并提出了偏安全情况和较危险情况<sup>[3]</sup>。类似成果颇多, 此处不再赘述<sup>[4-8]</sup>。而双排桩作为一种新型的围护结构逐步发展成熟起来。Martin等通过数值模拟分析了双排桩在抗滑时的变形、内力分布等, 并认为群桩是控制位移的较好措施<sup>[9]</sup>。黄凭等通过一假想剪切滑裂面, 在双排桩支护结构上建立各段桩体的挠曲微分方程, 然后求解得出双排桩各点的变形及内力情况<sup>[10]</sup>。聂庆科等<sup>[11]</sup>根据某大型深基坑工程的实测资料, 对双排桩支护结构上的截面弯矩、变形和土压力分布特征进行了研究, 表明深基坑双排桩支护结构上的土压力分布是十分复杂的, 用传统的土压力计算方法估算存在较大偏差。吴刚等分析并计算了冠梁对双排桩支护结构的变形协调作用; 考虑了滑移面和排距对作用在前后排桩上的土压力的影响<sup>[12]</sup>。总之以上的成果均是从双排桩控制基坑工程自身安全出发, 未能很好的结合周边环境风险进行分析。所以, 本文根据工程实例针对基坑工程自身和周边环境的双重目标对双排桩的设计参数进行优化。并采用数值模拟分析和现场监测等技术措施确保了邻近建筑物的安全。同时通过监测数据分析进一步表明双排桩隔离位移场保护邻近建构筑物效果明显。

## 1 工程概况

北京某地铁基坑位于惠新东街与惠新西街之间, 全长 459.328 m (K11+049.072—K11+508.4), 基坑开挖深度为 13.5 m。本段明开施工设计围护结构为  $\phi 600$  钻孔灌注桩+ $\phi 609$  钢管对撑支护体系, 支护桩的桩间土随基坑开挖进行网喷护壁。基坑周边建筑物很多, 其中一座装配式 16 层塔楼距离基坑 8.2 m。基坑与 16 层塔楼的位置关系见图 1。该工程地质情况复杂, 地下杂填土层土质松散且分布面积广, 在地下存在着滞水层, 降水时无法将其排出, 施工时会造成沉降, 出现沉降裂缝, 存在着严重的安全隐患。为确保邻近居民楼的安全, 减少工程施工对居民生活的影响, 避免降水施工产生土质疏松进一步造成地表及周边建筑物发生不均匀沉降, 有必要对开挖基坑北侧区域采取止水加固措施, 以保护周围环境的安全。

居民楼位于基坑北侧, 共 16 层, 筏板基础深约 7 m, 浅于基坑挖深, 完全在基坑施工影响范围内。经过现场调查, 该居民楼为装配式的高层建筑, 且存在较多的裂缝和既有的不均匀沉降。基坑施工必将影响该居民楼的使用安全且危险级别较高。有必要在施工中采取合理的施工方法和技术措施, 以确保基坑施工

和楼房使用安全。

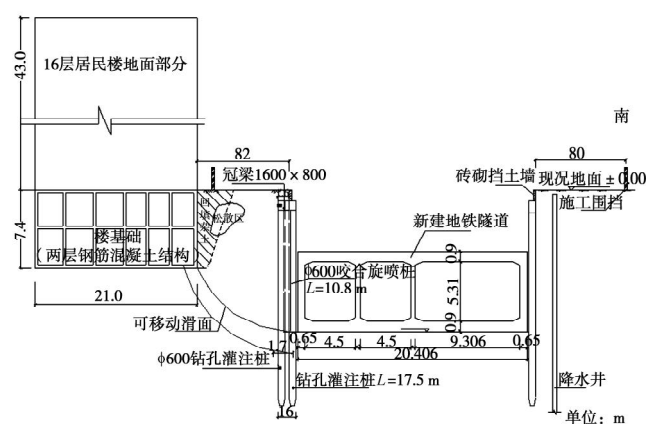


图 1 地铁基坑与居民楼位置关系断面图

Fig. 1 Relative position between existing buildings and deep foundation pit

## 2 双排桩隔离位移场方案设计优化

经过对既有建筑物的现状检测, 确定采用刚度大、适应性强的双排桩作为隔离措施, 以减小既有建筑的变形量。根据工程的实际条件, 对桩长、桩径、桩间距、桩排距、冠梁连接、桩间土处理等设计参数采用有限元方法进行了多次优化计算。最终确定了隔离范围为高层住宅楼东西向长 26.837 m 及两侧各 10 m 区域。即总的双排桩隔离长度 46.837 m。桩长为 17.5 m, 桩径为 600 mm, 桩间距为 1000 mm, 桩排距为 1000 mm, 前后排对齐布置。后排桩间施做 600 mm 旋喷桩, 不但可以止水, 减少地下水影响, 更可有效提高排桩的刚度。桩顶加设钢筋混凝土冠梁, 断面尺寸 600 mm $\times$ 900 mm, 前后排冠梁每隔 2 m 进行连接, 连接采用钢筋混凝土结构形式, 断面 400 mm $\times$ 900 mm, 钢筋连接采用焊接, 冠梁与连接同时浇筑完成(图 2)。

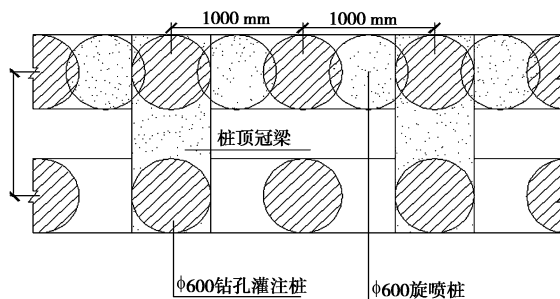


图 2 双排桩设计详图

Fig. 2 Plan of design of double-row piles

## 3 既有建筑物安全状况评估

根据 16 层塔楼的使用时间、结构特征、裂缝形成、既有沉降数值及承载力情况, 对其能够承受的变形及损伤进行了预测。并提出了以下安全控制标准: ①楼

房整体倾斜小于 0.5‰；②基础最大差异沉降小于 8 mm。经过有限元模拟计算单排桩不能满足楼房安全评估报告给出的控制标准。特别提出必须采取有效的隔离或加固措施。即采用双排桩增加支护结构刚度，减少既有建筑的附加变形。将以上的双排桩加固措施与建筑物变形结合基坑开挖的施工过程进行有限元分析，最终的最大差异沉降值为 5 mm，满足既有建筑的安全要求，但建议施工过程中须进行严密的监测确保既有高层建筑的安全使用。

4 现场监测

为了实时了解基坑施工过程中位移传递规律和控制既有建筑物的变形损伤情况，根据工程条件对现场监测进行周密的设计。将双排桩、桩后土体、既有建筑确定为主要监测对象，主要的监测项目有桩体变形（单排，双排）、桩顶沉降、桩后土体水平位移、桩后地表沉降、居民楼沉降、居民楼倾斜等。

4.1 结构沉降测点布设

结构沉降测点参照《建筑变形测量规范》（JGJ8—2007）的要求进行<sup>[13]</sup>，确保监测数据能够准确反映既有建筑的变形。根据要求在居民楼四角和变形缝及侧墙中点布设了测点，具体的测点布置见图 3 所示，在纵横向上形成监测断面。测点的制作、埋设按照相关规范的要求进行<sup>[14-15]</sup>。

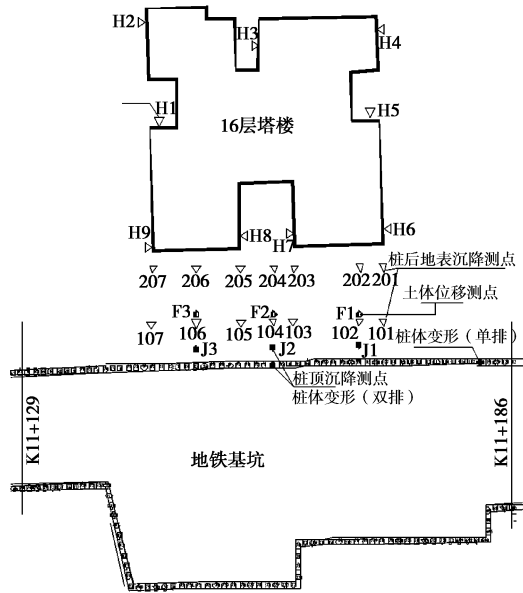


图 3 双排桩围护结构及邻近居民楼监测布点图

Fig. 3 Layout of monitoring points

4.2 现场监测的实施

由于该工程风险很高，涉及众多人员的生命财产安全，对于监测实施提出了较高的要求。鉴于此，在本工程中采用了精度为 0.3 mm/km 的蔡司精密水准仪和 0.02 mm/0.5 m 的 SINCO 测斜仪。按照高于一般监

测的要求的监测频率进行了监测。当基坑开挖深度小于 5 m 时，1 次/d。当基坑开挖深度大于 5 m 时，2 次/d。当结构完成后，参照沉降数据变化情况，逐渐降低频率至 1 次/3 d，直至数据变化稳定。

5 监测数据分析

5.1 桩顶沉降等竖向位移场分析

由图 4~7 可知双排桩、桩后地表及居民楼形成的竖向位移场是随着基坑开挖深度的增加而逐渐增大，而且表现出了相同的趋势。基坑开挖初期，开挖深度较浅，影响范围较小，只有桩顶发生了 1 mm 左右的沉降，随着开挖深度的增加，发生沉降的范围逐步扩展至 2，6，8 m 以及更大的范围。虽然具有相似的发展趋势，也不难看出当达到一定开挖深度后，桩顶沉降、较近的桩后土体都出现了快速沉降阶段，最大沉降速率可达 1 mm/d，而这一特征在较远的土体和建筑物沉降曲线上无明显表现。同时，桩顶沉降的最大值为-9.0 mm，桩后距基坑 2 m 处沉降最大值为-9.5 mm，桩后距基坑 6 m 处沉降最大值为-10.6 mm，居民楼沉降距离基坑较近侧（H8 点）的最大值为-8.7 mm，中间部位的 H1 点最大值为-6.0 mm，而距离基坑较远侧 H2 点最大值为-2.3 mm。由这些最值组成了基坑外地表沉降的变形规律，从基坑边开始沉降数据逐渐增大，在距离基坑 0.5 倍开挖深度时达到最大值后逐渐减少，直至 4 倍开挖深度后沉降几乎为零，从而形成非对称的沉降槽。显然该居民楼处于沉降槽的上升段，这会增加居民楼的横向角变量使其损伤的概率增大。从竖向位移场的时空分析来看，沉降的滞后效应很小，位移场以非对称的沉降槽为基本形态，以基坑开挖深度为发展的直接诱因，在距基坑由近及远的影响范围内层层叠加直至最后形成了稳定的沉降曲面。由以上竖向位移场展布规律的分析，可以发现，确定既有建筑物变形控制值的主要因素除了基坑围护结构形式、工程地质与水文地质条件、建筑物结构形式、建筑物刚

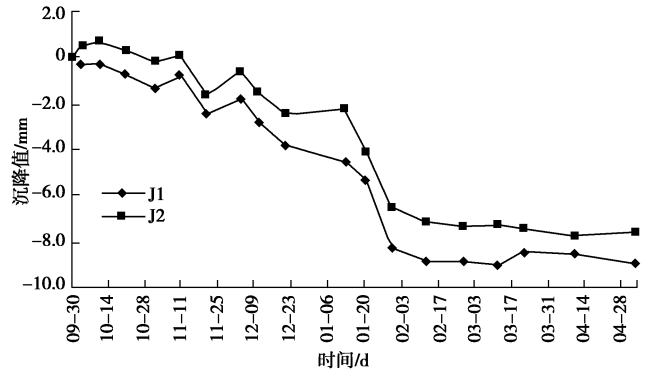


图 4 桩顶沉降历时曲线

Fig. 4 Variation of settlement of top of piles with time

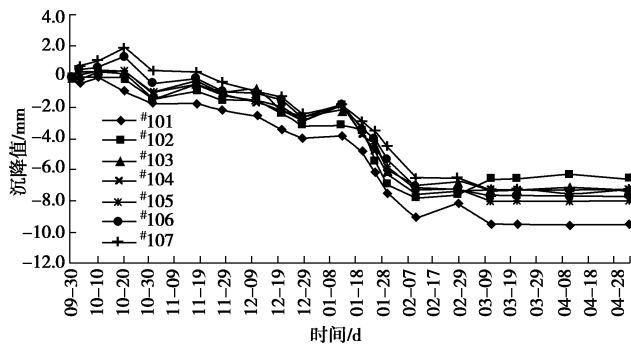


图 5 桩后土体沉降历时曲线 (距基坑 2 m)

Fig. 5 Variation of ground settlement with time (2 m)

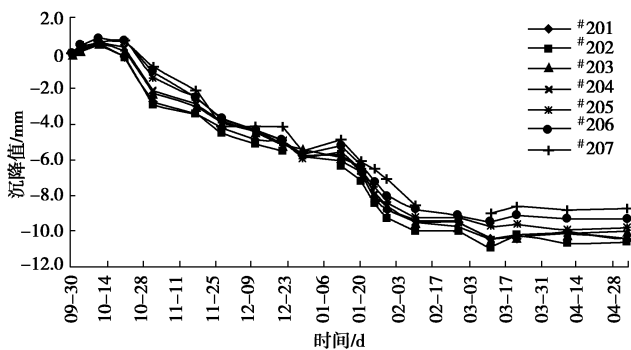


图 6 桩后土体沉降历时曲线 (距基坑 6 m)

Fig. 6 Variation of ground settlement with time (6 m)

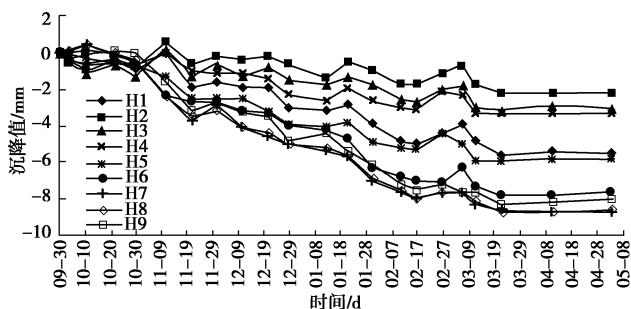


图 7 既有居民楼沉降历时曲线 (距基坑 8 m)

Fig. 7 Variation of settlement of existing buildings with time (8 m) 度之外, 建筑物与基坑边缘之间的距离也是需要重点考虑的因素。因为建筑物与基坑边缘之间的距离或者说建筑物在位移场中所处的位置决定了建筑物差异沉降的量值和其可能承受的最大拉应力。

## 5.2 桩体变形等水平位移场分析

由图 8~10 可以看出双排桩的前排桩、双排桩的后排桩、桩后土体的水平位移均是随着基坑的开挖深度的增加而增加, 表现出相同的趋势。前排桩向基坑侧水平位移了 16 mm, 深度位置在 10 m, 后排桩同样向基坑侧水平位移了 8 mm, 深度位置在 10 m 左右, 桩后土体向基坑侧水平位移了 7 mm, 深度位置亦在 10 m, 所以在同一开挖深度时水平位移的最大值是随着距基坑边缘距离的增加而快速减小, 且最大值的深度位置只是随着开挖深度的增加而增加, 而与距基坑边缘的水平距离无关。同时比较图 8, 9 不难看出最大

水平位移值出现了快速衰减, 减少的速率达到 50%。而由图 9, 10 比较得出后排桩与桩后土体的水平位移减少 1 mm, 仅有 13%。进一步表明双排桩结构内部快速降低了水平位移, 直接减少了桩后土体水平位移的空间, 也间接的控制了土体的竖向沉降, 由此进一步验证了双排桩控制桩后土体变形保护既有建筑物效果明显。此外就图 8 的坐标原点为起点, 将每一开挖深度的水平位移最大值进行连接成线, 若为近似直线可以反映出基坑的开挖速率是均匀的, 反之亦然。图 9, 10 也反映了同样规律, 但其斜率是递减的, 这也可从另一方面说明了水平位移场是随着基坑开挖速度基本为直线形态向深度发展, 在同一深度位置则随着距基坑边缘距离的增大而快速衰减下去。总之, 桩体水平位移是导致桩后土体沉降的主因, 但对邻近建筑物造成损伤的直接主因并不一定是桩后土体的水平位移, 因为水平位移的最值是在较深的基坑开挖面附近。

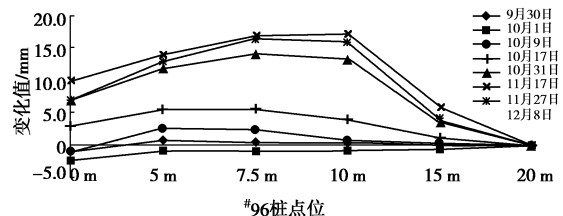


图 8 基坑围护桩前排桩体变形监测历时曲线

Fig. 8 Variation of horizontal displacement of piles with time

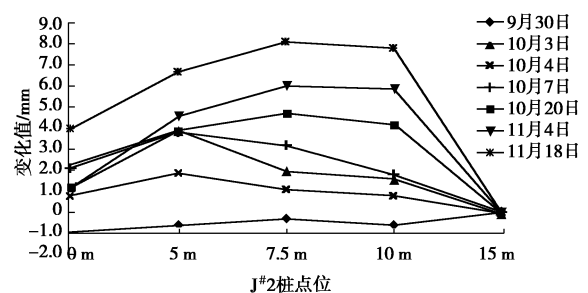


图 9 基坑围护桩后排桩体变形监测历时曲线

Fig. 9 Variation of horizontal displacement of piles with time

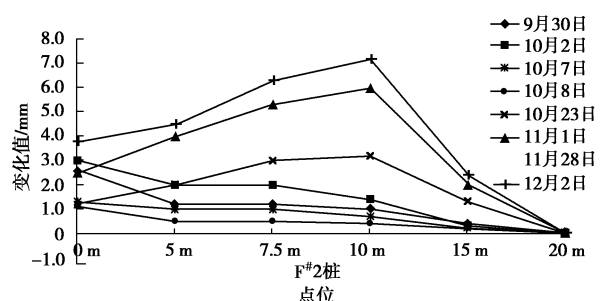


图 10 桩后土体水平位移监测历时曲线

Fig. 10 Variation of horizontal displacement of soils with time

## 5.3 居民楼的变形损伤分析

采取双排桩这一隔离加强措施控制桩后土体变形主要目的就是保护居民楼免受太大损伤。基坑开挖将

导致建筑物基础将发生倾斜,基础底面与水平面的夹角的正切定义为建筑物基础的角变量,而角变量的大小可以衡量建筑物基础发生沉降后的损伤程度<sup>[16]</sup>。由图7可以看出居民楼的整体竖向沉降趋势与地表沉降的趋势一致,但最大沉降值为-8.7 mm,相比地表沉降小了很多。按照测点距离基坑的远近可以将9个测点划分为3个断面,H6—H9为第一断面,沉降值约为-8 mm,单点之间几乎没有差异沉降。H1—H5为第二断面,沉降值-5.5~-6.0 mm,差异沉降0.5 mm。H2—H4为第三断面,沉降值-2.3~-3.2 mm,差异沉降0.9 mm。由以上分析可以得出,居民楼的筏板基础刚度较大,在平行于基坑方向上几乎没有差异沉降,即角变量很小。而由图11可以看出在垂直基坑方向上,建筑基础的最大沉降值为-8.2 mm,差异沉降6.9 mm。所以在垂直基坑方向上,建筑物受损伤程度较重。此外差异沉降曲线近似一条直线,再次证明建筑物基础的刚度较大。虽然基础刚度较大,从图11依然可以看出建筑的角点比中间点沉降要小。通过监测数据分析,居民楼的最终最大差异沉降为6.9 mm,角变量为0.33%。这两项均小于建筑物所能承受的评估值,将居民楼的受损伤程度控制在安全范围之内。

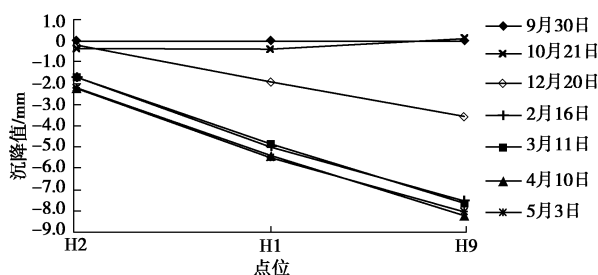


图11 居民楼垂直基坑方向差异沉降历时曲线

Fig. 11 Variation of differential settlement of high buildings with time

#### 5.4 双排桩与单排桩变形对比分析

通过图8、12的对比分析可以看出, #96桩的变形曲线较为缓和, 最值为16 mm, 略小于单排桩118号桩的最值17 mm。但是#118桩变形在开挖面经过时变化速率较大, 在10 m深度位置, 最大速率达到4 mm/d。相比较而言, #96桩在开挖面通过时的变化速率较小, 最大仅有2.5 mm/d。由此表明双排桩在很大程度上减少了其中单桩的弯曲变形, 使得桩体变形更加圆滑, 同时也减少了桩内的剪力, 提高了桩的安全储备。另一方面, 由图9和图12对比可以看出, 围护结构背后土体的水平位移由17 mm降低到8 mm, 减少了53%。由此验证了双排桩的隔离效果明显。同时, 由于围护结构变形的减小, 减少了结构后土体变形的空间, 进一步限制了结构后土体进行滑移或者下沉的

趋势, 从而更好的抑制了结构后土体的位移达到了保护邻近建筑物的目的。

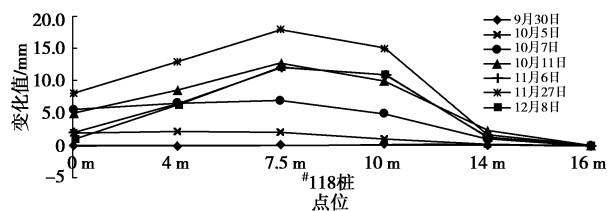


图12 单排桩桩体变形历时曲线

Fig. 12 Variation of horizontal displacement of piles with time

## 6 结 论

(1) 双排桩作为一种刚度大、适应性强的围护结构或隔离结构在防护邻近建构筑的工程中具有很好的效果, 但为了更好的实现隔离位移场控制结构后土体变形的目标, 需对桩排距、冠梁连接、桩间土处理等关键设计参数进行组合优化, 以达到双排桩结构的整体刚度最优。

(2) 从位移场的时空分析来看, 土体变形的滞后效应很小, 竖向位移场以非对称的沉降槽为基本形态, 以基坑开挖深度为发展的直接诱因, 在距基坑由近及远的影响范围内层层叠加直至最后形成了稳定的沉降曲面。同一开挖深度时水平位移的最大值是随着距基坑边缘距离的增加而快速减小, 且最大值的深度位置只是随着开挖深度的增加而增加, 而与距基坑边缘的水平距离无关。大刚度的围护结构并不能改变位移场展布的规律, 只是随着刚度的增大减小了位移场的幅值和范围。

(3) 邻近建筑物与基坑边缘的距离也是影响建筑物受损程度的重要因素, 而且最不利的位置是非对称沉降槽的拐点。通过对实测数据的分析, 在垂直基坑方向上的角变量要比平行于基坑方向上角变量大很多, 从保护建筑物的角度出发, 应重点控制垂直基坑方向上的角变量。居民楼的最终最大差异沉降为6.9 mm, 角变量为0.33%, 将居民楼的受损伤程度控制在安全范围之内。

(4) 通过对应用实例的分析, 双排桩结构使的桩体变形缓和圆滑, 减小了结构内的剪力, 提高了安全储备。同时, 围护结构背后土体的水平位移由17 mm降低到8 mm, 减少了53%, 从而按照桩后土体体积不变的假定可以推算出地表沉降的最值也减少了53%, 由此验证了双排桩的隔离效果明显, 是保护邻近建筑物的有效措施。

#### 参考文献:

[1] 应宏伟, 李 涛, 王文芳. 基于三维数值模拟的深基坑隔

- 断墙优化设计[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 220 - 226. (YING Hong-wei, LI Tao, WANG Wen-fang. Optimization design of partition wall in deep excavations based on 3-D numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 220 - 226. (in Chinese))
- [2] 黄茂松, 朱晓宇, 张陈蓉. 基于周边既有建筑物承载能力的基坑变形控制标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2305 - 2311. (HUANG Mao-song, ZHU Xiao-yu, ZHANG Chen-rong. Deformation controlling criterion for excavation based on bearing capacity of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2305 - 2311. (in Chinese))
- [3] 郑刚, 李志伟. 考虑初始不均匀沉降的建筑物受基坑开挖影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2491 - 2499. (ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Finite element analysis of responses of building adjacent to excavation considering initial differential settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2491 - 2499. (in Chinese))
- [4] 李进军, 王卫东, 邸国恩, 等. 基坑工程对邻近建筑物附加变形影响的分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊): 623 - 629. (LI Jin-jun, WANG Wei-dong, DI Guo-en, et al. Analysis of the influence of excavation engineering on additional deformation of adjacent buildings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 623 - 629. (in Chinese))
- [5] 王浩然, 王卫东, 徐中华. 基坑开挖对邻近建筑物影响的三维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(增刊 2): 1512 - 1517. (WANG Hao-ran, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Three dimensional analysis of the influence of deep excavation on adjacent building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(S2): 1512 - 1517. (in Chinese))
- [6] 李东海, 王梦恕, 丁振明, 等. 含砂砾土层 SMW 围护结构变形的三维数值分析与监测[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊): 120 - 124. (LI Dong-hai, WANG Meng-shu, DING Zhen-ming, et al. Three-dimensional numerical analysis and monitoring of deformation of SMW deep foundation pit enclosure structure in soil containing gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 120 - 124. (in Chinese))
- [7] 李大勇, 龚晓南, 张士乔. 软土地基深基坑周围地下管线保护措施数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(6): 736 - 740. (LI Da-yong, GONG Xiao-nan, ZHANG Tu-qiao. Numerical simulation of the buried pipelines protection adjacent to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 736 - 740. (in Chinese))
- [8] 翟杰群, 贾坚, 谢小林. 隔离桩在深基坑开挖保护相邻建筑中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(1): 162 - 166. (ZAI Jie-qun, JIA Jian, XIE Xiao-lin. Practice of Partition Wall in the Building Protection Projects near Deep Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(1): 162 - 166. (in Chinese))
- [9] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement[R]. Computers and Structures, 2005, **83**: 588 - 598.
- [10] 黄凭, 莫海鸿, 陈俊生. 双排桩支护结构挠曲理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3870 - 3875. (HUANG Ping, MO Hai-hong, CHEN Jun-sheng. Theoretical analysis of double-row piles retaining structure deflection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3870 - 3875. (in Chinese))
- [11] 聂庆科, 胡建敏, 吴刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3089 - 3094. (NIE Qing-ke, HU Jian-min, WU Gang. Deformation and earth pressure of a double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3089 - 3094. (in Chinese))
- [12] 吴刚, 白冰, 聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2753 - 2757. (WU Gang, BAI Bing, NIE Qing-ke. Research on calculation method of double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2753 - 2757. (in Chinese))
- [13] JGJ8—2007 建筑变形测量规范[S]. 2007. (JGJ8—2007 Code for deformation measurement of building and structure[S]. 2007. (in Chinese))
- [14] GB50026—2007 工程测量规范[S]. 2008. (GB50026—2007 Code for engineering surveying[S]. 2008. (in Chinese))
- [15] GB50299—1999 地下铁道工程施工及验收规范[S]. 1999. (GB50299—1999 Code for construction and acceptance of metro engineering[S]. 1999. (in Chinese))
- [16] 欧章煜, 谢百钧. 深开挖邻产保护之探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 509 - 517. (OU Zhang-yi, XIE Bai-gou. Building protection measures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 509 - 517. (in Chinese))