

# 深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及 控制措施研究

王 翠<sup>1</sup>, 闫澍旺<sup>1</sup>, 张启斌<sup>2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300201)

**摘要:** 以天津地铁二号线红星路站工程为依托, 采用弹塑性有限差分方法, 构建模拟基坑开挖过程的数值模型, 通过将土体、桥桩及地连墙变形的计算结果与实测数据进行对比分析, 验证该数值模型的可靠性, 基于该数值模型, 研究深基坑开挖对邻近桥桩的作用机制, 分析基坑围护结构刚度、钢支撑刚度和土体强度对控制土体变形的作用, 提出控制深基坑开挖对邻近桥桩影响的 3 种行之有效的工程措施。

**关键词:** 土力学; 深基坑开挖; 周围构筑物; 控制措施; 有限差分法

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2010)增 1-2994-07

## STUDY OF INFLUENCE OF DEEP PIT EXCAVATION ON ADJACENT BRIDGE FOUNDATION PILES

WANG Cui<sup>1</sup>, YAN Shuwang<sup>1</sup>, ZHANG Qibin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design Institute, Tianjin 300201, China)

**Abstract:** Based on the practical experiences, elastoplastic model is established by adopting finite differential method. Modified through monitoring data, the model is used to simulate the process of excavation and to analyze the mechanism of the influence on deep foundation induced by pit excavation. Furthermore, three effective controlling measures are presented for reducing the influence.

**Key words:** soil mechanics; deep excavation; adjacent pile; controlling measures; finite differential method

## 1 引 言

城市建设的快速发展带动了对地下空间的开发利用, 大规模的地下工程不断出现。在软土地区, 由于地层的软弱复杂, 深基坑开挖势必引起周围土体的位移, 并对基坑周围构筑物产生影响<sup>[1~3]</sup>。如果支护设计不当、施工方法不力, 基坑将产生较大变形, 引起周边土体失稳, 造成房屋变形开裂、地

下管网断裂等严重后果。如 2004 年 4 月 21 日新加坡 Nicoll 高速公路旁地铁基坑坍塌, 造成该高速公路主干道坍塌, 1 人死亡、3 人受伤、3 人失踪<sup>[4]</sup>; 2008 年 11 月 15 日杭州一地铁基坑塌陷, 导致基坑西侧道路塌陷, 并已经造成 17 人死亡、4 人失踪等。

国内外岩土工程界的专家学者就深基坑工程维护结构的变形与内力及其对邻近设施及建筑物的影响问题开展了研究。张鸿儒等<sup>[5]</sup>研究了深开挖引起周围地层位移对地下工程设施的影响; 李大勇等<sup>[6]</sup>

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-05-22

基金项目: 天津市科技创新专项资金资助(07FDZDSF02100-03)

作者简介: 王 翠(1979-), 女, 博士, 2009 年于天津大学岩土工程专业获博士学位, 主要从事岩土工程设计及仿真分析理论及应用方面的研究工作。E-mail: wangcui\_tju@126.com

研究了深基坑工程对地下管线的影响; Y. L. Mo 和 J. M. Wang<sup>[7]</sup>研究了在地震作用下, 正在开挖的基坑对近邻建筑物变形的影响; S. J. Boone 等<sup>[8]</sup>研究了基坑开挖对邻近建筑物的影响。上述研究主要探讨了基坑开挖对地上建筑物、浅基础结构和地下管网的影响, 对桥桩等深基础结构影响的研究较少。

本文依托天津市地铁二号线红星路车站工程, 采用弹塑性有限差分方法, 构建了模拟基坑开挖过程的数值模型, 基于该数值模型, 研究了深基坑开挖对邻近桥桩的作用机制, 提出了切实可行的控制深基坑开挖对邻近桥桩影响的工程措施。

2 实际工程模拟分析

2.1 工程概况

天津地铁二号线红星路车站工程, 车站为地下双层岛式结构, 站台宽度 10 m, 车站长度 230 m, 标准段宽度 17.3 m, 站区范围挖深 15.5~15.6 m, 拟采用地下连续墙维护结构, 墙厚 800 mm, 标准段墙长 28 m, 盾构井墙长 31.5 m。标准段采用四道支撑, 端头井处采用五道支撑, 横撑采用圆柱型、中空的 $\phi 609$  mm 钢管, 基坑开挖采用明挖法施工。车站东南侧有一座立交桥, 该立交桥匝道为 5×25 m 预应力混凝土连续箱梁, 采用满堂支架施工, 立交桥桥桩距离地铁基坑最近大约为 25 m。全桥共分 52 个单元, 53 个节点, 设计荷载为城 - A, 使用年限为 50 a。该工程基坑断面如图 1 所示。

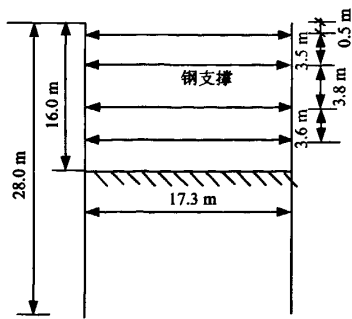


图 1 基坑断面图  
Fig.1 Elevation of foundation pit

该基坑位于天津市闹市区, 一旦维护结构变形过大, 将会引起基坑外侧土体过度位移, 进而在桥桩内产生附加应力及沉降, 降低其承载力, 威胁立交桥的正常使用。目前基坑工程仍采用半理论半经验的设计方法<sup>[9]</sup>, 基于基坑开挖的最终状态, 采用

极限平衡的分析方法, 验算基坑周围土体在所设计的支护条件下的稳定性, 不能全面反映实际工程的各种复杂变化。因此, 采用三维弹塑性有限差分法对该基坑的施工过程进行了模拟分析<sup>[10]</sup>, 以保证施工不同阶段基坑本身及周围构筑物的安全。

2.2 有限差分法仿真分析

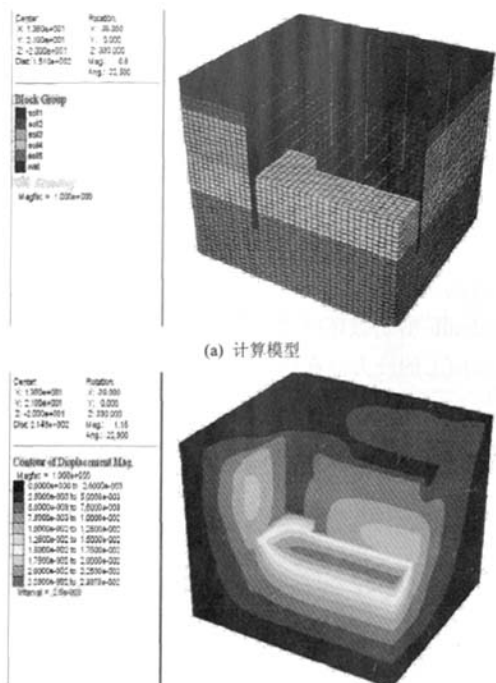
计算模型中, 选用 Mohr-Coulomb 模型模拟土体的基本物理特性和力学性能, 模型服从 Mohr-Coulomb 剪切破坏准则, 并带有拉力截断效应, 其屈服面上的应力点在剪切破坏时受非关联的流动法则控制, 而拉伸破坏时则受相关联的流动法则控制; 地连墙和桥桩采用实体单元模拟; 钢支撑采用梁单元模拟。在建模的过程中, 由于地连墙和土体刚度差别较大, 并且具有不透水性, 在地连墙和土体的接触部分建立接触单元, 模拟实际的接触效果。由于基坑工程的对称性, 建立的模型为实际结构的 1/4, 在对称面上设置了对称边界条件。此外, 模型采用流体和土体的耦合分析方法模拟基坑开挖中的降水过程, 整个模拟过程包含静力学和渗流 2 个计算模式。在渗流计算时, 将模型底部设为不透水边界, 模型 2 个对称面及 2 个竖直边界设置成仅允许水平向渗流。在整个计算过程采用的土的物理力学性质指标见表 1。

表 1 计算中土的物理力学性质指标  
Table 1 Physico-mechanical parameters of soils in calculation

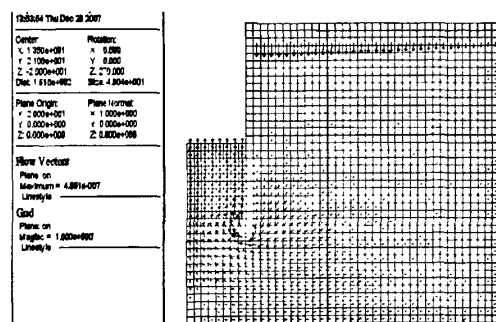
| 土性    | 厚度<br>/m | 天然容重<br>$\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 杨氏<br>模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松<br>比<br>$\nu$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi(^{\circ})$ | 渗透系数<br>$k$<br>( $10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) |
|-------|----------|---|----------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| 杂填土   | 3        | 17.5  | 8                          | 0.34             | 20.0                  | 5.0                         | 1.62   |
| 淤泥质黏土 | 3        | 17.2  | 4                          | 0.35             | 10.0                  | 4.0                         | 0.21   |
| 粉质黏土  | 10       | 19.6  | 15                         | 0.33             | 17.3                  | 20.3                        | 0.95   |
| 粉土    | 8        | 20.1  | 35                         | 0.30             | 10.0                  | 28.0                        | 5.18   |
| 粉质黏土  | 16       | 20.2  | 60                         | 0.33             | 22.8                  | 24.4                        | 0.45   |

采用以下步骤模拟基坑的施工过程: 第一步安装地连墙, 第二步开挖第一层土并加第一道支撑, 第三步开挖第二层土并加第二道支撑, 第四步开挖第三层土并加第三道支撑, 第五步开挖第四层土并加第四道支撑, 第六步为挖最后一层土。每一步计算过程中同时考虑了地下水位的变化, 即基坑的降水过程。图 2 为最后一步仿真分析模型及结果。

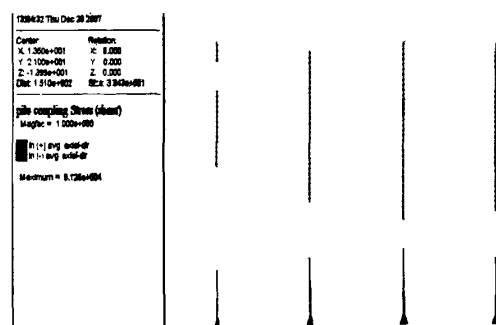
根据计算机仿真分析结果, 基坑及基坑周围构筑物在基坑开挖过程中均处于安全状态, 在基坑支护结构有效的前提下, 基坑工程对邻近桥桩的影响



(b) 土体总位移变化图(单位: mm)



(c) 土体中渗流情况矢量图



(d) 桥桩与土体摩擦力分布图

图2 最后一步仿真分析模型及结果

**Fig.2 Model and analysis results for the sixth stage**

主要体现在引起桥桩的竖向变形上, 水平向的变形几乎为 0。基坑开挖引起的附近的立交桥桥桩沉降变形小于 1 mm。由此可见, 该基坑支护设计方案比

较合理, 基坑开挖对其邻近桥桩的影响可以忽略。

### 2.3 工程实测数据分析

施工过程中,对基坑中部的断面(Q5)和东段断面(Q10)埋设测斜管,并在相应的断面上布置地面沉降观测点,进行重点监控。基坑测点布置如图 3 所示。

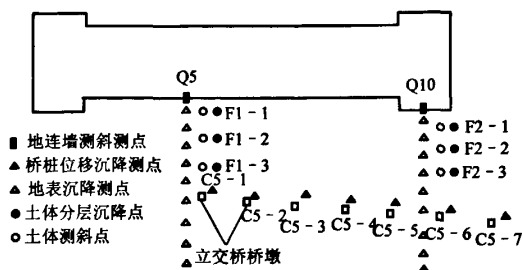


图 3 基坑测点布置图

**Fig.3 Monitoring point layout plan of foundation pit**

由施工监测数据得出, 基坑开挖引起了维护结构和土体的位移, Q10 处墙体最大水平位移为 31.58 mm(深度 15.5 m 处), Q5 处墙体最大水平位移为 24.33 mm(深度 5.0 m 处); 基坑周围土体最大沉降量为 15 mm, 最大沉降位置为地下连续墙外 5 m 处; 土体的分层沉降监测结果表明, 土层沉降值随深度的增加而减小, 并随着到基坑距离的增大呈减小, 在达到 1 倍基坑开挖深度时分层沉降值为 0; 基坑附近的桥桩沉降变形值很小, 沉降大多为 0~1.2 mm。以上实测结果表明, 该基坑及基坑周围的构筑物在施工过程中均处在安全情况下, 且基坑开挖对桥梁桩基础的影响很小。

图4给出了C5-1桥桩在不同工况下的沉降,图5给出了开挖结束后Q5断面(标准段)外侧地表沉降,图6给出了Q5断面的地连墙水平位移。从图4~6可以看出,计算得到的基坑围护结构及基坑周围土体的变形情况基本与实测情况吻合,说明有限差分模型能够较好的模拟工程施工的实际过程,计算结果真实可靠。

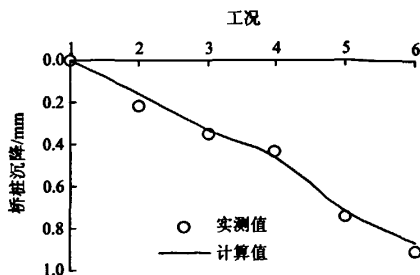


图 4 C5-1 桥桩在不同工况下的沉降

**Fig.4 Settlements of pile No. C5 - 1 in different stages**

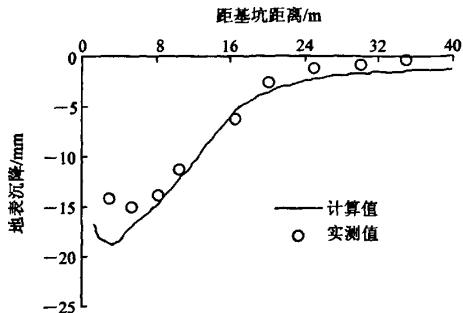


图 5 开挖结束后 Q5 断面(标准段)外侧地表沉降  
Fig.5 Ground settlement at section Q5 after excavation

3 基坑开挖对桥桩影响机制分析

由实测结果和有限差分法模拟结果均可看出, 基坑的开挖使邻近土体的应力场发生了改变, 进而对桥桩产生了一定程度的影响。为了进一步研究基坑开挖引起的周围土体变形对附近桥墩产生影响的机制, 利用有限差分数值模型进行了仿真分析。

3.1 桩身负摩擦(附加轴力)

随着基坑开挖深度的增加, 桥桩周围土体产生了沉降, 土体与桥桩之间产生了负摩擦, 并在桥桩中产生附加轴力, 负摩擦力的最大值和附加轴力的最大值均与基坑外桩同土体最大沉降呈线性关系(见图 7, 8)。因此, 在基坑开挖过程中, 桥桩承载力除损失了在沉降土体范围内的侧摩阻力, 也因附加轴力的存在有所降低。

3.2 不平衡水平力

同时, 随着桩周土体水平位移的不断发展, 桥桩受到的附加侧压力不断增大(见图 9), 这种附加应力也会造成作用在桩上的不平衡水平力。此种不平衡水平力除增大桥桩的水平应力外, 还可能引起桥桩的水平位移或变形, 进而降低桥桩的垂直度, 产生偏心矩, 降低桥桩的承载力。桩身的最大不平衡水平力与基坑外桩周土体最大水平位移呈近似线性关系。

3.3 附加沉降

如若桥桩周围土体发生沉降, 桥桩将会产生附加沉降, 为了研究距基坑不同距离处的桥桩所受到的影响, 将桩的位置改变, 对桩与基坑距离为 5, 10, 15, 20, 25, 30 m 的不同情况进行了计算, 所得计算结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 桥桩的沉降随着桥桩到基坑的距离的增大而减小, 这与靠近基坑处的土体变形较大而远离基坑处的土体变形较小的规律相一致。在基坑支护体系有效的前提下, 在距离基坑的距离大于 1.25 倍基坑深度时, 桥桩的变形小于 1 mm, 可认为基坑开挖对桥桩基本无影响。

4 控制措施分析

由以上分析可以看出, 在到基坑距离一定时, 桥桩的附加内力与基坑外土体的沉降呈线性关系, 因此为保证基坑工程本身和其邻近桥桩的安全, 需要严格控制基坑外地下水下降幅度和基坑外土体位

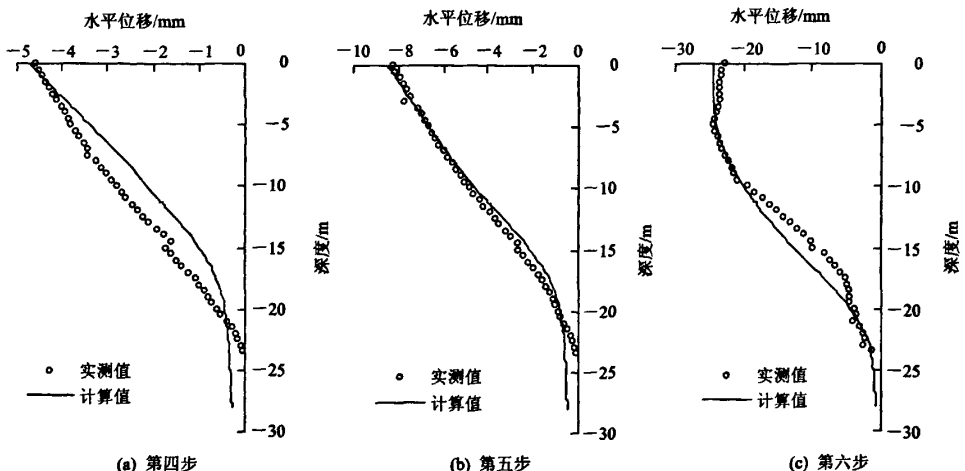


图 6 Q5 断面地连墙水平位移  
Fig.6 Horizontal displacements of diaphragm wall at section Q5

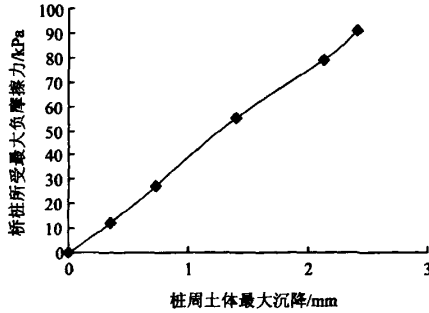


图7 桥桩所受最大负摩阻力

Fig.7 Ground settlement vs. negative skin friction on pile

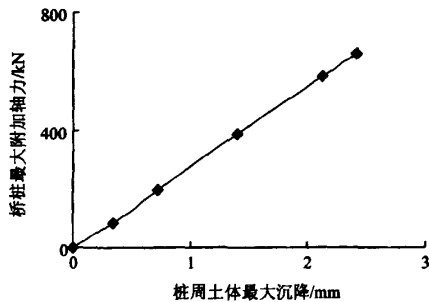


图8 桥桩所受最大附加轴力

Fig.8 Ground settlement vs. additional axial force on pile

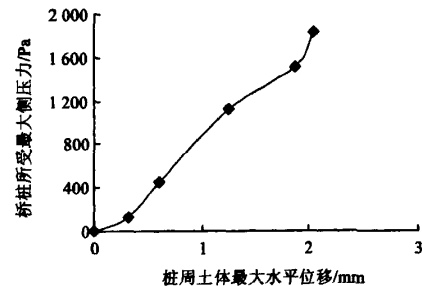


图9 桥桩所受的最大附加侧压力

Fig.9 Horizontal ground movement vs. lateral pressure on pile

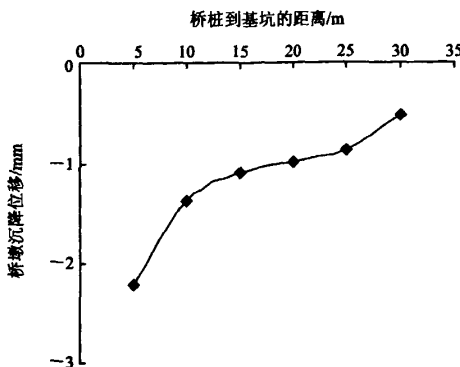
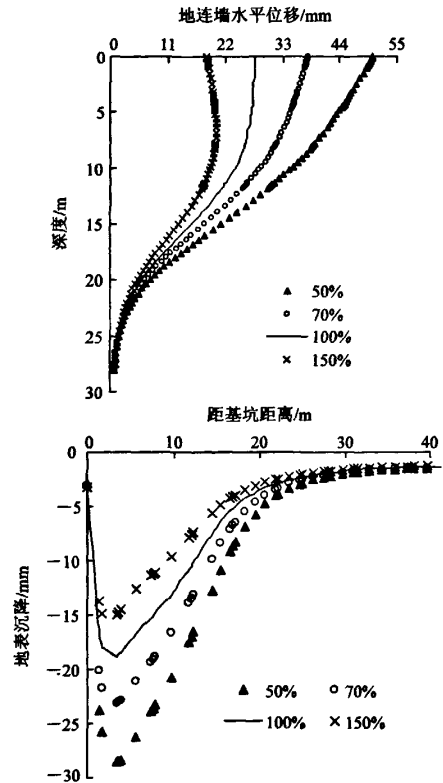


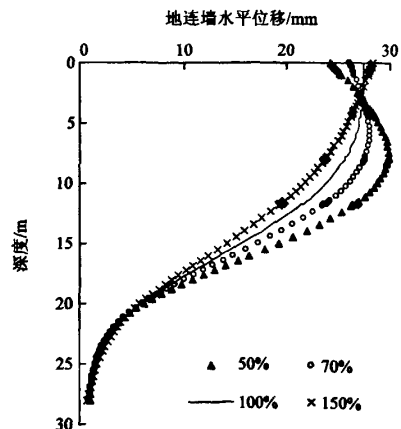
图10 桥桩到基坑的距离不同时桥墩沉降位移图

Fig.10 Settlement of foundation piles at different locations

移。假设基坑围护墙间接缝严密,无渗漏,基坑施工过程中的降水不影响周围地下水位的变化,根据地层损失法,基坑周围土体的位移是完全由地下连续墙的变形引起的,控制地下连续墙的变形可采取3种措施:改变钢支撑的刚度、改变围护墙体的刚度及增加土体的强度(土体加固)。在有限差分法的模型中,通过分别调整钢支撑、围护墙体和土体的参数,可模拟不同设计方案下基坑围护结构和土体的位移情况,进而研究不同工程措施对减小基坑及周围土体位移的作用效果。图11为不同控制措施



(a) 不同支撑刚度



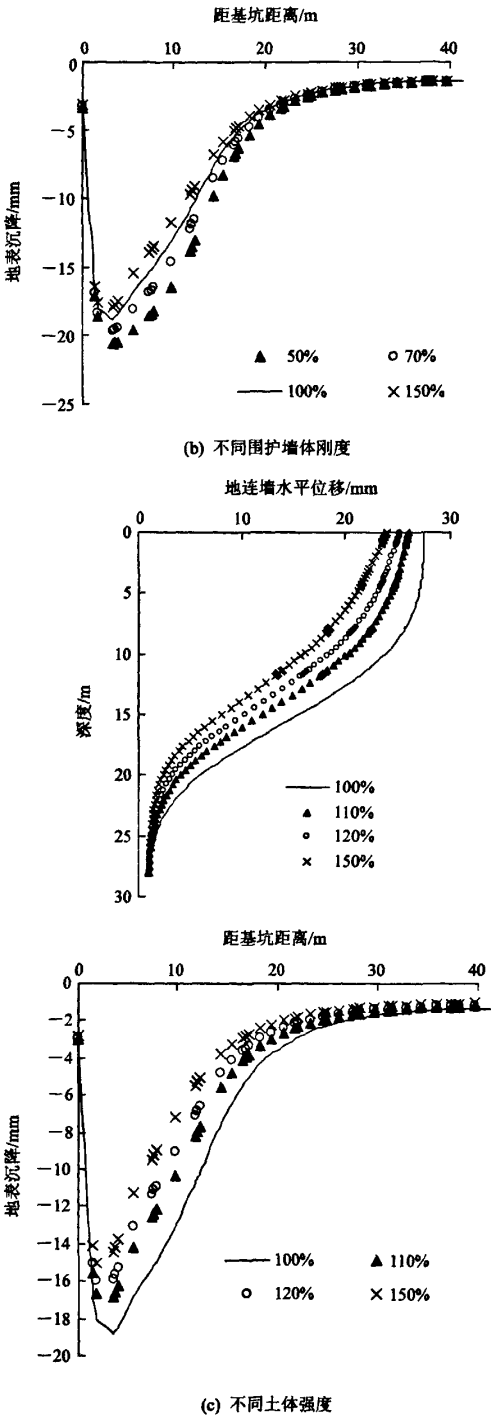


图 11 地连墙水平位移与墙后地表沉降关系  
Fig.11 Horizontal displacements of diaphragm wall and ground settlement for soil improvement effect

时地连墙水平位移与墙后地表沉降有限元分析结果。表 2~4 给出了分析结果汇总情况。

表 2 不同支撑刚度分析结果汇总

Table 2 Analytical results for different strutting schemes

| 钢支撑的刚度/% | 最大墙体水平位移/mm | 最大坑外地表沉降/mm |
|----------|-------------|-------------|
| 50       | 50.41       | 28.52       |
| 60       | 43.18       | 25.45       |
| 70       | 37.86       | 23.18       |
| 80       | 33.66       | 21.40       |
| 90       | 30.27       | 20.00       |
| 100      | 27.46       | 18.85       |
| 110      | 25.28       | 17.83       |
| 120      | 23.64       | 16.99       |
| 130      | 22.31       | 16.23       |
| 140      | 21.18       | —15.55      |
| 150      | 20.23       | —14.97      |

表 3 不同围护墙体刚度分析结果汇总

Table 3 Analytical results under different wall rigidities

| 围护墙体的刚度/% | 最大墙体水平位移/mm | 最大坑外地表沉降/mm |
|-----------|-------------|-------------|
| 50        | 29.80       | 20.58       |
| 60        | 28.70       | 20.08       |
| 70        | 27.98       | 19.67       |
| 80        | 27.57       | 19.36       |
| 90        | 27.35       | 19.09       |
| 100       | 27.46       | 18.85       |
| 110       | 27.72       | 18.63       |
| 120       | 27.92       | 18.44       |
| 130       | 28.07       | 18.27       |
| 140       | 28.18       | 18.10       |
| 150       | 28.26       | 17.95       |

表 4 不同土体强度分析结果汇总

Table 4 Analytical results for soil improvement effect

| 土体的强度/% | 最大墙体水平位移/mm | 最大坑外地表沉降/mm |
|---------|-------------|-------------|
| 100     | 27.46       | —18.85      |
| 110     | 25.96       | —16.81      |
| 120     | 25.20       | —16.02      |
| 130     | 24.64       | —15.59      |
| 140     | 24.23       | —15.26      |
| 150     | 23.92       | —15.02      |

从以上计算结果可以看出，随着墙体刚度、支撑刚度和土体强度的提高，地连墙的水平位移和墙后土体的沉降有所减小。由此可见，以上 3 种方法均可减小深基坑开挖对邻近深基础的影响。

## 5 结 论

本文以天津地铁二号线红星路车站工程为依托,采用弹塑性有限差分法,模拟分析了基坑的施工过程,研究了基坑开挖对邻近桥桩造成的影响。得出如下结论:

(1) 通过将土体及地连墙变形的计算结果与实测数据进行对比分析,验证了基于有限差分法建立的数值模型的可靠性,计算结果可以真实的反映基坑工程的实际情况。

(2) 研究了深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制,研究结果表明,深基坑开挖对邻近桥桩的影响主要体现在以下3个方面:①深基坑的开挖使邻近的土体产生水平向变形,可能引起作用在桩上的不平衡水平力;②由于基坑开挖导致周围土体沉降,引起桩身负摩擦,从而加大了桩身应力;③基坑开挖导致的周围土体的变形可能引起邻近桥墩的附加沉降。

(3) 计算了桥桩距基坑不同距离时,基坑施工引起的桥桩沉降量。分析结果表明,当桥桩距基坑的距离大于1.25倍的基坑深度时,桥桩的沉降小于1 mm,可以认为基坑开挖对桥桩基本无影响。

(4) 分析了钢支撑刚度、围护墙体刚度和土体强度对减小基坑及周围土体位移的作用效果,有限差分法模拟结果表明,以上3种方法均为行之有效的工程措施。

## 参考文献(References):

- [1] 刘 润, 闫 玥, 闫谢旺. 支撑位置对基坑整体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 174 - 178. (LIU Run, YAN Yue, YAN Shuwang. Stability analysis of foundation pit with change of brace[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 174 - 178. (in Chinese))
- [2] 何世秀, 吴刚刚, 朱志政. 深基坑支护设计影响因素的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 478 - 5 484. (HE Shixiu, WU Ganggang, ZHU Zhizheng. Finite element analysis of influence factors for timbering design of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 478 - 5 484. (in Chinese))
- [3] 刘登攀, 刘国彬. 邻近建筑物对某基坑变形影响的分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1): 28 - 31, 45. (LIU Dengpan, LIU Guobin. Analysis of the adjacent building influence on foundation pit deformation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(1): 28 - 31, 45. (in Chinese))
- [4] DAVIES R. Factors in the Nicoll Highway collapse[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2007, (2): 31 - 34.
- [5] 张鸿儒, 侯学渊, 夏明耀. 深开挖对周围工程设施的影响预测[J]. 北方交通大学学报, 1996, 20(1): 205 - 209. (ZHANG Hongru, HOU Xueyuan, XIA Mingyao. Prediction to the influence of deep excavation on surrounding facilities[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1996, 20(1): 205 - 209. (in Chinese))
- [6] 李大勇, 龚晓南, 张士乔. 深基坑工程中地下管线位移影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 1 083 - 1 087. (LI Dayong, GONG Xiaonan, ZHANG Tuqiao. Factors analysis of displacements of underground pipeline affected by deep excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 1 083 - 1 087. (in Chinese))
- [7] MO Y L, WANG J M. Seismic response of reinforced concrete buildings close to deep excavation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997, 145(1 - 2): 117 - 134.
- [8] BOONE S J, WESTLAND J, NUSINK R. Comparative evaluation of building responses to an adjacent braced excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2): 210 - 223.
- [9] 赵其华, 彭社琴. 岩土支挡与锚固工程[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008. (ZHAO Qihua, PENG Sheqin. Retaining and anchor engineering for rock and soil mass[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2008. (in Chinese))
- [10] 廖红建, 王铁行. 岩土工程数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. (LIAO Hongjian, WANG Tiexing. Numerical analysis for geotechnical engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese))