

基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析

郑刚¹, 颜志雄¹, 雷华阳¹, 雷扬²

(1. 天津大学土木工程系, 天津 300072; 2. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘要: 基坑开挖引起的土体位移对临近建筑物桩基的影响越来越得到工程界的重视。对某基坑工程开挖进行的实测表明, 基坑开挖可对临近桩基产生显著影响, 并发现当排桩桩间距较大时, 其后止水帷幕的水平位移可能大于排桩水平位移。以该实测工程为算例, 采用三维有限元法进行了计算并与实测进行了对比。分析了桩基和基坑间距、桩基刚度、桩顶竖向荷载和桩基顶部约束条件等对桩基附加弯矩、位移的影响, 并进行了评价分析, 以期有关的设计和施工提供参考。

关键词: 基坑开挖; 实测; 临近桩基; 三维有限元分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)05-0638-06

作者简介: 郑刚(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与研究。E-mail: zhengzige2004@yahoo.com.cn。

Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation

ZHENG Gang¹, YAN Zhi-xiong¹, LEI Hua-yang¹, LEI Yang²

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of Foundation Engineering, CABR, Beijing 100013, China)

Abstract: The pile response to soil movements induced by adjacent excavation has attracted more and more attention of engineers. A field measurement was performed and measurement data shown the deep excavation could produce significant effect on adjacent piles. It was shown that the lateral displacement of DMM wall behind the contiguous retaining piles could be larger than that of contiguous retaining piles with large pile spacing. Great attention should be paid to this phenomenon. Based on the field observation, the influences of various parameters on pile response due to adjacent excavation were studied with three-dimensional finite element model taking into account the distances between diaphragm walls and piles, pile rigidity, vertical load on pile-head and constraint condition of pile-head. Some suggestions for the design and construction were given.

Key words: excavation; field observation; adjacent pile; three dimensional finite element analysis

0 前言

随着城市建筑基坑向大、深方向发展, 临近建筑物、立交桥等的桩基础可能因基坑开挖引起土体位移的作用而产生不利影响: 一方面, 土体沉降会对桩产生负摩阻力, 引起桩下沉, 尤其是桩基的不均匀下沉使上部结构产生不均匀沉降; 另一方面, 土体的水平位移导致桩身产生附加弯矩、应力和位移, 严重时将引起临近桩基过量变形甚至破坏, 进而引起桩所支撑的建筑物或构筑物失稳或破坏^[1]。因此, 研究基坑开挖对临近桩基的影响具有重要的现实意义。

本文对天津市某深基坑开挖进行了实测, 并采用数值分析方法进行了对比分析。然后以该基坑工程为算例, 讨论了桩基和基坑间距、桩基刚度、桩顶竖向荷载和桩基顶部约束条件等对桩基附加弯矩、位移的

影响, 为相关工程的设计和施工提供参考。

1 工程概况

1.1 场地状况

仁爱濠景庄园地处天津市西青经济开发区凌庄子内, 场地东侧将建一栋地上 14 层, 地下 1 层的住宅楼, 紧邻场地一侧有一排三层砖混别墅。该场地埋深 50.50 m 深度范围内, 地基土按成因年代可分为 8 层, 按力学性质可进一步分为 14 个亚层, 主要由粉质黏土、砂土、粉土组成。地下水属潜水类型, 主要由大气降水补给, 静止水位埋深 0.25~1.50 m, 常年水位变幅在 0.50~1.00 m 左右。

1.2 基坑工程概况

基坑平面为 118.1 m×26.7 m, 开挖深度 9.1 m。围护结构以 $\phi 800@1200$ mm 单排钢筋混凝土灌注桩 (桩长 17.6 m) 加帽梁体系作为挡土结构, $\phi 700@500$ mm 双排水泥搅拌桩 (桩长 16.1 m) 作为止水帷幕, 开挖至 1.5 m 深度处设置 700 mm×900 mm 的混凝土水平支撑, 水平方向间距为 13 m。基坑南侧 4m 外有连排砖混结构别墅 (三层), 为保证建筑物安全, 在南侧除设置 $\phi 800@1200$ mm 连排灌注桩 (桩长 17.6 m) 作为围护结构外, 还利用距离围护桩 2.4 m 处的一排桩距 3.6 m 的 $\phi 800$ mm 裙房灌注桩桩基, 并以连系梁将两排桩的桩顶帽梁连接, 试图使该排工程桩也兼作围护桩 (形成类似双排桩结构), 以减小土层水平位移。

由图 1 (b) 可清楚看到, 距建筑物较近且标高较高的为后排工程桩帽梁, 与前排围护桩通过斜梁连接。水平支撑与前排围护桩帽梁连接。

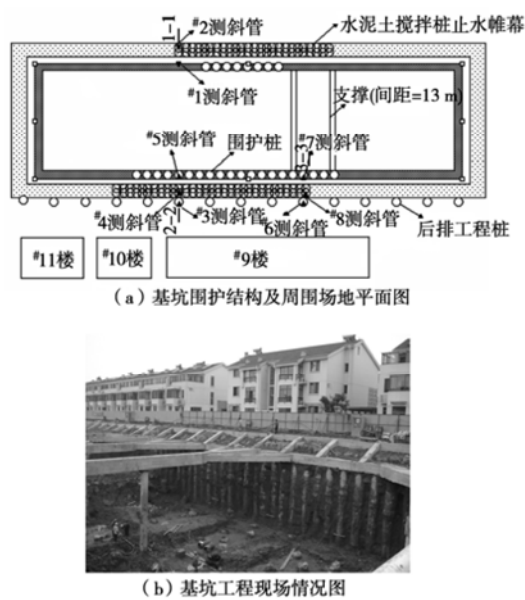


图 1 基坑工程示意图

Fig. 1 The profile of excavation

1.3 施工监测

在三个基坑横断面位置布置测斜管: 其中, 断面 1-1 位于基坑北侧, 基坑围护桩外未布置后排桩, 因此只在围护桩和水泥土搅拌桩止水帷幕内各埋置一个测斜管; 断面 2-2, 3-3 位于基坑南侧, 断面上依次设有基坑围护桩、水泥土搅拌桩止水帷幕和后排工程桩, 在同一断面的基坑围护桩、水泥土搅拌桩止水帷幕和后排工程桩内布置测斜管, 以监测围护桩、搅拌桩止水帷幕和工程桩的水平向变形。

周围建筑物的沉降监测也是工程监测的重点, 在临近基坑的#9, #10 和#11 建筑物的外墙角、外窗边角等部位埋设了多处沉降监测点, 对沉降值进行观测^[2]。本文研究重点未涉及基坑开挖对临近建筑物的影响。

1.4 监测结果及数据整理

现场监测历时两个月。监测剖面 3-3 由于#6, #7 测斜管失效, 仅测得止水帷幕#8 的水平位移, 2-2 监测剖面数据正常。测斜管测得的水平位移值见图 2。

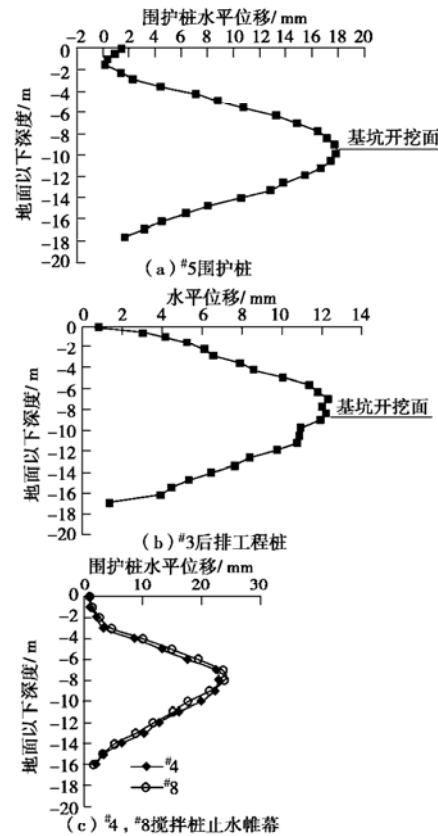


图 2 水平位移图

Fig. 2 Lateral displacement

由实测结果可看出, 后排工程桩水平位移曲线线形与围护桩、止水帷幕的水平位移曲线线形相似, 说明基坑开挖造成坑外土体侧移, 进而会引起临近桩体发生侧移, 这也表明: 考虑基坑开挖对临近桩体的影响是必要的。

此外, 从实测结果看, 止水帷幕的最大水平位移达到了 23 mm, 而围护结构的水平位移只有 18 mm, 止水帷幕的水平位移大于围护结构的水平位移近 28%。究其原因, 主要与围护体系是排桩结构有关。由于围护桩间距较大, 止水帷幕与前排桩之间土体在面向坑内一侧的前排围护桩的桩与桩间土体处于临空状态, 来自止水帷幕传递的水平土压力只能由止水帷幕与围护桩之间不临空的土体传递, 形成了土拱效应。由于承担荷载的土拱 (主要是拱脚) 只占止水帷幕与围护桩之间土体的少部分, 使得土拱部位土体产生较大压缩, 导致止水帷幕进一步侧移, 从而出现了止水帷幕水平位移大于围护结构水平位移的情况。

一般基坑围护结构监测仅注意围护桩的水平位

移,实际上,由于以上原因,围护桩的水平位移可能小于其后的止水帷幕的水平位移。这使得根据围护桩水平位移来估算坑后地面沉降的经验产生较大误差。可以想象,随着桩间距的增大,这个现象将更显著。天津地区常常采用 $\phi 600@1000\text{ mm}$, $\phi 700@1000\text{ mm}$ 等排桩布置方式,通过加大桩间距来降低工程造价而围护桩的最大水平位移并不显著增大。当临近有对沉降敏感的建筑物时,上述止水帷幕的水平位移大于围护结构的水平位移的现象必须引起重视。由图 2(c)可见,由于止水帷幕的抗弯能力很弱,过大的不均匀侧移会使之受弯开裂,从而丧失止水的功能,危及基坑工程,实际工程中需谨慎处理。

2 三维有限元模拟

2.1 有限元建模

该基坑为规则矩形,后排工程桩桩距均匀,为 3.6 m,因此可按局部空间问题考虑:依对称性取 1 倍工程桩间距 s 作为基坑纵向计算域,纵向边界铰支约束;横向计算宽度,基坑部分 B_1 取开挖宽度的一半,坑外土体部分 B_2 按基坑开挖深度的 3 倍取为 30 m,横向边界铰支约束;竖向土体计算深度按基坑开挖深度的 3 倍取为 31 m,底部边界竖向铰支约束。见图 3。

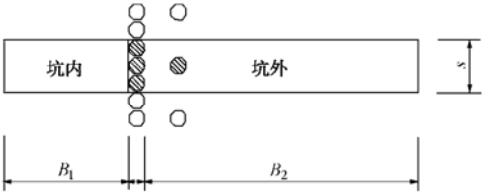


图 3 局部三维模型简图
Fig. 3 Three dimensional model

为便于计算,把围护桩按抗弯刚度等效的原则等效为连续墙体,围护墙与后排工程桩之间设置的水泥搅拌桩止水帷幕,按抗弯刚度等效的原则等效为连续墙体,水平支撑刚度根据支撑水平方向的间距(13 m)按每延米换算支撑刚度,然后根据有限元节点的间距,等效为每个节点上的支撑。模型考虑了坑底工程桩的作用,按对称性取 5 根,为了方便建模,将圆桩换算为方桩,边长 $B=0.7\text{ m}$,有限元模型示意图见图 4。

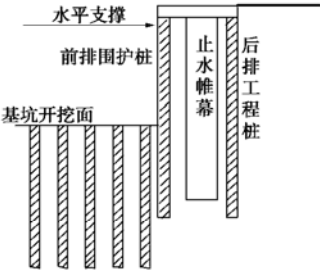


图 4 有限元计算模型
Fig. 4 Finite element model

计算中,混凝土桩、搅拌桩止水帷幕和支护墙采用线弹性模型,混凝土桩、连系梁、坑底工程桩和围护墙的弹性模量均为 $2.8\times 10^7\text{ kPa}$,混凝土支撑的弹性模量为 $3.0\times 10^7\text{ kPa}$,泊松比均取 0.20,搅拌桩止水帷幕的弹性模量为 $1.5\times 10^5\text{ kPa}$,泊松比取 0.40。土体采用以莫尔-库伦屈服条件为破坏准则的理想弹塑性模型,土层计算参数取自工程勘察报告,见表 1。

表 1 土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layer

土层	H/m	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	E_s/MPa
黏土	2.1	19.0	22.0	21.0	5.6
粉土	2.0	19.3	9.0	25.5	11.0
粉质黏土	8.2	18.9	18.0	24.3	5.7
粉质黏土	1.7	20.0	15.3	28.1	6.2
粉质黏土	4.9	19.5	17.6	28.6	6.3
粉质黏土	3.7	19.2	21.0	26.1	6.6
粉土	1.0	19.6	8.5	32.0	14.4
粉质黏土	1.6	19.4	26.5	20.8	5.8
粉土、粉砂	3.7	20.9	10.0	35.6	13.0
粉土、粉砂	2.1	19.8	11.2	37.2	17.9

2.2 计算结果与实测结果比较分析

围护结构、后排工程桩及止水帷幕水平位移计算值与实测值随深度变化的比较如图 5 所示。

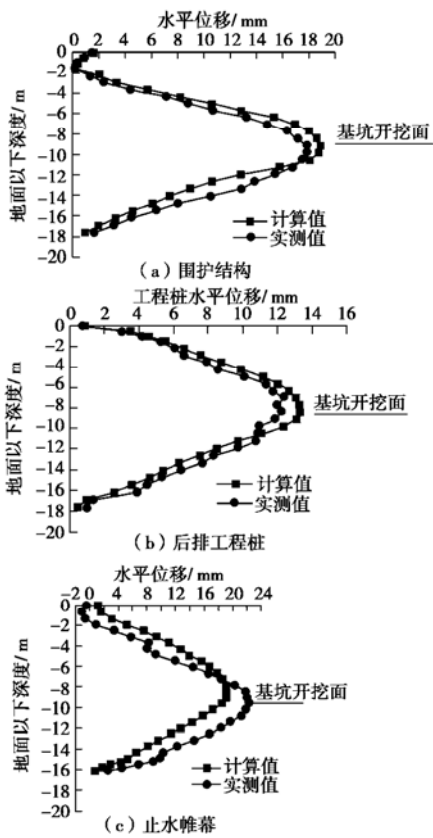


图 5 水平位移比较图

Fig. 5 Lateral displacement

由计算结果可看出,围护结构、后排工程桩和止

水帷幕的水平位移最大实测值均发生在坑底开挖面附近, 计算结果很好地反映了这一现象。图 5(c) 显示, 止水帷幕水平位移的实测值大于计算值, 这是计算中把基坑围护结构的连排灌注桩转换为地下连续墙结构, 无法考虑前文所述桩间净空存在导致止水帷幕水平位移加大所致。如上所述, 实际上排桩围护结构条件下, 承受和传递止水帷幕传来的水平荷载的是土拱部位土体(图 6), 桩间临空土体不承受荷载。而对于将排桩经简单换算后简化为墙体, 承受和传递止水帷幕所传递荷载的是止水帷幕与围护结构间所有土体, 从而出现了计算值小于实测值的情况。为了尽量在有限元分析中模拟实际工程情况, 考虑实际工程中围护桩间临空土体的应力松弛问题, 经反复试算, 可对围护结构与止水帷幕间土体的弹性模量进行简化修正:

$$E' = \frac{d}{d+s} E_0, \quad (1)$$

式中, E' 表示修正后的土体弹性模量, E_0 表示修正前的土体弹性模量, d 为实际工程中灌注桩桩径, s 为实际工程中灌注桩桩间距。

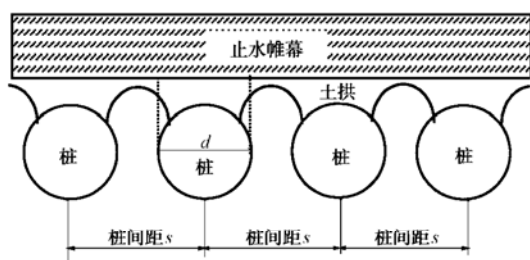


图 6 连排灌注桩与止水帷幕间土拱模型示意图

Fig. 6 Model for soil arch between bored piles and water-tight wall

考虑到围护桩与止水帷幕的距离一般较小, 可近似将图 6 中土拱的面积与桩等宽的土体, 桩间净空范围内的土认为由于存在临空面而不予考虑。采用修正模量后的计算结果如图 7 所示, 可以看到, 止水帷幕水平位移的计算值与实测值基本吻合, 且大于围护桩的水平位移。这不仅表明前述土体模量修正是可行的, 而且说明当围护桩桩距较大时, 应充分考虑桩间土临空面对桩后土体位移的影响。

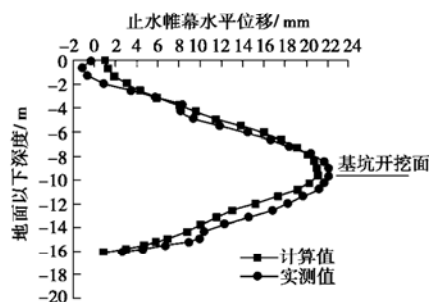


图 7 土体弹性模量修正后止水帷幕水平位移比较图

Fig. 7 Lateral displacement of water-tight wall

3 不同工况下三维有限元模拟分析

为进一步了解基坑开挖对临近桩基的影响, 以上述有限元模型为基础, 从数值分析的角度进一步研究桩基和基坑间距、桩基刚度、桩顶竖向荷载(即上部结构传来的荷载)和桩基顶部约束条件(即桩顶承台约束条件)等对桩附加弯矩、位移的影响^[3]。模型中临近桩的桩长、材料参数等不变, 临近桩与围护结构之间没有连系梁作用。

3.1 桩基和基坑不同间距的影响分析

基坑开挖引起的坑周不同距离处土体的侧向变形是不同的, 因此对处在不同距离处邻近桩基的影响也不相同。分别取桩基与基坑边缘间距为 2.4, 3.6, 4.8, 7.2, 9.6, 13.65, 18.2 m 七种情况进行对比分析, 基坑开挖深度、土层参数等条件均与前述基坑工程实例一致。基坑临近桩基的桩身侧移和弯矩变化见图 8, 9。

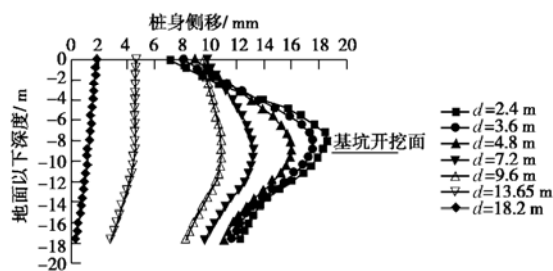


图 8 围护结构与桩基不同距离时桩身位移变化图

Fig. 8 Lateral displacement of piles at different distances from diaphragm wall

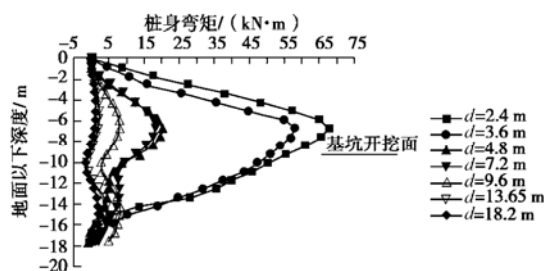


图 9 不同围护结构、桩基距离时桩身弯矩变化图

Fig. 9 Bending moment of piles at different distances from diaphragm wall

从图 8 中可以看出, 随着围护结构与桩基距离的增大, 桩身侧移有明显减小的趋势, 这与坑外土体变形场符合。计算表明, 当围护结构与桩基的距离超过 1 倍基坑开挖深度(基坑开挖深度为 9.1 m)时, 桩基侧移急剧减小, 当二者距离为 1.5 倍开挖深度时(对应间距 $d=13.65$ m), 桩身侧移量仅相当于间距 $d=2.4$ m 时的 25%, 当围护结构与桩基距离为基坑开挖深度的 2 倍时(对应间距 $d=18.2$ m), 桩身侧移已非常小, 可忽略不计。图 9 反映出桩基弯矩变化趋势, 随着距

离增大桩身弯矩逐渐变小, 当距离超过 1 倍基坑开挖深度时, 桩基弯矩仅为间距 $d=2.4\text{ m}$ 时的 10%, 可见, 在距离桩基约 1 倍开挖深度的地方进行基坑开挖对桩基的影响已经很小, 当两者距离超过 2 倍基坑开挖深度后, 基坑开挖对桩基的影响甚微, 施工中可不考虑。

3.2 不同桩基刚度影响分析

由于基坑临近桩基在受到土体位移的作用后, 产生了桩身附加弯矩、应力和位移, 而这种作用的效果又和桩基本身刚度有很大关系^[5]。分别取桩身弹性模量 $3.0 \times 10^5\text{ kPa}$ (相当于水泥土搅拌桩)、 $3.0 \times 10^6\text{ kPa}$ (相当于低标号素混凝土桩)、 $3.0 \times 10^7\text{ kPa}$ (相当于钢筋混凝土桩)、 $3.0 \times 10^8\text{ kPa}$ (相当于钢桩) 四种情况进行对比分析, 基坑开挖深度、土层参数等条件均与前述基坑工程实例一致。基坑临近桩基的桩身侧移和弯矩变化情况如图 10, 11 所示。

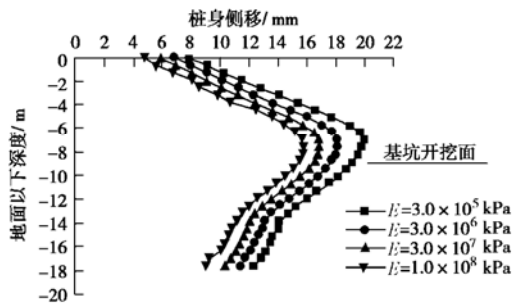


图 10 不同桩基刚度时桩身位移变化图

Fig. 10 Lateral displacement of piles with different rigidities

由桩身侧移和弯矩图看出, 随着桩基刚度的减小, 桩身侧移量逐渐增大, 与此同时, 桩身附加弯矩却逐渐减小, 表现出柔性桩的性状; 而当桩基刚度增大时, 桩身侧移量则相应减小, 桩身附加弯矩随之增加, 表现出刚性桩的性状。总体来说, 桩基的侧移并未随桩身刚度的增大发生显著的变化, 但弯矩变化极为明显。

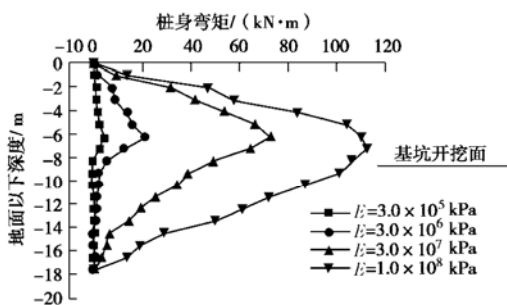


图 11 不同桩基刚度时桩身弯矩变化图

Fig. 11 Bending moment of piles with different rigidities

3.3 桩顶作用不同竖向荷载影响分析

上述讨论均假设基坑临近桩基桩顶没有作用荷载, 实际工程中建筑物桩基础是要承受上部结构传来的荷载的。当桩基顶部作用不同荷载时, 基坑开挖对

桩基的影响可能是不同的。因此分别取桩头荷载为 0, 600, 1200, 2400 kN 进行分析, 基坑开挖深度、土层参数等条件均与前述基坑工程实例一致。基坑邻近桩基的桩身侧移和弯矩变化情况如图 12, 13 所示。

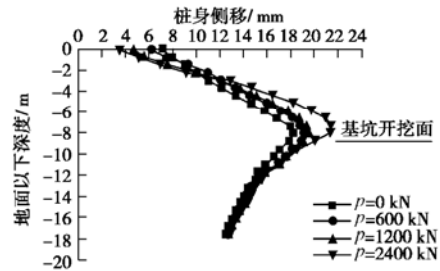


图 12 桩基顶部作用不同荷载时桩基侧移变化图

Fig. 12 Lateral displacement of piles under different vertical loads

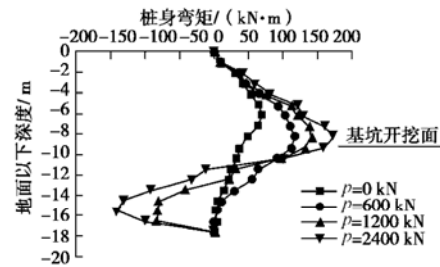


图 13 桩基顶部作用不同荷载时桩基弯矩变化图

Fig. 13 Bending moment of piles due to different loads on pile-head

从图 12, 13 可以看出, 当桩基顶部作用一定荷载时, 桩身的最大侧移值和桩身弯矩值都有变化, 且随着作用荷载的增加而增大。这是因为: 在基坑开挖前, 建筑物桩基可以看作是受轴心荷载的竖向受力结构, 而当基坑开挖后, 基坑外土体的水平位移引起处于其中的桩基发生侧向位移, 当桩基有平面内的侧移时(在本模型中, 桩身中部存在较大侧移), 桩基顶部的荷载相当于由原来的轴心荷载逐渐转变成了偏心荷载, 而且偏心距越来越大, 在偏心荷载的作用下逐渐导致桩身侧移进一步增大。

3.4 不同桩基顶部约束条件影响分析

由于临近建筑物桩基型式不同, 桩基顶部的约束条件也不同, 其所受基坑开挖的影响也有差异。分别取桩基顶部自由(条件 A)、桩基顶部可以转动但不能移动(条件 B)、桩基顶部可以移动但不能转动(条件 C)、桩基顶部完全固接(条件 D)四种情况进行对比分析^[6], 基坑开挖深度、土层参数等条件均与前述基坑工程实例一致。基坑邻近桩基的桩身侧移和弯矩变化情况见图 14, 15。

从图中可以看出, 桩基顶部自由时(条件 A), 桩基顶部侧移值和桩身最大侧移值均较其他几种情况大, 而桩身所受最大附加弯矩的绝对值最小; 当桩基

顶部铰接(条件B)时,桩身中上部出现了较大的弯矩值;当桩基顶部只能移动而不能转动时(条件C),桩身也有较大的侧移值,桩顶部出现较大弯矩值;当桩基顶部被完全约束住后(条件D),顶部位移为零,桩身侧移是其他几种情况中最小的,但桩身弯矩较大而且桩顶弯矩最大。所以,条件C和条件D时桩顶部位是偏于危险的。因此在工程中对开挖基坑临近的建筑物桩基进行监测时,应对桩顶部位进行重点监测。

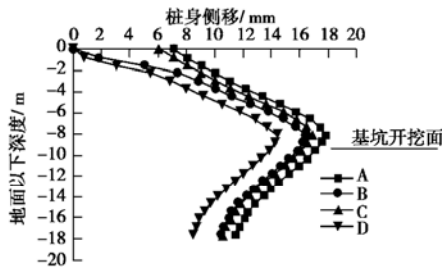


图 14 不同桩基顶部约束条件时桩基侧移变化图

Fig. 14 Lateral displacement of piles with different constraint conditions of pile-head

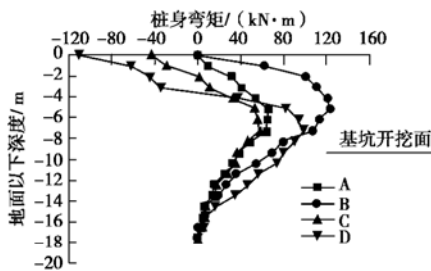


图 15 不同桩基顶部约束条件时桩基弯矩变化图

Fig. 15 Bending moment of piles with different constraint conditions of pile-head

4 结 论

(1) 实测结果表明,对于排桩围护结构,考虑桩间临空土体对桩后土体变形的影响是必要的,尤其对于间距较大的排桩结构,应注意桩间土临空面土体对桩后止水帷幕侧移的影响,防止止水帷幕出现过大侧移而危及工程安全。相应地,提出了考虑围护桩与止水帷幕间土体弹性模量的修正方法。

(2) 桩基距坑距离、桩身抗弯刚度、桩顶荷载(即上部结构传来的荷载)和桩基顶部约束条件(即桩顶承台约束条件)等均对桩基受基坑开挖的影响大小和性状有显著影响。表现为:①随着围护结构与桩基距离的增大,桩身侧移和弯矩均有减小的趋势,当间距大于1倍基坑开挖深度时,基坑开挖对桩基的影响已

经很小,当间距超过2倍基坑开挖深度时,基坑开挖对桩基的影响甚微,施工中可以不考虑。②工程桩桩身刚度的变化对其自身侧移的影响不显著,但其弯矩的影响比较明显,当桩基刚度减小时,桩身附加弯矩随之减小;反之,则随之增大。③随着桩基顶部作用荷载的增大,桩身所受的偏心距也增大,桩身的最大侧移值和弯矩值亦随之增大。对比几种约束条件表明,当桩基顶部只能移动而不能转动和当桩基顶部完全约束时桩基偏于不利,尤其当桩基顶部完全约束时,桩身弯矩较大且在桩顶位置出现最大弯矩。因此,在工程中对开挖基坑临近的建筑物桩基进行监测时,应对桩顶部位进行重点监测。

参考文献:

- [1] 杨敏,朱碧堂. 超载软土地基被动加固控制邻近桩基变形的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1912 - 1918. (YANG Min, ZHU Bi-tang. Effect of passive reinforcement of soil displacement control of piles subjected to adjacent surcharge loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1912 - 1918. (in Chinese))
- [2] 雷阳. 基坑开挖对邻近建筑物影响的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2006. (LEI Yang. Field observation and 3D finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent pile due to excavation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [3] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, China, 1997. (in Chinese))
- [4] 贾海莉,王成华,李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 4(38): 398 - 402. (JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 4(38): 398 - 402. (in Chinese))
- [5] PAN J L, GOH A T C, WONG K S. Three-dimensional analysis of single pile response to lateral soil movements[J]. International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 747 - 758.
- [6] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(6): 670 - 677.