

悬臂围护基坑开挖对邻近双桩基础的 三维数值研究

李琳^{1,2}, 段占宇^{1,2}, 张建新^{1,2}, 董光辉³

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 天津市地下铁道集团有限公司, 天津 300000)

摘要 目的 研究悬臂围护基坑开挖引起地层移动对临近双桩基础的影响. 方法 运用岩土数值计算程序 FLAC^{3D}, 采用修正剑桥模型模拟土体的非线性应力-应变关系, 桩基采用线弹性本构关系, 桩土之间建立接触面, 通过与离心机试验结果的对比表明数值模拟能较准确反映临近桩基的位移和内力, 然后就桩承台、桩到基坑距离、围护墙体刚度及桩顶竖向荷载的影响进行研究. 结果 双桩桩顶自由时的位移、内力等要小于同位置单桩, 双桩带承台时前、后桩上部会产生负弯矩, 随距离增大和围护墙刚度的增加双桩位移、内力和桩侧土压力等均减小, 在桩基允许承载力范围内竖向荷载的影响很小. 结论 前后桩之间存在加筋和遮拦效应, 前后桩通过承台相互作用且变形协调.

关键词 悬臂围护; 遮拦效应; 桩承台; 围护墙体刚度; 竖向荷载

中图分类号 TU473.1

文献标志码 A

Three Dimensional Numerical Investigation of Double Piles Response due to Unstructted Excavation-Induced Lateral Soil Movement

LI Lin^{1,2}, DUAN Zhanyu^{1,2}, ZHANG Jianxin^{1,2}, DONG Guanghui³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin, China, 300384; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin, China, 300384; 3. The Metro Corporation of Tianjin, Tianjin, China, 300000)

Abstract: The effects of unstructted excavation work for a new building on the adjacent double pile foundations were investigated. Using the explicit finite difference code FLAC^{3D}, the Modified-cam clay constitutive model was employed to model the non-linear stress-strain soil behavior and the pile was assumed to have linear elastic behavior, The interface model incorporated in FLAC^{3D} code has been used to simulate the soil/pile contact. The reasonably good agreements between the results of numerical investigation and centrifuge model test proved the deflection, internal force of an

收稿日期: 2017-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172233); 天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC35500)

作者简介: 李琳(1971—), 男, 副教授, 博士, 主要从事基础工程和岩土数值模拟等方面研究.

individual pile in free-head 2-piles group were smaller than that of a single pile at the same location. Negative moment developed along the upper shaft of the front and rear pile in capped-head 2-pile group, the deflection, internal force and lateral soil pressure dropped off with the increasing distance from excavation and the increasing retaining wall stiffness. The research indicated that shadowing and reinforcing effect existed between the front and rear pile, the capped-head 2-pile group were forced to act in union by the cap.

Key words: unstructted excavation; shadowing effect; capped-head-pile; wall flexibility; axial load

城市建设发展建筑物密集度增加,新建工程的深基坑开挖引起周围地层移动会使临近建筑物下的桩基产生附加弯矩和位移,导致桩基工作性能出现问题。POULOS H G^[1]指出侧向土体位移对临近桩基的影响更为重要,尤其是对于混凝土桩基,在设计时并未考虑承担较大的水平向荷载。国内外很多学者进行了这方面的研究,杨敏等^[2]运用弹塑性有限元法研究了无支撑基坑开挖与邻近桩基的相互作用。POULOS H G 等^[3]运用边界元和有限元的两阶段计算方法分别进行了黏性土有内支撑围护基坑开挖、悬臂围护基坑开挖对邻近单桩影响的研究,并设计了图表可计算桩基的附加弯矩和位移,通过与工程测试结果进行了比较具有良好的一致性。在深基坑开挖对邻近桩基影响的研究中,基坑周围土体位移场的模拟是首要问题,以上学者的数值模拟中主要采用了摩尔库伦或屈雷斯卡理想弹塑性模型,而采用硬化土模型可以更好地模拟基坑变形及周围土体的位移场,李琳等^[4]运用岩土数值计算软件 FLAC^{3D},土体采用修正剑桥硬化土模型进行数值模拟,研究了悬臂基坑开挖对邻近单桩的影响;胡小新等^[5]进行了悬臂基坑开挖对邻近桩基 $P-\delta$ 曲线的影响;丁勇春等^[6]运用 FLAC^{3D} 采用修正剑桥模型进行数值模拟研究了地铁车站深基坑对邻近桥梁桩基的影响;王恒等^[7]采用 HS 本构模型进行了基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析;木林隆等^[8]针对基坑变形控制严格情况采用小应变模型计算土体位移然后采用两阶段方法计算计算桩基位移和内力;张治国等^[9]进

行了黏弹性地基中基坑开挖对邻近桩基的影响研究。

关于深基坑开挖对临近桩基的影响研究中,解磊等^[10]进行了深基坑放坡-桩锚联合支护结构的监测及数值模拟;郑刚等^[11]以实测工程为算例,采用三维有元法进行了计算并与实测进行对比,分析了桩基与基坑间距、桩基刚度、竖向荷载和桩顶约束条件等对桩基附加弯矩、位移的影响;GOH A T C 等^[12]进行了明挖隧道基坑开挖对临近桩基影响的现场实测研究。由于现场实测研究各方面困难较大,岩土离心机试验成为这类问题研究的重要手段,LEUNG C F 等^[13]利用离心机模型试验研究了砂土地基中悬臂围护基坑开挖对邻近单桩影响;ONG D E L 等^[14-15]分别利用离心机模型试验法研究了黏性土地基中悬臂围护基坑开挖(分围护墙体稳定和围护墙体倒塌两种情况)对邻近单桩影响;LEUNG C F 等^[16]利用离心机模型试验法研究了砂土地基中悬臂围护基坑开挖对邻近群桩的影响;ONG D E L 等^[17]利用离心机模型试验法研究了黏性土地基中悬臂基坑开挖对邻近群桩的影响。

岩土离心机试验研究较为复杂和耗时,而数值模拟研究可提高工作效率,笔者运用 FLAC^{3D} 建立三维模型进行了悬臂基坑开挖对邻近双桩影响研究,先将数值模拟结果与岩土离心机试验结果进行对比验证,然后对双桩桩顶自由、双桩桩顶带承台两种情况进行对比,同时考虑到基坑不同距离、不同围护墙体刚度和竖向荷载等参数,揭示了邻近双桩的遮拦和加筋效应及桩承台作用。

1 模型介绍

1.1 模型概况

建立三维模型时,为减小计算量截取了矩形基坑中长度为4.05 m的一段建立模型,考虑对称性按1/2建模(见图1),基坑宽度为6 m(1/2模型),基坑最大挖深为6 m,围护墙体厚度为0.6 m,高度为13 m.计算域在坑后取30.6 m(约为5倍基坑开挖深度),深度方向取30 m,可基本消除边界影响.

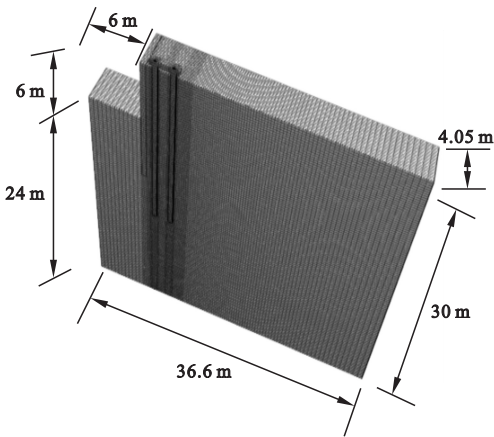


图1 三维有限差分模型

Fig. 1 Three dimensional finite difference

临近基坑的双桩基础位于围护墙体后方,桩径为0.6 m,双桩的轴心距离为2 m,双桩轴心连线垂直于基坑围护墙体的边缘线,双桩基础在沿基坑边缘方向上取1/2模型建立(见图1).由于所取基坑长度为4.05 m,考虑对称性则沿基坑长度方向实际桩间距为8.1 m(相当于13 D , D 为桩径),所以在沿基坑长度方向可不考虑群桩效应.为保证计算结果的正确和提高计算精度,经反复优化对桩基周围附近土体网格加密,直到增加网格密度对计算结果影响很小以至于没有影响为止,距离桩基较远处网格尺寸逐渐增大.双桩带承台时,为了避免承台与地面接触产生相互作用,承台底面脱离地面0.25 m,由于按1/2模型建模,1/2承台宽度为0.6 m,长度为3.2 m,厚0.5 m.

模型边界条件如下:地表各节点均自由,

其余各面约束垂直于该面方向的位移.模型共有444 360个单元和471 526个节点.土体采用的修正剑桥模型是适合黏性土的弹塑性模型,可反映各向同性固结黏土特性.由于笔者主要是进行不同参数的敏感性研究,不同参数引起的结果差异,而不是计算结果的绝对数值,所以可以采用均质土.模型参数选取如下:土体重度 $\gamma = 1.9 \text{ kN/m}^3$,泊松比 $\mu = 0.35$,孔隙比 $e = 0.62$,超固结比 $OCR = 1.0$,压缩常数 $\lambda = 0.09$,回弹常数 $\kappa = 0.0093$,摩擦常量 $M = 0.90$,与天津市第五层土的参数相一致^[18].基坑最大挖深为6 m,分5步进行开挖,数值模拟的各计算步见表1.

表1 数值模拟计算步

Table 1 Calculation steps of excavation

计算步	工况
0	初始地应力平衡
1	开挖至-1.5 m
2	开挖至-3.0 m
3	开挖至-4.0 m
4	开挖至-5.0 m
5	开挖至-6.0 m

1.2 桩基模型

桩基采用线弹性模型,桩基横截面直径为0.6 m,桩长为18 m,泊松比 $\mu = 0.3$.桩基横剖面单元剖分见图2,由于FLAC^{3D}中采用牛顿第二运动定律,而且采用低阶常应变四面体单元,网格剖分不合理时,在给定的变形时会获得较高的内力值,对于非常坚硬的材料例如桩基,要求特别加以注意^[19]. MARTIN GR^[20]进行了桩长方向网格密度的模拟试验,当沿桩长方向网格密度加大,桩基截面剪力的计算结果趋于稳定,当每米桩长方向的单元数目达到5个(即沿桩长方向单元长度0.2 m)时,由于桩长方向的网格尺寸剖分密度对桩基的截面剪力影响小于6%.所以笔者在计算模型中沿桩长方向单元尺寸采用0.2 m,可基本保证截面剪力的计算精度,桩基横截面内剖分的单元网格也较密,达到64

个(1/2 模型),可基本满足弯矩和位移的计算精度.

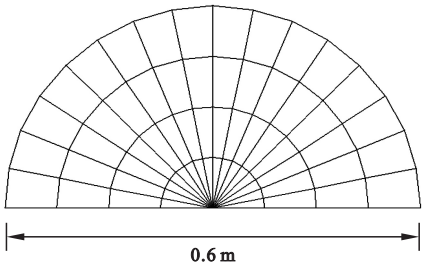


图2 桩基横截面网格
Fig. 2 Cross section of pile

1.3 接触面模型

桩土之间设置接触面,FLAC^{3D}中的无厚度接触面单元由一系列三节点的三角形单元构成,接触面参数主要有粘结力 c 、摩擦角 φ 、膨胀角 ψ 、法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 和抗拉强度 T . 如果接触面所受拉应力超过接触面的抗拉强度的话,接触面单元允许产生分离,接触面分离后节点的法向力和切向力就会为零. 文中若无特别说明,接触面上黏聚力和摩擦角大约按土的 2/3 取值, $c = 18\text{ kPa}$, 摩擦角 $\varphi = 18.4^\circ$, 接触面上的法向、切向刚度按文献[21]中公式计算后,在不影响计算结果的前提下适当降低以提高计算速度,取 $K_n = K_s = 10 \times 10^9\text{ Pa/m}$, 膨胀角取 $\psi = 0$, 抗拉强度取 $T = 0$.

2 结果与分析

在计算模型中,悬臂围护墙体为 C30 混凝土、弹性模量 30 GPa 以及墙体厚度 600 mm ,则相应的围护墙体抗弯刚度为 $540 \times 10^6\text{ N/m}$. 由于实际悬臂围护基坑的围护墙体抗弯刚度一般情况下要低于该值,因此在数值模型中通过仅改变围护墙体弹性模量的方法来改变围护墙体的抗弯刚度. 首先建立一个标准问题,在标准问题中围护墙体的弹性模量降低为 1.5 GPa ,此时围护墙体的抗弯刚度为 $27 \times 10^6\text{ N/m}$,这大致相当于 KSP - II 板桩墙的抗弯刚度.

在标准问题中,临近双桩基础分双桩桩顶自由及双桩桩顶带承台两种情况,双桩轴心连线都垂直于基坑围护墙体. 标准问题中的各参数选取如下:围护墙体的弹性模量 $E_w = 1.5\text{ GPa}$,双桩轴心距离基坑围护墙体(临土侧)分别为 $x = 1.0\text{ m}$ 、 $x = 3.0\text{ m}$,桩长 $L_p = 18\text{ m}$,桩基和承台都按 C30 混凝土考虑,弹性模量 $E_p = 30\text{ GPa}$. 标准问题中设定距离围护墙体 $x = 1\text{ m}$ 的桩基为前桩,距离围护墙体 $x = 3\text{ m}$ 的桩基为后桩.

桩基的位移、内力及桩侧土压力方向定义如下:当桩基位移为负值表示桩基位移指向基坑内部;弯矩值为正值时表示桩基在远离基坑的一侧处于弯曲受拉状态;当桩基截面的外法线方向与 z 轴负方向(其中 z 轴负向为由地面指向下)一致时,剪力指向 x 轴的正方向(x 轴正向为垂直基坑边界指向坑外方向)为负;当桩侧土压力作用在桩基远离基坑的一侧土压力指向坑内时桩侧土压力为正值. 桩基位移为桩基轴心线的位移,单位长度上的桩侧力是通过累加单位桩长上接触面节点上的法向力和切向拖曳力在土体位移方向上的分量得到.

2.1 数值模拟与离心机试验结果对比

ONG D E L 等^[17]通过离心机试验指出,当双桩轴心连线平行于围护墙体方向时,双桩的位移和弯矩差别不大,而双桩轴心连线垂直于围护墙体方向时,双桩存在的桩 - 土 - 桩相互作用比较复杂,笔者主要对这种情况进行研究. 由于数值模拟和离心机试验中,基坑的开挖深度、桩基的长度等并不一致,所以用桩长除以相应的基坑最大开挖深度进行归一化处理作为纵坐标,单桩情况数值模拟结果与离心机试验结果见图 3. 其中图 3(a)为单桩桩顶自由情况时对比曲线,可以看出,虽然由于土质条件、开挖深度和桩基尺寸等的不同,数值模拟与离心机试验结果并不相同,但是其沿桩长的分布形态是一致的,其最大弯矩的发生位置也均在最大开挖

面以下相接近的深度.图3(b)显示双桩桩顶带承台时的对比,弯矩沿桩长的分布形态也是相一致,其中前桩的上部会产生较大负弯矩,最大负弯矩大约出现在 $z = -4\text{ m}$,同时后桩上部也会出现较大的负弯矩,最大负弯矩在桩顶位置,主要差别在于数值模拟中前桩的桩顶负弯矩(绝对值)要小于后桩的桩顶负弯矩(绝对值),离心机试验中前桩的桩

顶负弯矩(绝对值)要大于后桩的桩顶负弯矩(绝对值),分析主要原因是由于数值模拟和离心机试验中承台与桩基的刚度之比不同造成的,离心机试验中桩承台用铝板做成,铝板刚度相对较弱,对桩顶约束不足.通过比较数值模拟中桩基位移和弯矩与文献[17]试验结果基本相一致,说明采用数值模拟可很好地进行该问题的研究.

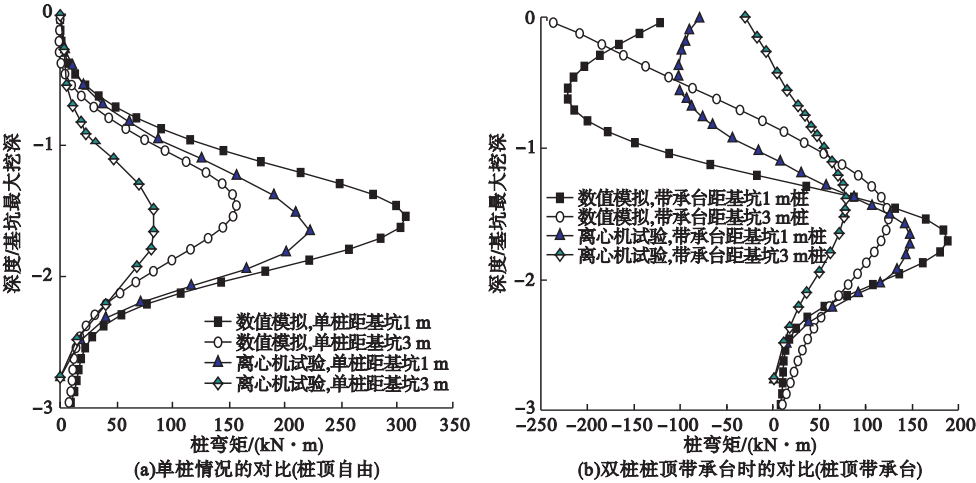


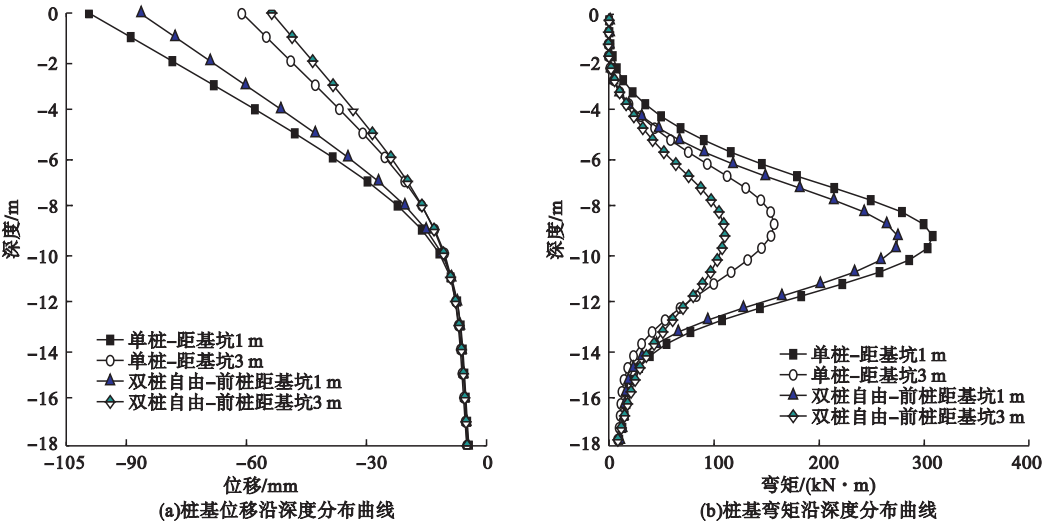
图3 单桩弯矩的数值模拟与离心机试验结果对比

Fig. 3 The comparison of single pile bending moment for the numerical investigation and centrifuge model test

2.2 双桩桩顶自由与双桩桩顶带承台

悬臂围护基坑开挖对临近单桩的影响可参见文献[4],笔者主要进行双桩桩顶自由及双桩桩顶带承台情况研究.首先对双桩桩

顶自由与单桩桩顶自由情况进行比较,当基坑开挖至最大深度-6 m时,双桩桩顶自由与同位置单桩的位移、内力及桩侧土压力沿桩长分布见图4.



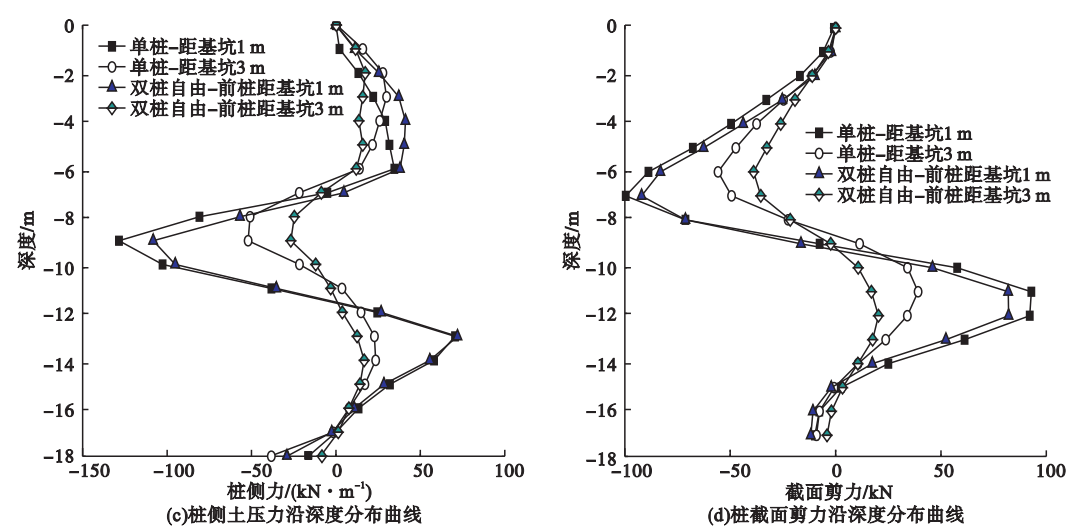


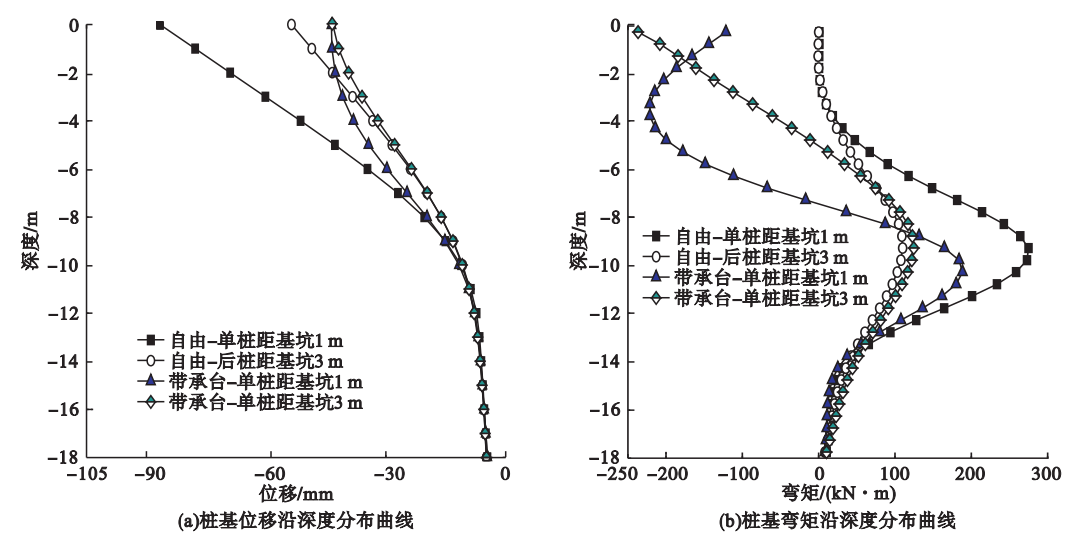
图4 双桩时的桩基反应(桩顶自由)

Fig. 4 Double piles response for “standard” problem(free headed)

通过图4可以看出,双桩桩顶自由时的桩基位移、弯矩和截面剪力与同位置单桩相比其分布形态基本相同但要稍小一些,主要由于双桩桩顶自由时后桩对前桩具有遮拦效应,而前桩对后桩具有加筋效应,由于两桩的共同受力使得前、后桩的位移、弯矩和截面剪力有所降低。

图5为双桩桩顶自由与桩顶带承台时的桩基位移、内力及桩侧土压力沿桩长分布。可以看出承台能将荷载在双桩中重新进行分配从而引起桩基位移、内力及桩侧土压力出现较大变化。双桩桩顶带承台会使前桩和后桩的桩顶位移相同,其桩顶位移量要比桩顶自

由时的前、后桩位移量明显减小。桩顶承台使后桩对前桩有一个后拉作用,会在前桩和后桩的上部产生较大的负弯矩,前桩弯矩呈现“S”型,其最大负弯矩出现在 $z = -4 \text{ m}$ 处,而且其正弯矩减小明显;后桩最大负弯矩出现在桩顶,其最大正弯矩基本没有改变。桩侧土压力方面,在稍大于基坑开挖深度的范围($0 \sim -7 \text{ m}$),增加承台对桩侧土压力影响较大,会使得前桩桩侧力明显增大而后桩桩侧力减小,其中前桩最大桩侧土压力由 45 kN/m 增大到 70 kN/m ,而对于在最大开挖深度(-6 m)以下桩侧土压力影响较小。



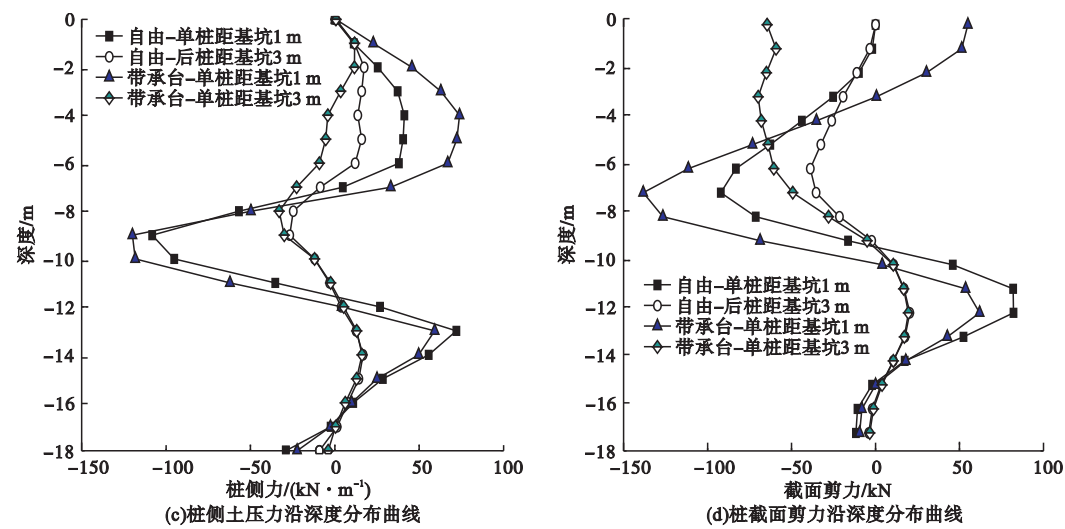


图5 带承台双桩的反应

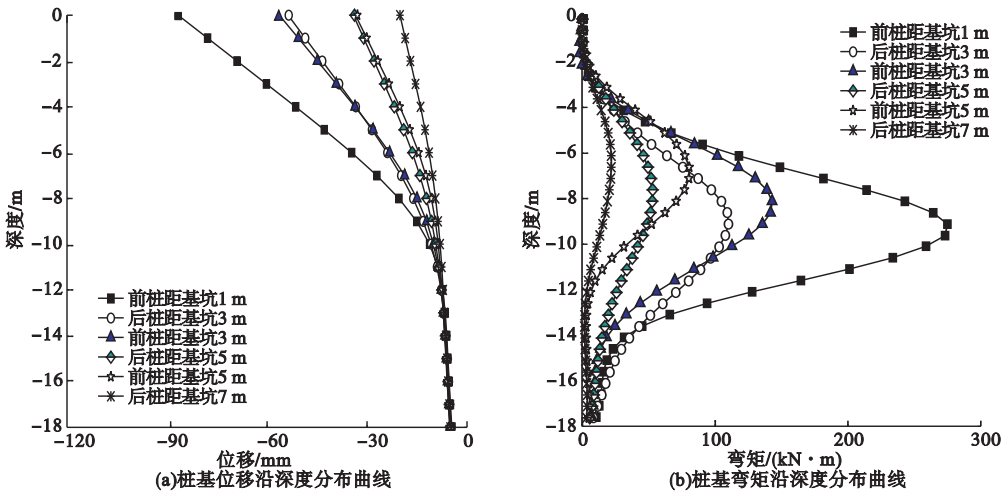
Fig. 5 Double piles response for “standard” problem

分析主要原因是由于增加承台后桩的拽拉作用使得前桩位移量减小较多,从而导致了前桩桩侧土压力增加量较大,进而导致了后桩桩侧力的减小. 桩基截面剪力方面,当双桩桩顶自由时桩顶剪力都为0,当双桩桩顶有承台时受承台约束作用在前、后桩桩顶产生相等但反向的截面剪力,随着深度增加承台对桩基截面剪力的影响逐渐减弱,在深度大于-8 m处(最大开挖面以下2 m处)后桩的截面剪力基本不受承台的影响,由于承台造成的差别,前桩的截面剪力随着深度增大也逐渐减小.

2.3 桩基到基坑不同距离影响

图6为双桩桩顶自由距离基坑不同时桩

基位移、内力和桩侧土压力沿桩长分布,双桩的位置仍取标准问题中的-1 m和-3 m,另外增加位于-3 m和-5 m、-5 m和-7 m的两组双桩进行比较,每组双桩中位置距离基坑较近的为前桩,较远的为后桩. 从图中可以看出,位于相同位置的桩基位移是基本相同的,但在同一位置作为前桩的桩基弯矩、桩侧土压力、截面剪力要明显大于作为后桩的桩基,其中作为前桩的最大值点比后桩的最大值点的位置要上移. 随着到基坑距离的增大,桩基弯矩、桩侧土压力、截面剪力最大值点位置逐渐上移,另外可以看出越接近基坑桩基的遮拦效应越明显.



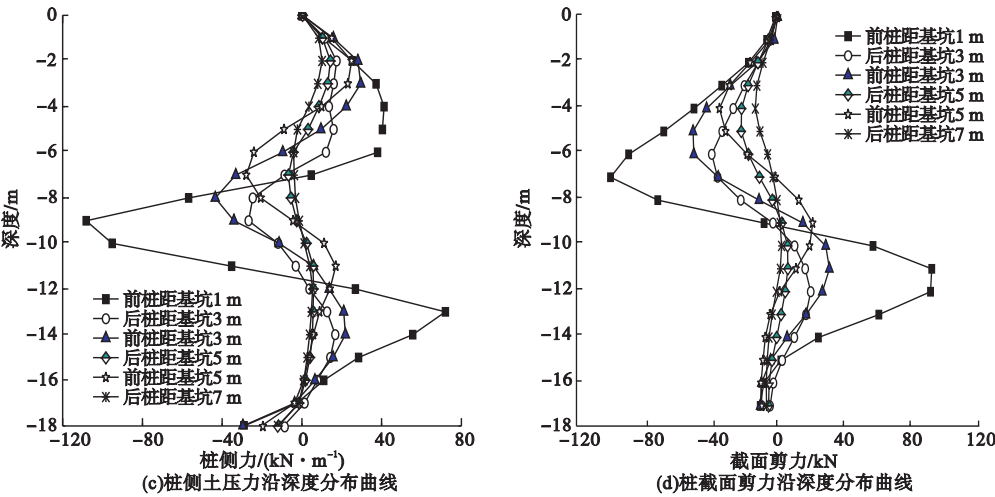


图6 距离基坑不同对桩顶自由双桩的影响

Fig. 6 Effect of distance from excavation face on double pile (free head)

图7为双桩桩顶带承台距基坑不同距离时桩基位移、弯矩、桩侧土压力以及截面剪力沿桩长分布.由图7(a)可以看出,由于增加了桩承台,同一分组的前桩与后桩桩顶位移相同,但随到基坑距离增大桩基位移减小.由图7(b)可以看出,随着距基坑距离增大,前桩和后桩的弯矩均减小,但桩弯矩沿桩长分布形状基本不变,前桩的最大负弯矩点出现在 $z=-4\text{ m}$ 左右,后桩最大负弯矩点出现在桩顶.图7(c)为桩侧土压力分布图,可看出距离变化对前桩土桩侧土压力影响较大,对后桩桩侧土压力影响较小.由图7(d)可以看出,随着到基坑距离的增大,前、后桩截面剪力分布形状基本不变但随距离增大而减小,在 $-10\sim-18\text{ m}$ 深度范围内桩基截面剪力较小,在这一深度范围内,桩基截面剪力随到基坑的距离变化也较小.

2.4 不同围护墙体刚度对临近双桩的影响

实际工程中,围护墙体刚度可能相差较大,所以有必要研究不同围护墙体刚度的影响.围护墙体刚度变化对临近单桩的影响在文献[4]已做介绍,桩顶自由的双桩在围护墙体刚度变化时和单桩类似,不再单独介绍.这里主要就改变围护墙体刚度对带承台双桩

的影响进行研究.同样如标准问题研究中不改变围护墙体厚度的条件下,而仅通过改变围护墙的弹性模量来改变围护墙体的抗弯刚度,设定围护墙体的弹性模量分别为 0.3 GPa 、 1.5 GPa 、 6 GPa ,分别相当于标准模型时围护墙抗弯曲刚度 EI 的 0.2 倍、 1.0 倍和 4.0 倍.

图8为围护墙刚度变化时桩顶带承台双桩的位移、弯矩、桩侧土压力和截面剪力沿桩长分布.从图中可以看出,随着围护墙刚度的增加,带承台双桩的位移、内力和桩侧土压力都明显减小,其中桩顶位移减小最为明显,但是在最大挖深以下桩基位移变化很小;桩基弯矩以桩上部的负弯矩和最大挖深面(-6 m)以下的最大正弯矩变化最大, -12 m 以下桩基弯矩变化很小;桩侧土压力以最大开挖深度(-6 m)以上的最大桩侧力和最大开挖深度(-6 m)以下最大桩侧力处变化最为明显;截面剪力在最大开挖深度(-6 m)附近处和较深的 -12 m 处分别达到最大负剪力和正剪力,这也是受围护墙体刚度变化影响最为明显的两个位置,桩顶处截面剪力变化不明显.

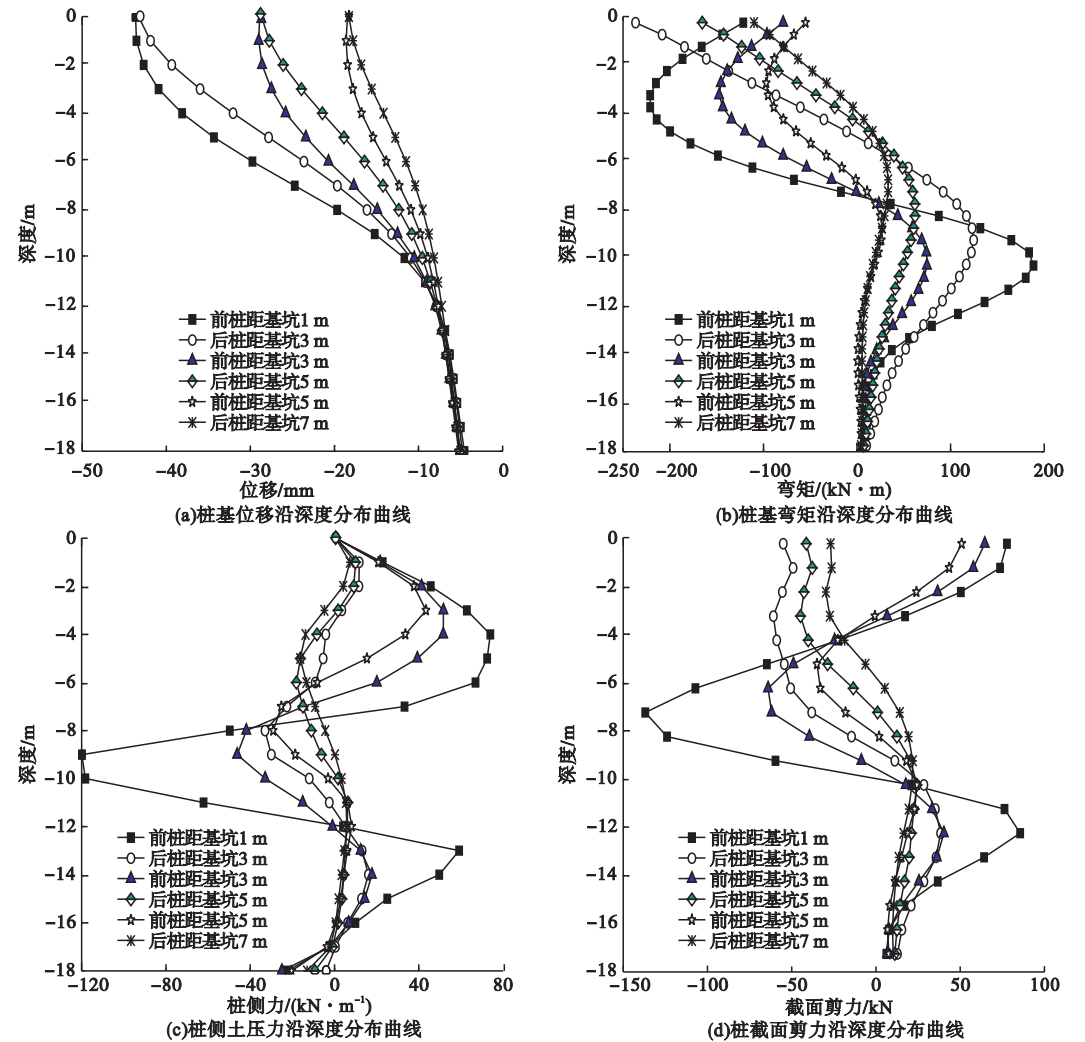
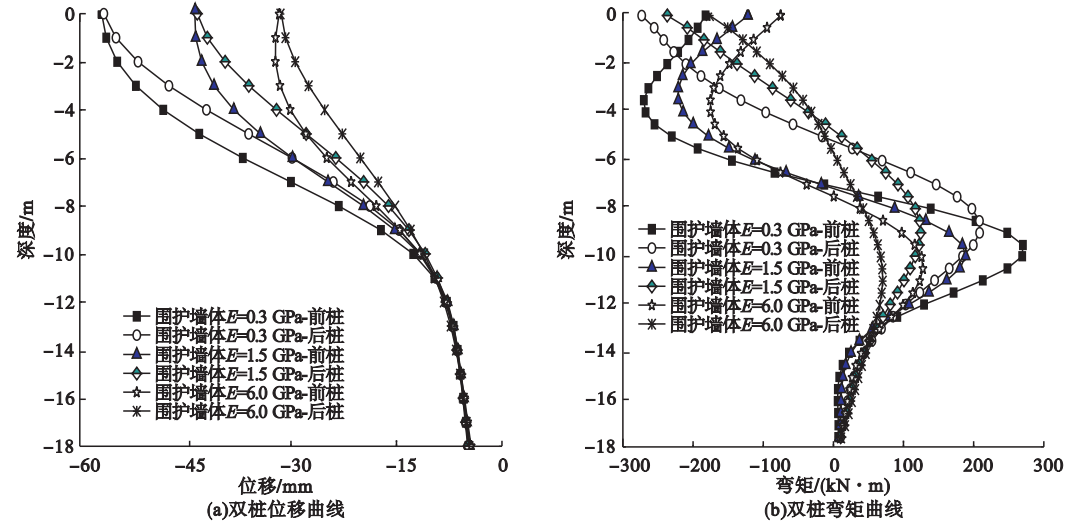


图 7 距离基坑不同对桩顶带承台双桩的影响

Fig. 7 Effect of distance from excavation face on double (capped head)



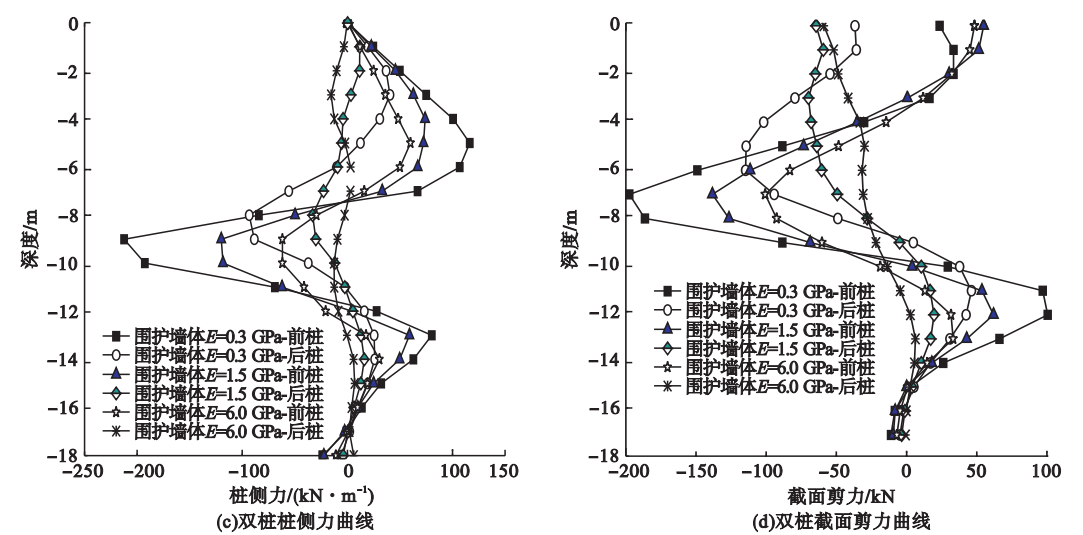


图8 围护墙刚度不同时对带承台约束的双桩影响

Fig. 8 Effect of retaining wall stiffness on the response of double pile (capped head)

2.5 竖向荷载的影响

通过数值模拟得到桩基的荷载-沉降关系曲线以确定单桩的极限承载力约为 $P_u = 1\,000\text{ kN}$,单桩允许承载力 $R = 500\text{ kN}$,在单桩桩顶分别施加竖向荷载 0 kN 、 500 kN 、 $1\,000\text{ kN}$ 进行研究发现,对桩顶自由双桩或带承台双桩,当桩顶荷载在 $0 \sim 500\text{ kN}$ (相当于桩基的允许承载力范围),前桩和后桩的位移、弯矩、桩侧土压力和截面剪力都基本没有变化,但是当桩顶荷载增大至单桩极限承载力 $P_u = 1\,000\text{ kN}$ 时,桩顶自由双桩的位移和弯矩有明显增大,而对桩侧土压力和截面剪力影响较小;对桩顶带承台双桩桩基位移有明显较大的增长,前、后桩上部最大负弯矩绝对值明显减小,最大正弯矩明显增大。

3 结 论

- (1)对桩顶自由双桩,后桩对前桩具有遮拦效应,前桩对后桩具有加筋作用,由于双桩共同受力使得双桩中各桩的位移、内力比同位置单桩要小。
- (2)桩顶增加承台使得双桩桩顶位移量减小,在桩顶产生负弯矩,使前桩的最大正弯矩减小,而后桩的最大正弯矩基本不变;同时使前、后桩桩顶产生相等但反向的截面剪力,

随着深度增加承台对桩基截面剪力的影响逐渐减弱。

- (3)双桩桩顶自由和桩顶带承台时,随着到基坑距离增加,桩基位移、弯矩、桩侧土压力、截面剪力逐渐减小。
- (4)随围护墙刚度的增加,带承台双桩的位移、弯矩、桩侧土压力及截面剪力都明显减小。
- (5)在桩基允许承载力范围内,桩顶竖向荷载基本没有影响,但是当桩顶荷载增大至极限承载力附近时,桩基位移、内力桩侧土压力有一定改变。

参考文献

[1] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation - induced lateral soil movement [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1997, 123 (2) : 94 - 99.

[2] 杨敏,周洪波,杨桦. 基坑开挖与邻近桩基相互作用分析 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (4) : 91 - 96.

(YANG Min, ZHOU Hongbo, YANG Hua. Numerical analysis of pile responses due to unsupported excavation-induced lateral soil movement [J]. China civil engineering journal, 2005, 38 (4) : 91 - 96.)

[3] 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.

- [4] LI Lin, DONG Guanghui, ZHANG Fenghui, et al. Three-dimensional numerical analyses of pile response due to unstrutted excavation-induced lateral soil movement [C] // Geotechnical special publication, 2014.
- [5] 李琳, 胡小新, 杨敏, 等. 悬臂基坑开挖对邻近桩基 $p-\delta$ 曲线影响的数值研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(增刊2): 32-39.
(LI Lin, HU Xiaoxin, YANG Min, et al. Numerical studies on the adjacent pile $p-\delta$ responses due to the unstrutted excavation-induced lateral soil movement [J]. Building science, 2015, 31(S2): 32-39.)
- [6] DING Yongchun, CHEN Zekun, WANG Jianhua, et al. Deformation of metro station excavation and its influence on nearby pile foundations of bridge[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S): 383-388.
- [7] 王恒, 陈福全, 林海. 基坑开挖对临近桥梁桩基的影响与加固分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1257-1265.
(WANG Heng, CHEN Fuquan, LIN Hai. Behaviors and strengthening of bridge pils subjected to excavation-induced soil movement [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(5): 1257-1265.)
- [8] 木林隆, 黄茂松. 基于小应变的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 304-310.
(MU Linlong, HUANG Maosong. Small-strain behavior-based method for effect of excavation on adjacent pile foundations [J]. Chinese journal of geotechnical engineering 2014, 36(S2): 304-310.)
- [9] 张治国, 鲁明浩, 宫剑飞. 黏弹性地基中基坑开挖对邻近桩基变形影响的时域解[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3017-3028, 3038.
(ZHANG Zhiguo, LU Minghao, GONG Jianfei. Time-domain solution for influence of excavation on adjacent pile deformation in viscoelastic foundation [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(10): 3017-3028, 3038.)
- [10] 解磊, 董礼. 深基坑放坡-桩锚联合支护结构的检测及数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 228-235.
(XIE Lei, DONG Li. Numerical simulation and monitoring of slope-pile anchor combined support structure for deep excavation [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 228-235.)
- [11] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对邻近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638-643.
(ZHENG Gang, YAN Zhixiong, LEI Huayang, et al. Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2007, 29(5): 638-643.)
- [12] GOH A T C, WONG K S, TEH C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2003, 129(4): 383-386.
- [13] LEUNG C F, CHOW Y K, SHEN R F. Behaviour of pile subject to excavation-induced soil movement [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 126(11): 947-954.
- [14] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Pile Behavior due to Excavation-Induced soil movement in clay. I: Stable wall [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, 2006, 132(1): 36-44.
- [15] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: Collapsed wall [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, 2006, 132(1): 45-53.
- [16] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2003, 129(1): 58-65.
- [17] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(10): 1462-1474.
- [18] 孟梁. 天津软土的结构性及本构关系模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
(MENG Liang. Study on structural property and constitutive model for Tianjin soft clay [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.)
- [19] ANDREW D. A numerical study of pile behavior in large pile group under lateral loading [D]. Los Angeles: University of Southern California, 2005.
- [20] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement [J]. Computers and geotechnics, 2005, 83: 588-598.