

竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究

郑 刚, 王 丽

(天津大学土木工程系, 天津 300072)

摘 要: 桩基可能会因各种原因导致桩体发生倾斜, 桩身的垂直度往往超过《建筑桩基技术规范》的允许值, 如何确定这些倾斜程度并不很大的倾斜桩的承载力一直是工程实践中的难题。对天津某高层建筑工程不同垂直度的倾斜桩进行了现场载荷试验, 试验结果表明小倾斜度下桩的承载力并不一定下降。在试验成果基础上利用有限元分析软件 ABAQUS 进行模拟, 分析了不同垂直度、不同土质条件下桩的荷载传递及承载力受垂直度变化的规律。有限元分析结果表明, 当桩的垂直度不大于 4% 时, 当桩身具有足够的抗弯强度和刚度时, 相同荷载下其沉降反而小于竖直桩, 但会在桩身产生一定的弯矩, 桩顶自由的单桩也会产生一定水平位移。承台有助于减小倾斜桩的水平位移与挠曲。

关键词: 倾斜桩; 桩土相互作用; 竖向承载力; 沉降; 载荷试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0323-08

作者简介: 郑 刚(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhengzige@yahoo.com.cn。

Load transfer and bearing capacity of inclined pile under vertical load

ZHENG Gang, WANG Li

(Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Inclination of piles may occur due to different reasons. Most inclinations of piles are beyond the limitation imposed by the Technical Code for Building Pile Foundations (JGJ94—94). How to determine the bearing capacity of inclined piles is a tough problem in practice. Field load tests on 6 inclined piles with different degrees of inclination were performed and their bearing capacities were compared. It was shown by test results that the bearing capacity did not necessarily decrease when the degree of inclination decreases if the inclination was within a small range. Based on modeling one of the load-test results of inclined piles, the required characteristics of soil for FEM analysis were obtained to conduct numerical analysis. The load transfer and bearing capacity of piles with different degrees of inclination under different soil conditions were studied. It was shown by numerical analysis that under the same vertical load the settlement of piles with the degree of inclination no more than 4 percent was even smaller than that of a vertical pile, but comparatively large bending moment would be produced, thus for inclined pile, enough rigidity and strength were required to resist these bending moment and lateral displacement. Lateral displacement and bending of inclined pile could be reduced with the introduction of pile cap.

Key words: inclined pile; soil-pile interaction; vertical bearing capacity; settlement; load test

0 引 言

天津市某高层建筑采用了预制桩基础, 基坑开挖(开挖深度 13.5 m)后发现大量桩体发生了不同程度的倾斜, 其中大部分桩体的垂直度超过了《建筑桩基技术规范》JGJ94—94^[1]允许的垂直度偏差值。目前还很少有确定这种情况下倾斜桩的承载力的研究文献报道, 是一个亟待解决的问题。

文献[2]通过模型实验对竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递机理有了一定的了解。文献[3]假定地基土体为半无限弹性体, 通过数值方法得到了竖向荷载作用下倾斜桩桩顶位移解, 认为承受竖直荷载的斜桩可

以有小于 10° 的倾角。文献[4, 5]提出了求倾斜桩承载力的近似算法。竖向荷载作用下倾斜桩的极限承载力是由桩顶沉降、桩顶水平位移及桩材料强度共同决定的, 因此在工程中垂直度超过多少时倾斜桩的承载力会较明显减少还有待于进一步的研究。本文基于该工程, 选取不同垂直度的工程桩进行了载荷试验, 并在此基础上进行数值分析, 以期探讨不同垂直度及其他相关条件对倾斜桩荷载传递及承载力的影响。

基金项目: 天津市科技创新专项资金资助项目

收稿日期: 2007-04-26

1 不同垂直度桩竖向承载力现场试验

上述高层建筑位于天津市区，场地土层的分布情况及各层土的物理力学指标见图1，图中土体表面为基坑底面。

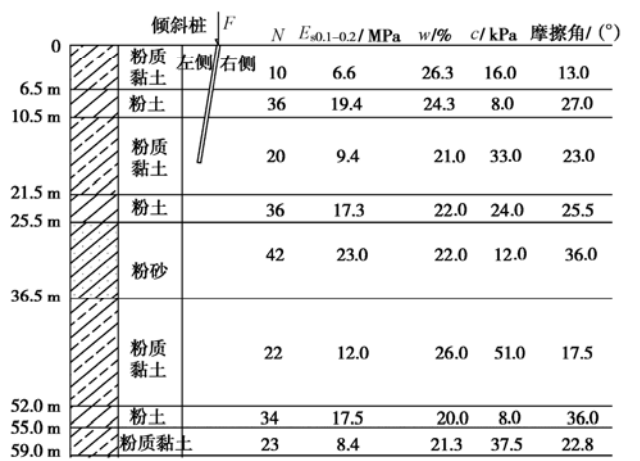


图 1 土层剖面图

Fig. 1 Soil profile

该工程拟采用的预制桩为边长0.4 m的方桩，桩长17 m，桩端进入持力层（粉质黏土层）6.5 m。桩顶标高位于天然地面下13.5 m。基坑开挖后发现大量桩体发生了不同程度的倾斜，为了确定倾斜桩的承载力，对不同垂直度的倾斜桩（垂直度分别为0.7%，1.0%，1.8%，1.9%，2.1%，2.4%）进行了现场载荷试验，考虑到基坑开挖可能导致原预制桩上浮，同时桩身完整性受到不同程度的影响，在试桩之前进行了相同的小荷载预压。图2为各倾斜桩的荷载-沉降曲线。

如图2所示，对于垂直度为0.7%~1.9%的倾斜桩，在相同竖向荷载作用下，桩顶沉降量随着倾斜程度的增加而增加。在工作荷载时（竖向荷载1200 kN），垂直度为0.7%，1.0%，1.8%，1.9%的倾斜桩的桩顶沉降量分别为3.92，4.75，5.85，6.8 mm。

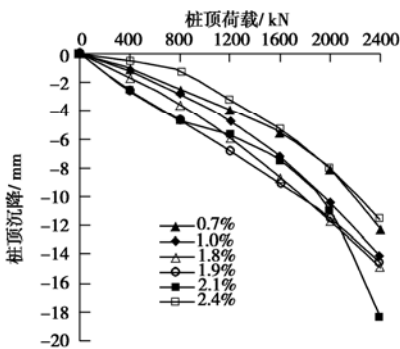


图 2 桩顶荷载-沉降曲线

Fig. 2 Load-settlement curves of pile top

垂直度为2.1%，2.4%的倾斜桩在初始预压时桩顶

沉降量较大，经过低应变检测发现桩身在地面下4.0 m处开裂明显，属于III类桩。通过预压加载使桩上下两段重新接触，预压沉降量分别为22.52，38.55 mm。然后再进行载荷试验。由于桩身的缺陷及试桩前的预压产生的较大沉降的过程导致这两根桩的荷载-沉降特性不能与其它四根桩进行比较。

通过静载试验得到各倾斜桩的极限承载力均不小于2400 kN。由此可见垂直度不超过2.4%的各倾斜桩的极限承载力差别不大。

尽管上述各倾斜桩的载荷试验是在相同的场地进行，但由于场地不同位置处桩周、桩端土质条件不可能完全相同，且各预制桩随施工先后、位置的不同的排土效应存在差异，同时试桩过程中的人为因素也不能忽略。为了排除这些因素的影响，研究当桩、土体条件及加载过程完全相同时，仅由于桩身倾斜引起的桩承载力及变形的变化，采用有限元方法对倾斜程度更大的桩进行模拟。

2 有限元模拟

本文数值分析的出发点是，首先利用有限元分析软件ABAQUS对其中垂直度为0.7%的倾斜桩的载荷试验进行模拟，当得到的桩顶沉降规律与现场试验的荷载-沉降曲线相接近后，依据此有限元模型的土体参数进行仿真模拟，研究当桩身倾斜程度进一步变化时倾斜桩的承载力及桩身变形规律。

2.1 有限元模型的建立及参数确定

(1) 土

土体采用 Drucker-Prager 模型（即 D-P 模型）。桩、土之间的接触通过接触对实现，采用库仑摩擦（Coulomb friction）模型来描述接触面间摩擦行为。模型为三维实体模型，土体的侧向边界限制其两个水平方向的位移，底边界限制竖向及两个水平方向的位移。有限元模拟时土体参数采用垂直度为 0.7%倾斜桩的土层分布及相关土体参数，见图 1。

(2) 钢筋混凝土桩

为了便于有限元计算时桩土之间的摩擦接触能够比较容易收敛，依据侧面积相等的原则将边长为 0.4 m 的方桩转化为直径为 0.5 m 的圆桩，桩长 17 m。有限元计算中桩身混凝土材料为弹塑性材料，其应力、应变关系见图 3^[6]。破坏时单轴拉应力与单轴压应力之比为 0.09。混凝土泊松比为 0.2。混凝土弹性模量为 3.0×10^4 MPa，抗压强度为 14.3 MPa。

由于在各级荷载作用下，钢筋应力未达到屈服，故将钢材作为弹性材料，弹性模量为 2×10^5 MPa，泊松比为 0.25。

有限元网格见图 4, 土体为半径 10 m 的圆柱体。 承台及没有承台两种情况的模拟, 计算分组见表 2。

3 有限元计算结果与分析

3.1 模拟现场试验结果

参照现场工程地质勘察报告资料及天津市各层土的弹性模量与压缩模量的经验关系($E/E_{s0.1-0.2}=3\sim8$), 经过反复试算、参数调整, 将图 1 中的压缩模量取为表 1 中的弹性模量时, 得到的垂直度为 0.7%时载荷试验及有限元计算的桩顶荷载 - 沉降曲线对比图, 见图 5。由图 5 可知, 在选取适当的参数时, 有限元计算结果可与现场试验结果能够很好的吻合。在此基础上, 可依据此模型研究当桩身倾斜程度进一步增加时倾斜桩的承载力及桩身变形规律。

表 1 有限元模拟所取土的弹性模量

Table 1 Elastic modulus of soil in finite element modeling			
土层	层底深度/m	E/MPa	$E/E_{s0.1-0.2}$
粉质黏土	6.5	24	3.6
粉土	10.5	70	3.6
粉质黏土	21.5	60	6.3
粉土	25.5	110	6.3
粉砂	36.5	150	6.5
粉质黏土	52.0	85	7.1
粉土	55.0	130	7.4
粉质黏土	59.0	65	7.7
粉土	64.0	130	7.9
粉质黏土	78.0	100	8.6

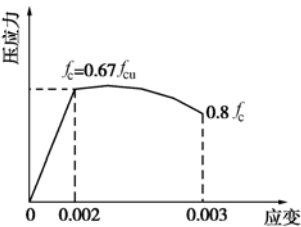


图 3 应力 - 应变关系图

Fig. 3 Curves of stress-strain

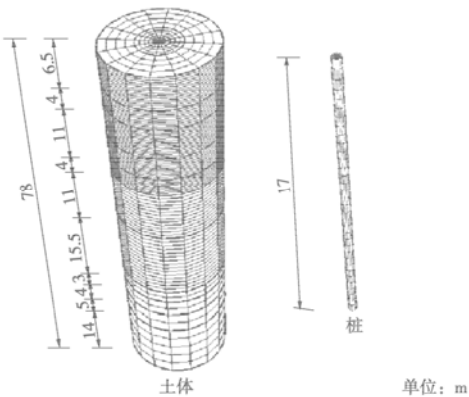


图 4 倾斜桩单桩分析有限元网格

Fig. 4 Finite element mesh for analysis of single inclined pile

3.2 天津市区地质条件下倾斜桩的仿真模拟

有限元计算时针对不同垂直度的倾斜桩进行了有

表 2 倾斜桩的垂直度

Table 2 Degree of inclination of piles							
没有承台垂直度/%	0.7	2	3	4	5	7	10
有承台 垂直度/%			3		5	7	

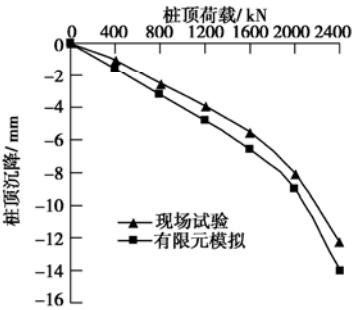
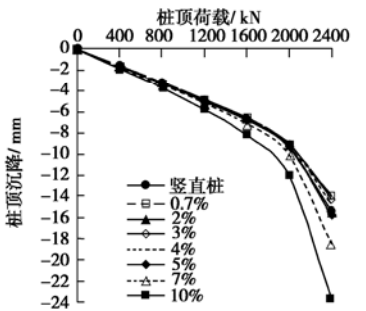


图 5 桩顶荷载 - 沉降曲线

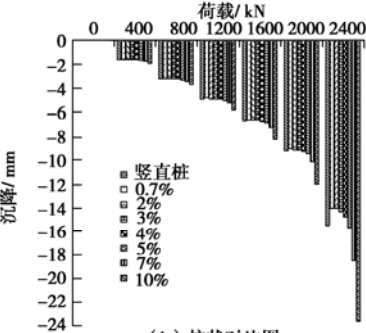
Fig. 5 Load-settlement curves

(1) 桩顶荷载 - 沉降

图 6 为各级竖向荷载作用下桩顶沉降曲线图。如图所示, 当垂直度小于 5% 时, 在各级荷载作用下, 竖直桩与各倾斜桩的桩顶沉降基本相同。对于垂直度为 7%, 10% 的倾斜桩, 竖向荷载为 1200 kN 时桩顶沉降比竖直桩分别增加了 6%, 18%; 竖向荷载为 2000 kN 时桩顶沉降比竖直桩分别增加了 9.8%, 30%。



(a) Q-s 曲线



(b) 柱状对比图

图 6 桩顶荷载 - 沉降曲线

Fig. 6 Load-settlement curves of pile top

如图 6 所示当总荷载为 2400 kN 时, 垂直度为 0.7%, 2%, 3%, 4%, 5% 的倾斜桩的桩顶沉降分别为 14.0, 14.0, 14.3, 14.8, 15.7 mm, 此时竖直桩的桩顶沉降量为 15.5 mm。可见相同荷载下, 垂直度不大

于 4% 的倾斜桩的沉降反而小于竖直桩。

(2) 桩身位移

当竖向荷载为 2000 kN 时, 倾斜桩发生了如图 7 所示的变形。在地面下 3~3.6 m 范围倾斜桩出现了反向弯曲的现象。随着倾斜程度增加反弯点下移, 垂直度小于 5% 倾斜桩的反弯点在地面下 3 m 处。垂直度为 7%, 10% 倾斜桩的反弯点分别为地面下 3.3, 3.6 m。随着倾斜程度增加, 桩顶水平位移及反弯点以下桩身的反向挠曲程度增加。当竖向荷载为 2000 kN 时, 垂直度为 4%, 5%, 7%, 10% 的倾斜桩的桩顶水平位移分别为 3.7, 5.3, 10.1, 19.8 mm。

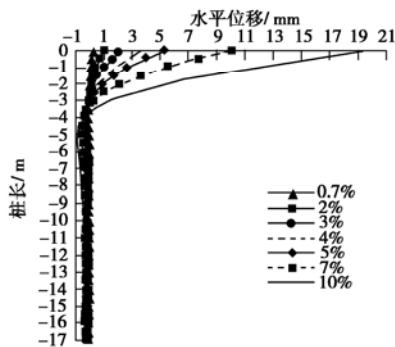


图 7 桩身水平位移

Fig. 7 Lateral displacements of piles

(3) 接触面上土体的水平应力分布

图 8 (a)、(b) 分别为竖向荷载为 2000 kN 时, 竖直桩及不同垂直度倾斜桩两侧接触面上土体的水平应力分布图。

如图 8 (a) 所示, 倾斜桩右侧的接触面上土体的水平应力出现了转折点, 在转折点以上随着倾斜程度增加水平应力增加, 在转折点以下随着倾斜程度增加水平应力减小。垂直度为 4% 以上的倾斜桩右侧接触面上土体的水平应力在地面下 1.5 m 范围内并没有随着桩身位移增加而明显增加, 土体的水平应力在 50~100 kPa 范围内。

如图 8 (b) 所示倾斜桩左侧的接触面上土体的水平应力分布也出现了转折, 在转折点以上随着倾斜程度的增加土体的水平应力减小, 在转折点以下随着倾斜程度的增加土体的水平应力增加。随着倾斜程度增加, 桩左侧接触面上土体的水平应力为零的范围越大。

接触面上土体的水平应力的分布规律与桩身的变形密切相关。在反弯点以上, 桩身发生了向右的水平位移而挤压桩右侧土体, 桩身倾斜程度越大, 对右侧土体的挤压程度越大。由于桩周土体受到其周边土体的侧向约束, 所以桩右侧的接触面上土体的水平应力随着倾斜程度的增加而增加。同时, 由于桩左侧与土体分离, 接触面土体的水平应力为零, 随着倾斜程度增加, 分离的范围越大, 水平应力为零的范围越大。

在反弯点以下, 桩身发生了反向弯曲, 桩左侧的土体受到挤压, 所以此时土体的水平应力的分布规律与反弯点以上的分布规律相反。

图 9 (a) 为当竖向荷载为 2000 kN 时, 天津市区地质条件下垂直度为 5% 的倾斜桩右侧土体的水平方向应变 ε_{22} 等值线图。

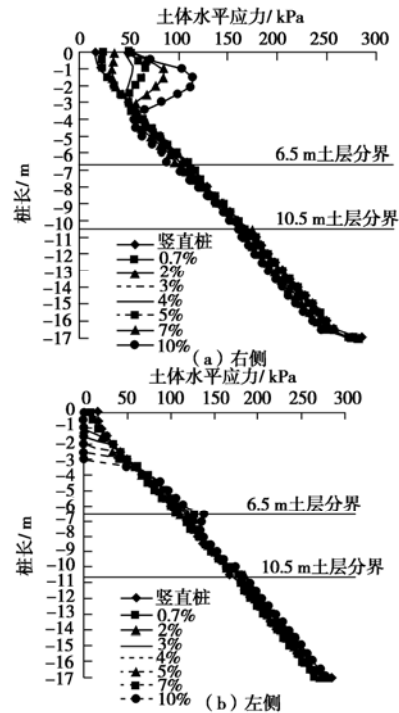


图 8 接触面上土体的水平应力

Fig. 8 Lateral stresses of the soil

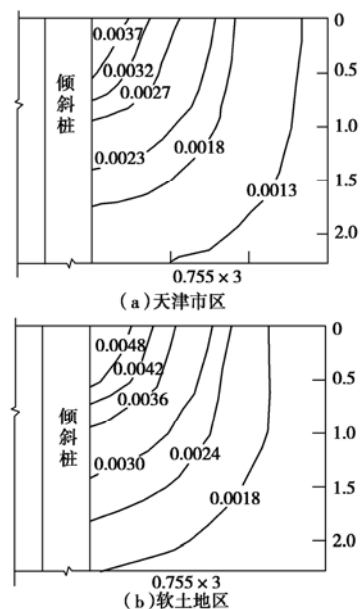


图 9 桩右侧土体水平应变等值线

Fig. 9 Contours of lateral strain of surrounding soil on the right side of indined pile

如图 9 (a) 所示, 垂直度为 4% 以上的倾斜桩由于桩身水平位移较大导致土体产生了较大的应变而进

入了软化阶段, 此时即使变形继续增加, 土体的应力也不会增加, 所以桩顶处土体水平应力始终不超过 50 kPa。随着深度增加由于土体的自重应力增加, 土体的大主应力(水平方向)与小主应力(竖直方向)的差值减小, 使达到软化阶段时土体的水平应力提高^[7]。当深度进一步增加时, 由于桩身的位移较小, 土体的应变较小, 土体仍处于强化阶段, 所以土体的水平应力分布随着桩身位移增加而增加。

(4) 桩侧摩阻力分布

图 10 (a)、(b) 分别为竖向荷载为 2000 kN 时, 竖直桩及不同垂直度倾斜桩的两侧桩侧摩阻力分布图。

如图 10 (a) 所示, 垂直度为 5% 以下时, 倾斜桩右侧摩阻力出现了一个转折点, 转折点位于地面下 3 m 处。在转折点以上, 随着倾斜程度的增加桩右侧摩阻力增加; 在转折点以下, 随着倾斜程度的增加桩右侧摩阻力减小。在地面下 4 m 以上的范围内, 垂直度为 7%, 10% 的倾斜桩的右侧摩阻力呈“S”分布, 而垂直度小于 5% 的倾斜桩的桩侧摩阻力随着距地面深度减小而增加。

如图 10 (b) 所示桩左侧的摩阻力也出现了转折, 各倾斜桩的左侧摩阻力在转折点以上随着倾斜程度的增加而减小, 在转折点以下随着倾斜程度的增加而增加。随着倾斜程度增加, 桩顶附近桩侧摩阻力为零的范围越大。

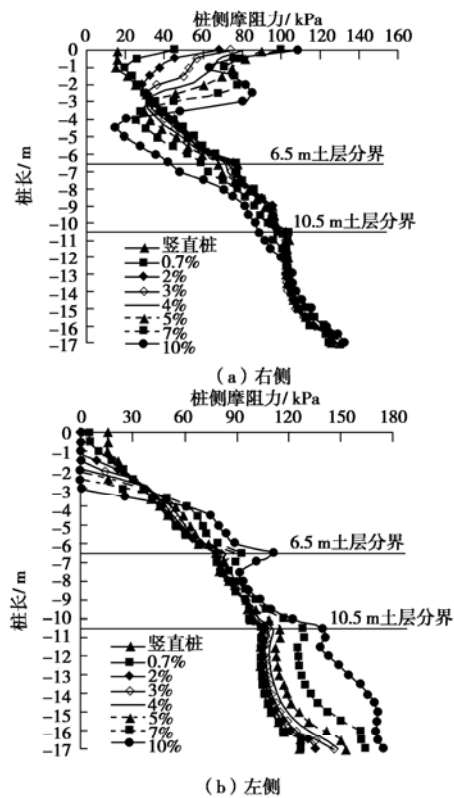


图 10 桩侧摩阻力分布
Fig. 10 Distribution of side friction of piles

桩侧摩阻力的分布同样与桩身的变形密切相关。由于桩身的反弯变形, 桩左右两侧的侧摩阻力出现了转折点, 在转折点上下侧摩阻力随着垂直度变化而变化的规律与桩身的反弯变形及桩顶部一定范围内桩土分离相对应。

对于垂直度为 7%, 10% 的倾斜桩, 正如前面的分析在地面下 1.5 m 范围内土体进入了软化阶段, 桩侧摩阻力也表现为“软化”。在此范围内桩侧摩阻力分布规律与垂直度小于 5% 的倾斜桩相似: 随着距地面的距离减小而增加。但桩侧摩阻力的大小与垂直度为 5% 的倾斜桩相近, 并没有明显提高。由此可见, 当计算倾斜程度较大倾斜桩的竖向承载力时, 由于左侧桩土分离及右侧土体软化的原因应该对桩顶一定长度范围内的桩侧摩阻力进行折减。

(5) 桩身弯矩分布

图 11 为竖向荷载 2000 kN 时倾斜桩的桩身弯矩图。竖向荷载作用下, 由于桩顶发生了水平位移, 使一定范围内桩身截面受弯, 即产生了 $P-\Delta$ 效应。随着倾斜程度增加, 相同截面位置的弯矩增加。钢筋混凝土桩在弯矩作用下会导致一侧钢筋受拉, 当钢筋的拉应力较大, 混凝土与钢筋之间的黏结力被破坏, 这会导致钢筋与混凝土剥离而使桩顶处桩身截面破坏。

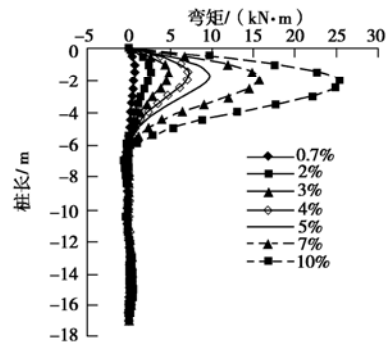


图 11 桩身弯矩
Fig. 11 Bending moments of piles

(6) 承台对倾斜桩的影响

在桩基础中桩顶通常要设置承台来协同各桩共同受力, 承台对桩顶有较强的约束作用, 此时倾斜桩的受力与变形情况显然与没有承台的情况不同, 为此在单桩模型顶部设置与桩整体浇筑的直径 1.8 m、厚 1.0 m 的钢筋混凝土承台, 研究承台对倾斜桩承载力的影响。

由于承台的截面面积比桩大, 即抗弯刚度大, 其抵抗变形的能力较强。如图 12 所示, 有承台的倾斜桩的桩身水平位移明显小于没有承台的情况, 相应反弯点以下的桩的挠曲变形也减小。承台对减小桩顶水平位移的能力受到垂直度的影响, 垂直度为 3%, 5%,

7%时桩顶水平位移分别减小了 45%, 50%, 24%。

图 13 为桩侧摩阻力分布图,为了表达清晰只将垂直度为 3%和 5%两种情况绘出。

如图 13 (a) 所示, 桩顶处由于承台与其下面的土体共同沉降, 桩顶处桩土之间没有相对位移因此桩顶处的右侧的侧摩阻力接近于零。出现负的侧摩阻力是由于承台限制桩顶水平位移, 导致桩右侧土体沉降大于桩的沉降, 产生了负摩阻力。在地面下 3 m 以上的桩侧摩阻力始终小于没有承台的情况。相应的, 如图 13 (b) 所示桩左侧的侧摩阻力增加, 对于垂直度为 3%, 5%的倾斜桩其左侧摩阻力为零的长度均减小了 0.5 m。

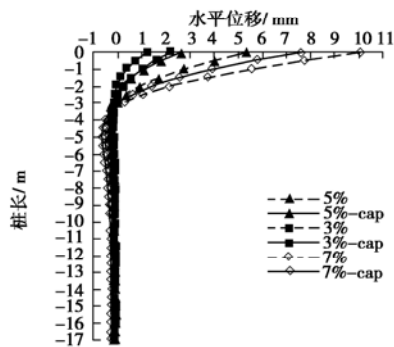


图 12 桩身水平位移

Fig. 12 Lateral displacements of piles

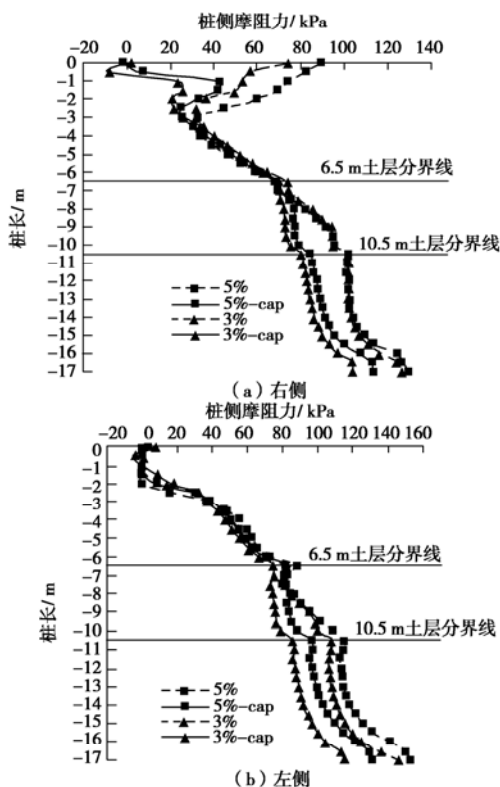


图 13 桩侧摩阻力

Fig. 13 Distribution of side friction along piles

图 14 为竖向荷载 2000 kN 时桩身弯矩图。如图 14 所示, 对于垂直度为 3%, 5%, 7%的倾斜桩有承台时桩身的最大弯矩分别减小了 8.1%, 25.1%, 17.1%。承台调整桩身弯矩的能力受到垂直度的影响。桩身最大弯矩的位置分别上升了 0.5, 1, 0.5 m, 因此有承台时, 桩身截面破坏会靠近桩与承台的连接处。

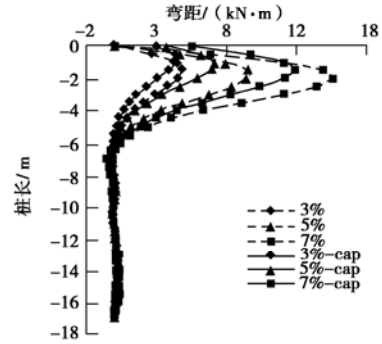


图 14 桩身弯矩

Fig. 14 Bending moments of piles

3.3 开发区软土地质条件下倾斜桩的仿真模拟

与天津市区的地质条件不同, 天津市开发区地面下一定范围内土体主要为淤泥质软土。正如上面分析, 桩身变形及弯矩主要分布在地面下 3 m 左右范围内, 此范围内土体的性质对倾斜桩的承载力与变形有很大的影响, 倾斜桩在软土地区的承载力和变形有待于进一步研究。为此, 将地面下 0~6.5 m, 6.5~10.5 m 范围的土体的弹性模量分别折减为天津市区土层 (表 1) 的一半, 即为 12, 35 MPa 以模拟软土地质条件, 在此基础上进行单桩的有限元模拟。

(1) 桩顶荷载 - 沉降

图 15 为各级竖向荷载作用下桩顶沉降曲线。如图所示, 当垂直度小于 5%时, 在各级荷载作用下, 竖直桩与各倾斜桩的桩顶沉降基本相同。垂直度增加为 7%, 10%时, 竖向荷载为 1200 kN 时桩顶沉降比竖直桩分别增加了 9%, 20%; 竖向荷载为 2000 kN 时桩顶沉降比竖直桩分别增加了 13.5%, 37.5%。地面下 10.5 m 范围内土体的压缩模量减小一半对于倾斜桩的桩顶沉降的影响较小, 如表 3 所示, 即使是垂直度为 10%的倾斜桩软土地区的桩顶沉降仅比天津市区地质条件下的桩顶沉降量增加了 7.5%。

如图 15 所示当总荷载为 2400 kN 时, 垂直度为 0.7%, 2%, 3%, 4%, 5%的倾斜桩的桩顶沉降分别为 14.5, 14.6, 14.8, 15.4, 16.44 mm, 此时竖直桩的桩顶沉降量为 16.2 mm。可见相同荷载下, 在软土地区垂直度不大于 4%的倾斜桩的沉降也同样小于竖直桩。

(2) 桩身位移

图 16 为当竖向荷载为 2000 kN 时, 倾斜桩桩身水

平位移图。在地面下 3.5~4 m 范围内桩身出现了反向弯曲的现象, 随着倾斜程度增加反弯点下移, 垂直度为 5% 以下的倾斜桩反弯点在地面下 3.5 m 处。垂直度为 7%, 10% 的倾斜桩反弯点分别为地面下 3.5, 4 m。随着倾斜程度增加桩顶水平位移及反弯点以下桩身的反向挠曲程度增加。当竖向荷载为 2000 kN 时, 垂直度为 4%, 5%, 7%, 10% 的倾斜桩的桩顶水平位移分别为 5.0, 7.0, 12.3, 24.2 mm。

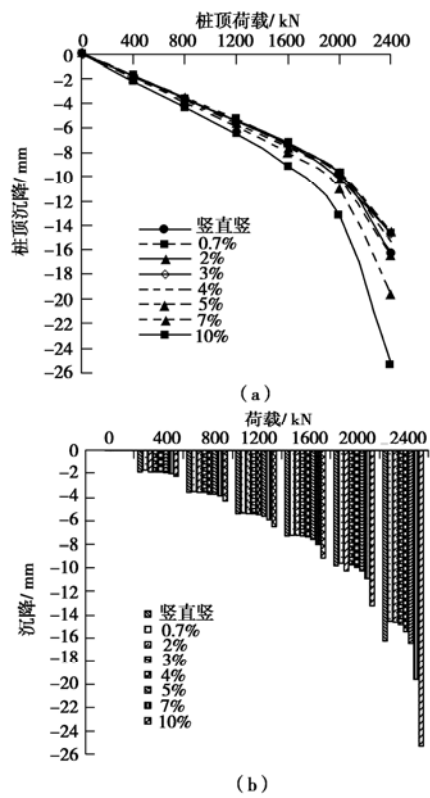


图 15 桩顶荷载 - 沉降曲线
Fig. 15 Load-settlement curves on pile top

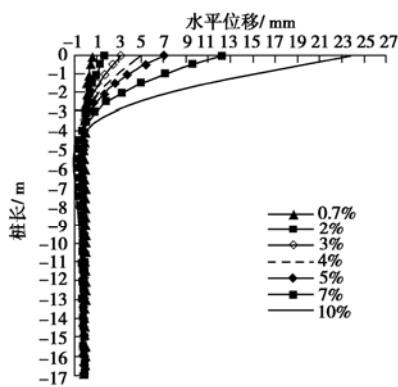


图 16 桩身水平位移
Fig. 16 Lateral displacements of piles

由于地面下 10.5 m 范围的土体的压缩模量减小一半导致软土地区桩顶的水平位移要大于天津市区地质条件的桩顶水平位移。两种地质条件下倾斜桩顶水

平位移比较见表 3。

(3) 桩侧摩阻力分布

图 17 (a)、(b) 分别为竖向荷载 2000 kN 时, 竖直桩及不同垂直度倾斜桩的两侧摩阻力分布图。软土地区倾斜桩的侧摩阻力分布规律与天津市区地质条件的桩侧摩阻力分布规律基本相同。但如图 17 (a) 所示, 与天津市区地质条件不同, 垂直度为 5% 的倾斜桩的右侧摩阻力在地面下 4 m 以上的范围内就表现为“S”分布。

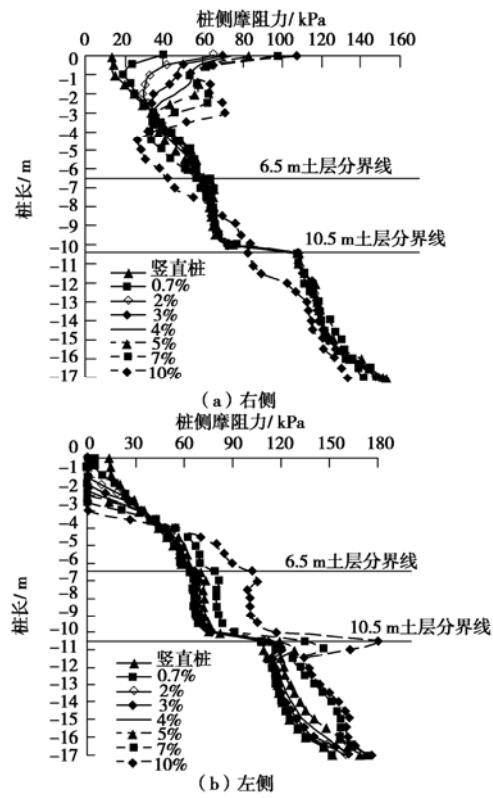


图 17 桩侧摩阻力
Fig. 17 Side friction along piles

这主要是由于地面下 10.5 m 土体的弹性模量减小, 在垂直度较小时, 倾斜桩就已经产生了较大变形, 相应土体产生较大的应变而进入软化阶段。如图 9 所示, 竖向荷载 2000 kN 时, 对于垂直度为 5% 的倾斜桩的右侧土体, 软土地区的土体应变 (图 9 (b)) 大于天津市区地质条件的土体应变 (图 9 (a))。

软土地区土体的水平应力分布规律与天津市区的土体的水平应力分布相似, 只是在数值上略小一些, 限于文章篇幅所限不再绘出。

(4) 桩身弯矩分布

如图 18 所示, 竖向荷载为 2000 kN 时, 对于垂直度为 3%, 5%, 7% 的倾斜桩的桩身的最大弯矩, 在软土地区分别比天津市区地质条件增加了 2.07, 2.21, 6.32 kN · m。

表 3 不同土质计算结果比较

Table 3 Comparison of results for different soils

垂直度/%	桩顶沉降量比竖直桩的增加量(mm)/增加的百分比(%)		桩顶水平位移比垂直度 0.7%桩的增加量(mm)/增加的倍数	
	天津市区地基	开发区软土地基	天津市区地基	开发区软土地基
0.7	9.0/-2.0	9.6/-2.0	—	—
2	9.1/-1.0	9.7/-1.0	0.804/2.8	1.209/2.3
3	9.1/-1.0	9.7/-1.0	1.936/6.8	2.683/5.2
4	9.2/0.4	9.9/3.1	3.395/12.0	4.475/8.6
5	9.4/2.5	10.2/6.3	5.064/17.8	6.426/12.4
7	10.1/9.8	10.9/13.5	9.827/34.6	11.795/22.8
10	12.0/30	13.2/37.5	19.521/68.7	23.637/45.6

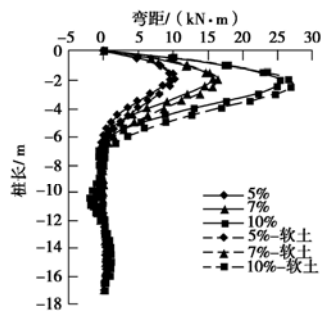


图 18 桩身弯矩

Fig. 18 Bending moments of piles

4 结 论

(1)现场试验结果表明倾斜程度较小的倾斜桩的承载力并不一定随着倾斜程度增加而下降。

(2)有限元分析结果表明,当桩的垂直度不大于4%时,当桩身具有足够的抗弯强度和刚度时,相同荷载下其沉降反而小于竖直桩,

(3)竖向荷载作用下倾斜桩桩身发生了反弯变形。随着倾斜程度增加,相同竖向荷载作用下桩顶的水平位移增大,反弯变形也增加。

(4)由于桩顶水平位移过大导致桩右侧土体产生了过大应变而进入软化阶段,同时桩左侧与土体分离。因此当计算倾斜程度较大倾斜桩的竖向承载力时,应该对桩顶一定长度范围内的桩侧摩阻力进行折减。

(5)随着倾斜程度增加,相同位置处桩身截面弯矩增加。钢筋混凝土桩在弯矩作用下会导致一侧钢筋受拉,倾斜程度足够大时,按竖向受压配筋的桩可能会出现受弯破坏。

(6)承台可以减小桩顶水平位移,对倾斜桩的承载力的发挥是有利的。但承台减小桩身变形和桩截面弯矩的能力受到垂直度的影响。

竖向荷载作用下倾斜桩的极限承载力是由桩顶沉降、桩顶水平位移及桩材料强度共同决定的,应根据具体的地质条件,同时考虑建筑的允许沉降、允许水平位移及桩身强度对倾斜桩的承载力做综合的评价。

此外,由于有限元模拟中采用了库仑摩擦模型,这种模型假定桩侧摩阻力与土体的侧压力成正比,故本文得到的桩侧摩阻力呈三角形分布,这与一些工程

实测中桩侧摩阻力在一定桩长以下基本不再增加的规律有一定差异。但本文所有的模型采用相同的摩擦模型,即在相同的情况下,只考虑桩倾斜程度对桩承载力的影响,因此得到的规律能够反映垂直度变化对桩竖向承载力的影响。

由于有限元提供的库仑摩擦模型存在上述不足之处,笔者正试图通过离心试验对倾斜桩的受力特点做进一步研究。

参考文献:

[1] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 1995 (JGJ94—94 Technical code for building pile foundations[S]. 1995. (in Chinese))

[2] Adel Hanna F, NGUYEN T Q. Shaft resistance of single vertical and batter piles driven in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(7): 601 - 607.

[3] 吕凡任, 陈云敏, 陈仁朋, 等. 任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(2): 191 - 194. (LÜ Fan-ren, CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, et al. Analysis of batter pile under arbitrary inclined loads in semi-infinite solid[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(2): 191 - 194. (in Chinese))

[4] 张根双, 王科智. 工程桩倾斜偏位对桩承载力的影响[J]. 江苏建筑, 2004(97): 39 - 41. (ZHANG Gen-shuang, WANG Ke-zhi. Effect of pile leaning on pile's carrying capacity[J]. Jiangsu Architecture & Construction, 2004(97): 39 - 41. (in Chinese))

[5] 蔡明兴. 倾斜预制方桩的承载力分析及处理[J]. 福建建筑, 2004(90): 71 - 73. (CAI Ming-xing. Bearing capacity analysis & disposal of the declining prefabricate quadrate piles[J]. Fujian Architecture & Construction, 2004(90): 71 - 73. (in Chinese))

[6] KUPFER H B, GERSTLE K H. Behavior of concrete under biaxial stresses[J]. Journal of Engineering Mechanics Division. ASCE. 1973. 99: 853.

[7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Soil mechanics & computation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))