

竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响

郑 刚, 王 丽

(天津大学土木工程系, 天津 300072)

摘 要: 在桩基础设计中通常分别确定单桩的竖向和水平承载力, 而不考虑竖向荷载与水平荷载之间的相互作用对桩承载力的影响, 这显然不能反映桩的真实受力状况。软土地基上建造超高层建筑有时需要采用长度达 80 m 甚至更长的超长桩, 目前考虑超长桩的竖向荷载和水平荷载二者之间相互作用的研究还很少。利用有限元软件 ABAQUS 模拟天津市某工程的 79 m 长桩荷载试验结果, 通过参数调整使有限元计算结果与荷载试验的结果一致, 在此基础上进行仿真模拟, 研究竖向及水平荷载作用下超长桩的荷载传递与变形特点。分析结果表明超长桩表现出与已有文献中的刚性短桩不同的变形特性: 对于承受水平荷载与竖向荷载的桩, 竖向荷载对水平荷载作用下桩的性状的影响与竖向荷载相对于水平荷载的施加顺序、竖向荷载的大小以及土质条件等均有关。就本文算例, 先施加竖向荷载再施加水平荷载时, 存在一个最优的竖向荷载, 在最优竖向荷载作用下, 竖向荷载减小桩顶侧移的有利作用最明显, 且竖向荷载减小桩顶侧移的作用主要表现在水平荷载加载后期, 即水平荷载较大时。在土质条件较好的情况下竖向荷载对桩顶侧移的有利影响不如土质条件较差时那样明显。先施加水平荷载再施加竖向荷载时, 竖向荷载不再起到减小水平荷载作用下桩顶侧移的作用。加载顺序变化对桩水平承载力的影响要大于对桩竖向承载力的影响。

关键词: 竖向荷载; 水平荷载; 相互作用; 最优竖向荷载; 加载顺序

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)12-1796-09

作者简介: 郑 刚(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学及岩土工程教学与科研工作。

E-mail: zhengzige2004@yahoo.com.cn。

Effect of loading level and sequence of vertical and lateral load on bearing capacity of single pile

ZHENG Gang, WANG Li

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

Abstract: It was a common practice to determine the vertical bearing capacity and lateral bearing capacity separately in the design of pile foundations without consideration of the interaction between the vertical load and the lateral load. It would certainly not reflect the real conditions. Piles with the length of 80 m or even longer were usually adopted in the foundations of super-high building in the soft soil area. At present, there were few documents about the interaction between the vertical load and the lateral load for the unusually long piles. Based on modeling the vertical and lateral load-test results of a pile with the length of 79 m, the necessary characteristics of soil for FEM analysis were obtained, and then the bearing capacity and deformation of extra-long piles under the vertical and lateral loads were studied. For piles under the vertical and lateral loads, effects of the vertical loads on the lateral bearing capacity and the deformation varied with the loading sequence of the vertical and lateral loads, the load level and the strength of soil. As far as the piles and loading condition being concerned, there was a critical vertical load under which the lateral deformation was reduced mostly at high loading level when the vertical load was applied before the lateral one. The weaker the soil, the greater the effect of the vertical load on the lateral displacement at the pile top. The vertical load did not help to reduce the lateral displacement at the pile top anymore when it was applied after the lateral load. The effect of loading sequence of the vertical load and lateral loads on the lateral bearing capacity was larger than that on the vertical one.

Key words: vertical load; lateral load; interaction; critical vertical load; loading sequence

0 引 言

桩基础由于有较高的承载力和抵抗变形的能力成

基金项目: 天津市科技创新专项资金项目 (07FDZDSF01200)

收稿日期: 2007-12-20

为软土地区高层建筑的主要基础形式。通常桩基础要同时承受较大的建筑物的自重及风荷载、地震作用。由于同时考虑竖向和水平荷载确定桩基础的承载力是非常复杂的, 目前通常的做法是分别考虑竖向荷载作用下桩的承载力、沉降及水平荷载作用下桩的变形特性, 依据小变形原理将竖向荷载与水平荷载产生的内力叠加, 而不考虑竖向和水平荷载之间的相互作用对桩承载力的影响, 这显然不能反映桩的真实受力状况。

国内外学者对倾斜荷载作用下桩的承载力和变形特点作了初步研究。Karthigeyan 等^[1]利用有限元程序 GEOFEM3D 分析了均匀的砂土及黏土中混凝土方桩桩顶竖向荷载对桩水平承载力的影响, 认为竖向荷载作用下, 砂土中桩的水平承载力得到提高, 黏土中桩的水平承载力下降。Christos Anagnostopoulos 等^[2]通过模型试验研究水平及竖向荷载对黏土中闭口钢管桩承载力的影响。W D Guo 等^[3]通过模型试验研究了上层土体横向运动对桩的弯矩、土反力的影响, 发现当桩顶有竖向荷载作用时, 上层土体运动引起的桩身最大变形、桩的最大弯矩及土反力都明显小于桩顶没有竖向荷载的情况。Meyerhof^[4-6]通过室内模型试验研究均质砂土、均质黏土及分层土中偏心倾斜荷载作用下桩侧土压力分布, 对不同土层的土压力分布进行了假设, 并按照这种假设得到了桩的极限承载力公式。赵明华等^[7-9]利用数值方法和试验手段对倾斜荷载作用下桩的承载力进行研究。郑刚利用非线性有限元方法研究成层土中倾斜荷载作用下桩侧土压力分布, 指出倾斜荷载的竖向分量在土中的扩散可增加桩周土的竖向应力, 减小水平荷载作用下桩周土体单元的主应力差, 从而提高桩周土体强度, 减小土体的侧移。

软土地区超高层建筑常采用长度可达 80 m 或 80 m 以上的超长桩, 竖向及水平荷载共同作用下超长桩的承载力和变形规律有待于研究。本文利用有限元软件 ABAQUS 模拟天津某工程 79 m 长、直径为 1.2 m 的灌注桩的载荷试验。通过参数调整使有限元计算结果与载荷试验结果一致, 在此基础上进行仿真模拟, 研究竖向与水平荷载作用下超长桩的承载力、变形特点。

1 有限元模型参数反演分析

1.1 土体

采用修正剑桥模型 (Modified critical state (clay) plasticity model) 模拟经历加、卸载过程的土体的弹塑性行为。现场试验地质勘察报告提供的土层剖面及土体参数见图 1。土体的黏聚力、摩擦角是通过直剪试验得到的。

由于该工程未对土体进行卸荷试验, 依据土体的

类型、压缩模量及土层深度, 参考天津市其它工程相似土质条件下的剑桥模型参数, 初步确定各土层的 λ , k , M 值, 通过调整这三个参数使有限元计算结果与现场试验一致, 反演得到各土层的最终参数 λ , k , M 值见表 1。

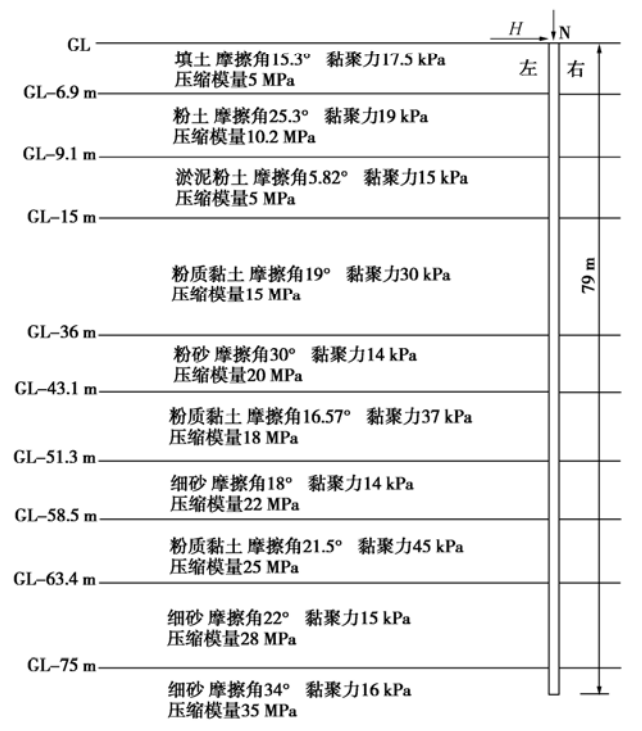


图 1 土层剖面图

Fig. 1 Profile of soils

表 1 剑桥模型的土体参数

Table 1 Parameters for modified critical state (clay) plasticity model

土层	土体类别	λ	κ	M
1	填 土	0.0252	0.0098	0.750
2	粉 土	0.0186	0.0067	0.865
3	淤泥质粉土	0.0960	0.0104	0.900
4	粉质黏土	0.0155	0.0062	0.979
5	粉 砂	0.0105	0.0028	0.979
6	粉质黏土	0.0114	0.0064	1.377
7	细 砂	0.0104	0.0044	1.377
8	粉质黏土	0.0114	0.0044	1.377
9	细 砂	0.0104	0.0042	1.125
10	细 砂	0.0098	0.0039	1.125

1.2 桩

现场载荷试验的桩长 79 m, 直径 1.2 m。采用混凝土损伤模型 (Concrete damaged plasticity) 来模拟桩身混凝土的弹塑性行为。混凝土弹性模量为 3.15×10^4 MPa, 抗压强度为 16.7 MPa。混凝土泊松比为 0.2。

由于在各级荷载作用下钢筋应力都未达到屈服, 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。

1.3 接触面

采用库仑摩擦 (Coulomb friction) 模型来描述接触面间摩擦行为。通过设置接触对来模拟桩、土之间的相互作用, 为了使摩擦接触分析容易收敛, 对于桩、土接触对采用了一个综合的摩擦系数, 通过对单桩载荷试验结果模拟, 反演得到接触面间的摩擦系数为 0.4。

1.4 有限元网格

模型为三维实体模型, 土体的侧向边界限制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。有限元网格见图 2, 土体为半径 25 m 的圆柱体。

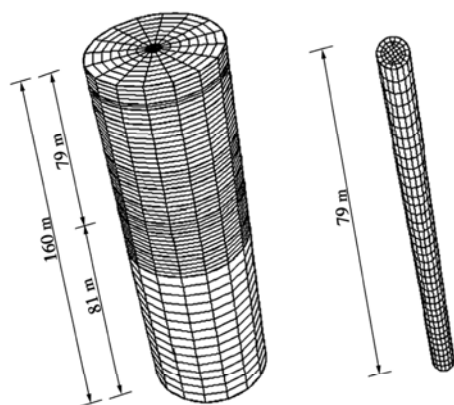


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element meshes

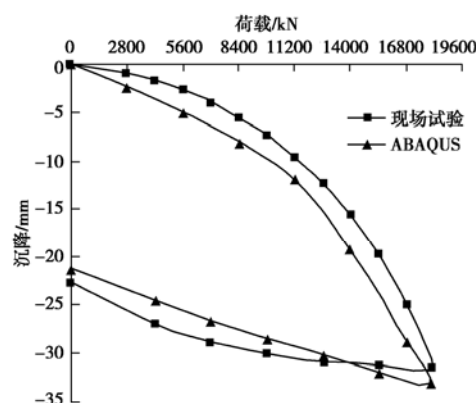
1.5 模拟现场载荷试验结果

现场载荷试验首先进行竖向加载-卸荷试验, 桩顶荷载-沉降曲线见图 3 (a)。进行休止后再在此基础上进行水平加载-卸荷试验, 桩顶荷载-侧移曲线见图 3 (b)。

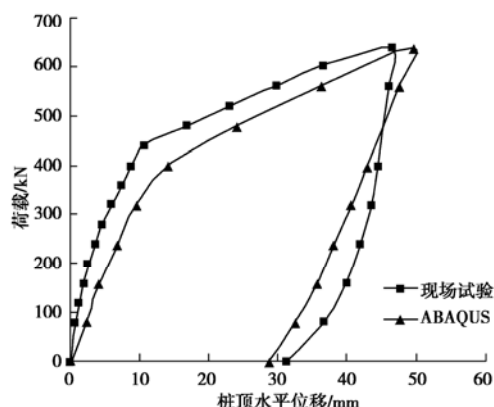
如图 3 所示, 加载阶段有限元计算结果与试验比较吻合。与现场试验不同, 卸载阶段有限元得到的回弹曲线是线性的。这是由于卸载后只有弹性变形能够恢复, 而混凝土回弹时的弹性模量是不变的, 因此回弹曲线必然是线性的。与现场试验不同, 有限元模拟的是理想状态, 即不受到材料不均匀性、现场环境变化、测量仪器精度及人为因素等影响, 因此, 有限元得到的回弹曲线与现场试验测量结果有一定的差别, 但两者在总体趋势及数值上比较接近, 说明有限元计算时所取的上体参数基本上能够反映现场的实际情况。

由于现场试验同时进行了竖向及水平荷载的载荷试验, 因此, 有限元反演得到的土体参数能够反映桩在竖向及水平荷载作用下真实的工作性状。在此基础

上进行了超长桩的仿真模拟。



(a) 竖向载荷试验模拟



(b) 水平载荷试验模拟

图 3 现场试验结果与计算结果的比较

Fig. 3 Comparison of results between field test and FEM

2 竖向荷载对超长桩水平承载力影响

2.1 桩顶侧移

有限元模拟时首先逐级施加上部建筑自重引起的竖向荷载。为了研究桩顶竖向荷载对水平承载力的影响, 取桩顶总竖向荷载分别为 0, 2520, 5040, 7560, 10080 和 12600 kN。此后保持桩顶竖向荷载不变, 逐级施加水平荷载直到桩顶产生较大的侧移, 每级水平荷载为 100 kN。这种变化桩顶竖向荷载再施加水平荷载的过程既可以反映施工不同阶段 (上部竖向荷载逐渐增加同时受到风荷载的影响) 桩的受力情况, 又可以反映竣工后桩基础中分担竖向荷载不同的各个桩的水平承载力。

图 4 (a) 为桩顶作用不同竖向荷载时桩顶水平荷载-侧移图。在各级水平荷载作用下, 桩顶竖向荷载为 5040 kN 时桩顶侧移最小。桩顶竖向荷载为 7560 和 2520 kN 时桩顶侧移十分接近。对于桩顶竖向荷载为 10080 和 12600 kN 的情况, 当桩顶水平荷载分别小于 300, 500 kN 时, 桩顶侧移要大于桩顶没有竖向荷

载作用的情况;但是当水平荷载继续增加,桩顶侧移则小于桩顶没有竖向荷载作用的情况。即当水平荷载较小时,桩顶竖向荷载为 10080 和 12600 kN 时,竖向荷载反而会增大桩顶侧移。

图 4 (b) 为不同水平荷载下桩顶竖向荷载 - 桩顶侧移图。水平荷载加载初期 (200 kN), 桩顶侧移受到桩顶已经施加的竖向荷载的影响较小。加载中期 (400 kN), 桩顶没有竖向荷载和桩顶竖向荷载为 10080, 12600 kN 时的桩顶侧移略大于桩顶竖向荷载介于 2520~7560 kN 的桩顶侧移。加载后期 (600 kN), 桩顶已有竖向荷载对桩顶侧移的影响较为明显, 此时, 桩顶没有竖向荷载时桩顶侧移为 28.9 mm, 桩顶竖向荷载为 5040 kN 时桩顶侧移为 19.1 mm。可见竖向荷载对桩顶侧移的影响主要表现在水平荷载较大的加载后期。

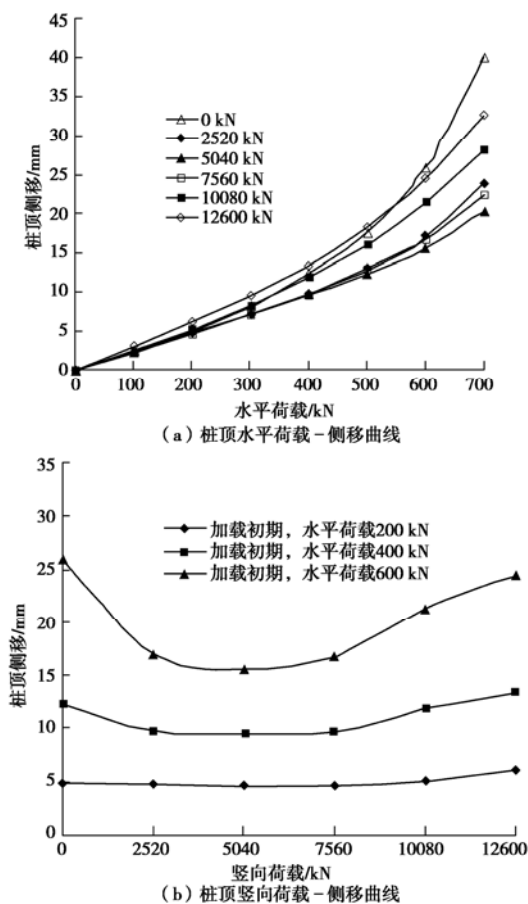


图 4 桩顶作用不同竖向荷载时荷载 - 侧移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of piles under different vertical loads

当水平荷载接近极限荷载时,桩顶竖向荷载为 5040 kN 时竖向荷载减小桩顶侧移的有利作用最明显。随着竖向荷载的增加或减小,竖向荷载减小桩顶侧移的有利作用均减小,即存在一个最优的竖向荷载,在最优竖向荷载作用下竖向荷载减小桩顶侧移的有利

作用最明显。对于本文算例,这个最优竖向荷载为桩竖向极限承载力的 0.4 倍。

综上所述,图 4 结果说明桩顶的竖向荷载对桩顶侧移的影响与桩顶竖向荷载、水平荷载的大小有关。

在相似加载情况下,上述结果与 Karthigeyan^[1]的刚性短桩有限元计算结果有差别。Karthigeyan 等利用有限元程序 GEOFEM3D 分析了均匀的砂土及黏土中桩顶自由的 1.2 m×1.2 m 的混凝土方桩,桩长 10 m,当桩顶分别作用 0.2 V_{ult} , 0.4 V_{ult} , 0.6 V_{ult} 及 0.8 V_{ult} (V_{ult} 为桩的竖向极限承载力) 时对桩顶侧移的影响,认为随着桩顶竖向荷载的增加,均匀砂土中相同水平荷载引起的桩顶侧移减小,而均匀黏土中规律正好相反。

本文有限元计算结果与 Karthigeyan 等^[1]计算结果的差别在于:首先由于桩的长细比不同导致桩、土体系之间的刚度比变化,因此在类似的加载情况下桩的变形特点不同。其次,有限元模拟的土体不是均质土,地面下 43.1 m 范围内主要为填土、粉土、淤泥质粉土、粉质黏土及粉砂,各层土的变形能力不同,桩、土之间的相互作用也要比均质土层复杂。

2.2 桩身侧移

图 5 为水平荷载 700 kN 时桩身侧移分布图,为了将桩顶部的变形差异表达清楚,图 5 中省略了地面下 25 m 以下桩身的变形。

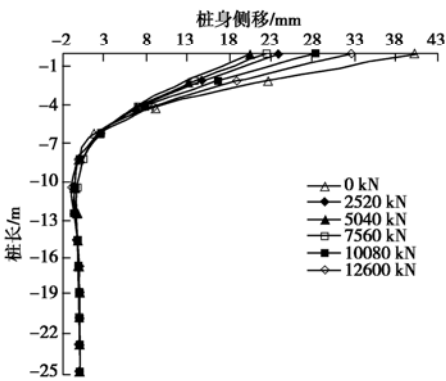


图 5 桩顶作用不同竖向荷载时桩身侧移曲线

Fig. 5 Curves of pile deformation under different vertical loads

桩顶竖向荷载为 5040 kN 时桩身侧移最小。桩顶竖向荷载为 7560 和 2520 kN 时桩身侧移十分接近。桩顶竖向荷载继续增加为 10080 和 12600 kN 时,桩身侧移逐渐接近于桩顶没有竖向荷载的情况。图 5 同样说明了存在一个最优的竖向荷载,此时,竖向荷载减小桩顶侧移的有利作用最明显。

2.3 桩侧摩阻力

图 6 为水平荷载 700 kN 时,桩顶作用不同竖向荷载时桩左、右两侧摩阻力分布图。为了更清楚表达桩右侧顶部侧摩阻力,图 6 (b) 省略了地面下 15 m 以下桩右侧摩阻力。如图 6 所示,对于有竖向荷载的情

况，随着竖向荷载的增加，虽有水平荷载的影响，桩左、右两侧摩阻力均随着竖向荷载增加而增加。

由图 6 (a) 可看出，仅有水平荷载作用时地面下 8.3~20 m 范围内桩右侧摩阻力为负值。这是由于地面下 8.3 m 处桩身发生了向左的反向弯曲，桩右侧土体沉降大于桩的沉降。

仅有水平荷载作用时由于桩身沿水平力作用方向发生较大的位移、挤压土体使桩右侧产生较大的侧摩阻力。因此如图 6 (b) 所示，没有竖向荷载时的桩顶右侧摩阻力介于桩顶的竖向荷载为 7560 和 10080 kN 的桩顶右侧摩阻力之间。

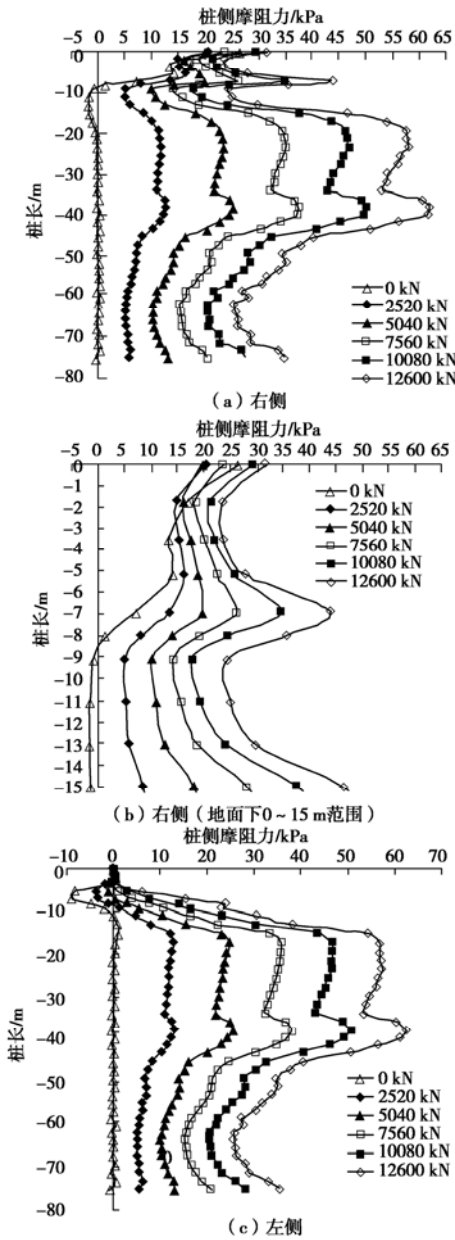


图 6 桩顶作用不同竖向荷载时桩侧摩阻力

Fig. 6 Side resistance of piles under different vertical loads

如图 6 (c) 所示，由于桩顶发生了沿水平作用力方向的侧移，桩左侧与土体脱离而使桩左侧地面下 1.7

m 范围内的侧摩阻力为零。

仅有水平荷载及桩顶荷载较小时 (2520 和 5040 kN)，地面下 3~10 m 范围内桩左侧摩阻力为负值。这是由于反弯点局部范围内左侧土体与桩之间的相对位移导致的。随着桩顶竖向荷载逐渐增大，负摩阻力转化为正摩阻力。

2.4 土中应力、应变

图 7 为水平荷载 700 kN 时，桩顶竖向荷载分别为 5040 和 10080 kN 时地表处桩周土体的水平应力等值线图。

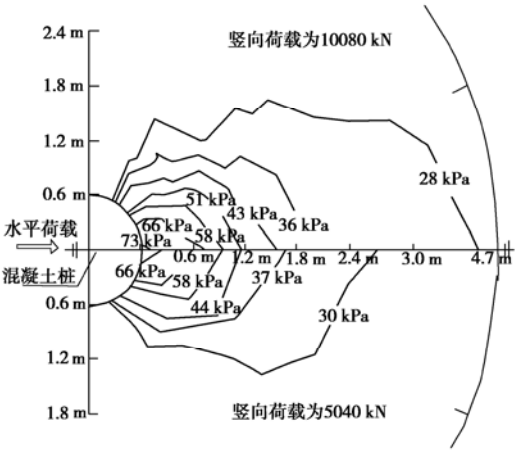


图 7 土中水平应力等值线

Fig. 7 Contours of lateral stress in soil

如图 7 所示桩周土体的水平应力随着桩顶竖向荷载的增加而增加。这与 Karthigeyan 等^[1]认为竖向荷载的有利影响来自于桩顶的竖向荷载会增大桩侧土体的水平应力，从而使桩侧摩阻力增加是一致的。不过，需要注意的是该文献中砂土剪胀角为 12°，竖向荷载作用时，土的剪胀性可增大桩侧法向压力。

2.5 桩身弯矩

图 8 为水平荷载 700 kN 时的桩身弯矩图。桩顶荷载为 5040 kN 时桩身弯矩最小，说明此时竖向荷载的有利作用最明显。

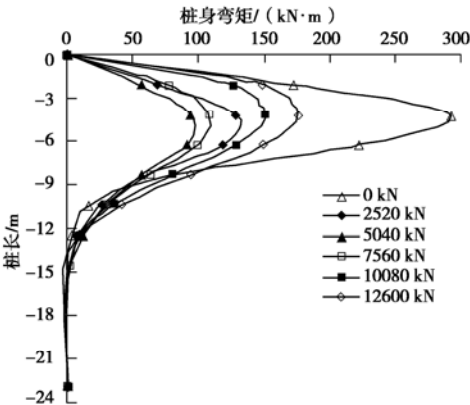


图 8 桩顶作用不同竖向荷载时桩身弯矩图

Fig. 8 Movement of piles under different vertical loads

图 9 为竖向荷载与水平荷载作用时土中水平向应力和桩侧摩阻力的分布示意图。当桩顶有竖向荷载时桩两侧摩阻力随着的竖向荷载增加而增加, 同时水平荷载使桩侧移导致桩两侧摩阻力及土体的水平应力不对称, 桩侧摩阻力及土体的水平应力形成了抵抗力矩, 这对于减小桩身弯矩是有利的。但同时桩侧土体受到较大的挤压力, 部分土体进入了塑性状态 (见图 10), 土体中的应力不变而变形逐渐增加, 这会导致桩顶竖向荷载引起的 $P-\Delta$ 效应增加, 这对于减小桩身弯矩又是不利的。

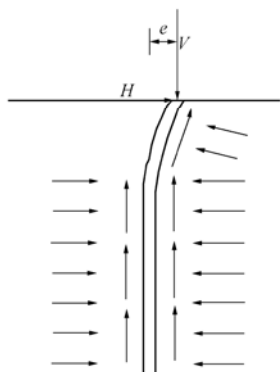


图 9 桩侧摩阻力及土中水平应力
Fig. 9 Side resistance and lateral stress in soil

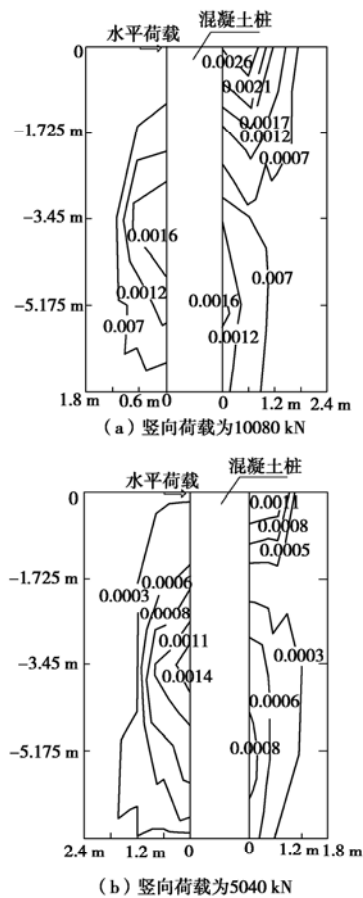


图 10 土中塑性应变等值线
Fig. 10 Contours of plastic strain in soil
这两种作用共同决定了竖向荷载提高桩水平承载

力的能力, 两个作用的影响同时与水平荷载的加载过程有关系。例如图 4 所示, 水平荷载加载初期, 桩顶竖向荷载为 10080 和 12600 N 时的桩顶侧移要大于仅有水平荷载作用时的桩顶侧移。

由上述分析可以发现竖向荷载提高桩的水平承载力的能力受到桩侧摩阻力、土中水平应力、桩身侧移及水平荷载的加载过程等因素的综合影响, 对于超长桩, 存在一个最优的竖向荷载, 此最优竖向荷载提高桩的水平承载力的作用最明显。

2.6 地面下 0~5 m 土体抵抗变形能力提高

在水平荷载作用下, 上部土体的性质对桩的变形影响较大, 当土体抵抗变形的能力提高时, 竖向荷载对超长桩的水平承载力的影响规律是否会发生变化需要探讨。将图 1 中 0~15 m 范围内的土体参数全部取为第 4 层 (-15~-36 m) 的土体参数, 相应在有限元模拟时 λ, k, M 值按照表 1 中第 4 层土取值, 使 0~15 m 范围内的土体的压缩性降低, 强度提高。

图 11 为地面下 15 m 范围内土体抵抗变形能力提高后桩顶侧移与水平荷载、竖向荷载之间的关系。如图 11 所示, 竖向荷载的作用规律与现场土质条件下 (图 4) 的规律十分接近, 仍然存在一个最优的竖向荷载, 最优的竖向荷载仍为极限荷载的 0.4 倍, 竖向荷载对桩顶侧移的影响主要表现在水平荷载较大的加载后期。

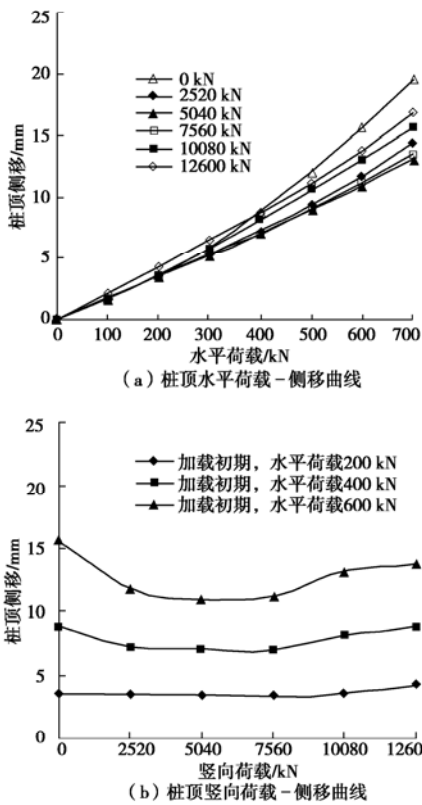


图 11 土质条件改善后的桩顶荷载-侧移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves of piles in improved soil

由于地面下 0~15 m 范围内土体抵抗变形的能力增加,相同水平荷载作用下,变形能力提高的土中桩顶的侧移比原地质条件下的桩顶侧移要小。

同时,相同条件下竖向荷载的有利作用不如原地质条件下明显。例如,当桩顶竖向荷载为 5040 kN,在水平荷载加载后期(600 kN)时,原土质条件下,桩顶侧移比仅有水平荷载时桩顶侧移减小 67%,而土质条件改善时的减小量则仅为 30%。

由此可见,竖向荷载减小水平荷载引起桩顶侧移的能力随着桩侧(特别是桩身上部)土质条件的变化而变化。此算例条件下,在土质条件较好的情况下,竖向荷载对桩顶侧移的有利影响不如土质条件较差时那样明显。

3 加载顺序对超长桩承载力、变形影响

实际工程中,对可能承担竖向荷载和水平荷载的桩,水平荷载、竖向荷载作用的先后顺序可能不同,也可能存在先施加竖向(或水平)荷载至一定水平,然后再施加水平(或竖向)荷载的情况。为了研究竖向及水平荷载的不同加载顺序对超长桩的竖向承载力及桩顶侧移的影响,模拟了表 2 所示 7 种加载顺序,研究竖向荷载、水平荷载不同加载顺序、不同加载水平对桩顶沉降、桩身变位的影响。

表 2 加载顺序

Table 2 Loading sequence		
序号	竖向荷载/kN	水平荷载/kN
1	0~12600	0
2	0	0~500
3	0~5040	0
	5040	0~300
4	5040~12600	300
	0~7560	0
5	7560	0~300
	7560~10080	300
6	10080	300~500
	10080~12600	500
7	0	0~300
8	0~12600	300
	0	0~500
9	0~12600	500
	0~12600	0
10	12600	0~500

表 2 中加载 1、加载 2 分别只施加竖向荷载、水平荷载。加载 3 首先逐级施加竖向荷载到极限荷载的 0.4 倍(5040 kN)后再施加水平荷载至 300 kN,此后保持水平荷载不变继续施加竖向荷载至极限荷载(12600 kN)。加载 4 首先逐级施加竖向荷载到极限荷载的 0.6 倍(7560 kN)后施加水平荷载,然后保持水平荷载 300 kN 不变继续施加竖向荷载至 0.8 倍极限荷载(10080 kN),保持竖向荷载不变增加水平荷载至

500 kN,此后保持水平荷载不变增大竖向荷载至竖向极限荷载(12600 kN)。加载 5、加载 6 首先分别施加水平荷载至 300, 500 kN 后逐级施加竖向荷载至极限值(12600 kN)。加载 7 首先施加竖向荷载至极限值(12600 kN)后施加水平荷载。

表 2 的 7 种加载顺序有的与高层建筑桩基础的受力情况接近(此时水平荷载主要是风荷载),如加载 3、加载 4、加载 7。有的与桥墩桩基础的受力状况相似(此时水平荷载主要是风荷载、波浪产生的水平推力,汽车荷载产生的离心力等),例如加载 5、加载 6。加载 1 代表水平荷载相对与竖向荷载来说可以忽略的情况,加载 2 与加载 1 的情况正好相反。

3.1 水平荷载对竖向承载力、沉降的影响

图 12 为表 2 中各种加载顺序下桩顶的竖向荷载 - 沉降曲线图,桩顶沉降以向下为正。

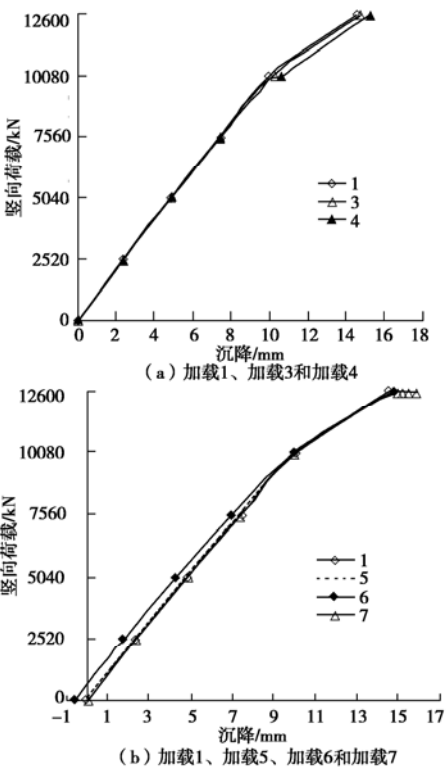


图 12 不同加载顺序的竖向荷载 - 沉降曲线

Fig. 12 Vertical load-settlement curves under different loading sequences

加载 3 当竖向荷载为 5040 kN 后开始施加水平荷载(0~300 kN),水平荷载仅使桩顶沉降量增加了 0.2 mm。此后继续增加竖向荷载(5040~12600 kN)的荷载 - 沉降曲线的形状与加载 1 在 5040~12600 kN 加载阶段的曲线相同。

加载 4 当竖向荷载为 10080 kN 后开始施加水平荷载(300~500 kN),施加水平荷载仅使桩顶沉降量增加了 0.43 mm,此后继续增加竖向荷载(10080~12600 kN)荷载 - 沉降曲线的形状也与加载 1 在 110080~

12600 kN 加载阶段的曲线相同。

加载 5、加载 6 初始施加水平荷载使桩身挠曲变形, 桩顶上拔, 所以初始沉降为负值。

加载 7 当竖向荷载加载到 12600 kN 后施加水平荷载 (100~500 kN), 水平荷载仅使桩顶沉降量增加了 1.3 mm。

综合上述的计算结果可发现, 在竖向荷载加载到极限值之前的任意阶段施加的水平荷载并不会对桩顶的荷载-沉降曲线的形状产生影响, 即桩、土体系的竖向刚度几乎没有变化。各种加载顺序得到的桩顶荷载-沉降曲线的差别很小, 只有当竖向荷载接近极限荷载后再施加的水平荷载才会略增加桩顶沉降量, 例如加载 7 桩顶竖向荷载保持极限荷载不变, 由水平荷载引起的桩顶沉降增加量不超过桩顶总沉降量的 9%。

3.2 竖向荷载对水平承载力、侧移的影响

图 13 为各种加载顺序下桩顶水平荷载-侧移曲线。

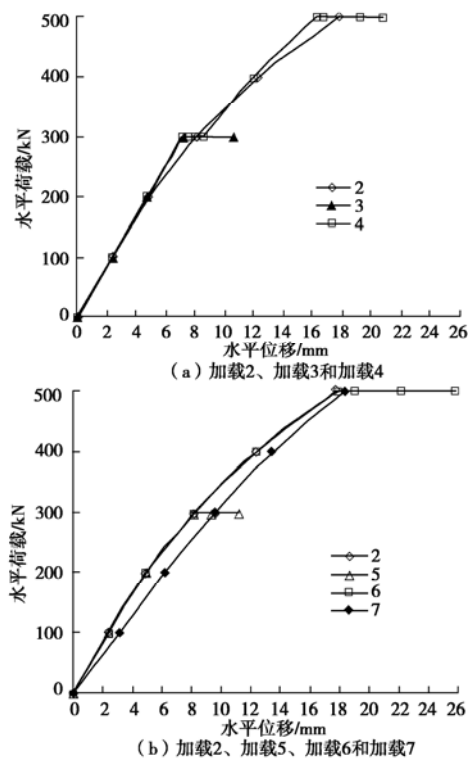


图 13 不同加载顺序桩顶水平荷载-侧移曲线

Fig. 13 Lateral load-displacement curves under different loading sequences

加载 3 首先施加了竖向荷载 (0~5040 kN), 正如前面分析竖向荷载能够减小桩顶侧移, 水平荷载为 300 kN 时加载 3 的桩顶侧移比加载 2 减小了 1.34 mm。由于桩顶的 $P-\Delta$ 效应, 加载 3 此后增加的竖向荷载 (5040~12600 kN) 使桩顶侧移增加了 3.4 mm。

加载 4 首先施加竖向荷载 (0~7560 kN) 然后施加水平荷载 (0~300 kN), 加载 4 桩顶侧移比加载 2 减小了 0.94 mm。保持水平荷载不变继续增加竖向荷

载, 桩顶的 $P-\Delta$ 效应使桩顶的侧移增加, 如图 12 (a) 所示, 当竖向荷载由 7560 kN 增加为 10080 kN 时侧移增加了 1.4 mm。继续增加水平荷载至 500 kN 得到的加载曲线的斜率明显大于没有竖向荷载的加载 2 的加载曲线的斜率, 侧移也相应比加载 2 减小了 1.5 mm。此后增加竖向荷载至 12600 kN, 竖向荷载使桩顶侧移增加了 5 mm。

加载 5、加载 6, 当水平荷载为 300, 500 kN 时, 竖向荷载由 0 增加到 12600 kN 使桩顶侧移增加量分别为 3.1, 7.8 mm。水平荷载越接近极限值时由竖向荷载引起的桩顶侧移越大。

由上述分析可以发现竖向荷载对于减小桩顶侧移是有利的, 但当先施加水平荷载后再施加竖向荷载, 后施加的竖向荷载只会增加桩顶的侧移。

3.3 加载顺序对桩的水平、竖向承载力的影响

加载 6 是先将水平荷载逐级增加到极限值后逐级施加竖向荷载, 加载 7 过程正好相反。加载 6 的最终桩顶侧移比加载 7 增加了 40.4%, 加载 7 的最终沉降比加载 6 增加了 7.5%。

加载 4 是将水平荷载与竖向荷载分 5 个阶段交替加载至极限值, 得到的最终桩顶侧移比加载 7 增加了 13.1%, 最终沉降比加载 6 增加了 3.4%。

由此可以发现加载顺序变化对于桩的水平位移的影响要大于对桩的沉降的影响。

4 结 论

(1) 对于承受水平荷载与竖向荷载的桩, 桩顶竖向荷载对桩在水平荷载作用下的性状的影响与竖向荷载的大小及竖向荷载相对于水平荷载施加的先后顺序等均有关。

(2) 就本文算例, 先施加竖向荷载再施加水平荷载时, 存在一个最优的竖向荷载, 在最优竖向荷载作用下, 竖向荷载减小桩顶侧移的有利作用最明显; 且竖向荷载减小桩顶侧移的有利作用主要表现在水平荷载加载后期。土质条件较好时, 竖向荷载对桩顶侧移的有利影响不如土质条件较差时那样明显。

(3) 竖向荷载的有利影响来自于桩顶的竖向荷载会增大桩侧土体的水平应力及桩侧摩阻力, 降低桩侧土体的主应力差, 从而降低土体的应力水平。

(4) 先施加水平荷载再施加竖向荷载时, 竖向荷载不再起到减小水平荷载引起桩顶侧移的作用。随着竖向荷载增加, 桩顶侧移也会增加。

(5) 加载顺序变化对桩的水平位移的影响要大于对桩的沉降的影响。

参考文献:

- [1] KARTHIGEYAN S, RAMAKRISHNA V V G S T,

- RAJAGOPAL K. Numerical investigation of the effect of vertical load on the lateral response of piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007, 133(5): 512 - 521.
- [2] ANAGNOSTOPOULOS Christos, GEORGIADIS Michael. Interaction of axial and lateral pile responses[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(4): 793 - 79.
- [3] GUO W D, GHEE E H. Behavior of axially loaded pile groups subjected to lateral soil movement[M]// Foundation Analysis and Design: Innovative Methods, 2006: 174 - 181.
- [4] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Flexible piles in layered soil under eccentric and inclined loads[J]. Soils and Foundations, 1999, 39(1): 11 - 20.
- [5] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Behaviour of flexible piles under inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27: 19 - 28.
- [6] MEYERHOF G G, SASTRY V V R N. Bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21: 267 - 276.
- [7] 赵明华, 侯运秋, 单远铭. 倾斜荷载下桥梁桩基的计算与试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(2): 86 - 91. (ZHAO Ming-hua, HOU Yun-qiu, SHAN Yuan-ming. Calculation and model test study on the bridge piles under inclined loads[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 1999, 26(2): 86 - 91. (in Chinese))
- [8] 赵明华, 侯运秋, 曹喜仁. 倾斜荷载下基桩的受力研究[J]. 湖南大学学报, 1997, 24(2): 98 - 109. (ZHAO Ming-hua, HOU Yun-qiu, CAO Xi-ren. Study on the behavior of inclinedly loading pile[J]. Journal of Hunan University, 1997, 24(2): 98 - 109. (in Chinese))
- [9] 赵明华, 邹新军, 邹银生, 等. 倾斜荷载下基桩的改进有限元—有限层分析方法[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 129 - 133. (ZHAO Ming-hua, ZOU Xin-jun, ZOU Yin-sheng, et al. Behavior of piles under inclined loads by the improved finite element-finite layer method[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 129 - 133. (in Chinese))

关于举办 2009 年黄文熙讲座暨黄文熙先生诞辰 100 周年纪念活动和《岩土工程学报》创刊 30 周年学术报告会的通知（第二号）

《岩土工程学报》由我国六个一级学会主办，自 1979 年创刊至今已历经 30 春秋。30 年来，在国内外各界人士的大力支持下，特别是在岩土工程界前辈们辛勤劳动和共同努力下，学报从无到有，从小到大，已经发展成为岩土工程领域有重要影响的学术园地。学报连续多年被评为“百种中国杰出学术期刊”；自 2006 年起连续三年获得了中国科协精品科技期刊工程项目的 B 类资助，是水利、土木、建筑行业唯一得此殊荣的期刊。

在学报而立之年，正值我国岩土工程学科奠基人、学报主要创办者黄文熙先生诞辰 100 周年，为了缅怀先生对我国水利水电和岩土工程事业的重要贡献，更好地促进我国水利水电和岩土工程的各项工作，学报编委会有关负责人经过讨论，并与学报各主办学会协商，拟定于 2009 年 1 月 9~11 日在南京举行 2009 年黄文熙讲座学术报告会，同时举行学报创刊 30 周年和黄文熙先生诞辰 100 周年纪念活动。

本次活动由《岩土工程学报》编委会主办，南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、清华大学、河海大学等单位共同承办，水利部领导届时将出席黄文熙先生诞辰 100 周年纪念活动，殷宗泽、周镜、孙钧、林皋、陈祖煜、郑颖人、吴中如、张建云、M D Bolton、H S Yu 等知名专家应邀将作学术报告。活动期间还将召开学报编委会工作会议，讨论学报的工作并投票选举 2010 年黄文熙讲座主讲人。请《岩土工程学报》第十届编委会全体编委出席会议，邀请学报历届老编委、学报各主办单位代表参加活动，热烈欢迎全国岩土工程界的专

家学者及各有关单位的代表参会。

日程安排：2009 年 1 月 9 日全天注册报到（地点：瑞迪大酒店 1 楼大堂）；2009 年 1 月 10 日上午举行 2009 年黄文熙讲座报告会，下午举行黄文熙先生诞辰 100 周年纪念活动；2009 年 1 月 11 日全天举行《岩土工程学报》创刊 30 周年学术报告会。

会议地点：南京市广州路 225 号南京水利科学研究院水文水资源大楼 12 楼会议厅

住 宿：瑞迪大酒店（南京市广州路 223 号）

交 通：

南京机场：出租车直达（约 130 元），或搭乘机场民航班车（25 元）到终点站星汉大厦下，换乘出租车（9 元）到酒店。

南京火车站：出租车直达（24 元左右），或乘 1 路、33 路公共汽车至珠江路下，换乘 6 路、91 路至省人民医院下。

会议联系：

总负责：蔡正银（电话：025-85829501，13851636805）

秘书处：明经平（电话：025-85829534，13705182312）

李东兵（电话：025-85829500，13851681672）

联系单位：《岩土工程学报》编辑部

南京水利科学研究院岩土工程研究所

传真：025-85829555

E-mail: ge@nhri.cn

（本刊编辑部）