

轴-横向荷载作用下超长桩数值模拟

尹武先¹, 姚文娟¹, 程泽坤²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 轴-横向荷载作用下的桩土相互作用研究主要集中在单层土中的中短桩, 工程设计将水平、竖向荷载作用分开单独考虑. 本文对成层地基中超长桩在轴-横向耦合荷载作用下展开数值模拟研究和试验对比, 结果表明, 轴-横向荷载作用下的超长桩桩-土相互作用主要集中在土体浅部区域, 竖向荷载作用使得桩身弯矩、水平位移减小, 从而提高了桩基础水平承载力; 对于软粘土, 水平荷载能在一定程度上提高超长桩的竖向承载力. 桩侧土与桩端土的变形模量比也是影响超长桩承载性能的重要因素, 两者比值越大, 侧摩阻力占总荷载比例越低. 本文建立的超长桩数值模型计算结果与实测数据吻合较好.

关 键 词: 超长桩; 竖向荷载; 水平荷载; 数值模型; 桩土相互作用

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)02-0015-06

在高层建筑、大型港口和大跨度桥梁工程建设中, 超长桩被广泛应用于承受上部结构自重荷载、风荷载、高填土侧土压力、水流和波浪冲刷力. 该类工程中超长桩桩土相互作用属于典型的水平、竖向荷载耦合作用. 目前桩基础荷载的耦合桩土相互作用研究文献较少, 且大多集中在单层土中的中短桩; 由于耦合荷载下桩土相互作用的复杂性, 工程设计也将横-竖向荷载作用分开考虑. 鉴于此, 对轴-横向荷载作用下成层土中的超长桩桩土相互作用展开研究具有较大的理论和工程实际意义.

单桩和群桩竖向受力特性分析方法主要有地基反力法、弹性理论法和有限单元法; 与竖向荷载研究方法类似, 水平荷载作用下桩基研究方法分为极限状态法、地基反力法、弹性理论法、p-y法和有限单元法. 国内学者如赵明华、李微哲^[1,2]等在m法的基础上采用幂级数解得考虑轴向及横向荷载作用下桩基的解析解, 得出一些有益的结论; 国外学者^[3]通过对铝制微型桩的试验和数值模拟分析, 指出传统的半无限空间法和地基反力法不能考虑水平和竖向荷载耦合时的桩土相互作用. 文献[4]通过建立有限元模型, 对横-竖向荷载耦合作用时的实验数据进行对比分析得出, 对于砂性土, 竖向荷载作用对桩的水平承载能力有较大提高; 而对于粘土, 竖向荷载的增加反而使桩的水平承载性能略有降低. 文献[5,6]利用宏单元考虑桩土受横-竖向荷载时的桩土相互作用, 结果表明横向荷载对桩的竖向承载特性有较大影响, 但竖向荷载对桩的水平承载能力影响较小. 本文通过建立有限元模型, 考虑桩土的脱开效应, 对超长桩在成层粘土中横-竖向耦合荷载作用下的力学特性进行数值模拟, 重点讨论竖向、水平荷载对桩、土体水平和竖向承载力以及桩身弯矩的影响; 桩侧与桩端土体变形模量对超长桩承载特性的影响.

1 模型参数及网格划分

1.1 模型参数

某桩长66 m, 桩身为弹性体, 桩头自由并与土体表面齐平. 采用ABAQUS 6.7建立有限元模型, 土体采

收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579084)

作者简介: 尹武先(1981-), 男, 江西吉安人, 硕士, 主要从事结构与土相互作用及优化设计.

E-mail: yinmeng_2001@yahoo.com.cn

用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,材料参数^[7]见表 1.

表 1 桩和土体参数

Tab. 1 Properties of the pile and soil

类 别	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	重 度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\Phi / (^{\circ})$	剪胀角 $\varphi / (^{\circ})$
桩	2.8×10^4	0.167	23	—	—	—
土	50	0.35	18	3	20	0.1
持力层	50 ~ 5000	0.3	18	0.1	35	10

1.2 网格划分及边界条件

桩身左右及桩端以下土体分别取 20 倍桩径(20 m),土体左右两侧边界分别约束其水平位移,对土体底部边界同时施加水平和竖向约束.单元尺寸、节点和单元体个数通过多次试分析并优化产生.临近地面桩身及桩端部土体网格划分较密,有助于计算收敛并提高计算精度.

1.3 接触面设置

桩土接触面设置点-面接触对,采用摩擦接触惩罚函数算法.在桩土接触面上,对桩和土分别设置 master(主面)和 slave(从面).桩土之间的摩擦角 δ 是影响摩擦桩承载性能的关键因素, Potyondy^[8] 等研究表明:对于粘性土取 $\delta / \varphi = 0.6 \sim 0.7$ 比较合适,文献[9]建议采用 $\delta = \tan^{-1}(\sin \varphi' \times \cos \varphi' / (1 + \sin^2 \varphi'))$ 来计算摩擦角.对于摩擦角范围 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的土体,那么桩土界面的摩擦角 δ 的范围为 $13.2^{\circ} \sim 19.1^{\circ}$,则摩擦系数 $\mu = 0.234 \sim 0.346$.所以在本算例中,取桩土间的摩擦系数 $\mu = 0.3$ 进行分析.

2 计算结果及分析

有限元分析过程分两步:第一步施加初始地应力,桩和对应土层施加相同的材料参数,以防止桩土截面产生额外的剪应力.初始有效应力认为同一土层随深度呈线性变化,土侧压力系数 k_0 取 0.66;第一步分析结束,地应力平衡将使所有土体沉降和应变归零,只剩初始地应力以便于下一步施加外荷载.第二步施加外部荷载,先在桩顶分别施加一较小的水平和竖向荷载以建立稳定的接触关系,加快计算收敛速度.

2.1 桩顶水平和竖向位移

对于特定的桩土参数和横-竖向荷载,桩顶轴向和水平位移分别见表 2 和表 3.由表 2 可见,对于软粘土,竖向位移随横向荷载的增大略有减小,故竖向承载力随水平荷载的增加而有所提高,这与文献[5]所得结论一致.表 3 表明,桩顶水平位移随竖向荷载的增加而略有减小,与文献[5]所得趋势相反.因为文献中桩周土为单层土,且土质较硬;而本文中超长桩桩周、桩端土分为两层土,且土质较软.

表 2 横-竖向荷载作用下桩顶的竖向位移

Tab. 2 Axial displacements at the top of the shaft under multiaxial loads

V / kN	桩顶竖向位移/ cm			
	$H = 0 \text{ kN}$	$H = -200 \text{ kN}$	$H = -300 \text{ kN}$	$H = -400 \text{ kN}$
0	0.0095	0.019	0.031	0.046
400	-0.369	-0.360	-0.348	-0.330
800	-0.746	-0.738	-0.727	-0.713
1200	-1.122	-1.115	-1.105	-1.091
1600	-1.499	-1.493	-1.484	-1.471
2000	-1.874	-1.870	-1.861	-1.849
2400	-2.250	-2.247	-2.239	-2.228
2800	-2.626	-2.623	-2.616	-2.605
3200	-3.002	-3.000	-2.993	-2.983
3600	-3.377	-3.375	-3.337	-3.360
4000	-3.752	-3.750	-3.746	-3.735

表3 横-竖向荷载作用下桩顶横向位移

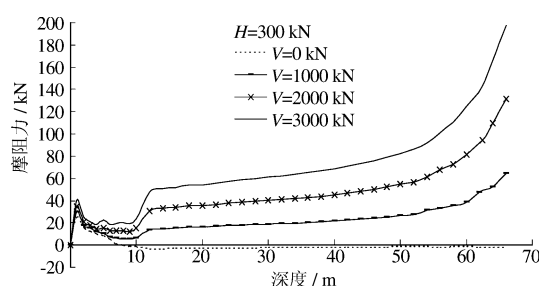
Tab.3 Lateral displacements at the top of the shaft under multiaxial loads

H / kN	桩顶横向位移 / cm			
	$V=0 \text{ kN}$	$V=1000 \text{ kN}$	$V=2000 \text{ kN}$	$V=3000 \text{ kN}$
40	0.189	0.180	0.176	0.173
80	0.388	0.361	0.352	0.345
120	0.598	0.550	0.528	0.518
160	0.816	0.748	0.708	0.691
200	1.040	0.956	0.897	0.866
240	1.272	1.172	1.095	1.047
280	1.508	1.393	1.301	1.236
320	1.749	1.621	1.516	1.434
360	1.993	1.854	1.735	1.639
400	2.240	2.092	1.961	1.852

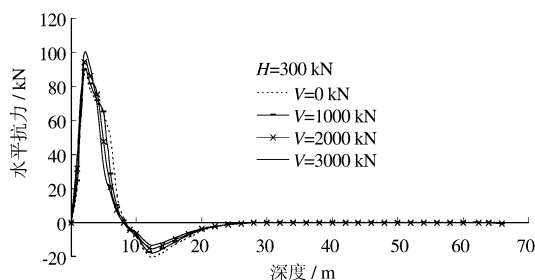
笔者曾对不同 E_b/E_r (桩端土与桩周土变形模量比) 的超长桩进行数值模拟分析, 保持桩周土变形模量不变而增大桩端土变形模量, 发现在桩周土较软的情况下, 当 E_b/E_r 大于 100 时, 桩顶水平位移随竖向荷载的增加而增大, 竖向荷载对水平位移的影响与文献[5] 所得结果趋势一致。

2.2 竖向荷载变化的桩土响应

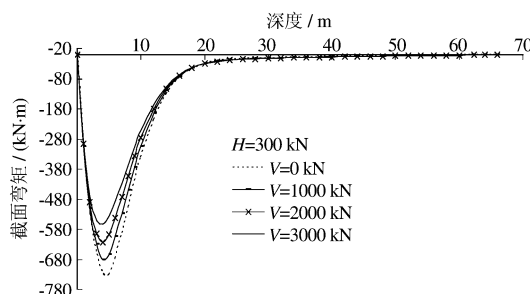
图 1(a) 表明在特定水平荷载作用下, 桩身侧摩阻力在桩顶 10 m 以下随竖向荷载的增加有大幅提高, 10 m 以上无明显变化。图 1(b) 表明, 土体水平抗力对竖向荷载的影响不大。不同竖向荷载作用下的桩土相互作用集中在距桩顶 0 ~ 26 m 之间。由图 1(c) 可见桩身弯矩随竖向荷载的增加而减小, 峰值集中在距桩顶 2 m 左右, 20 m 处回归于相对小值。



(a) 桩身侧摩阻力分布



(b) 土体水平抗力分布



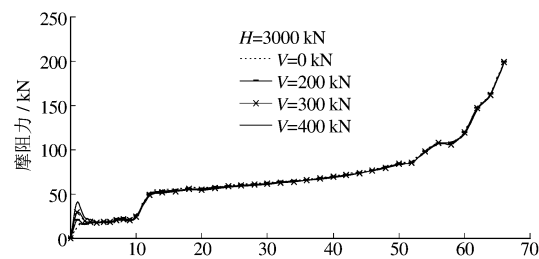
(c) 桩身截面弯矩分布

图1 不同轴向荷载作用下桩身侧摩阻力、土体水平抗力及桩身截面弯矩分布

Fig.1 Distribution of pile skin friction, lateral resistance of soil and bending moments under different vertical loads

2.3 横向荷载的桩土响应

不同水平荷载作用下桩身侧摩阻力、土体水平抗力及桩身截面弯矩分布见图 2。可见, 竖向荷载一定时, 桩身浅部侧摩阻力随水平荷载增大有小幅上升, 并在距离桩顶 1 m 处达到峰值, 但 5 m 以下侧摩阻力基本保持不变; 图 2(b) 表明土体水平抗力随水平荷载的增加增幅明显; 且均在距土体表面 1 m 附近达到正的峰值, 8 m 处形成一个正负分界的驻点, 均在 24 m 处回归于一相对小值; 图 2(c) 表明桩身弯矩随水平



(a) 桩身侧摩阻力分布

荷载的增加有较大增长,且均在距离桩顶 5 m 处到达峰值,30 m 处回归于一相对小值。

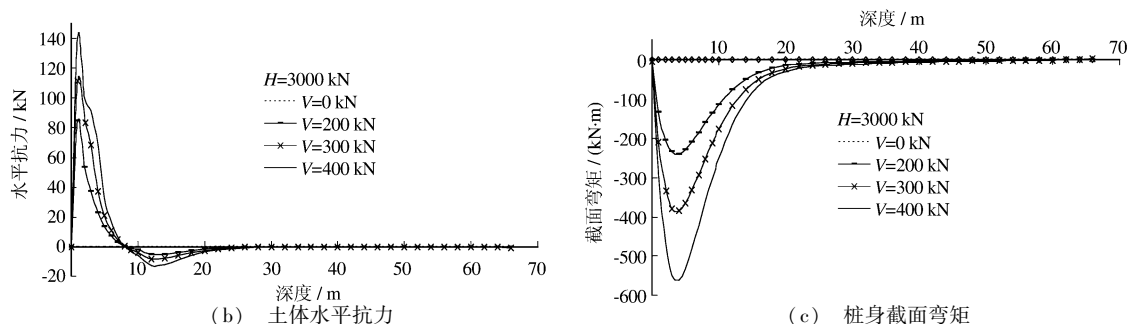


图 2 不同水平荷载作用下桩身侧摩阻力、土体水平抗力及桩身截面弯矩分布

Fig. 2 Distribution of pile skin friction, lateral resistance of soil and bending moments under different lateral loads

2.4 参数分析

当外荷载一定时,保持桩周土变形模量不变而增大桩端土变形模量,桩身轴力分布随 E_b/E_r 值的增大呈明显衰减趋势(见图 3). 当 $E_b/E_r=1$ 时,侧摩阻力占竖向总荷载的 83.7%,为典型摩擦桩;而当 $E_b/E_r=100$ 时,桩端阻力占竖向总荷载的 84.7%,为典型端承桩。

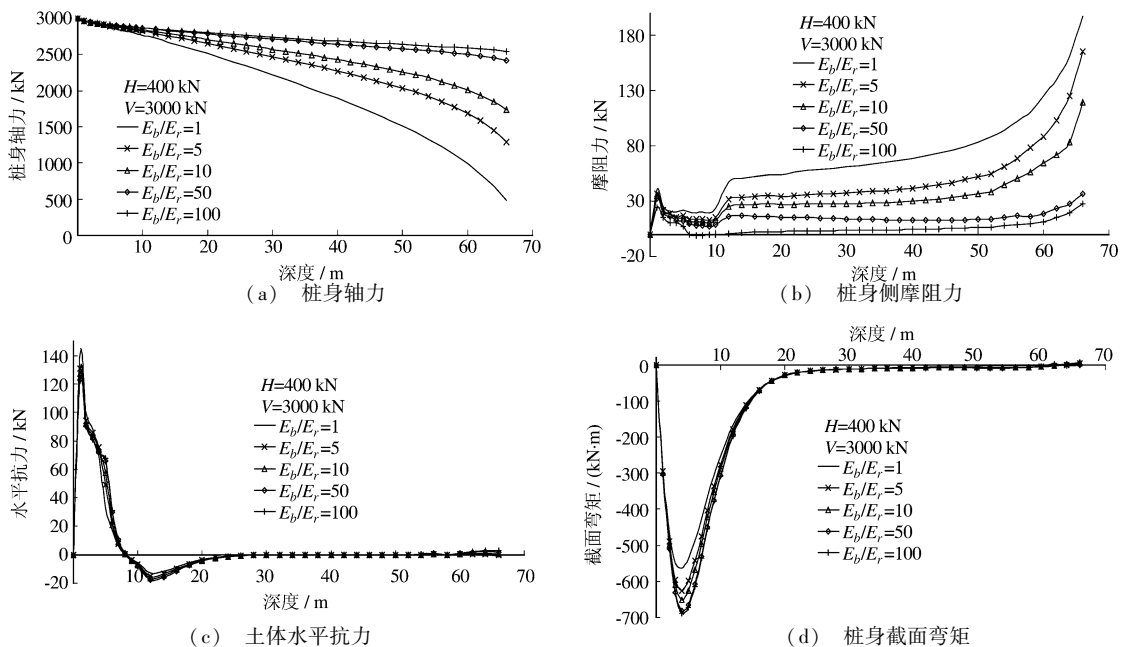


图 3 不同 E_b/E_r 值下桩身轴力、桩身侧摩阻力、土体水平抗力及桩身截面弯矩分布

Fig. 3 Distribution of axial force of pile, pile skin friction, lateral resistance of soil and bending moments with various values of E_b/E_r

3 模型验证

【1】实例 1 试桩^[10]桩长 3 m, 桩径 600 mm, 土体为两层, 上部硬砂土层厚 6 m, 下卧砂性粘土厚度为 7 m. 上层土抗剪强度参数为 $c=18$ kPa, $\Phi=18^\circ$; 下层土抗剪强度参数 $c=24$ kPa, $\Phi=14^\circ$, 上下土层变形模量和泊松比分别为 30 000 kPa, 0.32 和 20 000 kPa, 0.40, 两层土剪胀角均为零. 土体采用 Mohr-Coulomb 模型, 加载顺序为先施加竖向荷载, 再分级施加水平荷载, 三维弹塑性有限元计算结果与试桩数据比较见图 4. 可见, 计算结果与试验数据吻合较好。

【2】 实 例 2 本例通过一个桥墩的灌注桩试验^[11](Comodromos)对本文建立模型进行进一步验证,土层参数详见表4.通过建立三维有限元模型,土体采用 Druker-Prager 本构模型,在桩顶中心位置分级施加水平荷载.计算与实测结果比较见图5.可见,传统的 p-y 曲线法所得桩顶水平位移偏大且与实测值有较大误差,本文三维非线性弹塑性有限元计算结果更接近于实测值.

表 4 桩和土体参数

Tab. 4 Properties of the pile and soil

土 层	层底标高 / m	剪切模量 G / MPa	摩擦角 Φ / °	剪胀角 φ / °	不排水抗剪强度 c_u / kPa	重 度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
A	-36	2.475	0	10	22.5	20.0
B	-48	3.35	0	0	110	20.0
C1	-52	24.0	40	0	0	22.0
C2	-70	24.0	40	12	0	22.0

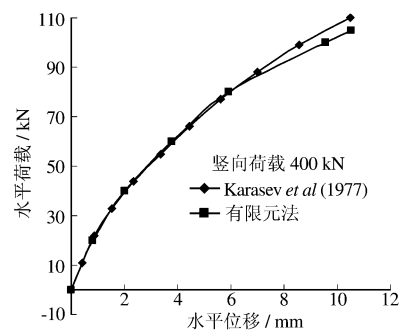


图 4 有限元计算与实测数据比较

Fig. 4 Comparison between the calculated results and the measured data

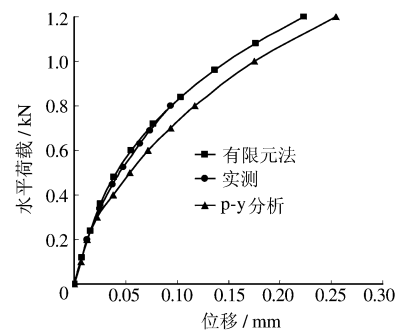


图 5 计算与实测及 p-y 法结果比较

Fig. 5 Comparison of finite element results with the measured and p-y data of comodromos

4 结 语

本文针对成层软粘土中超长桩基础在横-竖向荷载作用下的桩土相互作用,建立了桩土相互作用数值模型,考虑桩土脱离效应,并通过改变桩端与桩周土体变形模量的比值来研究其对超长桩的力学特性的影响,主要得出以下结论:

- (1) 水平荷载的作用对超长桩竖向承载力有一定提高;竖向荷载能限制超长桩周土体的水平位移,在一定程度上增大了超长桩基础的水平承载力;
- (2) 超长桩侧摩阻力主要由桩顶竖向荷载激发,桩顶水平荷载只对桩身浅部侧摩阻力有影响;
- (3) 在横-竖向荷载作用下,超长桩桩身弯矩、土体水平抗力主要集中在桩身和土体浅部位置;当桩身尺寸和土体参数一定时,桩身弯矩和土体抗力的峰值和驻点位置不随外荷载的变化而改变.建议在工程设计时,对横-竖向耦合作用的超长桩浅部桩周土体以及桩身的特定位置进行补强,以使桩身弯矩和土体应力能往较深处传递,防止桩身局部破坏和土体屈服破坏;
- (4) 桩身弯矩随竖向荷载的增大而减小,随水平荷载的增大而增大,就单位荷载对桩身弯矩的贡献而言,水平荷载的贡献明显大于竖向荷载;
- (5) 当超长桩顶作用一定水平和竖向荷载时,桩端土与桩周土体变形模量比的变化对超长桩身轴力、侧摩阻力影响显著,两者比值越大侧摩阻力越低;
- (6) 计算结果与实测结果比较表明,非线性有限元模型能较好地模拟超长桩桩土之间的相互作用,而传统的地基反力法和弹性半空间法难以分析超长桩复杂的桩土相互作用.

参 考 文 献:

- [1] 赵明华, 李微哲, 杨明辉, 等. 成层地基中倾斜偏心荷载下单桩计算分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 670-674. (ZHAO Ming-hua, LI Wei-zhe, YANG Ming-hui, *et al.* Analysis of single piles under eccentric and inclined loads in layered soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 670-674. (in Chinese))
- [2] 李微哲, 赵明华, 单远铭, 等. 倾斜偏心荷载下基桩内力位移分析[J]. 中南公路工程, 2005, 30(3): 53-57. (LI Wei-zhe, ZHAO Ming-hua, SHAN Yuan-ming, *et al.* Analysis of single pile under eccentric and inclined loading[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(3): 53-57. (in Chinese))
- [3] Anagnostopoulos C, Georgiadis M. Interaction of axial and lateral pile responses[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(4): 793-798.
- [4] Karthigeyanl S, Tramakrishna V V G S, Rajagopal K. Numerical investigation of the effect of vertical load on the lateral response of piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(5): 512-521.
- [5] Ertugrul Taciroglu, ChangSoon Rha, John W Wallace. A robust macroelement model for soil-pile interaction under cyclic loads [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(10): 1304-1314.
- [6] Changsoon Rha, Ertugrul Taciroglu. Coupled macroelement model of soil-structure interaction in deep foundations[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2007, 133(12): 1326-1340.
- [7] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. (WANG Jin-chang, CHEN Ye-kai. Application of ABAQUS on Civil Engineering[M]. Hanzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese))
- [8] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.
- [9] Randolph MF, Wroth C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. Geotechnique, 1981, 31(1): 143-150.
- [10] Karasev OV, Talanov GP, Benda SF. Investigation of the work of single situ-cast piles under different load combinations[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering (Translated from Russian), 1977, 14(3): 173.
- [11] Comodromos EM. Response prediction for horizontally loaded pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29: 597-625.

Numerical investigation on interaction of axial and lateral response for super-long pile

YIN Wu-xian¹, YAO Wen-juan¹, CHENG Ze-kun²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Research on the soil-pile interaction under vertical and lateral loads is currently focused on the short or middle-long piles in homogeneous soil; the current practice for design of piles is to consider the vertical and lateral loads independent of each other. The principal objective of this paper is the development and validation of a series of models for soil-pile interaction under simultaneously applied lateral and vertical loads. The results show that the presence of vertical loads decreases the lateral displacements and bending moments of the super-long pile; for soft clay, the action of lateral loads increases the vertical bearing capacity of super-long pile. The Young's modulus rate between the soil of pile bottom and surrounding area of pile is a sensitive factor for the variation of bearing capacity of super-long pile, and as the rate increases, the vertical bearing capacity decreases significantly. Finally, two three-dimensional models are developed and the computing results by these two models are compared with the test curves. The calculated results agree well with the filed test data.

Key words: super-long pile; vertical loads, lateral loads; numerical model; pile-soil interaction