

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.016

林骁骋, 姚文娟. 边载和水平荷载作用下超长桩承载性状数值分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 107-115. (LIN Xiao-cheng, YAO Wen-juan. Numerical analysis of bearing capacity of super long pile subjected to side and lateral loads[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 107-115.)

边载和水平荷载作用下超长桩承载性状数值分析

林骁骋, 姚文娟

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘要: 采用有限元法, 建立超长桩和土体共同作用的三维数值模型, 研究受边载和水平荷载共同作用下超长桩的承载特性, 分析超长桩侧摩阻力和桩身弯矩的变化规律。结果表明: 水平荷载与边载比值 k 的增大可以有效改善桩侧负摩阻力, 并且存在最优比值 $k=4$ 。桩侧负摩阻力和桩身弯矩随着长径比的减小而减小; 存在临界边载距离 $s=8$ m, 当边载距离 $s<8$ m 时, 桩身负摩阻力随着边载距离的增大而减小, 当 $s>8$ m 时, 边载对桩身负摩阻力几乎无影响。桩土刚度比的减小可有效提高超长桩承载力。同时应用多元非线性回归分析, 得到最小桩侧摩阻力随不同因素变化的函数关系式。根据该式可预测不同因素组合下的最小桩侧摩阻力, 有效避免桩侧负摩阻力的产生。

关键词: 超长桩; 边载; 水平荷载; 侧摩阻力; 桩土刚度比; 多元非线性回归分析

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)01-0107-09

国内外不少学者对桩基负摩阻力和承载性能进行了研究, 取得了一定进展^[1]。E. L. Matyas 等^[2]论证了桩身中性面的存在, 中性面的位置取决于桩周土体的固结程度。Yao Wen-juan 等^[3]对受轴对称堆载作用的超长桩进行研究, 得到桩身轴力和负摩阻力的变化规律。H. William 等^[4]的研究表明桩土刚度比、桩长细比和成层土剪切模量等因素对水平受荷桩基的侧移产生较大影响。R. Shivani 等^[5]对水平受荷桩在不同土体中的承载机理进行了理论分析, 提出了土体等效侧向应变的概念。赵明华等^[6]采用横向各向同性弹性半空间地基模型, 利用有限元-有限层法, 提出了横、轴向荷载共同作用下桥梁基桩的受力分析方法。郑刚等^[7]学者利用 ABAQUS 对超长桩进行了数值模拟分析, 指出竖向荷载可减少水平受荷超长桩的侧移, 并且存在最优竖向荷载。聂如松等^[8]研究发现, 负摩阻力对桩基造成的下拽沉降由桩顶沉降、中性点位置下移及桩身压缩引起。姚文娟等^[9-10]对不同工况下桩基进行了数值分析, 研究了边载大小, 边载距离和桩长等对桩侧负摩阻力的影响。

以上研究多针对普通桩基, 且往往单独考虑水平荷载或边载作用。鉴于此, 本文综合考虑边载与水平荷载共同作用下, 成层土中超长桩的承载性状, 尤其是对超长桩桩身侧摩阻力进行了分析, 并且分析影响超长桩承载性状的各因素之间的关系。

1 有限元模型

1.1 模型建立

本文采用有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析。根据上海软土土层特性, 将土层简化为 5 层, 采用修正剑桥模型模拟土体的弹塑性性状。模型中超长桩桩径 1 m, 桩长 60 m, 桩头自由与土体表面齐平, 置于成层

收稿日期: 2015-04-22

作者简介: 林骁骋(1990—), 男, 上海人, 硕士, 主要从事超长桩承载性状、桩土相互作用等研究。

E-mail: lxc1108lxc@163.com 通信作者: 姚文娟(E-mail: wenjuan@mail.shu.edu.cn)

土中。桩身材料为混凝土,故选用理想弹性材料,桩土参数见表 1。根据修正剑桥模型要求,桩土单元类型均为 C3D8I 单元^[11]。桩侧土体宽度取 20 倍桩径,桩端下土体取 1 倍桩长。桩土模型网格划分见图 1。

表 1 桩土参数

Tab. 1 Parameters of pile and soil

类别	土层厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	λ	κ	M	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
褐黄色黏土	3.3	5	0.35	0.083	0.008	0.74	1 790
淤泥质黏土	6.7	7.5	0.35	0.127	0.018	0.884	1 790
灰色黏土	20.8	18	0.35	0.115	0.01	0.984	1 900
粉砂	39.4	30	0.3	0.101	0.02	1.15	1 840
粗砂	49.8	35	0.25	0.189	0.02	1.418	2 000
桩		3×10^4	0.17				2 300

1.2 桩土接触及边界条件

为了真实地模拟桩土之间的相对滑动,在桩土界面处设置主-从接触,定义桩为主面,土为从面,采用库伦摩擦模型来描述接触面间的摩擦行为。综合考虑土层特性,取摩擦系数 $\mu=0.3$ 。土体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。

1.3 模型加载及验证

为了研究水平荷载、边载大小和边载距离对超长桩承载性状的影响,取不同水平荷载(0~1 200 kPa)以等效集中力形式作用于桩顶、不同边载(10~200 KPa)和不同边载距离(2~10 m)进行计算分析。在超长桩一侧土体表面施加边载,边载施加见图 2。

为了验证模型建立方法的有效性,选用佛山市某现场试验实例^[12]进行模拟。本文选取 3 号桩进行分析,有限元模拟值和试验值对比见图 3。模拟的水平荷载作用下桩顶侧移与试验值有少许误差,变化趋势基本一致,可见本文的数值模型准确性较高。

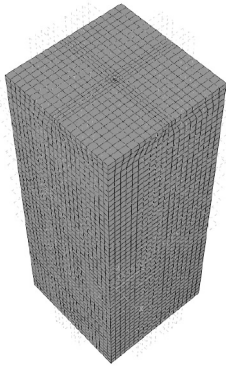


图 1 模型网格划分
Fig. 1 Mesh of model

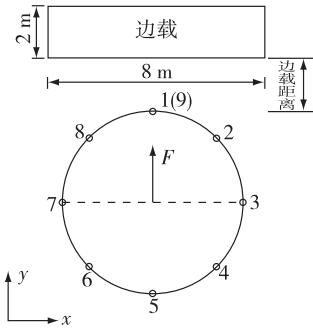


图 2 边载施加
Fig. 2 Area of side load

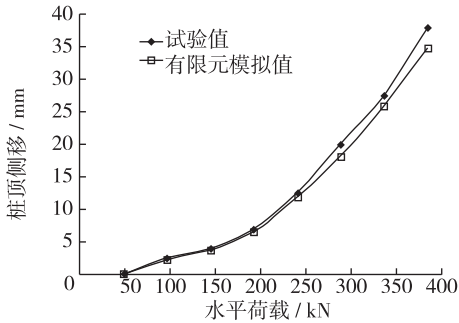


图 3 试验值与有限元计算结果对比
Fig. 3 Comparison between test results and calculated values by FEM

2 计算结果与分析

以水平荷载与边载大小比值 $k=0.67$,边载距离 4 m 和桩长径比 $L/D=60$ 为例,模拟得到桩侧摩阻力(平行于桩轴线方向)沿深度和桩周的变化情况见图 4 和 5。

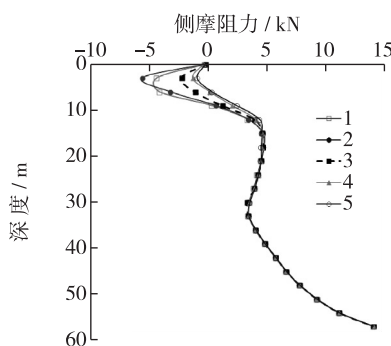


图4 桩侧摩阻力沿深度分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of skin friction of pile

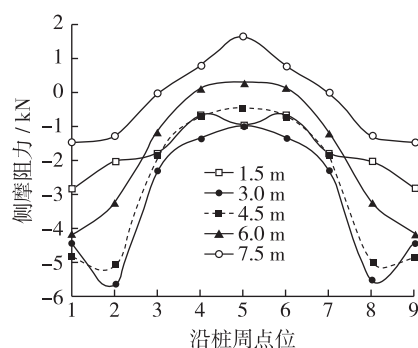


图5 桩侧摩阻力沿桩环向分布曲线

Fig. 5 Circumferential distribution curves of skin friction of pile

由图4和5可知,负摩阻力主要分布在桩身0~9 m范围内,且先变大后变小,最大值出现在3 m处,桩身受到的下拽作用最明显。这是因为在边载和水平荷载作用下,桩周软弱土层下沉量大于桩身沉降量,而在3 m处桩身水平位移最大,使得桩受到的法向土反力最大,从而导致该位置处负摩阻力出现极值。

侧摩阻力沿桩环向分布不均匀,但大致呈对称分布,离边载近侧负摩阻力较大,远侧较小。且在2号轴和8号轴受到负摩阻力最大,在5号轴最先出现正摩阻力。桩身下部侧摩阻力逐渐增大(如图4所示),为超长桩提供了竖向承载力。

2.1 水平荷载与边载大小比值对超长桩承载性状的影响分析

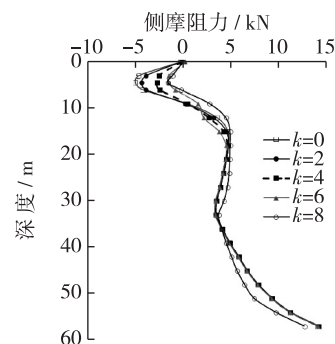
保持桩长径比 $L/D=60$ 、边载大小 150 kPa 和边载距离 4 m 不变,水平荷载与边载大小的比值 k 由 0 增加到 8。

由图6可见,随着比值 k 增大,桩侧上部负摩阻力明显减小,负摩阻力分布范围也相应减小,中性面位置逐渐上升,说明桩周土相对于桩的沉降位移变小,超长桩竖向承载力提高。表明在边载作用下,水平荷载的增大对边载起到了抑制作用。随着比值 k 增大,桩身下部正摩阻力逐渐增大,侧摩阻力曲线基本重叠在一起,表明比值 k 的变化对超长桩桩身下部的正摩阻力发挥几乎没有影响。

由图7可见,随着比值 k 增大,桩身最大负摩阻力减小。当 $k < 4$ 时,曲线斜率变大,水平荷载对负摩阻力的削弱作用明显。当 $k > 4$ 时,曲线斜率变小,水平荷载对负摩阻力的削弱作用减小。

图7和8为桩身弯矩和桩身最大弯矩随比值 k 的变化曲线。由图8可见,桩身弯矩主要分布在离桩顶 24 m 范围内。随着比值 k 增大,桩身上段弯矩逐渐增大,反弯点位置逐渐降低,而比值 k 对桩身下段弯矩没有明显影响。由图7可见,当 $k < 4$ 时,曲线斜率较小,水平荷载对桩身弯矩的增大作用较小,桩身弯矩处于较低水平。当 $k > 4$ 时,曲线斜率较大,水平荷载对桩身弯矩的增大作用较明显。综合考虑水平荷载与边载大小比值对负摩阻力、弯矩的影响,发现本列中存在最优比值 $k=4$,使得超长桩在桩身弯矩较小情况下,负摩阻力明显得到改善,超长桩承载力提高。

由图9可见,侧摩阻力沿桩环向分布不均匀,但关于 Y 轴大致呈对称分布。随着比值 k 的增大,桩周各点负摩阻力减小,正摩阻力增大。同样表明在边载作用下,水平荷载的增大对负摩阻力的减小起到了有利用作用,超长桩竖向承载力提高。

图6 不同比值 k 下桩侧摩阻力沿深度分布曲线Fig. 6 Distribution curves of skin friction of pile under different k

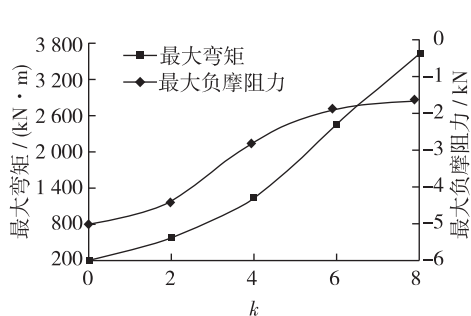


图 7 桩侧最大负摩阻力和桩身最大弯矩随比值 k 变化曲线

Fig. 7 Curves of maximum negative skin friction and maximum moment with change of k

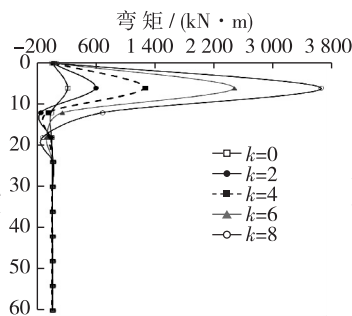


图 8 不同比值 k 下弯矩沿深度分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of moment of pile under different k

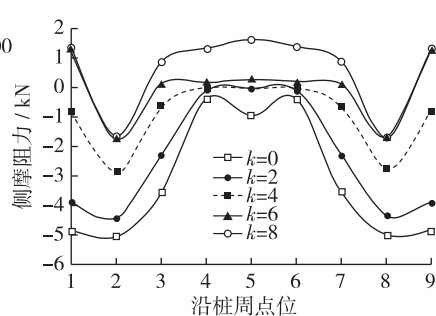


图 9 不同比值 k 下桩侧摩阻力沿桩环向分布曲线

Fig. 9 Circumferential distribution curves of skin friction of pile under different k

2.2 边载距离对超长桩承载性状的影响分析

保持水平荷载与边载大小比值 $k=0.67$ 和桩长径比 $L/D=60$ 不变,边距 s 由 2 m 增加到 10 m。

由图 10 可见,随着边载距离增大,桩侧上部负摩阻力明显减小,而中性面位置没有明显变化。表明在边载和水平荷载共同作用下,负摩阻力随着边载距离的增大而减小,超长桩竖向承载力提高。桩身上部正摩阻力随着边载距离的增大而逐渐减小,这是因为在水平荷载和边载共同作用下,随着边载距离增大,该处桩土挤压作用变小,正摩阻力变小。而桩身 30~60 m 区域侧摩阻力曲线基本重叠在一起,表明边载距离的变化对超长桩桩身下部的正摩阻力发挥几乎没有影响。

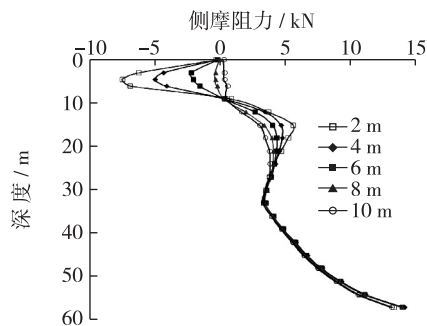


图 10 不同边载距离下桩侧摩阻力沿深度分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of skin friction of pile under different s

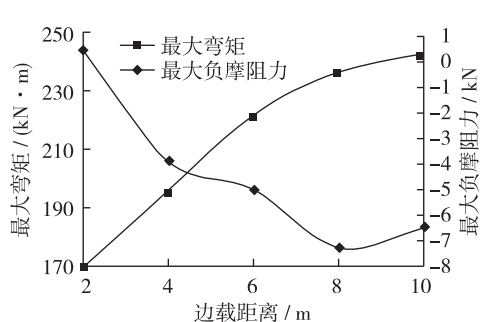


图 11 桩侧最大负摩阻力和桩身最大弯矩随边载距离变化曲线

Fig. 11 Curves of maximum negative skin friction and maximum moment with change of s

由图 11 可见,桩身最大负摩阻力随着边载距离的增大而减小,其曲线呈非线性递减趋势,曲线斜率越来越小。表明超长桩最大负摩阻力并不是随边载距离增大而一直减小的,存在一临界边载距离,当边载距离超过这个值时最大负摩阻力将不再减小或减小很慢,边载效应减弱。

图 11 和图 12 为桩身弯矩和桩身最大弯矩随边载距离的变化曲线。由图 12 可知,桩身弯矩主要分布在桩顶 24 m 范围内。随着边载距离增大,桩身上段弯矩逐渐减小,反弯点位置没有明显变化,而边载距离对桩身下段弯矩没有明显影响。

由图 11 可知,桩身最大弯矩随边载距离的增大而先减后增,当 $s=8$ m 时桩身极限弯矩最小。综合考虑边载距离对负摩阻力和弯矩的影响,发现存在临界边载距离 $s=8$ m,使得超长桩在边载和水平荷载的共同作用下,负摩阻力明显得到改善,桩身弯矩最小,超长桩承载力得到提高。

由图 13 可见,随着边载距离的增大,桩周环向对应的各点负摩阻力减小,正摩阻力增大。同样表明,边

载距离的增大对负摩阻力的减小起到了有利作用,超长桩竖向承载力提高。

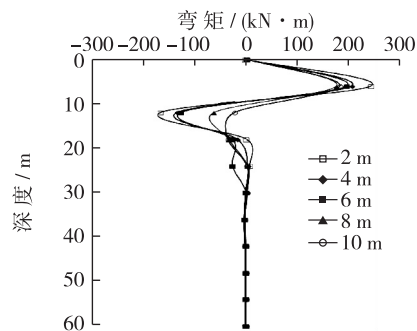


图 12 不同边载距离下弯矩沿深度分布曲线

Fig. 12 Distribution curves of moment of pile under different s

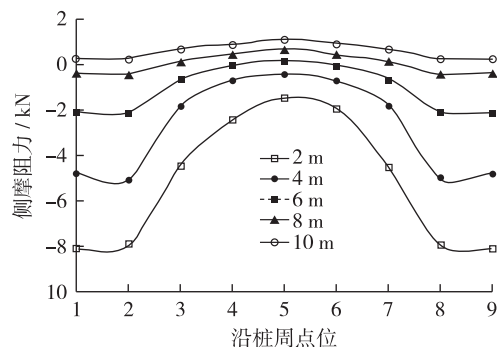


图 13 不同边载距离下桩侧摩阻力沿桩环向分布曲线

Fig. 13 Circumferential distribution curves of skin friction of pile under different s

2.3 长径比对超长桩承载性状的影响分析

保持水平荷载与边载大小比值 $k=0.67$ 和边载距离 4 m 不变,桩长径比由 40 增大到 60。由图 14 和 15 可见,随着长径比减小,桩侧上部负摩阻力逐渐减小,其减小曲线呈非线性,但减小速率趋缓。桩侧下部正摩阻力逐渐增大,而中性面位置没有明显变化。由图 15 和图 16 可见,桩身弯矩随着长径比的减小而减小,其减小曲线呈非线性,但减小速率趋缓。由图 17 可见,侧摩阻力沿桩周的分布情况,随着长径比减小,桩周负摩阻力减小,正摩阻力增大。

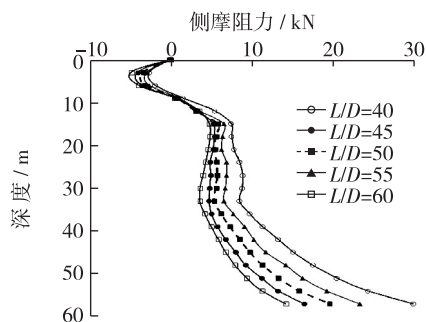


图 14 不同长径比下桩侧摩阻力沿深度分布曲线

Fig. 14 Distribution curves of skin friction of pile under different L/D

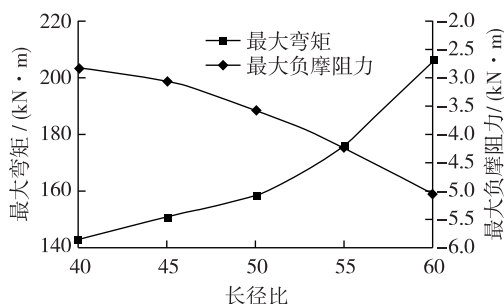


图 15 桩侧最大负摩阻力随长径比变化曲线

Fig. 15 Curves of maximum negative skin friction with change of L/D

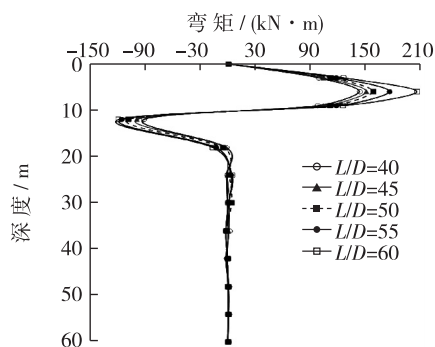


图 16 不同长径比下桩身弯矩沿深度分布曲线

Fig. 16 Distribution curves of moment of pile under different L/D

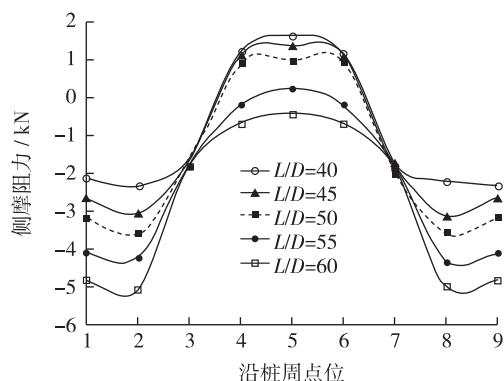


图 17 不同长径比下桩侧摩阻力沿桩环向分布曲线

Fig. 17 Circumferential distribution curves of skin friction of pile under different L/D

以上分析表明,增大桩径减小长径比使得桩身上部负摩阻力减小,弯矩减小;桩身下部正摩阻力更易于发挥。因此,超长桩长径比的减小可以有效提高桩身承载力,但当长径比减小到一定程度后,所发挥作用不明显。由此可见,工程中若一味增大桩径减小长径比并不经济。

2.4 桩土刚度比对超长桩承载性状的影响分析

为了研究土体参数的影响,本文引入桩土刚度比进行分析。考虑桩与土的弹性模量、桩长和桩径的影响,将桩土刚度比 n 定义^[13]如下:

$$n = \sqrt{\frac{2E(1+\mu_s)}{E_s}} \frac{r}{L} \quad (1)$$

式中: E 为桩弹性模量; μ_s 为土泊松比; E_s 为土弹性模量, r 为桩半径; L 为桩长。

考虑到桩身负摩阻力和最大弯矩出现的位置,本文保持其他参数不变,改变浅层土(第1和第2层土)的 E_s 进行分析。

由图 18 可见,随着桩土刚度比 n 由 1.06 变化至 0.375,中性点位置上升,负摩阻力分布范围也相应减小,相应区域内桩身负摩阻力减小,当 $n < 0.53$ 后减小速率趋缓。这是因为浅层土的抗压缩变形能力得到提高,在边载作用下土体沉降减小。桩身其余区域内的侧摩阻力没有明显变化。由图 19 可见,随着桩土刚度比减小,桩身最大弯矩减小,但减小速率趋缓。桩身下部弯矩没有明显变化。因此,改变浅层土中的桩土刚度比可以有效提高超长桩承载力,减小了桩基因为承受过大的附加力或局部弯矩而发生结构破坏的可能性,且对深层土中的内力没有明显影响。该结果可为超长桩工程中土体加固处理提供参考。

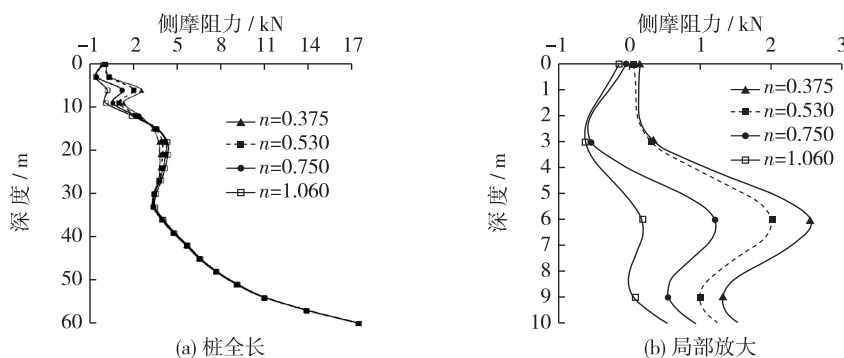


图 18 不同桩土刚度比下桩侧摩阻力沿深度分布曲线

Fig. 18 Distribution curves of skin friction of pile under different n

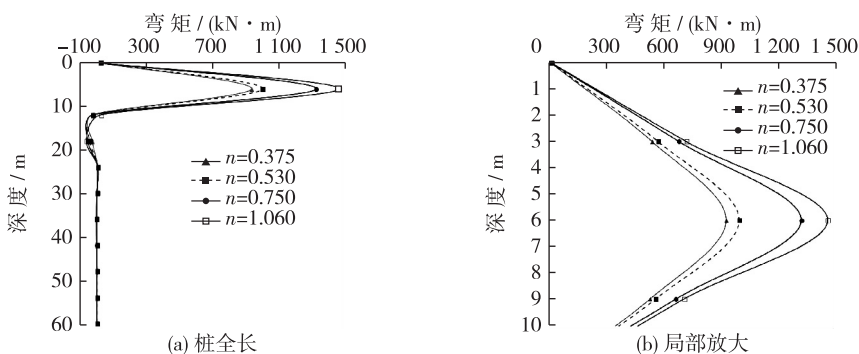


图 19 不同桩土刚度比下弯矩沿深度分布曲线

Fig. 19 Distribution curves of moment of pile under different n

3 多元非线性回归分析

通过分析发现水平荷载与边载大小比值 k , 边载距离 s 和桩土刚度比 n 这些因素对于最小桩侧摩阻力 f 的变化具有一定的影响。首先考虑 k, s 这两个变量对 f 的影响。如图 20 所示, 在三维空间中, 随着 k 和 s 的增大, 曲面逐渐凸起, f 由负转为正。但曲面曲率减小, 凸起程度降低, 由负转为正的速率趋缓。这与之前的分析基本吻合。

为了得出更具普遍意义的结果, 根据已有的数值模拟数据, 拟合出最小桩侧摩阻力的关系式:

$$f = -33.21 + 11.86s - 1.5s^2 + 0.064s^3 + 1.52k - 0.3sk + 0.02s^2k - 0.005k^2 + 0.002sk^2 \quad (2)$$

取 $f=0$ 时 k 与 s 的关系图进行验证。有限元计算结果和拟合公式计算结果对比分析见图 21(a), 可见该式具有较好的准确性。

与有限元模拟相比, 此公式是一种快速有效且具有一定精度计算最小桩侧摩阻力的方法。根据此公式, 选取图 21(a) 中曲线上方 k 和 s 的组合可以避免桩侧产生负摩阻力。

同理可得 f 与 n, k 以及 f 与 n, s 的关系式:

$$f = -0.72 - 4.99n - 3.26n^2 + 2.46n^3 - 1.02k + 2.73nk - 0.87n^2k + 0.1k^2 - 0.12nk^2 \quad (3)$$

$$f = 1.17 - 16.24n - 11.22n^2 + 7.99n^3 - 0.86s + 6.65ns - 0.88n^2s + 0.06s^2 - 0.37ns^2 \quad (4)$$

取 $f=0$ 时, n 与 k 以及 n 与 s 的关系图进行分析, 验证上述两式的准确性。有限元和拟合公式计算对比分析见图 21(b) 和 (c), 可见两式都具有较好的准确性。分别选取图 21(b) 和 (c) 中曲线上方的 n 和 k 或 n 和 s 的组合可以防止桩侧产生负摩阻力, 以免超长桩因受到额外下拽力而破坏。

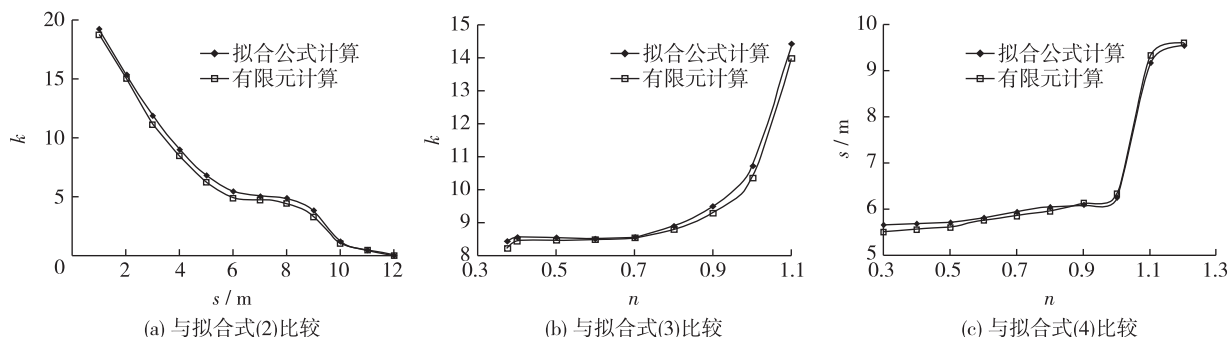


图 21 有限元计算结果与拟合式比较计算结果

Fig. 21 Comparison between results of fitting formulas and FEM

4 结 语

(1) 在边载和水平荷载共同作用下, 超长桩桩身局部会产生负摩阻力和较大弯矩。负摩阻力区域大致分布在桩顶 0~10 m 处, 先增大后减小; 沿桩周分布不均匀, 但大致关于水平荷载作用方向呈对称分布。桩身弯矩分布于桩顶 0~24 m, 最大值出现在 6 m 处。在设计桩身时需在上述负摩阻力和弯矩较大位置加强配筋, 以免桩身局部强度破坏或失稳。

(2) 在边载和水平荷载共同作用下, 随着水平荷载增大, 超长桩桩身负摩阻力明显改善, 分布区域变小。但考虑到使桩身弯矩保持在较低水平, 存在最优水平荷载与边载大小比值 $k=4$ 。当边载距离 $s < 8$ m 时, 超长

桩桩身最大负摩阻力和最大弯矩随 s 的增大而减小;当 $s > 8$ m 时,边载对最大负摩阻力基本无影响,最大弯矩随 s 增大而增大。因此,存在临界边载距离 $s = 8$ m。增大桩径减少长径比可以提高超长桩水平和竖向承载力,然而当长径比减少到一定程度后对负摩阻力和弯矩的减小作用不明显。

(3) 超长桩桩身负摩阻力和弯矩随桩土刚度比 n 的减小而减小,但当 $n < 0.53$ 后,减小趋于平缓。

(4) 根据大量数值模拟计算结果,进行多元非线性回归分析,得到超长桩桩侧最小摩阻力 f 与 k, s, f 与 n, k , 以及 f 与 n, s 的关系式。工程中可由此预测在不同影响因素组合下的桩侧最小摩阻力。

参 考 文 献:

- [1] TACIROGLU E, RHA C S, WALLACE J W. A robust macro element model for soil-pile interaction under cyclic loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(10): 1304-1314.
- [2] MATYAS E L, SANTAMARINA L C. Negative skin friction and the neutral plane[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 591-597.
- [3] YAO Wen-juan, LIU Yi-min, CHEN Jun. Characteristics of negative skin friction for superlong piles under surcharge loading[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2012(12): 90-97.
- [4] WILLIAM H, CELIO V. Elastic solutions for laterally loaded piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, 139: 1096-1103.
- [5] SHIVANI R, AMIT P. Estimation of the linear spring constant for a laterally loaded monopile embedded in nonlinear soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2014(8): 1-13.
- [6] 赵明华, 吴鸣, 郭玉荣. 轴、横向荷载下桥梁基桩的受力分析及试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 50-54. (ZHAO Ming-hua, WU Min, GUO Yu-rong. A study of the behavior analysis and model test of bridge piles under simultaneous axial and lateral loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 50-54. (in Chinese))
- [7] 郑刚, 王丽. 竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1796-1804. (ZHENG Gang, WANG Li. Effect of loading level and sequence of vertical and lateral load on bearing capacity of single pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1796-1804. (in Chinese))
- [8] 聂如松, 冷伍明. 负摩阻力作用下的单桩竖向承载性状[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(4): 1539-1544. (NIE Ru-song, LENG Wu-ming. Vertical bearing behavior of single pile subject to negative skin friction[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4): 1539-1544. (in Chinese))
- [9] 姚文娟, 陈尚平, 陈杰, 等. 边载作用下桩基承载性能数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 6-11. (YAO Wen-juan, CHEN Shang-ping, CHEN Jie, et al. Numerical analysis of bearing capacity of piles subjected to side loads[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 6-11. (in Chinese))
- [10] 尹武先, 姚文娟, 程泽坤. 轴-横向荷载作用下超长桩数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2009(2): 15-20. (YIN Wu-xian, YAO Wen-juan, CHENG Ze-kun. Numerical investigation on interaction of axial and lateral response for super-long pile[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(2): 15-20. (in Chinese))
- [11] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2013. (in Chinese))
- [12] 郭乾坤. 大直径桩的水平承载特性分析[D]. 广州: 广州大学, 2011. (GUO Qian-kun. Analysis of horizontal bearing characteristics large diameter pile[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011. (in Chinese))
- [13] 黄钟晖, 马少坤, 周小兵, 等. 隧道开挖对临近不同相对刚度比桩基影响研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(1): 165-172. (HUANG Zhong-hui, MA Shao-kun, ZHOU Xiao-bing, et al. The influence of tunneling on adjacent piles with different stiffness ratios[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2012, 37(1): 165-172. (in Chinese))

Numerical analysis of bearing capacity of super long pile subjected to side and lateral loads

LIN Xiao-cheng, YAO Wen-juan

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A three-dimensional numerical model for pile-soil interaction is established, based on studies of the bearing capacity of a super long pile under side and lateral loads. And the varying law of skin friction and moment of the super long pile is analyzed. The analysis results show that the increasing of the ratio k of the lateral load and the side load is effective in reducing the negative skin friction; furthermore, the critical ratio k is 4. The negative skin friction and moment decrease as a result of length-diameter ratio decrease. Moreover, the critical side load distance s is 8 m. When $s < 8$ m, the negative skin friction decreases as a result of increase of s . When $s > 8$ m, it almost has no effect on the negative skin friction. The bearing capacity of the super long pile can be effectively improved by decrease of stiffness ratio of the pile and soil. Meanwhile, by using multivariate nonlinear regression analysis, the expressions of the minimum skin friction on different factors are achieved. Then the minimum skin friction with different combinations of factors can be predicted by the expression. Thus the negative skin friction can be avoided effectively.

Key words: super long pile; side load; lateral load; skin friction; stiffness ratio of pile and soil; multivariate nonlinear regression analysis

版权转让声明

本刊已加入万方数据(www.wanfangdata.com.cn)、中国知网(www.cnki.net)、维普网(www.cqvip.com)等网站,并被中国核心期刊(遴选)数据库、中国科学引文数据库等收录。凡本刊录用的稿件将同时进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(即包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬),作者将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、汇编权等在全世界范围内转让给本刊,不再另行签署《论文著作权转让书》。若有异议,请在投稿时作文字说明,编辑部将酌情处理。

特此声明

《水利水运工程学报》编辑部
2016年2月16日