

· 地基与基础 ·

双层土水平受荷超长桩承载性状数值模拟



刘娟娟, 姚文娟

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 利用有限元软件ANSYS对双层土中超长桩水平承载性能进行模拟, 得到桩土相互作用下土抗力及超长桩桩身弯矩及侧移。分析桩侧竖向摩阻力、环向摩阻力和法向土抗力沿桩身的分布和对承载力的贡献以及超长桩水平承载性状随荷载、土层相对模量比、桩长径比的变化规律。结果表明: 桩侧竖向摩阻力、环向摩阻力、法向土反力沿桩环向呈不同的曲线分布规律, 沿深度呈递减趋势, 桩顶最大; 在不同分层情况下桩身弯矩和侧移量随着土层弹性模量比的增大而减小; 水平受荷超长桩存在有效长度和最优长径比; 沿桩身存在反弯点和位移零点。

关键词: 超长桩; 双层土; ANSYS; 摩阻力; 水平性状; 反弯点

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0161-07

Lateral properties of super long pile in double-layered soil based on numerical simulation

LIU Juan-juan, YAO Wen-juan

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

Abstract: The FEM model of laterally loaded super long pile in double-layered soil is built by ANSYS, based on which, the soil resistance under the pile-soil interaction and the moment distribution and shaft deflection of super long pile are simulated. The distribution of soil resistance along pile and its contribution to the bearing capacity are discussed in detail. And, the lateral properties of super long pile under various horizontal loads, elastic modulus ratio of double-layered soil and length-diameter ratio are also discussed. The results show that, to a certain depth, the radial distribution of vertical side friction, tangential friction and soil resistance along the pile present different curves. And to the same position in the circumferential direction, the maximum soil resistance exists in the pile head. The moment distribution and shaft deflection along the pile decrease as a result of elastic modulus ratio's increase. The laterally loaded super long pile exists effective length. The optimal length-diameter ratio leads to the optimal performance. There exists inflection point and zero displacement point along the pile body.

Key words: super long pile; double-layered soil; ANSYS; frictional resistance; lateral properties; inflection point

随着高层建筑及大跨度桥梁的迅猛增多, 超长桩以其具有较高单桩承载力的优点在工程上应用数量急剧增多。关于超长桩的定义至今没有统一的标准: 赵锡宏等^[1]认为桩长 $L > 50$ m; 刘金砺^[2]认为桩长 $L > 40$ m; 也有文献将 $L > 50$ m且 $L/D > 50$ (D 为桩径) 或者 $L > 50$ m且 $L/D > 100$ 的桩定义为超长桩。尽管已被大量使用, 但这类桩的荷载传递机理及承载性状还很不清楚。并且长期以来,

人们往往偏重于研究超长桩竖向承载性能, 而对横向荷载作用下的超长桩研究较少, 而在港口、桥梁及近海钻采平台等工程中超长桩承受较大的横向荷载。天然地基一般呈现成层特性, 在分析横向受荷桩的同时充分考虑各土层的差异十分重要。由于影响桩身内力及位移的主要土层是浅层土^[3], 因此多层可视为双层地基考虑。

不少学者对桩基进行了数值模拟研究。郑刚

收稿日期: 2013-06-15

作者简介: 刘娟娟(1990—), 女, 硕士研究生, 专业为土木工程。

等^[4]分析了成层土中桩在倾斜荷载作用下其竖向分量的有利作用和横向土抗力分布特点；贺嘉等^[5]采用大型有限元软件ABAQUS，对大直径桩进行了数值模拟分析；尹武先等^[6]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；邹新军等^[7]采用非线性有限元法对倾斜受荷群桩的受力变形特性进行探讨开发考虑材料非线性、桩-土-承台共同工作机理、桩周地基土体的分层性及不同桩顶荷载形式等因素的计算程序；赵明华等^[8-9]先采用层状横向各向同性弹性半空间地基模型，利用有限元-有限层法，提出了轴、横向荷载下桥梁基桩的受力分析方法；对横向荷载作用下桩-土相互作用特性进行了无单元数

值模拟分析，对不同荷载作用大小、桩周土性质及桩-土刚度比等因素对桩身受力变形特性的影响进行了对比分析。

以上研究多针对一般桩基，对超长桩的研究较少，并且较多考虑为单一土层。本文综合考虑分层土中水平受荷超长桩，利用通用有限元软件ANSYS对其水平承载性状进行研究。

1 有限元计算及验证

1.1 模型参数

采用通用有限元软件ANSYS进行模拟分析。桩土模型采用文献^[10]中试桩数据。桩径1.0 m，桩长16.45 m，土体分为5层，土体参数见表1。

表1 各土层参数

土层	土层厚度/m	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	摩擦系数	密度/(kg·m ⁻³)
素填土+吹砂	4.60	20	6	6	0.25	0.3	1 900
冲击黏土	3.70	18	14	18	0.35	0.3	1 860
冲积粉砂	3.30	26	3	22	0.22	0.3	1 900
强风化砂岩	2.40	120	100	30	0.20	0.3	2 100
中风化砂岩	2.45	1 800	260	32	0.16	0.3	2 200

桩身和土体都采用Solid45实体单元，土体本构采用D-P屈服准则。模型桩周土的几何尺寸径向为桩径的20倍，即20 m，桩底深度取为16 m。

1.2 网格划分及边界条件

桩土模型网格划分如图1所示。轴向网格划分时考虑水平受荷桩的变形主要发生在力的作用处，故由中心向外辐射网格由密到疏。



图1 桩土有限元模型

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 桩土接触

桩土接触面设置为面-面接触，采用接触单元来传递力，刚体目标面采用target170单元，接触面为conta173单元。对于土体的摩擦角范围为10°~30°，桩土界面的摩擦角的范围为6°~21°，则摩擦系数 $\mu = \tan\delta = 0.105\sim 0.384$ 。本文中取0.2进行分析。

1.4 加载

在桩土分析中，土体初始应力场的实现是一个关键问题。本文直接将重力荷载施加于有限元模型，并施加相应的边界约束，计算得到在重力荷载下的应力场。再将得到的应力场和重力荷载一起施加于原始有限元模型。

水平集中力作用在桩顶，按试验荷载加载：最大水平试验荷载480 kN，采用荷载步将荷载分为10级加载，每级48 kN。

1.5 结果验证

绘制桩顶位移-水平荷载曲线，ANSYS模拟结果与实测值的对比如图2所示。有限元模拟的桩顶位移与实测桩体位移趋势及大小具有较好的吻

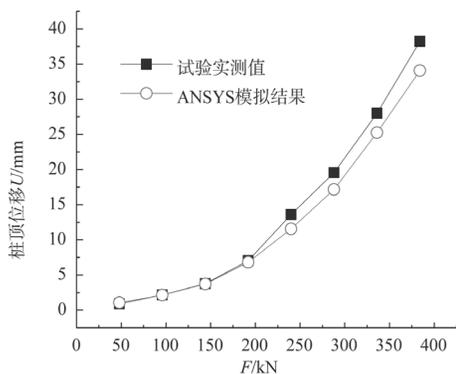


图2 模拟桩顶位移与实测桩顶位移的对比

合。说明该有限元模型在处理成层土中桩土相互作用的可行性, 即在之后的工作中可利用该建模

方法对双层土中超长桩进行数值模拟研究。

2 双层土中超长桩水平承载性状研究

2.1 数值建模

建立双层土中图2 模拟桩顶位移与实测桩顶位移的对比超长桩有限元模型。以长径比 $L/D = 54$, 浅层土厚 $h_1 = 4$, 双层土弹性模量比 $E_2/E_1 = 2$ (第二层土与浅层土的弹性模量之比) 为例, 此模型中桩径1 m, 桩长54 m, 桩头自由与土体表面齐平, 置于双层土中, 水平荷载 $F = 50$ kN 作用于桩顶, 桩土参数见表2。

表2 桩土参数

类别	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	剪胀角/($^\circ$)	厚度/m
桩	3.0×10^4	0.167	2 300				
第一层土	2.5×10^2	0.300	1 800	19	31	29	4
第二层土	5.0×10^2	0.300	1 800	19	31	29	100

2.2 桩身土抗力计算结果

2.2.1 竖向摩阻力

人们往往偏重对竖向承载桩的研究, 对水平受荷桩侧摩阻力分布关注较少。

在研究水平受荷桩的竖向摩阻力时(图3), 将桩横截面分为桩前、桩后2个区域, 用图中所示度数表示环向接触面上各点的位置, F 表示加载方向(X 轴正向)。以 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围为研究对象, 另一半圆周的摩阻力分布关于 X 轴对称分布。竖向摩阻力以向上为正(Z 轴)。

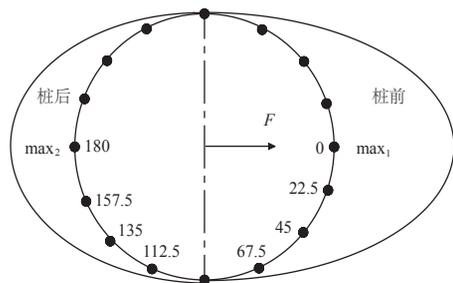


图3 竖向摩阻力桩周分布

利用ANSYS模拟得到桩竖向摩阻力沿深度和桩周的分布情况分别见图4和图5。

由图4可知, 水平受荷超长桩竖向侧摩阻力在桩顶处达到最大值, 沿桩的深度方向逐渐变小。

沿桩周竖向摩阻力的分布如图5所示。桩前区域桩承受的摩阻方向向上(正摩阻力), 桩后区

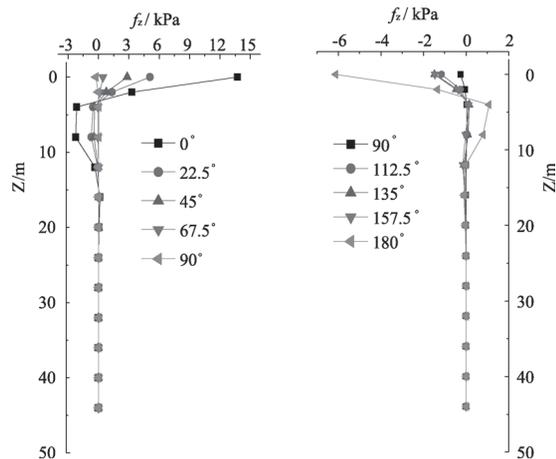


图4 竖向摩阻力沿深度分布曲线

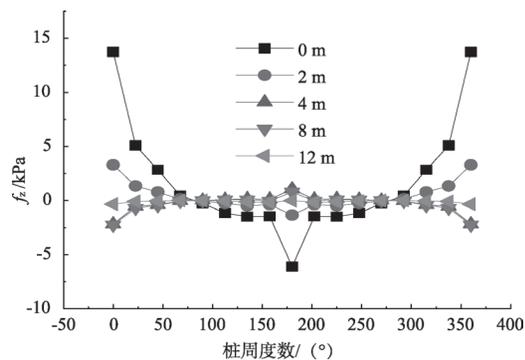


图5 竖向摩阻力沿环向分布曲线

域承受负摩阻力; 且在力作用方向上(0° 和 180° 位置)摩阻力发挥最为明显, 分别达到最大值 max_1 和 max_2 。在图5中, 当 $h = 8$ m时, 桩周竖向摩

阻力出现了反向，桩前区域桩承受负摩阻力而桩后区域承受正摩阻力，但其摩阻力值较小。从之后的桩身位移和弯矩分析中可知，沿深度在某一区域内（10 m附近）出现位移零点出现负位移，这一区域同时存在反弯点（弯矩为零），因而也将使得竖向摩阻力在这一区域出现反向。

桩身竖向摩阻力为水平受荷载桩提供了一定的竖向承载力。

2.2.2 环向摩阻力

图6和图7为水平受荷超长桩环向摩阻力沿深度和桩周的分布情况。图8为环向摩阻力沿桩周分布的示意图，方向以逆时针为正。

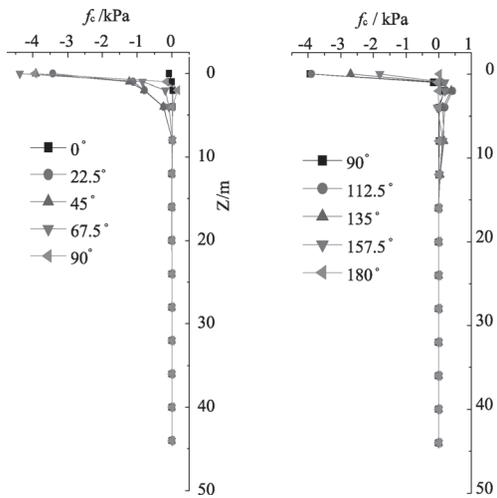


图6 环向摩阻力沿深度分布曲线

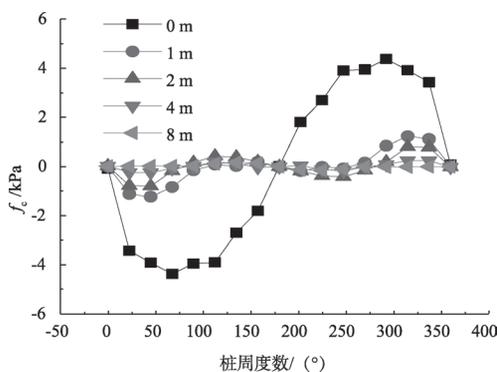


图7 环向摩阻力沿环向分布曲线

由图6可知，水平受荷超长桩环向摩阻力在桩顶处达到最大值，沿深度方向逐渐变小。

由图7可知，地表处（ $z=0\text{ m}$ ）环向摩阻力在垂直于力作用方向上（ 90° 和 270° 位置）发挥最为明显，分别达到最大值，如图8a）所示；地平以下环向摩阻力分布发生变化，如图8b）所示，桩

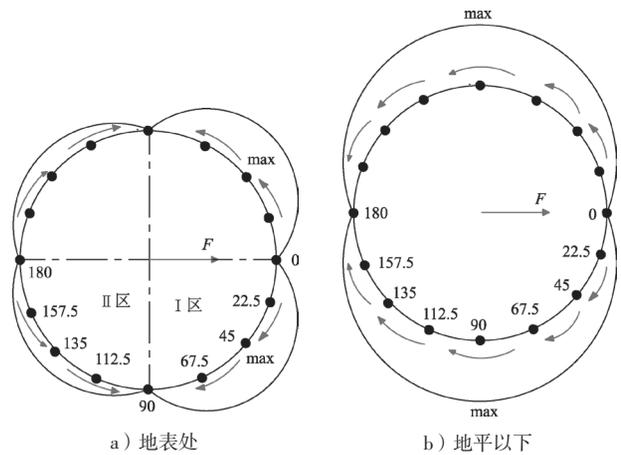


图8 竖向摩阻力沿环向分布

周 $0^\circ \sim 180^\circ$ 分为I、II两个区域，I区内环向摩阻力仍保持顺时针方向，最大值出现在 45° 区域，而II区摩阻力方向变为逆时针，数值也明显减小。

环向摩阻力沿水平方向的分力与 F 反向，对桩的水平承载力起到一定的作用。

2.2.3 法向土反力

图9和图10为水平受荷超长桩法向土压力沿深度和桩周的分布情况。

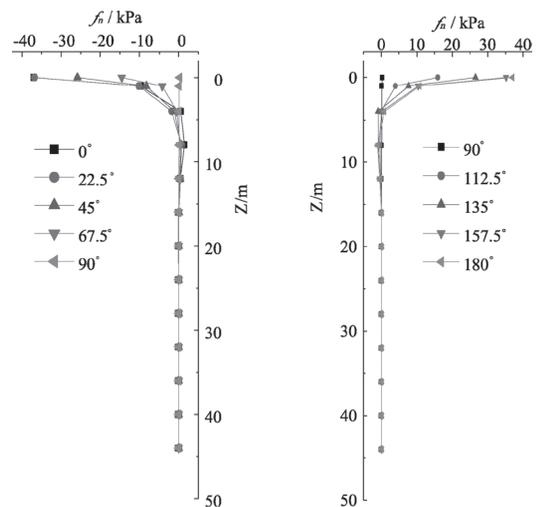


图9 法向土反力沿深度分布曲线

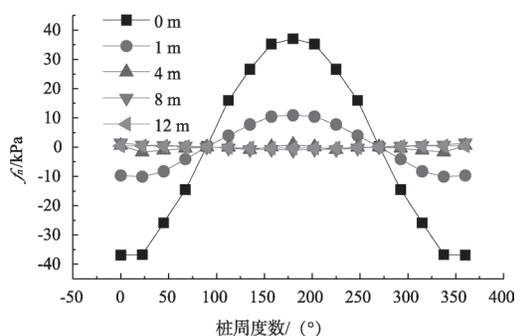


图10 法向土反力沿环向分布曲线

由图9可知, 水平受荷超长桩法向土反力在桩顶达到最大值, 沿深度方向逐渐变小。由图10可知, 在力作用方向上 (0° 和 180° 位置) 达到最大值。

2.3 桩身弯矩及侧移随影响因素分析

通过改变水平荷载 F 、土层相对模量比 E_2/E_1 及桩径比 L/D , 模拟各情况桩土相互作用, 研究超长桩双层土中的水平性状。

2.3.1 水平荷载的影响

保持双层土弹性模量比 $E_2/E_1=2$ 和桩径比 $L/D=54$ 不变, 水平荷载 F 由50 kN增加至300 kN。图11给出了桩身弯矩及侧移分布曲线随水平荷载的变化曲线; 图12为反弯点附近桩身弯矩放大图; 图13为桩身最大弯矩值与水平荷载的关系曲线; 图14为桩顶最大位移与水平荷载的关系曲线。

2.3.2 土层弹性模量比的影响

保持水平荷载 $F=50$ kN和桩径比 $L/D=54$ 不变, 变化土层相对模量比 $E_2/E_1=2\sim 6$ 。图15给出

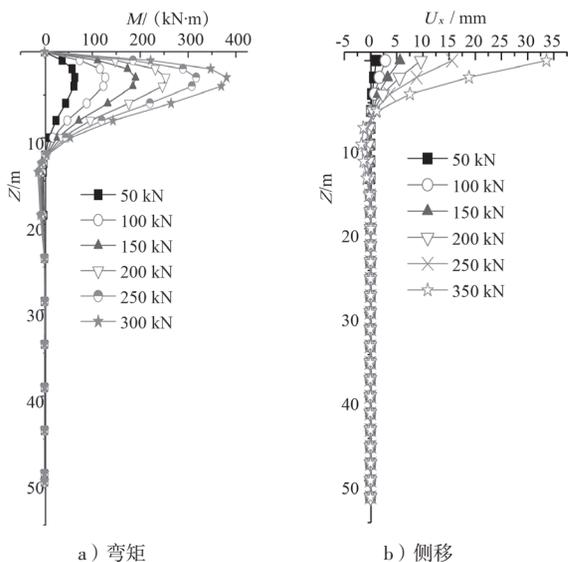


图11 不同水平荷载作用下桩身弯矩及侧移分布曲线

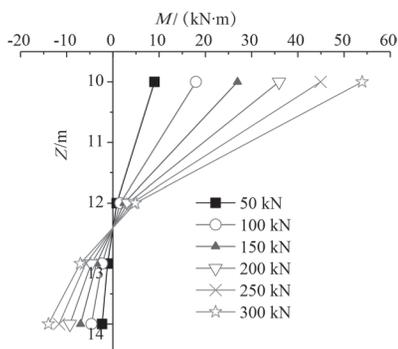


图12 桩身弯矩放大图

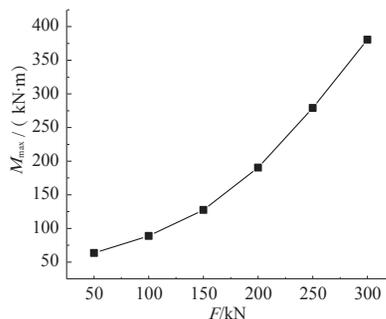


图13 桩身弯矩最大值随水平荷载变化曲线

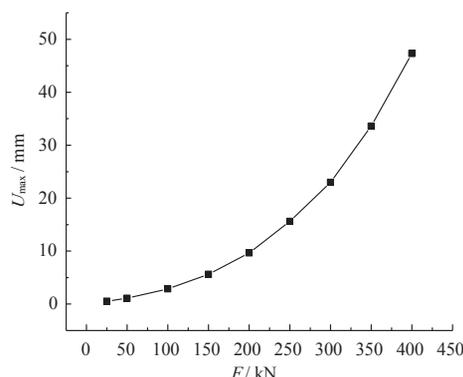


图14 桩顶最大位移随水平荷载变化曲线

了 E_2/E_1 变化时桩身弯矩及侧移分布曲线; 图16为反弯点附近桩身弯矩放大图; 图17为桩身最大弯矩值与土层弹性模量比的关系曲线; 图18为桩顶最大位移与土层弹性模量比的关系曲线。

2.3.3 长径比的影响

保持双层土弹性模量比 $E_2/E_1=2$ 和水平荷载 $F=50$ kN不变, 变化桩长径比 $L/D=27, 36, 45, 54$ 。图19给出了变化长径比下桩身弯矩及侧移分布曲线; 图20为桩身弯矩放大图; 图21为桩身最大弯矩值随长径比 D/L 的关系曲线; 图22为桩顶最大位移随长比 D/L 的关系曲线。

2.3.4 分析讨论

1) 以桩身弯矩和桩身位移来分析水平受荷超长桩的水平承载性状。

① 由图11 a) 和图15 a) 可知双层土中的水平受荷超长桩, 其桩身弯矩随着水平荷载 F 增大而增大, 随土层弹性模量比 E_2/E_1 增大而减小; 且桩身最大弯矩值 M_{max} 随水平荷载 F 和土层弹性模量比 E_2/E_1 的变化为非线性的, 如图13所示曲线斜率随 F 增大而增大, 图17中曲线斜率随 E_2/E_1 增大而减小。

② 图19a) 表明桩身弯矩在一定范围内随长

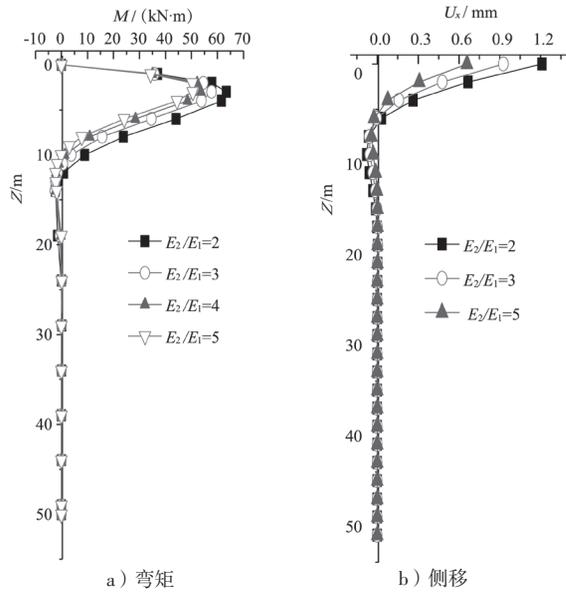


图15 不同土层弹性模量比下桩身弯矩及侧移分布曲线

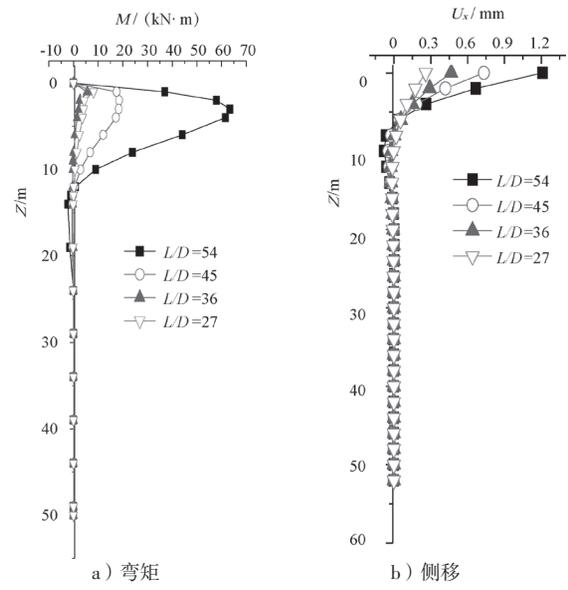


图19 不同长径比下桩身弯矩及侧移分布曲线

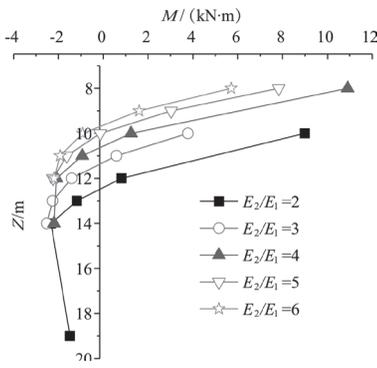


图16 桩身弯矩放大图

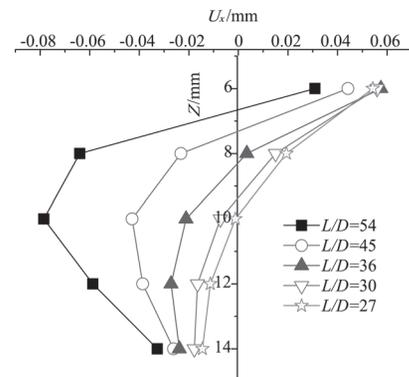


图20 桩身侧移放大图

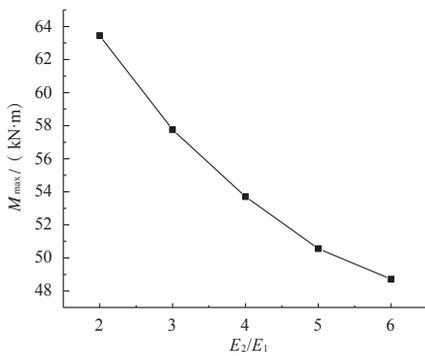


图17 桩身最大弯矩值随土层弹性模量比变化曲线

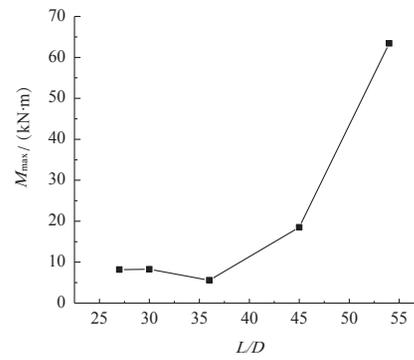


图21 桩身最大弯矩值随长径比变化曲线

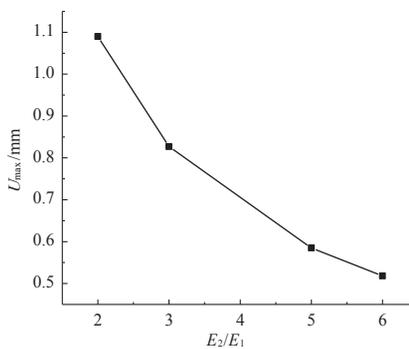


图18 桩顶最大位移随土层弹性模量比变化曲线

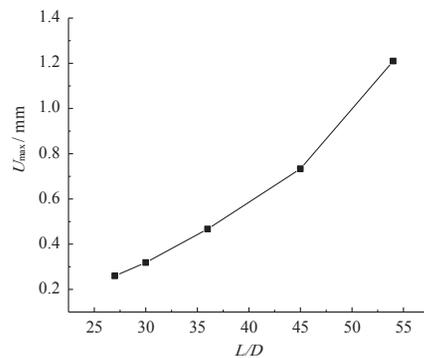


图22 桩顶最大位移随长径比变化曲线

径比 L/D 的增大而减小,并且存在一个最优长径比使得桩身弯矩最小。本次算例中当 $L/D=36$ 时,其桩身弯矩最小;如图21所示,当 $L/D<36$ 时,桩身最大弯矩值随着 L/D 的增大而减小,且 $L/D>36$ 时,桩身弯矩值随着 L/D 增大而增大,即存在最优长径比。

③由图11b),图15b)及图19b)可得:桩身侧移量随着水平荷载 F 增大而增大,随土层弹性模量比 E_2/E_1 增大而减小,随长径比 L/D 的增大而减小。且桩顶最大位移随水平荷载 F (图14),土层弹性模量比 E_2/E_1 (图18)和长径比 L/D (图22)的变化都呈非线性。

2)在桩身设计时需要桩身反弯点处应加强配筋,反弯点以上土体抗力与水平荷载方向相反,反弯点以下土体抗力与水平荷载方向相同,其位置值得关注。

①由图12可知,水平荷载 F 对桩身反弯点位置影响较小;而土层弹性模量比 E_2/E_1 对反弯点的位置有明显的影 响,如图16所示,随着 $E_2/E_1=2\sim 6$,反弯点位置沿着桩身上移,由12.5 m变为9.8 m。

②同样,沿桩身存在位移零点,如图20所示,随着长径比 L/D 由54变化至27,位移零点的位置沿桩身下降,由7 m变为10 m;且随着长径比值变小位移零点的下降速率变缓。

3 结论

1)水平受荷超长桩竖向摩阻力、环向摩阻力、法向土反力都沿深度呈递减,桩顶处最大;沿桩周环向分别呈不周的曲线分布规律。且竖向摩阻力对水平受荷桩的竖向承载提供一定作用,环向摩阻力对提高桩水平承载力起一定作用。

2)超长桩桩身弯矩和侧移量随着水平荷载的增大而增大,其增长趋势呈非线性;桩身最大弯矩和桩顶侧移随水平荷载的增加,且增长速率随荷载增大而增大。

3)超长桩在不同分层情况下,其桩身弯矩和侧移量随着土层弹性模量比的增大而减小;桩身最大弯矩和桩顶侧移随土层弹性模量比的增加,

呈非线性递减趋势,曲线斜率越来越小。

4)水平受荷超长桩存在有效长度,其变形主要分布在桩顶16 m范围内,而桩身下段对桩的弯矩及侧移没有明显的影响,且随着深度的增加影响越小。

5)超长桩桩身弯矩和侧移量在一定范围内随长径比 L/D 的增大而增大,但存在某一特定的值得水平性能最优,存在最优长径比。

6)水平受荷超长桩沿桩身存在反弯点和位移零点。水平荷载对反弯点位置影响很小,而土层弹性模量比对反弯点的位置有明显的影 响,随着土层弹性模量比增大反弯点位置沿着桩身上移;随着长径比 L/D 的减小位移零点的位置沿桩身下降。

参考文献:

- [1] 赵锡宏. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [2] 刘金砺. 桩基综合报告[C]/中国土木工程学会. 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [3] 赵明华, 王贻荪, 肖鹤松. 多层地基横向受荷桩的分析[J]. 建筑结构, 1994(2): 6-10.
- [4] 郑刚, 王丽. 成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 680-687.
- [5] 贺嘉, 陈国兴. 基于ABAQUS软件的大直径桩承载力-变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 306-310.
- [6] 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.
- [7] 邹新军, 赵明华, 郭宝林. 成层地基中倾斜受荷群桩的非线性有限元分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(4): 820-825.
- [8] 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.
- [9] 赵明华, 刘敦平, 邹新军. 横向荷载下桩-土相互作用的无网格分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2 476-2 480.
- [10] 郭乾坤. 大直径桩的水平承载特性分析[D]. 广州: 广州大学, 2011.