

# 桩端土刚度对桩侧阻力影响的数值分析

席宁中<sup>1</sup>, 刘金砺<sup>1</sup>, 席靖仪<sup>2</sup>

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 固定桩侧土层压缩模量, 采用有限元方法计算分析了不同桩端土层与桩侧土层压缩模量比  $E_p/E_s$  情况下单桩承载性状及桩周土体单元应力状态和位移的变化。结果表明: 不同桩端土层刚度会使桩侧土中竖向附加应力产生变化, 在同一桩顶位移情况下, 桩端土层刚度越大, 桩端平面以上桩侧高应力区范围也越大; 随着桩端土层刚度增大, 桩身下段一定范围内(10~15 d)的桩侧阻力有所提高, 桩端土层刚度对桩侧阻力具有增强效应。结合桩端侧附近土体单元微体应力状态变化的分析表明, 增强效应发生机理在于随桩端土层刚度的增加, 直接导致桩体受压破坏侧鼓效应增强; 同时, 桩端土层对上部桩侧土体向下位移起到阻滞约束作用增强, 致使桩端侧一定范围内土体围压增加, 土体抗剪强度提高, 桩侧摩阻力增大。

**关键词:** 桩端土刚度; 桩侧阻力; 增强效应; 发生机理

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0174-04

**作者简介:** 席宁中(1968-), 男, 江西资溪人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程的科研、咨询、设计和施工工作。E-mail: xfy1188@sohu.com。

## Numerical analysis of influence of stiffness of pile tip soil on shaft resistance

XI Ning-zhong<sup>1</sup>, LIU Jin-li<sup>1</sup>, XI Jing-yi<sup>2</sup>

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Under the fixed compression modulus of pile shaft soil, the finite element method is employed to calculate and analyze the changes in the bearing behavior of single pile as well as the unit stress status and displacement changes of the soil around the pile under the circumstances of different soil compression modulus ratios of pile tip to pile shaft. A conclusion is drawn that different stiffnesses of pile tip soil may change the vertical additional stress in pile shaft soil. Under the same pile top displacement, the greater stiffness of pile tip soil is, the larger high-stress area of pile shaft soil above the pile tip is. With the increase of the stiffness of pile tip soil, the shaft resistance in a certain range of lower pile shaft will develop. So the stiffness of pile tip soil has an enhancing effect on the shaft resistance. Combined with the stress analysis of the soil unit around the pile tip, the influence mechanism can be summed that the pressure damage and protruding effect of the pile is enhanced by the increase of the stiffness of pile tip soil. At the same time, the constraint effect of pile tip soil on the displacement of pile shaft soil is improve, so the confining pressure in a certain area of pile tip soil is increased and the shear resistance is strengthened, and the shaft resistance is also increased.

**Key words:** stiffness of pile tip soil; shaft resistance; enhancing effect; influence mechanism

## 0 引言

理论分析方法是利用一些较成熟的专业理论, 通过数值计算来揭示研究对象的规律性变化。相对于现场原型试验, 利用理论方法进行计算分析, 除了具备经济快捷和预估分析的优点外, 还能显示出其定量对比分析的特长和优势。有限元方法可考虑土的非线性属性、层状体系及桩土间的非线性相互影响等因素, 是目前桩基承载性状理论分析最通用的方法。

鉴于许多专业人士已对单桩轴向荷载传递性状进行过比较系统的有限元分析, 本文结合文献[1]试验研究成果仅就以下问题从理论上作进一步探讨和分析: ①桩端土层刚度对单桩承载性状的影响; ②桩端土层刚度对桩端附近桩侧阻力增强效应的发生机理。

## 1 桩端土层刚度对单桩承载性状影响为

收稿日期: 2011-08-02

使问题简化, 本文只考虑两种土层的情况, 即桩侧土层和桩端土层。分桩端土层压缩模量  $E_b$  与桩侧土层压缩模量  $E_s$  之比( $E_b/E_s$ )=0.1, 0.2, 1, 10 等 4 种情况进行计算。

计算取桩长  $L=25\text{ m}$ , 直径  $d=1000\text{ mm}$ , 固定桩侧土层压缩模量  $E_s$ , 变化桩端土层压缩模量  $E_b$  以分析持力土层刚度对单桩荷载传递性状的影响。按轴对称问题考虑, 影响范围: 桩下取 20 m, 桩外围取 20 m。桩采用线弹性模型, 土采用 Drucker-Prager 模型, 不考虑施工因素影响。材料参数见表 1, 计算结果如图 1~6 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

名称	模量 /MPa	泊松 比	密度 /(kg m <sup>-3</sup> )	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
桩长范围 土层	15	0.3	2000	20	20
桩端以下土 层( $E_b/E_s=1$ )	15	0.3	2000	20	20
桩端以下土 层( $E_b/E_s=10$ )	150	0.3	2000	5	35
桩端以下土 层( $E_b/E_s=0.2$ )	3	0.3	2000	20	20
桩端以下土 层( $E_b/E_s=0.1$ )	1.5	0.3	2000	20	20
桩	20000	0.2	0		

随着桩端土层与桩侧土层压缩模量比  $E_b/E_s$  的增长, 单桩极限承载力逐步提高, 荷载—沉降曲线的缓变趋势越为明显, 如图 1 所示。说明桩端土层性状影响单桩承载性状发挥, 桩端土层刚度越大, 单桩极限承载力越大。

图 2 为极限荷载条件下桩身轴力分布曲线。随桩端土层与桩侧土层压缩模量比  $E_b/E_s$  的增长, 桩端阻力明显提高, 桩端、桩侧的荷载分担比也发生相应的变化。说明在常规土层压缩模量情况下, 本文计算采用弹塑性模型还是能较好地反映实际单桩承载性状。两个模型桩桩侧阻力分担荷载比均在 80% 以上, 说明实际工程中, 大部分桩属摩擦型桩。

从图 3 可以明显看出: 桩端土层刚度对桩身下段一定范围内的桩侧阻力产生影响。随桩端土层与桩侧土层压缩模量比  $E_b/E_s$  的增长, 桩身下段一定范围内 (10~15d) 的桩侧阻力有所提高, 说明桩端土层刚度

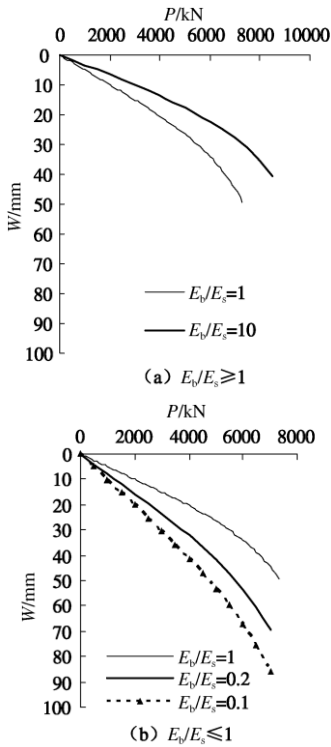


图 1 荷载  $P$  - 桩顶沉降  $W$  曲线  
Fig. 1 Curves of Load to settlement of pile top

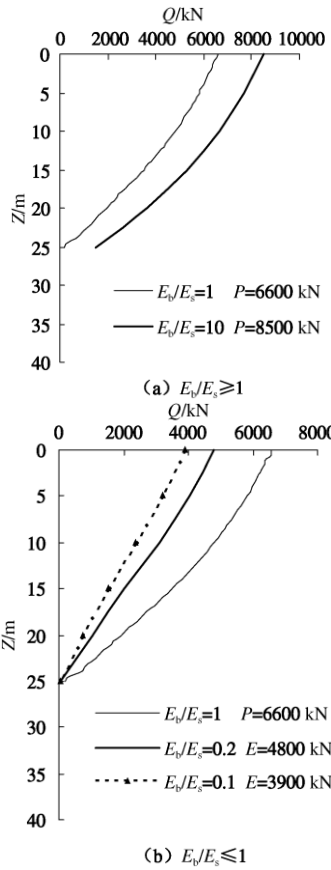


图 2 桩身轴力  $Q$  随深度  $Z$  分布曲线  
Fig. 2 Variation of axial force of pile with depth  
对桩侧阻力存在增强效应。

附加应力是指扣除了重力的影响, 单纯由重力外的荷载产生的应力。在有限元具体计算附加应力时,

由于是弹塑性问题, 先计算重力时的应力状态, 然后计算重力加外荷载时的应力状态, 两种应力状态相减就是除重力外的荷载产生的附加应力。附加应力在重力方向的分量就是重力方向附加应力, 在计算中, 由于是轴对称问题, 将桩长的方向定义  $y$  方向, 桩半径

方向定义为  $x$  方向, 所以, 重力方向附加应力就是  $\sigma_y$ , 本文所指附加剪应力是附加应力  $\tau_{xy}$ 。在桩外表面, 可近似认为附加应力  $\tau_{xy}$  就是外荷载引起的侧摩阻力。由于通常工程仅关心土重力方向附加应力  $\sigma_y$  和剪切应力  $\tau_{xy}$  (Randolph 理论), 所以本文只给出这两个应力

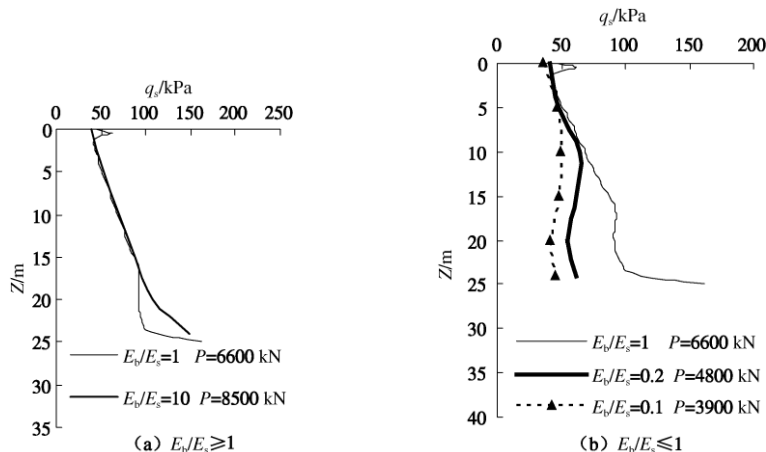


图 3 桩侧阻力  $q_s$  沿深度  $Z$  分布曲线

Fig. 3 Variation of shaft resistance with depth

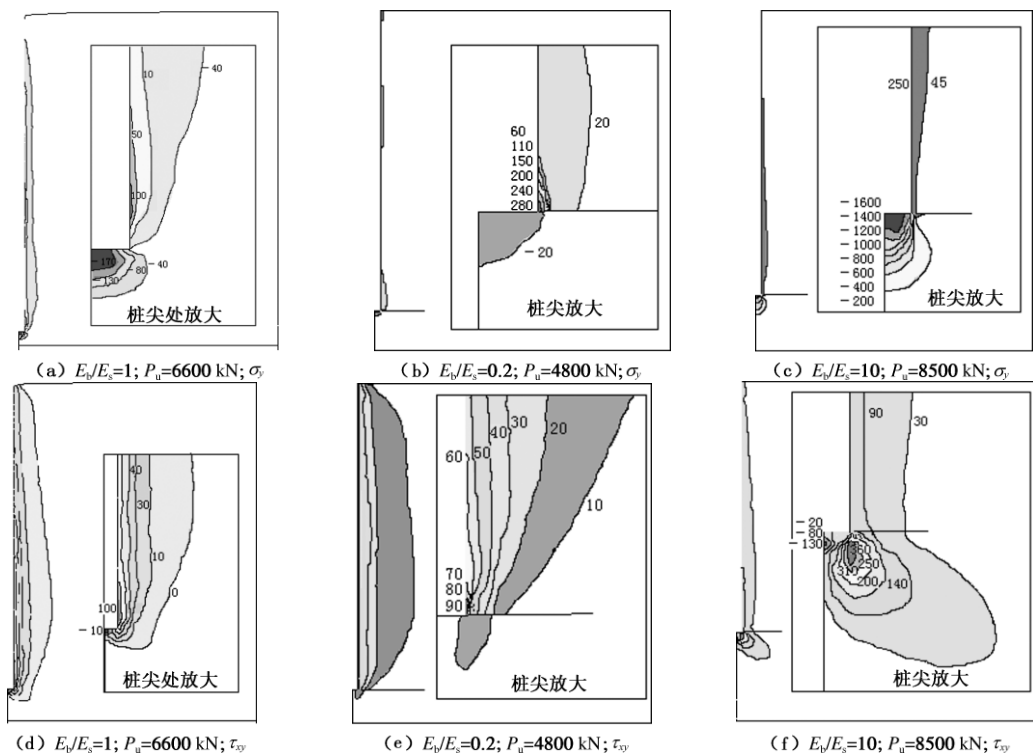


图 4 土中附加应力  $\sigma_y$  及  $\tau_{xy}$

Fig. 4 Curves of vertical additional stress  $\sigma_y$  and  $\tau_{xy}$

分量的应力变化 (图 4)。从图 4 可以看出: 土中重力方向附加应力  $\sigma_y$  大致自桩侧向四周逐渐减小, 沿桩身自上而下逐渐增大, 在桩端附近达到最大值; 桩侧土中附近应力同重力方向, 在桩端底部土中附加应力方向向上, 表现为压应力。从图 4 可以看出土中剪切应力  $\tau_{xy}$  在桩端角部区域达到最大值, 因此桩端角部位土体最早剪切破坏, 与实际情况基本相符。在桩端中心

部位剪应力呈负值, 说明桩体承载时在桩端中心部位的确存在一个压密核区域, 该部分土体呈压缩破坏特征。对比不同刚度情况下土中附加应力的变化可以看出: 随桩端土层刚度增长, 桩身下段土层侧阻值有所提高。当桩端土层较软时, 土中重力方向附加应力  $\sigma_y$  的高应力区一般集中在桩端平面以上一小段范围内, 而桩身其它区域, 重力方向附加应力  $\sigma_y$  相对较小。当

桩端土层刚度增大时, 桩身下段较长一段范围土中重力方向附加应力  $\sigma_z$  均有所提高。说明桩端土层刚度越高, 对上部土层的影响范围越大。同时, 最大剪应力区也从桩端平面以上逐步移至桩端平面以下桩端角部位。

图 5 反映出桩周土的竖向变形基本上表现为自桩侧向外逐渐减小, 桩端附近最大。分析表明桩周土在桩顶附近向内变形, 桩端附近向外变形, 表现为向外挤出, 桩侧中部位移变化不明显。

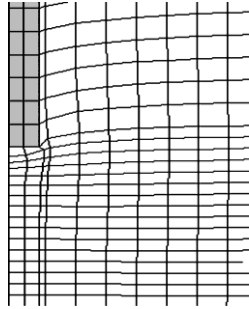


图 5 桩端部位土体位移变形 ( $E_b/E_s=1$ ; 放大 40 倍)

Fig. 5 Curves of soil displacement and deformation

## 2 桩端土层刚度对桩端附近桩侧阻力增强效应的发生机理

有限元分析及相关资料表明<sup>[2-3]</sup>: 单桩受荷过程中, 桩侧土体都发生不同程度的向下位移。为研究方便, 取桩端侧靠近桩端平面处土体中某一单元微体, 其应力状态如图 6 (a) 所示。

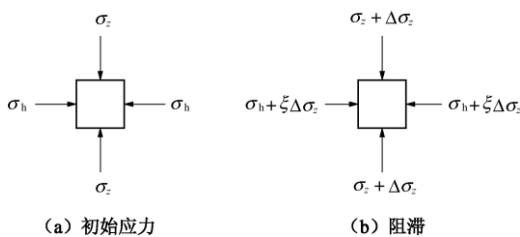


图 6 桩端土层刚度对土体单元应力状态的影响

Fig. 6 Effect of stiffness of pile tip soil on state of stress of a soil element

假定单元微体初始状态所受竖向应力为  $\sigma_z$ , 水平应力为  $\sigma_h$ 。单桩承受竖向荷载时, 竖向应力若发生  $\Delta\sigma_z$  的大小变化, 则根据土力学原理, 水平应力也将产生  $\xi\Delta\sigma_z$  大小的变化, 其中  $\xi$  为侧压力系数,  $\xi < 1$ 。由前文有限元分析可知: 随着桩端土层刚度的不断增大, 桩端阻力逐步提高。此时, 桩体作为受压杆件必将发生破坏侧鼓效应, 从侧面压迫桩侧土体, 阻止土体位移发生; 同时, 由于桩端土层刚度增大, 其压缩变形能力减小, 必然约束上部桩侧土体的向下位移。因此, 桩端土层刚度的增加, 直接导致桩体受压破坏侧鼓效应增强, 对上部桩侧土体位移起到阻滞约束作

用, 致使桩端侧一定范围内土体竖向附加应力增大  $\Delta\sigma_z$ , 应力状态发生相应改变, 即围压增加, 如图 6 (b) 所示。

从图 7 其相应摩尔圆变化可以看出  $\tau_1 > \tau_0$ , 说明桩端侧土体抗剪强度得到加强, 本文称之为桩端土层刚度对桩端侧土体的阻滞增强效应。

从理论上讲, 桩侧阻力的大小变化与桩侧土体的抗剪强度直接相关, 而土体的抗剪强度变化必然与土体应力状态的变化相联系。桩端土体在桩受荷沉降位移过程中对其上部桩端侧区域土体产生约束, 进而改变该部分土体应力状态的可能性是完全存在的。本文有限元分析结果也表明不同桩端土层刚度会使桩侧土中竖向附加应力产生变化。在同一桩顶位移情况下, 桩端土层刚度越大, 桩端平面以上桩侧高应力区范围也越大。

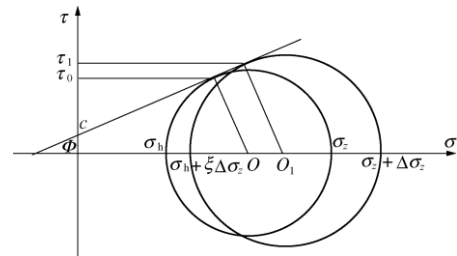


图 7 桩端土层刚度对桩端侧土体单元剪切强度的影响

Fig. 7 Effect of stiffness of pile tip soil on shear strength of a soil element within certain range of pile tip

## 3 结 语

(1) 桩端土层刚度越大, 桩端附近桩侧阻力也越大, 桩端土层刚度对桩侧阻力具有增强效应。

(2) 桩端土层刚度的增加, 直接导致桩体受压破坏侧鼓效应增强, 对上部桩侧土体位移起到阻滞约束作用, 致使桩端侧一定范围内土体围压增加, 土体抗剪强度提高, 桩侧摩阻力增大。

## 参考文献:

- [1] 席宁中, 刘金砺, 于海成. 桩端土刚度和桩长径比对桩侧阻力影响的试验研究[C]// 桩基工程技术进展. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 196 - 203. (XI Ning-zhong, LIU Jin-li, YU Hai-cheng. Experiment study on the influence for the rigidity of soil underneath a pile and the length-diameter ratio to the pile shaft resistance[C]// Development of Pile Foundation Technique. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 196 - 203. (in Chinese))
- [2] 张宗楣. 桩基承载力问题探讨[J]. 电力设计土建设计情报网, 1984. (ZHANG Zong-mei. Discussion on the bearing capacity of pile foundation[J]. Power Design and Civil Technical Information Network, 1984. (in Chinese))

- [3] FEDA J. 桩的表面摩擦力[M]. 地基与基础译文集 5, 桩基础. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 45 - 50. (FEDA J. Surface friction of pile foundation[M]. Translations of

Foundations Vol. 5, Pile Foundation. Beijing: China Architecture & Building Press, 1982: 45 - 50. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)