

# 桩土相互作用时桩参数对大直径空心桩 承载影响的有限元研究

张晓萌<sup>1</sup>, 汪拾金<sup>2</sup>, 武晓璠<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学桥梁与结构工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 浙江省岩土基础公司, 浙江 宁波 315400; 3. 宁夏银川供电局设计室, 宁夏 银川 751100)

**摘要:**运用 Ansys 有限元技术, 分析了在竖向荷载作用下大直径空心桩桩顶沉降、桩端沉降与桩身压缩三者的关系, 桩长  $L$  对桩身轴力的影响, 桩长  $L$ 、桩径  $D$ 、桩体弹性模量  $E$  对桩  $P-s$  曲线的影响, 桩长  $L$ 、桩径  $D$  对桩  $P-s$  (桩端沉降与桩顶沉降的比值) 曲线的影响, 具有工程上的实际意义。

**关键词:**大直径空心桩; 桩体参数; 承载性能; 有限元分析

中图分类号: TU473.1; U443.15 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2007)11-0009-06

**FEM Research on Affection of Pile Parameters to the Bearing Capacity of Large Diameter Hollow Pile in the Case of Pile-soil Interaction/ZHANG Xiao-meng<sup>1</sup>, WANG Shi-jin<sup>2</sup>, WU Xiao-fan<sup>3</sup>** (1. College of Bridge and Structure Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410076, China; 2. Zhejiang Geotechnical Foundation Co., Ningbo Zhejiang 315400, China; 3. Design Office of Power Supplying Bureau, Yinnan District, Ningxia prov, Yinnan Ningxia 751100, China)

**Abstract:** The paper analyzed the large diameter hollow pile under vertical loading on the relation among settlement of pile top, settlement of pile end and pile shaft compression with Ansys finite element technique.

**Key words:** large diameter hollow pile; pile parameter; bearing capacity; finite element analysis

由于大直径空心桩经济性能好, 直径大而自重轻, 施工时噪声小, 振动干扰小, 环境影响小, 水平推力小, 对周围建筑、路面、地下设施危害小, 承载力大, 同时, 工程开工后即可开始预制空心桩节, 工程作业面增加, 工程进度快, 断桩事故不易发生, 桩质可靠, 还可在空心部分对个别有缺陷桩节进行补救处理, 能最大限度地减少工程造价, 无需承台, 桩间距大, 群桩效应小, 设计计算简便, 桩的断面布置合理有效, 桩身刚度和周边长度能得以提高, 能节省大量混凝土, 是一种全新的基桩工艺, 其技术已达到当前国家基桩的先进水平, 因此, 在大跨度桥梁及其他工程基础建设中, 对保证工程质量、降低工程成本、提高工程效益都起到了很好的效果, 其应用前景广阔, 越来越适用于公路、桥梁、深水建筑物、码头、钻采平台、高层建筑和超高层建筑等结构基础中。

本文的理论研究采用有限单元法。该法同时考虑影响桩基工作性能的所有主要因素, 如: 土的非线性因素、固结时间、桩与土的接触界面滑移问题、动力效应、边界条件等等, 准确有效地考虑桩与桩周土

的三维问题, 客观实际地描绘桩、桩周土及其接触界面的本构关系等问题, 计算相应的应力与变形, 分析力的传递规律、变形机理和破坏特征等。

随着计算机手段的高效性与普及性, 有限单元法在理论及工程上的计算运用最广, 根据实际情况, 将土体、桩体、桩与土的接触界面进行有限元单元网格的划分, 根据土体的层状来变换土体的参数, 通过桩在承载状态下由桩土接触界面来传递摩阻力, 进而分析二者之间的相对位移, 计算其内力、位移及相关参数。编制了“桩土相互作用的大直径空心桩承载性能的有限元程序”, 利用前处理和后处理程序, 用 Ansys 有限元进行静力模拟仿真分析计算, 并验证了程序的正确性<sup>[1]</sup>, 得出了考虑桩土相互作用时大直径空心桩在竖向荷载作用下桩体各参数对桩承载性能的一系列计算成果。根据所得结果来分析在不同地质条件下桩长、桩径、桩体弹模等对桩的桩顶荷载  $P$  与桩身压缩  $s$  间的  $P-s$  曲线、桩端阻力、桩端沉降、桩身轴力分布曲线的影响等。

收稿日期: 2007-05-22; 改回日期: 2007-09-25

作者简介: 张晓萌(1972-), 女(汉族), 广东惠州人, 长沙理工大学讲师, 建筑与土木工程专业, 硕士, 从事建筑与土木工程研究工作, 湖南省长沙市, ftyzm5232166@163.com。

## 1 计算模型与基本理论

由于大直径空心桩桩身尺寸较大,所以,桩身采取实体单元来模拟,力学参数为桩身材料参数,在荷载作用下,采用二十节点六面体单元。

### 1.1 有限元计算模型

大直径空心桩有限元计算模型网格划分见图1。

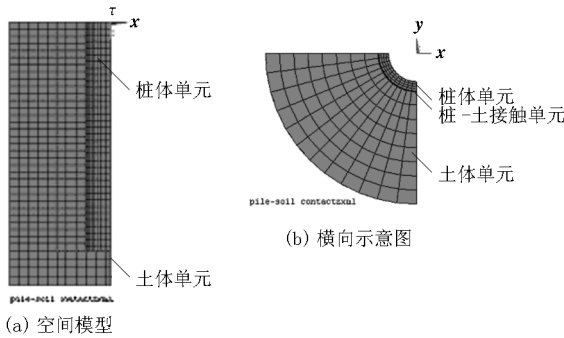


图1 1/4部分空心桩有限元计算模型图

### 1.2 基本理论

#### 1.2.1 受力与变形控制要求

在满足大直径空心桩桩基受力和变形方面,本文采用非线性有限元的塑性分析法来控制。程序设计考虑如下因素:对于桩端持力层为基岩、介质压缩性小、 $L/D \leq 5 \sim 10$ 的大直径桩,视为端承桩处理,此时不考虑桩周摩阻力。当略去基岩及桩身变形时,桩的极限承载力由桩身单轴抗压强度控制。在不同边界约束条件下所分析出来的数值结果作为纯端承桩桩身强度控制的极限承载力。在特殊支承条件下,纯端承桩的极限承载力由桩身设计强度控制。

##### 1.2.1.1 桩体极限承载力计算<sup>[2]</sup>

根据下式来确定桩的极限承载力计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum \psi_{si} q_{sik} l_i + \psi_p q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中: $Q_{uk}$ ——桩的极限承载力; $Q_{sk}$ 、 $Q_{pk}$ ——单桩总极限侧阻力和总极限端阻力标准值; $u$ ——桩的横断面周长; $q_{sik}$ ——桩周第*i*层土的单位极限摩阻力标准值; $l_i$ ——桩穿越第*i*层土的厚度; $q_{pk}$ ——桩的极限端阻力标准值; $\psi_{si}$ 、 $\psi_p$ ——大直径桩的侧阻、端阻尺寸效应系数; $A_p$ ——桩底面积。

##### 1.2.1.2 桩身轴力<sup>[2]</sup>

桩身轴力,在桩顶处为 $P_0$ ,在桩尖处为 $P_h = \lambda P_0$ ,在任意深度*y*处为 $P_y$ ,按抛物线分布。

$$P_y = P_0 - T_y = P_0 - U \left[ \tau_h + \left( 1 - \frac{\gamma}{2h} \right) \tau_2 \right] y \quad (2)$$

式中: $P_y$ ——深度为*y*处的桩身轴力; $P_0$ ——桩顶处轴力; $T_y$ ——桩深为*y*处的摩阻力; $U$ ——桩的横断面周长; $\tau_h$ ——桩尖处剪应力; $\gamma$ ——土的重度;

$\tau_2$ ——土壤表面剪应力。

##### 1.2.1.3 桩基竖向承载力设计值<sup>[3]</sup>

采用分项系数设计方法,桩基的竖向承载力设计值*R*为:

$$R = (Q_s/\gamma_s) + (Q_p/\gamma_p) \quad (3)$$

式中: $Q_s$ ——桩侧阻力的标准值; $Q_p$ ——桩端阻力的标准值; $\gamma_s$ ——桩侧阻力的分项系数; $\gamma_p$ ——桩端阻力的分项系数。对钢筋混凝土预制桩,经验参数 $\gamma_s = \gamma_p = 1.65$ 。

### 1.2.2 沉降计算

#### 1.2.2.1 影响沉降的主要因素

影响单桩沉降的主要因素有<sup>[1]</sup>:桩的长径比 $L/d$ ;桩的刚度系数 $K$ ;桩端处持力层的弹性模量与桩周土弹性模量比值 $E_p/E_s$ ;此外还有土的剖面、荷载水平、荷载持续时间、桩侧桩端各自分担的荷载比、桩侧阻力沿桩身的分布情况等。

#### 1.2.2.2 沉降的计算方法

在沉降变形的漫长过程中,桩周土体的变形起很大作用。它会引起桩侧摩阻力分布的变化、桩端支承力和土体中应力的变化。据国内外资料,至今还没有一种既能反映软土的非线性性质、固结和流变性质,又能在漫长的沉降过程中反映桩与土的界面上相互作用力不断变化的计算模式。本文根据桩与土之间复杂的相互作用、地基土的多层性,采用工程实际上常用的半理论半经验<sup>[4]</sup>的计算方法,即弹性理论公式计算应力的单向应力分层总和法。

#### 1.2.2.3 材料的屈服准则

对桩体与土体材料,采用最大拉应力理论和Mohr-Coulomb剪切破坏准则<sup>[5]</sup>。

## 2 承载性能分析

### 2.1 桩顶沉降、桩端沉降与桩身压缩三者的关系

取桩长为40 m,桩外径为1000 mm,内径为800 mm,桩体下部结构埋在粉质粘土、砂质粘土土体中的一组参数对桩身压缩的变形情况进行研究。Ansys有限元计算结果,*Y*/*Z*方向位移等值线部分云图如图2、3所示。

其桩身压缩、桩顶沉降、桩端沉降曲线图如图4所示。桩体下部土体视为无限大弹塑性体。

从图4可以看出,结合桩顶与桩端沉降曲线,大直径空心桩的荷载传递过程有如下特点:

(1) 桩在竖向荷载作用下,桩体与桩端均有一定的沉降,桩顶沉降等于桩身压缩与桩端沉降之和。

(2) 从桩身压缩曲线的形状来看,拐点A曲线

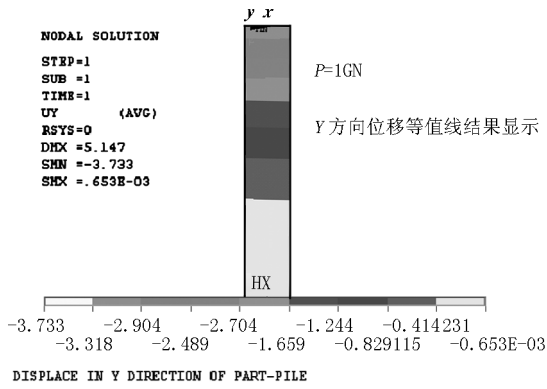


图 2 Y 方向等值线位移云图

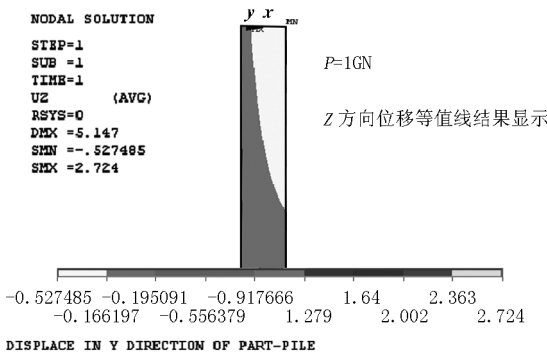


图 3 Z 方向等值线位移云图

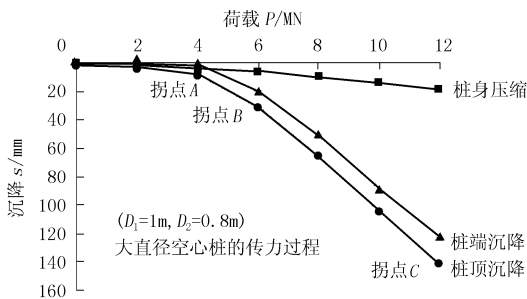


图 4 P-s 关系曲线

依次发挥作用并达到极限值。桩顶荷载由桩侧摩阻力和桩端阻力共同承受,拐点 B 后段曲线下落更快,桩侧摩阻力增量减小,桩端阻力增加,到拐点 C,可以认为桩侧摩阻力增量为零,C 点为极限摩阻力点。此时所施加的桩顶荷载均由桩端阻力承受。

为了更充分地说明桩的下部结构埋置情况对桩的传递性能的影响,本文又取了桩长为 20 m,桩外径为 1000 mm,内径为 800 mm,桩体下部结构埋在淤泥质土体中的参数值,其 P-s 曲线见图 5。P-s 曲线图中出现拐点 A 和拐点 B。拐点 A 范围内曲线说明桩体在受荷载基本上处于线弹性直线。拐点 A 处桩端开始发挥作用,同时桩侧土体也承受荷载。拐点 B 开始,桩端持力土层达到强化,曲线下落比 AB 段稍微缓慢,当大量的荷载传到桩底,桩端持力层就呈现部分屈服,桩侧摩阻力开始达到极限。此时继续加载,桩侧土体出现破坏。拐点 B 所对应的荷载可作为桩体的极限荷载。

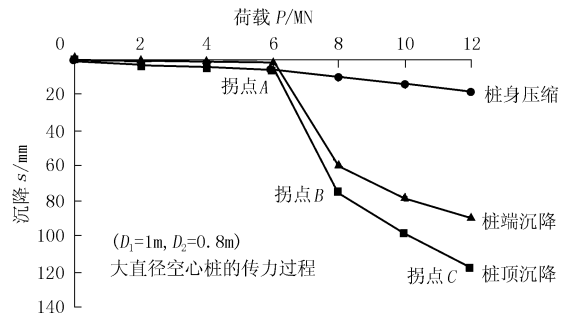


图 5 P-s 关系曲线

综合图 4、图 5 的 P-s 曲线来看,大直径空心桩由于桩身较长,桩径较大,桩身摩阻力的发挥较长。不同桩长、不同强度的土,其屈服发展的进程相互制约。上部结构荷载传给桩体,再经桩侧摩阻力和桩端承载力传递给地基土体,而主要以桩侧摩阻力为主。由桩体承担的荷载通过桩侧摩阻力和桩端承载力传递给周围地基土体。

### 2.2 桩身轴力分布曲线

桩长 L 对桩身轴力的影响见图 6。从图 6(a)可以看出,无论是哪一级荷载,桩身轴力从桩顶向桩端沿桩长呈递减趋势。为了更好地研究桩长与桩身轴力的关系,本文又取了桩径为 4 m,桩长分别为 10、30、50 m 的桩在不同桩端弹性模量 E 下的桩身轴力分布曲线情况(如图 6b、c、d)。长桩的桩身轴力递减明显。在接近桩端时,桩身轴力在小荷载下为零,大荷载下不为零,但数值也较小,这时桩顶荷载全部由桩侧土体和桩体之间的摩阻力来承受,土体受到

内,荷载较小,桩身压缩呈直线,为线弹性变形。随着荷载的增大,桩身压缩曲线向下弯曲,这表明由于桩周土的影响,桩身压缩与荷载的关系呈现非线性。桩身压缩曲线表明:在大荷载作用下,桩体出现了塑性变形,其压缩量等于桩顶沉降与桩端沉降之差。

(3) 桩端沉降随荷载的变化而变化。原点 O 与拐点 A 范围内,桩端沉降几乎为零,桩顶沉降曲线与桩身压缩曲线几乎重合。这表明桩端未受到(或较小受到)由桩顶传下来的荷载反作用力,桩端阻力为零,桩顶荷载由桩侧摩阻力来承担。随着荷载的增大(拐点 A 后段曲线),桩端沉降越来越大,桩顶沉降曲线与桩身压缩曲线渐渐分开,桩端渐渐承受阻力,这表明桩身轴力经由桩顶向下传递,桩身轴力沿桩身逐渐递减,桩侧摩阻力也沿桩身从上向下

了挤压,由挤压作用产生滑移。从递降趋势来看,荷载主要由桩体上部结构来承受,上部桩周土与桩体无摩阻力或摩阻力较小,说明桩周土体并未发挥作用,桩体与桩周土无滑移或较小滑移产生,而下部土体受到的挤压影响较上部大,摩阻力大,桩土滑移大。也就是说,短桩所承受的桩顶荷载易于向桩端

传递,再由桩端土层来承受,这样桩端阻力易于发挥;而长桩的桩端阻力发挥不明显,甚至几乎不发挥。

### 2.3 桩体各参数对桩 $P-s$ 曲线的影响

#### 2.3.1 桩长 $L$ 对桩 $P-s$ 曲线的影响(见图 7)

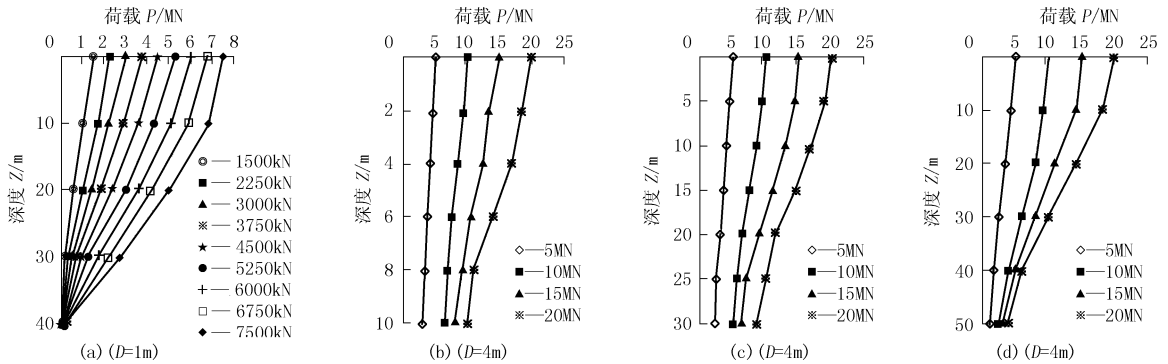


图 6 桩长  $L$  对桩身轴力分布曲线的影响

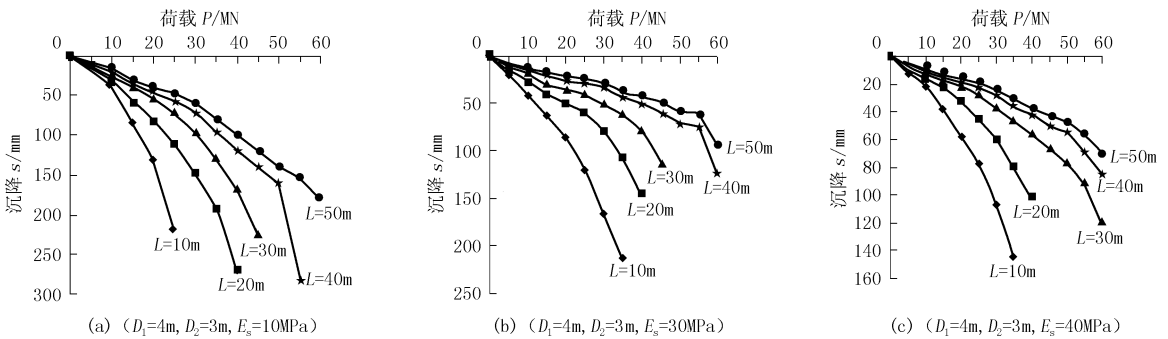


图 7  $P-s$  曲线与桩长  $L$  的关系

从图 7 中可知,随着桩长  $L$  的增加,桩体的极限承载力得到提高。这是由于桩体与桩侧土的摩擦面增大,桩与桩周土之间的摩擦力也加大,大部分荷载由桩体来承受,也有一部分荷载由土体来承受,桩周土对桩体作用有一定的反作用抵抗力。在相同的荷载作用下,随着桩长的增大,桩顶沉降在所取的土层中也有增大的迹象。但桩长  $L$  对桩的承载能力有很大的影响,随着桩长的增加,桩的承载力明显得到了提高。但在桩长从 40 m 增加到 50 m 时,3 种不同土性的弹性模量都明显表示出桩的承载力增加效果不明显。

为更好地研究桩长的增加特别是超长桩对桩的  $P-s$  关系曲线的影响,本文又对桩长分别为 55、60、70、80 m 的桩进一步进行了研究,如图 8 所示。

从图 8 可看出,随着桩长的增加,特别是对于超长桩,桩体的极限承载力增加缓慢,桩顶沉降变化也不十分明显,桩长为 70 和 80 m 的桩  $P-s$  关系曲线几乎重合,这说明超长桩桩长的增加对沉降的影响

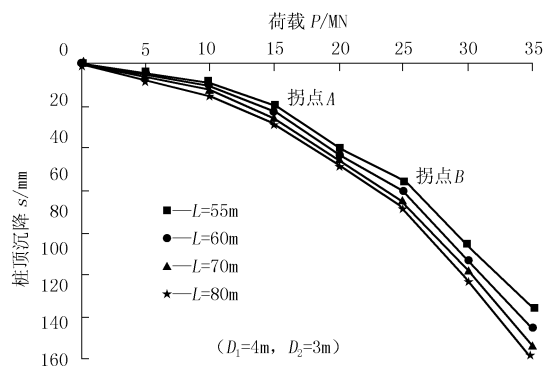


图 8  $P-s$  曲线与桩长  $L$  的关系

很小。建议将拐点  $B$  所对应的荷载作为桩体的极限荷载。

#### 2.3.2 桩径 $D$ 对桩 $P-s$ 曲线的影响(见图 9)

图 9 分别给出了在桩周土土体模量  $E_s = 30$  MPa、桩长  $L = 10、30、50$  m 的  $P-s$  关系曲线图。从图 9 可以看出,在相同桩长的情况下,随着桩径  $D$  的增加,桩的承载力  $P$  得到提高,桩的沉降量  $s$  减

小。其中,桩长  $L = 10\text{ m}$ 、桩径  $D = 6\text{ m}$  的桩其极限承载能力为  $D = 2\text{ m}$  的桩的 3 倍左右;桩长  $L = 30\text{ m}$  时,桩径  $D = 6\text{ m}$  的桩其极限承载能力为  $D = 2\text{ m}$  的桩的 2 倍左右;桩长  $L = 50\text{ m}$  时,桩径  $D = 6\text{ m}$  的桩其极限承载能力为  $D = 2\text{ m}$  的桩的 1.8 倍左右。这

种情况说明,在周边环境相同的同一条件下,随着直径  $D$  的增加,短桩的承载力比中长桩及长桩的承载力提高效果明显。

### 2.3.3 桩体弹性模量 $E$ 对桩 $P-s$ 曲线的影响(见图 10)

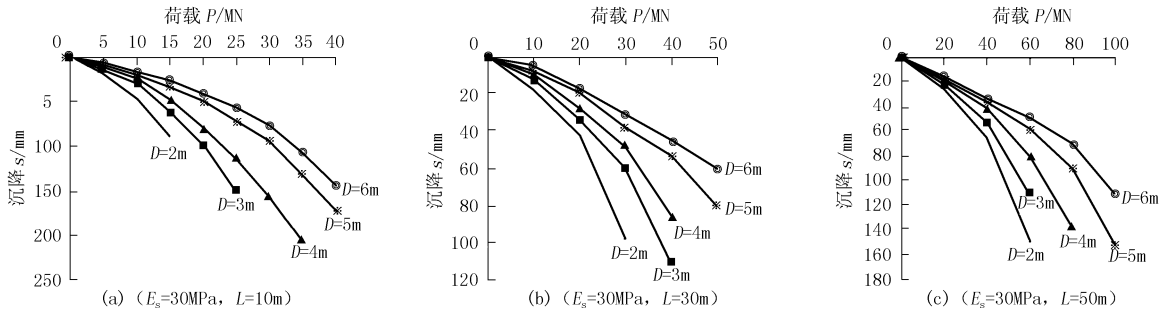


图 9  $P-s$  曲线与桩径  $D$  的关系

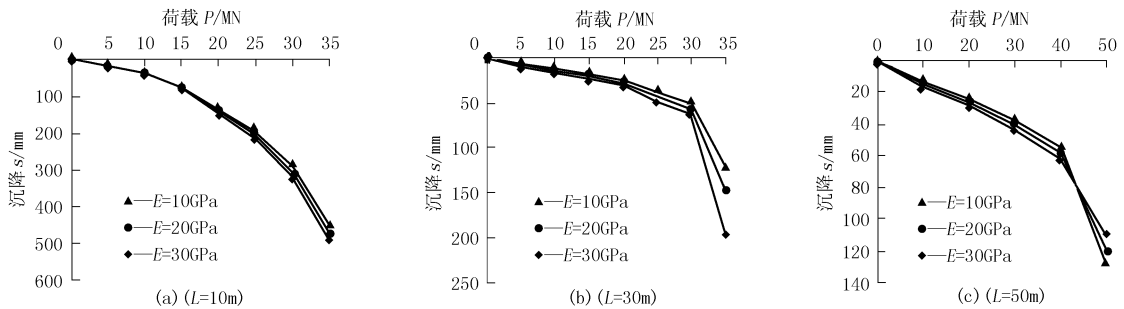


图 10  $P-s$  曲线与桩体弹性模量  $E$  的关系

从图 10 中可以看出,桩体弹性模量  $E$  对桩的承载力几乎没有什么影响。主要原因是桩的直径比较大,相应的截面面积  $A$  大,抗拉压刚度  $EA$  较大,在线弹性范围内,由桩体的压缩量  $\Delta L = NL/(EA)$  可知,桩体的压缩量很小。曲线出现拐点,说明桩体混凝土材料受到压缩破坏,桩体位移迅速加大。

### 2.4 桩体各参数对 $P-S_e$ 曲线的影响

为更好地研究桩端沉降与位移,确定桩长的取值,了解桩端持力层以及桩的承载能力,本文又对桩体各参数对桩端沉降的影响进行了研究。设桩端沉降与桩顶沉降的比值为  $S_e$ 。

#### 2.4.1 桩长 $L$ 对 $P-S_e$ 曲线的影响(见图 11)

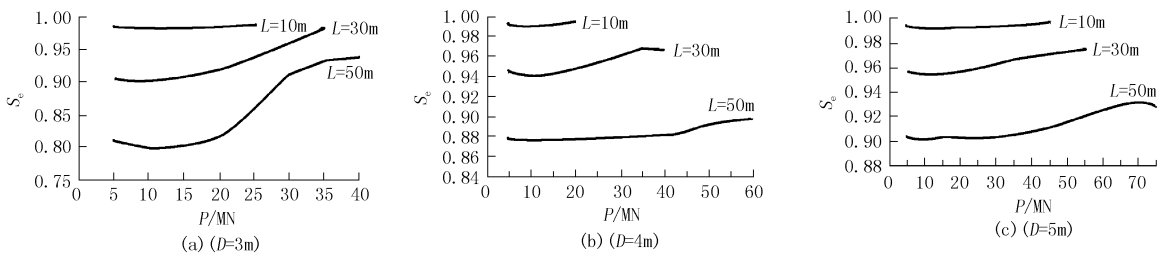


图 11 桩长  $L$  与  $P-S_e$  的关系

由前述已知,桩身压缩等于桩顶沉降减去桩端沉降值。桩径  $D = 3\text{ m}$  时,图 11(a) 桩端沉降为桩顶沉降的 78% 及以上;图 11(b) 为 86% 及以上;图 11(c) 为 89% 及以上。这充分说明桩的沉降是以桩端沉降为主,而且随着桩径  $D$  的加大,桩端沉降与桩顶沉降的比值  $S_e$  也加大。从同一桩径的曲线可以

看出,加大桩长  $L$ ,  $S_e$  值反而减小,即桩端沉降的比例减小。这是因为随着桩长的增加,桩侧与土的接触面积增大,桩侧土与桩体接触面所分担的摩擦力加大,所以桩端阻力减小,从而引起桩端沉降减小。长桩( $L = 50\text{ m}$ )随着荷载的增大,  $S_e$  值向上增大的曲线上明显出现一个拐点,这说明桩身压缩结束,桩侧摩阻力已充分发挥,随后曲线呈现下弯趋势,因

此,该拐点可认为是桩身压缩完成的标志,也是极限摩擦阻力的标志。

由上述分析可知,随着桩长的增加, $S_e$  值减小,这说明桩顶沉降的组成由桩端压缩为主的比例渐渐

减小,桩身压缩所占的比例渐渐加大,所以对于长桩或超长桩,要提高桩体的弹性模量来控制桩身的压缩,减小桩顶沉降变形。

#### 2.4.2 桩径 $D$ 对 $P-S_e$ 曲线的影响(见图 12)

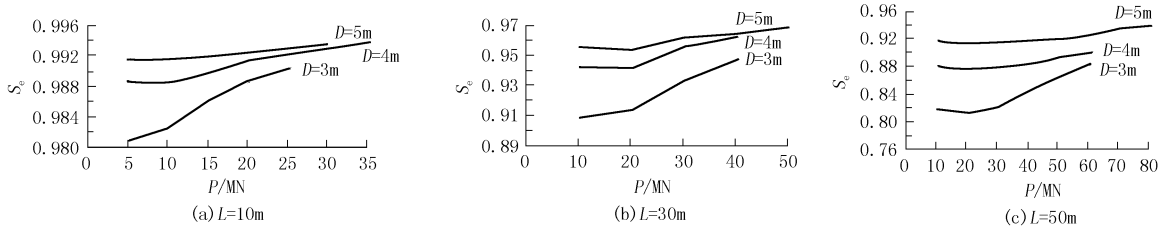


图 12 桩长  $D$  与  $P-S_e$  的关系

从图 12 可知:在桩端土体为不经处理的自然地基时,短桩( $L=10\text{ m}$ )的桩端沉降为桩顶沉降的 98% 及以上;桩长为 30 m 的桩端沉降为桩顶沉降的 90% 及以上;桩长为 50 m 的桩端沉降为桩顶沉降的 80% 及以上。这也充分说明桩的沉降是以桩端沉降为主的,随着桩长的增加, $S_e$  值减小,这一点也验证了前面有关桩长  $L$  对  $P-S_e$  曲线的影响所体现出来的规律。而且随着桩径的加大, $S_e$  值也增大。但在同一桩长的条件下,桩径  $D$  越大, $S_e$  变化反而越小。即长径比  $L/D$  的值越小,桩端沉降与桩顶沉降的比  $S_e$  越小。反之,在桩长一定的条件下,长径比  $L/D$  的值越大,桩端沉降与桩顶沉降的比  $S_e$  越大。这种情况说明,长径比  $L/D$  对桩端沉降与桩顶沉降的比  $S_e$  的影响较大。而且从图 12 中的每条曲线的水平段可以看出,随着桩径的增大,各条曲线的水平段得以加长,这说明增大桩径,可以降低桩顶沉降,提高桩体极限承载能力。另外,随着荷载的增加,桩径小的曲线向上变化的趋势明显,即桩端沉降所占的比例增大,反之,桩端沉降所占的比例减小,这也可以说明桩径的加大,有利于提高桩的承载能力。

### 3 结论

(1) 桩长的增加,可以使桩的承载力得以提高。但在桩长从 40 m 增加到 50 m 时,桩的承载力增加效果不明显。短桩所承受的桩顶荷载易于向桩端传递,由桩端土层来承受,桩端阻力易于发挥;而长桩的桩端阻力发挥不明显,甚至几乎不发挥。工程中,不能盲目地用增加桩长来提高桩的承载能力,而应以变形控制来合理地进行设计。对于长桩或超长桩,要提高桩体的弹性模量来控制桩身的压缩,减小桩顶沉降变形。

(2) 在周边环境相同的条件下,随着直径  $D$  的增加,短桩的承载力比中长桩及长桩的承载力效果提高明显。桩的沉降是以桩端沉降为主。长径比  $L/D$  对  $S_e$  的影响较大。工程上可用增大桩径、采用合理的长径比来降低桩顶沉降,提高桩体极限承载能力。

(3) 对于短桩,桩体弹性模量  $E$  对桩的承载力几乎没有影响。但对于长桩或超长桩,提高桩体的弹性模量来控制桩身的压缩,减小桩顶沉降变形是可取的。

(4) 桩体下部结构的埋置方式对于桩的沉降变形有极大的影响。工程中要严格控制桩端土体的土性,尽量使桩端沉降变形趋于零,以使桩体沉降等于桩顶沉降,使施工后的桩顶标高值尽可能地等于设计值,防止因沉降变形而引起的工程事故发生。

本文由于条件缺乏未作实验,仅作了理论的分析计算。工程中可能会出现一些如桩不垂直时极易断裂、承载力衰变极快、桩端土性不一样所产生的位移和其它力学条件都会大幅度改变等实际情况。希望本文的观点,能给工程界提供一点参考。

### 参考文献:

- [1] 陈星辉,张晓萌,喻小明. 大直径空心桩承载性能有限元仿真及参数分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, (6).
- [2] 高大钊,赵春风,徐斌. 桩基础的设计方法与施工技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 林天健,熊厚金,王利群. 桩基础设计指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [4] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 卢世深,林亚超. 桩基础的计算和分析[M]. 北京:人民交通出版社,1987.