

# 大直径桩沉降敏感性的数值分析

范臻辉<sup>1</sup>, 王永和<sup>1</sup>, 肖宏彬<sup>2</sup>

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南工业大学 岩土工程研究所, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 以某桥梁大直径桩为例, 采用弹塑性有限元法分析了桩周土、桩端土以及桩土界面特性等因素对大直径桩沉降的影响。土体本构关系采用 Drucker-Prager 弹塑性模型, 桩身混凝土采用线弹性模型, 而桩土界面采用接触面单元进行模拟。结果表明: 该桩的荷载-沉降曲线为缓变形, 无陡降段, 其极限承载力应以桩顶沉降来控制, 在 10.2 MN 的设计荷载作用下, 桩顶沉降仅为 14.94 mm, 具有较大的安全储备; 在各影响因素中, 桩周土对该桩沉降的影响最敏感, 其次为桩端土; 在工程实践中, 提高桩周土强度、合理选择持力层以及避免破坏桩土界面强度是减少桩基沉降、保证上部结构安全性的有效手段。

**关键词:** 大直径桩; 沉降; 敏感性; 有限元法

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0012-05

## Numerical Analysis of Settlement Sensitivity for Large Diameter Piles

Fan Zhenhui<sup>1</sup>, Wang Yonghe<sup>1</sup>, Xiao Hongbin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** The settlement of pile foundation of a bridge can affect the safety of the bridge itself and the vehicles on the bridge. However, the complexity and variability of pile foundation as well as the randomness in construction make it uncertain to identify the settlement of pile foundation. Based on large diameter pile foundation of a bridge, it utilizes the elastic-plastic FEM to analyze the factors that affect the pile settlement, such as the pile-side soils, pile-end soils and the characteristics of the pile-soil interface. The soil constitute is assumed to be Drucker-Prager elastic-plastic model, the concreted pile shaft is considered as the linear elastic model and the soil-pile interface is monitored by contact elements. The results show that the pile foundation design for this bridge is reasonable with enough safety potential. Moreover, pile-side soil is the most sensitive factor to affect pile foundation settlements, and then is the pile-end soil. In engineering practice, improving the strength of pile-side soil, properly selecting support layer and avoiding destroying the strength at the pile-soil interface are the effective measurements to decrease the pile foundation settlements, ensuring the superstructure's safety.

**Key words:** large diameter piles; settlement; sensitivity; FEM

## 0 引言

随着我国高速公路、高速铁路的快速发展, 大跨度连续梁桥得到了广泛应用。然而, 连续梁桥作为一种超静定结构体系, 由于其墩台沉降将引起结构内力变化, 因此连续梁桥对基础要求很高。大直径桩因其

稳定性好, 沉降小且均匀, 在桥梁基础中应用较为普遍。但随着行车速度的大幅度提高, 桥梁桩基础的沉降也就有了更高的控制要求。为了控制沉降, 保证桥梁结构和行车的安全, 需分析在影响桩基础沉降的众多因素中, 哪些因素的影响最显著, 以便能在设计中充分利用有利因素, 尽力避免不利因素。

收稿日期: 2008-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678177), 湖南省自然科学基金资助项目(01JJY3043)

作者简介: 范臻辉(1976-), 男, 湖南新化人, 中南大学讲师, 博士, 主要从事桩及特殊土地基处理研究。

目前, 应用在桩基础沉降计算方面的方法主要有荷载传递法<sup>[1-3]</sup>、弹性理论法、剪切位移法<sup>[4,5]</sup>、分层总和法、有限元法<sup>[6-8]</sup>等。其中有限元法, 经过近半个世纪, 对它的研究和应用已经取得了巨大的进展。从理论上说, 有限元法能同时考虑影响桩基础工作性能的主要因素, 如土的非线性、固结时间效应、动力效应、以及桩的特殊边界约束条件等, 它远比传统的分析方法要优越得多。因此, 本文以某桥梁大直径桩为例, 利用弹塑性有限元法, 对影响它沉降性状的各因素进行分析。

## 1 本构模型与计算方法

### 1.1 土体本构模型

土是一种复合体, 具有极为复杂的力学行为。尽管土的线性模型和非线性弹性模型(如邓肯-张模型)用得较多, 但土体在外力的作用下, 不仅产生弹性变形, 而且还会产生不可恢复的塑性变形。本文将土体视为弹塑性体, 采用 Drucker-Prager 屈服准则:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K, \quad (1)$$

式中:  $I_1$  为应力张量第一不变量,  $I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ ;  
 $J_2$  为应力偏量第二不变量,

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2];$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)};$$

$$K = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)};$$

$c$  为土的粘结力;

$\varphi$  为土的内摩擦角。

### 1.2 桩土界面模型

在岩土工程中, 当 2 种相邻材料的变形性能相差较大时, 在一定的受力条件下, 可能会在它们之间的接触面上产生错动、滑移或开裂, 古德曼 (Goodman) 等人提出了岩石节理单元, 被广泛地用作接触面单元。该类接触单元有 2 个“模量”值: 切向劲度系数  $k_s$ 、法向劲度系数  $k_n$ 。这 2 个劲度系数是切向、法向剪应力与相应方向的相对滑移之比。法向劲度系数与法向的变形有关, 因为接触单元在法向不能嵌入, 也不能脱开, 所以当法向受压时, 取较大的值 (这里取  $k_n = 10^{10} \text{ N/m}^3$ ), 而当法向受拉时则可取  $k_n = 1.0 \text{ N/m}^3$ 。切向劲度系数决定于单元两面的相对滑移, 一般认为, 接触单元的切向剪应力与节点的相对变形之间呈非线性关系 (在本文中简化为如图 1 所示的非线性关系), 认为在屈服前剪应力  $\tau$  和剪切位移  $w_s$  呈直线关系, 即

$$\tau = k_s \cdot w_s, \quad (2)$$

式中  $k_s$  为抗剪劲度系数, 如图 1 所示, 它也就是弹性

阶段的应力-位移关系曲线的斜率。

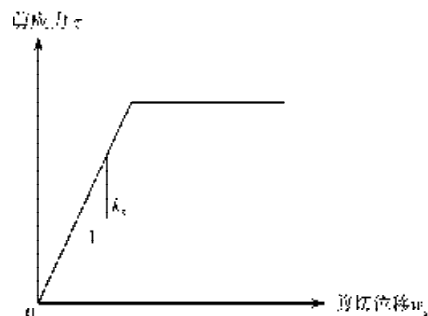


图 1 简化的应力-位移关系

Fig. 1 Simplified relationship between stress and displacement

若剪应力达到最大值  $\tau_u$  使接触面达到破坏, 这时剪应力  $\tau$  不再随剪切位移  $w_s$  而变化。这里, 假定接触单元的屈服条件符合 Mohr-Coulomb 准则, 即

$$\tau_u = \sigma_n \tan \delta + c_1, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_n$  为接触面上的压应力;

$c_1$  表示桩-土接触面上的粘结力;

$\delta$  表示桩-土接触面上的摩擦角;

$c_1, \delta$  值可由室内直剪摩擦试验确定。

### 1.3 计算方法

可以把图 1 所示的非线性问题逐段加以线性化, 采用摩擦迭代法来分析具有接触面单元的结构, 并把剪应力超过  $\tau_u$  的部分 (即  $\tau - \tau_u$ ) 化为单元的等效结点荷载转移出去<sup>[9]</sup>, 其方程如下:

$$\begin{cases} [\mathbf{K}]\{\delta\}_{m+1} = \{\mathbf{R}\} + \{\mathbf{R}\}_m, \\ \{\mathbf{R}\}_m = \sum_{\xi} \iint [\mathbf{B}]^T \{\Delta \tau_{\xi}\} dxdy. \end{cases} \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (4)$$

式中:  $\{\delta\}$  为结点位移;

$\{\mathbf{R}\}$  为结点荷载;

$\{\mathbf{R}\}_m$  为第  $m$  次摩擦迭代需要转移的等效结点荷载;

$[\mathbf{B}]^T$  为接触单元的几何矩阵;

$[\mathbf{K}]$  为结构整体刚度矩阵。

事实上, 摩擦迭代就是将接触面所需要转移的剪应力化为接触面节点上的等效荷载, 和实有的结构荷载一同作为已知荷载, 求解位移。这会在接触面左右两边相对应的结点上分别添加一对大小相同方向相反的荷载, 由于接触面单元没有厚度, 所以, 这些成对的荷载不会改变结构力的平衡。故每次摩擦迭代所转移的等效结点荷载  $\{\mathbf{R}\}_m$  的合力为零, 而且后一次等效荷载往往大于前一次, 即  $\{\mathbf{R}\}_{m+1} > \{\mathbf{R}\}_m$ , 但两者差值越来越小, 趋向收敛。这样, 就在解决变形体力学的有限元方法中引进了极限分析的概念。

在计算中对土体和接触面单元分别进行初应力迭代和摩擦迭代。由于判断收敛的标准和处理方法的不同, 必须将这 2 种迭代截然分开, 可将土体的初应力迭代包括在接触面的摩擦迭代之内, 就是说进行若干次

土体应力迭代达到收敛后才进行一次接触面摩擦迭代。像这样反复迭代下去,直到接触面上的剪应力取得收敛为止。因此,最后一次摩擦迭代结束,土体应力和接触面剪应力都同时达到收敛,这可称为双重迭代法。

在每次摩擦迭代结束后,下次摩擦迭代中的第一次土体应力迭代前,必须将结构所有的单元应力和结点位移恢复到摩擦迭代前的状况。因为,每次摩擦迭代仅改变接触面上的结点荷载,而不能改变本级初始时结构的应力和位移状况。当接触面上的结点荷载改变得恰当之时,接触面上的剪应力迭代结果就趋于收敛,摩擦迭代就结束,此时的单元应力和结点位移作为本级结束时的状态保留下来,又作为下一级的初始条件,进入下一级计算。

表1 材料参数

Table 1 Parameters of material properties

名称	层深/m	层厚/m	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	容重 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粘结力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
杂填土	0~2.8	2.8	3.0	0.4	1 900	15	8
粘土	2.8~21	18.2	28.0	0.3	1 920	25	20
砂质粘土	21~70	49	50.0	0.3	1 950	18	35
桩			31 500	0.2	3 600		

表2 桩土界面特性参数

Table 2 Parameters at the pile-soil interface

名称	抗剪刚度系数 $k_s / (\text{MN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘结力 $c_1 / \text{kPa}$	摩擦角 $\delta / ^\circ$
杂填土	2	15	6
粘土	25	25	20
砂质粘土	30	18	35

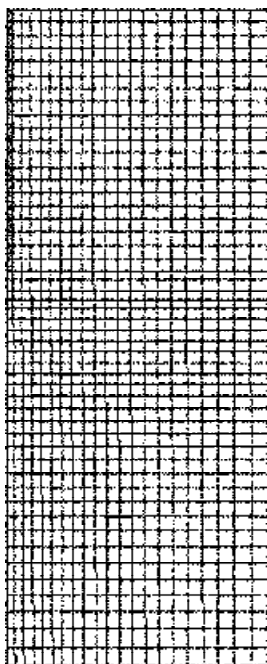


图2 有限元网格划分

Fig. 2 Division of the element mesh

## 2 有限元模型及参数

某城市高架桥梁桩基础,采用一墩一桩,桩径2.0 m,设计桩长25 m。为分析该桥梁桩基的沉降性状,本文采用文献[8]所编制的轴对称有限元分析程序进行研究。程序中土体本构关系采用Drucker-Prager弹塑性模型,桩身混凝土采用线弹性模型,桩土均采用4节点等参单元进行划分。为了较好地模拟桩土共同作用,在桩土界面处采用接触面单元,计算参数见表1、2。在有限元模拟中,为满足边界条件,计算影响范围在水平方向取30 m,在桩底以下取40 m,有限元模型网格划分见图2。

## 3 计算结果及分析

为简化,本文只研究桩顶承受竖向荷载的情况。

### 3.1 荷载-沉降关系

根据荷载-沉降关系可以确定桩基础的极限荷载和极限沉降,以及不同荷载时的沉降量。计算的荷载-沉降曲线见图3。

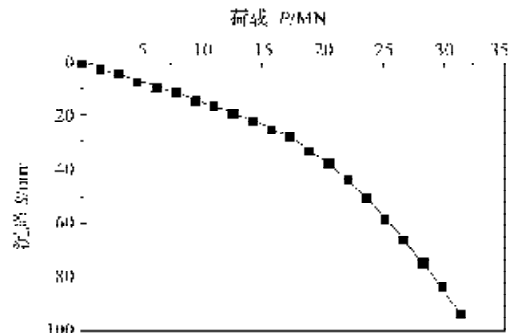


图3 荷载-沉降曲线

Fig. 3 Load-settlement curve

由图3可知,该桩的荷载-沉降曲线为缓变形,无陡降段,其极限承载力应以桩顶沉降来控制。在10.2 MN的设计荷载作用下,桩顶的沉降为14.94 mm,仅为设计控制沉降30 mm的一半,且处于荷载-沉降曲线的直线变化阶段,即弹性阶段。可见采用该桩基础,桥梁结构具有较大的安全储备。

### 3.2 沉降影响因素分析

实际土层如表1分布,但为了探讨桩周土、桩端土以及桩土界面特性等因素对沉降的影响,本文对土

层进行简化, 假定土层分为2层, 桩底以上桩周土层均为粘土, 桩底土层为砂质粘土。

### 3.2.1 桩周土的影响

其他计算参数仍按表1取值, 将桩周土层的弹性模量  $E_s$  分别取为280 MPa、56 MPa、28 MPa、14 MPa、2.8 MPa, 即与原桩周土弹性模量的比值分别为10:1、2:1、1:1、0.5:1和0.1:1, 这样计算的荷载-沉降曲线见图4。

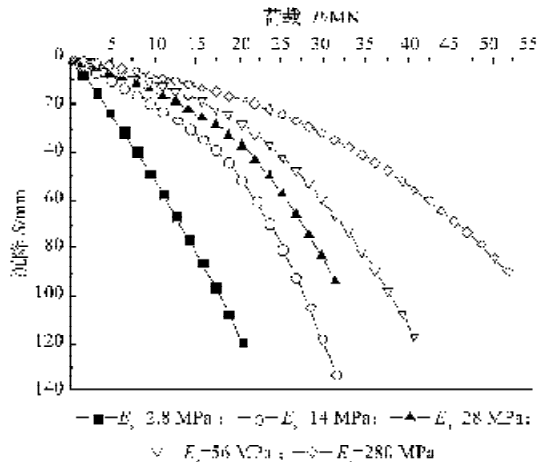


图4 桩周土的刚度对荷载-沉降曲线的影响  
Fig. 4 Influence of the ratio of pile-side soil's stiffness on the load-settlement curves

从图4可以看出, 随桩周土层弹性模量的增加, 桩的荷载-沉降曲线更趋平缓。可见在相同桩顶荷载作用下, 桩周土强度越高沉降越小。

### 3.2.2 桩端土的影响

其他计算参数保持不变, 将桩端土层的弹性模量  $E_b$  分别取500 MPa、100 MPa、50 MPa、25 MPa、5 MPa, 即与原桩端土弹性模量的比值分别为10:1、2:1、1:1、0.5:1和0.1:1, 计算的荷载-沉降曲线见图5。

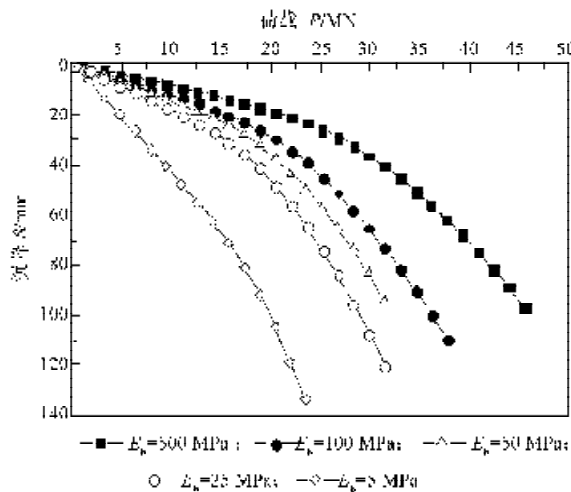


图5 桩端土的刚度对荷载-沉降曲线的影响  
Fig. 5 Influence of the ratio of pile-end soil's stiffness on the load-settlement curves

从图5可以看出, 与桩周土规律一样, 随桩端土层弹性模量的增加, 桩的荷载-沉降曲线也更趋平缓, 相同桩顶荷载作用下, 沉降也越小。可见, 选择较好的持力层(桩端土)可以确保桩的承载力并减少沉降。

### 3.2.3 桩土界面的影响

前面所做的分析都是在桩-土界面保持不变的条件下进行的。现为了分析桩-土界面特性对桩基沉降的影响, 取抗剪刚度系数  $k_s$  为特征参数进行分析。

由式(2)及式(3)知,  $k_s$  与桩-土间的粘结力及摩擦角有关, 即:

$$k_s = \frac{\tau}{w} = f(c, \delta) \quad (5)$$

其他计算参数保持不变, 桩-土界面的参数取值见表3, 其中抗剪刚度系数  $k_s$  与原值的比值分别为10:1、2:1、1:1、0.5:1和0.1:1, 计算的荷载-沉降曲线见图6。

表3 桩土界面特性参数

Table 3 Parameters of pile-soil interface properties

桩-土界面类型	参数名称		
	抗剪刚度系数 $k_s / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘结力 $c_1 / \text{kPa}$	摩擦角 $\delta / ^\circ$
1	2.5	10	6
2	12.5	15	12
3	25	20	30
4	50	30	35
5	250	50	40

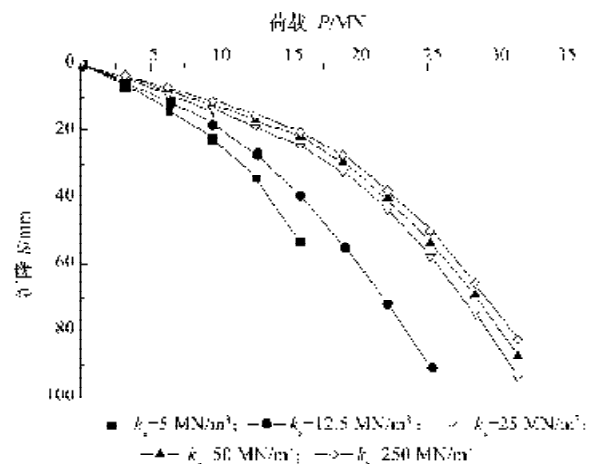


图6  $k_s$  对荷载-沉降曲线的影响

Fig. 6 Influence of  $k_s$  on the load-settlement curves

从图6可以看出, 随着桩土界面抗剪刚度系数的降低, 在相同桩顶荷载作用下, 桩的沉降加大; 而当桩土界面抗剪刚度系数较高(如本文中抗剪刚度系数高于25  $\text{MN}/\text{m}^3$ )时, 其对桩的沉降影响不大。可见, 在桥梁桩基的施工过程中, 加强对孔壁(或桩土界面)的处理, 可以避免桩的过量沉降, 提高结构的安全性。

### 3.2.4 敏感性分析

由于地基的复杂性和变异性,以及施工过程的随机性,桥梁桩基的沉降具有较大的不确定性。将图4~6中设计荷载为10.2 MN对应的桩顶沉降值绘入图7,图7采用半对数坐标。

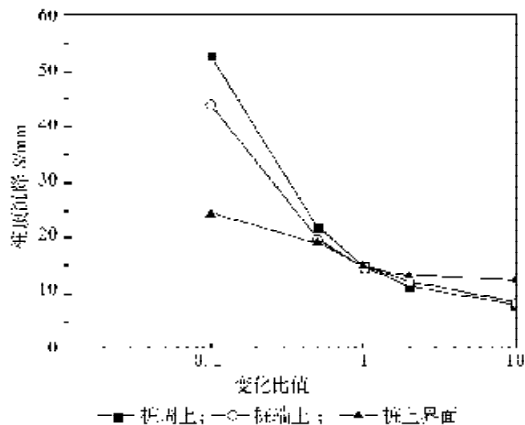


图7 影响因素敏感性分析

Fig. 7 Sensitive analysis of influencing factors

从图7可以看出,在影响桩基沉降的各因素中,最敏感的影响因素是桩周土强度,桩端土次之,最后是桩土界面。

## 4 结论

1) 对某桥梁桩基础进行有限元分析,结果表明:该桩基础设计合理,具有较大的安全储备。

2) 在相同桩顶荷载作用下,桩周土、桩端土以及桩-土界面强度越高,桩顶沉降越小。可见,在工程实践中,提高桩周土强度、合理选择持力层,以及避免破坏桩土界面强度是减少桩基沉降,保证桥梁结构

安全性的有效手段。

3) 在影响桩基沉降的各因素中,桩周土最为敏感,桩端土次之。主要是因为桩周土强度越高,桩周土分担的荷载就越大,传到桩端的荷载就越小,因而沉降也越小。

### 参考文献:

- [1] Xiao H B, Luo Q Z, Tang J, et al. Prediction of load-settlement relationship for large-diameter piles[J]. The Structural Design of Tall Buildings, 2002, 11(4): 285-293.
- [2] 肖宏彬,钟辉虹,张亦静,等.单桩荷载-沉降关系的数值模拟方法[J].岩土力学,2002,23(5):592-596.
- [3] 刘杰,张可能,肖宏彬.考虑桩侧土软化时单桩荷载-沉降关系的解析算法[J].中国公路学报,2003,16(2):61-64.
- [4] 肖宏彬,钟辉虹,王永和.多层地基中桩的荷载传递分析[J].中南工业大学学报,2003,34(6):687-690.
- [5] Liu Jie, Xiao H B, Tang J, et al. Analysis of load-transfer of single pile in layered soil[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2): 127-135.
- [6] 曾友金,章为民.用有限单元法分析超长单桩的荷载传递[J].岩土力学,2002,23(6):803-806.
- [7] 王俊杰,朱俊高,魏松.不同桩底地层超长桩工作性能的数值模拟[J].岩土力学,2005,26(2):328-331.
- [8] 肖宏彬.竖向荷载作用下大直径桩的荷载传递理论及应用研究[D].长沙:中南大学土木建筑学院,2005.
- [9] 雷晓燕,Swoboda G,杜庆华.接触摩擦单元的理论及其应用[J].岩土工程学报,1994,16(3):23-32.
- [10] 肖宏彬,张春顺.桩端土和桩侧土在荷载传递过程中的相互强化[J].株洲工学院学报,2006,20(2):75-79.

(责任编辑:张亦静)