

超长摩擦桩承载性状的有限元法

张齐兴^{1,2}, 姚波³, 俞中奇³

(1. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 湖州市港航管理局, 浙江 湖州 313000)

摘要: 基于三维有限元法, 探讨了超长摩擦桩的数值模拟方法, 分析了桩土界面单元、地基土单元模型参数对数值计算结果的影响. 计算分析结果表明, 桩周薄单元和地基土单元的模型参数对超长摩擦桩承载性状的影响很大. 若均采用邓肯-张 $E-v$ 模型, 抗剪强度指标、密度对桩顶极限荷载影响显著, 而模量参数主要影响荷载-沉降曲线的斜率及极限荷载时的桩顶沉降量.

关键词: 超长摩擦桩; 有限元法; 桩土共同作用; 桩土变形非线性; 邓肯-张模型

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)06-0681-05

随着我国经济的发展和科技水平的提升, 许多大型桥梁和高层、超高层建筑正在或将要建设, 其中有不少位于第四纪覆盖层很厚的东部地区. 在第四纪覆盖层深厚地区的大型工程建设中, 通常选用超长桩基础, 例如, 苏通大桥主桥索塔基础超长桩桩长达 116 m^[1]. 蒋建平等^[2-8]对超长桩的承载性状、荷载传递机理等进行了研究, 取得了不少成果, 但由于超长桩工作性能复杂, 许多问题尚需深入研究. 研究表明, 当超长桩桩底没有达到坚硬土层或基岩时, 超长桩具有摩擦桩的承载性状^[9].

对于超长桩承载性状问题, 传统方法是通过桩的小比例尺模型试验或桩的现场静载试验来研究. 模型试验由于不能模拟地基中的自重应力条件, 因而无法准确地观测到桩基深处土层在实际应力条件下的性状及其与桩的相互作用, 而现场静载试验的影响因素过多, 非大量试验难以找出规律性, 且超长桩现场静载试验的成本往往很高, 试验工期又较长. 现代高性能计算机的迅速发展和普及, 使数值模拟方法成为桩基设计方法发展的最有希望的方法之一^[10].

有限元法是目前工程界和学术界普遍应用的数值研究方法. 通常认为, 只要有限元模型合理, 边界条件确定适当, 材料参数选取恰当, 就可以确保有限元计算模拟分析结果的可靠性. 这也是有限元法被广泛应用于大型工程设计计算的原因所在. 用有限元法模拟超长桩的承载性状, 从理论上讲是可行的, 且前人研究成果表明, 其计算分析结果通常也是可靠的. 但有限元模型的选取、桩土接触问题、地基土本构关系的模型及其参数确定等, 这些方面处理不当将导致计算分析结果失真. 因此, 本文对该问题进行了探讨.

1 有限元模型的建立

1.1 桩单元及其本构模型

大型桥梁和高层建筑物桩基础所用超长桩多属于大直径桩, 其直径一般大于 800 mm^[11]. 在建立有限元模型时, 为了考虑桩土相互作用, 桩单元应与地基土单元类型相同, 宜用实体单元, 而不是杆单元等其他类型的单元.

对钢筋混凝土钻孔灌注桩而言, 在上部结构荷载作用下, 桩身混凝土的应力应变基本呈线弹性关系, 因而采用线弹性模型模拟桩身材料的本构关系是合理的.

1.2 地基土单元及其本构模型

在建立有限元模型时, 地基土通常采用实体单元, 这有利于桩土相互作用的模拟计算.

地基土的应力应变关系往往比较复杂, 这种关系随着所受荷载的增大, 常表现出非线性特性. 可用于描述土体非线性变形的本构模型很多, 如剑桥模型、邓肯-张模型^[12]等, 而且随着研究方法的改进, 将不断有新的模型出现. 由于土体应力应变特性比较复杂, 很难找到一种对各种土体均适用的本构模型, 因而在科研和

生产实际中,会出现对同一问题用不同模型进行计算分析的情况,这种情况下计算分析结果自然不可能完全相同.在我国,邓肯-张非线性弹性模型被广泛用来描述土体(包括细粒土和粗粒土)的应力应变关系.该模型包括 $E-\nu$ 模型和 $E-B$ 模型 2 种,邓肯-张 $E-\nu$ 模型中除有土体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 参数外,尚有切线模量参数 R_f, K, n, G, F, D .切线模量参数的含义及确定方法详见文献 [12].

1.3 桩土界面单元及其本构模型

对超长摩擦桩而言,桩身材料均为混凝土,其模量远高于周围土体,在桩顶竖向荷载作用下,桩土间可能存在变形的不连续性,即接触非线性,或者说在桩附近的土体中会产生大的剪切变形.为了能够模拟桩土的相互作用和桩土间的这种接触非线性特性,在建立有限元模型时,通常在桩土间设置一层界面单元.

界面单元有 2 种形式:一是无厚度的单元,如 Goodman 单元^[13];二是有一定厚度的薄单元,如 Desai 单元^[14]和河海大学接触面单元^[15].无厚度单元,只能模拟错动;有厚度单元可以反映一定厚度内的土体受桩施工扰动而引起的强度、模量的降低程度,在一定程度上它能综合反映桩土间无厚度的接触面及桩周扰动土的性质,把错动或者大的剪切变形,以综合在一起的一定厚度单元内的较大剪应变来反映,因此这种单元更符合实际.

薄单元的厚度通常有一个阈值^[16],根据 Desai 等^[14]的建议,薄单元的厚度可取单元长度的 $1/100 \sim 1/10$.

1.4 有限元模型

为了研究超长摩擦桩的承载性状,本文建立了如图 1 所示的三维有限元模型.其中:桩长 90 m,桩径 2.4 m,在建立有限元模型时,将圆形截面桩按侧面积相等等效为方形截面,桩周薄单元高度为 5 m,厚度为 0.3 m,即厚度/长度 = $1/16.7$,符合 Desai 等^[14]的建议;为满足边界条件,影响范围水平方向取 30 倍桩径,即 72 m,桩底以下取 110 m,约为桩长的 1.2 倍.

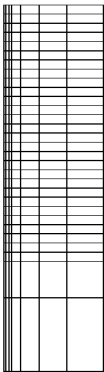


图 1 三维有限元
网格侧视图
Fig.1 Side view
of 3D FEM meshes

2 桩土界面单元模型参数敏感性分析

2.1 计算方案及模型参数

假定地基土为均质,且用邓肯-张 $E-\nu$ 模型模拟其本构关系,模型参数参照苏通大桥索塔地基中的粉细砂层取值,如表 1 所示.考虑到我国超长桩应用地区的地下水位通常较高,地基土、桩及桩周薄单元的密度均取浮密度计算.

桩身混凝土用线弹性模型模拟,弹性模量 $E = 3.3 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.167$,浮密度 $\rho' = 1.4 \text{ g/cm}^3$.

桩土界面用河海大学接触面单元^[15]模拟.模型参数的变化可能对超长桩的承载性状有较大影响,为了研究这种影响,针对表 2 中的 15 个方案进行了计算分析.

表 1 地基土模型参数取值

Table 1 Model parameters for foundation soil in Duncan-Chang model

K	R_f	n	G	F	D	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\rho'/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
320	0.84	0.61	0.40	0	0	31	24	0.98

表 2 各方案桩周薄单元模型参数取值

Table 2 Model parameters for thin-layer interface elements in different schemes

序号	K	R_f	n	G	F	D	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\rho'/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	100	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
2	200	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
3	300	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
4	100	0.8	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
5	100	0.7	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
6	100	0.9	0.56	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
7	100	0.9	0.46	0.40	0	0	20.0	10.0	1.10
8	100	0.9	0.66	0.31	0	0	20.0	10.0	1.10
9	100	0.9	0.66	0.49	0	0	20.0	10.0	1.10
10	100	0.9	0.66	0.40	0	0	30.0	10.0	1.10
11	100	0.9	0.66	0.40	0	0	10.0	10.0	1.10
12	100	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	20.0	1.10
13	100	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	0.0	1.10
14	100	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	0.90
15	100	0.9	0.66	0.40	0	0	20.0	10.0	0.70

2.2 计算成果及分析

图 2 给出了表 2 中各方案计算得到的桩顶荷载-桩顶沉降关系曲线。

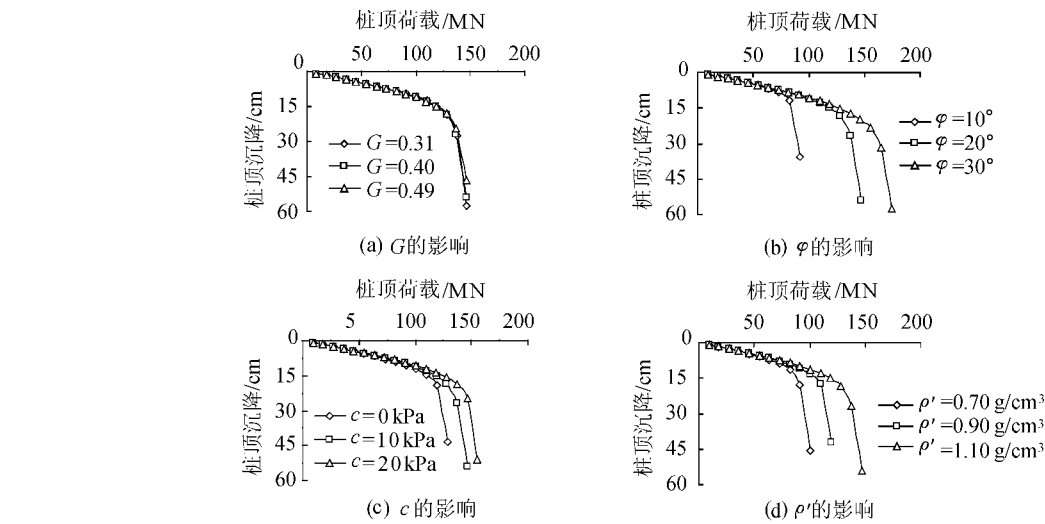


图 2 桩周薄单元模型参数对计算结果的影响

Fig.2 Effects of model parameters for thin-layer interface elements on calculated results

从计算结果可知,随着桩周薄单元模型参数 K 的增大、 R_f 的减小或 n 的增大,桩顶荷载达极限值时的桩顶沉降均有所减小,但桩顶极限荷载的变化不明显。由于桩周薄单元模型参数 K 的增大、 R_f 的减小或 n 的增大均引起薄单元切线弹性模量 E_t 的增大^[15],因此,可以认为桩周薄单元切线弹性模量的增大只使得桩顶荷载-桩顶沉降曲线斜率略有减小,而对桩顶极限荷载的大小几乎没有影响。

从图 2(a)可以看出,随着模型参数 G 的增大,桩顶荷载达极限值时的桩顶沉降均有所减小,而桩顶极限荷载的变化不明显。由于模型参数 G 的增大引起薄单元切线泊松比 ν_t 增大,因此,图 2(a)中桩周薄单元泊松比的增大也只使得桩顶荷载-桩顶沉降曲线斜率略有减小,而对桩顶极限荷载的大小几乎没有影响。

从图 2(b)~(d)可以看出,当桩周薄单元内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和浮密度 ρ' 中任一参数增大时,桩顶极限荷载都会明显增大,同时桩顶荷载达极限值时的桩顶沉降也显著增大。因此,在进行实际工程的数值计算分析前,合理确定桩周薄单元的内摩擦角、黏聚力和浮密度对确保计算结果的可信度至关重要。

计算结果表明:为了模拟桩土共同作用,在桩土间设置界面单元是必要的。为了能够合理、逼真地模拟桩土间的变形非线性特性,必须合理确定桩周薄单元的模型参数。在薄单元的各模型参数中,抗剪强度指标和密度的合理确定对桩顶极限荷载的大小影响很大;而其他模型参数如 K 、 R_f 、 n 、 G 等主要影响荷载-沉降曲线的斜率,即极限荷载时的桩顶沉降量。

3 地基土单元模型参数敏感性分析

3.1 计算方案及模型参数

假定地基土为均质,且用邓肯-张 $E-\nu$ 模型模拟其本构关系。为了研究地基土单元模型参数对超长摩擦桩承载性状的影响,针对表 3 中的 15 个方案进行了计算分析。

桩土界面用薄单元模拟,其本构模型也用邓肯-张 $E-\nu$ 模型模拟。考虑到桩周薄单元的力学性质与地基土的力学性质、成桩工艺等相关,同时结合上述计算分析成果,薄单元的模型参数取值如下:内摩擦角 φ 取地基土内摩擦角的 $2/3$;黏聚力 c 取地基土黏聚力的 $1/2$;浮密度与地基土浮密度相等;其他模型参数如表 4 所示。

桩身混凝土仍用线弹性模型模拟,模型参数同 2.1 节。

3.2 计算成果及分析

图 3 给出了表 3 中各方案计算得到的桩顶荷载-桩顶沉降关系曲线。

从计算结果可知,随着地基土单元模型参数 K 的增大、 R_f 的减小或 n 的增大,桩顶荷载达极限值时的桩顶沉降有所减小,而桩顶极限荷载的大小几乎没有明显变化。由于模型参数 K 的增大、 R_f 的减小或 n 的

表3 各方案地基土单元模型参数取值

Table 3 Model parameters for foundation soil elements in different schemes

序号	K	R_f	n	G	F	D	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\rho'/(g\cdot\text{cm}^{-3})$
1	320	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
2	420	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
3	520	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
4	320	0.74	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
5	320	0.94	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
6	320	0.84	0.51	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
7	320	0.84	0.71	0.40	0	0	31.0	24.0	0.98
8	320	0.84	0.61	0.31	0	0	31.0	24.0	0.98
9	320	0.84	0.61	0.49	0	0	31.0	24.0	0.98
10	320	0.84	0.61	0.40	0	0	21.0	24.0	0.98
11	320	0.84	0.61	0.40	0	0	41.0	24.0	0.98
12	320	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	14.0	0.98
13	320	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	34.0	0.98
14	320	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	0.88
15	320	0.84	0.61	0.40	0	0	31.0	24.0	1.08

增大均引起地基土单元切线弹性模量 E_t 的增大^[12],因此,增大地基土单元的切线弹性模量有利于减小桩顶荷载-桩顶沉降曲线的斜率,但不会改变桩顶极限荷载的大小.

由图3可以看出,当地基土模型参数 G 、内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和浮密度 ρ' 中的任一参数增大时,桩顶极限荷载都会明显增大,同时桩顶荷载达极限值时桩顶沉降的增大也较显著.由于模型参数 G 的增大引起单元切线泊松比 ν_t 的增大,因此,提高地基土的泊松比,有利于提高桩顶极限荷载,也有利于减小桩顶荷载-桩顶沉降曲线的斜率.同时,合理确定地基土单元的内摩擦角、黏聚力和浮密度对确保计算结果的合理性至关重要.

表4 桩周薄单元模型参数取值

Table 4 Model parameters for thin-layer interface elements in computation

K	R_f	n	G	F	D
100	0.9	0.66	0.40	0	0

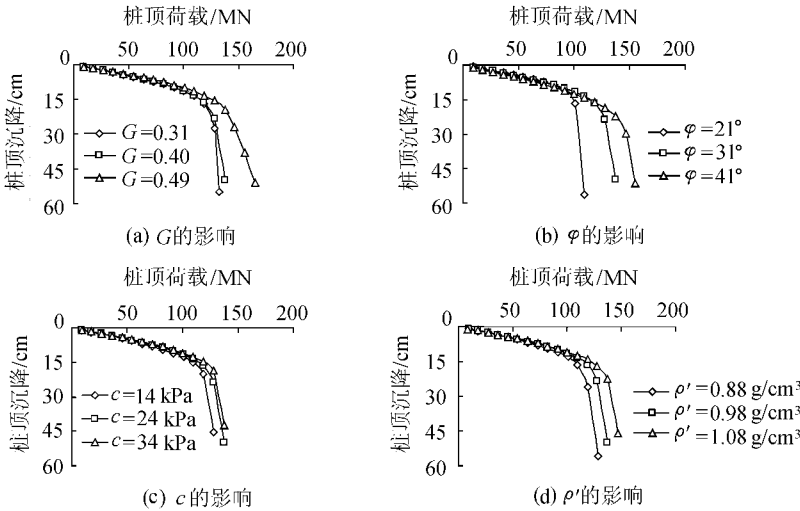


图3 地基土单元模型参数对计算结果的影响

Fig.3 Effects of model parameters for foundation soil elements on calculated results

4 结 语

有限元法是超长摩擦桩承载性状研究中的一种快速、经济和有效的方法,该方法已在工程中得到广泛应用.但在有限元模拟中,只有对一些关键问题处理得当,计算分析结果才具有可靠性和工程指导意义.本文对超长摩擦桩有限元研究中的几个关键问题进行了讨论,并得到以下几点认识:

- a. 为了能够模拟桩土共同作用,桩和地基土应取相同的有限元模型,通常均取为实体单元.
- b. 为了能够模拟桩土间的变形非线性特性,桩土间应设置界面单元.考虑到桩在工作荷载作用下,桩土间发生错动的可能性并不大,而更可能是在桩周一定范围的地基土内产生较大的剪切变形,界面单元宜取有

一定厚度的薄单元,而不宜取无厚度单元。

c. 桩周薄单元模型参数对超长摩擦桩承载性状的影响很大,采用河海大学薄单元模型时,其抗剪强度指标、密度对桩顶极限荷载影响显著,而 K, R_f, n, G 等则主要影响荷载-沉降曲线的斜率。

d. 地基土单元模型参数对超长摩擦桩承载性状的影响也很大,采用邓肯-张 $E-\nu$ 模型时,其抗剪强度指标、密度、 G 对桩顶极限荷载影响显著,而 K, R_f, n 等则主要影响荷载-沉降曲线的斜率。

参考文献：

[1] 河海大学岩土工程研究所. 苏通长江公路大桥跨江大桥工程主桥索塔群桩基础与土体共同作用数值模拟分析研究报告 [R]. 南京 : 河海大学岩土工程研究所 , 2003 .

[2] 蒋建平 , 高广运 , 汪明武 . 大直径超长桩有效桩长的数值模拟 [J]. 建筑科学 , 2003 , 19 (3) : 27-29 .

[3] 郑俊杰 , 彭小荣 . 桩土共同作用设计理论研究 [J]. 岩土力学 , 2003 , 24 (2) : 242-245 .

[4] 张忠苗 , 辛公锋 . 软土地基超长桩受力性状分析 [J]. 工程勘察 , 2003 (3) : 10-13 .

[5] 阳吉宝 . 超长桩承载力机理分析与有效桩长确定 [J]. 力学与实践 , 1995 , 17 (5) : 17-18 .

[6] 池跃君 , 顾晓鲁 , 周四思 , 等 . 大直径超长灌注桩承载性状的试验研究 [J]. 工业建筑 , 2000 , 30 (8) : 26-29 .

[7] 朱向荣 , 方鹏飞 , 黄洪勉 . 深厚软基超长桩工程性状试验研究 [J]. 岩土工程学报 , 2003 , 25 (1) : 76-79 .

[8] 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 .

[9] 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 .

[10] 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 .

[11] 中国建筑科学研究院 . JGJ94—94 建筑桩基技术规范 [S]. 北京 : 中国建筑工业出版社 , 1995 .

[12] 钱家欢 , 殷宗泽 . 土工原理与计算 [M]. 2 版 . 北京 : 中国水利水电出版社 , 1996 .

[13] GOODMAN R E , TAYLOR R L , BREKKE T L . A model for the mechanics of jointed rock [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division , ASCE , 1968 , 94 (SM3) : 637-659 .

[14] DESAI C S , LIGHTNER J G , SIRIWARDANE H J , et al . Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics , 1984 , 8 (1) : 19-43 .

[15] 殷宗泽 , 朱泓 , 许国华 . 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟 [J]. 岩土工程学报 , 1994 , 16 (3) : 14-22 .

[16] 陈开旭 , 安关峰 , 鲁亮 . 采用有厚度接触单元对桩基沉降的研究 [J]. 岩土力学 , 2000 , 21 (1) : 92-96 .

FEM for analysis of bearing behaviors of over-length friction piles

ZHANG Qi-xing^{1 2} , YAO Bo³ , YU Zhong-qi³

- (1. College of Agricultural Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
3. Port-shipping and Management Bureau of Huzhou City , Huzhou 313000 , China)

Abstract : The numerical simulation methods for over-length friction piles were discussed by use of 3D FEM , and the influences of the model parameters for soil-pile interface elements and foundation soil elements on the numerical results were analyzed . The results show that the model parameters for thin-layer interface elements and foundation soil elements are of great influences on the bearing behavior of over-length friction piles . If Duncan & Chang 's $E-\nu$ model was adopted to simulate the foundation soil element and thin-layer interface element , the shear strength index and density of foundation soil are of evident effects on the ultimate load at the top of piles , while the modulus parameters mainly affect the slope of the load-settlement curve and the settlement at the top of piles under ultimate load .

Key words : over-length friction pile ; FEM ; pile-soil coaction ; nonlinearity of pile-soil deformation ; Duncan-Chang model