

## 基于 ABAQUS 软件的单桩静载试验数值模拟

高鲁超,叶生洋

(河海大学 力学与材料学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**为了分析桩基极限承载力分布传递规律以及研究提高承载力的影响因素,利用 ABAQUS 有限元分析软件并结合实际工程勘察资料,选择合适的桩土力学参数,对单桩静载试验进行数值模拟。其模拟结果表明:通过合理的选择桩土力学参数,模拟得到的  $Q \sim S$  曲线与现场实测值基本吻合,说明利用 ABAQUS 有限元分析软件模拟单桩静载试验是可行的。同时分析桩土之间不同摩擦系数  $\mu$  对承载力的影响情况,摩擦系数  $\mu$  值对提高单桩极限承载能力是有利的。因此,摩擦型桩基极限承载力主要靠桩侧摩阻力从桩顶传递到桩端;轴向力传递自上而下逐渐减少;桩土相互作用变化也是提高桩极限承载力的手段。

**关键词:**单桩极限承载力;ABAQUS;摩擦系数  $\mu$ ;  $Q \sim S$  曲线

**中图分类号:**TU473.1

**文献标识码:**A

## Numerical simulation of the single pile static load test based on ABAQUS software

GAO Lu - chao, YE Sheng - yang

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to analyze the law of ultimate bearing capacity of the pile and numerical simulation studies to improve the bearing capacity factors, the finite element analysis software ABAQUS is used by combining with the investigation data of actual project, selected of pile and soil mechanics parameters is selected suitably and numerical simulation of the static load test of single pile is carried out. The simulation results show that through reasonable choice pile of soil mechanics parameters, simulation  $Q \sim S$  curves and filed measured values are well. This indicated that the use of ABAQUS finite element analysis software simulation to pile static load test is feasible. At the same time, it is beneficial to improve the ultimate bearing capacity of single pile through analyzing the effects of different coefficient of friction  $\mu$  on bearing capacity. Therefore, mainly by the friction of the pile side from the pile top is transferred to the pile end bearing capacity limit friction pile; axial force transmission gradually decreases from top to bottom; changes of soil pile interaction but also to improve the ultimate bearing capacity of pile method.

**Key words:** the bearing capacity of single pile; ABAQUS; the coefficient of friction  $\mu$ ;  $Q \sim S$  curve

桩基础是工程中应用最广泛的一种基础形式,桩基础质量直接关系到整个工程的质量安全。基础本身就属于隐蔽工程,进行施工时质量就难以控制,因此桩基检测成为判定桩质量的重要手段<sup>[1]</sup>。检测单桩极限承载力常用方法是通过现场单桩静载试验进行确定,而该方法具有工程量大、花费高、工期长等缺点。

随着时代发展,大型有限元软件的问世,利用有限元软件模拟桩的极限承载力已成为新的潮流趋势。费康<sup>[2]</sup>等介绍 ABAQUS 作为大功能的有限元分析软件,能够较好分析基桩承载力受力性状,并且可以做动荷载的检测;朱向荣<sup>[3-4]</sup>等提出了常见土的本构模型及其工程中应用,为模拟土的变形提供方便;代汝林<sup>[5]</sup>等提出岩土工程分析时

初始地应力平衡问题,提出了四种平衡方法,每种方法都有优缺点;贺嘉<sup>[6]</sup>等人从大直径桩入手,分析了实际工程中桩的承载力性状和桩侧摩阻力以及桩端阻力承担荷载时的情况;陈晶<sup>[7]</sup>则提出桩土之间需考虑相互作用的影响,ABAQUS可以对桩土作用数值模拟分析,为分析桩的承载力传递情况提供了依据。本文根据许多学者研究经验,选取合适的桩土力学参数,适当的本构模型和桩土接触面模型,利用 ABAQUS 有限元软件对实际工程桩进行数值模拟,结合试验桩现场测得数据,来确定单桩极限承载力。

## 1 土的弹塑性模型

Mohr - Coulomb 塑性模型(简称 M - C 模型)主要适用于在单调载荷下的颗粒材料,在岩土工程中应用非常广泛<sup>[2]</sup>。M - C 模型屈服准则假定当土体中任意一点的剪应力达到某个值时发生破坏,在  $\sigma - \tau$  坐标系中,破坏线如图 1 所示。

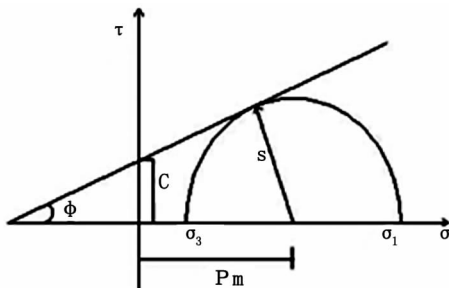


图1 M-C破坏模型

Fig. 1 M-C damage model

因此, M - C 模型屈服函数为:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

从摩尔圆可以得出:

$$\begin{cases} \tau = q \cos \varphi \\ \sigma = p_m + q \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入到式(2)中得:

$$q + p_m \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

式中:  $p_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ ;  $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ ;  $c$  为土的黏聚力;

$\varphi$  为土的内摩擦角。

## 2 桩 - 土接触模型

接触面之间的相互作用包含两部分:接触面的法向作用和切向作用。法向作用采用“硬接触”,其含义:接触面只有在压紧状态时才能存在法向压力,若接触面之间有间隙时则不存在法向压力<sup>[2]</sup>。切向作用常采用库仑摩擦模型,摩擦公

式表示为:

$$\tau_{crit} = \min(\mu p, \tau_{max}) \quad (4)$$

式中:  $\tau_{crit}$  为临界剪应力;  $\mu$  为摩擦系数;  $p$  为法向抗压强度;  $\tau_{max}$  用户指定的最大剪应力。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

本工程位于山东省济南市一居民小区,建筑结构为剪力墙结构,基础形式为复合地基或桩基。在勘察深度范围内,场地覆盖层主要由第四系全新统、冲洪和粘性土、砂土、碎石土组成,上覆一定厚度的杂填土。根据土工试验资料和工程实际经验确定试桩和各层土的力学参数,见表 1 和表 2:

表 1 试桩 S1 力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of test piles S1

试桩编号	d/m	L/m	E/GPa	$\mu$	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
S1	500	16	30	0.2	25

表 2 土的力学参数指标

Tab. 2 Soil mechanics parameters

层号、名称	层厚 /m	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\mu$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	重度 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
②砂土	0.72	22	0.38	40	21	15.2
③粉土	3.1	24	0.36	42	26	15.2
④粉砂	6.3	26	0.34	36	31	15.6
⑤粉质粘土	5.88	26	0.35	45	35	15.6

### 3.2 ABAQUS 有限元计算模型建立

桩土相互作用问题属于平面应变问题,桩土取轴对称模型,根据经验荷载距桩较远处的影响可以忽略,该模型计算区域径向取 20 d,竖向取一倍的桩长。桩身周围主要是粉土和砂土,且内摩擦角  $\varphi > 22^\circ$ ,故采用 Mohr - Coulomb 塑性模型来模拟土的变形<sup>[3]</sup>。桩选用线性的弹性模型,模型侧面施加水平约束  $U_1$ ,底面施加水平和竖向约束  $U_1$  和  $U_2$ 。刚度较大的桩表面为主控制面,刚度较小的土为从属面。单元类型采用 CAX4 单元,靠近桩的土体网格较密集,远离桩的土体网格较稀疏,如图 2 所示。

### 3.3 初始应力平衡

达到初始平衡状态条件:平衡前后土体应力数量级不变,位移一般达到 E - 04 数量级可认为初始

地应力平衡<sup>[5,8]</sup>。初始地应力施加方法有很多种,本文采用的是在编辑关键字窗口中,第一个分析步之前输入指示命令\* initial conditions, type = stress, input = × ×. csv 方法平衡地应力。图3和图4显示初始应力平衡前后  $U_2$  变形图。

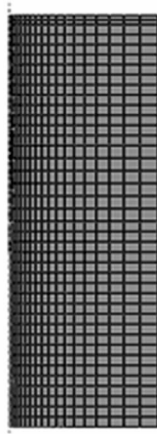


图2 网格划分图  
Fig. 2 Mesh map

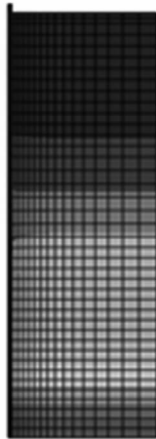


图3 平衡前位移云图

Fig. 3 Pre equilibrium displacement nephogram



图4 平衡后位移云图

Fig. 4 The displacement nephogram after equilibrium

### 4 结果分析

桩顶荷载分为 169、339、509、679、849、1 019、1 189、1 359 kN,  $Q \sim S$  模拟值和实测值对比图,见图5。模拟值和实测值误差分析见表3,从  $Q \sim S$  曲线看,模拟沉降数据和实测数据发展的基本趋势是一致的,该误差也是可以接受的。

图6为侧摩阻力沿桩长变化曲线。在缓慢施加所有荷载时,桩身上部均出现负摩阻力;桩侧负摩阻力先增大后减小进而转变为正摩阻力;在桩端附近侧摩阻力近乎为零,说明承载力主要是靠桩的侧摩阻力承担,该桩为典型摩擦型桩。图7为轴向力沿桩长变化曲线。从施加 169 kN 荷载开始,轴力就已经从顶部传递到端部,轴力沿桩长逐渐减少;在各级荷载的轴力传递速率也是不同。

由于桩土接触面的摩擦系数  $\mu$  无法通过实验精确获得,为此讨论  $\mu$  的变化对模拟结果的影响。图8为不同摩擦系数下桩顶处  $Q \sim S$  图,荷载取值为 1 359 kN 情况。桩土摩擦系数  $\mu$  的增加引起桩顶的沉降减少;曲线明显陡降趋势逐渐变为近乎平滑直线趋势,曲线的拐点逐渐增大,承载力取值逐渐增大,摩擦系数达到提高承载力的效果。

表3 实测数据与模拟数据对比

Tab. 3 The comparison between measured data and simulated data

荷载等级/kN	实测值/mm	模拟值/mm	相对误差%
169	1.42	1.41	-0.90
339	2.47	2.93	15.05
509	3.63	4.42	14.20
679	5.02	5.97	12.97
849	6.51	7.50	11.20
1 019	8.36	9.23	7.71
1 189	10.73	11.32	3.91
1 359	13.58	13.58	-1.07

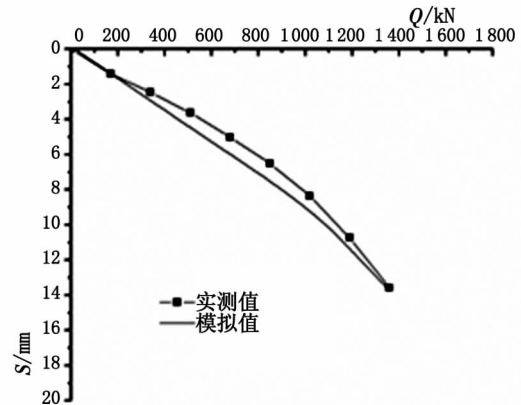


图5  $Q \sim S$ 对比图

Fig. 5 Comparison chart of  $Q \sim S$

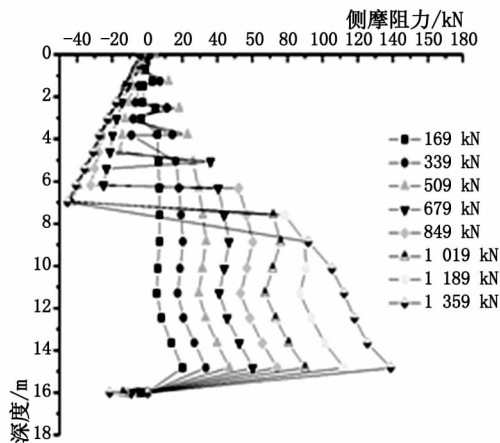


图6侧摩阻力分布图

Fig. 6 Distribution map of side friction

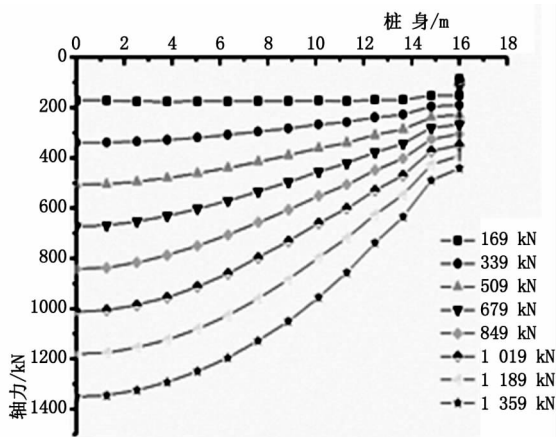


图7 轴向力分布图

Fig. 7 The distribution map of axial force

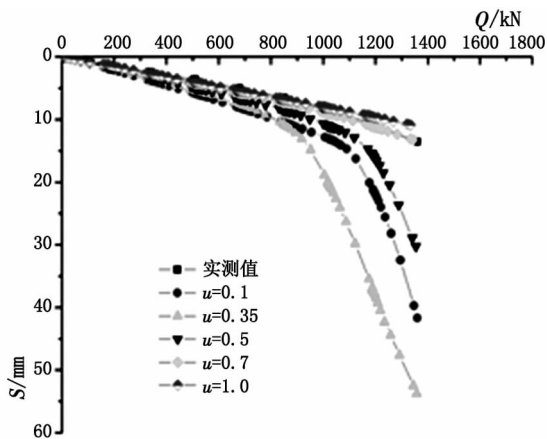


图8 不同摩擦系数下的Q~S对比

Fig. 8 Q~S contrast with different coefficient of friction

## 5 结论

1) 当无法直接通过现场静载试验确定单桩极限承载力时,可以结合工程实际勘察资料,利用 ABAQUS 有限元分析软件数值模拟计算。本文通过模拟计算结果和实测结果相对比,荷载—沉降曲线变化规律基本一致,说明用有限单元法来模拟现场静载试验是可行的。

2) 随着摩擦系数  $\mu$  的逐渐增大,桩顶沉降逐渐减少,当  $\mu = 1$  时,桩顶  $Q \sim S$  曲线几乎为一条直线,显然摩擦系数  $\mu$  可提高桩基的极限承载力。

3) 摩擦型桩承载力主要靠桩侧摩阻力进行传递,随着荷载逐渐增大,桩侧摩阻力承担大部分荷载,在桩端处承担少量荷载;受其影响轴向力也逐渐减小,在桩身上部较大,下部承受较小的轴力。

## 参考文献:

- [1] 刘屠梅,赵竹占,吴慧明. 基桩检测技术与实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [3] 朱向荣,王金昌. ABAQUS 软件中部分土模型简介及其工程应用[J]. 岩土力学,2004(25):144-148.
- [4] 杨春. 基于最小二乘支持向量机岩土本构模型的有限元分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(3):26-29.
- [5] 代汝林,李忠芳,王姣. 基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2012,29(9):76-81.
- [6] 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.
- [7] 陈晶. 基于 ABAQUS 的桩土共同作用的数值模拟[J]. 河南科学,2009,27(8):974-976.
- [8] 苑利飞,鹿群,杨海勇. 软土地区群桩效应影响因素的有限元分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(4):50-53.

(责任编辑 王利君)