

文章编号:1001-1986(2007)03-0055-04

# 单桩不同加载条件下有限元模拟及侧摩阻力分析

徐 燕, 佴 磊

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**采用弹塑性有限元法,结合岩土体结构特征,应用接触单元模拟桩土之间的不连续面,分别对单桩传统静载加载方式和自平衡加载方式进行数值模拟。自平衡加载方式的数值模拟结果与实际自平衡测试结果吻合较好,说明选取的模型和参数比较合理。进而采用此模型和参数,对传统静载加载方式进行数值模拟,得出桩上部荷载传递过程中桩及桩周岩土体应力及位移,求出各单元的应力应变,确定出桩侧法向应力,结合桩土之间摩擦试验的参数,根据莫尔—库仑理论求出桩侧摩阻力。最后将有限元数值模拟和自平衡实测侧摩阻力值进行对比,验证了在选用合理的模型和物理力学参数的基础上,有限元计算的侧摩阻力值和实测值较吻合,通过有限元方法计算获得的单桩侧摩阻力值具有一定的可借鉴性和实用性。

**关键词:**有限元法; 静载测试; 自平衡测试; 桩侧法向应力; 桩侧摩阻力

**中图分类号:**TU413.4    **文献标识码:**A

## Pile under different loading situation by the FEM simulation and analysis on pile lateral friction resistance

XU Yan, NAI Lei

(Construction and Engineering College, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** This paper applied the plastic and elastic FEM to simulating static loading method and self-balanced method of single pile. It used contact element to simulate the discontinue face between pile and soil and combined the structure characteristics of soil and rock mass. The outcomes of simulation of the self-balanced method and that of the self-balanced method in field coincide better, so the model and coefficients used is reasonable. And then, through the simulation of the static loading method, the stress and displacement of pile and soil around the pile is analyzed. At the same time, the value of stress and strain of the element is obtained and the pile lateral normal force is determined. Finally, we get the pile lateral friction resistance combined with friction parameters by piles territories test, according to Mohr—coulomb theory. Compared the outcomes of FEM Simulation with outcomes of self-balanced method, it is certified that they coincide better based on reasonable selection of the physical parameters and mechanics models. Getting pole lateral friction resistance through FEM calculation is feasible.

**Key words:** finite element method; static loading test; self-balanced test; pile lateral vertical force; pile lateral friction resistance

收稿日期: 2006-10-19

基金项目:吉林省交通厅科研项目(2003-01-13)

作者简介:徐 燕(1981—),女,满族,辽宁锦州人,博士研究生,从事地质工程和岩土工程方面的研究。

- [9] 谢卫红,卢爱红,李顺才,等. 岩石分形节理光弹实验与数值模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(1): 35—37.
- [10] 于广明,张健,赵建峰,等. 含分形断层面岩体破坏的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2399—2402.
- [11] 谢和平. 分形几何—数学基础与应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1991.
- [12] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 18—23.
- [13] LEE Y H, CARR J R, BARS D J, et al. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1990, 27(6): 453—464.
- [14] HUANG S L, OELFKE S M, SPECK R C. Applicability of fractal characterization and modelling to rock joint profiles[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1992, 29(1): 89—98.
- [15] MANDELBROT B B, NESS J W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications[J]. SIAM Rev., 1968, 10(5): 422—437.
- [16] BROWN S R. Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness[J]. J. Geophys. Res., 1987, B92, 1337—1347.
- [17] VOSS R. Fractals in nature[C]//Peitgen H, Saupe D, ed. The Science of Fractal Images. Berlin: Springer, 1988, 21—69.
- [18] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社, 1988.

随着高层建筑及桥梁工程建设的增多,桩基础的应用越来越广泛。目前桩基检测方法中,静载试验是单桩极限承载力测试中最直接和最可靠的方法,但其时间较长,费用高,对于承载力较高的大型桩难以直接测出。自平衡测试方法是近年来广泛应用于公路桥梁大型桩单桩极限承载力测试的一种新方法。该方法装置简单,场地占用少,速度快,较之静载试验费用低。存在的问题是其受力机理与桩承载机理不同,上段桩受到的土的侧摩阻力方向是向上的,与正摩阻力具有很大的不同。实际桩承受荷载后,桩周土(桩侧土和桩端土)的位移是连续的,而自平衡法桩周土的位移是不连续的。另外,平衡点难以确定,通常导致只有半段桩完全发挥承载力。

大型桩基承载力自平衡测试法无论从机理上还是平衡点确定上还存在许多不足之处,在研究单桩承载和变形的方法中有限单元法能较好地符合桩土小变形的特点,能计算各点的地应力、应变、破坏区的位移大小和方向,便于进一步分析。本文以龙华松花江特大桥主桥墩试桩为例,对单桩自平衡加载方式和传统静载加载方式进行了数值模拟,并结合桩土摩擦试验,给出确定单桩侧摩阻力的一种新方法。

## 1 有限元法的基本原理

有限元是求解连续区域内的边值和初值问题有效的数值方法,根据所分析问题的特征,把分析域离散成有限个只在结点相联结的子域即单元。并对每一个单元进行单元分析,形成单元刚度矩阵,在此基础上形成总体刚度矩阵,引入根据外部荷载性质生成的结点荷载列阵以及约束条件,求解出场函数在结点上的量值,即可得到场函数在整个区域内的分布和变化规律。

本次数值模拟为二维有限元模拟,采用弹塑性模型,Drucker-Prager 屈服准则。分析中采用节理单元来模拟桩土之间的不连续面。

### 1.1 有限单元法基本方程

单元基本方程为:以单元结点位移为未知量,  $n$  个结点单元的位移矩阵用  $\{\delta\}^e$  表示;单元内任一点的位移  $\{\Phi\} = [N]\{\delta\}^e$ ;单元结点力  $\{F\} = [K]^e\{\delta\}^e$ ;平衡方程  $[K]\{\delta\} = \{R\}$ , 式中  $[N]$  为形态矩阵,  $[K]^e$  为单元刚度矩阵,  $[K]$  为总体刚度矩阵,  $\{R\}$  为外荷载列阵,  $\{\delta\}$  为结点位移列阵。

### 1.2 弹塑性模型屈服准则

采用 Drucker-Prager 屈服准则,也称为广义米赛斯准则,屈服函数为  $F(\sigma) = \bar{\sigma} + 3\alpha\sigma_m - k_d = 0$

式中  $\alpha = \frac{-2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3+\sin\varphi)}$ ;  $k_d = \frac{6\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}$ ;  $\varphi$  为内摩擦角。采用此  $\alpha$ 、 $k_d$  为莫尔-库伦面的上界,在工程计算中是偏于安全的。

## 2 自平衡测试加载方式有限元分析

龙华寺松花江特大桥位于吉林省松原市。大桥设计基础全部采用钻孔灌注桩,主桥墩桩径 2 m、桩长 65 m。选取该特大桥主桥 1 号墩 1# 试桩进行单桩承载特性分析。首先以自平衡实测资料为基础,对该桩进行自平衡加载条件下的数值模拟。

### 2.1 有限元模型

所建模型为弹塑性模型,桩体为非刚体,会产生自身压缩。根据对称性选取桩的一半进行剖分,考虑桩对桩周土的影响范围,桩右取 50 m,考虑桩端阻力的影响范围,桩下部取 10 倍桩径深度,有限元模型如图 1 所示。采用的桩侧各地层物理力学性质参数如表 1 所示。

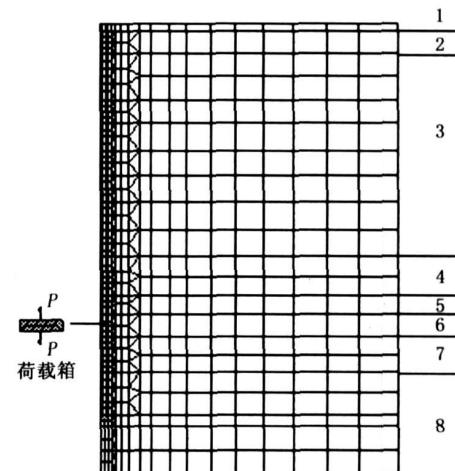


图 1 自平衡测试加载方式有限元模型及各岩层图

Fig. 1 The FEM model of self-balanced method and strata  
1—细砂;2—粗砂;3—粘土;4—中砂;5—砾砂;  
6—全风化泥岩;7—强风化泥岩;8—中风化泥岩

表 1 各土层物理力学参数表

Table 1 Physical mechanic parameters of strata

岩性	地层厚度/m	容重 $\gamma$ / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹模 $E$ / $\text{kPa}$	粘聚力 $C$ / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	摩擦角 $\Phi$ /( $^\circ$ )
细砂	5.24	20.1	9 780	0.0	19.9
粗砂	7.50	21.2	11 400	0.0	25.0
粘土	26.20	19.1	3 450	10.0	11.0
中砂	6.30	20.4	12 600	0.0	21.0
砾砂	3.20	21.3	15 700	0.0	25.5
全风化泥岩	3.80	21.1	13 100	35.0	16.5
强风化泥岩	6.00	20.6	36 200	70.0	18.0
中风化泥岩	6.76	21.0	49 600	100.0	20.0

## 2.2 有限元模拟结果分析

对数值模拟结果从位移和轴力分布两个方面进行分析。图 2 为有限元模拟桩的竖向位移和深度曲线, 图 3 为自平衡测试桩的竖向位移和深度曲线。表 2 为自平衡测试和有限元数值模拟位移情况对比表。

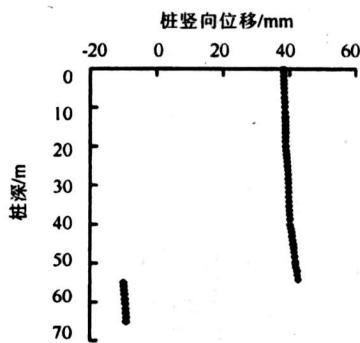


图 2 有限元模拟桩的竖向位移和深度曲线

Fig. 2 The curve of pile vertical displacement and depth by the FEM simulation

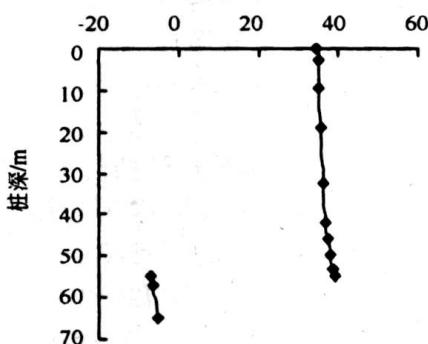


图 3 自平衡测试桩的竖向位移和深度曲线

Fig. 3 The curve of pile vertical displacement and depth by self-balanced test

表 2 自平衡测试和有限元数值模拟位移情况对比表

Table 2 The placement comparison between self-balanced test and the FEM simulation

	荷载箱上底板位移/mm	荷载箱下底板位移/mm	桩顶位移/mm	桩弹性压缩量/mm
自平衡测试	39.36	6.72	34.79	4.57
有限元数值模拟	42.70	9.90	38.10	4.60

从图 2 和图 3 可以看出, 有限元数值模拟与自平衡测试位移曲线规律相同, 上半段桩的位移远大于下半段桩, 上半段桩摩擦阻力发挥较好, 下段桩侧摩阻力没有达到极限状态。由表 2 可以看出, 其位移特征和实测值比较接近, 数值模拟比自平衡测试位移结果稍大, 这是由于数值模拟是成孔状态理想孔壁光滑的情况, 而实际钻孔并不能达到这种理想状态。另外数值模拟对复杂桩土作用进行了一定的简化。下面将从桩的轴力随桩深的分布关系来分析

摩阻力的发挥情况。图 4 分别为自平衡模拟桩轴力与桩标高曲线、实测桩轴力与桩标高曲线。

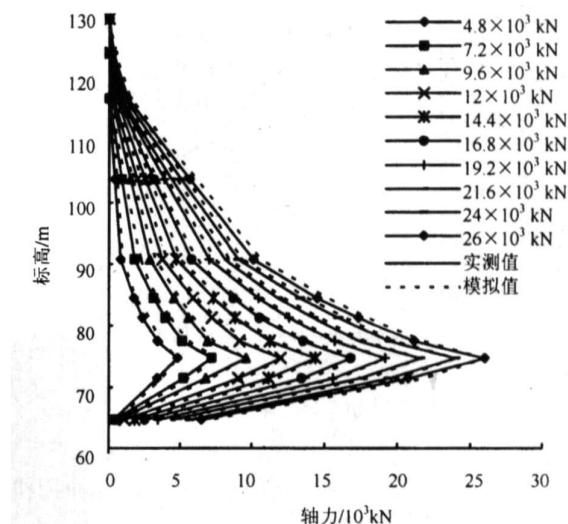


图 4 自平衡模拟和实测轴力与桩标高曲线

Fig. 4 The curve of the axial force and height mark by self-balanced test and the FEM simulation

自平衡模拟与实测轴力基本吻合。加载桩身轴力分布与传统静载轴力分布曲线有相同的趋势, 即加载处轴力最大, 由于侧摩阻力的发挥, 桩身轴力随着距荷载箱距离增大而减小。

综上所述, 本次有限元模型和参数的选取比较合理, 能够很好的模拟桩土所在的实际情况, 因而将采用此模型和参数, 对该桩进行传统静载加载条件下的数值模拟。

## 3 传统静载试验的有限元模拟

龙华寺松花江特大桥主桥 1 号墩 1# 试桩预估极限承载力为  $2 \times 30000 \text{ kN}$ , 由于其承载力很高, 传统的静载荷试验无法直接加载测试, 也就无法对其承载性状进行研究。因而本文采用有限元法对其进行传统静载加载模拟。

### 3.1 有限元模型

传统静载有限元模拟与自平衡有限元模拟采用相同的计算模型和参数, 所加载方式有所不同, 单桩传统静载试验, 是将荷载作用于桩顶。

### 3.2 有限元模拟结果分析

通过数值模拟得到的试桩荷载沉降  $Q-S$  曲线如图 5 所示, 为缓变型  $Q-S$  曲线。在静载试验中, 对于缓变型  $Q-S$  曲线, 一般可取  $S=40 \sim 60 \text{ mm}$  对应的荷载作为极限承载力。在本次模拟中, 桩顶位移达到  $40 \text{ mm}$  时, 桩顶荷载为  $54590 \text{ kN}$ , 此承载力与自平衡测试该桩的极限承载力大于  $53102 \text{ kN}$  相符。

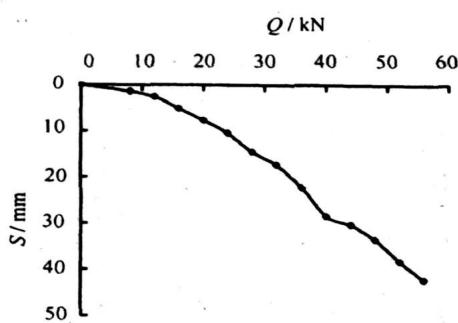
图 5 有限元模拟传统静载荷载( $Q$ )—沉降( $S$ )曲线

Fig. 5 The curve of load and displacement by traditional static loading test of FEM simulation

### 3.3 桩侧摩阻力分析

#### 3.3.1 主要理论基础

基于库仑理论,从荷载—桩—土的相互作用机制出发,首先根据有限元法计算出桩侧法向应力  $\sigma$ ,再根据摩尔—库仑强度准则  $\tau = \sigma \tan \varphi + c$  确定出桩与各地层的抗剪强度值  $\tau$ (式中  $c$ 、 $\varphi$  为中型剪切试验得出的桩身混凝土与地层的实际摩擦参数),再由  $R_s = \tau_1 A_1 + \tau_2 A_2 + \dots + \tau_n A_n$  确定桩侧摩阻力( $R_s$ —为桩侧摩阻力;  $\tau_i$ —为第  $i$  地层与桩之间的抗剪强度值;  $A_i$ —为桩穿越  $i$  地层内的侧表面积)。

#### 3.3.2 有限元模拟确定桩侧法向应力

根据传统静载有限元模拟,可以确定出每个地层与桩接触处各节点的应力。每一地层的桩侧法向应力  $\sigma$  值即为该地层与桩接触处各节点应力的平均值,当  $\sigma$  值大于岩体的屈服强度时,取岩体的屈服强度值作为法向应力  $\sigma$  值。龙华寺松花江特大桥主桥 1 号墩 1# 试桩的有限元模拟确定的桩侧法向应力见表 3。

表 3 各种试验方法确定的桩的力学指标

Table 3 The dynamic indexes of pile determined by some tests

岩性	有限元方法确定的法向应力 /kPa	中型剪切试验		自平衡测试和有限元	
		传统静载有限元模拟的桩侧摩阻力 /kN	自平衡测试侧摩阻力 /kN	粘聚力 /kN·m <sup>-2</sup>	内摩擦角 /°
细砂	25	283	288	0	19.9
粗砂	66.6	1 465	995	0	25
粘土	203.3	8 145	8 847	10	11
中砂	313.9	4 767	4 418	0	21
砾砂	268	2 569	2 817	0	25.5
全风化泥岩	353	3 331	3 835	35	16.5
强风化泥岩	356	10 766	10 506	70	18
中风化泥岩	600	13 997	14 786	100	20
总桩侧摩阻力	45 323	46 492			

#### 3.3.3 摩擦试验确定桩身混凝土与地层的摩擦参数

采用中型剪切摩擦试验,模拟桩与地层之间的相互作用,得出桩与地层之间的摩擦参数,即  $c$ 、 $\varphi$

值。试验过程中考虑桩周地层岩性,通过钻孔获得实际地层岩土试样,模拟成孔工艺对桩承载力的影响(即成桩过程中泥浆护壁对桩承载力的影响),混凝土试块采用工程实际配比来确定。按岩土层实际埋藏的深度来设计轴向最大加载,将最大荷载分成 5 级,分级加载,以等应变法来控制加载速度,最后通过正应力—剪应力曲线来求得各岩土层的  $c$ 、 $\varphi$  值。底摩擦试验比较真实地模拟桩与桩周岩土体的相互作用过程,据此得出的桩身混凝土与底层之间的摩擦参数更加可靠。中型剪切试验获得的桩身混凝土与各地层之间的摩擦参数见表 3。

#### 3.3.4 桩侧摩阻力比较

自平衡测试和有限元模拟确定的桩侧摩阻力如表 3 所示,通过传统静载有限元模拟计算得出总的桩侧摩阻力值为 45 323 kN,自平衡测试结果为 46 492 kN,有限元模拟计算结果与现场测桩结果吻合较好,说明该方法在理论上是可行的,通过有限元模拟确定桩侧摩阻力值具有借鉴意义,同时该方法还具有计算快、经济的特点,这也为用室内方法确定桩的侧摩阻力开辟了新的途径。

## 4 结论

a. 自平衡测试有限元模拟计算结果表明,桩顶、桩底及荷载箱上下底板位移及桩轴力与自平衡实测结果吻合较好,说明有限元数值模拟过程能很好的模拟工程实际,模型及参数的选取较合理。

b. 通过传统静载加载条件下有限元数值模拟得出桩侧法向应力,结合中型剪切试验得出的桩身混凝土与地层之间的摩擦参数,根据莫尔—库仑理论,求得的桩侧摩阻力与自平衡测试结果吻合较好,说明该方法具有一定的可行性。

c. 有限元数值模拟具有计算快、灵活性高、经济的特点,在采用合理的参数情况下,计算出的桩侧摩阻力有很强的借鉴性,对具体的工程建设有很好的指导意义。

## 参考文献

- [1] 赵法锁,俞剑勇,罗丽娟,等.灌注桩桩土相互作用试验及有限元模拟研究[J].工程地质学报,2001,9(1):87—92.
- [2] 阳吉宝.超长桩的荷载传递机理[J].岩土工程学报,1998,20(6):108—112.
- [3] 陈仁朋,梁国钱,俞济棠,等.考虑桩土相对滑移的单桩和群桩的非线性分析[J].浙江大学学报,2002,36(6):668—673.
- [4] 刘凤琴,刘用暖,马斌,等.桩—土联合工作形状的研究[J].武汉大学学报(工学报),2004,37(4):86—90.<http://www.cnki.net>
- [5] 佴磊.岩土工程数值法[M].长春:吉林大学出版社,1994.
- [6] 罗骐先.桩基工程检测手册[M].北京:人民交通出版社,2003.