

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.003

自平衡法试桩转换系数数值试验

杨有莲^{1 2} 朱俊高^{1 2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 采用三维有限元方法对桩顶压桩和桩底托桩承载特性分别进行模拟分析, 研究了自平衡静载试验法中的转换系数。分析桩长、土类对荷载传递特性及转换系数的影响。结果表明: 无论是在砂土还是在黏土中, 随着桩长的增加, 转换系数的变化曲线均呈凹形, 类似抛物线形状分布, 转换系数存在着极小值, 不同土类转换系数的极小值不同, 在 35 ~ 55 m 桩长范围内可能出现托桩的极限承载力大于压桩的极限承载力的情况。

关键词 钻孔灌注桩; 桩承载力; 自平衡试桩法; 有限元法; 压桩; 托桩; 转换系数

中图分类号 TU413.4 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)01-0008-04

Numerical experiment on conversion coefficient of self-balanced pile test method/YANG You-lian^{1 2}, ZHU Jun-gao^{1 2}
(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : By use of 3-D FEM, the bearing capacity of jacking piles and uplift piles was simulated, and the conversion coefficient in self-balanced static test loading was studied. The analysis of the influences of pile length and soil type on the load transfer performance and conversion coefficient demonstrates that, with the increase of pile length, the conversion coefficient, no matter in sand soil or clay soil, shows a concave-shaped distribution, which is similar to a parabola, that the minimal values of the conversion coefficient exist and vary with the type of soils, and that the bearing capacity of uplift piles is higher than that of the jacking piles with the length in the range of 35-55 m.

Key words : bored pile; bearing capacity of pile; self-balanced pile test method; FEM; jacking pile; uplift pile; conversion coefficient

超大直径钻孔灌注桩承载力高,适用于各种土层,技术工艺简单,施工方法灵活,且具有显著的经济效益^[1],目前已被广泛采用。单桩承载力的确定是设计的关键问题,迄今为止,桩的静载试验是确定单桩承载力最可靠的方法。然而,对超大直径桩,其承载力很高,传统的静载试验往往无法得到准确的承载力数据。因此,出现了一种新的静载试验方法——自平衡静载试验法^[2],取得了良好的效果。

自平衡静载试验法的基本原理^[3-6]是利用试桩自身反力平衡,根据上段桩的摩阻力与下段桩摩阻力和桩端阻力之和相等的原则,在上、下段桩之间设置荷载箱,通过荷载箱对上、下段桩施加荷载,从而依据破坏时荷载箱的荷载间接推算获得单桩承载力。该方法的关键之一是根据荷载箱所加荷载大小与向上、向下位移的唯一对应关系,可得上、下桩段的 $Q \sim S$ 曲线,从而将上段桩的极限抗托承载力经一定处理后转换为极限抗压承载力,与下段桩承载

力相加,得到单桩的极限承载力。

目前对由桩底托桩承载力计算桩顶压桩承载力的转换系数的理论研究较少。本文采用河海大学研制的 TDAD 三维有限元法,对桩顶压桩和桩底托桩两种加载方式进行计算分析,研究荷载沉降特性,总结转换系数随桩长的变化规律,可供大直径桩自平衡试验时参考,用来推求单桩的极限承载力。

1 有限元计算模型

1.1 土的本构模型和接触面模型

桩顶受压桩和桩底受托桩荷载传递机理如图 1 所示。本文采用三维有限元计算程序对两种加载方式下桩的工作特性进行模拟分析。土体采用邓肯-张弹性非线性 $E-\mu$ 模型。

由于桩混凝土和土的变形模量有很大的差异,在竖向荷载作用下,导致桩土之间的相对位移较大,不符合位移连续性假定^[7]。为了考虑桩土间的这种

作者简介: 杨有莲(1976—),女,四川成都人,博士研究生,从事桩基及基础工程研究。E-mail: ylyang@mailsvr.hhu.edu.cn

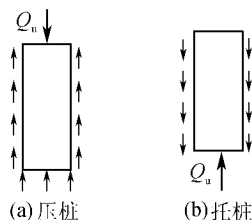


图1 荷载传递简图

相对位移和应力之间的非线性关系,以及在施工成孔过程中泥浆护壁形成的泥皮和对桩周土的扰动而使强度、模量降低的影响,本文计算采用了薄层单元界面模型,它在一定程度上能综合反映接触错动、泥皮以及施工扰动的影响。

1.2 桩及土体单元

考虑到桩径较大,需反映桩与土之间的受力变形协调关系,以及便于设置接触面单元,计算中桩和土均采用六面体八结点等参实体单元来模拟。

桩身混凝土在达到破坏强度之前,线性关系一般较好,故本研究中将其作为线弹性材料考虑。

1.3 计算参数及边界条件

计算中,桩身混凝土的弹性模量取 33 GPa,泊松比为 0.167,桩长为 125 m,桩径为 2.5 m。为了简化计算,分别采用砂土和黏土两种均质地基进行有限元计算,土体的计算参数见表 1。接触面薄层单元厚度取 0.3 m。

根据荷载和结构的对称性,取 1/4 结构进行分析,考虑桩周和桩端土层的影响范围,土层水平及竖向范围均取 220 m。

表1 土体的计算参数

土类	R_f	K	N	G	F	D	c'/kPa	$\varphi'/(\text{A}^\circ)$
砂土	0.75	668.1	0.55	0.40	0	0	10.0	34.1
黏土	0.74	321.2	0.61	0.38	0	0	24.0	31.3

注: R_f 为破坏比; K, N 分别为模量数及模量指数; G, F, D 为泊松比参数; c', φ' 分别为有效黏聚力和有效内摩擦角。

2 转换方法

由自平衡测试结果计算单桩承载力公式为^[8]

$$Q = kQ^+ + Q^- \quad (1)$$

式中: k 为转换系数; Q^+ 为上段桩的向上托力(扣除上段桩的自重); Q^- 为下段桩的向下压力。

根据自平衡测试的 $Q \sim S$ 曲线的特点:每级荷载作用下,上、下段桩的位移值不同,而堆载压桩的荷载位移值是一一对应的。根据向上、向下位移相等原则,即根据 $S = S^+ = S^-$,找出对应的 Q^+ 和 Q^- ,由式(1)计算单桩的承载力 Q ,由此得到一系列点 (S_i, Q_i) , $i = 1, 2, \dots, n$,将这些点光滑相连得到转换曲线,若与堆载压桩测得的 $Q \sim S$ 曲线较吻合,说明

明 k 的取值较准确;反之,则不准确。如图 2 所示。

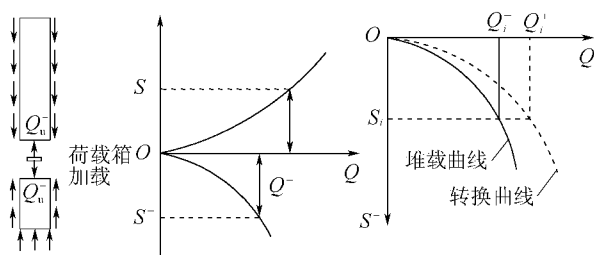


图2 自平衡 $Q \sim S$ 曲线和转换曲线

在欧洲,做自平衡转换时,一般取转换系数 $k = 1$ 。对于短桩,通常取转换系数 $k = 1.5$,再根据相同位移对应的荷载进行简单的荷载相加而拟合出 $Q \sim S$ 曲线。根据文献[1]桩承载力自平衡测试法的理论研究,压桩的正摩阻力一定大于托桩的负摩阻力,这样拟合的 $Q \sim S$ 曲线偏于安全。通过一些自平衡试验与堆载压桩试验的对比,结果发现,转换系数一般为 $1.0 < k < 1.6$ 时,转换曲线与堆载压桩曲线较吻合。

为了进一步弄清压桩与托桩的承载力转换系数 k 在不同土质条件、不同桩长情况下的大小及变化规律,利用三维有限元方法,计算得出压桩与托桩的 $Q \sim S$ 曲线。为了叙述方便,根据式(1)中的第 1 项,则托桩与压桩的承载力转换公式可写成:

$$Q^- = kQ^+ \quad (2)$$

式中: Q^- 为压桩的桩顶向下压力; Q^+ 为托桩的桩底向上托力。

根据压桩和托桩受力机理的不同,在相同外荷载作用下,压桩和托桩的位移值不同,计算所得的荷载沉降曲线也不同。按照托桩的 $Q^+ \sim S^+$ 曲线找出与位移 S_i^- 对应的 Q_i^+ ,由此可以得到一系列点 (Q_i^+, S_i^-) , $i = 1, 2, \dots, n$,将这些点光滑相连得到本文的计算转换曲线,即为 $k = 1$ 时的转换曲线。若计算转换曲线与压桩承载力曲线较吻合,则表明 $k = 1$ 时较合理;若计算转换曲线位于压桩承载力曲线下,则表明 $k > 1$,如图 3 所示;反之,则 $k < 1$ 。

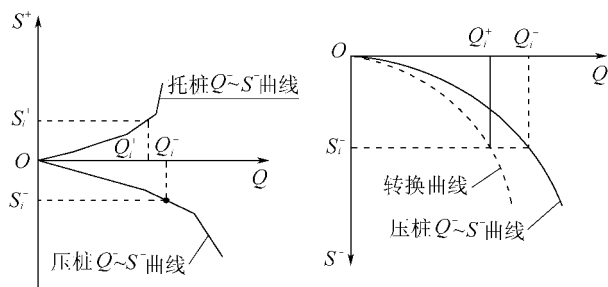


图3 本文 $Q \sim S$ 转换曲线

3 计算方案

为了研究土类和桩长变化对桩的极限承载力和

转换系数的影响,本文分别采用了不同的计算方案对单桩进行数值模拟。计算分析主要有两种方案:分析不同桩长(10 m、27 m、50 m、71 m)在桩顶受压和桩底受托两种加载方式下,土类分别为砂土或黏土时转换系数的变化规律。

4 计算结果分析

4.1 Q~S 曲线分析

对于本文选用的两种地基土,经计算分析发现该两种地基中桩的 Q~S 曲线变化规律一致。下面以砂土地基为例,说明不同桩长单桩在桩顶受压和桩底受托两种加载方式下的 Q~S 关系曲线,如图 4 所示。

根据 Q~S 曲线可以确定极限荷载和极限沉降量以及不同荷载时的沉降量。从荷载传递机理的角度分析,桩底托桩的承载特性与桩顶压桩的承载特性显然是不同的,具体表现在以下 4 个方面:①桩底托桩和桩顶压桩两种加载方式下,桩周土的应力状态是完全不同的^[8-13]。根据一些学者的试验研究,桩顶压桩时桩周土的应力状态近似于常规三轴排水压缩试验时土体单元的应力路径;而桩底托桩时桩周土单元的应力路径则与三轴排水伸长试验的应力路径相似,即平均主应力减小,偏应力增加。②桩底托桩过程中,桩顶部存在临空面,使得托桩的摩阻力下降较多,而桩顶压桩时,由于桩端土层对下部土的约束加强作用,压桩时摩阻力下降较小。③桩顶压

桩时,在荷载作用下桩身产生弹性压缩,桩身侧向膨胀,使得桩周土体中径向应力 σ_r 增大,通常认为摩阻力 $\tau = c + \sigma_r \tan \delta$ (δ 为摩擦角),于是引起桩侧摩阻力的增加。由于临空面的存在,使得桩底托桩时桩侧摩阻力的增加较小。所以,压桩的正侧摩阻力一定大于托桩的负侧摩阻力。④从受力力学机理分析,托桩的承载力由负侧摩阻力和桩身有效自重组成,而压桩的承载力由正桩侧摩阻力和桩端阻力组成。综合托桩的受力特点,其破坏形式更接近于摩擦形式。

从图 4 可以看出,无论是压桩还是托桩,其承载力都随桩长的增加而增加。桩的承载力主要与桩侧土层的物理力学性能有关。

图 5 给出了单桩极限承载力与桩长之间的关系。可以看出:①当桩长较短时,在砂土和黏土中压桩的承载力与托桩的承载力大小差不多。②随着桩长的增加,压桩和托桩的承载力都是呈非线性规律

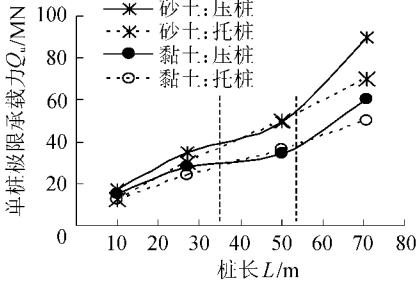


图 5 桩的极限承载力随桩长变化曲线

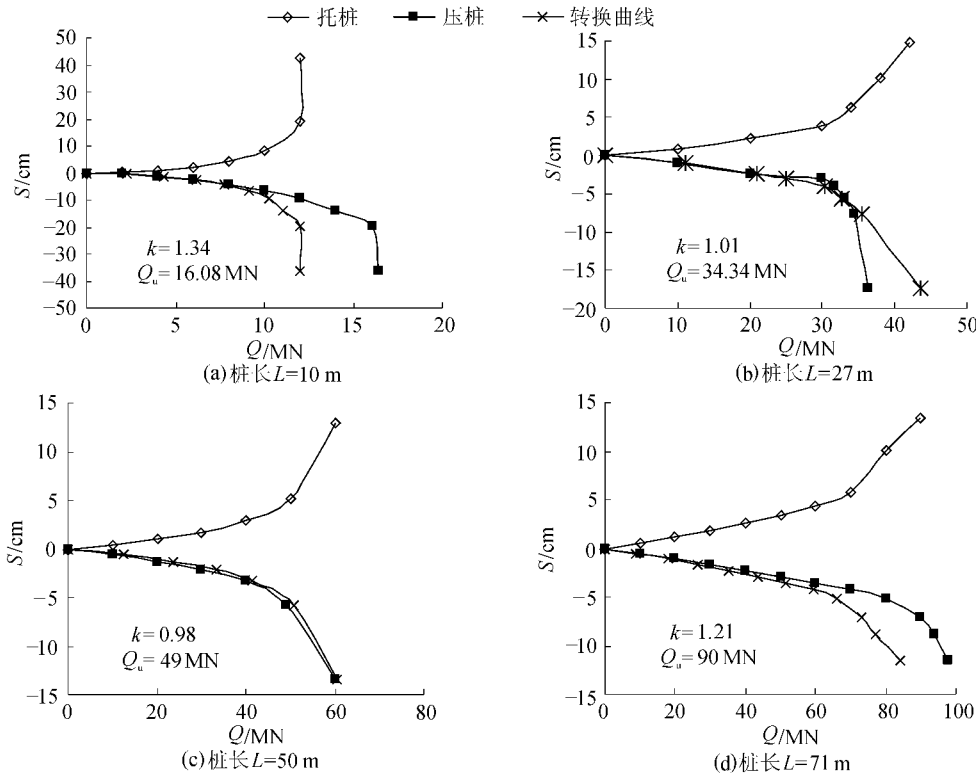


图 4 Q~S 关系曲线(砂土)

增长。但在一定桩长范围内,托桩的承载力大于压桩的承载力,即 $k < 1$ 。该桩长范围大约为 35 ~ 54 m。③随着桩长的继续增加,托桩的承载力增长速率明显降低,这时压桩的承载力比托桩的承载力大得多。

在一定桩长范围内,会出现托桩承载力大于压桩承载力的现象。众所周知,桩的承载力发挥过程是桩侧摩阻力和桩端阻力(或桩身有效自重)共同作用的过程,桩侧摩阻力和桩端阻力的发挥不是同步的,存在先后关系。它们发挥作用的程度与土的性质、桩长以及桩土相对位移大小等诸多因素有关。从桩受力学机理来看,虽然临空面存在,使托桩的极限承载力性能降低;而桩端土层的约束加强作用又使压桩的极限承载能力提高。但在某一桩长范围内,出现向下桩侧摩阻力和桩身有效自重的叠加结果大于向上侧摩阻力和桩端阻力的叠加结果是可能的,即出现托桩的承载力大于压桩的承载力是可能的。

4.2 转换系数分析

图 6 给出了转换系数与桩长的关系。从图 6 中可以看出,在砂土和黏土中转换系数随桩长的变化规律是一致的,类似于凹形抛物线形状,转换系数存在极小值,在砂土中的转换系数较黏土中要大。当桩长较小时,砂土和黏土中转换系数的变化率都在减小,但砂土中的转换系数仍然比黏土中的大,此时黏土中的转换系数速率较砂土中慢,且随着桩长减小 k 值增大。当桩长较大时,两者的变化速率差不多,且随着桩长增加 k 值增大。根据文献[4],托桩的 $Q^+ \sim S^+$ 曲线转换为压桩的 $Q^- \sim S^-$ 曲线的转换系数为 1 ~ 1.6,当桩端土刚度较大或短桩的情况下取大值,本文的计算结果与此也相符。因此,笔者推测随着桩长减小或增加,转换系数最终将趋于某一稳定值附近。从图 6 来看,对本文选用的砂土和黏土而言,在黏土中 $k_{\min} = 0.89$,对应的桩长为 50 m;在砂土中 $k_{\min} = 0.96$,对应的桩长为 40 m,而不是 $k_{\min} = 1.0$,即托桩的极限承载力大于压桩的极限承载力。产生这种现象的原因见 4.1 节中的分析。

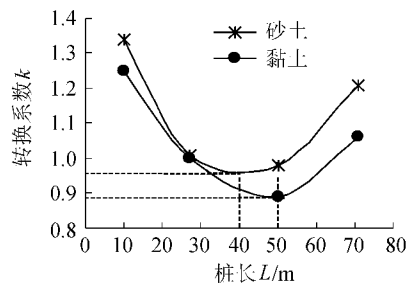


图 6 转换系数随桩长变化曲线

5 结 语

本文利用有限元分析方法对均质砂土和黏土中托桩的 $Q \sim S$ 曲线转换为压桩的 $Q \sim S$ 曲线的转换系数 k 进行了理论探讨,得出在砂土和黏土中,两者的转换系数同桩长的变化规律是一致的,均呈类似凹形抛物线形状分布,存在极小限值小于 1.0,说明了在某一桩长范围内出现托桩的极限承载力大于压桩的极限承载力是可能的,并分析了产生此现象的原因。

本文采用数值试验方法探讨了托桩的承载力与压桩的承载力之间的转换系数,具有一定的参考价值,但还有待大量现场实测资料来验证。

参考文献:

[1] 李昌驭,龚维明,戴国亮,等.大直径钻孔灌注桩桩端后压浆试验研究[J].公路,2004(5):55-59.

[2] 戴国亮,龚维明,蒋永生.桥梁大吨位桩基新静载试验方法的工程应用[J].东南大学学报:自然科学版,2001,31(4):54-57.

[3] JORI O. New device for load testing driven piles and drilled shaft separates friction and end bearing[J]. Piling and Deep Foundations, 1989, 1: 421-427.

[4] 龚维明,翟晋,薛国亚.桩承载力自平衡测试法的理论研究[J].工业建筑,2002,32(1):37-40.

[5] 王立波,刘艳军,吴屠建,等.自平衡法的三维有限元模拟分析[J].工程论坛,2005(20):40.

[6] 龚维明,戴国亮,蒋永生,等.桩承载力自平衡测试理念与实践[J].建筑结构学报,2002,23(1):82-88.

[7] 汤斌,陈晓平.群桩效应有限元分析[J].岩土力学,2005,26(2):299-302.

[8] 何剑.嵌岩灌注桩抗拔桩的承载性状试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):315-319.

[9] 张忠苗,吴庆勇,张广兴.抗拔桩和抗压桩受力性状异同性研究[J].工程勘察,2006(6):4-9.

[10] 殷亚军,刘长明,闫树民.大直径人工挖孔扩底桩抗拔静载试验分析[J].吉林建筑工程学院学报,2005,22(4):18-22.

[11] 丁佩民,黄堂松,肖志斌.抗拔桩桩侧摩阻力发挥规律的探讨[J].建筑科学,2003,19(6):46-49.

[12] 钟闻华,石名磊,刘松玉.超长桩荷载传递性状研究[J].岩土力学,2005,26(5):307-310.

[13] 翟晋.自平衡试桩法的应用研究[D].南京:东南大学,2003.

(收稿日期 2007-01-22 编辑:方宇彤)