

文章编号: 1000-7598-(2005)02-0328-05

不同桩底地层超长桩工作性能的数值模拟

王俊杰, 朱俊高, 魏松

(河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 超长桩在大型桥梁和高层建筑中得到了越来越广泛应用。以某超长桩基础工程为例, 采用三维有限元法分析了桩底地层对超长桩工作性能的影响。土体本构关系采用邓肯-张双曲线非线性弹性模型, 混凝土、岩石采用线弹性模型模拟, 桩土界面采用有厚度的薄单元模拟。结果表明: 桩底地层不同时, 桩端阻力和桩侧阻力的比例不同, 但承载性状仍属摩擦型桩; 桩顶极限荷载不同, 但桩身失稳时的极限沉降基本相同; 桩端阻力的发挥程度不同, 但桩基失稳的原因都是桩侧土体的破坏。

关键词: 超长桩; 桩身荷载; 桩侧阻力; 桩端阻力; 桩底地层; 薄单元

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Numerical simulation of behavior of overlength piles with different base stratum

WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, WEI Song

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Overlength piles have been found abroad application to large bridges and high buildings. Based on an example of an overlength pile foundation, the influences of base strata on the behavior of overlength piles are studied with 3D FEM. Duncan-Chang elastic model is used to simulate the constitutive relation of soils; and linear elastic model is used to simulate the constitutive relation of concrete and rock. Results of analyses indicate that for the different base strata, the scales of tip resistance and side resistance are different, but the behaviors are same; the critical loads are different, but the limit displacements are almost same; the tip resistances are different, but the failure reasons are shearing failure of the soils around piles.

Key words: over length piles; shaft load; side resistance; tip resistance; base stratum; thin unit

1 前言

随着经济的发展及高层、超高层建筑和大跨桥梁的兴建, 超长桩(指桩长 L 大于50 m或长径比 L/D 大于100的桩^[1])因其具有高承载力, 在深厚软土分布地区(如长江下游地区)得到大量应用。一般认为, 超长桩的受力性状为摩擦桩^[2~6], 即桩端阻力占承载力的比例很小。那么, 桩底地层特性对超长桩的承载性状有无影响? 影响程度如何? 研究此类问题对超长桩的理论和实践将具有一定现实意义。桩土共同作用的思想在现代桩基工程的设计中普遍应用, 前人对其进行的理论研究^[7]和数值模拟研究^[8~9]均具有重要意义。

本文以某超长桩基础工程的地基为例, 用三维有限元法对桩底地层为软粘土、粘土、砂土及岩石等4种情况的超长单桩的工作性能进行研究, 探讨了桩底土层的力学性质对超长桩承载性状的影响。

该桩基础为高承台大直径超长钻孔灌注群桩基础。桩径为2.5 m, 设计入土桩长为71 m。第四纪覆盖层厚超过300 m, 自上而下依次为全新统(Q_4)、上更新统(Q_3)和中更新统(Q_2)地层。

2 有限元模型及参数

在有限元模拟中为满足边界条件, 影响范围水平方向取150 m, 桩底以下取99 m, 桩、土的单元均采用8结点等参单元。为了较好地模拟桩土共同作用, 在桩土界面设置了有厚度的薄单元。薄单元厚度的大小对界面特性的影响较大, 其影响程度存在一个阈值厚度^[10], Desai^[11]提出薄单元厚度应在单元高度的1/100~1/10的范围内取值。通过对不同厚度薄单元有限元网格计算结果的比较分析, 本文薄单元的厚度取0.3 m, 是单元高度的1/25~1/15。

桩身混凝土采用线弹性模型模拟, 弹性模量 $E=3.3 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu=0.167$ 。土体用 Duncan-

收稿日期: 2003-11-18

修改稿收到日期: 2004-02-20

作者简介: 王俊杰, 男, 1973年生, 博士研究生, 讲师, 从事土石坝设计理论、岩土工程数值模拟等研究。E-mail: wangjunjiehu@163.com

论文联系人: 朱俊高, 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体本构关系、高土石坝边坡、加筋土等研究。E-mail: zhujungao@163.com

Chang 非线性 E- ν 模型^[12]模拟。假定土体泊松比为常数, 即反应泊松比的模型参数 F , D 均等于零, G 等于 ν , 各地层及桩周薄单元模型参数见表 1。表中模型参数是利用该工程的单向固结试验和直剪试验^[13]资料结合经验确定的。桩土界面单元的参数与许多因素相关, 且对计算结果影响很大, 由于没有对其进行专门研究, 本文的确定方法是依据桩基的施工工艺, 并结合土石坝工程中有关混凝土防渗墙与地基土接触面的变形试验资料拟定一组参数,

同时假定沿桩长是不变的, 然后, 通过试算, 若计算得到桩的极限承载力接近设计的 50 MN 的承载力, 则取这时的接触面参数为取用参数。

实际的桩底地层(深度 -71.0~-86.0 m)为粘土, 为分析桩底地层的作用, 再假定桩底地层为软粘土、砂土和岩石等 3 种情况, 其中软粘土和砂土的模型参数也列于表 1。岩石用线弹性模型, 假定弹性模量 $E=2.0 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu=0.25$, 无侧限抗压强度为 4.7 MPa。

表 1 三维有限元计算采用的 Duncan-Chang 模型参数
Table 1 Values of parameters in Duncan-Chang model used in FEM

序号	材料	ρ^1 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	土层埋深 /m	模型参数				ϕ /($^\circ$)	c /kPa
				R_f	K	n	ν		
1	粉细砂	0.98	-19.0	0.84	321.2	0.61	0.40	31.3	24.0
2	中粗砾砂	1.12	-27.0	0.80	668.1	0.55	0.40	34.1	10.0
3	粉细砂	1.04	-46.0	0.70	477.0	0.55	0.40	29.9	20.0
4	中粗砾砂	1.18	-57.0	0.80	516.3	0.58	0.40	31.2	19.0
5	粉细砂	1.10	-63.0	0.91	522.0	0.63	0.40	33.2	19.0
6	中粗砾砂	1.18	-71.0	0.80	516.3	0.58	0.40	31.2	19.0
7	粘土	1.08	-86.0	0.80	376.0	0.59	0.38	27.7	29.5
7-1	软粘土	0.38	-86.0	0.75	120.0	0.56	0.38	7.5	5.6
7-2	砂土	1.12	-86.0	0.80	668.1	0.55	0.40	34.1	10.0
8	粉细砂	1.05	-113.0	0.78	596.0	0.56	0.40	31.8	14.3
9	亚粘土及粘土	1.04	-170.0	0.69	368.1	0.53	0.38	28.2	50.0
10	桩周薄单元	1.10		0.90	100.0	0.66	0.40	20.0	10.0

注: ρ^1 为浮密度。

3 计算结果及分析

为使问题简化, 本文只研究桩顶作用竖向荷载情况。

3.1 荷载-沉降关系

根据荷载-沉降关系可以确定极限荷载和极限沉降以及不同荷载时的沉降量。由图 1(a)可知, 随桩底地层力学性质的提高, 极限荷载在增大, 相同桩顶荷载时的沉降有所减小, 而极限沉降几乎没有变化。图 1(b)表明, 桩底地层的力学特性对桩侧阻力-桩顶沉降关系的影响很小。

3.2 承载性状分析

图 2 和图 3 显示, 不同桩底地层的超长桩均属摩擦型桩^[14], 但桩端阻力所占的比例是不同的(见表 2)。桩底为岩石的端阻力达桩顶荷载的 30.68%, 而其它 3 种情况的均小于 15.0%。

3.3 桩身荷载分布

桩身荷载的分布可以反映荷载的传递过程, 图 4 中各分布线对应的桩顶荷载示于表 3。对桩底为岩石的情况, 当桩端阻力小于岩石的极限承载力时, 桩身荷载沿桩身呈均匀分布, 桩顶荷载几乎完全由桩端阻力平衡; 而当桩端阻力达岩石的极限承载力后, 桩身荷载沿桩身呈减小分布, 桩端阻力保

持不变, 桩顶荷载的增加由桩侧阻力平衡。对另外 3 种情况, 桩身荷载沿桩身总是减小的, 未接近极限情况下, 桩端阻力在加荷过程中的增加很小, 桩顶荷载主要由桩侧阻力平衡。而当荷载接近极限荷载时, 即最后一级荷载下引起桩端阻力增加较大。

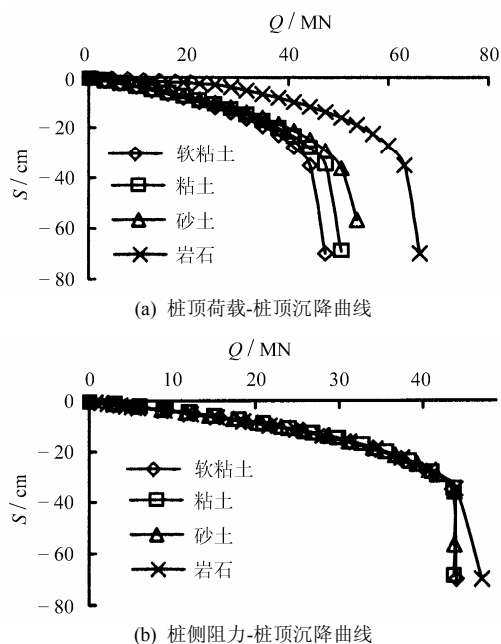
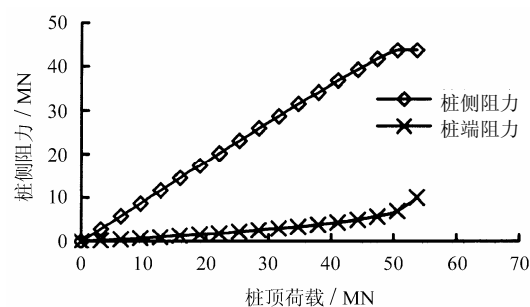
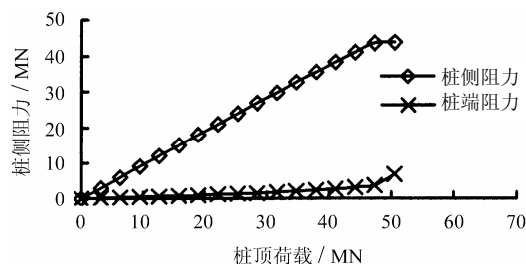


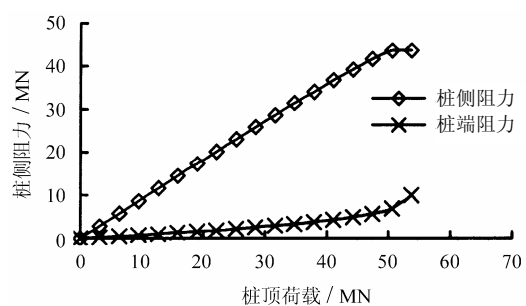
图 1 荷载-沉降曲线
Fig.1 Load-settlement curves



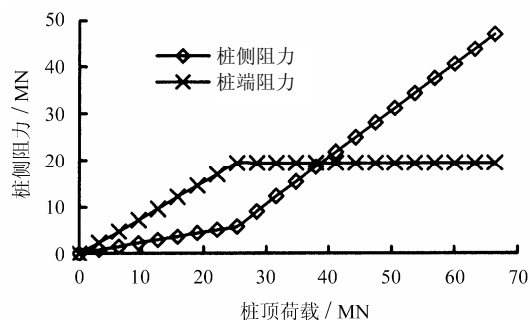
(a) 桩底为软粘土



(b) 桩底为粘土



(c) 桩底为砂土



(d) 桩底为岩石

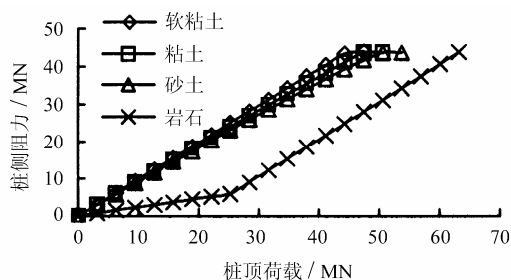
图2 桩侧摩阻力和桩底阻力

Fig.2 Pile side resistances and base resistances

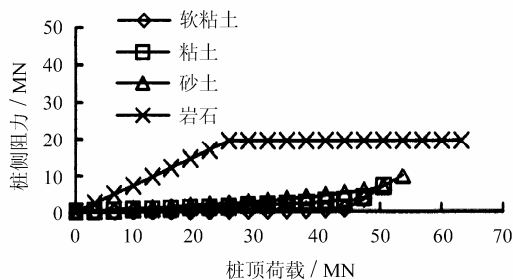
表2 不同桩底地层情况的桩端阻力

Table 2 Tip resistances to different base strata

桩底 地层	桩顶荷载 / MN	桩端阻力 / MN	桩端阻力 桩顶荷载 / %
软粘土	44.24	0.792	1.79
粘土	47.4	3.787	7.99
砂土	50.56	6.883	13.61
岩石	63.2	19.39	30.68



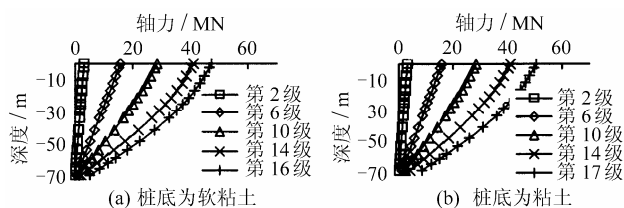
(a) 桩顶荷载-桩侧阻力



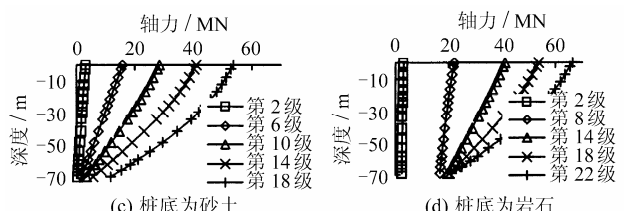
(b) 桩顶荷载-桩端阻力

图3 桩顶荷载与桩侧阻力、桩端阻力

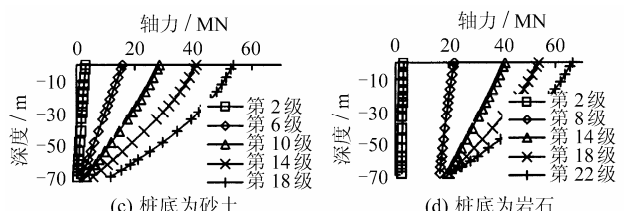
Fig.3 Load and pile side resistances, base resistances



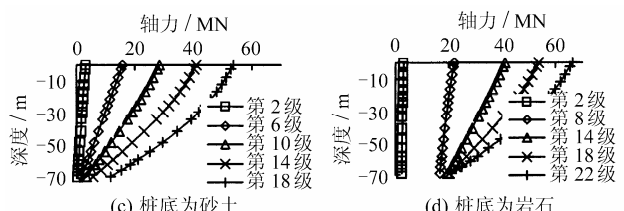
(a) 桩底为软粘土



(b) 桩底为粘土



(c) 桩底为砂土



(d) 桩底为岩石

图4 桩身荷载分布线

Fig.4 Pile shaft load distribution lines

表3 各级荷载对应的桩顶荷载

Table 3 Butt loads of pile under stages

荷载级次	桩顶荷载 / MN	荷载级次	桩顶荷载 / MN	荷载级次	桩顶荷载 / MN
2	3.16	10	28.44	17	50.56
6	15.8	14	41.08	18	53.72
8	22.12	16	47.4	22	66.36

3.4 桩侧摩阻力分布

桩侧摩阻力是超长桩的主要承载力,了解桩侧摩阻力的发生、发展过程可以弄清荷载传递机理。图5所示的桩侧摩阻力分布线表明,桩身上部的桩侧摩阻力首先达到极限值,后随着桩顶荷载的增加,下部的桩侧摩阻力逐渐增大,并沿桩长自上到

下依次达到极限,表明桩侧摩阻力的充分发挥是从桩顶开始的,桩侧摩阻力极限值沿桩长呈逐渐增大分布,在桩侧摩阻力出现极限值之前,其沿桩长基本是均匀分布的。

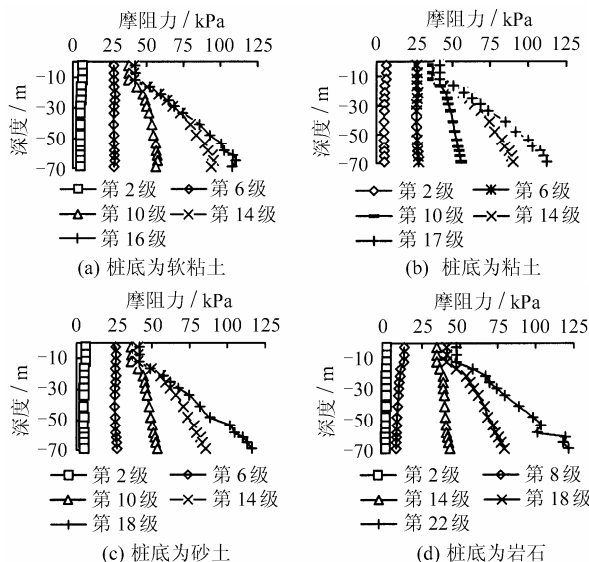


图5 桩侧摩阻力分布线

Fig.5 Pile side resistance distribution lines

3.5 桩基失稳机理分析

分析桩侧、桩底土体的应力状态在加荷过程中的变化,可以弄清桩基失稳的原因。在 Duncan-Chang 非线性弹性模型中,应力水平定义为当前主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)与破坏时的主应力差($\sigma_{1f} - \sigma_{3f}$)之比,该值反映了土体强度的发挥程度^[12]。因此,可以用应力水平的大小反映土体的稳定状态,应力水平小于 1.0 表示处于稳定状态;等于 1.0 表示处于极限平衡状态或破坏。

图 6 显示了桩底土体的应力水平随荷载的变化。可以看出,随荷载增大,应力水平逐渐增大。在桩基失稳时,仅桩底为软粘土的应力水平达到 1.0,而对于其它土层的情况,在极限荷载时的应力水平均小于 1.0,即桩基失稳时,桩底土体仍处于稳

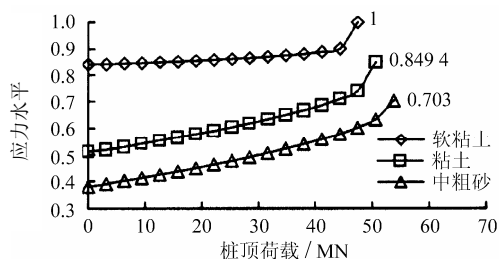


图6 桩底土体应力水平-桩顶荷载关系

Fig.6 Variation of stress levels of base soil with pile top loads

定状态。对于桩底为岩石的情况,桩底岩石在桩基失稳前早已进入破坏状态。表明桩基失稳的原因不是桩底土体(或岩石)的破坏。

图 7 反映了桩周薄单元土体的应力水平沿桩长的分布。在桩基失稳时,应力水平平均达到 1.0,可以认为,桩基失稳是由于桩周土体的破坏引起的。另外,从图 7 亦可看出,桩周薄单元土体应力水平的变化特点是桩身上部的首先增大,并达到 1.0 进入破坏,随着桩顶荷载的继续增大,沿桩长各薄单元的应力水平依次达到 1.0 进入破坏,这也说明桩侧摩阻力的充分发挥是从桩顶到桩底依次实现的。

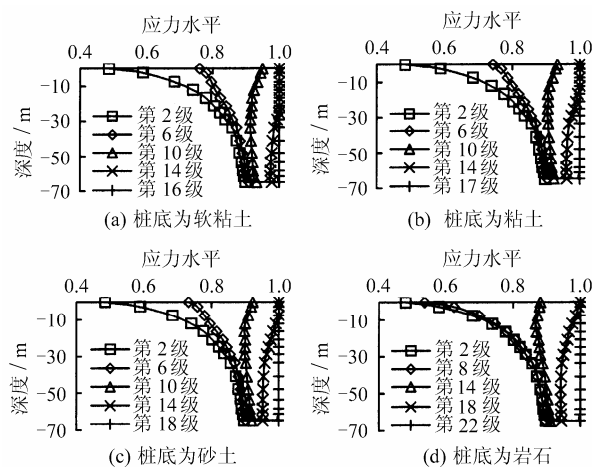


图7 薄单元土体应力水平分布线

Fig.7 Stress level distribution lines of thin units

4 结论

(1) 超长桩属摩擦型桩,其荷载传递性状与桩底地层的力学特性有关,对桩底为压缩性较大的土体而言,为桩侧阻力先于桩端阻力发挥,二者是异步的,在工作荷载下主要依靠桩侧阻力的发挥来提供承载力;而对于桩底为低压缩性的岩体,由于桩侧阻力发挥所需要的桩-土相对位移的条件起初不能满足,使得桩端阻力先于桩侧阻力发挥,二者仍是异步的,在桩底岩体允许大变形前,主要是依靠桩端阻力的发挥来提供承载力;

(2) 桩底地层力学性质提高时,由于桩端阻力的增大而提高了极限荷载,由于压缩性的降低而对减小工作荷载下的沉降有利,但并不减小极限沉降;

(3) 桩侧摩阻力的充分发挥是从桩顶开始的,随荷载增大,向桩底依次达到极限摩阻力;

(4) 超长桩基失稳的原因是桩侧土体的剪切破坏,而不是桩底土体的破坏。