

文章编号:1005-0523(2009)06-0026-05

软土地基抗拔桩极限抗拔力影响因素分析

陈娟

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:抗拔桩的极限抗拔力是软土地基中抗拔桩设计的重要参数,为研究和分析抗拔桩极限抗拔力的影响因素,在国内外相关研究分析的基础上,结合上海火车站抗拔桩静载试验实测数据,并通过 ABAQUS 有限元软件进行数值分析,研究了桩体弹性模量、桩长、桩径 3 种因素对抗拔桩极限抗拔力的影响。结果表明,桩体弹性模量对抗拔桩的极限抗拔力影响不大,而桩长、桩径的增加均能明显提高抗拔桩的极限抗拔力。

关键词:抗拔桩;极限抗拔力;ABAQUS;有限元

中图分类号:TU473.11

文献标识码:A

抗拔桩作为抗拔基础的一种重要形式,已大量用于超高层建筑物,极限抗拔力^[1~3]是其设计的重要参数。目前,抗拔桩极限抗拔力的设计多运用经验公式,借鉴抗压桩的设计方法,以桩的抗压侧摩阻力值导入一个经验折减系数后作为抗拔桩侧摩阻力值^[4~5]以估算抗拔力,该方法一般用于安全等级低的工程,不能准确反映抗拔桩的极限抗拔力。国内外对抗拔桩的研究多来自砂土中模型试验,而对于软土地区抗拔桩的极限承载力研究比较少。Kulhawy^[6]通过系统研究发现砂土中等截面抗拔桩主要破坏形态为沿着桩-土界面发生圆柱形剪切破坏;Alawneh、Rao 等^[7]在砂土中做了大量抗拔桩试验,总结得出抗拔桩的极限承载力与土的密度、桩身材料、桩的类型、施工工艺等^[8]有关。本文基于上海南站抗拔桩静载试验结果,结合数值模拟方法,分析了在软土地基中桩体弹性模量、桩长、桩径对抗拔桩极限抗拔力的影响,以供软土地区抗拔力设计时作为参考。

1 抗拔桩承载机理分析

抗拔桩的抗拔与承压桩的抗压机理不同^[9,10],前者是利用桩身自重及桩周土体的摩阻力来抗拔。在桩顶施加竖向拉力时,桩身受到拉伸作用而相对土体产生向上位移的趋势,于是桩与土的接触面上产生向下的摩阻力,随着上拔荷载的增加,桩土接触面的摩阻力也逐渐增加。当荷载到达一定水平,桩与土的接触面或者桩周土体内破裂面便发生破坏,桩的抗拔力发挥到极限,此后逐渐下降。实际工程中抗拔桩的极限抗拔力远小于抗压桩的极限抗压力。规范中规定,抗拔桩的极限抗拔力由抗压桩的极限抗压力乘以折减系数 γ 来确定。本文运用杭州中山花园抗拔桩与承压桩试桩试验结果,对比分析抗拔桩与抗压桩承载特性的区别。根据中山花园抗拔桩和承压桩的静载试验^[11],抗拔桩和承压桩的桩长分别为 44.5 m 和 44.0 m,桩径都为 900 mm。图 1 为文献^[11]原始试验结果,由于曲线的拐点不明显,为了更好地分析极限抗拔力,对结果做了对数处理,结果如图 2 所示。从图 1、图 2 可以看出,位于同一场地,尺寸相近的抗拔桩和承压桩的承载特性差异很大。

(1) 相同尺寸的抗拔桩与抗压桩相比,抗压桩的极限抗压力远大于抗拔桩极限抗拔力。由图 1、图 2 可知抗拔桩的极限抗拔力约为 2 500 kN,抗压桩的极限抗压力约为 5 000 kN。这主要是由于抗压桩的极限承载力由侧摩阻力和桩端阻力组成,大量现场试验测得桩端阻力可以占据极限承载力的一定比例^[12],而抗拔桩的极限抗拔力主要由侧摩阻力提供。

(2) 无论是等截面抗压桩还是等截面抗拔桩,从图 1 可以看出,在荷载较小时, $Q-S$ 曲线都近似为一直线,说明当桩顶荷载较小时,桩土无相对位移,主要是桩身受力变形,而桩身的初期变形属于弹性变形。

收稿日期:2009-09-20

作者简介:陈娟(1985-),女,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为铁道工程。

随着荷载的增加,桩体的向上位移促使桩周土也产生向上的位移,土体出现非线性变形。对于等截面抗压桩,在荷载超过3 000 kN时,才呈现明显的非线性;而对于等截面抗拔桩,当荷载超过1 000 kN时,就呈现明显的非线性。

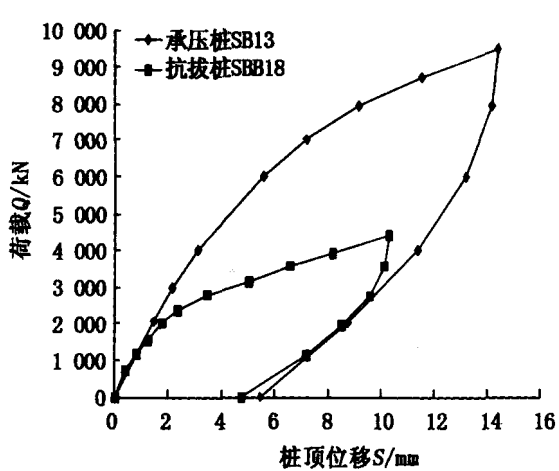


图1 中山花园 Q-S 曲线对比^[11]

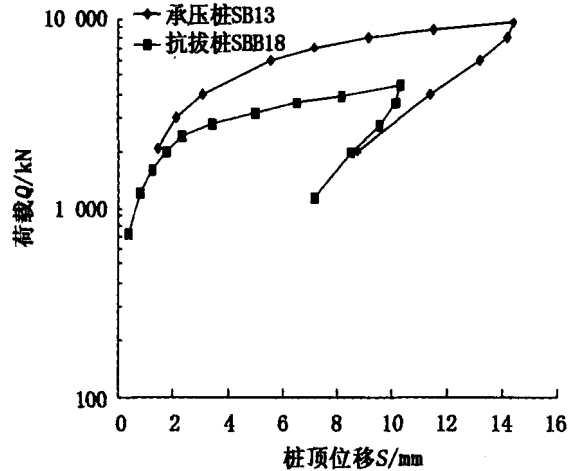


图2 中山花园 lgQ-S 曲线对比

由以上分析可知,抗拔桩与抗压桩的荷载方向不同,造成两者的极限承载力不同。抗拔桩的极限抗拔力与桩体的性质、几何参数及桩周土性质有关。在实际工程中,除桩体参数及桩周土性质外,成桩工艺及成桩后的应力改变对抗拔桩极限抗拔力也有影响。

2 有限元模型的建立及验证

2.1 计算模型

抗拔桩施工过程较复杂,对抗拔桩的抗拔力进行模拟,做了如下假设:

- (1) 桩身假设为线弹性体,土假定为理想弹塑性体,且采用 Mohr-Coulomb 屈服准则;
- (2) 桩土体系被看作是以桩垂直中心线任意平面为对称轴的轴对称问题;
- (3) 假定在工作荷载下,桩土接触面不分离,也就是处于接触且滑动状态;
- (4) 桩侧和桩底土体的物理力学性质不随桩的设置而改变。

有限元计算模型简图如图3所示,桩径0.75 m,桩长50 m,桩基下面的土层深取150 m,模型径向范围为50 m。模型中土体采用 CAX4R 单元,桩体采用 CAX8R 单元模拟。边界约束:模型的底部径向和竖向位移均约束,模型的外侧的径向位移约束。

2.2 桩土接触面

在模拟桩土相互作用过程中,多引入接触面单元,它是有限元计算中模拟接触面变形的一种特殊单元。采用接触面单元需要确定哪些点的位移连续,不能准确模拟实际过程,利用 ABAQUS 中的主-从接触面可以解决该问题。ABAQUS 软件中,采用单纯的主-从接触算法,把桩土相互接触的一对表面定为接触对。根据接触算法将桩表面定为主接触面,土表面定为从属接触面。桩土接触面模型采用经典的库伦摩擦模型,并用 μ 来表征两个接触面的摩擦行为。当等效摩擦力达到临界应力 t_{crit} 时,接触面就会发生相对滑移。 t_{crit} 由下列公式确定

$$t_{crit} = \min(\mu p, t_{max})$$

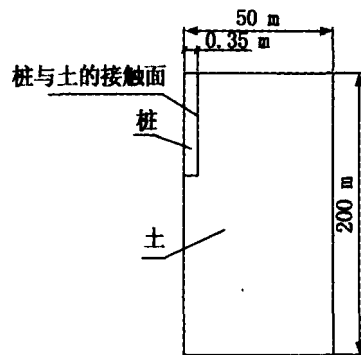


图3 模型简图

式中, μ 为摩擦系数; p 为两接触面的接触压力; t_{max} 为 ABAQUS 中由用户指定的摩擦力。

2.3 模型验证

采用上海南站南广场基坑工程抗拔桩静载试验成果进行模型验证。该工程地层为软土, 土体强度低、含水量高, 地下潜水位在地表下 0.5 m 左右, 地下结构受到浮力大, 而上覆荷载较小, 仅靠结构自重以及结构与土体的侧摩阻力无法满足抗浮的要求, 必须在坑底设置抗拔桩。由于工程需要, 现场进行了 A、B、C1 三种桩型的抗拔桩静载试验。

本文选用 C1 型桩两根试桩抗拔试验与有限元计算结果进行对比分析, 有限元模型如图 4, 土层参数见表 1 所示。

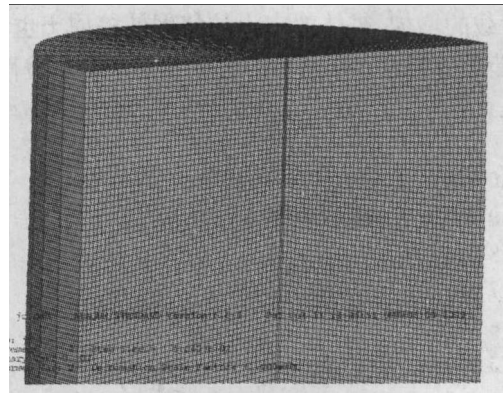


图 4 有限元网格图

表 1 各土层物理力学参数

层序	土名	内摩擦角 / 度	土层厚度 l_i / m	内聚力 c / kPa	有效重度 / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
② ₁	黄色粉质粘土	18.7	1.6	24.7	9.75
② ₂	灰黄色粉质粘土	18.0	0.8	27.4	9.54
③	灰色淤泥质粉质粘土	16.2	1.1	20.7	8.12
④	灰色淤泥质粘土	16.2	1.5	10.6	7.59
⑤ ₁	灰色淤泥质粉质粘土	10.9	10.4	10.9	7.11
⑤ ₂	灰色砂质粉土	12.1	5.2	11.9	8.10
⑤ ₃₋₁	灰色粉质粘土夹粉砂	30.6	7.6	3.6	8.80
⑤ ₃₋₂	灰色砂质粉土	22.9	18.4	20.3	8.11

桩土界面之间的摩擦角 δ 是影响抗拔桩承载性能的关键因素, 根据 Randolph 和 Wroth 提出的用以下公式计算桩土间的摩擦角 δ

$$\delta = \tan^{-1}(\sin\varphi' \times \cos\varphi' / (1 + \sin^2\varphi'))^{[13]}$$

式中, φ' 为土体的内摩擦角

现场抗拔桩静载试验 $Q-S$ 曲线与有限元计算结果对比如图 5 所示, 曲线表明两者吻合较好, 计算中取用的桩土接触面参数、有限元网格划分比较合理, 能够较好地模拟抗拔桩的试桩过程。

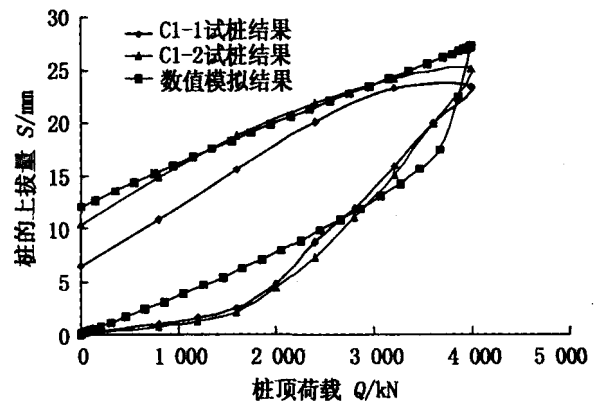


图 5 数值模拟结果与试验结果对比

3 抗拔桩极限抗拔力影响因素分析

本文主要分析抗拔桩桩体弹性模量、桩长、桩径这 3 个方面对其极限抗拔力的影响。为了保证其它条件相同, 揭示 3 种参数对抗拔桩极限抗拔力的影响, 对土层进行简化, 统一取上海南站具有代表性意义的第③层土的参数, 桩土摩擦系数统一取 0.3。

3.1 桩体弹性模量影响分析

取桩长为 30 m 桩顶作用 1 000 kN 上拔力时, 抗拔桩弹性模量分别取 20 GPa、30 GPa、40 GPa 计算得出的 $Q-S$ 曲线如图 6 所示。

计算结果表明:

(1) 在不同的桩体模量 $Q-S$ 曲线中, 随着桩顶作用荷载的增加, 桩顶的上拔量也增加。桩体弹模为 20 GPa、25 GPa、30 GPa 的 $Q-S$ 曲线的极限荷载为 634 kN、695 kN、710 kN, 对应的上拔量分别为 28.51 mm、26.25 mm 和 25.96 mm。即当桩体模量分别提高 25%、50% 时, 抗拔桩的极限抗拔力分别增加 9.62%、

11.99%,对应的桩顶上拔量分别降低7.90%,8.94%。

(2) 由分析可知,当抗拔桩达到一定强度后,增加桩体的模量,抗拔桩的极限抗拔力相应地增加,但增加的幅度较小,可以近似地认为桩体模量的增加对抗拔桩极限抗拔力影响不大。因为桩体达到一定强度后,桩身变形减少,桩整体出现较大的上拔位移,当桩土相对位移到达一定限值后,土体发生塑性破坏。因此再增加桩体的强度对极限抗拔力影响不大。

3.2 桩体长度影响分析

桩体弹模取 30 GPa,桩长分别取 30 m,40 m,50 m,60 m,70 m 计算得到的 $Q-S$ 曲线如图 7 所示。

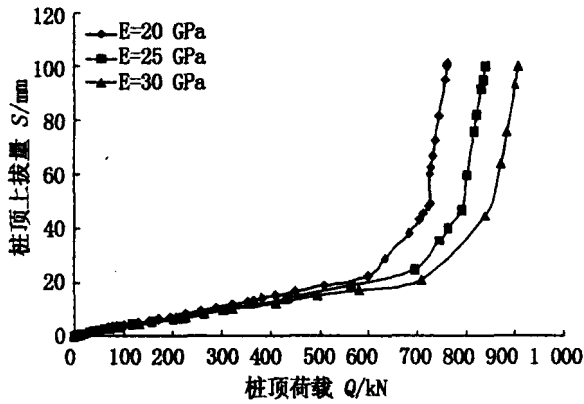


图6 不同桩体模量 $Q-S$ 对比曲线

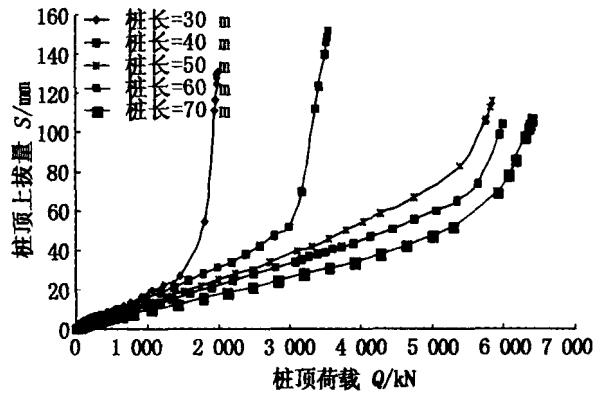


图7 不同桩长 $Q-S$ 对比曲线

计算结果表明:

(1) 随着桩长的增加, $Q-S$ 曲线逐渐由陡降型变成缓变型。抗拔桩的桩长分别为 30 m,40 m,50 m 时, $Q-S$ 曲线的极限抗拔力分别为 1 462 kN,2 978 kN,5 654 kN,对应的桩顶上拔量分别为 27.29 mm,52.14 mm 和 74.35 mm。当桩长分别增加 33.33%,66.67% 时,抗拔桩的极限抗拔力分别增加 103.69%、286.73%,对应的桩顶的上拔量分别增加 91.06% 和 172.44%。然而当桩长继续增加,极限抗拔力增加的效果不明显。

(2) 可以得出,桩体的长度增加,抗拔桩的极限抗拔力和桩顶的上拔量都明显增加,然而当桩长继续增加到一定程度后,极限抗拔力增加得缓慢。因为侧摩阻力承担的抗拔力通过桩身逐渐向下传递到桩身下部土体,且桩与土的相对位移也由桩顶传递到桩尖。即由于长桩上部和下部侧摩阻力的异步性,在桩身中部桩土之间的摩阻力达到土的抗剪强度发生破坏。因此当桩长达到一定值后,对提高极限抗拔力没有意义。

3.3 桩径影响分析

桩长取 40 m,桩体弹模取 30 GPa 时,桩径分别取 0.8 m,1.0 m,1.2 m,1.4 m,1.6 m 计算得到的 $Q-S$ 曲线,每条曲线都有明显的拐点,可以直接得到在不同条件下的抗拔桩极限抗拔力,曲线如图 8 所示。

计算结果表明:

(1) 桩径为 0.8 m,1.0 m,1.2 m,1.4 m,1.6 m 时, $Q-S$ 曲线的极限抗拔力分别为 1 055 kN,1 346 kN,1 731 kN,2 342 kN,2 778 kN,因此当桩径增加 25%,50%,75%,100% 时,抗拔桩的极限抗拔力分别增加 27.58%,60.08%,122.00%,163.32%。

(2) 从图 8 可知,随着桩径的增加,同一荷载水平下桩顶的上拔量逐渐减少。因此,增大桩径能提高抗拔桩的极限抗拔力也能减少桩顶的上拔量,主要由于桩径变大桩土接触面面积增大,需要克服的侧摩阻力

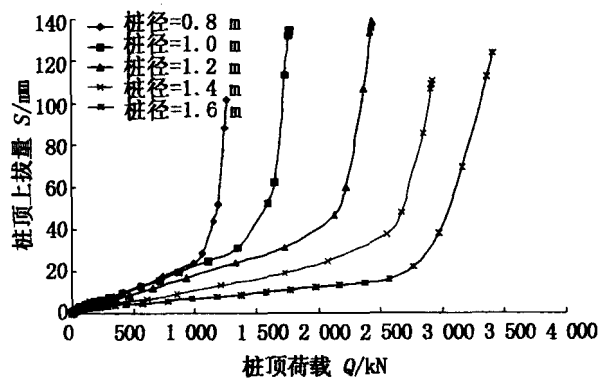


图8 不同桩径 $Q-S$ 对比曲线

也增加。但是增加桩径所需的材料明显增加且施工难度也增加,工程中较不经济。

(3) 抗拔桩设计时,应结合桩长和桩径,采用优化方案设计,选择合适的桩长和桩径来提高抗拔桩的极限抗拔力和减少桩顶的上拔量。

4 结论

本文运用 ABAQUS 有限元软件分析抗拔桩桩体弹性模量、桩长、桩径 3 种因素对软土地基中抗拔桩极限抗拔力的影响,得出以下结论:

(1) 桩体的弹性模量对抗拔桩的极限抗拔力影响不大,但是可以适当提高桩体弹性模量来控制抗拔桩的变形量。

(2) 桩长增加 33%,67%时,抗拔桩的极限抗拔力分别增加 104%,287%。桩体长度的增加能明显的提高抗拔桩的极限抗拔力,但当桩长继续增加到一定程度后,并不能继续提高极限抗拔力。

(3) 桩径增加也可以提高抗拔桩的极限抗拔力,当桩径增加 25%,50%,75%,100%时,抗拔桩的极限抗拔力分别增加 27.58%,60.08%,122.00%,163.32%。但是增加桩径,所需的材料明显增加且施工难度也增加,工程中较不经济。

参考文献:

- [1] 刘祖德. 抗拔桩基础[J]. 地基处理, 1995, 6(4): 1-2.
- [2] 黄茂松, 任青, 王卫东, 陈峰. 深层开挖条件下抗拔桩极限承载力分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1690-1695.
- [3] 凌辉. 上海软土中单桩抗拔承载机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. 22-47.
- [4] 杜广印, 黄锋, 李广信. 抗压桩与抗拔桩侧阻的研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 91-93.
- [5] 朱碧堂, 杨敏. 抗拔桩的变形与极限承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 120-129.
- [6] Fred H K, David W K. Uplift testing of model chilled shafts in sand[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(1): 31-47.
- [7] Ahmed S A, Abdallah I, Husein M. Tension tests on smooth and rough[J]. Model Piles in dry sand. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 746-751.
- [8] 黄锋, 李广信, 吕禾. 砂土中抗拔桩位移变形的分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(1): 31-36.
- [9] 谢涛, 袁文忠, 蒋泽中. 嵌岩抗拔桩抗拔承载力试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(4): 44-46.
- [10] 何思明. 抗拔桩破坏特性及承载力研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 308-310.
- [11] 杨什生. 软土地基中抗拔桩的受力与变形特性研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2003.
- [12] 黄锋, 郭瑞平, 李广信, 吕禾. 桩侧摩阻力和桩尖端承载力确定方法的探讨[J]. 岩土工程师, 1996, 8(2): 10-14.
- [13] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006. 183-184.

An Analysis of Influential Factors for Ultimate Pullout Capacity of Uplift Pile on Soft Ground

CHEN Juan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ultimate pullout capacity of uplift pile is an important design parameter of uplift Piles, and Elastic modulus, length, diameter of pile are the important influencing factors of Ultimate pullout capacity. Based on Static Load Test of uplift Piles of Shanghai South Railway Station, ABAQUS finite element is used to study the influence to ultimate pullout capacity of the three factors. The results show that elastic modulus of pile has little effect on ultimate pullout capacity, and increase of length, diameter of pile can markedly improve ultimate pullout capacity of uplift pile.

Key words: uplift pile; ultimate pullout capacity; ABAQUS; finite element

(责任编辑:王建华)