

郭欣玥,刘润.海洋工程中桩基抗拔承载力研究[J].地震工程学报,2018,40(2):369-375.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.369

GUO Xinyue,LIU Run.Study of the Uplift Bearing Capacity of Pile Foundations in Ocean Engineering[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):369-375.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.369

海洋工程中桩基抗拔承载力研究^①

郭欣玥, 刘 润

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要:抗拔承载力是桩基设计的重要组成部分,随着海上风电场的建设,海洋工程中出现了越来越多需要提供足够抗拔力的抗拔桩。现有规范中桩基抗拔承载力的计算来源于对抗压承载力的修正,理论研究成果也仅限于半经验法及极限平衡算法,因此与实测数据存在较大差异。系统阐述现有的桩基抗拔承载力计算方法,并结合实际工程计算桩基的抗拔承载力,对比各种计算方法的结果发现:黏土中 API 规范法计算的桩基上拔承载力更接近实测值;Meyerhof 和 Das 算法适合计算长径较小的桩;Chattopadhyay 和 Shanker 算法适用于砂土中抗拔桩的计算;现有抗拔承载力计算方法忽略了黏土中的黏附力和负孔隙水压力,导致计算结果与实测值偏差较大。

关键词:抗拔桩;极限承载力;计算

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)02-0369-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.369

Study of the Uplift Bearing Capacity of Pile Foundations in Ocean Engineering

GUO Xinyue, LIU Run

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Uplift bearing capacity is an important part of pile foundation design. In ocean engineering, there is a growing demand for piles that have enough uplift bearing capacity for construction in offshore wind farms. The method for calculating the uplift bearing capacity of pile foundations given in current codes is rooted in the modification of the compressive bearing capacity of pile foundations, and the theoretical research is limited to semi-empirical and limit equilibrium methods. Therefore, there is big difference between calculated and measured values. This paper systematically explains the current calculation methods for the uplift bearing capacity of pile foundations, then uses different methods combining them with practical projects. The results show that: the uplift bearing capacity calculated by the method given in the API code is closer to the measured value in clay; the Meyerhof and Das algorithms are ideal for uplift piles with a small length-diameter ratio; and Chattopadhyay and Shanker's algorithms are suitable for piles in sand. We also found that the current methods for calculating uplift capacity ignore the adhesion force

① 收稿日期:2016-09-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB046800);国家自然科学基金优秀青年基金(51322904);高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20130032110074)

作者简介:郭欣玥(1993—),女,硕士研究生,主要从事结构物与地基相互作用方面的科研工作。E-mail:guoxytju@163.com。

and negative pore water pressure, resulting in great differences between calculated and measured values.

Key words: uplift pile; ultimate bearing capacity; calculation

0 引言

随着国家经济建设的发展,抗拔桩的应用日益广泛。抗拔桩主要用于地下水位较高的建筑,如地下停车场、建筑的地下室等,这是由于地下水浮力较高,需要抗拔桩来抵抗上拔荷载。此外,抗拔桩还用于海洋平台的系泊系统和输电线路的桩基础,因为其上层建筑受到较大的风浪作用,需要抗拔桩来承受由上部结构传递下来的拉拔荷载。

抗拔桩的设计中,抗拔承载力的计算是一项重要内容。但目前有关抗拔桩的研究深度远不及抗压桩,且现有规范中桩基抗拔承载力的计算来源于对抗压承载力的修正。国内外学者研究提出了一些抗拔承载力的计算方法:一类是在进行抗拔桩模型试验后分析总结出的半经验算法,如 Meyerhof^[1] 和 Das^[2] 提出的抗拔承载力计算方法。另一类是在假设抗拔桩某种破坏模式的基础上,通过极限平衡法建立方程得出的计算方法,如 Chattopadhyay 等^[3]、Shanker 等^[4]、何思明等^[5] 提出的计算方法。

上述抗拔承载力的计算方法多是通过抗拔桩的模型试验得到的,且研究多集中于砂土中的抗拔桩。对于黏土中的抗拔桩,上述计算方法的适用与否需要进一步验证。基于此,本文系统阐述现有的桩基抗拔承载力计算方法,包括规范法、半经验法和极限平衡法,并结合实际工程计算桩基的抗拔承载力,对比各种计算方法在砂土和黏土中的适用性,以期对实际工程应用提供参考。

1 抗拔桩的承载机制

1.1 荷载传递规律

上拔荷载作用于桩顶时桩身上部受拉,桩与桩周土之间产生相对位移,桩周土在桩侧产生向下的侧摩阻力。抗拔阻力一开始由上部土体提供,随着桩与桩周土之间相对位移的增加,下部土体开始提供侧摩阻力。当桩侧摩阻力达到极限值时桩发生上拔破坏。一般来说,桩数少且桩距大的抗拔桩,其破坏模式是单桩拔出破坏;桩数多且桩距小的抗拔桩,其破坏模式是群桩整体破坏^[6]。

1.2 主要的破坏模式

目前研究认为桩基的抗拔破坏模式主要有^[7]: (1)沿桩-土界面剪切破坏,如图 1(a)所示。这是桩

的主要破坏模式,破坏面沿着桩的侧表面。(2)沿复合剪切面破坏,如图 1(b)所示。桩下部的破坏面沿桩的侧表面,桩上部的破坏面沿桩周土体,通常发生在硬黏土中钻孔灌注桩的上拔过程中。(3)沿桩周土体剪切破坏,如图 1(c)所示。破坏面沿与桩长等高的倒锥形或喇叭形土体表面,通常发生在软岩中灌注桩的上拔过程中。

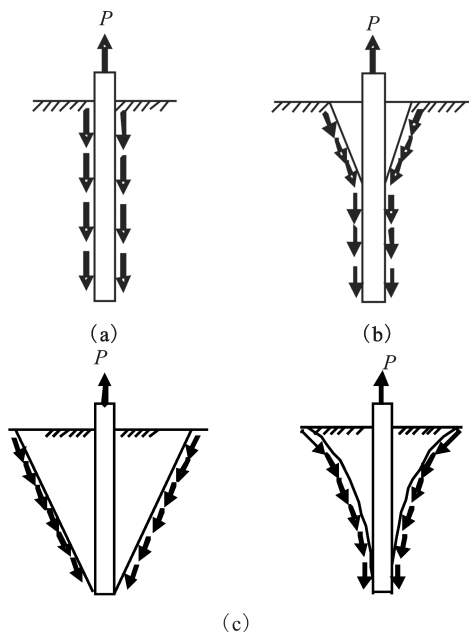


图 1 抗拔桩的破坏模式

Fig.1 The failure modes of uplift piles

1.3 影响桩基抗拔承载力的因素

(1) 桩参数和土性

Chattopadhyay 等^[3]研究发现砂土中桩基的抗拔承载力与桩的长径比、土的内摩擦角和桩土界面摩擦角等因素有关。Shin 等^[8]研究发现黏土中桩的抗拔承载力与桩身横截面面积和桩土界面黏附力有关。Alawneh 等^[9]研究发现砂土中闭口桩的抗拔承载力比开口桩高,粗糙桩的抗拔承载力比光滑桩高。梁云发等^[10]通过研究发现桩身刚度对桩的荷载传递有显著影响。此外有研究表明沉桩方式对桩基的承载力也有影响^[11-12]。

(2) 外部荷载

Turner 等^[13]研究发现循环荷载作用下,桩基的抗拔承载力有所下降。任国峰等^[14]研究发上

拔力加载速率增加,桩基的抗拔承载力也增加。Rao 等^[15]研究发现黏土中受水平循环荷载作用的刚性桩,当其荷载作用频率小于一定值时,桩基的抗拔承载力将不受影响。Shelke 等^[16]研究发现随着桩轴压的增大,抗拔桩的侧摩阻力减小。

(3) 时间效应

饱和软黏土地基中沉桩后,桩基的抗拔承载力具有一定的时效性。黄占芳等^[17]研究表明桩侧摩阻力的发挥存在时间效应。张添文等^[18]研究表明抗压桩和抗拔桩的侧摩阻力均存在时间效应因素的影响。

(4) 群桩效应

群桩效应就是指群桩基础受竖向荷载后,由于桩侧阻力、桩端阻力、沉降等性状发生变化,承载力不等于各单桩承载力之和这一现象。群桩效应与土的性质、桩距、桩的长径比和沉桩方式等因素有关^[19-20]。

2 抗拔承载力的计算方法

2.1 规范法

2.1.1 港口工程桩基规范

《港口工程桩基规范》(JTS 167-4-2012)^[21]中规定,打入桩的单桩抗拔承载力设计值可按下式计算:

$$T_u = \frac{1}{\gamma_R} (\pi d \sum \xi_i q_{ti} l_i + W \cos \alpha) \quad (1)$$

式中: T_u 为单桩抗拔极限承载力设计值; γ_R 为单桩抗拔承载力分项系数,取 1.45~1.55; d 为桩身截面直径; ξ_i 为折减系数,对黏性土取 0.7~0.8,对砂土取 0.5~0.6,桩的入土深度大时取大值,反之取小值; q_{ti} 为桩周第 i 层土的单位面积极限侧阻力标准值,无当地经验时,可根据规范中给定的参考值选取; l_i 为桩身穿过第 i 层土的长度; W 为桩重力,水下部分按浮重力计; α 为桩轴线与垂线夹角。

2.1.2 建筑桩基技术规范

《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[23]中指出,承受上拔力的桩基,其单桩抗拔承载力应满足:

$$T_u \leq \frac{T_{uk}}{2} + G_p \quad (2)$$

式中: T_u 为桩的抗拔拔力; T_{uk} 为抗拔极限承载力标准值; G_p 为桩自重,地下水位以下取浮重度。

抗拔极限承载力标准值 T_{uk} 可按下式计算:

$$T_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_i \quad (3)$$

式中: T_{uk} 为抗拔极限承载力标准值; u_i 为桩身周

长; q_{sik} 为桩侧表面第 i 层土的抗压极限侧阻力标准值; λ_i 为抗拔系数,砂土取 0.5~0.7,黏土和粉土取 0.7~0.8。

2.1.3 API 规范

根据 API 规范 (API RP 2A)^[23],黏性土和无黏性土的单桩抗拔承载力设计值可按下式计算:

$$T_u = W + \pi d \int f dZ \quad (4)$$

式中: T_u 为单桩抗拔极限承载力设计值; d 为桩的直径; W 为桩重力,水下部分按浮重力计; f 为沿着桩身任意一点处的桩侧摩阻力。

(1) 黏性土中的单位侧摩阻力 f :

$$f = \alpha c \quad (5)$$

式中: c 为该点的不排水抗剪强度; α 为无量纲参数。参数 α 满足 $\alpha \leq 1.0$,根据下式计算:

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.5}, \psi \leq 1.0 \quad (6)$$

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.25}, \psi > 1.0 \quad (7)$$

其中: $\psi = \frac{c}{p'_0}$; p'_0 为该点处的有效覆盖土压力,按下式计算:

$$p'_0 = \gamma_s z \quad (8)$$

式中: γ_s 为土的有效重度; z 为入土深度。

(2) 无黏性土中的单位侧摩阻力 f :

$$f = K p_0 \tan \delta \quad (9)$$

式中: K 为侧土压力系数,对于开口桩且没有土塞,侧土压力系数 K 通常取 0.8,对于闭口桩或桩端有土塞的桩, K 值取 1.0; p_0 为该点处的有效覆盖土压力; δ 为桩土摩擦角。

2.2 半经验法

国内外学者通过桩的上拔模型试验和现场试验,提出了一些计算桩基抗拔承载力的半经验法。该方法通常认为桩的总抗拔承载力由桩侧摩阻力和桩重两部分提供,表达式为:

$$T_{ug} = T_{un} + W \quad (10)$$

式中: T_{ug} 为总抗拔承载力,如图 2 所示; T_{un} 为净抗拔承载力; W 为桩的有效重力。

2.2.1 Meyerhof 计算方法

Meyerhof^[1]通过砂土中粗糙桩的上拔试验(其中试验桩的长径比 L/d 小于 10),提出了桩的单位侧摩阻力计算公式:

$$f = \gamma z K_u \tan \delta \quad (11)$$

式中: γ 为土的单位重度; K_u 为桩的抗拔系数; δ 为桩-土界面摩擦角。抗拔系数 K_u 和土的内摩擦角 φ 有关,二者关系如图 3 所示。

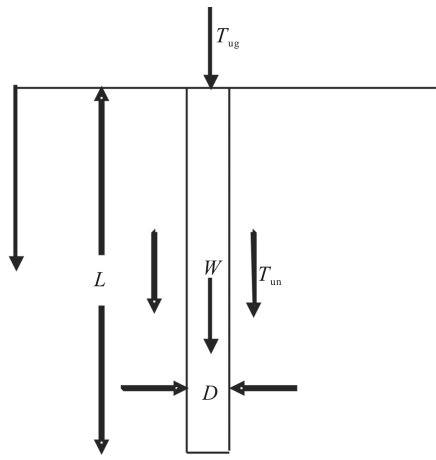


图 2 桩的抗拔承载力

Fig.2 Uplift bearing capacity of piles

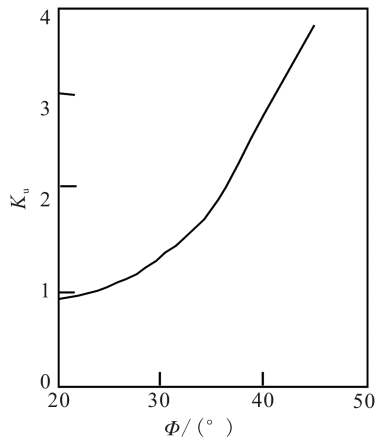


图 3 抗拔系数与土内摩擦角曲线

Fig.3 Relation curve of uplifting coefficient and soil friction angle

所以,桩的净抗拔承载力表达式:

$$T_{un} = \pi d \int_0^L f dz = \pi d \int_0^L \gamma z K_u \tan \delta dz = \frac{1}{2} \pi d \gamma L^2 K_u \tan \delta \quad (12)$$

2.2.2 Das 计算方法

(1) 砂土中的桩

Das^[2]认为桩的抗拔承载力与桩的埋深率 L/d 有关,并进行了砂土中表面粗糙桩的模型试验,试验中取桩的长径比 $L/d = 4 \sim 24$ 。当桩的埋深小于临界桩长 L_{cr} 时,桩的单位侧摩阻力 f 呈线性增长;当桩的埋深等于 L_{cr} 时,桩的单位侧摩阻力 f 达到极限值;当桩的埋深超过 L_{cr} 后,桩的单位侧摩阻力 f 保持不变。桩的临界埋深率 $(L/d)_{cr}$ 根据下式计算:

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{cr} = 15D_r + 4, D_r \leq 70\% \quad (13)$$

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{cr} = 14.5, D_r > 70\% \quad (14)$$

桩的净抗拔承载力表达式:

$$T_{un} = \pi d \int_0^L f dz, \frac{L}{d} \leq \left(\frac{L}{d}\right)_{cr} \quad (15)$$

$$T_{un} = \pi d \int_0^{L_{cr}} f dz + \pi d \int_{L_{cr}}^L f dz, \frac{L}{d} > \left(\frac{L}{d}\right)_{cr} \quad (16)$$

$$f = \gamma z K_u \tan \delta \quad (17)$$

式中: K_u 为抗拔系数,取自 Meyerhof 试验; δ 为桩土界面摩擦角。

Das 根据试验结果还发现桩-土界面摩擦角 δ 与土的内摩擦角 φ 和相对密度 D_r 有关, δ/φ 和 D_r 的关系如图 4 所示。

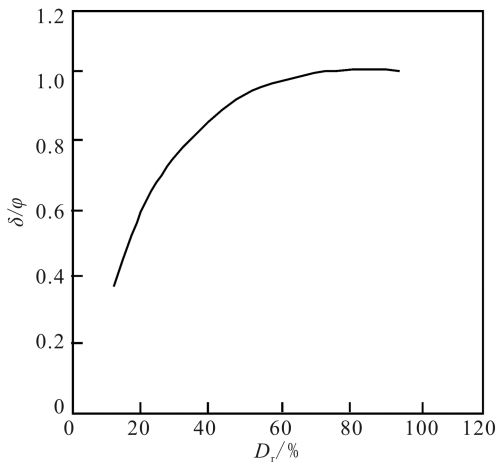


图 4 δ/φ 与相对密度曲线

Fig.4 Relation curve of δ/φ and relative density

(2) 黏土中的桩

除了砂土中的抗拔试验, Das 还进行了黏土中桩的抗拔试验,提出饱和软黏土中桩的净抗拔承载力公式:

$$P_{un} = LU\alpha'c_u \quad (18)$$

式中: L 为桩的埋入深度; U 为桩身截面周长; c_u 为黏土的不排水强度; α' 为桩-土界面的黏附系数,对钢管桩:

$$\alpha' = 0.715 - 0.019 1c_u (c_u \leq 27 \text{ kPa}) \quad (19)$$

$$\alpha' = 0.2 (c_u > 27 \text{ kPa}) \quad (20)$$

2.3 极限平衡法

国内外一些学者通过假设抗拔桩的破坏面形状和范围,考虑桩和土的相关参数,运用极限平衡法推导桩的抗拔承载力计算方法。

2.3.1 Chattopadhyay 理论

Chattopadhyay 等^[3]认为砂土中抗拔桩在上拔过程中,桩土破坏面的形状和范围取决于桩的埋深

率 $\lambda(\lambda=L/d)$ 、桩土界面摩擦角 δ 和土的内摩擦角 φ 。砂土中抗拔桩的破坏面模型如图 5 所示。基于极限平衡条件,Chattopadhyay 推导了桩的抗拔承载力公式:

$$T_{un}=A_1\pi d\gamma L^2$$

(21)

$$A_1=\frac{1}{L}\int_0^L\frac{2x}{d}\left(1-\frac{Z}{L}\right)\left[\cot\theta+(\sin\theta+K\cos\theta)\tan\phi\right]dZ-\frac{d}{4L}$$

(22)

式中: θ 为桩破坏面与水平面之间的夹角; A_1 为净抗拔承载力系数。

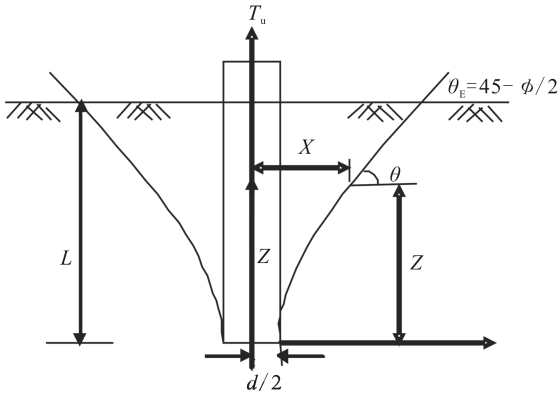


图 5 抗拔桩的破坏面
Fig.5 Failure surface of uplife pile

净抗拔承载力系数 A_1 与桩的埋深率 λ 和桩土界面摩擦角 δ 有关,在其他条件不变的情况下,三者关系如图 6 所示。

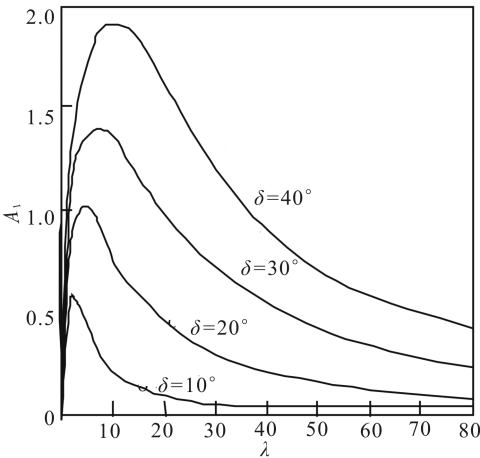


图 6 净抗拔承载力系数 A_1 与埋深率 λ 曲线
Fig.6 Relation curve of net uplift capacity factor A_1 and embedment depth λ

2.3.2 Shanker 理论

Shanker 等^[4]认为砂土中抗拔桩的破坏面形状

与埋深率有关,当 $L/d\leq 20$ 时,抗拔桩的破坏面沿桩周土体剪切破坏[图 7(a)]。根据极限平衡法推导的抗拔承载力表达式为:

$$T_{ug}=\frac{C_1}{2}L_2+\frac{C_2}{6}L^3\left(\frac{L}{d}\leq 20\right)$$

(23)

式中:系数 C_1 和 C_2 表达式如下:

$$C_1=\pi d\gamma\left[\frac{1}{\tan\theta}+(\cos\theta+K\sin\theta)\tan\varphi\right]$$

(24)

$$C_2=\frac{2\pi\gamma}{\tan\theta}\left[\frac{1}{\tan\theta}+(\cos\theta+K\sin\theta)\tan\varphi\right]$$

(25)

$$K=K_0=(1-\sin\varphi)\frac{\tan\delta}{\tan\varphi}$$

(26)

当 $(L/d)>20$ 时,抗拔桩的破坏面为复合剪切破坏面[图 7(b)]。此时桩的抗拔承载力由两部分相加而成:一部分是桩上部 $0.75L$ 长的抗拔承载力;另一部分是下部 $0.25L$ 长的侧摩阻力。

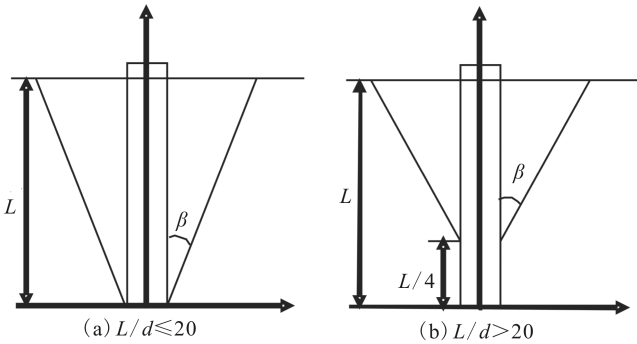


图 7 桩土破坏面
Fig.7 Failure surface of pile and soil

3 不同计算方法的对比

3.1 工程概述

工程一是渤海某码头的钢管桩拔除施工^[24]。拆除的钢管桩直径 630 mm,壁厚 12 mm,桩长 25.7 m, $L/d=40$,桩底标高-21.00 m。钢管桩采用封闭式桩尖结构,空腔中装满细沙,桩重 48 kN,桩内砂重 144 kN,工程实际上拔力 1 700 kN。具体土层参数如表 1 所列。

工程二是上海某大型地下变电站的单桩抗拔承载力的原位试桩^[25]。钻孔灌注桩的桩长 $L=48.5$ m, $d=0.8$ m, $L/d=61$,壁厚为 12 mm,桩身的重量为 25 kN/m³。抗拔承载力实测值为 5 000 kN。具体土层参数如表 2 所列。

3.2 不同方法计算结果的对比

本文两个实际工程的桩长径比过大,Meyerhof

计算方法不适用,两个工程均不再对 Meyerhof 公式进行计算。Chattopadhyay 和 Shanker 算法适用于砂土,工程一也不对这两个公式进行计算,其他计算结果如表 3、表 4 所列。

表 1 土层的计算参数(工程 1)

Table 1 Calculated parameters of soils layers (Project 1)								
层号	土层名称	层厚 /m	$\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\delta /(^{\circ})$	$\varphi /(^{\circ})$	c_u / kPa	$\alpha /$	q_{fi} / kPa
1	淤泥	1.5	7.8	7.0	8.8	4	0.64	10.7
2	淤泥质黏土	4.0	8.4	15.0	18.8	12	0.49	12.0
3	黏土	7.5	9.4	20.0	25.0	42	0.20	28.0
4	泥炭质黏土	2.5	9.4	20.0	25.0	50	0.20	48.0
5	粉质黏土	3.5	10.0	20.0	25.0	60	0.20	58.7
6	黏土	2.5	10.0	20.0	25.0	67	0.20	80.0

表 2 土层的计算参数(工程 2)

Table 2 Calculated parameters of soils layers (Project 2)								
层号	土层名称	层厚 /m	$\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\delta /(^{\circ})$	$\varphi /(^{\circ})$	D_r	K_u	q_{fi} / kPa
1	砂质粉土	5.3	19.1	15.0	29.8	0.17	1.40	47.8
2	粉砂	6.2	19.3	20.0	31.7	0.20	1.50	67.0
3	粉质黏土	14.9	18.4	15.0	23.2	0.20	1.00	40.0
4	粉质黏土与粉砂互层	13.0	18.5	20.0	23.8	0.37	1.20	50.0
5	粉质黏土与粉砂互层	5.0	19.4	20.0	24.4	0.37	1.40	50.0
6	中砂	2.1	20.1	25.0	30.8	0.37	1.30	81.3

表 3 计算结果(工程 1)

Table 3 Computation result (Project 1)			
算法	抗拔桩极限承载力/kN	实际上拔力/kN	理论值和实测值的偏差/%
	港口工程桩基规范	950.7	-44.1
建筑桩基技术规范	824.8	1 700	-51.5
API 规范	1 099.1		-35.3
Das	569.3		-66.5

表 4 计算结果(工程 2)

Table 4 Computation result (Project 2)			
算法	抗拔桩极限承载力/kN	实际上拔力/kN	理论值和实测值的偏差/%
	港口工程桩基规范	4 481.1	-43.99
建筑桩基技术规范	4 001.0	8 000	-49.99
API 规范	5 558.5		-30.52
Das	5 623.2		-29.71
Chattopadhyay	6 935.5		-13.31
Shanker	5 919.2		-26.01

从表 3 的计算结果可以看出:抗拔承载力在黏性土层的计算中,API 规范计算值与实测值最接近,偏差为-35.3%。从表 4 的计算结果可以看出:抗拔承载力在砂性土层的计算中,Chattopadhyay 计算值与实测值最接近,偏差为-13.31%。

4 结论

本文在规范和国内外研究成果的基础上,总结

了桩基抗拔承载力的不同计算方法,并结合实际工程对比计算了各种算法,探讨了不同计算方法对抗拔承载力计算的适用性,得出如下结论:

(1) 规范法中,《港口工程桩基规范》和《建筑桩基技术规范》的计算值与实测值有较大偏差。如需使用规范法计算黏土中桩的抗拔承载力,建议用 API 规范中的计算方法,其计算值较其他计算方法与实测值更接近。

(2) 半经验法中,Meyerhof 和 Das 计算方法均适合长径比小的桩,且 Das 计算方法在黏土中抗拔承载力的计算和实测值有较大偏差。

(3) 极限平衡法中,Chattopadhyay 和 Shanker 计算方法可较为准确地计算砂土中桩的抗拔承载力,但是对于黏性土中的桩不适用,其抗拔承载力计算值与实测值有较大偏差。

(4) 现有计算方法一般认为桩的抗拔承载力由两部分提供:一是净抗拔承载力,由桩侧摩阻力提供;二是桩身自重。现有计算方法忽略了黏土中的黏附力和负孔隙水压力,导致计算值与实测值之间存在较大偏差。

参考文献(References)

[1] MEYERHOF G G.Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles [C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Pergamon,1975,12(7):97.

[2] DAS B M.A Procedure for Estimation of Uplift Capacity of Rough Piles[J].Soils and Foundations,1983,23(3):122-126.

[3] CHATTOPADHYAY B C,PISE P J.Uplift Capacity of Piles in Sand[J].Journal of Geotechnical Engineering,1986,112(9): 888-904.

[4] SHANKER K,BASUDHAR P K,PATRA N R.Uplift Capacity of Single Piles:Predictions and Performance[J].Geotechnical and Geological Engineering,2007,25(2):151-161.

[5] 何思明,张晓曦,王东坡.分层地基中抗拔桩破裂面的确定方法与极限抗拔承载力计算方法研究[J].岩土力学,2012,33(5): 1433-1437,1444.

HE Siming,ZHANG Xiaoxi,WANG Dongpo.Study of Computation Methods of Ultimate Uplift Capacity and Determining Position of Failure Surface of Uplift Piles in Layered Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(5):1433-1437,1444.

[6] 万嘉康,徐云博.抗拔桩应用与研究现状[J].岩土工程界,2008,11(3):50-51.

WANG Jiakang,XU Yunbo.Application and Research Status of Uplift Piles[J].Geotechnical Engineering World,2008,11 (3):50-51.

[7] 孙晓立.抗拔桩承载力和变形计算方法研究[D].上海:同济大学,2007.

SUN Xiaoli.Study on Calculation Method of Deformation and

- Bearing Capacity of Uplift Piles[D].Shanghai: Tongji University, 2007.
- [8] SHIN E C, DAS B M, PURI V K, et al. Ultimate Uplift Capacity of Model Rigid Metal Piles in Clay[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1993, 11(3): 203-215.
- [9] ALAWNEH A S, MALKAWI A I H, AL-DEEKY H. Tension Tests on Smooth and Rough Model Piles in Dry Sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 746-753.
- [10] 梁发云, 宋著, 陈海兵. 抗拔桩荷载传递特性的积分方程解法及参数分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 977-983.
- LIANG Yunfa, SONG Zhu, CHEN Haibing. Analysis for Load Transfer Behaviors of Uplift Single Pile With an Integral Equation Method and Parameter Studies[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(7): 977-983.
- [11] GALLAGHER K, ST JOHN H. Field Scale Model Studies of Piles as Anchorages for Buoyant Platforms[C]//European Offshore Petroleum Conference and Exhibition, London: 1980.
- [12] 周龙, 刘润, 郭绍增, 等. 桩靴连续贯入过程的动态模拟方法研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 461-466.
- ZHOU Long, LIU Run, GUO Shaozeng, et al. A Dynamic Simulation Method for Continuous Spudcan Penetration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 461-466.
- [13] TURNER J P, KULHAWY F H. Drained Uplift Capacity of Drilled Shafts under Repeated Axial Loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(3): 470-491.
- [14] 任国峰, 徐光明, 顾行文. 单桩竖向抗拔承载力离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(1): 91-94.
- REN Guofeng, XU Guangming, GU Xingwen. Centrifuge Model Test Study on Vertical Uplift Bearing Capacity of Single Pile[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(1): 91-94.
- [15] RAO S N, PRASAD Y. Uplift Behavior of Pile Anchors Subjected to Lateral Cyclic Loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(4): 786-790.
- [16] SHELKE A, PATRA N R. Effect of Compressive Load on Uplift Capacity of Cast-In-situ Bored Piles[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(5): 927-934.
- [17] 黄占芳, 刘永强. 上拔荷载作用下挤扩支盘桩试验与荷载传递机理的分析[J]. 建筑科学, 2010(7): 17-21.
- HUANG Zhanfang, LIU Yongqiang. Experimental Study of Loading Transfer Behavior for Squeezed Branch Piles under Pulling Loading[J]. Building Science, 2010(7): 17-21.
- [18] 张添文, 陈广才. 大直径(超)长灌注桩竖向荷载试验研究[J]. 工程勘察, 2013(9): 7-13, 18.
- ZHANG Tianwen, CHEN Guangcai. Study on Large Diameter and (Super) Long Bored Piles by Using Vertical Loading Tests[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(9): 7-13, 18.
- [19] DAS B M. Model Uplift Tests on Pile Groups in Sand[J]. Transportation Research Record, 1984: 25-28.
- [20] 陈立宏, 袁希雨. 砂土中旋挖挤扩灌注桩的抗拔模型实验[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 69-72.
- CHEN Lihong, YUNA Xiyu. Experimental Study on Anti Uplift Model of Rotary Grouting Pile in Sand[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(4): 69-72.
- [21] 港口工程桩基规范: JTS1674-2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Code for Pile Foundation in Port Engineering: JTS1674-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [22] 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical Code for Building Pile Foundation: JGJ 94-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [23] American Petroleum Institute. RP2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-working Stress Design[M]. Houston: American Petroleum Institute, 2000.
- [24] 焦卫峰. 渤海石油输灰码头改造钢管桩拔除施工[J]. 中国港湾建设, 2006(1): 56-58.
- JIAO Weifeng. Extraction of Steel Tubular Piles During Rebuilding of a Jetty for Bohai Petroleum Company[J]. China Harbour Engineering, 2006(1): 56-58.
- [25] 酆建俊, 黄茂松, 木林隆, 等. 分层地基中扩底桩抗拔承载力的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1997-2003.
- LI Jianjun, HUANG Maosong, MU Linlong, et al. Study on Calculation Method of Uplift Bearing Capacity of Belled Piles in Layered Soil[J]. Rock Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1997-2003.