

DX 桩单桩抗拔计算公式探讨

袁希雨¹, 贺德新², 陈立宏¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京中阔地基基础技术有限公司, 北京 100097)

[摘要] DX 桩在承受上拔荷载时, 桩土间的相互作用除了桩侧的摩擦阻力外, 还有承力盘提供的抗拔阻力, 对于桩身的抗拔摩擦阻力的研究有不少成果, 但要研究 DX 桩的抗拔承载力, 关键在于解决支盘的抗拔阻力计算问题。文章通过对 DX 桩作为抗拔桩的某工程实例进行分析, 运用不同的计算方法对 DX 抗拔桩的承载力进行计算并与工程实测值进行对比, 对不同计算方法进行了讨论研究, 并试着探求一种新的计算方法。

[关键词] DX 桩; 抗拔承载力; 盘阻力; 计算方法

[中图分类号] TU473 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0069-05

1 前言

抗拔桩作为一种广泛应用的基础形式, 在高耸构筑物、桥梁、地下结构、桩基试验等工程实践中应用日益频繁。传统意义上的等截面抗拔桩的抗拔承载力完全由桩侧摩擦阻力及桩身自重提供, 桩周土体作用难以充分发挥, 致使其抗拔能力较为有限; 即使桩侧阻力能够得到充分的发挥, 桩土的相对位移也会比较大, 这样可能会导致桩体上部与土体分离, 削弱桩侧阻力的发挥。由此可见, 等截面抗拔桩并不是最为理想的抗拔桩型, 在工程实践中人们往往将抗拔桩做成非等截面的形状(例如扩底桩等)或者利用后注浆来提高桩的抗拔能力。DX 旋挖挤扩灌注桩是一种新型的变截面桩, 简称 DX 桩, DX 桩通过在桩身不同位置挤扩多个盘腔, 灌注混凝土形成突出的盘体, 从而形成了多点支撑的结构形式, 能充分利用土体中较大的端阻力, 从而具有良好的抗拔性能。在 DX 桩抗拔性能评价中, 核心是计算盘端抗拔阻力, 文章结合某工程实例进行分析计算, 对现有的计算方法进行了讨论, 提出了进一步研究 DX 桩抗拔承载力的计算方法。

2 抗拔桩计算方法研究现状

2.1 常见单桩抗拔承载力计算方法举例

2.1.1 《建筑桩基技术规范》中的计算方法

一般的单桩抗拔承载力可以根据桩身的侧摩阻力和桩身的自重计算。在《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)中规定了抗拔桩的摩擦阻力等于抗压桩身摩擦阻力乘以一个折减系数 λ (砂土时取 0.5~0.7, 粘土时取 0.7~0.8)^[1]。

$$T_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_i \quad (1)$$

式(1)中, T_{uk} 为抗拔极限承载力标准值; u_i 为破坏表面周长, 对于等直径桩 $u = \pi d$, 对于扩底桩, 自桩底算 $l_i \leq (4 \sim 10)d$ 部分, $u_i = \pi D$, $l_i > (4 \sim 10)d$ 的部分, $u_i = \pi d$ (d 为桩身直径, D 为扩底段直径); q_{sik} 为桩侧表面第 i 层土的抗压极限侧阻力值, 按规范取值; λ_i 为抗拔折减系数; l_i 为第 i 层土厚度。

而最新的《大直径扩底灌注桩(墩)技术规程》中的抗拔计算和建筑桩基技术规范完全一样^[2]。

2.1.2 国外灌注桩抗拔承载能力计算公式

美国采用了如下灌注桩抗拔承载力计算公式^[3, 4]:

[收稿日期] 2011-10-15

[基金项目] 铁道部重点科技项目(2009J010-F)

[作者简介] 袁希雨(1988—), 男, 山东临沂市人, 硕士研究生, 主要从事桩基工程研究工作; E-mail: 330652642@qq.com

$$P_u = \sum P_{si} + P_{pb} + W \quad (2)$$

式(2)中, P_u 为桩的抗拔极限抗拔力; P_{si} 为桩身在第 i 层土的摩阻力; P_{pb} 为扩径体的端承力; W 为桩身自重。

而前苏联采用的公式为

$$\Phi_a = m \cdot u \sum m_f \cdot f_i \cdot l_i \quad (3)$$

式(3)中, Φ_a 为桩的抗拔极限抗拔力; m 为工作条件系数; u 为桩截面的外周长; m_f 为桩侧土的工作条件系数; f_i 为第 i 层土的最大摩阻力, 仅与土种类有关; l_i 为第 i 层土的层厚。

这一公式与我国相关规范中的计算公式基本一致。

2.1.3 爆扩桩抗拔承载力计算公式

南京工程兵工程学院与上海人民防空办公室科研院所提出了饱和软土中爆扩桩抗拔承载力计算方法, 表达式为^[5]:

$$N' \leq P_a = K_s / K [\pi d \sum \lambda_i \cdot l_i \cdot f_i + \pi [(D^2 - d^2) / 4 \cdot R_1] + 0.9G \quad (4)$$

式(4)中, N' 为轴向拉力; P_a 为桩的容许抗拔力; K_s 为施工影响系数(完全掌握了施工工艺的施工工人, K_s 值可以大于 1.0, 考虑施工工人素质的差异, 建议取值 0.8 ~ 1.3); K 为安全系数, 通常取 2.0; λ_i 为桩侧摩阻因数(一般的, 桩的上 1/3 段为 0.5, 中间 1/3 段为 2.0, 最下 1/3 段为 1.5); f_i 为桩周第 i 层的极限摩阻力; D 为扩径体直径; d 为桩身直径; R_1 为扩径体上方土的极限承载力; G 为桩体自重, 地下水位以下取有效密度。

这一公式一方面考虑了施工的影响, 另一方面利用土的极限承载力来计算扩大头提供的抗拔承载力。

赵长青等提出了类似的爆扩桩抗拔承载力计算公式^[6]:

$$P_u = \pi d \sum \lambda_i \cdot l_i \cdot f_i + \pi [(D^2 - d^2) / 4] R_1 \cdot \rho + W_1 + W_2 \quad (5)$$

式(5)中, d 为桩身直径; λ_i 为抗拔系数; f_i 为桩周土的容许摩阻; D 为扩大头直径; ρ 为扩大头形状系数, 它的取值是扩大头压迫土体的切面法向向量在垂直方向的分量, 一般形状爆扩桩扩大头是球形, 为了便于计算可以统一取为 0.5, 大致为扩大头切面法向向量与水平面呈 30° 夹角; R_1 为扩大头上方土体的抗压极限承载力; W_1 为桩体自重, 地下水位以下取有效重度; W_2 为扩大头拖带土体的质量。

2.2 DX 桩的抗拔承载力计算方法

DX 桩的抗拔机理较为复杂, 当 DX 桩顶承受拉

拔荷载时, 桩身开始承受拉力, 荷载继续增大到达一定值并大于桩身自重的情况下, 桩土之间会有相对位移或者桩土一起拔起的趋势, 此时摩阻力从上往下逐渐地发挥。在荷载不断增大时顶盘首先发挥承载力, 然后是向下第二个盘, 依次向下发展。因此不同的盘发挥承载力是有时间效应的, 各承力盘达到极限承载力的时间是不同的, 即某承力盘达极限抗拔承载力时其他承力盘可能尚未达极限状态, 或已进入软化阶段而抗拔承载力有所减小; 桩侧的摩阻力先于承力盘承载力的发挥, 桩侧摩阻力先达到峰值并进入软化阶段; 承力盘在达到极限承载力时, 所需的相对位移较大, 因此达极限抗拔承载力时桩顶位移相当可观, 有助于提高抗拔桩的承载能力。

DX 桩的抗拔承载力的计算问题一直未能得出定论, 目前比较常见的计算方法中大多是盘阻和桩身侧摩阻力分算。桩身侧摩阻力的计算基本达成共识, 即借鉴抗压桩的设计方法, 以桩的抗压侧摩阻力乘以经验折减系数后作为抗拔桩的侧摩阻力, 进而估算抗拔桩的侧摩阻力; 但要研究 DX 桩的抗拔承载力, 关键问题在于解决承力盘的抗拔阻力计算问题, 这仍是工程设计和学术领域内未能彻底解决的难题。在《三岔双向挤扩灌注桩设计规程》(JGJ171-2009)^[7] (以下简称“规程”)中效仿了建筑桩基规范中的计算方法, 将 DX 桩的承力盘及受承力盘影响范围内的桩身等效成与承力盘等直径的等截面桩进行计算, 规定 DX 桩极限抗拔承载力标准值按式(6)求解:

$$T_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u_i l_i \quad (6)$$

式(6)中, T_{uk} 为基桩极限抗拔承载力标准值; q_{sik} 为单桩第 i 层土的抗压极限侧阻力标准值; u_i 为桩身周长, 按“规程”表 5.2.2-1 和 5.2.2-2 取值; l_i 为桩的破坏表明穿过第 i 层土的厚度; λ_i 为抗拔阻力折减系数。

赵明华^[8]等从 DX 桩的承载机理出发对其抗拔承载力的计算方法和影响 DX 桩抗拔承载力的因素进行了研究, 将 DX 桩的抗拔承载力分成主桩侧摩阻力、承力盘承载力以及桩身自重三部分, 分别计算后求和得出 DX 桩的抗拔极限承载力。即公式:

$$Q_{uk} = \sum Q_{zpj} + \sum Q_{skj} + W_c \quad (7)$$

其中对于承力盘承载力计算公式为:

$$Q_{zpj} = 0.5 \pi (D_j^2 - d^2) \cdot \sigma_{zpj} \cdot (1 + \tan \varphi_j \tan \theta_j) \quad (8)$$

式(7)、(8)中, Q_{uk} 为 DX 桩抗拔极限承载力; $\sum Q_{zpj}$ 为 DX 桩承力盘的极限承载力; $\sum Q_{skj}$ 为主

土层编号	土质分类	平均层厚/m	桩极限侧阻力标准值 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	土体抗压承载力标准值/kPa
④ ₂	粉质粘土	1.65	55		
④ ₃	粉砂	0.95	60		
④ ₄	圆砾	0.65	120	35	380
⑤ ₁	重粉质粘土、粉质粘土	3.20	65		
⑤ ₂	粉质粘土	0.30	65		
⑤ ₃	粉质粘土	4.20	65		
⑥ ₁	砂质粉土	0.95	65		
⑥ ₂	粘质粉土	2.40	65	19	290
⑥ ₃	圆砾	1.80	125		
⑦ ₁	粉质粘土	2.20	55		
⑦ ₂	砂质粉土	2.35	65		
⑦ ₃	中砂	1.80	72		

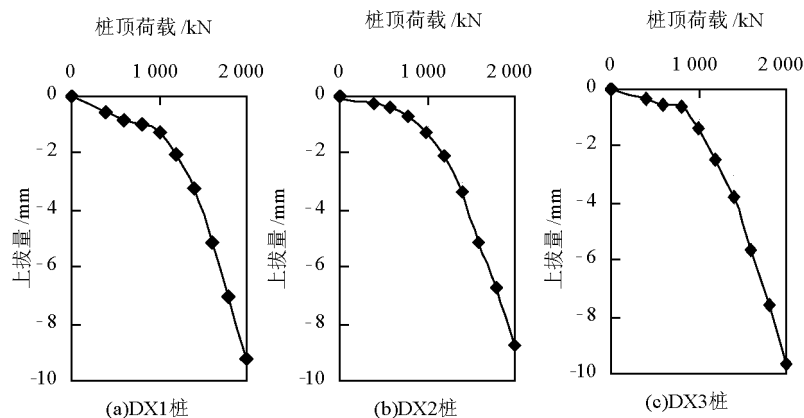
表2 试桩设计尺寸

Table 2 Sizes of test piles

桩号	有效桩长 /m	桩径 /mm	盘径 /mm	盘数 /个	盘距桩顶距离/m
DX1	22	700	1 500	2	9.7、19.4
DX2	22	700	1 500	2	9.7、19.4
DX3	22	700	1 500	2	9.7、19.4

3.2 试桩结果分析

为更加直观形象地对 DX 桩的受力特点进行分析、对极限承载力进行判断,现将本工程的试桩结果绘制成 $Q-s$ 曲线如图 1 所示。

图1 试桩 $Q-s$ 曲线^[11]Fig. 1 $Q-s$ curve of the pile test^[11]

桩的极限侧阻承载力抗压桩的设计方法,以桩的抗压侧摩阻力乘以经验折减系数(沙土取 0.50 ~ 0.70,粘性土、粉土取 0.70 ~ 0.80)后得到; W_c 为 DX 桩自重;下标 k 为承力盘数量; σ_{qj} 为第 j 个承力盘处土体抗压承载力标准值; θ_j 为第 j 个承力盘受荷面与水平面的夹角; φ_j 为第 j 个承力盘所在土层桩土内摩擦角; D_j 为第 j 个承力盘的直径; d 为主桩直径。

另外李广信等结合室外模型试验对 DX 桩的抗拔利用锚板理论、Prandtl 理论等进行过对比计算分析^[9];陈轮等进行了 DX 桩与直孔桩的现场模型试验对比^[10]。

3 工程实例分析

3.1 工程场地及试桩概况

某工程位于北京地区。根据现场勘察、原位测试以及室内土工试验研究,按地层的沉积年代、成因类型,将场地地面以下内土层划分为若干个大层,各土层的性质指标如表 1 所示。本工程共对 3 根两个盘的 DX 桩进行了抗拔试验,具体试桩设计尺寸如表 2 所示。

表1 试桩场地各土层性质指标

Table 1 Details of sub-soil characteristics of test field

土层编号	土质分类	平均层厚/m	桩极限侧阻力标准值 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	土体抗压承载力标准值/kPa
①	素填土	0.70	20		
②	砂质粉土	1.40	40		
③ ₁	粉质粘土	1.45	50		
③ ₂	粘质粉土	0.95	60		
④ ₁	砂质粉土	1.85	60		

从图 1 中可以看出,工程中三棵桩在试验过程中 $Q-s$ 曲线大致平缓光滑,没有出现陡降,没有出现拔出量的急剧增加,说明试桩没有达到极限承载力。由此可以看出,三棵 DX 桩的侧摩阻力还没有发挥到极限(或者将要达到但还没达到极限),而且 DX 桩的拔出量比工程经验中的等截面直孔桩的上拔量小得多,这对于提高桩基础的抗拔性能、减少抗拔量有重要作用,对保证抗拔桩基的工程安全性有实际意义。对试桩的 $Q-s$ 曲线进行了平行拟合外推,得到它们的极限抗拔承载力为 2 400 kN。工程的试桩结果如表 3 所示。

表 3 试桩结果
Table 3 Testing results

试桩号	单桩竖向抗拔承载力 特征值/kN	单桩竖向抗拔极限 承载力/kN
DX1	1 200	2 400
DX2	1 200	2 400
DX3	1 200	2 400

4 基于不同计算方法的抗拔承载力计算

根据“规程”方法和公式(7)的计算方法、混凝土密度按 2.5 t/m^3 计算,对工程中 DX 桩的抗拔承载力进行计算,结果如表 4 所示。

表 4 承载力特征值计算结果
Table 4 Calculating results

实测承载力 特征值/kN	“规程”计算承载力 特征值/kN	公式(7)对应承载力 特征值/kN
1 200	1 356	2 262

由表 4 可以看到,对于同一工程采用不同的计算方法计算出的抗拔承载力结果有很大差别,采用“规程”和公式(7)计算的承载力分别比实测值高出 13% 和 88.5%。本次计算结果与“规程”条文说明中的结果略有不同,可能是在取值等细节上有所不同造成的,但总的差别不大。由于影响 DX 桩抗拔承载力的因素很多,比如桩侧土体强度、承力盘受荷截面与水平面夹角 θ 、承力盘数量与间距、盘的埋深等,这使得同一公式在计算不同的工程时也会出现较大差别。这种差别主要出现在承力盘抗拔承载力的计算上,解决承力盘的抗拔阻力计算问题是现阶段 DX 桩抗拔承载力计算研究的关键问题。

5 DX 桩抗拔承载力计算方法探究

通过以上计算笔者等发现,DX 桩的抗拔承载

力计算理论还很不成熟,即使是依据“规程”进行计算,所得结果也会由于参数的取值问题出现较大偏差;由于公式中参数取值范围比较广,所以不同的人对同一公式同一工程的计算结果也会有较大出入。

在等截面抗拔桩桩侧摩阻力的计算中笔者等借鉴了抗压桩的桩侧摩阻力计算方式,乘以一个系数 λ 。由此得到启发,大胆地假设 DX 桩抗拔桩的盘阻力也可以由其抗压状态下的盘阻力乘以一个系数得到,不妨定义为 α 。DX 桩的抗压承载力计算理论要相对成熟得多,只要知道 α 的值,便不难估算出承力盘的抗拔阻力。由此便得到一个新的计算公式:

$$Q_{uk} = \sum Q_{zpj} + \sum Q_{skj} + W_c = u \sum \lambda_i q_{sik} l_i + \alpha \eta \sum q_{Bik} A_{pD} + W_c \quad (9)$$

式(9)中, q_{Bik} 为单桩第 i 个盘的持力土层极限盘端阻力标准值,可由“规程”表 G.0.2 查得; A_{pD} 为承力盘设计的截面面积,按承力盘在水平投影面上的面积扣除桩身设计截面面积计算; η 为总盘端阻力调整系数,单个和两个盘时取 1,三个盘及以上时取 0.93;其他系数意义同公式(7)。

为对此计算方法进行验证, α 取 0.0 ~ 1.0,采用代入法对工程中 DX 桩的抗拔承载力进行验算,最终在 $\alpha = 0.3$ 时得到了比较接近的数值 1 245 kN,只比实测值偏大 3.75%。但 α 肯定是与承力盘的埋深以及承力盘周土的性质等诸多因素有关的,所以要得到一个系统的理论取值范围需要大量的重复试验作支撑,笔者在此仅做一个假设性的讨论。

6 结语

文章通过 DX 桩抗拔的现场试验以及计算分析得出以下结论:

1) DX 桩抗拔承载力的计算可以分为主桩侧摩阻力、承力盘承载力以及桩身自重三部分,明确承力盘抗拔阻力与其抗压阻力之间的关系、解决承力盘的抗拔承载力计算问题是目前研究 DX 桩抗拔承载力计算的关键。

2) 现有的 DX 桩抗拔承载力计算公式不尽完善,对于同一工程采用不同的计算方法计算出的抗拔承载力结果有很大差别,而且无论哪种方法计算出的结果都与实测值有着较大的差距;同时由于公式中参数取值范围比较广,所以不同的人对同一公式同一工程的计算结果也会有较大出入。

3) 文章尝试根据等截面抗拔桩桩侧摩阻力的计算方法,即在抗压桩的桩侧摩阻力上乘以一个系

数 λ , 提出了 DX 桩抗拔桩的盘阻力也可以由其抗压状态下的盘阻力乘以一个系数 α 得到的假设, 得到一个新的公式。但要研究透彻承力盘的抗拔阻力与抗压阻力之间的关系、得到一套 α 的系统的理论取值范围, 需要大量的试验作支撑, 笔者等的能力有限, 只是在此做一个假设性的探究, 希望能为 DX 桩抗拔承载力的计算研究提供一个思路。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. 建筑桩基技术规范(JGJ94 - 2008) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大直径扩底灌注桩(墩)技术规程 JGJ225 - 2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

- [3] 段新胜, 顾 湘. 桩基工程[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1994.
- [4] Xu W Y. Settlement behavior of pile foundations [R]. Beijing: Prof. of International Conference for Deep Foundation, 1986.
- [5] 工程兵工程学院, 上海市人防科研所. 饱和软土中爆扩桩的研究 [R]. 南京: 工程兵工程学院, 1986.
- [6] 赵长青, 宫常青. 爆扩桩抗拔承载力计算公式研究 [J]. 后勤工程学院学报, 2006(2): 68 - 72.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 三岔双向挤扩灌注桩设计规程(JGJ171 - 2009) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [8] 赵明华, 李微哲, 单远铭. DX 桩抗拔承载机理及设计计算方法研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 199 - 203.
- [9] 李广信, 汤 飞. DX 桩承力盘抗拔阻力的分析与研究 [J]. 工业建筑, 2005, 35(6): 52 - 56.
- [10] 陈 轮, 蒋 力, 王海燕, 等. DX 桩抗拔承载力机理的现场试验研究 [J]. 工业建筑, 2004, 34(10): 33 - 35, 46.

Discussion on formula for anti-pull bearing capacity of DX pile

Yuan Xiyu¹, He Dexin², Chen Lihong¹

- (1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Beijing Zhongkuo Foundation Technology Co., Ltd, Beijing 100097, China)

[**Abstract**] When the DX-pile is under uplift load, the pile-soil interaction consists of pile shaft resistance and uplift resistance provided by the bells which effectively raises the uplift-pile ultimate bearing capacity. The friction resistance along pile shaft friction has been study well and has lots of results, but the problem of calculating the resistance of bell is still under studied which is the key to DX-pile uplift capacity. This paper calculates the bearing capacity of DX-pile and compares it with the measured value on the basis of a project to discuss and study these calculation methods, and a new method of calculation is also proposed.

[**Key words**] DX-pile; uplift capacity; resistance of load carrying plate; calculation methods