

DX 旋挖挤扩灌注桩单桩抗拔承载性状的数值分析

陈立宏¹, 张清林^{1,2}, 袁希雨¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国建筑股份有限公司技术中心, 北京 101300)

[摘要] 总结了 DX 桩的抗拔研究现状, 采用 FLAC^{3D} 对具有两个承力盘的 DX 单桩和相同直径与长度的普通直孔桩做了抗拔的数值计算分析, 对 DX 单桩抗拔的性状进行了研究。模型参数依据土工试验获取并采用现场大比尺试验结果进行校验。通过模拟分级加载, 得到了 DX 桩和直孔桩的抗拔承载力曲线, 同时得到了沿桩身的轴力分布, 依据这些计算结果展开分析, 可以发现 DX 单桩的抗拔承载力比相同直径的普通直孔桩高出一倍以上, 其上下承力盘的发挥作用是由上而下, 但当荷载增大到一定程度时, 下盘将发挥更大的作用。

[关键词] DX 桩; 抗拔; 数值分析

[中图分类号] TU473 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0031-06

1 前言

抗拔桩是抗拔基础的主要形式。近年来随着土木工程, 尤其是地下工程、交通工程、近海工程等的飞速发展, 抗拔桩的应用日益广泛, 在高耸建筑物、输电塔、抗浮地下结构、桥梁基础、冻胀和膨胀土地区的建筑中得到了广泛应用。对于传统的非嵌岩等截面竖桩, 桩的抗拔力都由侧阻提供, 而抗拔侧阻力要小于抗压时的值, 其抗拔能力十分有限, 并非理想的形式。为了满足抗拔承载力的要求, 往往要求大幅度增加抗拔桩的长度和直径, 或者采用后注浆等新技术, 而采用变截面桩, 改变单纯由侧阻提供抗拔力的承载模式是一个更好的选择。近年来在各种建筑物基础中扩底桩的应用日趋增加, 而多节扩孔桩在桩身上部的扩大部分能更早期地发挥抗拔力, 相对而言是一个更好的选择。

DX 桩是多节挤扩桩中的优秀代表, 其是在普通直孔桩基础上通过挤扩装置挤扩成扩大腔体, 形成由承力盘、桩身、桩端共同承受上部荷载的桩型。虽然工程实践表明了 DX 桩优异的抗拔性能, 但实

践应用仍然相对较少, 而且对于 DX 桩的抗拔受力机理、计算方法以及沉降的计算还处在探索阶段, 因此非常有必要进行深入的研究。文章通过数值计算方法对 DX 桩进行抗拔承载性状的研究, 以期能增加对 DX 桩抗拔机理的认识。

2 研究现状

由于承力盘增大了桩身的有效承载面积, 同时旋扩设备对周围土体有一定的挤密作用, 因此 DX 桩可大幅度提高单桩承载力。承力盘的存在改变了桩的承载机理, 大幅度地提高了桩的抗拔承载力, 现场抗拔试验表明 DX 旋挖挤扩灌注桩的抗拔效果是普通直孔桩的 2 倍甚至更多, 而且发挥极限承载力需要的位移更小^[1~3]。与传统的挤扩技术相比, 旋挖挤扩装置有着显著的优势, 双油缸双向相对位移带动三对旋扩臂对土体进行旋转挤压, 挤压过程中同时完成切削、碾压、挤扩, 旋扩臂始终与土体接触, 上下面土体均被挤压, 土体扰动小, 无沉渣或少掉土。而且具有施工快捷、安全等优点。承力盘的位置可根据地层条件选择持力层, 具有灵活性好、适应

[收稿日期] 2011-11-15

[基金项目] 中央高校基本科研业务费专项资金(2011JBM269); 铁道部重点科技项目(2009J010-F)

[作者简介] 陈立宏(1975—), 男, 浙江桐庐县人, 北京交通大学副教授, 博士, 主要研究方向为桩基工程; E-mail: lhchen@bjtu.edu.cn

性广的特点,这一桩型目前在抗拔桩领域应用越来越广。采用该桩型,有利于大大缩短桩长、降低混凝土用量、节约工期,具有非常广阔的应用前景。由于其突出的优点,DX 桩应用于抗浮、抗滑和其他抗拔工程中,收到了非常好的工程效果和经济效益。

但是 DX 桩的抗拔机理研究则远远落后于工程实践,目前的研究主要是通过一些桩基的静载荷试验来反馈分析,深入的研究工作很少。这主要是因为:

1)多节旋挖挤扩灌注桩的承载力机理相当复杂。与常规直孔桩完全不同,多节旋挖挤扩灌注桩是多支点的摩擦端承桩。抗压承载力由3部分组成:桩侧摩阻力、承力盘阻力、桩底端阻力,抗拔承载力则由桩侧摩阻力和承力盘阻力组成,这些不同的阻力之间又存在相互影响。目前针对承力盘阻力的研究基本属于空白;承力盘的存在会影响 DX 桩抗拔破坏的模式以及桩身摩阻力的发挥;同时,承力盘的大小、位置、数量、角度也会对抗拔承载力造成影响。多级扩径体的存在导致了目前人们对承载力机理的认识还很不充分,制约了其在工程中的应用^[4~6]。

2)与抗压桩相比,抗拔桩的研究相对较少。相对于抗压桩,抗拔桩的作用机理更为复杂,具有更多的不确定性。相对的研究也较少,特别是理论研究远远落后于工程实践发展。国内外对于抗拔桩的研究主要集中在承载力方面,而且在承载力的研究上主要集中在经验性的基础上,系统和深入的机理研究相对不多。当前抗拔桩的设计主要借鉴抗压桩的设计方法,即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,进而估算抗拔桩的摩阻力。

3)DX 桩发展时间不长。DX 桩技术是在国内独立发展起来的新型桩基技术,发展时间才十多年,因此相对试验资料不足、计算理论也不成熟^[4,5]。

对于等截面抗拔桩,国内外进行了较多的模型试验和一些现场原位试验研究。Kulhawy 在 1979 年进行了砂土中大型模型桩抗拔试验,发现抗拔桩主要破坏模式为沿着桩土界面的圆柱形剪切破坏^[7]。Alawneh 在砂土中做了 63 组模型试验,探讨了打桩方式、砂的密实形态等对抗拔力的影响^[8]。其他许多学者也进行了相应的试验研究,清华大学就曾利用渗水力方法进行了模型试验、现场足尺试验,对桩侧阻的发挥机理进行了探索。国内外根据大量的研究发现,一般破坏可分为倒圆锥台、圆柱和复合剪切破坏三大类形式,而主要形式是圆柱形剪切破坏,目前绝大部分研究都是在此基础上进行的。

对于扩底桩的抗拔研究近年来比较多,主要是以模型试验为主,现场原型试验也有不少。

DX 桩是一种新型桩基技术,相关研究较少,与其他桩型一样,研究主要集中于 DX 桩的实践效果和抗压机理,包括室内模型试验、大比尺模型试验和现场试验以及数值计算等。DX 桩的抗拔研究目前还非常少,文献可见的研究成果极其稀少,不足 10 篇。陈轮等在北京莲花桥附近进行过大尺寸的模型桩抗拔试验^[9],对桩身端阻、侧阻的发挥规律进行了分析研究。李广信、汤飞对 DX 桩的抗拔利用锚板理论、Prandtl 理论等进行过对比计算分析,并提出了用于规范计算的建议公式^[10]。赵明华等通过增加折减系数的办法提出了一个 DX 桩抗拔承载力的计算方法^[11]。

3 DX 单桩抗拔的数值模拟

3.1 数值模拟概况

DX 桩承力盘的存在增加了破裂柱面的直径,增加了抗拔力,改变了抗拔破坏的形态,也改变了位移与抗拔力之间的关系。另外承力盘的深度、大小、盘的数量对抗拔性能都有很大的影响,对这些问题现在依然没有开展过太多的研究工作,大大制约了 DX 桩的应用。在 DX 桩抗拔的数值模拟计算中,DX 桩直径 d 选取为 1 m,承力盘直径 D 为 2 m,高度为 1 m,桩身长度为 20 m,两承力盘间距为 8 m。在 FLAC^{3D} 中建立模型,网格划分的范围取径向为 10 m,深度为桩底 14 m,如图 1 所示。为对比起见,还同时进行了直孔桩的抗拔模拟计算,直孔桩尺寸和数值模拟中的参数与 DX 单桩中的相同。计算采用分级加载,如表 1 所示。

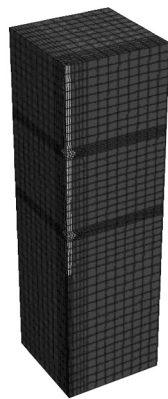


图 1 DX 单桩模型

Fig. 1 Mesh of DX single pile

表 1 抗拔加载与位移

Table 1 Load and uplift displacement of piles

荷载级别	DX 桩		直孔桩	
	荷载/kN	位移/mm	每级荷载/kN	累积荷载/kN
1	754	1.49	377	0.5
2	1 507	2.75	754	1.31
3	2 261	4.14	1 130	2
4	3 014	5.71	1 507	2.67
5	3 768	7.61	1 884	3.44
6	4 522	9.66	2 261	4.2
7	5 275	12.03	2 638	4.98
8	6 029	15.3	3 014	6.01
9	6 782	19.52	3 391	8.06
10	7 536	26.61	3 768	17.27
11	8 290	33.52	4 145	38.19
12	9 043	44.55	4 522	67.68

在 DX 桩抗拔的数值计算中,桩身混凝土采用弹性模型,桩周土体采用摩尔-库仑模型,桩土接触面采用库仑剪切模型,DX单桩的接触面模型建立

后如图 2 所示,计算参数见表 2。计算采用分级加载,共分 12 级。采用的土的参数是文献[12]中现场试验的数据。

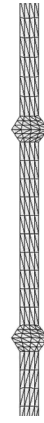


图 2 DX 单桩接触面

Fig. 2 Contact surface of DX single pile

表 2 DX 单桩数值计算所采用的本构模型及参数

Table 2 Constitutive models and parameters in numerical simulation of DX single pile

模拟对象	本构模型	模型参数						
		体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	法向刚度 /MPa	切向刚度 /MPa	抗拉强度 /kPa
桩身混凝土	弹性模型	16 700	12 500					
桩周土体	摩尔-库仑模型	42.5	19.6	25	20			5
桩土接触面	库仑剪切模型			20	16	3 600	3 600	0

3.2 模型参数验证

为验证数值模拟所采用的本构模型及所取参数的可靠性,用数值计算中所取的模型及参数对文献[12]中的模型试验的 1 号桩、5 号桩进行了模拟。1 号桩、5 号桩桩长 2 m,桩径为 0.15 m,承力盘直径为 0.3 m,承力盘在桩中间位置。网格划分范围取径向 2 m,深度为桩底 2 m,如图 3 所示。

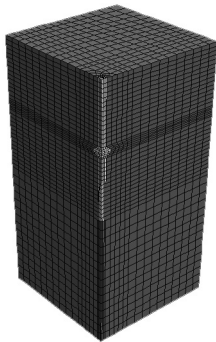


图 3 模拟 1 号桩、5 号桩的网格划分

Fig. 3 Meshing of pile 1 and pile 5 in simulation

数值模拟中的加载级数和每级荷载大小与实际情况一致,联合数值计算得到的桩顶在各级荷载下的沉降量与联合模型试验中 1 号桩、5 号桩的沉降量,作出两者的荷载-沉降曲线($Q-s$ 曲线),如图 4 所示。

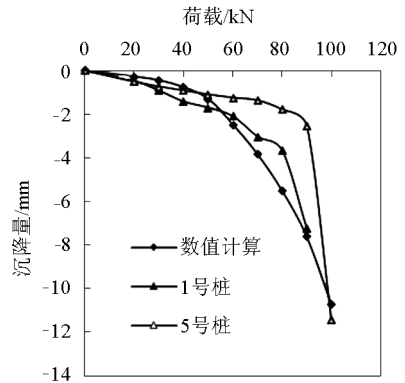


图 4 数值计算及 1 号桩、5 号桩的 $Q-s$ 曲线

Fig. 4 $Q-s$ curves of pile 1, pile 5 and the pile in numerical simulation

由于数值计算出的 $Q-s$ 曲线没有发生突变,故按文献[13]取桩顶沉降为 $0.05d$ 或 40 mm 时为桩的极限承载力,模拟中桩直径为 0.15 m , $0.05d$ 即为 $7.5\text{ mm} < 40\text{ mm}$,故取桩顶沉降为 7.5 mm 时桩顶荷载为桩的极限承载力。

由图4可知数值计算出长度为 2 m 、直径为 0.15 m 、有一个承力盘的 DX 桩的极限承载力为 84 kN 左右。这和试桩1的极限承载力 80 kN 、试桩2的极限承载力 90 kN 分别相差 5% 和 6.7% ,可以认为三者的极限承载力很接近。

故完全可以认为数值计算所取的参数是合理的、可靠的。

3.3 抗拔曲线

通过数值分析计算得出 DX 单桩在各级上拔荷载 Q 下的上拔量 s ,作出承载力与沉降的 $Q-s$ 曲线,如表1和图5所示。

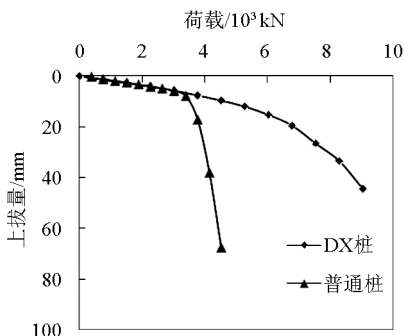


图5 DX 桩和普通直孔桩的抗拔曲线
Fig.5 Uplift resistance curves of DX pile and ordinary pile

由图5可以看到:

1) DX 桩的抗拔曲线呈现缓变,而相同直径的普通直孔桩则出现突变。DX 桩承受抗拔的能力远比普通直孔桩强,DX 桩在上拔荷载 $7\,536\text{ kN}$ 时位移为 44.6 mm ,而直孔桩在 $2\,638\text{ kN}$ 后就出现了位移突变。对于有两个承力盘的 DX 桩其抗拔承载力比普通直孔桩提高了2倍以上。

2) 对于普通直孔桩,在桩顶施加竖直向上的荷载时,桩身与土层之间的剪切力使地基土体发生剪切位移,当地基土体的剪切位移超过极限位移后,就发生破坏。而对于 DX 桩,当地基土体达到或超过极限位移后,仍有承力盘承受上部土体的支撑力,使桩仍能承受上拔荷载。随着桩顶上拔荷载增加,桩身混凝土的拉伸量和桩土相对位移量逐渐增大,桩侧中下部的摩阻力逐步发挥出来;由于粘性土的极

限位移只有 $6\sim 12\text{ mm}$,故当桩土相对位移大于桩土的极限位移后,桩身上部的侧阻已发挥到最大值并出现滑移。

3) 在桩顶第四级荷载即 $3\,014\text{ kN}$ 时,DX 桩的上拔量为 5.63 mm ,普通直孔桩的上拔量为 5.95 mm ,这说明在较小的抗拔荷载下,DX 桩的上拔量和普通直孔桩相差不多。但继续加载时,DX 桩的优越性就表现出来了。

3.4 承力盘阻力的发挥

作出受上拔荷载的 DX 单桩的桩身轴力图,如图6所示。图6显示的是在桩深度方向上,在桩顶和上下承力盘处的桩身轴力的大小。可以看到,沿桩深度方向上,桩身的轴力是不断减小的,这是因为在桩顶承受上拔荷载时,沿桩深度方向上,桩身轴力逐渐转化为桩侧摩阻力和承力盘的端阻力。在经过上、下两个承力盘后,桩身轴力变得很小,几乎为零。说明在桩底部承受的桩侧摩阻力很小,几乎所有的荷载都被下承力盘及其以上的桩身承担。沿桩的深度方向上有两个突变,这是因为承力盘承受了较大的荷载,使桩身轴力在经过承力盘时减小的幅度较大。

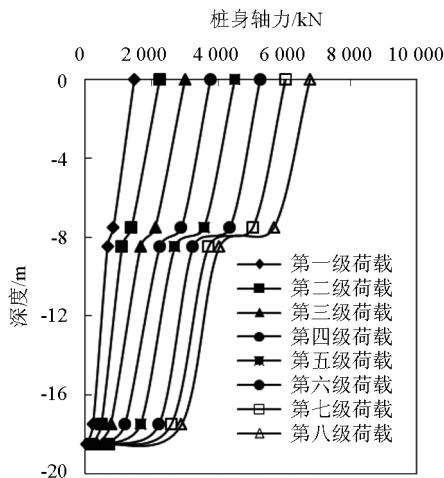


图6 DX 单桩受上拔荷载时的桩身轴力图
Fig.6 Axial force diagram of DX single pile under uplift loading

受上拔荷载的 DX 桩承力盘阻力的发挥也可以通过承力盘周围土体单元出现塑性区的范围来说明,在不同级上拔荷载下桩周土体的塑性区单元如图7所示。

由图7可以看出:

1) 在第二级荷载下,承受上拔力的 DX 桩上承

力盘周围土体发生塑性区的单元个数要比下承力盘的多,这说明在第二级荷载下,上承力盘首先发挥作用。

2)在第四级荷载下,上下两承力盘周围土体的塑性区都进一步增大,说明两承力盘阻力都发挥了作用。

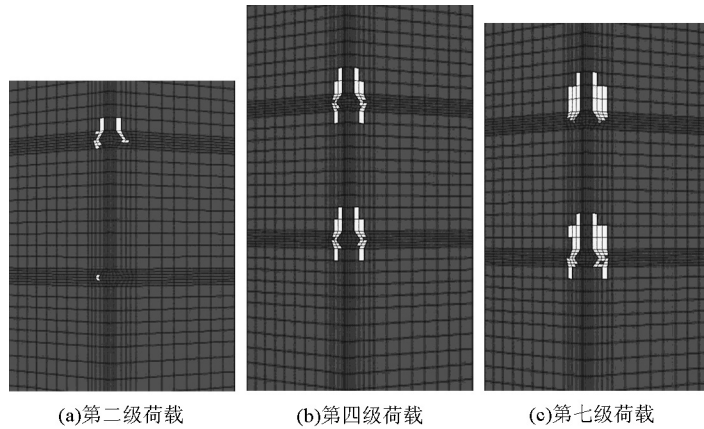


图7 不同荷载下DX桩周塑性单元(浅色区域所示)

Fig.7 The plastic units of DX pile under different grades of loading(light areas)

3)当桩顶荷载继续增大时,两承力盘周围土体的塑性区也进一步增大。在第七级荷载下,上承力盘周围的部分土体单元发生拉破坏。

4)总体来说,DX桩在承受上拔荷载的时候,承力盘阻力的发挥也具有时序效应。上承力盘阻力先发挥,下承力盘阻力再发挥。

4 结语

通过大比例尺模型试验和DX桩的数值计算分析,可以得出:

1)相比尺寸相同的普通混凝土灌注桩,DX单桩的抗拔承载力明显提高,上拔量明显降低。由数值计算得出具有两个承力盘的DX单桩的抗拔承载力超过普通直孔桩2倍。

2)DX桩在上拔荷载的作用下,承力盘阻力的发挥具有明显的时间顺序效应,上部盘的承载力先发挥,下部盘的承载力后发挥。当荷载进一步增大后,下盘承担的上拔荷载要高于上盘。主要是由于下盘周围土体应力较大,可承担的极限承载力较大,而这一结果与部分实测结果略有不同。文献[1]中实测数据表明上盘承受的抗拉荷载要比下盘大得多,这说明DX桩的抗拔模拟分析技术还有待提高。

参考文献

[1] 沈保汉,王海燕,刘振亮,等. 北京 BGF D 风电场两节 DX 挤扩

灌注桩抗压和抗拔承载力机理的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(2): 45-54.

[2] 钱德玲. 支盘桩抗压和抗拔特性的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊2): 517-520.

[3] 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.

[4] 贺德新. DX 桩技术概论[J]. 岩土工程界, 1999(2): 23-26.

[5] 贺德新,沈保汉. DX 挤扩装置及 DX 多节挤扩桩的应用[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 27-31.

[6] 曹可之. DX 桩基技术及实用工程[J]. 西部探矿工程, 2002, 76(3): 130-131.

[7] Kulhawy Fred H, Kozera David W. Uplift testing of model drilled shafts in sand[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(1): 31-47.

[8] Ahmed Shlash Alawneh, Abdallah I, Husein Malkawi. Tension tests on smooth and rough model piles in dry sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 746-751.

[9] 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.

[10] 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): 52-55.

[11] 赵明华,李微哲,单远铭,等. 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.

[12] 陈立宏,唐松涛,贺德新. DX 桩群桩现场试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1003-1007.

[13] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范 JGJ94-2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

Numerical analysis on uplift bearing characteristic of cast-in-situ DX pile

Chen Lihong¹, Zhang Qinglin^{1,2}, Yuan Xiyu¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Technology Center of China State Construction Engineering Co., Ltd, Beijing 101300, China)

[**Abstract**] This paper analyzes DX single pile with 2 bearing plates on its resistance of uplift load by numerical analysis method. The parameters for analysis are drawn from lab test and verified by large scale loading test of DX piles. The $Q-s$ curve and axial force of DX pile are obtained, and the conclusions based on the analysis are drawn. The uplift bearing capacity of DX single pile is about more than twice larger than that of the normal single pile and its bearing plates work out from the upper to the lower order, while when the bearing capacity reaches certain level, the lower plate will play a more important role.

[**Key words**] DX pile; uplift bearing capacity; numerical analysis