

21 世纪的桩基新技术:DX 旋挖挤扩灌注桩

王梦恕^{1,2}, 贺德新³, 唐松涛¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044; 2. 中铁隧道集团,河南洛阳 471001;

3. 北京中阔地基基础技术有限公司,北京 100097)

[摘要] 桩基作为一种古老的建筑形式在当前的发展中仍发挥着巨大的作用。伴随着工艺和技术的革新,各种新桩型不断地涌现,并取得了巨大成功。DX 桩作为其中的一种较为突出的桩型得到了广泛的应用。笔者从 DX 桩的发展、工艺特点、成桩优势、国内外研究进展以及工程应用等多方面进行了详细的阐述。

[关键词] DX 桩;承载机理;承载力;沉降

[中图分类号] TU473 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)01-0004-09

1 前言

桩基是一种历史悠久的基础形式,在我国很早就已成功地使用木桩来解决软土地基上的基础建造问题。到了近代,一方面是高、重建筑和精密设备对地基基础的要求日益严格,另一方面是成桩技术的进步,使桩基具有更突出的承载力高、变形量小、抗液化、抗拉拔能力强的优点,促使桩基发展十分迅速,已广泛应用于建筑、桥梁、铁路、水利、港口和近海工程等诸多领域。从发展趋势看,它是实现基础施工工业化的途径之一,因而是一种很有发展前途的深基础。

截至 2010 年年末,我国高铁的运营里程已达到 8 358 km,路网规模和速度等级均已居世界第一。京沪高铁全长 1 318 km,其中近 80 % 为桥梁,是当今世界上一次建成线路最长、技术标准最高的高速铁路。这些实践均证明了所采用的桩基础是安全、稳定和可靠的。同时,城市轨道交通建设的发展也为桩基的发展提供广阔的空间。

随着生产的发展和技术的进步,桩基技术在桩型和施工工艺等方面不断地推陈出新,桩的成桩工艺和应用都比过去更为多样化,特别是在桩基设计和施工领域中提出了许多崭新的概念和理论。具体

表现在单桩设计承载力越来越大,设计者不得不从诸如桩身材料优选,加大桩身截面,寻求新的、有效的沉桩工艺等途径入手,于是出现了各种新型系列的改良桩系。各种不同桩型的对比情况见表 1。

随着 21 世纪的到来,桩基础施工技术在各个方向都取得了长足的发展:a. 桩的尺寸向长、大方向发展;b. 桩的尺寸向短、小方向发展;c. 向攻克桩成孔难点方向发展;d. 向低碳节能工法桩方向发展;e. 向扩底桩方向发展;f. 向变截面桩方向发展;g. 向埋入式桩方向发展;h. 向组合式工艺桩方向发展;i. 向高强度桩方向发展;j. 向多种桩身材料方向发展;k. 向条形桩基方向发展。

DX 桩作为变截面新桩型的代表,近年来得到了迅速的发展。它是在钻孔灌注桩的基础上,使用专用的挤扩设备在桩底和桩身挤扩成为支盘状,然后浇灌混凝土形成桩身、承力盘和桩根共同承载的桩型。由于承力盘增大了桩身的有效承载面积,同时挤扩设备对周围土体有一定的挤密作用,因此 DX 桩可较大幅度提高单桩承载力。

经过多年工程实践证明,DX 桩技术具有工艺独特,设备操作简便,机械先进,技术经济竞争力强,单桩承载力高,成桩差异小,盘腔成形稳定,节约成本,降低造价等特点,是一种较成熟的桩基技术。目

[收稿日期] 2011-11-15

[作者简介] 王梦恕(1938—),男,河南温县人,中国工程院院士,北京交通大学教授,主要研究方向为隧道及地下工程设计、施工新技术;

E-mail: wms3273@263.net

前在山东、山西、天津等地的部分地区和企业已制订了 DX 桩设计与施工的规程和企业标准,使得 DX 桩在这些地区得到推广应用,并取得了良好的经济效益。但 DX 桩由于其多级扩径体的存在改变了传

统等截面桩的荷载传递和变形性状,桩与土之间的相互作用问题较为复杂,目前人们对 DX 桩承载机理的认识还很不充分,制约了 DX 桩在工程中的应用的发展。

表 1 各种桩型优缺点比较
Table 1 Advantages and disadvantages of several piles

桩型	优点	缺点
预制桩	适用于上层较弱、下层较好的土层;对桩间土产生挤密作用,施工质量较稳定且容易控制	锤击产生振动、噪声污染,配置钢筋较多,造价较高
普通灌注桩	施工方法较简单;适应性较强	比 DX 桩造价高,钢筋、水泥用量多,桩尖虚土难于处理,桩身可能有缩径
沉管灌注桩	能改善灌注桩和预制桩等桩的施工缺欠	仅适用于上部为软弱土层,下层为较好持力层的土层;产生噪声,也易产生桩身质量问题
锥形桩	挤土效果较好,利用锥面可增大桩的侧阻力;承载力提高,沉降量较小	桩长有限,施工产生噪声、振动等
后注浆灌注桩	二次注浆可解决普通灌注桩的桩尖虚土及桩身与土的收缩缝隙,提高承载力	二次注浆需多耗费水泥、造价高,易对相邻基础产生不利影响
扩底桩	桩端可形成扩大头,充分利用桩端持力层的承载力	桩端承载力的充分发挥需要桩身沉降的发展,在正常使用状态,很难达到预期效果
大直径桩(墩)	施工简便,造价低,承载力高,沉降量小,混凝土质量易于保证,抗震性能好	对无粘性的砂、碎石类土,难于在水下形成扩大桩头,施工时因应力释放而出现孔壁土的松弛效应,导致侧阻力降低
DX 桩	集预制桩和扩扩桩的优点;施工工艺简单,造价低,承载力高;能以桩径小、桩长短的桩满足承载力较高的要求	在较弱土层中成岔、盘较困难,设计参数及承载力计算公式需进一步研究

2 多节扩孔桩的发展

20 世纪 50 年代后期,印度开始在膨胀土中采用多节扩孔桩,20 世纪 60 年代和 70 年代印度、英国及前苏联在黑棉土、黄土、亚粘土、粘土和砂土中采用多节扩孔桩。国外经验表明,多节扩孔桩与直孔桩相比,承载力大大提高,沉降小,技术经济效果显著。

1978 年初,北京市建筑工程研究所等在团结湖小区进行干作业成孔的小直径(桩身直径 300 mm、扩大头直径 480 mm)两节和三节扩孔短桩(桩长不足 5 m)施工工艺及静载试验研究。

1979 年建设部建筑机械研究所和北京市机械施工公司在国内首先研制开发出挤扩、钻扩和清虚土的三联机,简称 ZKY-100 型扩孔器,同年北京市桩基研究小组首先在劲松小区对用该机的挤扩装置制作成的四节挤扩分支桩(桩身直径 400 mm,挤扩分支直径 560 mm,每一节为 6 个分支,单支宽度 200 mm、高度 200 mm,桩长 8.70 m)和相应的直孔

桩(桩径 400 mm、桩长 8.85 m)进行竖向受压静载试验,结果表明,前者的极限荷载为后者的 138%。

20 世纪 90 年代,北京俊华地基基础工程技术集团研制开发出该公司的第一代锤击式挤扩装置和第二代 YZJ 型液压挤扩支盘成型机及挤扩多分支承力盘桩,后者在北京、天津、河南、安徽、湖北等地的工程中得到应用,取得了较显著的技术经济效益。支盘桩的单桩承载力一般为相应直孔桩的 2 倍左右。

近年来,上海地区推出凹凸型钻孔灌注桩,即在成孔过程中,采用高速、控压造凹凸工艺,选择合适部位,扩大孔径,然后灌注混凝土而成桩体,并在几个工程中成功地应用。

同时,AM 桩也得到了很大的发展。AM 桩是一种旋挖钻孔扩底灌注桩,即在直孔桩钻孔完成后,采用特有的 AM“魔力桶”进行液压切削扩底。

基于国内外建筑业市场前景,扩孔灌注桩技术运用广泛,而扩孔桩施工机具技术落后的现状,1998 年,贺德新在应用 YZJ 型支盘挤扩机的基础上,认

真分析,潜心研究,研制出国内外同类型机具中新一代全智能多功能液压挤扩装置(简称DX挤扩装置)。之后,在第一代DX挤扩装置的基础上,研发出第二代钻扩清一体化机,该设备可以同时完成钻孔、扩孔以及清孔施工,大大提高了施工效率。

2006年,北京中阔地基基础技术有限公司又将现有的挤扩设备进行改进,发明了DX旋挖挤扩钻机。该设备将原来的非连续成盘作业变为连续的切削碾压作业,成盘的质量更高,速度更快。设备的革新也带来了施工工艺的革新,采用新工艺以后,DX桩扩盘的适用范围更加广泛。对于以前纯挤压方式无法施工的硬土层或强风化岩层,新一代设备也同样可以保质保量的完成,大大拓宽了DX桩的适用范围。

随着DX桩技术及工艺的普及,DX桩在住宅楼、高层办公楼桩基、电厂公路桥梁桩基以及液化天然气储存罐桩基等工程中得到了大规模应用。这些工程涵盖了从普通的工业与民用建筑,到大型、重型荷载作用下的建筑物基础,为DX桩规范的制订提供了大量可靠的依据。截至目前,已经有5个省市的相关部门先后颁布了6本DX桩的地方技术规程以及建设部的行业标准。

3 DX桩的工艺特点

3.1 基本原理

三岔双向挤扩灌注桩(简称DX桩)是在钻(冲)孔后,向孔内下入专用DX挤扩装置,通过液压系统控制该装置的挤扩臂的扩张和收缩,按承载力要求和地层土质条件在桩周土不同位置旋挖挤扩出匀称分布的扩大盘腔后,放入钢筋笼,灌注混凝土,形成由桩身、承力盘和桩根共同承载的桩型。

DX桩实质上是多节扩孔桩的新一代产物,是在应用YZJ型支盘挤扩机的实践中,总结国内外同类型机具的优劣特点,分析各类扩孔机具在不同土体中的成型机理,在支盘桩的基础上进行多方面的实质性改进,明显地改善了旋挖挤扩成型效果的一种新桩型。

3.2 DX桩施工工艺

DX桩施工工艺简单,主要的工艺流程包括:DX桩成直孔施工→将DX挤扩装置放入孔内→按设计位置自下而上依次挤扩形成承力盘腔体→测定盘腔体的位置与尺寸→下放钢筋笼→插入导管→灌注混凝土→成桩。

1)DX桩属于钻孔多节挤扩灌注桩,它区别于钻孔扩底桩与人工挖扩桩基本不改变原地基土物理力学特性,将桩端承压面积扩大,DX桩是在原等截面钻孔灌注桩施工增加一道工序,将DX旋挖挤扩装置下入孔中,通过地面液压站控制挤扩臂的扩张和收缩以及装置的自动旋转,旋扩出DX桩的承力盘腔,旋扩后腔体周围的土体被挤密,该挤密后的土体与随后浇筑入盘腔内的混凝土紧密地结合成一体。通过扩大桩身多个断面直径,增大了桩的有效承载面积,同时由于挤密土体效应,较充分地发挥桩土共同承载作用,从而提高了单桩承载力,同时也改善了群桩的应力分布,进而达到减少沉降的目的。

2)DX桩的挤扩成孔工艺适用范围广,可用于泥浆护壁、干作业、水泥浆护壁及重锤捣扩成直孔工艺。

3)机具入孔过程,可对直孔部分的成孔质量(孔径、孔深及垂直度的偏差等)进行二次定性检测。

4)施工工艺中实施二次回钻及增加旋挖斗等手段,保证桩底沉渣满足国家规范要求。

4 DX桩的优势

DX桩无论是设备还是工艺都具有非常先进的特点,这些特点包括:a.盘结构上下对称;b.成腔质量可靠;c.设计灵活、盘位可调;d.不均匀沉降小;e.适用土层广泛、适应性强。

4.1 盘结构上下对称

双向挤扩形成的上下对称带坡度的盘具有施工和受力上的诸多优点:

1)抗压性能明显优于传统的直孔桩。
2)具有非常好的抗拔性能。
3)在成腔的施工过程中,沉渣能够顺着斜面落下,避免沉渣在空腔底面的堆积。

4)斜面便于混凝土的浇筑,混凝土靠自身的流动性就能充分灌满整个腔体,同时还不夹泥,利于控制混凝土的密实程度。

5)承力盘的斜面形状(见图1),保证了承力盘的混凝土处于受压状态。盘的剪切通过桩身的钢筋,所以承力盘不会发生剪切破坏。

6)在竖向受力时,承力盘下方的斜面可以增加承力盘施加给土体的附加应力的扩散范围,避免对土体造成剪切(见图2)。

4.2 成腔质量可靠

多节扩孔类的灌注桩成败的关键在于扩孔形成

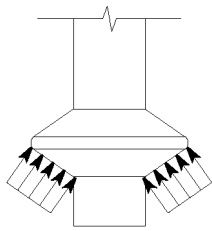
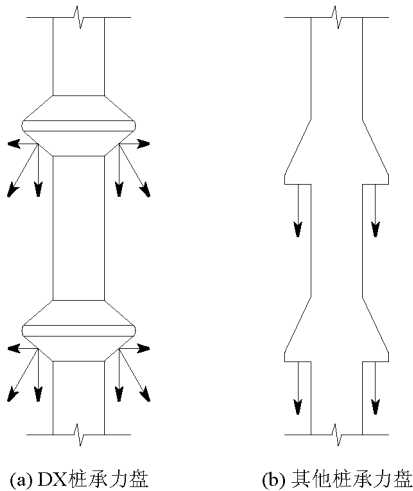


图 1 承力盘剪切受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of shear force of bell



(a) DX桩承力盘

(b) 其他桩承力盘

图 2 承力盘下土体受力示意图

Fig.2 Force diagram of soil under each bell

的盘腔的质量以及能否按设计要求顺利形成盘腔。旋转挤扩技术是目前唯一能快速、高效、高质量完成各种土层条件下盘腔施工的技术,原因如下:

- 1) 旋转挤扩设备独特的双缸双向液压结构保证了盘腔周围土体的稳定性。
- 2) 一次旋扩三对挤扩臂同时工作,三向支撑,三向同时受力,挤扩机能准确与桩身轴心对齐。
- 3) 腔体下侧面的这种斜面形状可以保证沉渣能顺利掉落,而不会堆积在承力盘腔体内,确保了腔体的完整性。
- 4) 旋转挤扩方式能适用 $N > 40$ 的土层。
- 5) 旋转挤扩施工方式比水平挤扩方式施工速度提高数倍。

图 3 是某次施工形成的盘腔,从照片上看,盘腔十分规则,而且盘腔壁的土体十分密实、坚硬,施工现场用铁钎都很难撬动。

4.3 设计灵活、盘位可调

由于承力盘是通过液压臂旋挖挤扩土层形成



图 3 旋转挤扩所成的盘腔

Fig.3 Bell cavity by rotary extruding-expanding

的,挤扩过程相当于旁压实验,施工过程同时也是对土层承载力的一种检验。因此,施工时能大致了解到土层软硬性即持力层的适宜程度,当发现与试桩施工有差别时,可按照设计变更要求,采取调整盘位置或增设盘数量的措施,如图 4 所示。这样可以确保桩基承载力,以及各桩承载力的一致性,这是其他桩型无法实现的。

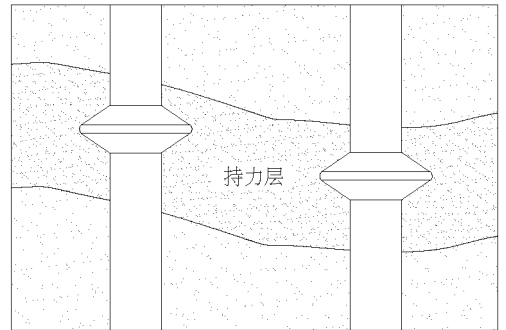


图 4 盘位随土层变化示意图

Fig.4 Sketch map of bell locations varied as the soil changes

4.4 不均匀沉降小

由于承力盘可以根据持力层的深度变化随时调整,确保同一工程中不同 DX 桩的承载力离散性小。同时,DX 桩施工工艺可靠,成桩性能稳定。这两方面的因素,保证了 DX 桩群桩工程中,不同单桩的沉降差异小。

4.5 适应性强、适用土层广泛

DX 桩按不同成孔工艺可结合采用潜水钻机、正循环钻机、冲击钻机、螺旋钻机、钻斗钻机、全套管贝诺特钻机及沉管机等成孔钻机。

随着不断的经验总结和技术革新,DX 桩的设备和 技术 发展 进入 了一个 更高 的 阶段。DX 桩可在多种土层中成桩,不受地下水位限制,并可以根据承

承载力要求采取增设承力盘数量来提高单桩承载力。

DX 桩承力盘的设置原则:

对于第一代和第二代 DX 装置,承力盘应设置在:a.可塑~硬塑状态的粘性土中,或稍密~密实状态($N < 40$)的粉土和砂土中;b.承力盘也可设置在密实状态($N \geq 40$)的粉土和砂土或中密~密实状态的卵砾石层的上层面上;c.底承力盘也可设置在强风化岩或残积土层的上层面上。

而对于新一代的 DX 装置,由于设备和工艺的进步,适用的土层大大拓宽,一般遵循如下原则:对于标贯击数在 15~40 的土体,采用切削碾压工艺进行施工;而当标贯击数大于 40 时,由于此时土体的密实度已经相当高,再进行挤扩可能会使土体发生剪胀效应,且挤扩所需的压力极大,施工困难,因而采用切削工艺,尽量保持土体的原状性,以达到充分利用土体承载力的效果,见图 5。

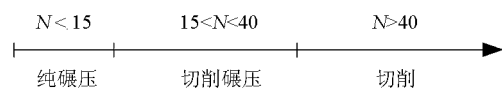


图 5 不同土层适用的旋扩方法

Fig. 5 Methods using in different soils

5 研究进展

在设备和工艺发展的同时,DX 桩的理论研究也同样得到了蓬勃的发展。先后有很多国内外的专家和学者对 DX 桩的承载机理、荷载传递规律和沉降特性进行了研究。对 DX 桩承力盘的角度、盘间距、群桩的桩间距等各方面都进行了系统的研究。

5.1 国外研究

在印度等国家,从 20 世纪 50 年代开始进行了扩孔桩的广泛的应用与研究^[1~5]。

1955 年,扩孔(Under-reamed)桩在印度的黑棉土地区开始应用。该桩型一般设置一个或两个承力盘,并作为锚桩或者承载力要求不高的抗压桩。受当时施工机械的限制,该桩桩长一般为 4 m 左右,桩径也非常小。

Mohan^[3]等人的研究表明,与一个承力盘的扩孔桩相比,相同桩径和盘径的两个承力盘的扩孔桩盘间距在 1.25~1.5 倍盘径时,承载力能提高 50%。两个承力盘的最佳间距为 1.5 倍盘径。研究中所采用的盘径和桩径比为 2.5:1。

在承载力计算方面,建议采用两种方法:

1) 盘间距较小时

$$Q_u = A_p N_c c_p + A_a N_c c'_a + c'_a A'_s + f c_a A_s \quad (1)$$

式(1)中, A_p 为桩身截面积; N_c 为承载力系数(对于粘土通常取 9); c_p 为桩端处土体的抗剪强度值; A_a 为 $\pi/4(D_u^2 - D^2)$, D_u 和 D 分别为盘径和桩径; c'_a 为盘端土体平均抗剪强度; A'_s 为承力盘形成的土柱的侧表面积; f 为折减系数(对于印度黑棉土,通常取 0.5); c_a 为沿桩身的土体平均抗剪强度; A_s 为桩身侧表面。

2) 盘间距较大时

$$Q_u = A_p N_c c_p + n A_a N_c c'_a + f c_a A_s \quad (2)$$

式(2)中, N 为承力盘个数。

同一时期,在俄罗斯 Mintskovskii 等人也进行了相关研究,其采用的设备与 Mohan 等人的施工设备相似,其桩型也相似。得出的结论与 Mohan 等人的结果相似。

Martin^[4]等在美国进行了两个承力盘的扩孔桩的研究,此时大型设备的发展使得该桩型在大直径桩中的应用成为可能。其研究成果大致与 Mohan 等人的研究成果一致。

5.2 承载性能与机理研究

魏章和^[5]、周青春^[6]等通过现场试桩静载荷试验对 DX 桩的受力特性及变形破坏机理进行了研究。其研究成果表明与相同直径和桩长的直孔桩相比,DX 桩能提高承载力 1 倍以上。在比较均匀的底层中,DX 桩各承力盘端阻力的发挥具有明显时间和顺序效应。总体趋势是上盘比下盘承载力发挥得早、荷载分担得多。DX 桩的破坏模式是在极限荷载下各承力盘阻力先后达到极限状态而破坏,表现在桩顶上为破坏迅速发生。其试验表明,在极限荷载作用下,第 1 盘承受的荷载最大,土体剪切破坏瞬间发生,从而导致下盘受力迅速增加,达到极限状态,荷载又迅速下传,直至桩身发生急剧的、不停滞的下沉而破坏。

杨志龙^[7]等根据挤扩多支盘混凝土灌注桩(DX 桩)的现场静载荷试验结果,分析 DX 桩的荷载传递机理。试验结果表明,随着竖向荷载的增加,由上到下各承力盘先后发挥其端承作用;各承力盘上下一定范围内桩侧摩阻力不能发挥出来,建议在 DX 桩设计时,承力盘或分支间间距宜不小于 4~6d(d 为桩径);对于粉土、粉质粘土,桩侧极限摩阻力为 30~70 kPa,所对应的极限位移为 5~20 mm;桩侧极限侧摩阻力和极限位移随土层埋深而增大。在相同条件下 DX 桩的极限承载力比等截面桩高 50%。

陈轮^[8]等用有限元法对竖向桩顶荷载作用下 DX 桩桩周土的应力变形及桩身荷载传递特点进行了数值分析。给出了桩周土体的应力位移等值线,分析了扩径体数量、间距及形状对 DX 桩承载性能的影响,进一步揭示了 DX 桩的单桩承载力机理。

陈轮^[9]等对 DX 桩进行了大比尺的模型试验研究。结果表明:a. 同一地质条件下,与直孔桩相比,在混凝土体积增加 26%~50%的情况下,DX 桩单桩极限承载力比直孔桩提高了 106%~171%,整根桩的单方极限承载力提高了 62%~81%;b. DX 桩的 $Q-s$ 曲线与直孔桩相比,曲线变化较为平缓并向右(即荷载增大的方向)拓延,曲线的第二拐点位置向右、向下移动;c. 荷载作用下,DX 桩承载力盘的端阻力发挥较早,由于 DX 桩的承力盘空腔是通过挤扩装置在较大的压力下挤密周围土体形成的,土体的强度提高而且在承受竖向荷载时,DX 桩不再或很少经历将承力盘下方土体由原位状态进行挤密压实的过程,所以承力盘的端承作用可以发挥较大的端阻力,在桩沉降量较小的情况下提供支持力;d. DX 桩承力盘端阻力的发挥具有明显的顺序。自上而下,第一承力盘先承力而下部承力盘要滞后些承力,待上部承力盘接近于或达到极限承载力时,桩身轴力像“接力棒”一样逐渐向下部传递,使下部承力盘的承力作用逐步得到发挥。

陈轮^[10]等还对单位端阻力进行了研究,认为随着桩顶荷载的增加,DX 桩扩径体的单位端阻力逐渐增大;与下部扩径体相比,上部扩径体的单位端阻力较早达到极限值,而此后基本保持不变;而在上部扩径体达到极限单位端阻力后,下部扩径体的单位端阻力仍有较大的增长幅度和较长的发挥过程。达到极限荷载后,随桩顶沉降的再增加,下部扩径体的单位端阻力也略有增加。只有荷载接近破坏荷载时,下部扩径体的单位端阻力才会达到极限值并保持不变。

沈保汉^[11,12]总结了诸多与 DX 桩类似的桩型的承载机理,并详细讨论和总结了 DX 桩的承载机理。同时,其对影响 DX 桩承载力的主要因素进行了总结,这些因素包括桩身和承力盘的直径大小,承力盘的数量、间距和位置,承力盘端部土层的特性,盘腔的首次挤扩压力值及成孔成桩的施工工艺和施工质量等^[13]。

5.3 承载力的计算

史鸿林(1997)通过 17 组试桩的原型荷载试验

及计算,提出了支盘桩的单桩承载力计算公式:

$$\begin{aligned} R_k &= R_{sk} + R_{pk} \\ &= \mu_p \sum q_{si} \cdot l_i + \sum m_i \cdot q_{si} \cdot h \cdot (a-b) \\ &\quad + q_p A_p + \sum m_i \cdot q_{pi} \cdot \beta \cdot a \cdot b \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表明,支盘桩承载力除保留原直孔桩的侧摩阻力和桩端阻力外,还增加了分支两侧的摩阻力和分支的端阻力。侧阻和端阻完全是参照有关直孔桩或扩底桩的规定推算的,并且在最后一项中各分支的端阻力乘上大于 1 的系数,以考虑挤扩分支时的挤密效应对承载力的有利影响,并分析了承载力影响因素,如分支时挤压地基土对承载力的影响,分支或分盘的数量、间距、形状及施工质量对承载力的影响等。

吴兴龙^[14]等在对 DX 桩现场测试、理论分析的基础上,分析了 DX 桩的变形破坏机理,提出了单桩极限承载力计算的公式和经验公式和影响承载力的因素,这些因素包括承力盘的数量和支盘间距、成桩工艺、尺寸效应等,还提出了 DX 桩的适用土层为粉细砂、中密粉细砂土。文中提出的 DX 桩单桩承载力计算公式考虑了多种承载力的影响因素,其承载力计算公式表达式为

$$\begin{aligned} Q_{uk} &= Q_{sk} + \eta Q_{Bk} + Q_{pk} \\ &= u \sum_{i=1}^n \psi_{si} q_{sik} l_{ei} + \eta \sum_{j=1}^m \psi_{Bj} q_{Bjk} A_{Bj} + q_{pk} A_p \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中,等号右边 3 项分别表示桩的侧阻、扩径体的端阻、桩的端阻,3 个系数 ψ_{si} 、 ψ_{Bj} 、 η 分别表示第 i 土层桩侧阻综合修正系数,第 j 个承力盘端阻力综合修正系数,承力盘发挥性状修正系数。在系数 ψ_{si} 、 ψ_{Bj} 中分别考虑了施工工艺、尺寸效应、承力盘间距等的影响,系数 η 是考虑到单桩达到极限承载力时并不是每个承力盘都能达到极限承载力。文章中除了对个别影响因素的量化取值提出自己的建议外,没有对这些系数的取值作更多的研究。

钱永梅^[15]等根据 DX 桩承力盘下土体的滑移破坏形式,运用滑移线理论确定的盘下土体应力计算模式,结合塑性势理论和虚功原理,确定 DX 桩的土体极限承载力,修正并完善了现有的桩端承载力及桩侧阻力的计算公式,提出了全新挤扩多盘桩单桩承载力的计算公式。

沈保汉^[16]提出确定 DX 挤扩灌注桩极限承载力的两种方法:对试验完整的桩采用 $s-lgQ$ 法;对试验不够完整的桩先用逆斜率法拟合外推,而后采用 $s-lgQ$ 法。此外,还提出 DX 挤扩灌注桩极限承

载力的综合评价方法。

5.4 沉降计算

近年来,随着 DX 桩使用范围的越来越广,已有学者对 DX 桩沉降方面进行了一些可行性的研究,但是由于 DX 桩的承力盘的存在使得沉降问题变得极为复杂,使得无论是 DX 桩单桩还是群单桩的沉降,目前业内都没有形成统一的计算标准。在三岔双向挤扩灌注桩设计规程(JCJ 171 - 2009)中,对于 DX 单桩沉降采用直孔桩的计算方法,乘以 0.6 ~ 0.8 的经验系数。同济大学的胡安兵^[17]根据挤扩灌注桩为变截面的摩擦多支点端承桩,则挤扩体及桩端的端承力均可用集中力来近似代替,在 Geddes 应力解的基础上考虑桩身的弹性压缩量与桩周土的位移协调,引入分层总和法计算单桩沉降,而曹正舸^[18]对挤扩体部分进行了优化,把挤扩体简化为以盘径为直径,挤扩体高度为桩长的短桩,在 Geddes 应力解的基础上通过理论分析,提出了适合挤扩灌注桩单桩的沉降计算方法。

天津大学的吴永红教授^[19]根据 DX 桩属于多支点端承桩的受力特点,提出了承力盘分段扩散的技术方法,并在此基础上引入了桩与桩的相互作用系数,从而导出 DX 桩群桩沉降的计算方法,并用工程实例验证了计算的沉降值与实测值吻合较好,上述方法计算过于复杂。唐松涛依据 DX 群桩大比例尺模型试验中 DX 群桩受力特性,提出了一种新的 DX 群桩沉降计算方法,将群桩基础分为两部分:第一个承力盘以上的桩身与承台内的土组成实体基础;第一个承力盘以下各 DX 桩组成桩基础。对桩端下层土体的附加应力采用 Mindlin 解,引入分层总和法计算沉降,计算值与试验实测值吻合得很好。

上述方法都是各学者对 DX 桩进行的一些探讨,还欠缺实际工程的检验,工程界并没有对 DX 桩群桩的沉降计算形成统一的认识,目前国内对群桩沉降计算主要参考实体基础的做法。而从实测结果看,计算成果往往对沉降估算偏大,过于保守,在客运专线和高速铁路中,沉降恰恰是重点关注的问题,因此这方面的研究亟待加强。

6 工程应用

目前,DX 桩已经在诸多领域进行了广泛的应用,包括建筑桩基,工业厂房及构筑物桩基,液化天然气储气罐桩基,大型和特大型公路桥梁桩基等,并且取得了非常良好的经济效益和社会效益。

以某工程为例,设计方案有普通直孔灌注桩和 DX 桩两种。两种桩型的基本参数见表 2。

表 2 两种桩型的基本参数

Table 2 Parameters of two kinds of piles

桩型	桩长/m	桩径/m	盘径/m	承力盘数/个
直孔桩	70	1.2	—	—
DX 桩	40	1.2	2.2	3

通过试桩的结果分析,DX 桩桩长比直孔桩缩短了 30 m,仅为直孔桩 57%,两者桩径一样。而承载力方面直孔桩为 18 711 kN,DX 桩为 16 396 kN,DX 桩仅比直孔桩小 12%左右,见表 3。但是由于桩长的缩短,带来的施工的方便与快捷,同时对材料的大量节省,是直孔桩无法比拟的。

表 3 两种桩型的试桩结果对比

Table 3 Comparison of two kinds of piles test results

对比项目	直孔桩	DX 桩
单桩竖向抗压极限承载力标准值/kN	18 711	16 396
极差/%	18.9	7.5
单桩水平承载力特征值/kN	240	300
单桩混凝土用量平均值/m ³	79.258	52.260
单方混凝土提供承载力/(kN · m ⁻³)	236.075 3	313.736 5
单方混凝土提供承载力比值/%	75.24	100

工程实例 2,该项目中也是采用了 DX 桩和直孔桩的对比,见表 4。两者的桩长一致,DX 桩桩径比直孔桩大 100 mm,但是 DX 桩的极限承载力比直孔桩提高了 54%。由此,该工程在设计时,每个桥墩下的桩数由原来直孔桩的 4 根,减少到 DX 桩的 2 根。每墩桩基(半幅)总造价由 316 472 元减少到 203 110 元,节约了 36%,经济效益相当可观。

表 4 经济效益分析

Table 4 Analysis of economic benefit

对比项目	直孔桩	DX 桩	备注
桩径/mm	1 400	1 500	—
承力盘径/mm	—	2 500	—
承力盘数/个	—	4	—
有效桩长/m	50	50	—
Q_{uk} /kN	9 768	15 000	—
特征值 R_a /kN	4 884	8 300	—
单桩混凝土方量/m ³	77	92.8	—
每墩桩数/棵	4	2	减少 50%
桩混凝土总方量/m ³	308	185.6	减少 39%
承台混凝土方量/m ³	86.9	56.4	减少 35%
泥浆排放量/m ³	308	185.6	减少 39%
每墩桩基(半幅)总造价/元	316 472	203 110	节约 36%

7 结语

当前是我国基础建设的高潮期,高速铁路、城市

轨道交通、城市化进程以及各种港口、桥梁建筑等重大项目不断开工建设,工程中涉及的桩基础不计其数,每年灌注桩的混凝土方量超过亿万吨。如此重要和巨大的工程量,十分有必要积极采用先进的技术和理念,建设更安全、更经济、更具社会效益的基础。DX 桩通过旋挖挤扩技术,将传统的直孔桩转变为多点支撑的新型桩,充分利用了土体端阻力远远大于摩擦力这一天然特性,充分挖掘了土体的潜力,从而有更高的竖向抗压和抗拔承载力。DX 桩技术走出了传统桩基技术靠增加桩长或桩径来提高承载力的做法,通过横向挤扩,将二维的桩基技术扩展到了三维空间。大量的工程实践证明这一技术具备安全、可靠、效率高的特点,能为工程提供更高的安全性并具备良好的经济性,同时可以大量节约混凝土和钢筋用量,为当前节能减排做出重要贡献。

与工程实践相比,DX 桩的相关研究还急待提高,特别是群桩抗压抗拔机理和沉降计算。当前的重大工程都是沉降控制设计,如高速铁路要求沉降小于 15 mm 甚至小于 10 mm。对于群桩基础,如果仍然采用规范中的实体基础假设进行沉降计算,DX 桩与直孔桩相比并无明显优势,这显然将制约该技术的应用。

参考文献

[1] Chandra S. Under-reamed pile foundations in black cotton soils [J]. Indian Concrete Journal, 1962, 36(1): 27-30.

[2] Chandra S, Khepar S D. Double under-reamed piles for foundations in black cotton soils [J]. Indian Concrete Journal, 1964, 38(2): 50-52.

[3] Mohan D, Jain G S, Sharma D. Bearing capacity of multiple under-reamed bored piles [J]. Proceedings, 3rd Asian Regional Con-

ference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Haifa, 1967, 1: 103-106.

[4] Martin R E, DeStephen R A. Large diameter double underreamed drilled shafts [J]. J Geotechnical Engineering, ASCE, 1983, 109(8): 1082-1098.

[5] 魏章和, 李光茂, 贺德新. DX 桩的试验与研究[J]. 岩土工程界, 2000, 3(5): 12-16.

[6] 周青春, 于南燕. DX 桩的试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 298-302.

[7] 杨志龙, 顾晓鲁, 张国梁. 挤扩多支盘混凝土灌注桩承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5): 100-104.

[8] 陈 轮, 常冬冬, 李广信. DX 桩单桩承载力的有限元分析[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 67-72.

[9] 陈 轮, 蒋 力, 王海燕. DX 桩承载力及荷载传递特点的现场试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 5-8.

[10] 陈 轮, 王海燕, 沈保汉, 等. DX 桩单位侧阻力和单位端阻力的现场试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(3): 15-18.

[11] 沈保汉, 钱力航, 孙君平. DX 挤扩灌注桩的桩身承载力研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(5): 23-27.

[12] 沈保汉. DX 挤扩灌注桩的荷载传递特点[J]. 工业建筑, 2008, 38(5): 5-12.

[13] 沈保汉, 贺德新, 孙君平, 等. 影响 DX 挤扩灌注桩竖向抗压承载力的因素[J]. 2008, 38(5): 32-38.

[14] 吴兴龙, 李光茂, 魏章和. DX 桩单桩承载力设计分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 581-585.

[15] 钱永梅, 尹新生, 钟春玲, 等. 挤扩多盘桩的土体极限承载力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(4): 568-570.

[16] 沈保汉. DX 挤扩灌注桩竖向抗压极限承载力的确定[J]. 工业建筑, 2008, 38(5): 13-17.

[17] 胡安兵. 挤扩灌注桩工作性态的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

[18] 曹正舸. 多节挤扩灌注桩沉降计算和性状研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[19] 吴永红, 郑 刚, 闫澍旺. 多支盘钻孔灌注桩基础沉降计算理论与方法[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 528-532.

New pile foundation technology of 21 Century: DX pile

Wang Mengshu^{1, 2}, He Dexin³, Tang Songtao¹

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

2. China Railway Tunnel Group, Luoyang, Henan 471001, China;

3. Beijing Zhongkuo Foundation Technology Co., Ltd, Beijing 100097, China)

[**Abstract**] As a kind of old construction form, pile foundation still plays a tremendous role nowadays. The fast developing and innovation of technology promote new types of pile constantly emerging, which has been a huge success. DX pile is one of those piles and has been widely used. The author illustrates the development, technological characters, advantages, research progress both at home and abroad, and engineering applications of DX pile.

[**Key words**] DX pile; bearing mechanism; bearing capacity; settlement