

内 击 扩 底 桩

南昌市 林天健

【提要】本文是向岩土工程界介绍NJ—D60型内击扩底桩的性能和施工工艺的综述文章，文中将概括地叙述内击扩底桩的成桩机理、施工工艺、特点以及它在工程实践中的使用情况。

【Abstract】The characteristics Driving mechanism, Constructive technology and its application of thi driving insicle belled pile of type NJ-D60 one comprehensively introduced in this paper.

一、引言

“内击扩底桩”是一种锤击沉管灌注桩。由于其具有桩端扩大底，而比一般沉管灌注桩的端承面积大，夯制扩大底时持力层在强夯下变得更为密实，以及特殊施工工艺所获得的高的桩身混凝土质量，使得它具有小的桩径，埋深较浅而承载力较大的特点。是一种经工程实践证明技术可靠和造价经济的优良桩种。目前，当采用桩径为600mm时，在不同的地质条件下，内击扩底桩的单桩容许承载力可高达2000~2200kN，适用于9—35层楼房的桩基工程，所选择的持力层可以是中密以上的砂层，硬塑残积土层或强风化岩层。由于内击扩底桩的优异性能，在一般情况下，它能节约工程费用（±0.00以下含承台计）15%~25%，当高层建筑采用片筏基础并要求桩具有抗拔性能时，更适宜于采用内击扩底桩。

当然，是否所有用内击法夯制有扩大底的沉管灌注桩都具有上述优异的性能，我们未作调查研究。但一种由我国自己设计制造的NJ-D60型内击桩机，并采用我们发展的特殊施工工艺的内击扩底桩却基本上达到了上述要求，而且避免了一般沉管灌注桩所常有的桩身混凝土离析、难以穿过密实厚砂层、桩身强度低而不均匀以及承载力低等缺点。我国《建筑物地基基础设计规范》（GBJ7-89）（以下简称《规范》）在桩基

部分取消了旧规范的爆扩桩，而补充了扩底桩的内容。我们这种内击扩底桩基本上符合规范的要求，并以工程实践检验表明《规范》增加扩底桩内容的正确性。

作者期望这篇粗浅的叙述能引起工程界广大同行对内击扩底桩的关注和支持，使它在桩基工程特别是软土地基工程中发挥它的特殊优势，为工程建设作出贡献。

二、内击扩底桩的基本结构及成桩机理

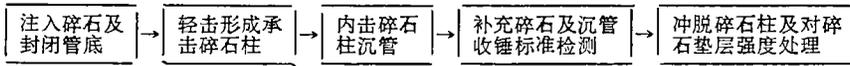
（一）内击扩底桩的基本结构

内击扩底桩是一种在现场浇注的钢筋混凝土灌注桩，全桩由桩帽、桩身和扩大底三个部分构成。这种桩的承载力主要由端承力来提供，桩周摩阻力只是起一种辅助作用或作为安全储备来考虑。现时应用的NJ-D60型内击扩底桩具有600mm的桩径。扩大底的直径一般为800~1000mm，桩长视地质条件不同可采用2~32m，桩身混凝土充盈系数通常为1.2，混凝土强度等级C23~C28。

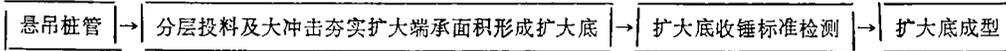
（二）内击扩底桩的成桩机理

内击扩底桩系借沉管塑造桩孔，再在现场浇注混凝土而成桩。不过，与一般沉管灌注桩不同的是，内击扩底桩的沉管系借在管内锤击管底碎石柱塞而带动桩管下沉。内击扩底桩的成桩工艺包括桩身成孔、夯制扩大底和收锤标准检测、混凝土灌注三个工序。其工艺流程如下：

1. 桩身成孔



2. 夯制扩大底



3. 桩身混凝土灌注

完成夯制扩大底工艺后，用“三边工作法”或“孔底附震法”完成桩身混凝土浇注。

三、有关施工方法的理论阐述

内击扩底桩的优良性能归功于它的科学的施工工艺，这项工艺的理论核心概括地可归纳为如下三个主要问题：

(一) 为确保承载力而选定的收锤标准问题

在内击扩底桩的施工工艺中，要保证单桩承载力满足设计要求，可以从两个方面来考虑：一是使桩有足够的埋深，使桩尖埋置于可靠的持力层上，并取得较大的摩阻力但可能遇到这样情况：透过深厚的淤泥层后即达到岩石强风化层，则这种桩基本没有摩擦力，就只得靠端承力来达到承载力要求，为此，桩应打入基岩一个“D”(D为扩底桩直径)以上来解决桩的嵌固问题，二是强夯改造持力层，使其承载力有一定程度的提高。为此，在施工中要执行某些施工控制条件，这就是所谓的“收锤标准”。内击扩底桩执行两种收锤标准，一是桩深控制锤标准，一是夯制扩大底收锤标准。

现时，尚未见到有关内击扩底桩的较系统的和精确的理论分析。显然，打桩时的动态阻力与静态承载力之间是有区别的，两者之间的经验相关关系可以通过打桩试验和静载试验确定。考虑到不可能对每个工地事先进行锤击试验或静载试验，比较可行的办法是参照现有打桩公式以及桩基工程实践经验，制定在一定前提条件下的收锤标准。

常用的打桩公式有：

$$1. \text{荷兰公式} \quad R = \frac{P'H}{(P+Q)ng} \quad (1)$$

$$2. \text{Hilley公式} \quad R = \frac{1}{2} \cdot \frac{N \cdot E \cdot ef}{S + c/2} \quad (2)$$

$$3. \text{动力公式} \quad R = \frac{PH}{7 \left(e' + 0.25 \times \frac{Q}{P} \right)} \quad (3)$$

上三式中

- R —— 单桩容许承载力(kN);
- P —— 锤重(kN);
- P' —— 桩身 + 桩帽重之和(kN);
- Q —— 桩管重(kN);
- H —— 落锤高度(mm) [在(3)式中为(m)];
- n —— 安全系数
- g —— 最后每击贯入度(mm);
- E —— 桩锤能量(kN·m);
- $N = \frac{W}{W + P'}$
- W —— 锤重(kN);
- e —— 回弹系数(取e = 0.4);
- ef —— 锤击效率(取ef = 0.9);
- S —— 最小贯入度(m);
- c —— 锤击时瞬时弹性变形值(m);
- e' —— 每击贯入度(cm)。

应当指出，打桩公式存在着一系列的缺点，例如桩的弹性压缩是用静力计算、撞击时的能量损失是用牛顿公式计算以及假定全部阻力集中在桩尖处……等等，因此，有人认为：这最多只能近似地对打桩阻力而不是对单桩承载力作出估计，而打桩阻力与单桩承载力之间存在着很大的差别。

以往，一些与内击扩底桩类似的桩种就

因为单纯以从打桩公式估算锤击贯入度作为桩深控制的收锤标准,而遭到某些桩基工程的失误,这除了上述动力公式的局限性以外,将打桩公式用于内击扩底桩的施工控制,还有三个问题值得考虑,因为“内击扩底桩是“小桩径、大承载力”的桩。这就要求打桩控制的精确度应较高。

1.基于打桩公式的常用收锤标准,其每一锤击的冲击能量过小,易被所谓“收锤假象”所迷惑。收锤假象系由机械效率损失、操作员以及土层内部特异阻力的偶发(例如土层内存在薄硬层或孤石等)。

2.动力打桩公式适用于有桩尖的侧向排土容易的桩的施打情况,而对于内击扩底桩,其侧向排土性能差,桩管受冲击压力的瞬间,由于桩—土体系的弹性变形量增加,易发生沉管回跳现象,特别在砂层中更为严重。

3.必须指出,“内击扩底桩”的端承面不是在以锤击贯入度所控制的沉管深度的桩管底平面上,而是在此平面以下所夯打的扩大底平面上。这个位置与桩管底平面距离多少,决定于地质的具体条件,我们可举出下面的例子来说明问题。

当以锤击贯入度为桩深控制,而达到沉管深度的收锤标准时,总有可能遇上管底处于一坚硬的,但厚度较薄的夹层上,管底至此薄硬层的下方层底界面的厚度是以平衡(承托)收锤标准时的贯入压力。在收锤标准时,每击的冲击力为222kN,作用到桩管上使管贯入,管底截面积为 $0.6^2 \times 0.7854 = 0.2827\text{m}^2$,则在面积上的单位压强是 $222\text{kN}/0.2827\text{m}^2 = 785.28\text{kN}/\text{m}^2$ 。当夯打扩大底时,使用的冲击力为440kN。这冲击力是由击锤底直接作用到持力层的端承面上的。而锤底因磨损和工艺所需,计算直径应为35cm,则面积为 $0.35^2 \times 0.7854 = 0.0962\text{m}^2$ 。则单位面积的压强是: $440/0.0962 = 4615.4\text{kN}/\text{m}^2$,差不多是前者的6倍。

(而且沉管收锤标准时的222kN冲击力需克服桩管质量所构成的惯性力,桩管和土体系的弹性和非弹性的变形,土层对桩管摩擦等的损失。夯打扩大底时,则没有这些损失。)于是,如果此硬夹层的下卧层比夹层硬,就不存在什么问题。但若下卧层比此硬夹层软弱,则夯打扩大底的冲击力就势必把此硬夹层击穿,扩大底将在下卧层上成形,被击穿的硬夹层就变成桩管贯入的延续桩体孔,直至下卧层被夯实,扩大底的高度上升到此夹层上时,才使扩大底把此夹层段的孔径扩大。因此,扩大底的底平面根本不可能由沉管深度控制来决定。有人给夯打扩大底的投料量制定了一个标准。c4~5打桩记录表也曾经把这个量附在表的后面。这是错误的。我们的施工历史上最多的一次投料量为 3.7m^3 ,而每一个工地的每一根桩的扩大底投料量总不会完全相同,上述情况的现象也必然出现在每一个工地上。投料在 $0.5\sim 1.2\text{m}^3$ 是普遍的, 1.8m^3 每个工地都有, 2m^3 以上则少见。

因此夯打扩大底必须有一个可靠的判断方法、依据或准则。也有人认为:“以夯打至桩管自动回升为准就可以了”,这也是不行的。因为使管回升的力量,只要能克服桩管质量、由管重构成的惯性力、土层对管的摩擦阻力等,管就可自由回升。很明显摩擦力是变值,每个工地不同,一个工地上也有差异,仅此就可以说明桩管的自由回升不能说明什么问题。

就我们的知识水平来看,“锤击贯入度”还是夯打扩大底控制标准的可取方案,由于扩大底上面的土层压力,桩管对扩大底上四周土层的约束,击锤直接与持力层接触,排除其他因素的影响,这个锤击贯入度的取值就可得到较高的可靠性。

内击扩底桩属动力打桩,施工控制原则是:桩管入土深度的控制以贯入度为主,与设计持力层标高相对照为辅,而扩大底的施工

控制则以夯沉量(锤击贯入度)为准。这样,就有两个收锤标准:第一个标准属于沉管深度控制,它主要是监测桩管周侧摩阻力是否达到要求;第二个收锤标准是为了检验桩底持力层的密实度以保证端承力满足要求。

第一个标准用阵锤检验:以落锤高度6m,锤击次数不少于检测击数(35击以上)的总贯入度(40cm以下),这就能克服前述(1)的“收锤假象”的问题。而问题(2)的桩管回跳度的影响则应根据不同土层的条件予以必要的修正,其修正系数 $K_T = 0.77 - 0.9$ 。施工执行时必须满足要求,才能作为最后沉管收锤;第二标准为夯打扩大底的收锤标准,其锤击贯入度的计算式将由即将发表的《内击扩底桩确保承载力的收锤标准问题》一文介绍。该文推荐的计算式具有较高的可靠性,因为,夯打扩大底时,击锤是直接作用到持力层上,没有桩管、管帽、桩垫等弹性变形与非弹性变形等不定因素的影响,而且桩管以及扩大底以上土层压力对夯击点有约束作用。即提高了计算式所设定条件的可靠度,也即提高了计算的可靠度。

内击扩底桩的收锤标准是根据对桩的荷载传递机理的分析、打桩资料的统计分析以及试验测定的数据、内击扩底桩多年工程实践的经验积累而制订的。

(二)内击扩底桩的承载力及估计

内击扩底桩的实践证明,只要在施工中认真执行收锤标准检测,单桩承载力均能满足设计要求。考虑到内击扩底桩的一些特殊条件(持力层为粉质粘土或残积粉质粘土地层、 $N_{63.5} = 18 \sim 35$ 击、桩周土为软土),可以认为,内击扩底桩的承载力系以端承力为本,摩阻力为辅或作为安全储备。对中长桩(长径比 $L/d = 25$)来说,桩端可分担60%以上的荷载,因此,从本质来说,内击扩底应属端承桩。

从荷载传递机理及已有工程的试桩结果来看,可以指出与承载力有关的两个问题:

1.现时的内击扩底桩的使用尚有潜力可挖,例如深圳红岭大厦和滨河公寓共6根试桩资料的统计,最大极限荷载7400kN,最小极限荷载4000kN。

2.从理论分析和试桩资料可见,内击扩底桩的破坏均属于混凝土桩体破坏和端承力不足。这是对于“小桩径,大承载力”意义认识不足,未从理论和实践上解决落实。确保桩体质量和承载力的可靠度是内击扩底桩成败的关键。

内击桩单桩承载力的确定与一般混凝土桩大致相同,即采用如下三种方法之一:直接由静载试验求得,用静力触探比贯入阻力估算以及规范规定的桩周摩阻力和端承力表估算。此外Meycrhoff提出用如下公式计算端承力:

$$P = 30 \bar{N} A \times 9.8 \quad (4)$$

式中 P ——桩端承力(kN);
 \bar{N} ——桩尖以下 $2d$ 、桩尖以上 $4d$ 土层的标贯值平均值;(d—桩身直径)
 A ——桩身截面(m^2)。

可见,若端承力占总承载力的较大比例,且桩身混凝土有足够强度,则在不考虑桩周摩阻力的情况下,内击扩底桩的容许承

$$\text{载力 } R = 30 \times 30 \times \frac{\pi \cdot 0.6^2}{4} = 2494 \text{ kN}$$

根据一般试桩的取值方法,对扩底桩按静载试验 $P \sim S$ 曲线确定承载力时,以 $S = 40 \sim 60 \text{ mm}$ 所对应荷载作为极限荷载;以 $S = 10 \sim 20 \text{ mm}$ 或 $S = 0.008D \sim 0.01D$ (D 为扩底桩直径)所对应荷载为容许承载力。

作为例子,在表1中给出了3个工程的静载试验结果。

表 1 内击扩底桩单桩容许承载力实例

序号	工程名称	桩径 (mm)	施工桩长 (m)	桩尖持力层	试桩最大荷载 (kN)	单桩容许承载力 (kN)	相应沉降 (mm)
1	中山市商业大厦	600	19~23	坚硬残积土	3000	1471	5.59
2	广州市造纸厂码头仓库	600	9.8~15	硬粗粉质粘土	3000	1471	8.10
3	广州市钢琴厂厂房	600	9~16	强风化岩	3000	1177	12.11

由表 1 可以看出:

(1) 由于试桩最大荷载只按设计荷载的二倍来考虑,并未达到桩的极限荷载,因此单桩承载力还有潜力可挖。

(2) 桩长对桩的承载力有一定影响,说明在一定条件下,桩周摩阻力的作用不容忽视。

(3) 当要求高的承载力时,必须相应提高桩身混凝土强度。例如按照香港公式取桩身混凝土强度的1/4作为单桩容许承载力:

$$R = \frac{\pi \times 60^2}{4} \times \frac{2.452}{4} = 1733 \text{ kN}$$

(取 C_{25} 混凝土计, $\bar{R} = 2.452 \text{ kN/cm}^2$)。

从上述的分析可以认为: NJ-D60 型内击扩底桩的单桩容许承载力可以在 1500~2000kN 的范围内选用,在特别考虑的施工条件下,单桩容许承载力可以提高至 2500kN。

(三) 与提高桩身混凝土质量有关的施工工艺问题

特殊的、科学的施工工艺是内击扩底桩取得成功的关键,这些工艺有一定的理论基础,它的协同施用,显示出最佳的综合效应。

为保证桩身混凝土达到设计强度,在施工工艺上可以从以下几方面注意:防止混凝土离析、强度沿桩身上下不均、出现蜂窝、卡腰、缩颈甚至断桩等,尽力提高混凝土的浇注质量。

内击扩底桩采取的工艺是以下列理论分析为依据的:

1. 内击扩底桩成桩时,由于桩管壁厚达 3cm,管内孔面积(0.239m²)与由桩管塑成的土体桩孔面积(0.342m²)相比较小。混

土在管内虽震捣密实,但拔管时,其空间自由度增加,混凝土重新松开,从而形成混凝土桩身的某些缺陷。此外,当混凝土的配合比与和易性不适当时,若提管速度过快,混凝土流动性不好,就容易产生断桩。所以施工时若拔管速度、淤泥回塑速度配合不协调时,卡腰缩颈,蜂窝松散等在所难免。为避免这些事故,拔管速度应为 0.4~0.8m/min,若淤泥层厚,拔管速度应采用 0.4m/min 的低值。

2. 内击扩底桩具有施工时横向冲击波小的特点,因而对土层原有的自然结构力破坏小,这样拔管时就需要相当大的上拔力,一般沉管灌注桩通常都要在桩管口配上激振力为数百吨的激振管。由于激振力大,在拔管时可用振捣混凝土。对于内击扩底桩,我们考虑到发源于管顶的强大激振力向下传递时,由于管内混凝土以及管外周土体的阻尼作用而逐渐衰减,此外灌注时桩管向上拔,造成桩管上段振动力大,振动时间长,下段振动力小,振动时间短,结果全桩的混凝土由下至上碎石沉降越来越多,砂浆析出也越来越多。当再次投料时,浮于表面的第一次投料所析出砂浆就会渗入第二次浆料中使砂浆含量过多,甚至形成砂浆隔层。还有,当拔管时水被混凝土挤动穿过混凝土而流到表面,也会引起混凝土离析。自上而下的强大激振力还可能导致管外土层液化、土体内的粗颗粒被强迫向外排开,而液化了的淤泥则填补了粗颗粒排开后的位置包围着桩体,这就使得桩体的摩阻力降低或彻底地被破坏。基于对上述情况的考虑,内击扩底

桩采用了“三边工作法”和“管底附震法”的工艺。

当夯制扩大底时,应分层投入干浆料,分层重打夯实。浆料在锤击作用下,先是向下夯实,但当锤底浆料的密度比侧边周围土层的密度高时,锤击的侧向分力使得浆料向外扩张并排开管口周围的泥土而形成扩大底。而当底部和侧边浆料的密度都很高时,锤击力将产生一向上分力,使扩大底上面的土层也被夯实,进入收锤阶段。为了最大限度地扩大这扩大底的直径,当扩大底夯实到一定程度后,要使每次锤击时,击锤底部尽可能都超出管底以外,在管底下约20~25cm处冲击,使冲击能量不受桩管约束,而利用浆料横向扩散和压实,增大扩大底的直径。

“扩大底”的实际结构形态直接影响其本身强度。理想的结构是使桩体与扩大底之间由小到大有一渐变的过渡段,而不应是突变。这可以由正确的工艺来实现,即严格控制投料量、锤击能量与拔管行程三个因素即可。此外,由于夯制扩大底时的锤击会导致部分碎石被击碎,从而生成新的石粉和砂粒,为此在配料时应保持水泥和碎石的原计划用量而降低砂的用量10%,以免扩大底强度降低。

完成扩大底的工艺后即安装钢筋笼(若钢筋笼不是全桩长设置,则要等投料达相应高度才能放入钢筋笼),然后按三边工作法和管底附震法工艺完成全桩的混凝土浇注。

所谓“三边工作法”就是边投料、边拔管、边轻压锤的施工方法。这种工艺的实质就是实现如下的控制:为混凝土灌注提供空间,但又利用拔管速度控制空间不过大,以免混凝土松散;混凝土料进入拔管提供的空间后又由于轻压锤而保证一定的填充密度并防止淤泥回塑占据桩孔空间。向管内投料时,料层高度不小于3cm,最大为5.5m,然后把击锤放到料层顶面上,即开始拔管。拔管应按照上述拔管速度控制,桩管拔升1m,击锤最少应下沉20cm。如发现锤头下行不

正常,可以用低打锤来加强浆料的下落。

管底附震法是内击扩底桩的一项重要工艺,它的作法是在完成扩大底夯打后,在桩体混凝土灌注前卸下击锤,换上管底振荡器,并将其穿过钢筋笼吊入桩管底以下30~40cm的位置中,然后向桩管内投入浆料,浆的坍落度应小于7cm,当投料达3cm高度以上后,即可开动振荡器,随之开动拔管绞盘提升桩管(振荡器与管同步提升),以后继续不间断地拔管、投料和振动,直至桩体混凝土灌注完毕。

内击扩底桩施工有两个拔管速度,当使用三边工作法时,可配合使用0.39m/min的拔管速度,但在某些条件下也可使用0.8m/min的速度;而在使用管底附震法时,可配合使用0.8m/min的拔管速度。

(四)“系统”能力的最大程度发挥

若把内击扩底桩的桩土体系、桩身以及打桩机看作一个统一的“内击桩系统”,那么,为了取得内击扩底桩的最优效果,正确的途径自然是设法做到最大程度地发挥“系统”的潜在能力。以上所述主要是从理论上探讨并在施工上实现桩土体系以及桩身潜在能力的最优发挥,这里,再从打桩机具的角度对这个课题作简单的补充叙述。

NJ-D60型内击桩机的架顶装有延伸杆装置,为的是利用高仅为12.5m的矮桩架打长桩(桩长18m);此外,为了解决拔管时巨大拔管力(2200kN)产生的对地压力和平衡倾车力矩,设计了前悬臂支撑装置。特别要指出的是管底附震器的使用,它最合理地解决了混凝土离析和拔管困难问题。拔管时每拔高不超过35cm就振动一次,做到一物两用。

四、简短的结语

内击扩底桩经过十多年的工程检验,证明它是一个优良的桩种,但它也有其使用的前提条件,在选用时要扬长避短。此外,它还要在使用中不断发展、完善,包括理论方面的提高。