

# 第一章 绪 论

## 1.1 桩基础在公路桥梁中的应用

桩基础是最古老的基础形式之一，在有文字记载以前，人类就懂得在地基条件不良的河谷和洪积地带采用木桩来支撑结构物，而桩基础在桥梁方面的应用可追溯到公元前。据《水经注》记载，公元前 532 年在现今山西汾水上建成的 30 墩柱木柱桥梁，即为桩柱式桥墩。而中国汉代古灞桥等桩基础的应用，则是对木桩的推广。

1893年 人工挖孔桩在美国问世 当时美国芝加哥、底特律等大城市由于土地紧张，建筑物层数不断增加，而某些高强轻质材料相继开始生产，为高层建筑设计施工创造了条件。但这些城市地表以下存在着厚度很大的软土或中等强度的粘土，建造高层建筑仍沿用当时通用的摩擦桩，必然会产生很大的沉降。于是工程师开始考虑使桩穿越软弱土层，把桩端设在很深的持力层上，并且为满足承载力的要求，桩身横截面的设计也增大。这样的桩不可能用木桩制作，而应使用钢管、型钢或钢筋混凝土预制桩，但依靠当时的打桩设备难以打至所需要的深度，于是，借鉴人类自古相传的掘井技术，人工挖孔桩在这一历史背景下试验成功，解决了工程中的难题。这种桩因其施工工艺简单，且不需特殊机械，不久即不胫而走，被美国各大城市及世界各地的工程界所采用。50年后 即 20世纪 40年代 大功率钻孔机具的研制成功 使钻孔灌注桩在美国问世 之后 南美的委内瑞拉某高速公路的桥梁工程——马拉开波法特大桥的基础施工中，首次用旋转钻浇筑混凝土桩。此后，钻孔灌注桩技术在日本、英国乃至在世界范围内出现了蓬勃发展的局面，应用越来越广泛。

我国桩基础的发展是在 20 世纪 50 年代，当时多采用木桩基础。虽然钢筋混凝土和钢桩也有应用，但数量较少，桩的制造工艺和施工质量不高。如 20 世纪 30 年代建造的钱塘江大桥就曾采用木桩和钢筋混凝土桩基础。50 年代以后，木桩逐渐被钢筋混凝土桩和预应力混凝土桩所代替。如武汉长江大桥、余姚江大桥、奉化江大桥、南京长江大桥及潼关黄河大桥等工程，开始普遍采用普通钢筋混凝土预制管桩和方桩基础。由于普通钢筋混凝土管桩的抗裂能力不高，尤其在沉桩过程中桩身防止横向裂缝的能力较差，所以 1966 年丰台桥梁厂开始研制先张法预应力离心混凝土管桩，并于当年正式投入成批生产。

我国自 1955 年起在武汉长江大桥和 II 南京长江大桥上先后以管桩钻桩下到基岩持力层后再浇筑混凝土；20 世纪 60 年代初，在河南省安阳冯宿河大桥的两座桥的修建中首先成功地应用了人工冲击钻和回转钻成孔的钻孔灌注桩基础，接着在河南竹杆河和白河两座大桥应用，并在国内其他一些省、市地区相继推广。1965 年交通部在河南省南阳市召开了钻孔桩技术鉴定会，认为它是一项重大的技术革新，是在当时我国客观条件下一种多快好省的桥梁基础施工方法，决定在全国推广。因钻孔灌注桩施工技术具有工艺简单、承载力大、适用性强等突出的优点，很快被公路工程技术人员认同并接受，成为公路桥梁基础的首选形式。桩基技术的发展历史简要概括如表 1-1 所示。

桩基技术发展历史

表 1-1

阶段	年代	主要桩型	特点
初期阶段	19 世纪以前	木桩 石灰桩	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由天然材料做成，桩身较短，桩径小</li> <li>2. 采用竖直桩，主要用于传递结构的竖向荷载</li> <li>3. 多设置于地质条件不利的河谷及洪积地带</li> <li>4. 采用简单的人工锤击下沉的施工方法</li> </ol>
发展阶段	19 世纪中叶至 20 世纪 20 年代	除天然材料制成的桩外，主要是混凝土桩和钢筋混凝土桩	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 桩型较少，打桩机械沉桩的施工方法开始使用</li> <li>2. 土力学理论的建立为桩技术的发展奠定了理论基础</li> <li>3. 桩的设计理论和施工技术比较简单，处于初级发展阶段</li> <li>4. 桩的尺寸有所增大，直径约 30cm，桩长 900 ~ 1500cm</li> </ol>

续上表

阶段	年代	主要桩型	特点
现代阶段	第二次世界大战后至今	除钢筋混凝土桩外发展了一系列的桩系,如钢桩系列、特殊桩(超高强度、超大直径、变截面等)系列等	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.多种桩型的出现与发展,形成现今桩基的各种不同体系</li> <li>2.桩基技术与理论吸取其他学科的先进技术与成果,拓宽了桩的研究领域和深度,使桩的应用范围得到极大的发展</li> <li>3.人工成桩被复杂的机械和专门化的工艺所替代</li> <li>4.新型桩的出现,使桩的承载力得到极大的提高</li> <li>5.公路桥梁桩基础普遍采用大直径钢筋混凝土灌注桩</li> <li>6.大直径钻埋空心桩产生并发展</li> </ol>

### 一、发展现状

随着公路桥梁桩基础施工技术的进步与桩基础设计计算理论的发展,目前大江大河上修建桥梁的跨径不断增大,为提高桥梁基础的承载力,相应地要求桥梁桩基的桩径与桩长越来越大。1985年河南郑州黄河大桥采用桩径2.2m、桩长70m的摩擦桩;我国最大的江阴长江大桥和南京长江二桥主塔墩基础反循环钻孔灌注桩直径均为3.0m,后者桩长达150m,目前公路桥梁桩基直径大于2.5m的情况已较普遍,最大的桩径已达8.0m。采用大直径桩与小直径桩相比有明显的优点,主要体现在:

- (1) 提高承载力 减少水中作业 加快工程进度;
- (2) 提高结构的抗振、抗风稳定性与抵御冲击能力;

(3) 降低工程造价。如广东九江大桥主桥为2×160m的独塔斜拉桥,主跨基础采用变截面钻孔灌注桩高桩承台结构。此前曾采用了不同桩径的方案比较,从表1-2中可以明显看出,3种方案均在满足工程要求的前提下,大直径桩的材料用量明显减小。据粗略统计,国内有大量的公路桥梁桩基础直径超过2.5m。表1-3列举了国内部分公路大桥采用2.5m以上直径桩基的情况。事实上,受地质条件、结构形式等因素的影响,有些桥梁的基础采用大直径变截面桩基础,如广东九江大桥通航孔采用 $\phi 3/\phi 2.5/\phi 2.0\text{m}$ 的大直径变截面钻孔桩,湖南的多座大桥也采用了该技术。

广东九江大桥主墩基础灌注桩设计方案比较

表 1-2

桩径(m)	桩数(根)	桩身混凝土(m <sup>3</sup> )	承台混凝土(m <sup>3</sup> )	基础混凝土(m <sup>3</sup> )
1.5	63	6234	4250	10484
2.0	32	5634	3850	9484
2.5	18	4873	3200	8073

国内部分公路大桥采用大直径桩的情况

表 1-3

桩径(m)	桥 名
2.5	泸州长江大桥、九江长江大桥、长德沅江大桥、宣城汉江大桥、三门峡黄河大桥、钱塘江大桥、武汉长江大桥、广东斗门大桥、广东肇庆西江大桥等
3.0	湖南石龟山大桥、黄石长江大桥、珠海横琴大桥、益阳资江大桥、江汉四桥、广州鹤洞大桥、芜湖公铁长江大桥、南京长江二桥、江苏江阴大桥、江苏苏通大桥、广东番禺大桥、新会崖门大桥等
3.5	湖南沅陵大桥、湘潭湘江二桥
4.0	铜陵长江大桥、南昌新八一大桥、湖南石龟山大桥(空心桩)等
5.0	湖南张家界鸳鸯湾大桥(挖孔空心桩)、江西湖口大桥(多次成孔及人工挖孔)等

在公路桥梁桩基础设计与施工技术发展过程中，受土层工程性质及灌注桩施工工艺存在局限性的影响，即使增加桩长和桩径，桩承载力提高的幅度也并不明显，从而使桩的承载力难以满足大型公路桥梁工程的使用要求。以现行公路桥梁桩基础采用的钻孔灌注桩为例，由于桩成孔过程中以泥浆护壁法为主，使成桩工艺存在着固有的缺陷（如桩底沉渣、桩侧泥皮过厚等对桩承载力的影响），导致桩侧阻力与桩端阻力显著降低。为改善桩端与桩周土的工程性质，提高桩承载力，减小桩的沉降量，桩端与桩周注浆技术应运而生。桩周与桩端注浆技术在国外已有 40 年的历史，1961 年在修建 Maracaibo 大桥桩基施工中首次应用，此后日本、意大利、法国、英国、德国及前苏联等国均开始使用该技术，并在施工中使该项技术不断得到发展与完善。20 世纪 80 年代，注浆技术首先在我国的工业与民用建筑行业得到应用。90 年代初，该项技术被引入公路桥梁桩基础的施工中并得到广泛应用和发展，获得了明显的技术经济效益。大量的现场实测结果表明，由于地质情况的差异和注浆技术的差异使桩侧与桩端注浆后的承载力较注浆前的承载力提高程度相差较大，最小可提高 30%，最大的超过了百分之几百。因此，该项技术将会成为我国公路桥梁

## 钻孔灌注桩必备的配套技术

另外，为提高桩的承载力，有关专家与学者从桩的受力机理出发，提出了人工挖孔扩底桩的设计方法。该方法通过扩大桩端头的截面尺寸，提高桩端承受外荷载的能力，从而使桩的整体承载力得到提高。在日本，扩底直径与桩身直径之比小于 2.0 而扩大头则有数米之高（已有的实体工程达 8.0m）。目前扩底桩的施工方法有近 30 种。而我国近年推荐采用锅底形扩底桩 锅底矢高取  $0.1 \sim 0.15D$  扩底起始侧面的斜率取  $1/3 \sim 1/2$  人工扩底桩目前在工业与民用建筑中应用较多，现有的扩底桩种类超过 20 种，而该桩型在辽宁等地的公路桥梁桩基础的设计与施工中已逐渐开始使用 但该桩型的设计、计算理论目前不同的行业采用不同的标准与方法，仍处于研究探索阶段。

## 二、发展趋势

21 世纪公路桥梁桩基础技术发展的动向主要有以下几个方面。

### 1. 向大直径长桩方向发展

基于大型桥梁主塔基础等承载的需要，桩径越来越大，桩长越来越长 欧美及日本的钢管桩长已超过百米，桩径超过 2.5m。河南郑州黄河大桥 采用桩径 2.2m、桩长 70m 的摩擦桩；我国最大的斜拉桥苏通大桥和吊桥江阴大桥、南京长江二桥主塔墩基础反循环钻成孔灌注桩直径均为 2.5~3.0m 且桩长均超过 100m；湖南的石龟山大桥等 10 多座大桥采用大直径钻埋预应力混凝土空心桩，用单根大直径桩代替群桩基础，使得结构轻型化，简化施工程序和节省多排桩所需的承台及围堰，使工程费用大大降低。例如：1992 年湖南湘潭二桥采用了无承台 5.0m 和 3.5m 的大直径桩；1996 年又顺利地 在江西南昌八一大桥主塔基础中采用 4 根直径为 4.0m、嵌入风化岩层 8.0m 的大直径桩。

### 2. 向埋入式桩方向发展

所谓埋入式桩就是将预制桩沉入到钻或挖成的孔中后，采用某些手段增强桩承载力的总称。日本在近 20 年开发出 60 多种埋入式桩施工方法，桩的截面形式多种多样。在我国，北京采用长螺旋钻成孔，然后将预制桩放入孔内，最后锤击使桩端进入设计要求的持力层；河南首次采用多次扩孔成孔，将预制的预应力混凝土空心桩放置到设计标高后，给桩周填满粗集料，然后在桩周与桩端注浆成桩，该方法在湖南的多座桥梁桩基的

施工中都得到了应用。

### 3. 向高强度桩方向发展

桥梁桩基础在向埋入式桩方向发展的同时，对桩自身的要求也越来越高，诸如高承载力。普通钢筋混凝土桩（简称 P.C 桩 混凝土强度通常为 C20~C30）已满足不了工程上的要求。因此，预应力钢筋混凝土桩（简称 P.H.C 桩，混凝土强度通常为 C40）使用越来越多。P.H.C 管桩在欧美、日本、前苏联及东南亚等地被大量应用。我国公路桥梁桩基础的施工中采用的大直径钻埋预应力混凝土空心桩就属于 P.H.C 桩。

### 4. 向复合式施工工艺桩方向发展

受桩承载力的要求、环境保护的要求及工程地质与水文地质条件的限制等，采用单一工艺的桩型往往满足不了工程要求，工程中采用了复合式施工工艺桩。如：对于桩径超过 3.0m 的桩基础 施工中常采用一次、两次甚至多次扩孔进行成孔，成桩采用灌注混凝土与放置预制桩两种工艺；桩端压力注浆有成孔成桩与成桩后给桩端压力注浆两种工艺；桩侧注浆有成桩后注浆与桩侧回填粗集料后再注浆两种工艺；钻孔扩底灌注桩有直接成孔和扩孔两种工艺。

### 5. 向低公害的成桩工艺发展

我国公路桥梁桩基础以灌注桩为主，对于钻孔灌注桩多采用的是泥浆护壁的成孔方法。钻孔灌注桩中的泥浆在成桩后目前仍未能采取有效的方法进行处理，造成环境污染，且泥浆在使用中会造成施工现场不文明。目前国外主要采用贝诺特灌注桩，国内已在昆明、浙江及北京等地的十几处工程中进行了应用。贝诺特灌注桩的优点是环保效果好（噪声小、振动小、无泥浆污染与排放）施工现场文明。

## 三、桩基技术面临的挑战

从桩基技术的发展趋势上可以看出，桩基技术在进入现代化阶段后获得了迅速的发展，也面临着以下几方面的挑战：

(1) 由于工程造价、工程进度和工程质量的要求 桩基技术显得越来越重要。事实上 对于不同的桥梁结构、不同的地质条件、不同的桩型 就同一工程往往有多种不同的桩型可以选用，这就必须对其分别进行技术与经济比较 选择承载能力大、工期短、造价低且能确保工程质量的桩型。

(2) 随着基础建设力度的加大，桥梁桩基础建设的难度也越来越大，

对减小环境不良效应的要求更高。因此，针对实体工程，推陈出新，克服传统桩基中存在的技术缺陷势在必行。

(3)随着新型桩基技术的不断推出，相应的桩基施工机械设备暴露出很多缺陷，这就要求加速桩基施工机械的研究、开发和改进，确保新技术的推广和应用。例如，大直径变截面桩的施工，对钻机设备已提出了很高的要求。

(4)在特大直径桩、大直径超长桩的应用中，仍然基于传统意义上的桩基础理论体系来认识桩的工作机理和受力性状显然存在着一定问题。因此，开展特大直径桩、大直径超长桩的理论研究十分重要。

## 1.2 大直径空心桩的产生及类型

### 一、大直径空心桩的产生

随着我国公路交通事业的迅猛发展，许多渡口改为桥梁，甚至在同一条河上需要建造多座桥梁以便于分流，现今长江上的大桥，湖南省内有 13 座，江苏省内有 16 座。江苏省的苏通大桥为跨径 1088m 的斜拉桥，位居国内外同类桥梁第一。江阴大桥为跨径 1385m 的悬索桥，位居我国同类桥梁第一，世界排名第四。而南京长江二桥的南汊大桥为钢箱梁斜拉桥，长 2958m，主跨 628m，该跨径目前在同类桥梁中位居国内第一，世界第三。其北汊大桥为预应力连续梁桥，桥长 2212m，主跨为  $3 \times 165\text{m}$ ，属国内领先水平。根据已有的统计资料显示，我国公路桥梁从 1965 年拥有 10.4 万座，总长度 156.65 万延米，发展至 1998 年拥有 22 万座，总长度 745.4 万延米。33 年间桥梁的数量翻了一番，而总长度却增长了 4.5 倍。对于这些跨越江河、湖海的公路桥梁基础，则因桩基成桩技术的发展，特别是大直径超长灌注桩技术的发展，桩基已是目前桥梁基础中最常用的基础形式，其使用率超过 90%。然而，因公路等级的提高和超重载的不断增多，现行公路桥梁的设计与施工中，对桩承载力的要求越来越高，这就要求增大这种桩的直径。但增大桩径，会使桩身自重占桩周土支承桩的承载力的比重越来越大，反而使工程不经济。在这种情况下，桥梁桩基础的发展趋势是大直径和预拼工艺的集成，显然只有采用大直径空心桩结构才有实际经济价值。大直径空心桩的产生实际上经历了较长的探索过

程，主要包括管桩和管柱及就地钻孔灌注桩两个阶段。

### 1. 管桩和管柱

最早采用空心桩结构的桥梁是 1956 年始建的武汉长江大桥。当时，在前苏联专家指导下建造了  $\phi 40 \sim \phi 55\text{cm}$  管桩和  $\phi 1.5\text{m}$  管柱基础。之后在前苏联全面推广了管柱，并形成  $\phi 1.2\text{m}$  和  $\phi 1.6\text{m}$  管柱组成的无承台桥墩标准设计。铁道部大桥局曾建成  $\phi 2.5\text{m}$ 、 $\phi 3.6\text{m}$ 、 $\phi 5.8\text{m}$  大直径的普通粗钢筋预应力沉入式管柱。但在 20 世纪 50 年代末期和 60 年代初管柱在不少铁路桥的施工实践中出现了下述问题：

(1) 大功率电源的要求。随着桩直径加大，要求振动锤功率越来越大，到 500t 级时启动功率达 400kW，这是一般工地无法解决的。

(2) 土的工程特性的要求。以振动为主配以射水的方法是管柱下沉的主要手段，然而遇到粘性土时效果很差，在风化岩中下沉也很困难。另外在软弱地基以摩擦力为主时管柱也不能很好地适应。

(3) 工程精度难以满足。据统计，铁道部大桥局施工的管柱基础，有 70% 超出容许偏差范围。纠偏给施工带来极大的麻烦，造成工期延误，工程费用增加。

(4) 大型设备的需求。一般的施工单位都没有管柱施工所需的大型机械设备。

由于上述原因，空心管柱基础在桥梁工程中的推广受到很大限制。

### 2. 钻孔灌注桩

1964 年河南创建就地钻孔灌注桩以来，因其施工简便和适应性强，在各个领域中都得到了推广。但大量实践表明，钻孔灌注桩仍然存在着不足之处：

(1) 桩底沉淀的问题。桩底沉淀很难清除干净，且易产生压缩变形，并大大弱化桩端承载力。与打入桩和管柱相比较，钻孔灌注桩的承载力明显偏低。

(2) 桩身混凝土质量问题。由于都是现场就地灌注水下混凝土，桩身混凝土夹泥断桩的情况常有发生。经过对 564 根钻孔桩的统计分析，其中严重缺陷桩占 5.9%，一般缺陷桩占 14%，完好桩仅占 80%。20 世纪 60 年代后期，湖北汉江上的几座大桥断桩事故都高达 10% 以上，其处理时间有的长达一年之久，使工期严重滞后，工程费用大大提高。国外的钻孔桩统计也表明，其质量事故率为 10% 左右。这些问题对于数量比较多

的群桩基础尚不严重，而对于 1 个桥墩只有 1~2 根的无承台大直径桩而言影响很大。

为了适应公路桥梁高速发展对基础工程的要求，迫切需要研究一种将预制桩和钻孔桩两者相结合的新结构。实际上，早在 20 世纪 60 年代后期河南就开始了探索，1980 年河南在洛阳东华桥就应用了直径为 1.5m 的空心桩，但直到 20 世纪 80 年代后期空心桩才被列入交通部“七五”计划的重点科研项目。在交通部公路科研所和河南省公路局的努力下，于 1988~1990 年在洛阳伊河大桥进行了 3 根直径为 1.5m 的钻埋预应力空心桩第一阶段试验，接着 1991 年在党湾润河大桥进行第二阶段试验，完成了 10 余根直径为 1.5m 的预应力钻埋空心桩（用于多孔 30m 跨径的简支梁），1992 年 5 月通过交通部的鉴定。至此具有中国特色的无承台大直径钻埋预应力混凝土空心桩终于完整地诞生了，其主要的三个特殊工序为：

- (1) 在形成的桩孔内沉放桩壳；
- (2) 桩侧填石压浆；
- (3) 桩底填石压浆。

由于上述技术主要是钻孔和埋桩壳，故定名为“钻埋空心桩”，其主要特点在于“钻”和“埋”。“钻”就是利用钻机能在任何地质情况下钻进 100m 以内的深孔，从而克服了管柱基础以“振”为主的弊病；“埋”就是在已成孔的桩孔内埋入预制桩，从而克服了灌注水下混凝土的局限性。

当时河南省试验工程的空心桩直径只有 1.5m，但是空心桩如果与大直径桩相结合，其技术经济效益将更显著，而大直径空心桩再与取消承台和变截面技术相结合，其技术经济效益就更为显著。当时，湖南省在广东九江大桥、湖南湘潭湘江二桥、益阳资江二桥等桥的设计施工中成功地应用了无承台变截面大直径桩的技术，因此，湖南省在河南大直径钻埋预应力混凝土空心桩成果鉴定之后，于 1993 年在所承担的交通部“八五”行业联合科技攻关计划里的“洞庭湖区桥梁修建新技术的开发研究”课题中，进一步将两种技术相结合，最终形成了大跨径桥梁的无承台大直径变截面空心桩技术，并在哑吧渡等 8 座大桥上应用该项技术。目前已完成了桩径为 2.5~6.0m 的大直径空心桩共 196 根，总长 3497m，其中大直径钻埋预应力混凝土空心桩 84 根，2293m。大直径空心桩是一种将预制桩和钻孔桩两者的优点结合在一起的全新桩型，集目前国内外桩基先进技术之大成，主要有以下几个特点：

(1)施工方法采用钻孔埋入，集钻孔桩与预制桩的优点于一体，可有效地防止钻孔桩施工过程中出现的各种工程质量和预制桩下沉困难或沉桩偏差过大的质量问题。

(2)桩基直径较大(1.5m以上)又系预应力空心桩，使桩体断面布置更为合理有效，与同直径的实心桩相比，既可充分发挥混凝土的作用，节省大量混凝土，又可因混凝土质量的提高及自重的减小而相对提高桩的承载力。

(3)桩身采用预制空心桩节分段竖拼，可阶段性设置预应力或整体组拼施加预应力，不仅可避免水下混凝土浇注，而且可使桩基施工作业部分工厂化，既可确保桩身混凝土质量，又可钻孔预制并行作业，从而加快了工程施工进度。

(4)桩周填石压浆使桩与桩周土结合紧密，大大提高了桩周摩阻力。桩底高压注浆使桩底土体压密加固，桩端承载力得到有效地发挥。

(5)带底的空心桩，可利用水的浮力，缓解对吊机起吊能力的要求，易于作业，适用性较广。

钻埋预应力空心桩的优点，将预示着该桩型具有很强的生命力，特别是在深水区域的桥梁，用大直径空心桩替代群桩基础，其经济效益十分显著。

## 二、大直径空心桩的类型

大直径空心桩是集大直径桩与预制桩的特点于一体的新桩型，可从成桩的角度对其进行分类，主要分为三大类。

### 1. 钻孔灌注水下混凝土空心桩

该方法是利用钻机成孔后，在孔内埋设普通内模，在内模与孔壁之间沉放钢筋笼，灌注水下混凝土，这种类型的桩实质上相当于将一般的灌注桩中心挖空。由于水下混凝土导管直径最少需要25cm(过细易卡管)，又要下钢筋笼，因此桩壁厚度应大于60cm，上段护筒加粗部分壁厚至少75cm以上，因此桩身直径较大，如图1-1所示。该桩型宜在直径大于3.0m时采用。广州鹤洞大桥的桩基础就采用了这种桩型。

### 2. 钻埋预应力混凝土空心桩

该方法是利用钻机成孔后，将事先预制好的混凝土空心桩管节用预应力连接，并吊放入桩孔内，然后埋设预应力桩壳，在桩壳与孔壁之间不放钢筋笼，只埋压浆管，填石后压浆，桩端亦压浆。由于压浆管直径一

般只有 5~7cm 故填石压浆层壁厚 15~20cm 即可,如图 1-2 所示。这是一种全新的施工工艺,河南省试验成功后,在推广应用做了大量的改进,并在多座大型桥梁中进行了应用。本书将着重介绍这种桩型的相关理论研究成果

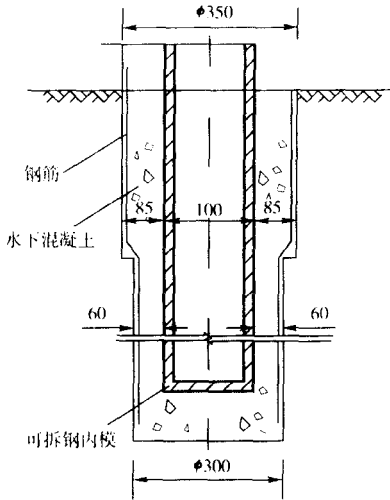


图 1-1

(尺寸单位:cm)

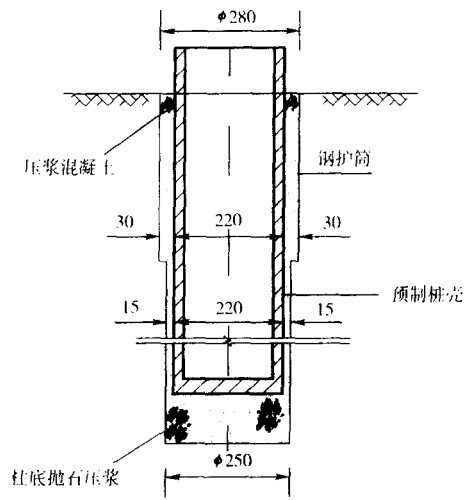


图 1-2

(尺寸单位:cm)

### 3. 沉挖大直径空心桩

该方法是利用沉井管边挖、边沉、边抽水的方法将沉井管沉至基岩在刃脚封水后人工凿岩再浇筑混凝土成空心桩。它是沉井管和挖孔桩两种基础施工工艺的集成,具有结构整体性好,抗弯、抗推刚度及承载力大的特点。该桩型适用于在砂、砾、卵、漂石覆盖层厚度不大采用钻机成孔技术上不合理的情况。如湖南的桃沅水大桥均采用了该类型的空心桩基础其最大直径达 6.0m。

## 1.3 大直径空心桩的发展

大直径空心桩因解决了钻、挖孔灌注桩存在的诸多技术缺陷,并集钻、挖孔灌注桩与预制桩的优点于一体,受到工程技术人员的普遍关注。但时至今日大直径空心桩近 10 年的应用主要在湖南等省的局部地区,

而未能在全国范围内得到推广应用，究其原因，一方面工程技术人员因对该桩型不熟悉，在应用中缺乏技术支持；另一方面该桩型的一些问题仍有待于进一步研究。因此，对于大直径空心桩基础，必须在考虑上述桩基础发展中存在问题的同时，进一步考虑这种新型桩基础的施工工艺与测试技术研究，并完善该桩型的设计计算理论与方法。展望今后大直径空心桩的发展方向，主要应开展以下几方面的研究工作：

### 1. 大直径空心桩的理论研究

大直径空心桩由于桩径的增大、桩端头的增大和在桩周与桩端注浆，与传统的大直径桩相比，桩—土工作机理及其荷载的传递规律是否一致，桩的设计计算理论是否一致，现有的设计计算理论用于大直径桩时的可靠度如何，桩头扩大及桩端与桩周注浆前、后桩的设计参数如何变化及桩的承载力提高幅度的大小等问题，已成为大直径空心桩基础应用的主要障碍，亟待研究工作者解决这些问题。因此，应通过试验和理论研究进一步明确各种条件下大直径空心桩的桩—土相互作用性状，评价已有理论对大直径空心桩的适用性，完善大直径空心桩的设计计算理论。另外，应加强大直径空心桩基础的抗振理论研究，借助现有的高科技手段，开展对土的动态强度、砂土振动液化原因和预防措施等方面的研究。

### 2. 大直径空心桩工艺的研究

因大直径空心桩为预制桩基础，其工艺应从设计与施工两个方面考虑。主要包括：(1)合理的空心桩节设计。为方便预制桩的吊装与运输，施工时首先是预制桩节，桩节数量越多，吊装与运输越方便，但施工工序相对增加，桩的节头亦增加，因此应设计合理的空心桩节。(2)密封技术研究。空心桩节之间采用预应力进行连接，预应力的有关设计参数及空心桩节间的密封技术须进一步研究。(3)成孔技术研究。空心桩成孔过程中采用普通钻机成孔时，需进行扩孔技术及其大孔径孔壁的稳定性研究。

### 3. 大直径空心桩测试技术研究

在桥梁工程中，传统的桩基础主要采用超声波、大应变、小应变、取芯及现场原位试验等方法对其完整性进行检测评价。但对大直径空心桩而言，其特点一是空心结构，二是承载力大（以大直径钻埋预应力空心桩基础替代群桩基础，二者的承载力相当，其承载力较群桩基础中单根桩的承载力而言大得多），很难用现有的测试技术对其完整性及承载力进行测试与评价。因此，开展适于大直径空心桩基础测试技术研究势在必行。

## 第二章 大直径钻埋预应力混凝土空心桩的成桩工艺

钻埋预应力混凝土空心桩是预制桩与钻孔灌注桩两者相结合的新型基础结构,其特点一是“钻”——钻机能在任何地质情况下钻百米以内大直径孔( $\phi 250\text{cm} \sim \phi 600\text{cm}$ )从而克服了管柱基础以“振”为主的弊病;二是“埋”——在已完成的孔内埋入质量有保证的预制桩,从而克服了就地灌注水下混凝土桩的各种弊病;同时,在桩侧与桩端压浆,大大提高了桩侧摩阻力与桩端阻力,使桩的承载力大大提高。

大直径钻埋预应力混凝土空心桩的施工工艺包括:预应力混凝土空心桩桩节的预制、混凝土空心桩桩节的运输和存放、钻埋预应力混凝土空心桩的成桩工艺、预应力混凝土空心桩桩侧压浆与桩端压浆。

### 2.1 桩节的预制

预应力混凝土空心桩桩节的预制有卧式预制与立式预制两种方法,因前者整体精度难以保证,故通常采用后一种方法。桩节的预制包括:预制场地的选择、模板的制作、桩节预制。

#### 一、预制场地的选择

预制场地需根据实际情况选择。一般情况下,预制场地多选在桥位附近,以减少预制桩节的运输距离,提高工作效率。例如:已建成的哑吧渡大桥和石龟山大桥的预制场地就选在河滩;但是有时受桥位附近的地形地质条件的限制,需要花费较多的工程费用对其加以处理方可使用时,也可将预制场地选在离桥位较远的地方。例如:湖南已建成的南华渡大

桥就是在桥位尚未确定时，就在南华渡大桥指挥部提前将 300 节空心桩节预制完成。

预制场地要求平整，地面要压实，以防止沉陷。预制场的工作关键是场地内起吊运输方式的选择和确定。龙门吊因其具有起重和运输两种功能，可作为预制场内首选的起吊运输设备。在龙门吊的工作范围内，应整体考虑桩壳预制台座、成品堆放、运输车辆进入、桩壳的调装上车等不同工序的平面布置，使其互不干扰。另外，还要安排钢筋制作、砂石材料堆放、水泥仓库、拌和机作业水、电供应系统及场地等使其能与龙门吊成为有机的联系整体。同时，预制场要设排水系统，主要用来排出雨水和预制桩节的养生用水，以确保预制场内无积水，保持预制场的稳定。

## 二、模板的制作

模板由内模板、外模板、定位模板 3 部分组成。各部分之间都用螺栓夹橡皮连接，定位模板一般采用钢模板，用钢板整体加工制作，以确保表面平整度误差和预应力孔道预留位置误差均小于 1.0mm。模板高度的确定要视施工单位的起吊能力而定，一般以 2.0~3.0m 为宜，最大可达 6.0m。空心桩内外模的制作要求坚固耐用、不易变形、不漏水、装卸方便和能重复使用，其材料必须用钢结构，同时也可确保桩的外形不变形和预应力孔位的准确，使各桩节拼装时成一直线。空心桩底节的构造和其余各桩节不同，它是带底板的，且在底板上留有压浆管孔。空心桩在下沉过程中由于底板要承受很大的浮力，底板在制作时必须加设钢板和斜撑予以加强如图 2-1 所示。每套模板都要固定在混凝土底座上，模板至少要有两层如图 2-2 所示。当 I 层空心桩节 A 浇筑后，其模板不拆，接着装 II

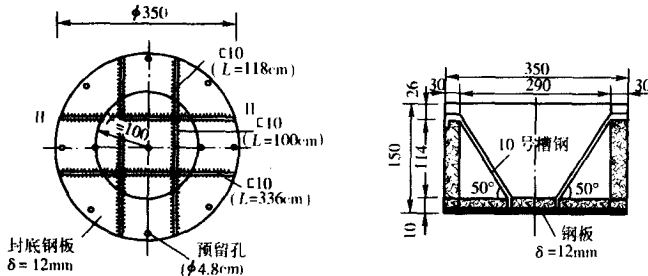


图 2-1 空心桩桩节底节构造图（尺寸单位：cm）

层模板；II层模板浇筑桩节 B 后，又随着 B 节吊放到下层，在其上又装 I 层模板浇筑桩节 C。这种采用拆一留一的方法是确保桩节外形竖直，接缝平顺无错缝，同时，下层钢模与桩节可一起承受上层荷载。

### 三、桩节预制

在桩节预制之前，首先要预制台座。预制台座主要用来安装模板及支承预制桩节，台座一般为方形，用片石或红砖砌筑并用 10cm 混凝土砌平，台座应有足够的强度和平整度，其标高应高出地面不小于 10cm。同时在台座上设置预留孔道，用于固定预应力孔道的位置。

桩节的制作可在工厂采用离心式浇筑或立式振捣浇筑，亦可在施工工地现场预制，其桩节构造见图 2-2b) 圆环中心轴线均匀预留预应力钢筋孔道，桩节的上端预留张拉螺母及套筒的位置，桩节内外设置双层构造筋及螺旋筋。桩节长度可根据桩径大小及起吊能力而取，壁厚 14 ~ 20cm。在现场振捣时，应注意外模的就位情况、垂直度及钢筋的保护层的要求。

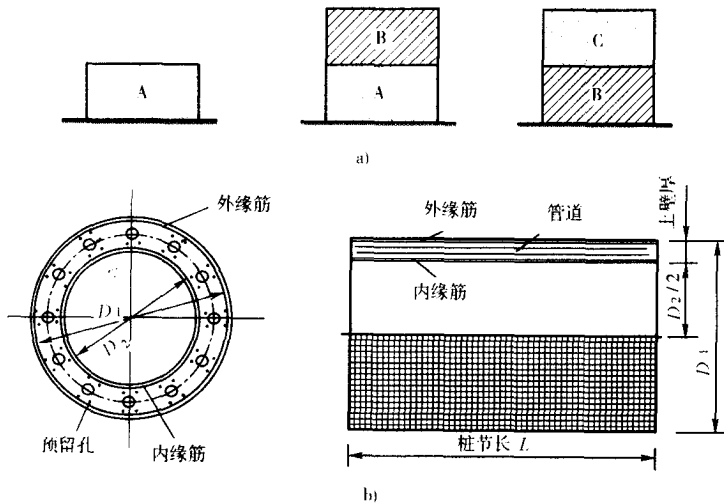


图 2-2 预应力空心桩桩节模板 I 序示意图

a) 预制顺序；b) 桩节构造示意

桩节的预制，是在钢模板固定在混凝土底座上后，在外模板的内面层涂刷一层 HL-401 型混凝土表面缓凝剂，待内外模板安装检查后可分层

浇筑混凝土，并用插入式振捣器捣实。当桩节混凝土拆模后，此时，桩身虽已凝固，但是由于桩节外表面附有一层缓凝混凝土表层，该表层在水的冲击下 桩节外表面便裸露出 2~3mm 深的骨料层。这样桩身外表面的粗糙度使桩侧压浆层与桩身的结合更紧密，从而提高桩的整体强度。预制过程中，采用双层模板对接法预制：第一桩节预制后，在第一桩节的上端涂刷一层不掺固化剂的环氧树脂胶作为隔离层，于隔离层上预制第二桩节，同样在第二桩节上端面涂隔离层，以此类推预制其它桩节，直至预制完一根桩所需的桩节数。

在桩节的预制过程中，应特别注意温度和时间，及时将  $\phi 5\text{cm}$  钢管在初凝后拔出，以形成预应力管道。同时用不凝固的环氧树脂制作桩节顶面隔离剂以后，由于亲和性，以后更有利于将来的环氧树脂胶粘缝，而且避免了很多因修凿桩节造成的费工费时。桩节的工艺流程如图 2-3 所示。

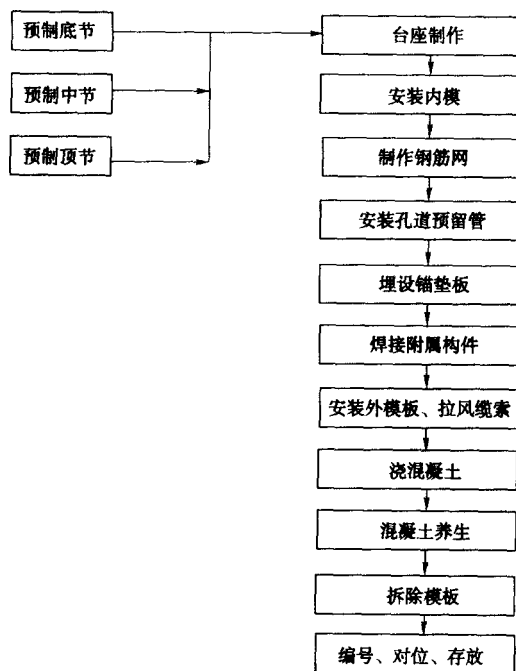


图 2-3 桩节的工艺流程图

## 2.2 桩节的运输与存放

桩节预制过程中及预制完成后，在预制场和预制场至施工现场，都存在着桩节的运输及如何存放的问题。预制桩节在未成桩之前，属钢筋混凝土构件，其直径大，在起吊、运输与堆放过程中产生的动荷载足以使管节产生环裂。同时，由于每根空心桩节都是对接预制的，因此在堆放过程中必须按预制时的顺序进行编号，并应注意预制桩节之间需垫枕木以免压坏桩节节头及混凝土接触面被污染。

桩节的运输包括在预制场预制完成后运输至桩节的存放地和从存放地运输至施工场地两个运输过程。由于钻埋预应力混凝土空心桩的重要特点之一是桩身分节预制，各桩节高度的大小决定了预制桩节的自重，而该自重又受到起重设备能力限制，因此，运输设备是空心桩节施工的关键技术。目前主要的运输设备有龙门吊、汽车吊、浮吊、缆吊等。龙门吊设备简单，通常可在工地自制，较汽车吊耐用性好、成本低，是施工中的首选方案。汽车吊机动灵活，但吊重受限制，成本费用高，同时不能单独作纵向运输用，要另加平移和滚移滑道。要发挥好汽车吊的效率，须在桩位上再设置一小型的固定门吊，用于垂直吊放桩壳，而汽车吊则用于桩壳从汽车上或滑道上转移到固定门吊下。浮吊通常是将汽车吊放在渡船上形成的，由于渡船的宽度窄，稳定性不够，在吊装时要将渡船用手拉葫芦稳定在钻孔工作平台上。缆吊起吊重量大，可以居高临下，使用面宽，工作效率高，特别重要的是缆吊可以进行纵向水平运送，在施工中有深水、浅滩和岸孔时它都可以代替多台吊车。

由于空心桩壳尺寸大，外表不能打孔和设置吊环，因此在运输时采用特制的吊装夹具——钢板夹具，将钢板夹具与桩节紧扣在一起，钢板和桩壳间的空隙用木塞塞紧。

## 2.3 成桩工艺与质量控制指标

当空心桩分节预制和搭设平台、打入钢护筒以及完成工序后，再通过“成桩”工艺形成空心桩。这包括在孔内放桩管、桩侧填石压浆和桩尖二次压浆3个工序，如图2-4所示。下面按工艺步骤分项说明。