



中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

N

ew

桥梁桩基新技术

——大直径钻埋预应力混凝土空心桩

Technique of Bridge Pile Foundation

—— Large Diameter Bored Hollow Pile of Prestressing Force Concrete

● 冯忠居 谢永利 上官兴 著



人民交通出版社



中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

New

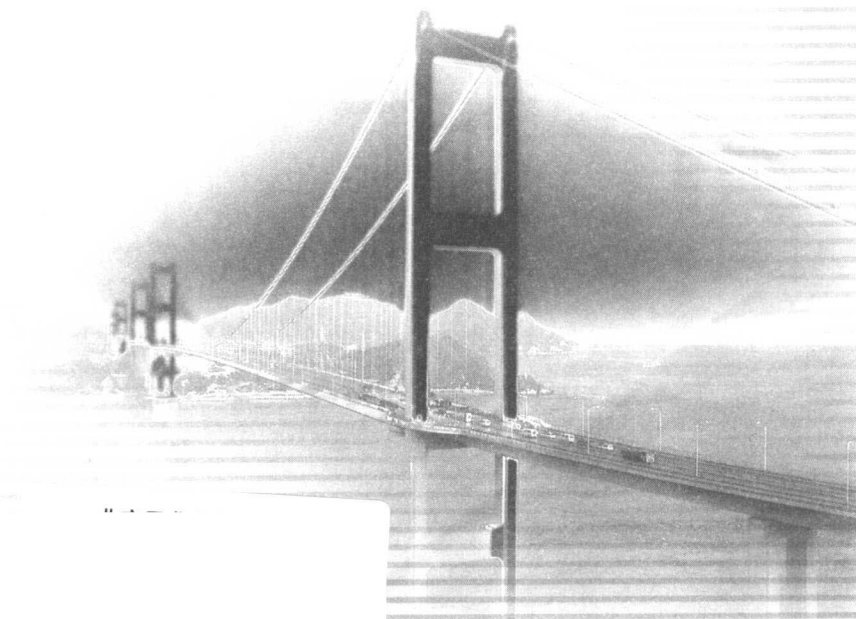
桥梁桩基新技术

——大直径钻埋预应力混凝土空心桩

Technique of Bridge Pile Foundation

—— Large Diameter Bored Hollow Pile of Prestressing Force Concrete

● 冯忠居 谢永利 上官兴 著



人民交通出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

桥梁桩基新技术: 大直径钻埋预应力混凝土空心桩/
冯忠居, 谢永利, 上官兴著. —北京: 人民交通出版社,
2005.5

ISBN 7-114-05538-2

I. 桥... II. ①冯...②谢...③上... III. 桥梁基
础: 桩基础-混凝土桩 IV. U443.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 034016 号

书 名: 桥梁桩基新技术——大直径钻埋预应力混凝土空心桩

著 作 者: 冯忠居 谢永利 上官兴

责任编辑: 富砚博

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)85285736, 85285956

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×980 1/16

印 张: 11.75

字 数: 174 千

版 次: 2005 年 7 月第 1 版

印 次: 2005 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05538-2

印 数: 0001—2000 册

定 价: 20.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

内 容 提 要

大直径钻埋预应力混凝土空心桩是 20 世纪 90 年代初由我国专家首次提出的一种新型深基础形式。它集钻孔桩与预制桩的优点于一体,给桥梁桩基领域带来了新的活力,蕴藏着巨大的经济效益与社会效益。本书在对大直径钻埋预应力混凝土空心桩施工工艺简要介绍的基础上,基于模型试验,揭示出桩端与桩侧回填后压浆对大直径钻埋预应力空心桩承载力影响的内在机理;利用数值仿真技术,系统研究了不同参数对桩承载力性状的影响;建立了大直径钻埋预应力混凝土空心桩的偏心受压计算公式和承载力计算公式;提出了完整的大直径钻埋预应力混凝土空心桩设计计算方法;最后,结合实体工程应用,给出了大直径钻埋预应力混凝土空心桩基础在不同桥梁工程中应用的典型实例及图例集。

本书可供公路工程、桥梁工程等专业领域的科研、教学及基础工程的设计、施工与管理人员参考。

前言

大直径钻埋预应力混凝土空心桩是 20 世纪 90 年代初由我国专家首次提出的一种新型深基础形式,它集钻孔桩与预制桩的优点于一体,给桥梁桩基领域带来了新的活力,蕴藏着巨大的经济效益与社会效益潜力。虽然该基础形式已有一些成功应用的实例,但在桩的受力作用性状研究、计算参数的选取、设计计算理论与方法的研究等方面都还是空白。本书首先在对大直径钻埋预应力混凝土空心桩的施工工艺简要介绍的基础上,基于模型试验,把桩与桩侧、桩端介质不同注浆情况下的相互作用性状分开进行研究,得出了大直径钻埋预应力空心桩桩侧和桩端压浆后桩的侧阻力和端阻力变化性状,揭示出桩端与桩侧回填后压浆对大直径钻埋预应力空心桩承载力影响的内在机理。利用数值仿真技术,系统研究了不同参数对桩承载力性状的影响,得出了大直径钻埋预应力空心桩的临界桩长并据此界定弹性长桩与刚性短桩;分析了桩侧压浆厚度对桩内力的影响。推导出大直径钻埋预应力混凝土空心桩偏心受压计算公式,该公式的建立对现行《公路桥涵设计规范》中没有预应力混凝土构件偏心受压荷载计算理论公式进行了补充。建立的空心桩竖向承载力理论计算公式,为大直径钻埋预应力混凝土空心桩基承载力的确定奠定了基础,提出了完整的大直径钻埋预应力混凝土空心桩设计计算方法。最后,结合实体工程应用,给出了大直径钻埋预应力混凝土空心桩基础在不同桥梁工程中应用的典型实例。

第一章,概括了桩基础在公路桥梁中的应用情况,介绍了大直径钻埋预应力混凝土空心桩的产生及类型,指出了大直径空心桩的发展方向。

第二章,介绍了大直径钻埋预应力混凝土空心桩的成桩工艺,着重介绍空心桩壳的预制、桩节的预应力联结及桩侧与桩端填石压浆工艺。

第三章,为研究大直径钻埋空心桩的承载力性状,通过室内模拟试验,分析桩周注浆体与桩体间的摩阻力以及注浆体与土体间的摩阻力,并与桩和土体界面的摩阻力试验结果相比较;分析桩端注浆前后的承载力大小及其变化规律。

第四章,利用仿真分析技术,系统分析了大直径钻埋空心桩在桩周土性参数、桩的设计计算参数变化下的承载力性状。

第五章,基于仿真分析,对大直径钻埋预应力混凝土空心桩在横轴向荷载作用下的受力性状进行了分析,给出了刚性桩与弹性桩的界定标桩;建立了大直径钻埋预应力混凝土空心桩结构的承载力计算公式;评价了空心桩结构的实用性。

第六章,在剖析桩基础荷载传递规律的基础上,对现行经验公式确定桩基础承载力方法存在的问题进行了系统分析,推导了确定桩基础承载力的理论计算公式。

第七章,系统介绍了大直径钻埋预应力混凝土空心桩的设计方法,主要包括空心桩基础几何尺寸的拟定、桩基础的构造设计、空心桩结构的强度验算等内容。

第八章,介绍了大直径空心桩在实际工程不同桥型中的应用。这些工程的成功应用及其显著的经济效益,为大直径钻埋预应力混凝土空心桩的推广应用奠定了基础。

在本书脱稿之际,感谢陈桂发副教授、侯仲杰高工在模型试验研究工作中所给予的支持和帮助,感谢魏炜副教授在第五章 5.4 公式推导中所给予的支持和帮助。对博士研究生李晋同学在数值仿真分析中所作的工作深感欣慰。由于时间紧促、水平所限,书中不足之处在所难免,敬请读者指正。

作者

2005 年 1 月 5 日

工程施工图例



1. 泥浆地



2. 石龟山大桥扩孔钻头



3. 在钻孔中采用的油由聚内烯酰胺不分散低固相浆系统



4. 钻孔施工



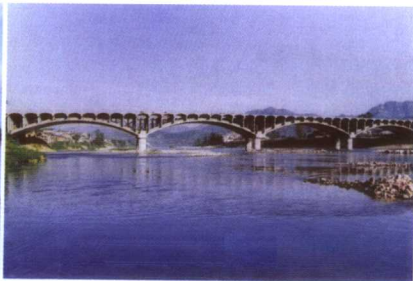
5. 空心桩吊装



6. 空心桩缆吊吊运拼接全景



7. 缆吊全景



8. 湖南张家界市观音澧水大桥



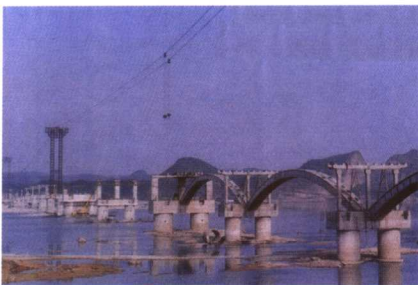
9. 湖南南县南华渡大桥



10. 广东韶关五里亭大桥



11. 湖南常德石龟大桥



12. 湖南桃源沅水大桥



13. 湖南南县哑吧渡大桥



14. 湖南张家界鸳鸯沅水大桥



15. 空心桩码放



16. 空心桩用对接法预制



17. 空心桩预制场



18. 预制好的空心桩



19. 压浆测读上抬量、压力



20. 桩底抛石



21. 桩周抛石



22. 接头用 $\Phi 32$ 锥形连接筋



23. 空心桩拼接对位



24. 控制桩位



25. 连接完毕的桩节



26. 清洁接头顶面



27. 清洁接头底面



28. 涂环氧树脂砂浆接头



29. 桩节位置微调



30. 桩内注水下沉



31. 桩伴下放



32. 桩体下放到位

目 录

第一章 绪论	1
1.1 桩基础在公路桥梁中的应用	1
1.2 大直径空心桩的产生及类型	7
1.3 大直径空心桩的发展	11
第二章 大直径钻埋预应力混凝土空心桩的成桩工艺	13
2.1 桩节的预制	13
2.2 桩节的运输与存放	17
2.3 成桩工艺与质量控制指标	17
2.4 桩侧压浆与桩端压浆	21
2.5 小结	24
第三章 大直径钻埋预应力混凝土空心桩的室内模拟试验	26
3.1 试验目的	26
3.2 试验设计及试验内容	27
3.3 试验装置设计	35
3.4 试验成果与分析	40
3.5 试验小结	53
第四章 大直径钻埋预应力混凝土空心桩承载力的数值仿真分析 ..	55
4.1 仿真软件	55
4.2 计算模型的建立	57
4.3 计算参数的选取	61
4.4 计算成果分析	65
4.5 主要结论	88
第五章 横轴向荷载作用下空心桩的内力与位移性状分析	91
5.1 横轴向力作用下空心桩的受力特点	91
5.2 空心桩的结构内力与位移计算	96
5.3 组合荷载作用下空心桩结构的受力分析	112
5.4 大直径钻埋预应力空心桩结构的承载力计算	115



5.5 空心桩结构的实用性分析	121
第六章 大直径钻埋预应力混凝土空心桩竖向承载力评价	129
6.1 桩—土体系的荷载传递规律	129
6.2 现行方法存在的问题	134
6.3 桩承载力的理论计算方法	137
6.4 对比分析	141
第七章 大直径钻埋预应力混凝土空心桩的设计方法	143
7.1 引言	143
7.2 几何尺寸的拟定	143
7.3 构造设计	145
7.4 空心桩结构的强度验算	149
第八章 大直径空心桩工程应用实例	155
8.1 引言	155
8.2 无承台变截面大直径空心桩试验桥应用实例简介	157
8.3 大直径空心桩在斜拉—连续梁组合体系桥梁基础工程中的 应用	160
8.4 大直径钻埋预应力混凝土空心桩在连续梁桥中的应用实例	164
参考文献	172



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均不高,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孔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	1. 由天然材料做成,桩身较短,桩径小 2. 采用竖直桩,主要用于传递结构的竖向荷载 3. 多设置于地质条件不利的河谷及洪积地带 4. 采用简单的人工锤击下沉的施工方法
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	1. 桩型较少,打桩机械沉桩的施工方法开始使用 2. 土力学理论的建立为桩技术的发展奠定了理论基础 3. 桩的设计理论和施工技术比较简单,处于初级发展阶段 4. 桩的尺寸有所增大,直径约 30cm,桩长 900 ~ 1500cm

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	1. 多种桩型的出现与发展,形成现今桩基的各种不同体系 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 3. 人工成桩被复杂的机械和专门化的工艺所替代 4. 新型桩的出现,使桩的承载力得到极大的提高 5. 公路桥梁桩基础普遍采用大直径钢筋混凝土灌注桩 6. 大直径钻埋空心桩产生并发展

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 $2 \times 160\text{m}$ 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 ³)	承台混凝土(m ³)	基础混凝土(m ³)
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 in 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