

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

本书由“十二五”国家科技支撑计划课题“三峡水库常年回水区航运工程建设关键技术研究”（2011BAB09B01）资助出版

深水码头大直径

钢护筒嵌岩桩承载性状研究

SHENSHUIMATOU DAZHIJING GANGHUTONG QIANYANZHUANG
CHENGZAI XINGZHUANG YANJIU

王俊杰 刘明维 梁越 著



科学出版社

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

本书由“十二五”国家科技支撑计划课题“三峡水库常年回水区航运工程建设关键技术研究”(2011BAB09B01)资助出版

深水码头大直径钢护筒 嵌岩桩承载性状研究

王俊杰 刘明维 梁 越 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

钢护筒嵌岩桩已成为内河深水码头的主要基础型式之一。现有的设计理论中,钢护筒嵌岩桩仍按普通嵌岩桩考虑,即不考虑钢护筒的作用。事实上,由于钢护筒参与受力,使得钢护筒嵌岩桩的荷载传递机理和工作性状与普通嵌岩桩存在较大区别。本书通过大量试验研究和理论分析,在揭示钢护筒嵌岩桩的荷载传递机理基础上,查明其承载性状,进一步建立了其设计计算方法。

全书共7章,分别为绪论、国内外研究现状、钢护筒-混凝土界面剪切特性研究、钢护筒-地基土体界面力学特性研究、单桩模型试验、双桩模型试验、深水码头钢护筒嵌岩桩承载性状数值模拟。

本书适合水利工程领域研究人员、工程设计人员、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

深水码头大直径钢护筒嵌岩桩承载性状研究 / 王俊杰,
刘明维,梁越著. —北京:科学出版社,2015.6
ISBN 978-7-03-045127-9

I. ①深… II. ①王… ②刘… ③梁… III. ①深水码
头-嵌岩灌注桩-桩承载力-研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 133791 号

责任编辑:杨 岭 朱小刚 / 责任校对:葛茂香
责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:12 3/8 插页:12 面

字数:300千字

定价:75.00元

前 言

长江黄金水道货运量位居全球内河第一,发展内河航运对国家经济社会发展具有重大战略意义。国务院出台了一系列加快长江航运建设的意见,提出要建设长江经济带和全流域的黄金水道。建设现代化港口码头是保障内河航运发展的关键。三峡工程的建成与蓄水极大地改善了长江上游尤其是三峡库区的通航条件,然而,三峡蓄水后,过去一贯可资利用的码头建设施工枯水期再也不会出现,面临的是长时间的深水期(6个月以上)和水位陡涨陡落的洪水期(水位差超过30m),加之复杂的库岸地质条件,使传统码头形式难以满足现代航运发展的要求。复杂的水文地质条件催生了直立式深水框架码头这一新形式,并在重庆港寸滩码头、果园码头、纳溪沟码头等建设中得到成功的应用。大直径钢护筒嵌岩桩是直立式框架码头的基础形式,由桩芯钢筋混凝土及外衬钢护筒组成,桩芯混凝土与钢护筒共同承载。如何确定复杂水文地质条件下大直径钢护筒嵌岩桩的承载性状是码头设计中面临的首要问题。

在“十二五”国家科技支撑计划课题“三峡水库常年回水区航运工程建设关键技术研究”(2011BAB09B01)的支持下,本书作者对直立式深水框架码头钢护筒嵌岩桩的承载规律进行了大量研究。采用模型试验、数值模拟及理论分析相结合的方法,深入探讨了大直径钢护筒嵌岩桩承载过程中的荷载传递规律、极限承载能力与破坏模式。本书分析了桩基承载性状的影响因素,探索了钢-混凝土、钢-土界面接触规律对桩基荷载传递规律的影响,建立了钢护筒嵌岩桩承载数值模型,揭示了桩基承载机理,提出了桩基承载能力计算方法;在国内外规范的基础上,建立了直立式深水框架码头钢护筒嵌岩桩的设计方法。

本书共分7章,由重庆交通大学王俊杰教授、刘明维教授和梁越副教授共同撰写,全书由王俊杰教授统稿。重庆交通大学王多银教授、周世良教授、张小龙博士、赵迪博士、马伟硕士、潘琦硕士、高俊升硕士、贾理硕士、尹文硕士、卢孝志硕士、李鹏飞硕士、陶晶晶硕士、吴洋硕士、伍应华硕士及其他研究生参加了相关的科研工作,邱珍锋博士、程玉竹硕士和储昊硕士等做了大量的修订工作,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 长江上游码头建设常用基础型式	1
1.1.1 大直径嵌岩桩基础	1
1.1.2 大直径钢护筒嵌岩桩基础	3
1.1.3 嵌岩条形基础	3
1.1.4 非嵌岩条形扩大基础	4
1.1.5 低桩承台基础	4
1.2 大直径钢护筒嵌岩桩应用概况及存在问题分析	6
1.3 深水码头大直径钢护筒嵌岩桩承载性状研究意义	6
1.4 本书主要研究内容	7
第 2 章 国内外研究现状	8
2.1 大直径钢护筒嵌岩桩承载特性	8
2.2 嵌岩桩竖向承载特性	8
2.3 嵌岩桩水平承载特性	11
2.4 钢管—砼界面特性研究	12
2.5 嵌岩桩承载力常用计算方法	13
2.5.1 只考虑桩端阻力	13
2.5.2 只考虑嵌岩部分的侧阻力和端阻力	14
2.5.3 全面考虑覆盖土层的侧阻力、嵌岩段的侧阻力和端阻力	14
2.6 钢管混凝土柱的受力特性分析	15
2.6.1 钢管混凝土柱荷载传递机理的基本特征	15
2.6.2 钢管混凝土柱的承载力计算	16
第 3 章 钢护筒—混凝土界面剪切特性研究	19
3.1 引言	19
3.2 试验方法及试验方案	19
3.2.1 试件结构	19
3.2.2 试验仪器	20
3.2.3 试验方案	21
3.2.4 试件加工	22
3.3 平型界面试件试验结果分析	24
3.3.1 荷载—位移关系	24

3.3.2	抗剪强度—法向应力的关系	25
3.3.3	界面摩擦强度	26
3.4	凹型界面试件试验结果分析	26
3.4.1	界面破坏形态	26
3.4.2	荷载—位移关系	27
3.4.3	抗剪强度—法向应力的关系	29
3.4.4	界面摩擦强度	31
3.5	凸型界面试件试验结果及分析	32
3.5.1	界面破坏形态	32
3.5.2	荷载—位移关系	32
3.5.3	抗剪强度—法向应力的关系	35
3.6	钢—混凝土界面剪切特性描述	36
3.7	本章小结	38
第4章	钢护筒—地基土体界面力学特性研究	39
4.1	引言	39
4.2	影响钢—土界面特性的主要因素	39
4.3	试验方法及试验仪器	39
4.3.1	试验方法	39
4.3.2	试验仪器	40
4.4	试验方案及试验土料	41
4.4.1	简易直剪试验方案	41
4.4.2	改进直剪试验方案	43
4.4.3	试验土料制备	45
4.5	试验结果	46
4.5.1	简易直剪试验结果	46
4.5.2	改进直剪试验结果	53
4.6	钢—土界面抗剪强度指标影响因素分析	60
4.6.1	简易直剪试验	60
4.6.2	改进直剪试验	64
4.7	钢—土界面剪切特性数学模型	69
4.8	本章小结	71
第5章	单桩模型试验	72
5.1	引言	72
5.2	小比尺单桩模型试验	72
5.2.1	试验材料选择	73
5.2.2	加载方案设计	75
5.2.3	试验测点布置	76

5.2.4 试验结果分析	77
5.3 大比尺单桩模型试验	86
5.3.1 试验简介	87
5.3.2 试验结果分析	88
5.4 本章小结	91
第6章 双桩模型试验	92
6.1 引言	92
6.2 试验模型制作及数据采集	92
6.2.1 试验模型设计	92
6.2.2 试验模型制作	94
6.2.3 数据采集	97
6.3 普通嵌岩双桩模型试验结果及分析	99
6.3.1 荷载—位移关系	99
6.3.2 桩身弯矩	103
6.3.3 桩身挠曲	105
6.3.4 p - y 曲线	109
6.3.5 模型破坏模式	110
6.4 钢护筒嵌岩双桩模型试验结果及分析	114
6.4.1 荷载—位移关系	114
6.4.2 桩身弯矩	117
6.4.3 桩身挠曲	120
6.4.4 模型破坏模式	122
6.5 钢护筒对嵌岩桩承载性状的影响	125
6.5.1 钢护筒对荷载—位移关系的影响	125
6.5.2 钢护筒对模型破坏模式的影响	126
6.6 本章小结	127
第7章 深水码头钢护筒嵌岩桩承载性状数值模拟	128
7.1 钢护筒嵌岩桩数值建模	128
7.1.1 本构模型	128
7.1.2 接触面模型	134
7.1.3 初始地应力的处理	134
7.1.4 钢护筒嵌岩桩有限元建模实例	135
7.2 钢护筒嵌岩桩单桩承载性状数值模拟	136
7.2.1 模型参数	136
7.2.2 桩基竖向承载计算结果分析	136
7.2.3 桩基竖向承载影响因素分析	139
7.2.4 桩基水平承载计算结果分析	140

7.2.5 桩基水平承载影响因素分析	144
7.3 斜坡施工对桩基承载性状的影响	148
7.3.1 模型的建立	148
7.3.2 模型参数选取	149
7.3.3 岸坡回填方式对桩基承载性的影响的结果分析	150
7.3.4 影响因素分析	153
7.3.5 单因素敏感性分析	157
7.4 框架码头钢护筒嵌岩桩基础承载性状数值模拟	160
7.4.1 建立框架码头钢护筒嵌岩桩基础模型	160
7.4.2 数值模拟结果分析	162
7.4.3 框架码头钢护筒嵌岩桩基础承载影响因素分析	165
7.5 初次蓄水条件下框架码头桩基承载性状的数值模拟	172
7.5.1 模型建立	172
7.5.2 计算结果分析	173
7.6 水位骤降码头桩基承载性状数值模拟分析	178
7.6.1 数值模拟方案	178
7.6.2 水位降幅对码头桩基受力变形的影响	178
7.6.3 水位降速对码头桩基受力变形的影响	179
7.7 本章小结	180
参考文献	182
彩色图版	191

第 1 章 绪 论

1.1 长江上游码头建设常用基础型式

长江上游河段属于典型的山区河流。天然河段具有坡陡流急、水位变幅大，地形、地质条件复杂等特点。渠化河段通航条件大为改善，但仍然存在大水深(大于 20m)、年复出现大水位差(大于 20m)和大流速(大于 3m/s)的复杂水文条件，以及地质灾害频繁等问题^[1]。目前，长江上游(包括三峡库区)码头建设中常用的结构主要包括斜坡码头、架空直立式码头、桥吊码头、框架墩式码头、分级下河公路等型式^[2,3]。码头基础型式主要包括大直径嵌岩桩基础、大直径钢护筒嵌岩桩基础、嵌岩条形基础、非嵌岩条形扩大基础和低桩承台基础。

1.1.1 大直径嵌岩桩基础

大直径嵌岩钢筋混凝土灌注桩(简称大直径嵌岩桩)是指在工程现场通过机械钻孔等手段在地基中形成桩孔，在其内放置钢筋笼并灌注混凝土而成的，桩径大于 0.8m 的桩。大直径嵌岩桩具有单桩承载能力大、沉降小、抗震性能好、群桩效应小的优点^[4,5]，已成为库区岩石地基上架空斜坡码头、架空直立式码头、桥吊码头、墩式码头的主要基础型式，如图 1.1~图 1.4 所示。

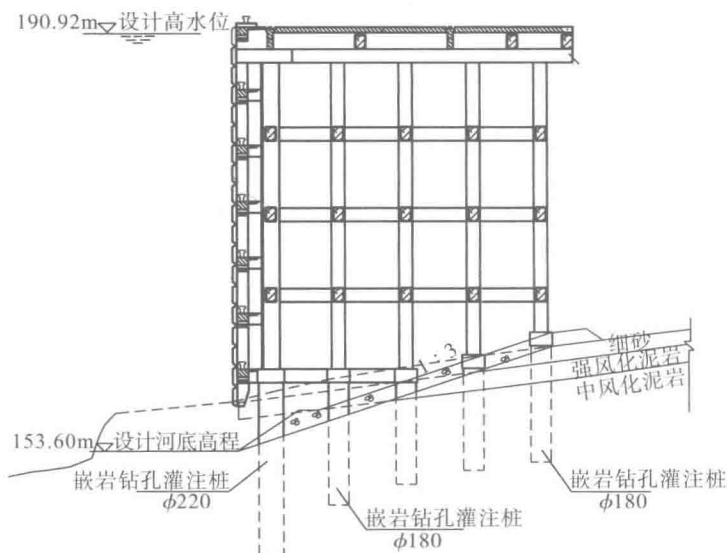


图 1.1 某架空直立式码头结构及其大直径嵌岩桩基础(单位: cm)

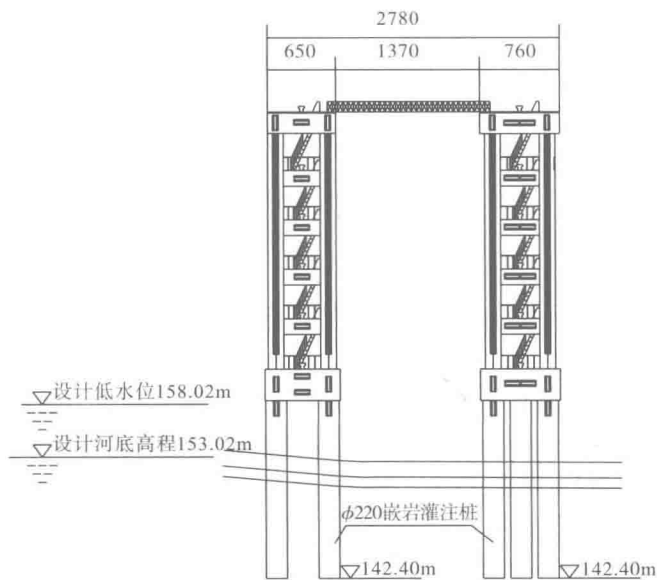


图 1.2 某框架墩式码头结构及其大直径嵌岩桩基础(单位: cm)

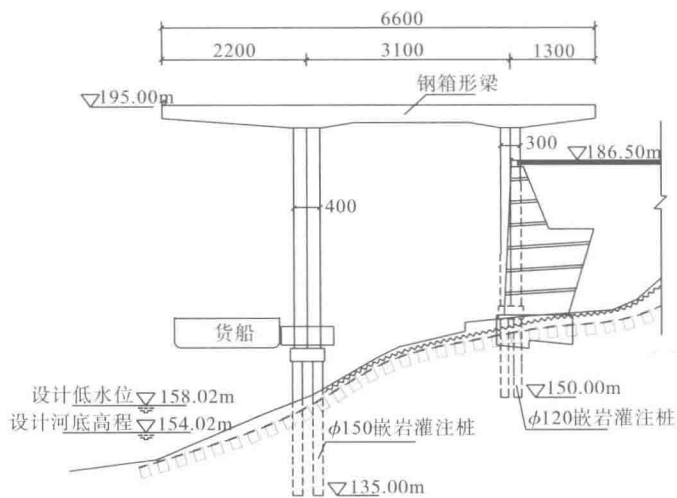


图 1.3 某桥吊码头及其大直径嵌岩桩基础(单位: cm)

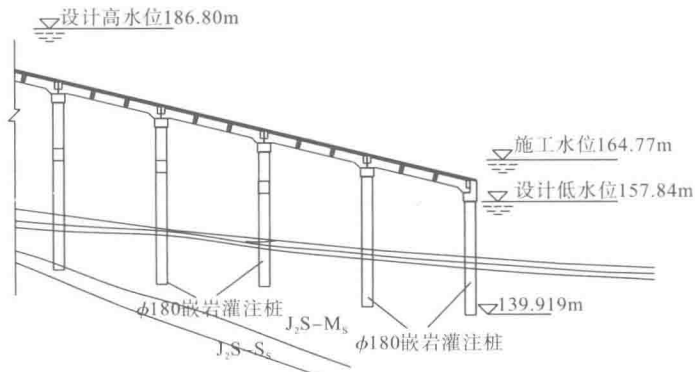


图 1.4 某架空斜坡码头及其大直径嵌岩桩基础(单位: cm)

大直径嵌岩桩基础需要进行现场钻孔和成桩,施工受水位影响较大,施工水位低,一般需要利用枯水期抢工完成。三峡工程蓄水至 175m 高程后,大型码头采用大直径嵌岩桩基础明显受到深水条件的影响。

1.1.2 大直径钢护筒嵌岩桩基础

大直径钢护筒嵌岩钢筋混凝土灌注桩(简称大直径钢护筒嵌岩桩)是在覆盖层较浅的深水码头和跨江桥梁建设中经常采用的深基础型式^[6]。在桩基施工前,在水上搭设钢平台,在钢平台上安装施工机械,施工时先打入钢护筒形成围堰,再在筒内进行钻孔、下钢筋笼、灌注混凝土,形成钢护筒和钢筋混凝土的组合桩基,桩径大于 0.8m。钢护筒是作为施工措施,钢筋混凝土是主要受力构件。内河深水码头大直径钢护筒嵌岩桩基础中钢护筒作为施工措施,施工完毕后一般不会拆卸,使用中钢护筒和桩芯混凝土具有明显的共同受力性质^[7]。大直径钢护筒嵌岩桩能满足深水码头建设需要,已在长江上游深水码头建设中推广使用(图 1.5),但其造价高,钢护筒和桩身混凝土界面受力复杂。

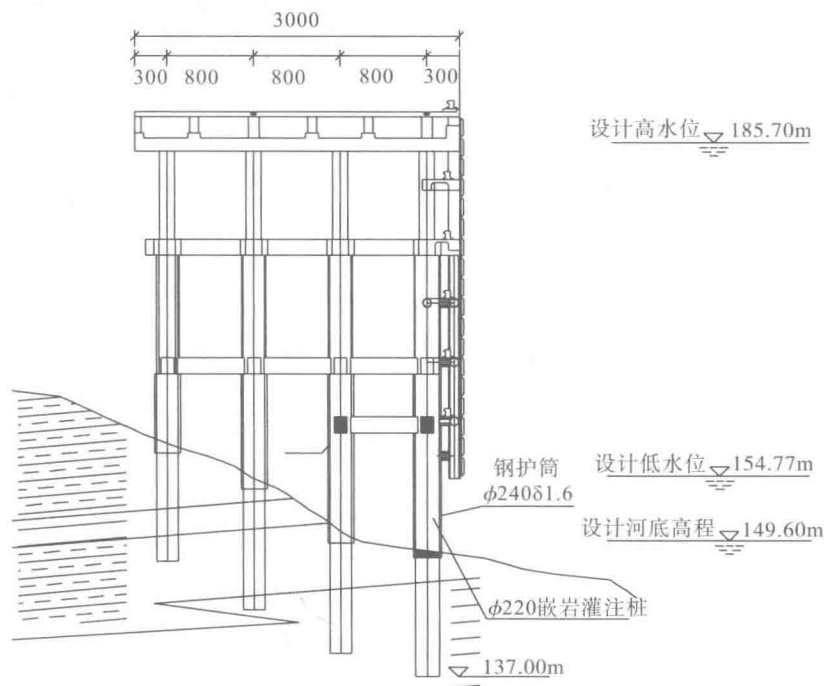


图 1.5 某架空直立式码头结构及其大直径钢护筒嵌岩桩基础(单位: cm)

1.1.3 嵌岩条形基础

在散货、中小型件杂货及滚装码头中采用分级直立式码头型式较多,直立岸壁一般采用挡墙型式。当挡墙高度大于 8m 时,挡墙基础通常采用嵌岩条形基础。基础为现浇混凝土或浆砌条石,基础进入中风化岩层一定深度(砂岩 0.6~1.0m,中风化泥岩 1.0~1.5m),如图 1.6 所示的下挡墙基础。嵌岩条形基础对地质条件要求高,对墙后荷载不

低桩承台基础的承台与桩基共同受力，既可以作为上部挡墙的基础，又对岸坡的稳定很有利。但是，低桩承台基础往往造价较高，施工有一定难度，且受水位的影响较大。

基于三峡库区沿岸主要港口码头调查，表 1.1 汇总了主要的码头基础型式。

表 1.1 三峡库区部分码头基础型式汇总表

序号	结构型式	码头名称	基础型式	泊位数
1	斜坡码头	九龙坡码头	大直径嵌岩桩、嵌岩条形基础	6
2		猫儿沱码头	大直径嵌岩桩、嵌岩条形基础	3
3		茄子溪码头	大直径嵌岩桩、嵌岩条形基础	4
4		朝天门码头	大直径嵌岩桩、嵌岩条形基础	3
5		果园码头一期	大直径嵌岩桩	2
6		东港一期码头	大直径嵌岩桩	2
7		重钢长寿码头	大直径嵌岩桩、嵌岩条形基础	5
8		红溪沟码头	大直径嵌岩桩、嵌岩条形基础	3
9	分级直立式码头	江津米邦沱码头	嵌岩条形基础	1
10		江津珞璜水泥厂码头	嵌岩条形基础	1
11		万州青草背一期码头	嵌岩条形基础	2
12		忠县复建码头	嵌岩条形基础	1
13	直立式码头	寸滩一期集装箱码头	大直径嵌岩桩	2
14		寸滩二期集装箱码头	大直径嵌岩桩	3
15		寸滩三期集装箱码头	大直径嵌岩桩	4
16		果园二期集装箱码头	大直径钢护筒嵌岩桩	5
17		果园二期及二期扩建集装箱码头	大直径钢护筒嵌岩桩	10
18		涪陵黄旗集装箱码头	大直径嵌岩桩	1
19		万州江南沱口	大直径嵌岩桩	2
20		公运公司纳溪沟码头	大直径嵌岩桩	2
21		江津东阳光公司码头	大直径嵌岩桩	2
22		重钢新港码头	大直径嵌岩桩	2
23	框架墩式码头	万州鄂渝钢铁码头	大直径嵌岩桩	2
24		维扬公司纳溪沟码头	大直径嵌岩桩	2
25		九龙坡大件码头锚地泊位	大直径嵌岩桩	1
26		重钢大宝坡矿石码头	大直径嵌岩桩	1
27	其他型式码头	各个港区的下河公路码头	嵌岩条形基础、非嵌岩条形扩大基础、低桩承台基础	—

1.2 大直径钢护筒嵌岩桩应用概况及存在问题分析

长江上游(包括三峡库区)码头建设中,在工程规模小、水深及水下工程量不大、地质条件较好、基础施工可进行围堰施工的情况下,码头基础可以采用大直径嵌岩桩基础、嵌岩条形基础、非嵌岩条形扩大基础或低桩承台基础等型式。对于库区大型深水码头,存在深水、大水位差的水文条件及薄覆盖层、裸岩、岩面起伏大的特殊地形地质条件,而采用大直径钢护筒嵌岩桩能够解决水下桩基础施工问题,因此,大直径钢护筒嵌岩桩基础在深水码头建设中的应用越来越广。目前,该型式已在重庆果园二期及二期扩建工程、万州新田港等内河码头工程,以及上海洋山港、浙江舟山港、浙江千岛湖大桥等大型码头和桥梁建设中获得应用。但是,大直径钢护筒嵌岩桩基础在设计、施工及使用中存在如下亟须解决的问题:

(1)大直径钢护筒嵌岩桩的理论研究成果较少,受力理论认识不清。目前,大直径钢护筒嵌岩桩采用的计算方法主要是通过钢管混凝土的套箍指标将钢管强度折算为混凝土强度来考虑其共同受力^[10],或者只考虑钢筋混凝土桩的单独受力,仅仅将钢护筒当作施工过程中的一道工艺,并不考虑钢护筒参与桩身受力。由于目前对钢-混凝土组合变截面桩的施工要求不完善,钢护筒段的桩基施工质量得不到保证,《港口工程桩基规范(JTS 167-4-2012)》中也未对钢护筒嵌岩桩作出具体规定,这种处理方式可能造成工程造价增大或存在安全隐患,因此亟须系统开展大直径钢护筒嵌岩桩承载性能研究。

(2)大直径钢护筒嵌岩桩施工工艺复杂,成本高,在一般中、小码头中的应用存在难度。由于大直径钢护筒嵌岩桩施工往往优先采用水上平台,必须考虑能承受大吨位钢护筒下放,钻孔机械施工及流速等荷载,还应满足冲刷要求;同时平台由辅助部分和钻孔平台两部分构成,结构较为复杂。因此,水上平台施工技术往往造价较高,施工难度大,亟须研究更为经济合理的施工技术。

(3)大直径钢护筒嵌岩桩基础在使用阶段的防腐蚀要求不容易保证,影响结构的耐久性。涂装防锈漆是内河港工和桥梁结构防腐体系中的首选方式。根据工程实践经验,目前的防锈漆能在5年左右有效保证防腐蚀效果。由于三峡库区水流速度大,江水挟沙,对大直径钢护筒嵌岩桩表面的防锈漆有很大的冲刷作用,缩短了防腐体系的防护年限,如不妥善处理将造成钢护筒锈蚀,桩基承载能力降低的严重后果^[11,12]。因此,开展大直径钢护筒嵌岩桩基础防腐技术研究也十分必要。

1.3 深水码头大直径钢护筒嵌岩桩承载性状研究意义

大直径钢护筒嵌岩桩是在覆盖层较浅的深水码头和跨江桥梁建设中经常采用的深基础型式。近年来,随着我国深水码头、高速公路、高速铁路等基础设施建设速度加快,大直径钢护筒嵌岩桩的应用越来越广泛^[13]。大直径钢护筒嵌岩桩主要由两部分组成:一是进入岩层较浅的钢护筒;二是钢护筒内嵌入中风化岩层一定深度的钢筋混凝土^[14]。在施工过程中往往以钢护筒的型式作为施工措施,在使用过程中钢护筒和桩芯钢筋混凝土具有明显的共同受力性质^[15]。码头下部结构的两层钢纵横联系梁及钢靠船构件都焊接在

钢护筒上,船舶撞击力等水平荷载通过钢护筒传递给整个桩基。

大直径钢护筒嵌岩桩虽然具有传统钢筋混凝土嵌岩桩和钢管混凝土桩(柱)的部分特性,但仍有其突出的特点。与传统钢筋混凝土嵌岩桩相比,由于桩芯混凝土浇筑于钢护筒中,钢护筒与桩芯混凝土具有共同受力特性。而与钢管混凝土桩(柱)相比,有以下三点不同:

(1)受荷性质不同。钢管混凝土桩(柱)主要承担轴向荷载,而深水码头大直径钢护筒嵌岩桩除承受竖向荷载外,还受到船舶撞击力、系缆力等水平循环荷载作用,且横向承载性能研究更为重要^[14]。

(2)联合受力机理不同。钢管混凝土桩(柱)主要利用轴向受压时钢管对核心混凝土的紧箍作用,使管内混凝土处于三向受压状态而提高其抗压强度。而大直径钢护筒嵌岩桩由于直径大(通常1.0~1.5m),钢护筒与钢筋混凝土进入基岩深度不同,钢护筒对混凝土的约束效应有限且无法保证两者协调工作,导致钢护筒与桩芯混凝土联合受力性能低于钢管混凝土桩(柱)。

(3)传力途径不同。钢管混凝土桩(柱)主要以轴向力的方式将上部荷载传递到基础或地基中,传递途径为上部荷载→钢管混凝土桩(柱)→地基(或基础)。大直径钢护筒嵌岩桩轴向承载与钢管混凝土桩(柱)类似,但承受船舶荷载(水平力)时的传力途径为船舶荷载→靠船构件→钢护筒→钢-混凝土界面→桩芯混凝土→地基。码头下部水平受力结构与钢护筒间通过焊接的纵横连系梁连接,水平力通过纵横联系梁传给钢护筒,再由钢-混凝土界面传递给桩芯混凝土,而并非直接作用于桩芯上。

复杂的结构受力特点使得大直径钢护筒嵌岩桩的设计计算面临很大困难。虽然国内外学者普遍认同钢管与桩芯混凝土具有共同受力的观点,但目前采用的计算方法主要是通过钢管混凝土的套箍指标将钢管强度折算为混凝土强度来考虑其共同受力,或者只考虑钢筋混凝土的单独受力。对大直径钢护筒嵌岩桩受力性质、变形特性认识不清,提出的设计方法存在局限,造成工程造价增大或存在安全隐患。

1.4 本书主要研究内容

为了查明大直径钢护筒嵌岩桩的承载性状,进一步完善大直径钢护筒嵌岩桩基设计理论,本书通过系统研究,查明钢护筒-桩芯混凝土界面及钢护筒-地基土界面的强度特性,揭示大直径钢护筒嵌岩桩受力机理及变形特性,提出适于工程应用的承载力及变形计算方法。主要研究内容包括:

- (1)钢护筒-桩芯混凝土界面特性研究。
- (2)钢护筒-地基土界面特性研究。
- (3)钢护筒嵌岩单桩模型试验研究。
- (4)钢护筒嵌岩双桩模型试验研究。
- (5)钢护筒嵌岩桩基数值模拟方法。
- (6)钢护筒嵌岩桩基设计技术研究。

第2章 国内外研究现状

大直径钢护筒嵌岩桩在港口工程、桥梁工程中应用广泛,但相关的研究成果不多,理论研究明显滞后于工程应用。目前,国内外学者对传统钢筋混凝土嵌岩桩以及钢管混凝土桩(柱)等桩基型式研究较多,成果较为丰富,可为大直径钢护筒嵌岩桩的研究提供参考。本书主要涉及大直径钢护筒嵌岩桩的竖向承载特性、水平承载特性、钢管-混凝土界面特性、嵌岩桩承载力计算方法等研究内容,下面分别论述相关研究现状及发展动态。

2.1 大直径钢护筒嵌岩桩承载特性

直接针对钢护筒嵌岩桩开展的研究较少,相关文献往往从实用的角度提出处理措施。国外的研究者注意到海洋环境下的带钢护筒基桩施工的特殊性,进行了桩头的接头试验及耐腐蚀环境的复合桩试验和理论研究^[16,17]。美国公路桥梁设计规范认为,永久钢护筒的壁厚大于3mm时,就可以认为它参与受力^[18]。日本大芝大桥则首次明确采用混合桩概念,采用带凸缘的线形钢管,使钢管本身与填充的钢筋混凝土达到整体受力作用^[19]。国内的研究者也注意到钢护筒对桩体强度提高的影响^[20,21],并认为在水平荷载产生的弯矩分配中不能忽略,但对钢护筒效应考虑与否,对桩体水平荷载下桩体位移的影响,以及与普通钢管桩相比其共同作用程度,均缺少量化分析。

随着跨海、跨江大桥的建设,桥梁钻孔灌注桩基础应用越来越普遍,在深水中施工的大直径钻孔灌注桩,需预先打设钢护筒形成围堰^[22]。钢护筒外径一般比设计桩径大0.2~0.4m,钢护筒长度一般为桩长的40%左右。成桩之后,因其拆除困难都被保留下来,成为永久桩体结构的一部分。桩体事实上形成了“上大下小”的变截面大直径混合桩:上部为类似钢管混凝土柱、下部为钢筋混凝土桩的混合桩身;在钢护筒范围内,由于钢护筒的环箍效应,在承受水平荷载时,该段桩体将呈现出钢管-混凝土组合结构的承载特性,称为钢护筒效应。目前的设计理论均忽略钢护筒的作用,为验算通过而需加大基桩截面或增加抗弯配筋措施,显著增大了工程造价。

钢护筒嵌岩桩作为跨海、跨江大桥的桩基时,由于其主要受到竖向荷载作用,在考虑钢护筒参与受力时,往往采用变截面桩混合桩的理论计算,受到横向外力时,缺少量化分析。而内河码头钢护筒嵌岩桩除承受竖向荷载以外,还要承受横向荷载(如船舶荷载)作用,目前相应的研究成果较少,理论研究严重滞后于工程实践,亟须开展相应研究。

2.2 嵌岩桩竖向承载特性

国内外学者通过现场试验、室内模型试验、理论分析及数值分析方法对嵌岩桩竖向承载特性展开多方面的深入研究,得到大量关于嵌岩桩桩侧摩阻力、桩端阻力、嵌岩深度、承载机理等方面的认识,丰富完善了岩石地区桩基的设计理论。

现场试验是研究嵌岩桩竖向承载机理最可靠的研究手段,完整的实测试桩资料不多。早在1969年Reese等在第7届国际土力学及基础工程会议上就发表了埋设量测元件的单桩桩身竖向荷载传递规律,得到实测桩端反力占桩身总荷载的15%~25%^[23]。Horvath等通过总结欧美地区大量试桩资料,在大量实测数据的基础上建立了桩侧阻力与岩石饱和单轴抗压强度的关系^[24,25]。传统观念认为,嵌岩桩属端承桩,直到史佩栋等通过对150例现场实测资料和2例原位观测资料的分析,得出嵌岩桩在竖向荷载作用下桩端阻力分担比随长径比变化的一般规律,探讨了不同长径比的嵌岩桩可能成为端承桩或摩擦型端承桩的必要条件^[26]。我国在修订《建筑桩基技术规范(JGJ 94—1994)》时提出嵌岩桩竖向承载力由桩侧土总阻力、嵌岩段总阻力和总桩端阻力3部分组成^[27]。2000年后,人们对嵌岩桩的认识不断深入,2008年我国新颁布《建筑桩基技术规范(JGJ 94—2008)》时将嵌岩段的桩端阻力和桩侧阻力综合考虑,该规范对嵌岩桩的竖向承载机理有了突破性的认识,但对影响其承载力的岩石条件、桩的尺寸、桩端条件及桩岩界面粗糙度等因素没有考虑,而且嵌岩桩的破坏模式不够完善^[28]。宋仁乾和张忠苗对杭州地区100多根嵌岩桩的试验资料进行分析,提出软土地基中不同桩径的桩具有不同嵌岩深度,不存在最大嵌岩深度^[29]。张建华通过对湿陷性黄土区大直径嵌岩灌注桩进行竖向静荷载试验和桩身应力测试,分析嵌岩桩的竖向承载特性和影响因素,得到桩岩胶结状况对桩的非嵌岩段有很大影响,且桩侧强化效应的产生与荷载大小有关^[30]。龚成中等基于自平衡测试法对大直径深长嵌岩桩的桩侧阻力进行研究,得到嵌岩桩的竖向荷载传递规律及软岩地区嵌岩深度对承载力的影响^[31]。刘衡采用现场静载试验和钻芯法进行桩身检测,研究表明,厚层沉渣严重削弱嵌岩桩的承载能力,其破坏型式是突然性的失稳破坏^[32]。汤洪霞等基于3根深嵌岩灌注桩的竖向静载荷试验,得到胶州湾填海地区全风化泥岩基地深嵌岩灌注桩的竖向荷载传递特性与传递机理^[33]。许建通过对新近厚填土地场的8根嵌岩试桩进行现场试验,研究不同土层的负摩阻力特性,得到试桩在正常施工和正常使用条件下桩身轴力变化趋势和负摩阻力特性的规律^[34]。

室内模型试验具有成本低、易控制、见效快的特点,在某些情况下可以替代原型试验。Pells等进行了室内模型试验,认为桩顶Q-S曲线的变化规律主要与桩—岩接触界面的粗糙度有关^[35]。四川省公路勘察设计院的4根模型嵌岩桩竖向承载试验表明,嵌岩桩的桩侧阻力从上层土至下层土逐层发挥,且存在一个临界荷载使上层土的阻力完全消失,桩底岩土刚度严重影响桩侧阻力的发挥^[36]。Johnston等通过常量法向刚度直剪试验,研究软岩嵌岩桩中桩岩剪切情形,得出软岩嵌岩桩桩侧阻力的发挥受制于桩径法向刚度常量的结论^[37]。Indraratna等也通过常量法向刚度直剪试验,研究了不同剪胀角情况下岩石的软弱夹层对桩侧阻力的影响^[38]。Gu和Haberfeld通过室内混凝土—玄武岩接触面的剪切试验模型研究嵌岩桩桩—岩界面的摩阻力特性,分析了围岩刚度、剪胀角和法向压