

苏州河河口水闸桩基础设计与检测

季永兴¹, 卢永金¹, 陈海英¹, 郑永明²

(1. 上海市水务工程设计研究院, 上海 200063; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要 简要介绍苏州河河口水闸工程及工程地质情况, 比选了钢管桩及钻孔灌注桩的工程应用可行性。应用 M 法和三维有限元法分别对直径 90 cm 和 60 cm 的钢管桩进行内力分析计算, 按地基土支承能力和桩身强度两种方式计算桩基承载力。根据条件分别选用钢管桩基础和钻孔灌注桩加钢套筒(即钢管混凝土桩)联合受力的设计方案。介绍了两种桩基的检测和两岸不均匀沉降测量结果。

关键词 钢管桩; 钢管混凝土桩; 承载力; 桩身强度; 苏州河河口水闸

中图分类号: TV66; TU473.1 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2007)S1-0044-04

随着国民经济发展及城市空间的变化, 大跨度桥梁、海上平台、港口码头建设及高层与超高层建筑不断涌现, 钢管桩基础以其承载力大、规格多、桩长易调整、挤土效应有限、对周边环境影响小、施工速度快、质量有保证、不易腐蚀等特点而被大量运用于大型及重要工程建设中。苏州河河口水闸工程是苏州河综合整治的重要工程, 其位于苏州河与黄浦江交界的河口——上海市的黄金地段, 地理位置重要, 工程施工空间小, 周边又有百年历史的俄罗斯领事馆、外白渡桥和重要的保护建筑物海鸥饭店、人民英雄纪念塔、黄浦江防汛墙等, 同时水闸承受巨大水平荷载, 施工要求不断航(苏州河航运)不断流, 所以设计拟采用钢管桩基础作为水闸闸墩基础。本文简要介绍苏州河河口水闸钢管桩基础的设计过程及桩基调整情况。

1 工程及地质概况

苏州河河口水闸采用液压水下卧倒门, 单孔净宽 100 m, 为国内外同类型水闸规模之最, 水闸主体结构均位于地面以下, 水闸配套用房拟置于南岸现有空箱式防汛墙下和闸墩内。工程防洪标准为 1 000 年一遇重现期, 相应的防御水位为 6.26 m, 工程等级为 I 等工程, 主体水工建筑物级别为 1 级, 主要包括: 基坑围护、基础钢管桩、闸墩、底板、水下防渗设施、防冲护坦、拦物防撞设施、钢闸门、启闭设备、电气自动控制系统等。水闸闸墩基础结构采用沉井式桩基承台结构, 边墩沉井尺寸为 30 m × 16 m × 7 m(长

× 宽 × 高), 中墩沉井为 18 m × 13 m × 4 m。沉井封底混凝土厚 2.0 m, 沉井底板厚 2.0 m, 沉井底板下设桩基础。沉井沉放采用不排水方法施工, 至设计标高后搁置在钢管桩顶, 钢管桩可以对沉井下沉的限位起到控制作用。边墩沉井结构见图 1。

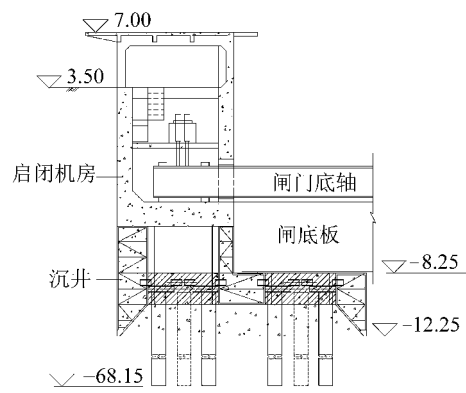


图 1 边墩沉井结构示意图

根据地质勘察, 拟建物性质和勘察深度范围内 ⑤₁₋₂ 层土由于土性差或埋深浅等原因不能作为桩基持力层, 同时区域内又缺失第 ⑥ 和第 ⑦ 层土, 可选择作为桩基持力层的有 ⑤₃ 层灰色粉质黏土、⑧ 层灰色粉质黏土及 ⑨ 层灰色砾砂。⑨ 层灰色砾砂是高强度低压缩性土, 对控制桩基沉降量很有利。各土层的物理力学性质指标及桩侧极限摩阻力标准值 f_s 值与桩端土极限端阻力 f_p 值如表 1 所示。

2 桩基础设计

2.1 桩基方案比较

根据地质条件、工程特性、周边环境及施工条

件 ,可采用的桩基形式主要为钢管桩和钻孔灌注桩。钢管桩与钻孔灌注桩各有优缺点 ,具体比较见表 2。

从结构本身而言 ,用钢管桩方案明显优于钻孔灌注桩方案 ,而且可以控制施工工期 ,但需采取较优的沉桩方案以减少沉桩对周边的影响。钻孔灌注桩方案沉降变形控制难度大 ,结构上必须加大桩径并配合钢套管 ,形成钢管混凝土结构^[1] ,受力才能满足结构要求 ,而且施工质量要求高 ,工期长。考虑施工方便、工程进度及经济等因素 ,并参考老闸桥桩基结构 ,推荐采用钢管桩结构 ,并建议在土塞效应的桩顶空腔内回填混凝土 ,以达到承担巨大水平力的要求。

2.2 桩基内力计算

根据地质勘察成果、沉桩可能性及沉桩施工对周边环境的影响情况 ,对桩基础进行了深入研究 ,考虑采用直径 90 cm 和 60 cm 两种钢管桩方案进行比较。边闸墩桩基础考虑桩数为 32 根 ,中间墩桩基础桩数为 24 根。考虑液压水下卧倒闸门底轴变形对基础沉降的要求非常高 ,所以将桩的持力层设为第

⑨层。因此 ,本工程的桩基属于典型的超长桩。桩基础内力计算采用 M 法和三维有限元法整体数学模型两种方法进行。

2.2.1 90 cm 桩方案

M 法计算所得的不同工况下桩基础的内力结果见表 3 ,三维有限元结构分析所得的不同工况下桩基础的内力结果见表 4。

按照中墩支墩结构 ,解析法计算假设中墩不受水平力 ,所以桩基础主要承担底板传来的竖直力 ,按均值考虑 ,中墩桩基础轴力 ,挡潮时 $N = 1\,900\text{ kN}$,挡内河水时 $N = 1\,830\text{ kN}$;三维有限元结构分析的中墩桩基础轴力 ,挡潮时 $N_{\max} = 2\,322\text{ kN}$,挡内河水时 $N_{\max} = 2\,490\text{ kN}$ 。

从三维有限元的应力图分析可知 ,边墩只有 2 ~ 3 根桩的应力比较大 ,绝大多数的内力与 M 法计算的结果接近。中墩因闸门主轴位置不对称 ,引起一侧内力大 ,一侧内力小 ,但均值与 M 法计算的结果比较接近。

表 1 部分土层物理特性指标及 f_s 、 f_p 建议值

土层 编号	土层名称	层厚/ m	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	压缩模量 E_s/MPa	静探/ MPa	预制桩		灌注桩	
							F_s/kPa	F_p/kPa	F_s/kPa	F_p/kPa
② ₃	灰色黏质粉土	0.00 ~ 3.00	4	32	10.78	2.15	15		16	
④	灰色淤泥质黏土	0.70 ~ 3.95	12	12	2.31	0.54	25		20	
⑤ ₁₋₁	灰色黏土	5.30 ~ 9.60	15	13.5	2.97	0.76	35		28	
⑤ ₁₋₂	灰色粉质黏土	2.02 ~ 25.4	12	23.5	4.57	1.20	50		40	
⑤ ₃	灰色粉质黏土	9.50 ~ 1.05	18	21.5	4.49	1.41	55	1700	44	700
⑧	灰色粉质黏土	13.0 ~ 19.5	15	24.5	5.36	2.12	70	2800	55	1400
⑨	灰色粗、中砂		0	39.0	18.03		110	8000	90	3000

注 :灌注桩直径超过 800 mm f_s 与 f_p 值作适当折减。

表 2 不同桩基方案比较

桩基形式	沉井限位情况	沉降控制情况	水平抗力情况	施工影响情况	施工工期	造价/(万元·根 ⁻¹)
钢管桩	自身可以满足对沉井下沉限位要求	沉降变形控制好	同直径状况下对水平弯矩和剪力抗力好	打桩影响大 ,借助措施可以满足要求	短	12.2
钻孔灌注桩	自身不能满足对沉井下沉限位要求 ,须通过留存钢套筒达到限位要求	沉降变形与施工质量(特别是清孔质量、混凝土收缩变形)有关 ,对施工质量要求高	通过加大桩径并留存钢套筒来满足要求	沉桩对周边影响相对较小	长	12.7 (混凝土 + 钢套管)

表 3 M 法计算的不同工况下边墩桩基础内力

工 况	水位/m	桩内轴力/kN		弯矩/(kN·m)		桩顶位移/cm		
		$N_{\max}$	$N_{\min}$	$M_{\max}$	$M_{\min}$	横河向	顺河向	竖直向
挡 潮	6.26 ~ 2.50	3050	- 333	990	125	1.1	0.8	2.9
挡内河	3.50 ~ 0.24	2451	560	963	797	2.6	0.9	1.3
挡潮(震)	5.65 ~ 2.80	2570	2100	1450	962	1.1	0.8	2.9
挡内河(震)	3.50 ~ 1.29	2310	1970	1340	760	2.6	0.9	1.3

表 4 三维有限元法计算的不同工况下边墩桩基础内力

工况	水位/ m	桩内轴力/kN		桩顶位移/cm			闸墩顶位移/cm		
		$N_{\max}$	$N_{\min}$	横河向	顺河向	竖直向	横河向	顺河向	竖直向
挡潮	6.26 ~ 2.50	2818		1.65	0.60	3.80	2.85	0.66	3.89
挡内河	3.50 ~ 0.24	3642		1.74	0.63	4.64	2.96	0.628	4.65

2.2.2 60 cm桩方案

M 法和三维有限元分析计算的不同工况下桩基础的内力结果如见表 5。

表 5 M 法和三维有限元法计算的不同工况下边墩桩基础内力计算结果

工况	水位/m	M 法				三维有限元法	
		桩内轴力/kN		弯矩/(kN·m)		桩内轴力/kN	
		N_{max}	N_{min}	M_x	M_y	N_{max}	N_{min}
挡潮	6.26 ~ 2.50	2 293	- 515	346	346	2 088	
挡内河	3.50 ~ 0.24	2 256	22	532	532	2 702	

中墩桩基础轴力与 90 cm 桩方案一致 ,挡潮时 $N = 1\,900\text{ kN}$,挡内河水时 $N = 1\,830\text{ kN}$;三维有限元结构分析的中墩桩基础轴力 ,挡潮时 $N_{max} = 2\,094\text{ kN}$,挡内河水时 $N_{max} = 2\,243\text{ kN}$ 。

2.3 桩基承载力计算

由于本工程桩基结构为钢管桩 ,所以桩基承载力确定需考虑按地基土支承能力和桩身强度两种方式取其小值。按地基土支承能力 根据上海市《地基基础设计规范》计算 ,90 cm 桩和 60 cm 桩不同位置单桩承载力计算结果见表 6。按桩身强度计算 ,考虑预留 2 mm 钢管桩锈蚀厚度 ,钢管桩壁厚为 18 mm ,90 cm 桩单桩设计承载力为 5 459 kN ,60 cm 桩单桩承载力为 3 205 kN。

由上述计算结果可以看出 ,超长钢管桩的承载力由桩身强度控制 ,设计取两种计算方式的小值 ,即 90 cm 桩和 60 cm 桩单桩设计承载力分别为 5 459 kN 和 3 205 kN。

2.4 桩基结构及桩位布置

综合桩基受力情况、经济性、沉桩可能性、沉桩影响及钢管桩制造可能性等多方面因素 ,确定采用直径为 60 cm 的钢管桩方案 ,钢管桩壁厚取 18 mm ,土塞效应的桩顶空腔内回填混凝土 ,共同分担巨大的水平力。考虑沉桩桩架高度和沉桩可能性 ,并考虑地层厚度 ,将桩长分节 ,接桩结构如图 2 所示 ,桩的分节情况见表 6。边墩桩基位置布置见图 3。

3 桩基调整

3.1 调整原因

为减少打桩对周边建筑物的振动影响 ,施工单位于 2003 年 10 月初提出在南、北岸地下基坑围护内进行高喷注浆 ,高压旋喷桩桩长 64 m ,桩径 $\varnothing 600$,

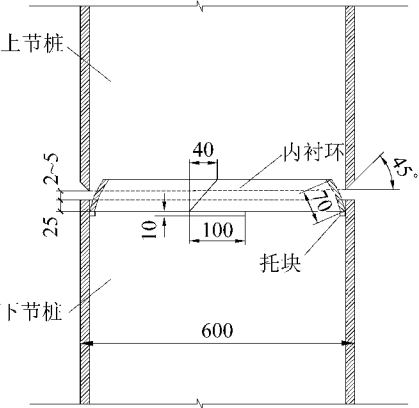


图 2 接桩结构示意图

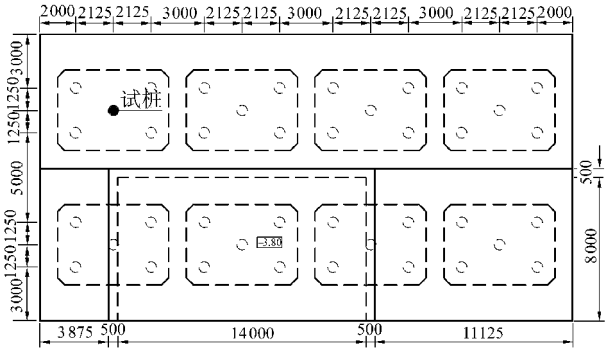


图 3 边墩桩位布置示意图

高喷压力为 36 MPa。经论证认为高喷注浆隔振措施可以尝试。11 月 15 日 ,在位于北岸的俄罗斯领事馆范围内地面发生裂缝 ,高喷注浆立即停止。据此 ,笔者等研究北岸边墩钢管桩调整为钻孔灌注桩加钢管套管联合受力(即钢管混凝土桩)的可行性。

3.2 北岸桩基受力分析

根据上部金属结构对沉降变形要求及工程地质情况 ,分析认为钻孔灌注桩的桩底标高仍应维持原提出的第⑨ 层土。钻孔灌注桩的桩径受已预制钢壳沉井尺寸限制 ,以及规范对桩的最小间距不小于 2.5 倍桩径的限制 ,桩径最大只能取 $\varnothing 1\,000$ 。桩数维持原设计的 40 根。M 法计算的挡潮和挡内河水工况下桩基础的最大轴力和最大弯矩分别为 257 kN 和 1 045 kN·m。桩基承载力按桩身强度(C30)计算为 11 775 kN ,按地基土支承能力计算可以达到 6 372 kN ,两者取小值应为 6 372 kN。

3.3 北岸桩基桩身结构

考虑桩基上部为淤泥质土 ,为成孔安全、沉井限位搁置要求及承担巨大水平力的要求 ,采用留存钢

表 6 不同位置桩长、分节及按地基土支承能力计算的单桩承载力

位 置	桩顶标高/m	第 1 节/m	第 2 节/m	第 3 节/m	合计桩长/m	桩底标高/m	单桩承载力/kN
北岸边墩	- 9.45	20.0(22.0)	20.0	21.7(19.7)	61.7	- 71.15	9 145/5 379
中 墩	- 9.45	20.0(22.0)	20.0	19.7(17.7)	59.7	- 69.15	8 909/5 223
南岸边墩	- 9.45	20.0(22.0)	20.0	18.7(16.7)	58.7	- 68.15	8 896/5 215

注 :单桩承载力为按地基土支承能力计算的结果 ,表示为 90 cm 桩 /60 cm 桩。有括号的数表示桩节有长有短。

套筒受力,钢套管的直径根据钻孔灌注桩成孔要求采用 $\varnothing 1100$,考虑锈蚀2 mm,结合桩身受力要求,套筒壁厚厚度为12 mm,相应的灌注桩桩身配筋为 $\varnothing 25@150$ 。施工钢套管留存在基础内作为结构抗弯、抗剪、沉井搁置构件。

3.4 南岸桩基影响分析

南岸桩基是否调整受多种因素影响：

a. 变形控制是本工程桩基的关键,原设计的钢管桩桩基方案能有效地控制自身沉降、沉降差异、自身变形等影响,而钻孔灌注桩加钢套管结构虽然加大桩径,并留存钢套管承受水平力,能够满足结构受力要求,但钻孔灌注桩(特别是超长桩)的控制变形能力(桩身变形及桩体下卧土层变形)受施工质量影响较大,较钢管桩难控制。

b. 北岸调整为钻孔桩后,南岸是否调整取决于钻孔桩的施工质量及南、北岸边墩不均匀沉降情况。定性判断,钢管桩比钻孔桩的沉降小,在中墩已经沉桩结束的前提下,南、北岸均为钢管桩,北岸为钻孔桩、南岸为钢管桩,南、北岸均用钻孔桩,这3个方案中对结构的不均匀沉降影响情况是前者比后者小(表7)。

c. 南岸钢管桩已经预制,如果调整南岸桩基方案,则可能有部分经济损失。若由钢管桩改为钻孔灌注桩加预留钢套管受力的方案,一个边墩的桩基费用会增加约20万元。工期上,如果每个边墩考虑2台成孔设备同时施工,因要错位施工,还要加上混凝土龄期和桩顶凿除工期,所以采用钻孔桩工期会增加。

d. 南岸人民英雄纪念碑、外滩历史纪念馆等建筑均为现代建筑,有较长的桩基础,相对北岸俄罗斯领事馆而言,对沉桩要求宽松得多。

综合而言,采用钢管桩方案,沉井下沉更方便,工期短,投资省,质量控制有把握,在严格控制沉桩顺序及速度的情况下对环境的影响是可以控制的。与钻孔桩方案相比,钢管桩方案工程质量风险小,因此南岸维持钢管桩设计方案,北岸调整为钢管混凝土桩方案,并要求钻孔桩预留注浆管,待成桩结束后进行桩底注浆。

表7 南北岸不同桩基方案及施工质量对底板变形影响比较表

北 墩			中墩	南 墩	底板形状示意
钢管桩、硬			硬	钢管桩、硬	
钻孔桩、质量好、硬			硬	钢管桩、硬	
钻孔桩、质量差、软			硬	钢管桩、硬	
钻孔桩、质量好、硬			硬	钻孔桩、质量好、硬	
钻孔桩、质量好、硬			硬	钻孔桩、质量差、软	
钻孔桩、质量差、软			硬	钻孔桩、质量差、软	
钻孔桩、质量差、软			硬	钻孔桩、质量好、硬	

4 桩基检测

由于工程地质复杂及承受巨大荷载,所以为进一步验证桩基的垂直承载力,验证确定钢管桩接桩方法、钻孔灌注桩施工质量、沉桩方法、使用设备和施工停止沉桩的控制标准,根据规范要求对桩基础进行了静荷载测试和动力测试。

4.1 静荷载测试

静荷载测试采用锚桩反力法,试验桩采用1个隔仓的中间位置桩,其余4个桩作为反力桩(图3)。试验加载级差为600 kN,其中第1级为1200 kN,卸载按加载分级量的2倍进行。试桩的荷载-沉降(Q-S)曲线如图4所示。试桩结论:单桩极限承载力不小于6600 kN,相应的桩顶总沉降为55.30 mm,卸载后桩顶残余沉降为4.39 mm。

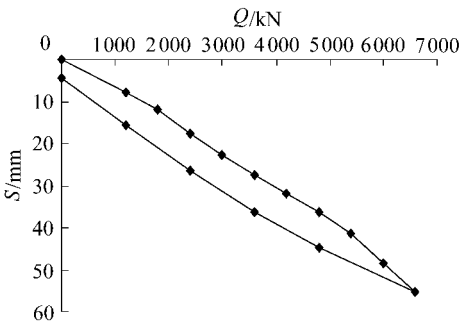


图4 钢管桩试桩 Q-S 关系曲线

4.2 动力测试

采用美国PDI公司的打桩分析仪对3根钢管桩作高应变动测,锤击采用液压锤进行。高应变动测的力-速度随时间变化曲线如图5所示(F表示力,

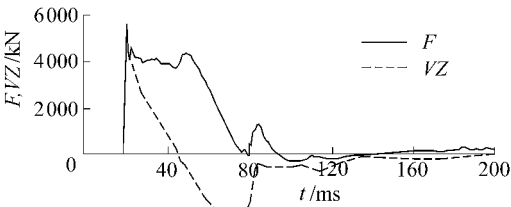


图5 钢管桩试桩实测曲线

(z=1348.3 kg/s,最大力波第1个峰值的时间为27.2 ms)

小 不同门顶高程下的试验结果见表 3。

表 3 不同门顶高程排涝时黄浦江的允许水位

序号	门顶高程/m	黄浦江允许水位/m
1	3.0	1.29
2	2.5	≥1.5
3	2.0	≥2.0
4	1.5	≥2.5
5	1.0	≥3.0

注:相应的苏州河水位为 3.5 m。黄浦江水位 1.29 m 为给定水位,此时河道无明显冲刷。

3 结 语

本文研究结果表明,解析计算和数值模拟结果吻合程度较好,最大流速出现位置几乎一致,满足河床不冲的流速影响范围也基本一致。解析计算的结果可以作为设计控制的参考依据,数值模拟结果更直观地反映了垂直流场的情况,特别是局部流速分布。解析计算、数值模拟和物理模型试验结果均表明,闸门运行时不仅要控制上下游水位差,还需要严

(上接第 47 页) V 表示桩尖速度, Z 表示桩身材料阻抗)。采用 CASE 法对动测结果进行分析计算,并采用 CAPWAPC (case pile wave analysis program-continuous version) 进行曲线拟合,结果 3 根桩的极限承载力分别为 6 070 kN, 6 390 kN, 6 150 kN, 桩身完整性为 100%。

采用弹性波反射法对 40 根钢管混凝土桩进行低应变动力测试,Ⅰ类无缺陷完整桩占 80%,Ⅱ类有轻度缺陷,但不影响或基本不影响远射击桩身结构强度的桩占 20%,无其他明显缺陷桩。

4.3 南、北岸沉降观测

为掌握南、北岸不均匀沉降情况,自工程开始就由施工、监理及第 3 方对整个过程进行监测。在南、北闸墩施工完毕后的 4 个月内,单墩高程最大变化为 3 mm,说明南、北闸墩基本处于稳定状态。

5 结 语

在苏州河河口水闸建设中,应用钢管桩与钢管混凝土桩的独特优势,承载巨大垂直立与水平力,采取挤土效应相对小、对周边环境影

响小、施工速度快、质量有保证的施工方

案,为工程安全和顺利实施提供了保障,工程检测结果良好。

研究中发现超长钢管桩的承载能力不仅受地基土支承能力的控制,而且桩身强度也是影响承载能力的重要因素,设计中应综合各方面因素进行取值。采用钻孔灌注桩加钢套筒的设计方案同样可以满足承担巨大水平荷载、减少对周边环境的影响、保证混

参考文献:

[1] 季永兴. 不对称布置的泵闸枢纽工程水流问题分析 [J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(1): 58-59, 68.

[2] 许荫椿, 胡德保, 薛朝阳. 水力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.

[3] SL 265—2001, 水闸设计规范 [S].

[4] 河海大学水利水电工程学院. 苏州河河口水闸工程整体水工模型试验报告 [R]. 南京: 河海大学水利水电工程学院, 2003.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 高建群)

凝土顺利实施等功效,但施工进度较慢,造价较高,同时为防止桩底清基影响,建议采取桩底注浆措施控制沉降。

参考文献:

[1] 季永兴, 卢永金, 陈文伟, 等. 苏州河河口水闸工程设计特色 [J]. 上海水务, 2006(2): 3-5.

[2] 季永兴, 卢永金, 张永宝, 等. 苏州河水闸边墩沉井沉放影响分析与对策 [J]. 城市道桥与防洪, 2005(2): 87-90.

[3] 黄明奎, 汪稔, 李斌, 等. 钢管混凝土结构在桩基工程中的应用探讨 [J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 550-552.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 高建群)

