

苏州河河口水闸差异沉降控制方案

缪圆冰¹ 夏才初² 季永兴³ 郑永明⁴

(1. 福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海市水务工程设计研究院, 上海 200063; 4. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要 针对苏州河河口水闸闸底板差异沉降小于 1.5 cm 的设计要求, 建立水闸整体三维有限元模型, 并进行多方案数值模拟, 寻找控制差异沉降的有效方法。通过对中闸墩桩基的敏感性分析, 发现增加中桩或减少边桩控制沉降效果甚微, 桩长、桩基分布及桩底持力层才是关键因素。综合考虑, 最终方案确定为边闸墩基础采用 40 根直径为 60 cm 的钢管桩, 中闸墩基础加宽, 采用 4 排共 24 根直径为 60 cm 的钢管桩。

关键词 水闸; 差异沉降; 三维数值模拟; 桩基调整; 苏州河河口

中图分类号: TV66; TU478

文献标识码: B

文章编号: 1006-764X(2007)S1-0063-04

苏州河河口水闸采用单跨 100 m 水下卧倒式闸门结构, 闸门通过底轴及 10 个轴承座与闸底板相连, 闸底板搁置于 3 个闸墩上, 闸墩基础结构采用钢壳沉井式承台, 下设桩基础。因此, 闸底板的变形直接影响闸门的运行可靠性, 闸底板的差异沉降控制成为水闸设计的关键点之一。

目前对于高层建筑桩基础的差异沉降控制已有较多研究, 思路主要是建立结构与桩基共同作用的数值模型, 通过调整上部结构、地基或基础的刚度进行计算比较, 达到减小差异沉降的目的。宰金珉^[1]提出在基底设置变刚度垫层以调整地基刚度的方法, 刘金砺等^[2]通过上部结构-基础-地基共同作用研究, 提出了变刚度调平优化设计的概念与方法, 张建辉等^[3]对基于差异沉降最小的桩筏基础布桩进行分析, 黄斌等^[4]采用三维有限元法研究在同一基础下不同桩型情况时各桩沉降和刚度的关系, 探讨通过改变桩型来控制差异沉降的方法, 杨敏等^[5]按桩基沉降控制原理提出高层建筑长短桩组合桩基础设计思想, 乔志炜等^[6]利用有限元方法对竖向荷载作用下复合桩基的沉降进行计算分析, 讨论设置变刚度垫层, 改变桩长、桩径、桩距及布桩方式对基础差异沉降和内力的影响。

差异沉降是造成水工构筑物破坏的原因之一^[7-8], 实际工程中由差异沉降造成的水闸结构破坏时有发生^[9-11]。因此, 差异沉降控制是软土地基上

水闸设计的一个关键因素。苏州河河口水闸建于典型的上海软土地基上, 目前对这种水闸基础的差异沉降控制研究较少。在水闸基础设计过程中, 本文针对该水闸结构的特殊性, 同时借鉴建筑桩基变形控制的理论与研究方法, 采用三维有限元法进行多种方案的数值计算, 分析控制差异沉降的主要因素, 并据此对结构进行优化和调整, 从而提出最终设计方案, 有效地控制了差异沉降。

1 工程概况

苏州河河口水闸位于上海市区苏州河与黄浦江交界河口, 闸孔净宽为 100 m, 要求其具有双向挡水和综合调水的功能, 正向挡水设计挡苏州河水水位差为 3.76 m, 反向挡潮设计挡黄浦江潮水水位差为 3.46 m。水闸工程防洪标准为千年一遇重现期, 相应防御水位为 6.26 m, 主体水工建筑物级别为 I 级, 抗震按基本烈度 7 度设防。场地位于长江三角洲入海口东南前缘, 其地貌属于上海地区四大地貌单元中的滨海平原类型, 在所揭露深度 85.0 m 范围内的地基土均属第四系沉积物。

综合功能、景观等要求, 设计门型选用了单扇液压水下卧倒门, 采用 100.0 m × 7.76 m 翻板闸门作为挡水结构, 翻板闸门门叶由底轴直接驱动旋转, 转角范围 0 ~ 90°, 闸门底轴通过 10 个支点支承于底板之上。闸底板为钢筋混凝土预制沉箱, 尺寸为 99 m ×

14 m × 6.35 m(长 × 宽 × 高),其受力通过 4 条平板橡胶支座传递到 3 个闸墩上,类似于两跨连续梁结构。边闸墩上部为钢筋混凝土箱形结构,下部为预制中空钢质沉箱,尺寸为 30 m × 16 m × 7 m;中闸墩为预制中空钢质沉箱,尺寸为 18 m × 13 m × 4 m,闸墩基础采用钢管桩。水闸结构示意图见图 1。

水闸的翻板钢闸门所承受最大水压力达到 32 076 kN,该压力由底板、边墩、中墩和桩基础联合承受,由于施工期间的通航要求,一百多米跨度的底板仅设置了 3 个闸墩,且中墩相对较为薄弱。而单扇液压水下卧倒门对机械制作精度要求极高,要求闸底板的差异沉降小于 1.5 cm,水平向差异位移小于 2 cm,且闸门检修困难,必须达到 30 a 免维护。在上海的软土地质条件下,这样严格的变形控制对水闸基础的设计提出了很高的要求。

初步设计方案中两个边闸墩桩基础分别采用 32 根直径为 90 cm 的钢管桩,中闸墩桩基础采用 18 根直径为 90 cm 的钢管桩,桩底高程为 -42 m,桩长 30 m,桩基持力层为⑤₃层灰色粉质黏土。而最终采用的设计方案为边闸墩基础分别采用 40 根直径为 60 cm 的钢管桩,中闸墩基础采用 24 根直径为 60 cm 的钢管桩,桩底高程为 -72 m,桩长 60 m,桩基持力层为⑨层灰色砾砂。

2 计算与分析

2.1 三维有限元计算模型

采用大型通用有限元软件 Marc 对水闸进行整体三维有限元计算,根据初步设计方案以及地质勘察报告等相关资料,在 Marc 有限元分析软件中建立了三维有限元模型。为消除边界效应对计算结果的影响,三维有限元的计算范围远大于主要结构的尺寸,图 2 为剖分得到的三维有限元网格,共计 35 883 个单元,37 089 个结点。本工程主要构件为沉箱、桩以及底板,模型基本按照实际的几何尺寸建立,其网格划分及相互连接见图 3,其中 x 轴沿闸门轴线方向, y 轴沿河道轴线方向, z 轴沿铅垂线方向。采用八结点六面体块体单元模拟土体和沉箱,采用薄板单元模拟闸底板,采用三维杆单元模拟桩。

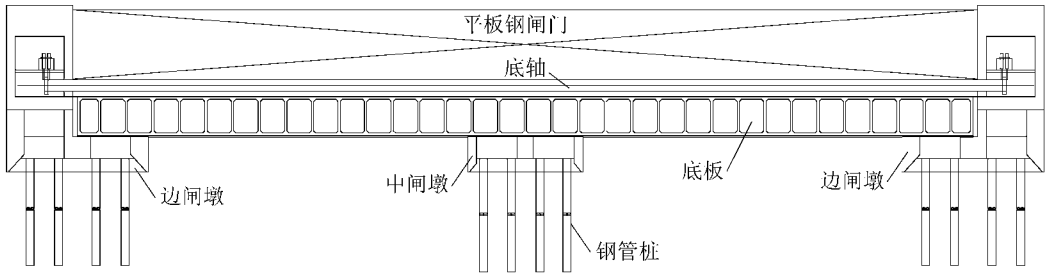


图 1 水闸结构示意图

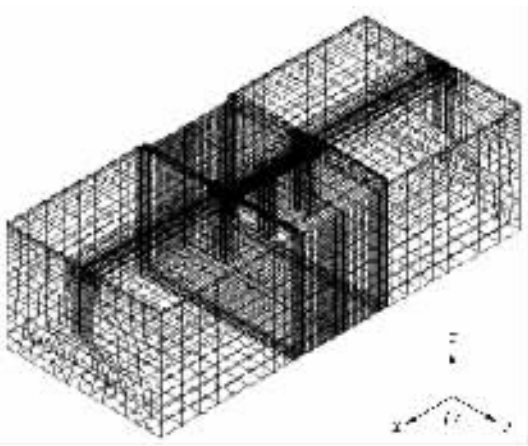


图 2 整体三维有限元模型

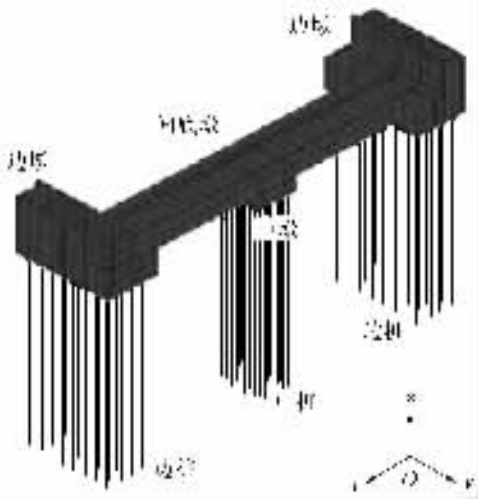


图 3 主要结构网格

土层的划分和计算参数基本根据地质勘察报告^[12]确定。在有限元计算时,按照上海地区的工程经验,将土体压缩模量的 2~4 倍作为计算分析所需要的变形弹性模量,本报告取压缩模量的 3 倍。模型中使用的土层参数见表 1。

计算时考虑两种工况。工况 1(反向挡潮):苏州河水位 2.50 m,黄浦江水位 6.26 m,水位差 3.76 m。工况 2(正向挡水):苏州河水位 3.50 m,黄浦江水位 0.24 m,水位差 3.26 m。

已知边界条件均取为位移约束条件,其中上部边界为自由边界,下部边界固定 z 方向位移,前后边界固定 y 方向位移,左右边界固定 x 方向位移。计

算时在河底及河岸两侧施加水荷载 ,而闸门两侧的水位差和自重产生的水平推力和竖向力则转化到分布于闸门底轴的 10 个结点上。在底板上施加闸门两侧水位差产生的水压力 ,沉井底部施加浮托力 ,两侧沉井内施加灌水产生的水压力 ,邻河侧面施加水压力。另外在两边沉箱中的启闭机位置上施加了相应的集中力(油泵提供的作用力)。

表 1 土层计算参数

序号	土 层	弹性模量/ kPa	泊松比	密度/ (t·m ⁻³)	层底标高/ m
1	①层杂填土	9600	0.40	1.74	3
2	② ₃₋₁ 层灰色黏质粉土	29565	0.35	1.87	-6
3	④层灰色淤泥质黏土	6660	0.40	1.73	-11
4	⑤ ₁₋₁ 层灰色黏土	9100	0.40	1.79	-17
5	⑤ ₁₋₂ 层灰色粉质黏土	13850	0.36	1.82	-28
6	⑤ ₃ 层灰色粉质黏土	14780	0.36	1.89	-52
7	⑧层灰色粉质黏土	16950	0.36	1.84	-72
8	⑨层灰色砾砂	53890	0.35	2.03	

2.2 初步设计方案计算结果及对策分析

首先按照初步设计方案建立模型进行有限元计算 ,即桩底高程 -42 m ,中桩 18 根 ,边桩各 32 根 ,桩径为 90 cm。计算得出挡潮工况底板的最大沉降为 7.634 cm ,最小沉降为 4.379 cm ,差异沉降为 3.255 cm ;挡水工况底板的最大沉降为 8.088 cm ,最小沉降为 5.087 cm ,差异沉降为 3.001 cm。

从计算结果看出 ,底板的差异沉降远大于设计要求的 1.5 cm ,因此必须修改设计。文献 [6] 指出 ,控制差异沉降的主要途径有 :①加强上部结构刚度 ;②调整地基的刚度 ;③调整基础的刚度。对本工程而言 ,减小差异沉降的方法无非以下 4 种 :

a. 改变结构形式。对结构形式进行适当调整是控制差异沉降的一种有效方法。在本工程中 ,闸底板如果能够增加 1 跨 ,或者将位于边墩上的支座位置内移至两侧沉井内边缘 ,从结构受力上来说会更加合理 ,变形也会相应减小。但由于施工期间的通航等要求以及防止边墩承受大偏心荷载 ,底板的总体结构形式已经无法改变。

b. 改变荷载分布。通过在沉井中灌水 ,以及在底板靠近边墩两侧灌注混凝土来加大边墩的荷载 ,以此加大边墩沉降减小差异沉降。但从修改有限元模型得到的计算结果来看 ,效果并不明显。

c. 加大结构刚度。底板和闸墩均为钢筋混凝土结构或钢结构 ,刚度较大。通过加硬桩基下部土体的计算发现 ,由结构本身挠度产生的闸门轴线上的差异沉降很小 ,仅为 0.41 cm ,因此大部分沉降是由土体的变形和桩基的下沉引起的。

d. 调整桩基。从以上分析来看 ,对本工程而言 ,调整桩基础是唯一的可行方法。调整桩基包括

调整桩基分布、桩基长度、桩径等 ,以下是对这几个方面的探讨。

2.3 桩基长度影响分析

第一次修改的方案是将桩基加长 10 m ,其余均不变 ,即桩底标高 -52 m ,桩基长度 40 m ,桩基持力层仍为 ⑤₃ 层灰色粉质黏土。计算得出挡潮工况底板的最大沉降为 6.852 cm ,最小沉降为 3.831 cm ,差异沉降为 3.021 cm ;挡水工况底板的最大沉降为 6.982 cm ,最小沉降为 4.323 cm ,差异沉降为 2.659 cm。从计算结果看出 ,虽然沉降量和差异沉降量都有一定程度的减小 ,但还是远不能满足设计要求。

通过调整三维有限元模型 ,得到挡潮工况下不同桩长水闸底板的沉降计算结果 ,如表 2 所示。从表中可以看出 ,桩长的调整对总沉降量及差异沉降的影响较为显著。当桩长为 60 m (桩底标高 -72 m) 时 ,闸底板最大差异沉降差仅为 1.37 cm。

表 2 不同桩基长度下的沉降计算结果

桩基 长度/m	最大沉降/ cm	最小沉降/ cm	最大差异 沉降/cm	桩基持力层
30	7.634	4.379	3.255	⑤ ₃ 层灰色粉质黏土
40	6.852	3.831	3.021	⑤ ₃ 层灰色粉质黏土
50	4.870	3.250	1.620	⑧层灰色粉质黏土
60	3.650	2.280	1.370	⑨ 层灰色砾砂

2.4 中桩敏感性分析

相对增加桩长而言 ,调整桩基分布是较为经济的方法 ,以往的文献也给出了不少建筑工程中成功应用的实例 [3-6]。因此 ,在挡潮工况下桩长 50 m 时对中桩进行了敏感性分析 ,分别计算了无中桩、1 排中桩、2 排中桩、3 排中桩、4 排中桩以及 3 排中桩加硬桩下土这 6 种方案。底板沉降计算结果见表 3 ,各工况下底板闸门轴线位置的挠曲线见图 4。从计算结果中可以看出 :①在没有中桩的情况下 ,闸门轴线上最大差异沉降达 5.01 cm。随着中桩排数的增加 ,差异沉降显著减小。②3 排中桩与 4 排中桩的结果十分接近 ,即在桩长一定的情况下 ,中桩的排数增加到 3 排后 ,若再增加排数 ,对底板的差异沉降影响就十分微弱了。③从 3 排中桩加硬桩下土的计算结果看出 ,当桩底土层较好时 ,闸门轴线上最大差异沉降仅为 0.41 cm。

表 3 中桩敏感性分析计算结果 cm

中桩方案	最大沉降	最小沉降	最大差异 沉降	闸门轴线上 最大差异 沉降
无中桩	8.84	3.46	5.38	5.01
1 排中桩	5.50	3.30	2.20	2.17
2 排中桩	4.95	3.26	1.70	1.66
3 排中桩	4.87	3.25	1.62	1.59
4 排中桩	4.86	3.24	1.62	1.58
3 排中桩 加硬桩下土	0.52	0.085	0.43	0.41

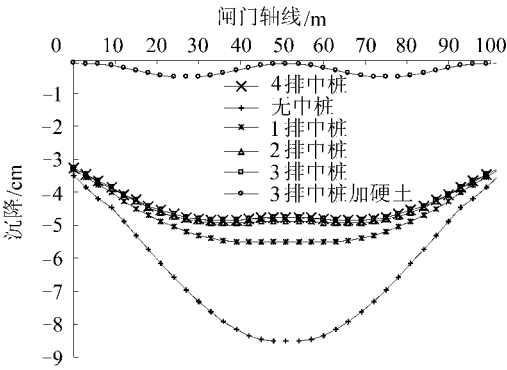


图4 各工况下闸底板挠曲线

2.5 桩径影响分析

设计过程中考虑了静压沉桩的施工难度及沉桩施工对周边环境的影响,对采用直径为 60 cm 钢管桩与 90 cm 钢管桩两种方案进行了比较,见表 4。从表 4 中看出,在相同条件下采用直径为 90 cm 的钢管桩对控制闸门轴线上差异沉降较为有利,但影响也不大。结合数值计算的结果,并综合考虑桩基受力、经济性,特别是考虑捶击沉桩或静压沉桩的可能性,以及沉桩对周边俄罗斯领事馆、海鸥饭店等重要建筑物的影响,最终采用的方案是桩长由 30 m 增加至 60 m,加宽中闸墩,中桩采用 4 排共 24 根直径为 60 cm 的钢管桩方案。

表 4 不同桩径底板位移计算结果 cm

工况	桩径	最大沉降	最小沉降	最大差异沉降	闸门轴线上最大差异沉降
反向挡潮	90	3.65	2.28	1.37	1.30
正向挡水	90	3.83	2.47	1.36	1.03
反向挡潮	60	3.95	2.46	1.50	1.42
正向挡水	60	4.15	2.66	1.48	1.15

水闸建设时在闸底板跨中和闸墩位置布设了沉降观测点,水闸建成后进行了一次系统性连续 5 d 的联动调试,埋设于底板内的沉降观测点显示调试过程中各测点之间的不均匀沉降仅为 3 mm 左右。

3 结 语

苏州河河口水闸底板的规模、结构形式和受力模式在国内水闸工程中均属首次,通过建立三维数值模型,本文对该工程进行了整体结构有限元分析,得到了各构件的沉降、变位、倾斜和结构内力结果。同时,为解决原设计方案闸门底板差异沉降过大的问题,对桩长、桩数、桩径等进行调整分析,为最终确定方案提供参考。水闸建成后的监测数据表明,最终设计方案很好地控制了闸门底板的差异沉降,保证了水下卧倒门的正常运行。

从桩基调整的效果可得到以下结论 ①桩长、桩数及桩径对差异沉降均有一定的影响,其中桩长及

桩底土层的性质对沉降影响最大;②中桩根数从无中桩增加至 3 排中桩时,差异沉降显著减小,但增加至 3 排以上后影响程度趋缓,因此通过调整桩的分布对减小差异沉降的作用是有限的;③较大的桩径对减小差异沉降有利,但效果并不明显。

另外,对于复杂的大型工程在设计阶段采用数值模型对整体结构进行计算分析是十分必要的,通过规范计算、数值计算、专家和工程师的密切配合及不断沟通互动,有利于做出最合理、最切合实际的工程设计方案,在设计中掌握主动。

参考文献:

[1] 宰金珉.地基刚度的人为调整及其工程应用[M].北京:万国学术会议出版社,1999.

[2] 刘金砺,迟铃泉.桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J].岩土工程学报,2000,22(2):151-157.

[3] 张建辉,邓安福,周锡初.基于差异沉降最小的桩筏基础分布桩分析[J].天津大学学报,2001,34(5):646-650.

[4] 黄斌,熊巨华.不同桩型情况下的桩基差异沉降三维有限元分析[J].建筑科学,2004,20(2):31-35.

[5] 杨敏,杨桦,王伟.长短桩组合桩基础设计思想及其变形特性分析[J].土木工程学报,2005,38(12):103-108.

[6] 乔志伟,黄广龙.控制差异沉降的复合桩基设计方法及有限元分析[J].苏州科技学院学报:工程技术版,2005,18(4):57-61.

[7] 张丽明.水闸破坏形式与除险加固措施的研究[J].水利科技,2001,2:25-28.

[8] 王波,徐恒,赵秀艳.对水闸产生不良影响的因素分析[J].黑龙江水利科技,2005,33(6):57.

[9] 杨媛,陈秀吟.某水闸重建工程软基处理经验及教训[J].广东水利水电,2003,9(增刊):41-43.

[10] 关少波,何亚伯,杨和礼.预应力技术在水闸加固中的应用[J].建筑技术开发,2005,33(2):71-72.

[11] 陈阵,张永红,张会芝.滞洪水库退水闸差异沉降问题的数值模拟分析[J].河南教育学院学报:自然科学版,2005,14(1):42-44.

[12] 上海海洋地质调查局地质勘察工程公司.苏州河河口水闸工程地质勘察报告[R].上海:上海市水务工程设计研究院,2003.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 骆超)

