

苏州河河口水闸大跨度薄壁空箱式底板结构设计

陈 峰,卢永金,季永兴,吴维军,盛 军

(上海市水利工程设计研究院,上海 200063)

摘要 对苏州河河口水闸工程大跨度底板结构的设计过程进行论述和分析。通过方案比选确定底板采用钢壳混凝土薄壁空箱结构形式,运用空间线弹性有限元模型和非线性固结有限元模型对拟定的底板结构布置进行优化和计算分析,并与常规设计方法进行对比,提高了设计的可靠度。对设计中的技术关键点提出了相应的处理措施。对水闸调试运行期间的底板监测数据进行分析,验证了底板结构设计的正确性和合理性。

关键词 水闸底板 结构设计 优化分析 薄壁空箱钢壳混凝土结构 大跨度闸门 苏州河河口水闸
中图分类号 :TV662⁺.1 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2007)S1-0032-04

苏州河河口水闸为单孔水闸,净宽 100 m(与河口同宽),闸门门型为液压水下卧倒门,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(吴淞零点)。水闸的功能必须满足双向挡水、灵活启闭。根据工程的总体布置设计,闸底板搁置于 2 个边闸墩和 1 个中闸墩上,闸底板结构总长 99 m,采用钢筋混凝土薄壁空箱结构,横断面外轮廓尺寸为 14 m×6.35 m。挡潮时闸门所承受的荷载都将传递至底板,并通过底板传递至闸墩,因此,整个闸底板结构承受非常大的水平力和垂直力。从垂直向分析,底板简支于 3 个闸墩上,类似两跨连续梁;从水平向分析,由于中闸墩只能提供给底板非常小的约束力,底板类似简支于边闸墩上的单跨箱梁。苏州河水闸工程在整个施工过程中不允许断流,因此闸底板将围绕着以上双向受力体系和施工条件的限制进行结构设计分析和优化调整。

1 底板设计方案比选

苏州河水闸工程闸底板结构由于受闸门设计和现场施工条件的限制,必须满足能浮运、不能分段、能承受闸门作用力以及受力情况下垂直与水平向的

挠度变形不能过大等条件,因此底板需采用预制、浮运的方式,制作方法类同于沉管隧道管段,不同之处在于两者受力机理不同,但结构形式具有借鉴的价值。参考国内外多项大型沉管隧道工程管段的设计工艺,底板结构形式可选取空箱钢结构、空箱钢壳混凝土结构和空箱钢筋混凝土 3 种形式,三者优缺点比较见表 1。

由于闸门完全支撑于底板上,为满足闸门门体结构受力和启闭的需要,闸底板变形应控制在一个较小的范围内。从表 1 可以看出,空箱钢壳混凝土结构具有整体性好、刚度大,工程造价低、施工工艺简单和水下工程量少等优点,唯一不足在于自重较重,但设计考虑对底板采用空箱薄壁结构并进行优化布置,使其能完全满足自浮,因此闸底板最终确定采用空箱钢壳薄壁混凝土结构形式(见图 1)。

2 底板结构优化及设计

在确定底板结构形式的前提下,根据闸门门体结构的几何尺寸初拟了底板结构外形尺寸和内部纵横隔仓的分布。考虑到底板变形除承受荷载作用产生以外,闸墩自身及相互之间的变形对其影响不可

表 1 闸底板 3 种结构形式比较

结构形式	整体性	结构质量	结构防水性	水下工程量	施工情况	工程造价
空箱钢结构	较好	较小	很好	较大	需在船厂内施工,工期短、工艺复杂	高
空箱钢壳混凝土结构	很好,刚度最大	较大	很好	较小	需在干坞内施工,工期长、工艺简单	较低
空箱钢筋混凝土结构	较好,刚度较大	较大	较好	较小	需在干坞内工期长、工艺简单	低

作者简介 陈峰(1974—),男,江苏无锡人,工程师,从事水利工程设计及研究工作。E-mail :chenf@swedri.com

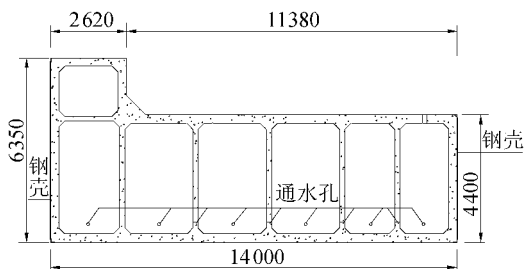


图1 闸底板空箱薄壁结构横断面示意图

忽略,为了确定底板应力应变计算的边界条件,对整个水闸主体结构进行了整体模型计算。整体模型分别采用空间线弹性有限元模型^[1-2]和空间 Biot 非线性固结有限元模型^[3-4]进行对照分析,选取 2 种设计控制工况,见表 2。

表 2 整体模型计算控制工况

工 况	苏州河水位/m	黄浦江水位/m
反向挡潮工况	2.8	6.42
正向挡水工况	3.5	0.62(50%低潮位)

经计算分析,水闸结构及地基基础变形的绝对量和相对量均不大,闸墩间的差异沉降较小,2 种整体模型计算结果所表现出来的应力趋势和变形规律一致,底板的变形处于弹性范围内,底板的边界可假设为弹性边界进行处理。确定底板计算边界后,再对底板建立局部细化模型,进行优化分析和设计计算。

2.1 底板结构布置优化

在满足结构受力的基础上,底板还必须控制自重,使能够浮运。根据底板外轮廓尺寸,参照上海市吴淞路闸桥底板结构和外环隧道沉管结构,初步拟定将底板的横断面分隔成 7 个仓(见图 2(a)),经浮运稳定和结构应力计算,并调整侧板和隔板不同厚度试算发现,将底板横断面分隔成 6 个仓后底板的

最大应力值变化不大,但底板的自重相应减少了(见图 2(b))。从力的传递方面分析,最初拟定的底板横断面,顶面板至第 1 隔仓为止,而顶面板与第 1 隔仓的相交处为门轴的主要传力点,这种布置造成传力不明确,传力路径复杂,为此,将面板延伸穿过第 1 隔仓,与底板的外侧板相交(见图 2(c))。底板沉放就位后为了提高底板的整体稳定性和增大局部截面刚度,对底板横向最外侧隔仓的部分仓位(中、边墩附近)采用混凝土填充,以起到减小底板最大压应力值的作用^[2](见图 2(d))。底板结构横断面优化过程见图 2。

2.2 底板结构计算分析与设计

底板结构内力计算采用三维线弹性有限元法,为了确保计算结果的可靠性,同时采用了传统设计的结构力学和材料力学的方法进行对照复核。底板沿中心线完全对称,有限元建模时取一半计算,采用板壳单元,在底板中轴线位置施加对称约束,在边墩位置约束底板底部竖向位移和底板两侧的水平向位移,在中墩位置只约束了底板底部的竖向位移,计算模型和位移边界约束见文献^[1]。结构力学和材料力学方法则将底板沿竖向和水平向分别进行简化计算,竖向简化为两跨连续梁,水平向简化为单跨简支梁,横截面简化成同刚度工字形梁。

经计算,底板最不利条件受挡潮和挡水 2 种工况控制,最大拉、压应力发生于底板两侧面板位置,将空间有限元计算的应力结果通过积分转化为内力与经典力学方法计算结果进行对比,得到三维线弹性有限元法计算的最大拉应力值为 15.86 MPa,最大压应力值为 15.39 MPa,弯矩为 $3.55 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$,用结构力学计算的弯矩为 $6.67 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。这些计算结果表明,

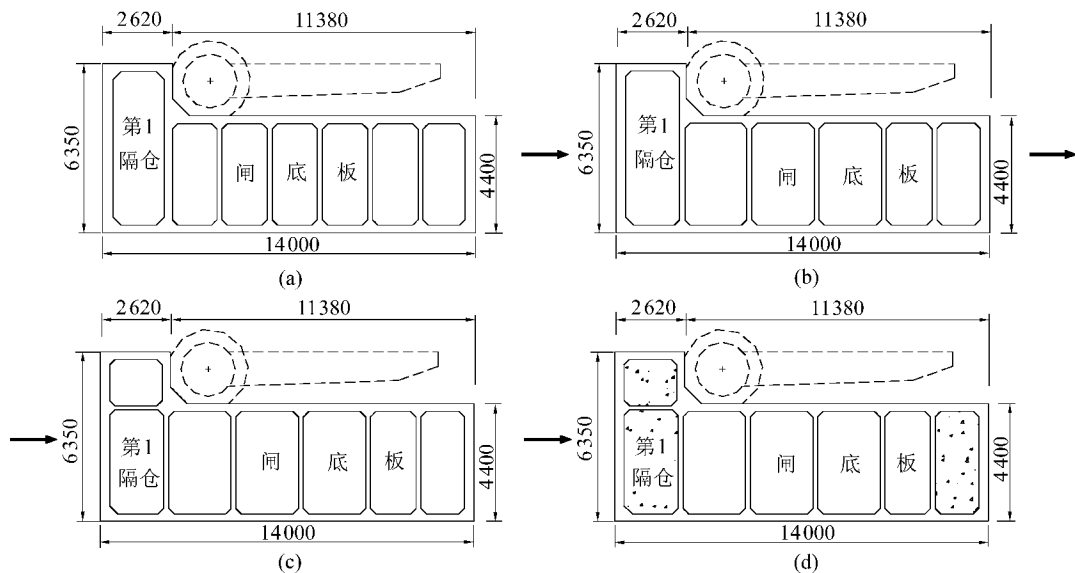


图2 底板结构横断面的优化过程示意图

两种方法得出的数值结果属于同一数量级,从而说明了计算结果的可靠性。由于空间模型可考虑底板内部纵横隔板的约束作用,因此三维线弹性有限元法的计算结果比结构力学计算结果偏小。

应力计算计算结果表明,挡潮工况下底板最大压应力已超过 C30 混凝土的抗压强度设计值,在如此高应力水平下,底板采用普通钢筋混凝土结构设计难以满足要求。设计过程中曾考虑用预应力结构,这样既能满足大跨度底板结构的强度要求,又能适当降低底板的自重,但本工程底板受到 2 种控制工况的应力场正好相反,最大应力值接近,因此无论在哪一侧设置预应力钢筋都会加大另一种工况下的压应力,为了抵消预应力附加的压应力而大幅度提高混凝土强度则得不偿失,故否定了采用预应力结构方案。为了满足高应力状态下底板强度的需要,利用底板钢壳参与受力,形成钢-混凝土组合结构共同承担外荷载,钢壳作为外包钢的原理进行设计^[5],通过计算确定底板钢壳不同部位的厚度;混凝土标号采用 C40,既能保证底板承载的整体强度和刚度,又能充分利用高强混凝土的特性,减少水泥用量,降低混凝土水化热,从而有效控制薄壁混凝土结构的裂缝。在确定空箱混凝土底板结构的基础上,对底板可能承受的多种工况分别进行计算,主要控制工况最大应力应变计算结果见表 3。

表 3 2 种工况最大应力和应变计算结果

工 况	竖 向		水平向	
	最大应力/ MPa	最大应变	最大应力/ MPa	最大应变
挡潮工况	9.13	27.2	15.86	28.8
挡水工况	5.99	16.1	12.66	18.5

2.3 中墩约束对底板的影响

受闸门启闭控制的限制,要求底板自身水平向相对位移差不宜大于 20 mm,而根据计算分析,在假设中墩对底板无水平约束和满足强度要求的条件下,底板水平向最大相对位移差达到 40 mm。底板与闸墩之间采用橡胶板式支座连接,由两者作用关系决定相互之间必然实际存在约束,中墩对底板的约束力由其桩基水平承载力控制,因此,通过计算中闸墩桩基础的水平承载力,反算其对底板的水平向约束力,假定中墩顶部水平位移取 20 mm,通过线性插值确定水平约束力为 16 984.72 kN。底板水平向位移差与中墩提供的水平向反力关系曲线见图 3。

3 底板结构设计技术关键点

3.1 底板自重控制

计算表明,地板越厚实则闸门运行时底板的变形相对越小,其不足之处在于自重较重,增加了浮运

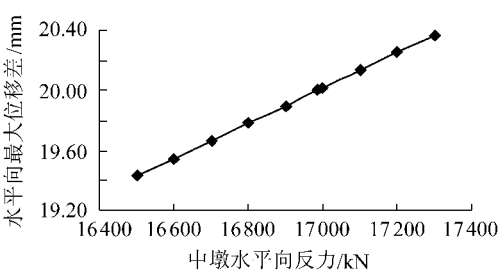


图 3 底板水平向位移差与中墩提供的水平向反力关系曲线

难度。为了最大限度地减少底板的质量,空箱薄壁结构的壁厚控制在 140 ~ 180 mm 之间,经过优化计算分析和比较,最终确定底板内部的结构布置。在满足结构受力的条件下,对底板的干舷高度、浮运稳定性、吃水深度及定倾稳定性分别进行计算分析,均能满足浮运要求。

3.2 钢壳参与结构受力

从底板结构内力计算分析可知,根据混凝土结构设计原理,承受外荷所需配置钢筋量对于薄壁结构已超过最大配筋率的情况,将使结构处于脆性状态,不符合结构按承载能力极限状态设计的原则。为了发挥钢壳混凝土的优点,根据其受力机理,充分利用外包钢参与结构受力,通过绘制内力包络线确定不同截面钢筋量和外包钢的厚度,这样运用钢壳结构既能保证结构强度,又能保证结构受力时所需满足的裂缝要求。

3.3 底板地基处理

底板沉放就位后,在底板与地基之间存在一定的空隙,虽然底板竖向受力分析假设计算模型为连续梁,但若底板与其地基之间适当处理,不仅可提高底板结构安全富裕度,而且可减少底板地基渗透破坏的可能性。底板与地基之间采用灌混合砂的工艺进行处理,混合砂采用级配砂和水泥熟料配制而成,一方面水泥熟料通过硬化与砂结合成一体,提高了地基强度,另一方面水泥熟料在硬化过程中不会过度膨胀而对底板造成负面影响。水泥熟料粒径为 2 ~ 3 mm,掺量比例通过试验确定,与砂混合后通过底板内预埋管灌注形成。

3.4 中墩外侧高喷处理

为了有效控制中墩水平向位移在 20 mm 以内,提高闸门启闭运行时的安全富裕度,在垂直顺水流方向的中墩边墙外侧采用高压旋喷法对两侧的土体加固,提高土体强度和水平地基反力比例系数值,通过中墩对底板提供水平向反力形成一定的约束,从而保证底板结构变形相对位移差满足闸门运行的要求。

4 底板结构的实测分析

苏州河河口水闸底板的规模、结构形式和受力模

式在国内水闸中均属首例,为保证闸门运行的可靠度,在闸底板内设置了钢筋应力计和沉降观测仪,钢筋应力计布置于计算应力较大的区域,沉降观测点布置于跨中和闸墩位置。目前水闸运行处于调试阶段,虽然还未经受最大设计挡潮标准工况,但从连续观测数据分析仍较真实地反映了闸底板的工作状态。

根据水闸第 1 次系统性连续 5 d 的联动调试情况监测数据统计,在闸门承受最大水位差为 1.7 m 的工况下,底板钢筋计应力监测值相对变化在 $-45 \sim 126$ MPa 之间(其中正值为拉应力,负值为压应力),绝大部分应力监测值变化在 2 Pa 之内,应力变化幅度较大的点均位于计算高应力区,实测应力变化趋势与计算结果较为吻合。根据钢筋应力计监测所得的最大平均拉、压应力值计算,主筋发挥了约 13% ~ 35% 的设计强度,通过压应力区钢筋应力计监测数据,运用变形协调原理,对受压区混凝土的最大平均应力进行计算,其发挥了约 38% 的设计强度。

在整个水闸联动调试过程中,埋设于底板内的沉降观测点显示出测点变形有下沉、有上升,但变化均不大,测点中相对沉降变化量最大的为 4 mm,其余部分变化在 2 mm 之内,测点之间的不均匀沉降在 3 mm 左右。

5 结 语

通过对底板结构方案的优选比较、计算分析、优化布置、技术关键点的处理以及实测分析,结果表明苏州河河口水闸工程底板结构设计合理可靠。为了满足总体布置、闸门金属结构设计和施工工艺的要求,底板结构设计中针对技术关键点的细节方面分别提出了适当的处理措施:①通过优化分析确定大跨度空箱薄壁的底板结构形式;②充分利用钢壳和

混凝土组合结构共同参与结构受力;③通过对底板地基和中墩外侧土体进行加固等构造措施,提高结构的安全可靠度。

底板结构计算引入先进的理论计算方法,并与传统计算方法相互对比分析,确定合理准确的计算模型和边界条件,大幅度提高了设计的可靠性,弥补了常规计算中的不足,为同类型大型结构的计算积累了一定的经验。

参考文献:

- [1] 同济大学地下建筑与工程系隧道及地下工程研究所. 苏州河河口水闸底板结构三维有限元优化计算报告[R]. 上海:同济大学,2003.
- [2] 缪圆冰,王瑟澜,夏才初,等. 苏州河水闸工程大跨度箱形底板结构优化设计[J]. 地下空间与工程学报,2005(1):112-116.
- [3] 国家电力公司华东勘测设计研究院,上海市水利工程设计研究院. 上海市苏州河河口水闸工程初步设计报告[R]. 上海:上海市水利工程设计研究院,2003.
- [4] 河海大学岩土工程研究所. 苏州河河口水闸地基基础与结构空间有限元固结计算分析[R]. 南京:河海大学,2003.
- [5] DL/T 5085—1999,钢-混凝土组合结构设计规程[S].
- [6] 王伟,陈剑,卢廷浩,等. 苏州河河口水闸三维固结有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(12):2054-2058.
- [7] 上海市建设委员会科学技术委员会. 上海大型市政工程设计施工丛书——道路工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,1997:193-232.
- [8] 李侃,扬国祥. 上海外环线越江沉管隧道工程技术概览[J]. 世界隧道,2000(5):32-37.
- [9] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].

(收稿日期:2007-02-15 编辑:高建群)

·简讯·

2007 重大水利水电科技前沿研讨会将在南京召开

为了探讨 21 世纪我国水利水电建设中存在的主要问题,中国工程院土木、水利和建筑工程学部将于 2007 年 11 月 10 ~ 12 日在河海大学召开“2007 重大水利水电科技前沿研讨会”,研讨水利水电建设中的前沿科学问题和热点问题,以促进水利工程学科的发展和工程技术的创新。会议主要议题包括:①21 世纪大型水利水电工程建设的主要任务和其中的关键科学问题;②大型水利工程的安全和防灾减灾;③大型病险水库综合整治的关键技术;④大型水利工程对生态、环境和防洪的影响及其对策;⑤新世纪中国水资源和水能资源存在的问题和对策;⑥国家自然科学基金重点基金和“973”课题研讨。会议由河海大学、南京水利科学研究院、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室承办。会议期间,中国水利学会将同时在河海大学举办全国水利博士论坛。会议论文将以论文集的形式由出版社出版。

(本刊编辑部供稿)