

漕河渡槽三向预应力结构优化设计

王志刚^{1, 2}

(1 三峡大学 湖北宜昌 443002 2 河北省水利水电勘测设计研究院 天津 300250)

摘要:漕河渡槽是南水北调中线的一座大型交叉建筑物,在设计上保证建筑物的安全性是至关重要的。通过对渡槽槽身结构进行优化,将槽身由单向预应力改为三向预应力,提高了结构的抗裂性,节省了工程量和投资。

关键词:漕河渡槽 三向预应力 结构 优化

1 工程概况

漕河渡槽位于河北省满城县西北约9km处,是南水北调中线总干渠上的一座大型交叉建筑物,全长2300m,建筑物级别1级,地震设计烈度6°,设计流量125m³/s,加大流量150m³/s,相应槽内水深分别为4.15m和4.792m。

漕河渡槽由进口渐变段、进口闸室段、落地槽段、渡槽槽身段、出口闸室段和出口渐变段等组成。其中渡槽槽身段包括20m跨和30m跨,上部槽身均采用简支梁式三槽一联整体多纵墙结构,单孔断面净宽6.0m,槽深5.4m。槽身外侧加设底肋和侧肋,间距2.5m,底肋断面0.5m×0.9m,侧肋断面0.5m×0.7m。槽身底板厚0.5m,侧壁厚0.6m,中壁厚0.7m。中纵墙顶部设2.7m宽人行道板,边纵墙顶部设2.0m宽人行道板。纵墙“马蹄”断面尺寸,中墙1.4m×1.5m,边墙1.3m×1.5m。

2 槽身单向预应力修改为三向预应力的缘由

初步设计阶段,槽身采用单向(纵向)预应力结构,其缺点是槽身横向配筋量大,布置困难,影响混凝土浇筑质量,同时为满足抗裂要求,还需加大设计断面尺寸,投资增大。

三向预应力结构能改善梁体的受力状态,提高构件的抗裂度与抗渗性,减小构件变形,增强结构的耐久性,同时可以减轻自重节约材料降低造价。设计中,决定将漕河渡槽槽身结构型式由单向预应力改为三向预应力结构。

3 槽身单向预应力结构计算情况

3.1 材料特性指标选择

结构计算中混凝土轴心抗压强度标准值取 $f_{ck}=32.0\text{ N/mm}^2$,抗压强度设计值 $f_c=23.5\text{ N/mm}^2$;抗拉强度标准值取 $f_{tk}=2.75\text{ N/mm}^2$,抗拉强度设计值 $f_t=2.0\text{ N/mm}^2$ 。钢筋采用热轧Ⅱ级,抗拉强度设计值 $f_{py}=310\text{ N/mm}^2$ 。预应力钢材选用 $\phi^115.2\text{ mm}$ 钢绞线,抗拉强度标准值 $f_{ptk}=1860\text{ N/mm}^2$,张拉控制应力 $\sigma_{con}=0.7f_{ptk}=1302\text{ N/mm}^2$ 。

3.2 荷载、荷载组合及其分项系数

根据《水工建筑物荷载规范》,槽身主要荷载包括自重、水重、水压力、风压力、冰压力、人群荷载。槽内设计水深为4.15m,加大水深为4.792m,满槽水深为4.892m。基本风压力0.4 kN/m²,人群荷载3.0 kN/m²。结冰厚度按0.4m计,相应冰压力为85.0 kN/m²。

槽身荷载组合按承载能力极限状态计算为“基本组合”,按正常使用极限状态验算包括“长期组合”和“短期组合”。“长期组合”是指渡槽通过设计流量时的正常运用工况。“短期组合”是指渡槽通过加大流量、建成无水+风荷载,以及局部槽孔检修时的特殊运用工况。

在进行承载能力极限状态计算时基本组合的各项系数:1级建筑物结构重要性系数 $\gamma_0=1.1$;持久状况、短暂状况的设计状况系数 ψ 分别取1.0、0.95;永久荷载中的结构自重分项系数 γ_G 取1.05;可变荷载分项系数 γ_Q 中的水压力、冰压力取1.1,人群荷载取1.2,风荷载取1.3。

3.3 槽身横向内力和配筋计算

槽身横向内力计算采用结构力学方法,按平

注:《南水北调中线工程漕河渡槽三向预应力结构设计》项目获第二届欧维姆预应力技术奖二等奖。

面问题计算。取一肋间距之间的荷载作为计算荷载，横向划分为8个节点，10个单元。在槽身横向结构计算时在跨中截取一个肋间距2.7m之间由拉杆、侧肋、中墙和底肋组成的闭合框架进行研究。框架底肋支撑在纵墙底部的“马蹄”上，侧肋按一端简支一端固定的T型梁计算，T型梁翼板宽2.7m。底板既是支撑在底肋上的连续板，又是中、边墙纵向I字梁的翼板。框架的内力计算采用结构有限元计算程序。

根据规范，对渡槽进行正常使用极限状态的抗裂验算，此时永久荷载分项系数和可变荷载分项系数均取1.0。正常使用状态内力计算成果见表1。根据表1结果进行验算，渡槽底肋在计算配筋量条件下均满足抗裂要求，侧肋、中墙也分别满足抗裂要求。

表1 各工况主要部位正常使用状态弯矩计算成果表 (kN·m)

工 况	底肋		侧肋		中墙	
	端部	跨中	下端	上端	下端	上端
(1)设计水深+风荷载+冰压力	-623.6	348.4	-560.5	208.6	-23.8	0
(2)满槽水深+冰压力	-685.9	390.1	-591.7	147.0	-17.6	0
(3)中孔检修	-619.9	510.2	-417.4	15.2	-307.4	30.5
(4)两边孔检修	-613.2	394.5	-39.3	0	-273.7	35.1
(5)一边孔检修(另一边、中孔过水)	-796.3	444.6	374.2	-21.2	-279.6	34.3
(6)一边、中孔检修(另一边孔过水)	-668.2	499.6	390.2	-18.9	-313.2	29.6
(7)空槽+风荷载	-224.6	154.4	-80.9	0	-24.3	0

3.4 槽身纵向内力和预应力计算

在槽身纵向结构计算时，将中墙/边墙分别做为简支梁单独考虑。

30m跨各纵墙跨中弯矩，中墙控制工况为“一边孔检修”工况，边墙控制工况为“满槽水深+冰”工况，相应跨中最大弯矩分别为86742.8 kN·m和52787.7 kN·m。

根据上述内力计算结果，中/边墙跨中断面在“一边孔检修”和“满槽水深+冰”荷载组合条件下，按照纯弯构件计算受拉区边缘应力

为 $\sigma_{cs}=6.761/4.658 \text{ N/mm}^2$ ，受压区边缘应力为 $\sigma'_{cs}=-7.342/-5.459 \text{ N/mm}^2$ 。“+”号表示拉应力，“-”号表示压应力。据此应配置预应力钢绞线数量：墙顶15/12（束），墙底（包括底板）191/108（束），共652束。

4 槽身三向预应力结构计算

4.1 结构复核条件

技施设计阶段根据专家审查和咨询意见对初步设计阶段结构计算成果进行了复核。复核时仍沿用原结构计算时所采用的材料特性指标、荷载组合及其分项系数、槽身纵、横向内力和配筋计算方法，并在此基础上做以下修改和调整：

(1) 将温度作为一种荷载考虑，温差的数值根据当地气象资料，冬季输水工况，取渡槽外表面温度 -10°C ，槽内水温 4°C ；夏季输水工况，取渡槽外表面阳面温度 41°C ，阴面温度 35°C ，槽内水温 28°C 。温度荷载作用的分项系数取1.1。

(2) 在渡槽槽身纵向内力和预应力计算中，考虑结构的自重影响。

(3) 底肋的断面尺寸考虑到曲线预应力钢绞线布置的合理性，将其高度减小0.2m，即由原初步设计的 $0.5 \times 1.1\text{m}$ 改为 $0.5 \times 0.9\text{m}$ 。

(4) 中/边墙纵向内力计算时，考虑横向计算产生的不平衡剪力。

4.2 横向预应力计算结果

槽身横向内力复核时，计算单元沿纵向取肋间距2.5m，计算时考虑运行期间内外温差引起温度荷载的作用及跨中多个纵梁之间由于挠度不同而引起的结构内力协调变形等因素的影响，并根据初步设计结果调整工程运用方式，检修工况只考虑对称检修情况，其主要部位的计算结果见表2。

由表2计算结果看：①在满槽水工况下底肋跨中的计算弯矩为 $388.64 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，若考虑温度则达到 $976.91 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，超出不考虑温度的1.5倍。②在满槽水+冰+挠度的工况下侧肋底端的计算弯矩达到 $-559.92 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。如果采用普通钢筋承担则底肋需要配置10根 $\phi 28$ 螺纹钢，布置上比较困难的，影响混凝土浇筑质量，而且抗裂不能满足要

求。因此,为保证建筑物的安全和抗裂性有必要在底肋和侧肋都施加预应力。对于中墙竖向由于在正常运用情况下受力对称,即使在检修工况下弯矩也不大,施加普通钢筋就能满足抗裂要求,因此没有必要设置预应力。

依据计算结果,底肋按偏心受拉构件计算,组合荷载产生的应力和预加力产生的应力后控制应力为:边孔左端迎水面 -0.324 N/mm^2 ,跨中底部 -0.444 N/mm^2 ;中孔左端迎水面 -0.298 N/mm^2 ,跨中底部 -0.650 N/mm^2 (考虑混凝土自身抵抗温度应力后的数值),都为压应力。侧肋迎水面控制应力为 -0.382 N/mm^2 ,背水面应力为 -0.076 N/mm^2 。据此计算,横向需布置钢绞线数量:底肋24束,侧肋21束。

表2 各工况主要部位正常使用状态弯矩计算成果表(kN·m)

工况	底肋		侧肋		中墙	
	端部	跨中	下端	上端	下端	上端
(1) 设计水深+风	-445.68	373.16	-293.42	-11.10	-39.43	0.23
(2) 设计水深+风+冰	-402.33	306.79	-429.10	-170.43	-31.38	-7.14
(3) 建成无水+风	-207.47	136.34	-105.85	29.45	-32.45	0.00
(4) 满槽水深	-472.52	388.64	-321.24	-44.03	16.01	0.95
(5) 满槽水深+冰	-453.27	329.54	-456.24	-88.49	-19.78	-1.68
(6) 满槽水深+冰+均匀温降	201.61	921.06	50.33	-268.72	-52.28	-4.44
(7) 满槽水深+均匀温升	-974.41	372.65	-55.20	-203.70	234.18	13.87
(8) 满槽水深+挠度	-356.83	385.98	-424.92	-11.52	-24.28	-1.44
(9) 满槽水深+均匀温降	313.50	976.91	185.33	-317.51	-16.50	-0.98
(10) 满槽水深+均匀温升+挠度	-861.93	346.32	-158.88	-143.40	193.89	11.48
(11) 中孔检修,两边孔过水	-385.00	424.51	-332.32	-39.90	209.26	-90.14
(12) 两边孔检修,中孔过水	-391.23	341.21	-54.12	-54.12	-182.73	102.81
(13) 满槽水深+冰+挠度	-479.30	363.63	-559.92	-79.69	-60.06	-5.10
(14) 满槽水深+冰+均匀温降+挠度	317.30	976.91	-53.36	-212.48	-92.57	-7.86

注:底肋下部受拉为正,侧肋右侧受拉为正,中墙右侧受拉为正。

4.3 纵向预应力复核结果

在槽身纵向结构计算时沿槽中心线切开,经复核槽身中/边墙在最不利工况下其跨中最大弯矩分别为 $70946.9/43284.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。按照纯弯构件计算中/边墙受拉区边缘应力 $\sigma'_{cs}=4.258/3.277 \text{ N/mm}^2$,受压区边缘应力 $\sigma'_{cs}=-5.833/-4.427 \text{ N/mm}^2$ 。据此进行预应力计算,经过合理布置和计算,确定槽身纵向应布置预应力钢绞线的数量为:中墙13个孔道128束,边墙9个孔道83束,底板24个孔道96束,共518束。在这种配筋条件下正截面、斜截面的承载能力计算和抗裂计算,以及局部承压和挠度计算都满足规范要求。

5 优化前后的工程量和投资比较

对30m段槽身结构优化前后的工程量和投资进行比较,具体数值见表3。

表3 30m段单跨槽身结构优化前后的工程量和投资比较表

项目	单位	优化前 (初步设计阶段)			优化后 (施工图设计阶段)		
		数量	单价 (元)	合计 (万元)	数量	单价 (元)	合计 (万元)
槽身混凝土	m ³	1427.25	659.62	94.14	1310.40	659.62	86.44
钢筋	t	199.81	5428.31	108.46	166.91	5428.31	90.60
钢绞线	t	23.25	15841.32	36.83	28.00	17145.14	48.01
投资合计				239.44			225.05

由表3看出,槽身结构优化后混凝土减少 116.85 m^3 ,钢筋减少 32.90 t ,钢绞线增加 4.75 t 。优化前单跨槽身工程费用为 239.44 万元,优化后为 225.05 万元,一跨可节省 14.39 万元。30m跨槽身共有42跨,共节省 604.38 万元。

6 结语

漕河渡槽是目前国内最大的输水渡槽,在设计上保证建筑物的安全性是至关重要的。槽身改为三向预应力后不但可以提高结构的抗裂性,减小构件变形,而且还节省了工程量和投资。因此这种修改是合理的,是对初步设计成果的优化。

参考文献

- [1] SL/T 191-96水工混凝土结构设计规范[S].
- [2] 南水北调中线京石段应急供水工程(石家庄至北拒马河段)漕河渡槽初步设计报告[R]. 2004.