

文章编号:1001-4179(2011)20-0031-04

南水北调中线工程某大型渡槽设计

李世平, 谢三鸿, 唐清华

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:南水北调中线总干渠渡槽设计过流量大,通过经济技术指标比选,确定采用开口箱梁矩形槽型式,采取三向预应力设计。由于渡槽受力呈现较强的空间性,为了提高设计效率并便于复核,截面拟定和配置预应力时采用平面杆系对渡槽横向和纵向分别进行计算,然后用三维有限元法进行复核。复核阶段主要考虑了非线性温度荷载和侧向风荷载的影响。计算结果表明,各工况下,渡槽大部分部位为受压状态,局部拉应力亦控制在规范允许范围内。

关键词:矩形渡槽;非线性温度荷载;设计;南水北调中线工程
中图分类号:TV672.3 **文献标志码:**A

随着南水北调工程的开工建设,我国的过水渡槽进入大规模建设时期。渡槽上部槽身可供选择的结构型式很多,有梁式渡槽、拱式渡槽、桁架式渡槽、斜拉式渡槽、工字梁组合渡槽等^[1-2],其中,拱式渡槽和斜拉式渡槽适于跨越深谷河流地区。桁架式渡槽是将若干直杆的杆端用铰相互连接而成几何不变体系,其杆件制作较为麻烦,若采用混凝土弦杆,杆端铰接处受力复杂,容易开裂;若采用钢弦杆则造价较高,并且后期难以维护。工字梁组合渡槽为简支预应力工字梁承重的梁槽组合结构,该结构受力明确,工字梁可工厂预制,对工程质量有保证,但工程量和投资相对较大,另外,因工字梁高度较高,占用槽下净空大,而且因拼装体系后浇带较多,水密性相对较差。梁式渡槽受力整体性较好,受力明确,裂缝容易控制,水密性好,施工方便,造价较为低廉,已成为目前较为常用的一种渡槽结构体系。

1 工程概况

南水北调中线一期工程总干渠某渡槽,设计流量为 $330\text{ m}^3/\text{s}$,加大流量为 $400\text{ m}^3/\text{s}$ 。槽身段长 200 m ,槽底至原地面之间高度 $5\sim 10\text{ m}$,渡槽工程区覆盖层多为砂卵石,厚度 $4\sim 10\text{ m}$,下伏基岩较深,且抗压强度较低。根据渡槽工程区地质情况,为避免不均匀沉

降,结合经济、结构等因素综合比较,渡槽采用双线单槽布置的形式。同时,由于工程区地形较为平缓,不适合建造拱式渡槽和斜拉式渡槽,经比选研究,选择梁式渡槽作为槽身结构方案。本文对渡槽截面形式、受力体系、下部结构形式的选择和设计计算进行介绍。

2 渡槽上部结构方案比选

2.1 槽身截面形式选择

梁式渡槽的槽身截面形式主要有矩形渡槽和U形渡槽。该渡槽总长 200 m ,规模不大,施工上若投入造桥机造价太高,因而主要考虑支架现浇。U形渡槽若采用支架现浇,其曲线型断面施工控制难度相对矩形渡槽要大,横向稳定性相对矩形槽要小,故推荐矩形渡槽方案。

矩形渡槽分为开口箱梁矩形槽、闭口箱梁矩形槽、多纵梁形式的矩形槽等(图1),具体采用哪种截面形式要综合考虑受力特性、渡槽规模、槽下净空及施工等多方面因素决定。由于闭口箱梁矩形槽内外温差大,温度应力大,结构处理复杂,因此对该种断面形式不予考虑。

箱梁渡槽依靠底板和腹板共同承受竖向和侧向水压力以及自身重量。多纵梁渡槽的底板是由横梁和纵梁构成的梁格结构,纵向受力主要由纵梁承担水的竖

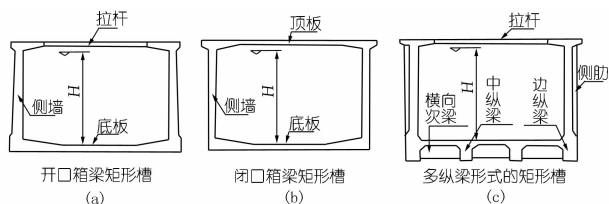


图 1 矩形渡槽常用截面形式

向压力和自重, 横向受力, 主要由横梁承担水压力和自重^[3-5]。在底板高度选择上, 多纵梁结构形式比箱梁形式高, 占用的槽下净空大。根据本渡槽总体布置, 过水断面底面至 300 a 一遇校核洪水水位仅 2.65 m, 若布置多纵梁结构形式, 槽下净空不满足要求, 综合考虑以上因素, 拟采用开口箱梁截面形式。如前所述, 该渡槽过水设计流量 330 m³/s, 加大流量 400 m³/s, 当单槽选取 13 m 槽宽时, 渡槽设计水深 6.13 m, 加大水深 6.86 m, 深宽比约 0.53, 整体受力较为合理, 故选取 13 m 槽宽进行设计。

2.2 受力体系的选择

在受力体系上, 梁式渡槽又可分为简支和连续两种, 连续箱梁渡槽有效地降低了跨中弯矩, 结构受力合理, 跨度较大, 有利于行洪, 但工程量和投资相对较大, 适应不均匀沉降变形能力较低, 抗震性能较差, 施工难度较大。该渡槽所在河床地质较差, 沉降难以控制, 另外开口截面支座负弯矩难以满足要求, 故将简支箱梁作为推荐方案。

2.3 渡槽跨度比较

该渡槽采取双线双槽布置, 由于过水流量和断面较大, 单跨跨度不宜超过 40 m, 通过对 30 m 跨和 40 m 跨的比较发现^[6], 30 m 跨与 40 m 跨方案在工程总量上和投资上相差不大, 但 40 m 跨方案略优。另外, 30 m 跨方案桥墩比 40 m 跨方案的桥墩多, 阻水面积比 40 m 跨方案要大, 不利于河道行洪, 同时为了统一跨径, 方便施工, 本渡槽推荐单跨 40 m 的跨径布置。

3 渡槽结构设计

3.1 槽身结构设计

渡槽采用 40 m 跨预应力开口箱梁型简支梁方案, 单槽梁底宽 15.1 m, 梁顶宽 15 m, 跨中梁高 8.48 m, 支座处梁高 8.93 m。底板在支座位置厚度为 1.15 m, 在距离梁端 2.97 m 位置减小为 0.9 m, 并继续在距梁端 2.97~7.97 m 范围内由 0.9 m 线性过渡到 0.7 m。上部腹板在支座位置厚为 0.9 m, 并在距离梁端 2.97~7.97 m 范围内线性过渡到 0.7 m, 下部腹板厚度不

变, 箱梁开口宽度为 10 m, 通过拉杆相连, 中部拉杆尺寸为 0.3 m (宽) × 0.5 m (高), 拉杆间距为 2.5 m。端部拉杆尺寸为 1.0 m (宽) × 0.5 m (高)。

渡槽槽体采用 C50 混凝土, 设三向预应力。根据预应力钢绞线的布置位置, 将预应力钢绞线分为底板纵向预应力钢绞线、底板横向预应力钢绞线、腹板纵向预应力钢绞线、腹板竖向预应力钢绞线、顶板纵向预应力钢绞线。其中, 底板纵向预应力钢绞线为 27 孔, 间距为 0.5 m, 每孔布置 15Φ^s15.2 钢绞线。底板横向预应力钢绞线为竖向两排布置, 每排为 98 孔, 共 196 孔, 间距为 0.4 m。渡槽两端的 20 孔, 每孔布置 10Φ^s15.2 钢绞线, 中间的 58 孔, 每孔布置 9Φ^s15.2 钢绞线。腹板纵向预应力钢绞线为单侧腹板 4 孔, 每孔布置 15Φ^s15.2 钢绞线, 腹板竖向钢绞线布置为单侧腹板 99 孔, 间距为 0.4 m, 每孔布置 11Φ^s15.2 钢绞线, 与底板横向钢绞线交叉布置。顶板纵向预应力钢绞线布置为每侧 2 孔, 每孔布置 15Φ^s15.2 钢绞线。渡槽纵向钢束立面布置见图 2, 环向钢束横断面布置见图 3。

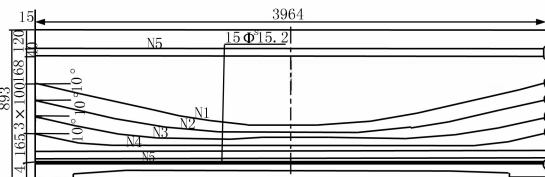


图 2 渡槽纵向钢束立面(单位:cm)

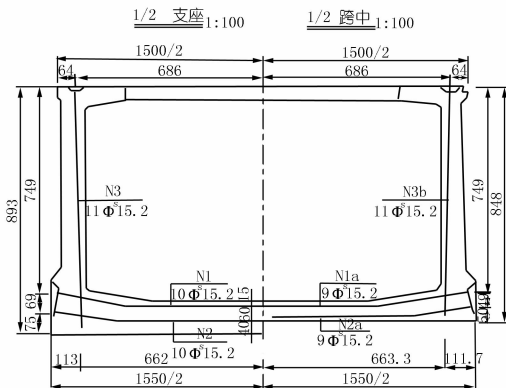


图 3 渡槽环向钢束横断面布置(单位:cm)

3.2 下部结构设计

渡槽下部结构包括盖梁、槽墩、承台和桩基。盖梁高度为 2.5 m, 纵向宽度 5.2 m, 采用减震支座以增强渡槽抗震能力。渡槽墩身采用空心板墩, 壁厚 0.8 m。墩底承台按双线分离布置, 单个承台长 16.1 m, 宽 10.2 m, 厚 3.5 m, 两承台间净距 0.1 m。单个承台下设 8 根桩基, 桩径 1.8 m, 桩长 62.0 m。桩基按梅花形

布置,桩间距大于 4.5m。支座采用耐久性好的新型弹性球型钢支座。

4 结构计算

渡槽的受力呈现较强的空间性,为了提高设计效率,同时为了进行对比,截面拟定和配置预应力时采用平面杆系对渡槽横向和纵向分别进行计算,然后用空间有限元法进行复核。

4.1 平面计算

4.1.1 计算模型与工况组合

本次设计采用了梁博士 3.0 结构分析软件进行平面计算分析,将槽身离散为平面杆件单元,在施工过程中施加预应力和施工临时荷载,在运营过程中施加水荷载和其他有可能出现的不利荷载,同时忽略支座变形对槽身的作用。纵向计算模型含节点总数 19 个,单元总数 18 个,计算跨度 36.94 m;横向计算模型取跨中截面,长度 1 m,节点总数 66 个,单元总数 66 个。模型单元划分见图 4,5。

根据《水工混凝土结构设计规范》(SL191 - 2008),所有钢束张拉控制应力取 $0.7f_{pk} = 1302 \text{ MPa}$ 。设计计算考虑了 3 种组合:基本组合① 自重 + 预应力 + 收缩徐变 + 槽面活荷载;基本组合② 自重 + 预应力 + 加大水深 + 收缩徐变槽面活荷载;基本组合③ 自重 + 预应力 + 满槽水深 + 收缩徐变槽面活荷载。

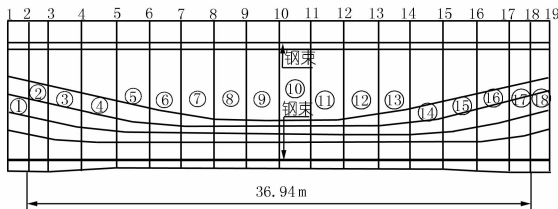


图 4 箱型渡槽纵向计算模型

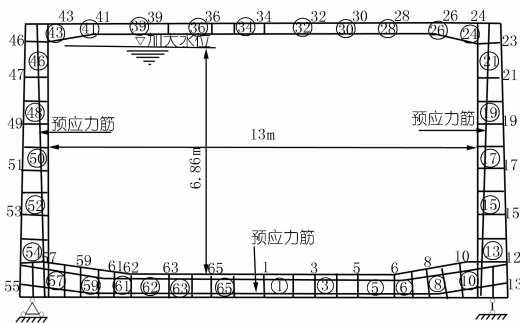


图 5 箱型渡槽横向计算模型

4.1.2 计算结果

纵向计算结果表明,在 3 种基本组合下,跨中断面

和支座断面全截面纵向受压。跨中断面顶板压应力值(截面最大压应力值)为 7.48 MPa,底板压应力值(截面最小压应力值)为 1.81 MPa。支座断面顶板压应力值(截面最小压应力值)为 1.38 MPa,底板压应力值(截面最大压应力值)为 4.25 MPa。横向计算结果表明,在基本组合①工况下,腹板根部外侧会产生 0.56 MPa 的拉应力,此拉应力在技术规定允许范围内,在 3 种基本组合下,跨中断面横向其他截面均受压,满足要求。跨中断面底板上缘最大压应力值为 14.30 MPa,下缘最小压应力值为 1.70 MPa;腹板根部内侧最小压应力值为 4.00 MPa,外侧最大拉应力值为 0.56 MPa,符合技术规定要求。

4.2 空间计算

4.2.1 计算模型与工况组合

空间计算考虑了槽壁的非线性温度荷载和侧向风荷载,非线性温度影响主要考虑冬季寒潮和夏季太阳照射下阴阳面的影响。对于冬季寒潮温降,满槽水时考虑渡槽内表面为 8℃,外表面为 0℃,空槽则认为内外表面无温差。对于夏季日光照的阴阳面,空槽时阴面取腹板内侧温度为 0℃,外侧为 5℃(温升);空槽时阳面取内侧温度为 5℃,外侧为 0℃(温降)。满槽时阴面取腹板内侧 0℃,外侧为 8℃(温升),满槽时阳面取腹板内侧温度为 8℃,外侧为 0℃(温降)。根据建成时无水期和运用期分 8 种工况进行计算(见表 1)。

表 1 空间模型计算工况

工况	自重	收缩、徐变	水风荷载			温度荷载		风荷载
			设计流量	加大流量	满槽水	槽面活荷载	温升	
1	√	√				√		√
2	√	√				√	√	√
3	√	√				√		√
4	√	√	√			√		√
5	√	√		√		√		√
6	√	√			√	√		
7	√	√			√	√	√	
8	√	√			√	√		√

利用通用有限元分析程序——Ansys 9.0,并采用稳态热分析和静力分析耦合的方法进行计算,先对渡槽内外壁施加一定温差,计算其在壁厚范围的温度分布,再转换为结构分析,结构分析时施加外荷载,读取热分析时温度分布结果,从而得到温度和外荷载作用下结构的应力分布。混凝土的热传导系数取 $k = 2(\text{W/m} \cdot \text{℃})$ 。热分析时混凝土采用三维等参热体单元 Solid 70,结构分析时转换为三维应力单元 Solid 45。钢绞线在热分析时采用 link33 单元,结构分析时转换

为 link8 单元。预应力施加时根据平面计算的结果扣除摩阻、锚端回缩、收缩、徐变等损失后再施加在有限元模型上。鉴于结构和荷载的对称性,只取槽身结构的 1/4 部分建模,对称面加法向约束,支座处加竖向约束,忽略支座变形对槽身的作用。计算模型节点总数 43 796 个,单元总数 37 012 个。模型建立采用了直接建模法,所有实体单元均采用 8 节点等参单元。

4.2.2 计算结果

(1) 应力计算。计算结果表明,在拟定的 8 种工况下,槽身内壁纵向全部处于受压状态,槽身外壁纵向在温降时会产生一定的拉应力。拉应力最大值为 0.88 MPa,出现在满槽温降工况的跨中槽底外壁,但该拉应力不大于混凝土轴心抗拉强度设计值的 0.9 倍。槽身的纵向应力满足混凝土应力控制标准。槽身外壁横向在空槽工况时会出现一定的拉应力,拉应力最大值为 1.16 MPa,出现在空槽温降工况跨中腹板下角隅的外壁,但该拉应力不大于混凝土轴心抗拉强度设计值的 0.9 倍,槽身的横向应力满足混凝土应力控制标准。

(2) 挠度计算。控制性工况挠度计算结果见表 2。

表 2 跨中槽底竖向位移 mm

工况	挠度	工况	挠度
工况 2	2.71	工况 7	-8.98
工况 3	0.38	工况 8	-11.10
工况 6	-9.25		

从表 2 可看出,空槽工况跨中槽底向上变形,有微小的反拱现象;渡槽充水后,槽体向下变形,最大竖向

位移为 11.10 mm,满足 $f \leq L_0/600$ 的要求。

5 结 语

南水北调中线工程总干渠渡槽设计流量大、荷载大。在渡槽规模相对不大的情况下,选择矩形渡槽有利于采用现浇工艺进行施工。在截面拟定时应选择合适宽深比,以便横向受力趋于合理。鉴于渡槽受力呈现较强的空间性,在采用平面计算拟定好尺寸和预应力配置后,需采用空间有限元程序进行精确的应力分析,同时充分考虑温度差的影响,以便全面了解渡槽在各阶段受力的情况,将渡槽应力控制在规范和南水北调中线工程技术规定允许范围之内,确保渡槽在施工和使用阶段的安全。

参考文献:

- [1] 竺慧珠,陈德亮,管枫年. 渡槽[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [2] 刘成芳,张颜琴. 矩形梁式渡槽设计[J]. 黑龙江水利科技, 2007, (5):48-49.
- [3] 王志刚. 漕河渡槽三向预应力结构优化设计[J]. 水科学与工程学报, 2006, (5):30-32.
- [4] 高小翠,彭琳. 大型预应力混凝土箱式渡槽有限元分析[J]. 中国农村水利水电, 2003, (5):53-55.
- [5] 谢三鸿,尤岭,李世平,等. 南水北调大型渡槽设计与施工研究[J]. 人民长江, 2010, (16):32-35.
- [6] 潘江,吕国梁,郑光俊等. 陶岔主鲁山段大型输水矩形渡槽跨度研究[J]. 人民长江, 2010, (16):28-31.

(编辑:郑毅)

Design of a large - scale aqueduct in Middle Route Project of South - to - North Water Diversion

LI Shiping, XIE Sanhong, TANG Qinghua

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The designed flow of aqueduct of the main canal of South - to - North Water Diversion Middle Route Project was large. Through comparison of economic and technical indexes, the open box girder rectangular canal is adopted for a large - scale aqueduct, which is designed by 3 - direction pre - stress. As the spatiality of the aqueduct force action, the cross - section selection and pre - stress were determined by plan bar system for the transversal and longitudinal calculation and the calculation results were checked by three - dimensional FEM. The non - linear thermal load and lateral wind load were mainly considered during check period. The results show that main parts of the aqueduct are in compressed state, and the local tensile stress is also in the scope of design code.

Key words: rectangular aqueduct; non - linear thermal load; design; South - to - North Water Diversion Middle Route Project