

引水工程大流量渡槽结构型式选择

李建伟, 洪振国

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 针对工程等级高、过水流量大、抗震设防要求高的引水工程, 渡槽结构型式选择存在工程技术难题, 根据引水工程渡槽槽墩较高、荷载大、结构断面大、沉降变形影响因素较为复杂特点, 进行了渡槽支承型式、槽身截面形式、渡槽墩身的比选。结果表明: 简支结构具有减少施工难度和不均匀沉降对槽体结构应力影响, 简化结构受力条件, 简支结构较为有利优点。空心重力墩具有节省材料, 充分利用材料强度, 刚度较大, 墩身质量较轻, 抗震能力和抗冲击强, 高度较大优点, 对类似工程设计具有参考意义。

关键词: 大流量渡槽; 工程等级高; 抗震设防高; 结构选型; 结构布置; 结构计算; 引水工程

中图分类号: TV222

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0193-05

Selection of water diversion project of large flow type aqueduct structure

LI Jianwei, HONG Zhenguo

(Yunnan Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

Abstract: Considering the water diversion project of high grade engineering, large water flow rate and high seismic fortification requirements, there are engineering technical problems of aqueduct structure. According to the characteristics of water diversion project with high pier, big load, large aqueduct structure section size, and complicated factors of settlement and deformation, the aqueduct support type, trough section form, aqueduct pier body are compared and selected, and the results show that the simple structure can reduce the difficulty of construction and uneven settlement on the stress of the tank structure, and has the advantage of simplifying the stress condition of the structure. The hollow gravity pier has the advantages of saving material, making full use of material strength, great stiffness, light pier body, high seismic capacity and impact resistance, which can be a reference to similar project design.

Key words: large flow aqueduct; engineering of high grade; high seismic fortification; structure type selection; structure layout; structure calculation; water diversion project

渡槽是引水工程穿越道路、河谷、河渠等重要的引水建筑物, 在城镇生活用水、农田灌溉、工业用水、供排洪和导流工程中广泛应用^[1-3]。尽管目前我国渡槽设计理论不断发展、渡槽结构型式也多种多样, 但是大多数工程规模较小。云南某引水工程渡槽具有过水流量大、荷载大、规模大、抗震设防和工程等级高、地质条件复杂等特点, 渡槽支承型式、跨度、槽身截面形式、渡槽墩身的结构选择难度较大, 因此渡槽的结构设计成为重要的研究课题, 对其他类似工程具一定参考作用。

1 工程概况

云南某引水工程是云南省可持续发展的战略性

基础工程, 具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。渠首位于石鼓, 经过丽江、大理、楚雄、昆明、玉溪、红河蒙自^[4-7], 渠首流量 $135 \text{ m}^3/\text{s}$ 。引水线路总长 661 km。输水工程等别为一等工程, 主要建筑物级别为 1 级。工程区地震动峰值加速度为 $0.2g$, 相应的地震基本烈度为 VIII 度, 输水工程建筑物按 8 度抗震设防^[8-11]。避开不良地质区域、尽量缩短槽身长度、降低槽墩高度、建筑物紧凑布置, 跨河槽址处河势稳定、与河流正交, 减少与公路、渠道等建筑物的交叉为原则^[12-13], 经过布置比选, 渡槽上游接断面尺寸为 $(2 \sim 5.0) \text{ m} \times 8.8 \text{ m}$ 暗涵、下游接断面尺寸为 $8.0 \text{ m} \times 9.41 \text{ m}$ 隧洞, 设计引水流量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$, 渡槽设计采用 $i = 1/2500$, 渡槽全长 149.024 m。

收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-02-19

作者简介: 李建伟(1961-), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 主要从事水工建筑物设计工作。

通讯作者: 洪振国(1976-), 男, 云南洱源人, 高级工程师, 主要从事水工建筑物设计及研究工作。

渡槽穿越 NE 向侵蚀槽谷,槽谷底宽 90 m 左右,沟谷内为灌木林地,地面高程 1 938 ~ 1 985 m,两侧谷坡相对高差小于 50 m,谷坡坡度 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。地表冲洪积(Q_{pal})覆盖层厚大约 5.4 m,结构松散,中等压缩性。下伏基岩为张河组 1 段(J2z1)紫红色长石砂岩、冯家河组 2 段(J1f2)紫红色泥质粉砂岩,岩石强风化,基础较好,强风化岩承载力满足设计要求,可作墩基持力层。

2 渡槽结构布置

渡槽由进口段、槽身段、出口段组成,渡槽平面图见图 1,纵剖面见图 2,进口段为渐变段,长 25 m,宽度由进口净尺寸 11.1 m 渐变至出口 18.0 m,高

度由进口净尺寸 8.7 m 渐变至出口 4.4 m,底坡 $i = -0.1$,边墙及底板厚 1.5 m。槽身段全长 150 m,槽身为简支预应力 C50 混凝土结构,三箱矩形断面型式,槽身跨度 30 m,共计 5 跨。

根据受力条件好,结构简单、工程量少原则进行渡槽孔数和底肋等的确定,则渡槽断面净尺寸 $3 \times 5.2 \text{ m} \times 4.4 \text{ m}$ (孔数 $\times$ 宽度 $\times$ 高度);边墙及中墙厚 0.6 m,底板厚 0.5 m,拉杆尺寸为 $0.3 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高),间距 2.5 m,底肋断面尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高),间距 2.5 m,底梁断面尺寸 $1.3 \times 1.9 \text{ m}$ (宽度 $\times$ 高度),边墙顶翼缘断面尺寸 $2 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ (宽度 $\times$ 高度),中墙顶翼缘断面尺寸 $2.7 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ (宽度 $\times$ 高度)。

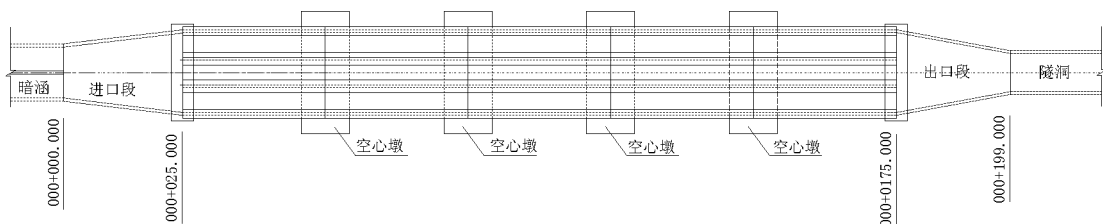


图 1 渡槽平面图

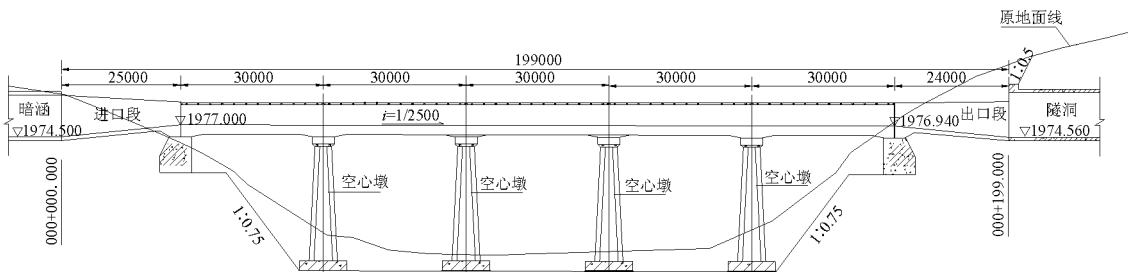


图 2 渡槽纵剖面图

渡槽共 4 个中墩,4 个边墩。中墩槽墩采用 C30 钢筋混凝土空心重力墩,高度为 26 m,柱墩最大截面尺寸 $22.2 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$ (长度 $\times$ 宽度),壁厚 1.2 m,内设 3 个厚 1.2 m 的中隔墙,柱墩墩帽平面尺寸 $20.8 \text{ m} \times 5.1 \text{ m}$ (长度 $\times$ 宽度),高 2 m;柱墩基础采用 C25 钢筋混凝土,基础平面尺寸 $27.5 \text{ m} \times 11.8 \text{ m}$ (长度 $\times$ 宽度),高 2.5 m;渡槽基础采用 C25 钢筋混凝土摩擦群桩处理,桩长 20 m,直径 1.3 m,间排距 3.5 m。

进出口边墩为重力式挡墙,C25 混凝土结构,高 7.7 m,顶宽 4.7 m,底宽 7.55 m。

出口段为渐变段,长度 24 m,宽度由进口净尺寸 18.6 m 渐变至出口 8 m,高度由进口净尺寸 4.4 m 渐变至出口 9.85 m,底坡 $i = 0.099$,边墙及底板厚 1.2 m。

3 渡槽结构型式选择

3.1 渡槽支承型式选择

渡槽支承结构型式有拱式渡槽、梁式渡槽、斜拉式渡槽、桁架式渡槽等^[5],各种渡槽的优缺点如下:

梁式渡槽具有设计简易、施工方便、整体受力性较好、受力结构简单、裂缝容易控制、水密性好、造价较低廉、应用广泛等优点,同时具有跨度不宜太大缺点。拱式渡槽具有节约钢材、跨度较大的优点,同时具有支座受较大水平推力,对地基要求较高,需解决侧向稳定问题,不易于机械化施工、施工难度大的缺点。桁架式渡槽整体刚性大,能充分发挥材料力学性能;结构轻巧,水平推力小,对墩台变化的适应性较好,对地基要求较低,同时具有杆件制作较为复杂,混凝土弦杆,杆端容易开裂,钢弦杆造价较高,难以维护

的缺点。斜拉式渡槽具有跨越能力较强,有利于发挥混凝土抗压和高强钢丝或钢绞线抗拉的材料特性,构造衰减性能良好,地形、地基适应能力较强,造型简明轻巧美观,跨度较大的优点,同时具有内力变形计算及施工作业要求较严格,投资相对较大的缺点。根据上述各类型渡槽的优缺点及适用情况,结合渡槽未跨越深谷河流,而是跨越地形比较平缓、槽底到原地面之间高度不大的地区,无采取拱式、斜拉式渡槽的必要,宜在梁式及桁架式渡槽中选取。

采用桁架式渡槽具有整体结构刚性大,能充分发挥材料力学性能,结构轻巧及对墩台变位的适应性较好等特点,但桁架式受到材料特性的影响,桁架式渡槽多用于中等跨距条件下使用,单跨跨度较大则体现不出桁架渡槽的优点,而采用梁式渡槽结构则结构简单,施工难度较低,通过对槽身采用预应力结构,不仅避免了桁架式渡槽结构复杂,施工难度高的不利因素,而且单跨跨距基本可达到桁架式渡槽的普遍跨度,因此选用梁式渡槽结构。

梁式渡槽槽身结构有简支、双悬、单悬和连续梁4种型式。单悬型式一般在靠近两岸的槽身或双悬臂梁式与简支梁式过渡时采用;双悬臂梁式渡槽因跨中弯矩较简支梁小,每节槽身长度可为25~40 m,但其重量大,整体预制吊装困难,当悬臂顶端变形或地基产生不均匀沉降时,接缝止水容易被拉裂。因此,本段输水线路三座渡槽宜在简支和连续梁两种型式中选择,其优缺点如下:

简支式具有吊装方便、止水简单、安全性可靠性高,较普遍适用优点,同时具有跨中弯矩较大,底板受拉对抗裂防渗不利的缺点。连续梁式具有受力条件好,可加大跨度优点,同时具有不均匀沉降时,槽身将产生较大附加弯矩,还可能产生扭曲应力,对地基条件要求高,抗震性较差,施工难度较大,且工程量和投资相对较大,地质条件要求较高,不易产生沉降的缺点。

根据上述梁式渡槽槽身结构型式的优缺点,考虑减少施工难度和不均匀沉降对槽体结构应力影响,荷载大、结构断面尺寸大、复杂的沉降变形影响因素等,采用简支结构^[14]。

3.2 槽身截面形式的比选

槽身横断面型式有矩形、U形、梯形、半圆形、半椭圆形和抛物线形等^[4],常用矩形与U形。本段输水线路渡槽槽身横截面形式选择技术较为成熟的矩形和U形进行比选,其优缺点如下:

矩形槽身型式具有施工工艺相对简单,矩形槽身

预制比较简单,对于大流量的渡槽,矩形槽身比较普遍适用的优点,但是其具有用料相对较多,槽身对风的阻力较大,大跨径的矩形槽身渡槽对稳定不利的缺点。U形槽身型式具有自重轻,用料省,横向受力条件比较有利,对风的阻力小,抗风稳定性较为有利;结构简单、受力明确,纵向刚度大、受力条件好、结构有足够的强度、刚度、稳定性、结构安全可靠优点,同时具有施工控制难度较大,横向稳定性较小,施工难度太大,纵向预应力筋不能发挥曲线预应力筋的优势^[15],U形薄壳对横向受力非常敏感,当顶推出现偏差时其内力难以确定,断面型式预制施工较复杂,抗冻性和耐久性较差,施工要求高,如施工质量不好,易引起表面剥落,甚至产生裂缝漏水等现象的缺点。

根据上述渡槽断面型式的优缺点及适用情况,考虑到引水工程各输水渡槽槽身结构断面尺寸大、荷载大,参考国内外大型渡槽采用断面型式及经验,渡槽槽身横截面形式宜选择施工工艺相对简单,安全可靠的矩形断面型式。

矩形渡槽又分为箱式矩形槽、矩形槽、多纵梁形式的矩形槽等。由于槽身在任何组合条件下槽身内壁表面不允许出现拉应力,为检修方便,提高运行的可靠性,同时考虑到本渡槽槽身结构断面尺寸大、荷载大,宜选择多纵梁形式的矩形槽断面型式,且需进行双槽一联多侧墙、三槽一联多侧墙、双孔箱式矩形槽方案技术经济比选,其优缺点如下:

双槽一联多侧墙具有受力时各侧墙与底板联合作用,节约材料和投资优点,同时具有检修工况结构受力复杂,单槽过水时偏心荷载较大,底板承受较大剪力缺点。三槽一联多侧墙具有受力明确,施工简单,受力时各侧墙与底板联合作用,节约材料和投资优点,同时具有检修工况结构受力复杂,底板承受较大剪力,渡槽底板总宽度也较大的缺点。双孔箱式矩形槽具有受力明确,结构简单,施工方便,受力时各侧墙与顶板、底板联合作用,节约材料和投资的优点,同时具有检修工况结构受力复杂,单槽过水时偏心荷载较大,观测检修不便的缺点。

由以上分析可知,双孔箱形槽结构简单,施工方便,但由于槽顶封闭,观测、检修不便,底板及侧墙较厚,因此宜在两槽多侧墙、三槽多侧墙两种截面型式中选择。

两槽多侧墙、三槽多侧墙结构型式受力条件好,结构简单、混凝土量少,施工工艺成熟^[16]。考虑到两槽多侧墙检修工况结构受力复杂,单槽过水时偏心荷载较大,底板承受剪力较大,选择工程量和投资

工程量少的三槽多侧墙结构型式。

3.3 渡槽墩身的比选

梁式渡槽下部支承有实心重力墩、空心重力墩、钢筋混凝土槽架(排架),三种结构型式优缺点如下:

钢筋混凝土槽架具有施工工艺成熟、构造简单、工期较短,工程量少,工期短优点,同时具有抗冲击和抗震性较差的缺点。实心重力墩构造简单、施工方便、工期较短,刚度大、承载能力高,抗冲击和抗震能力强优点,同时具有地基要求高,工程量大缺点。空心重力墩具有材料节省,充分利用材料强度、刚度较大、墩身重量轻,工程量和投资工程量少,抗震和抗冲击能力强,高度较大的优点,同时具有结构相对复杂的缺点。

经比较分析,并考虑到引水工程的重要性及渡槽上部荷载巨大,且槽墩较高,渡槽墩身型式采用空心重力墩。

4 渡槽槽墩结构计算

4.1 计算基本资料与计算模型

渡槽结构计算主要包括槽身和槽墩等的计算,槽身计算可采用传统的结构计算方法,槽墩结构计算复杂,本文以渡槽槽墩为代表进行结构计算,渡槽槽墩结构计算采用大型通用有限元结构计算软件

ANSYS 进行计算^[17]。槽墩及基础均采用 8 节点六面体 SOLID185 单元,计算中将槽身内水流及槽身自重以质量单元形式加载槽墩顶面^[18]。槽墩各部位材料参数表 1,渡槽有限元计算模型见图 1。正常应用工况荷载组合为槽墩自重+槽身自重+设计水深重+风荷载。渡槽抗震设计烈度为 8 级,水平向地震加速度代表值 α_h 为 0.2 g ,竖向地震加速度代表值 α_v 为 $0.2 \times 2/3\text{ g}$,设计反应谱最大值的代表值为 $\beta_{\max}$ 为 2.25;场地土类型为 I 类,特征周期 $T_g(\text{s})$ 为 0.2,阻尼比取 5%。

表 1 槽墩各部位材料参数

材料	部位	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$)	泊松比
C50	槽身及墩帽	25	34.5	0.167
C30	墩身	25	31.5	0.167
C25	基座	25	28	0.167
强风化岩	浅层地基	25	6	0.250
弱风化岩	深层地基	26	20	0.200

4.2 正常运行工况应力分析结果

有限元计算应力分析结果见图 3~6,槽墩各部位应力统计表 2。

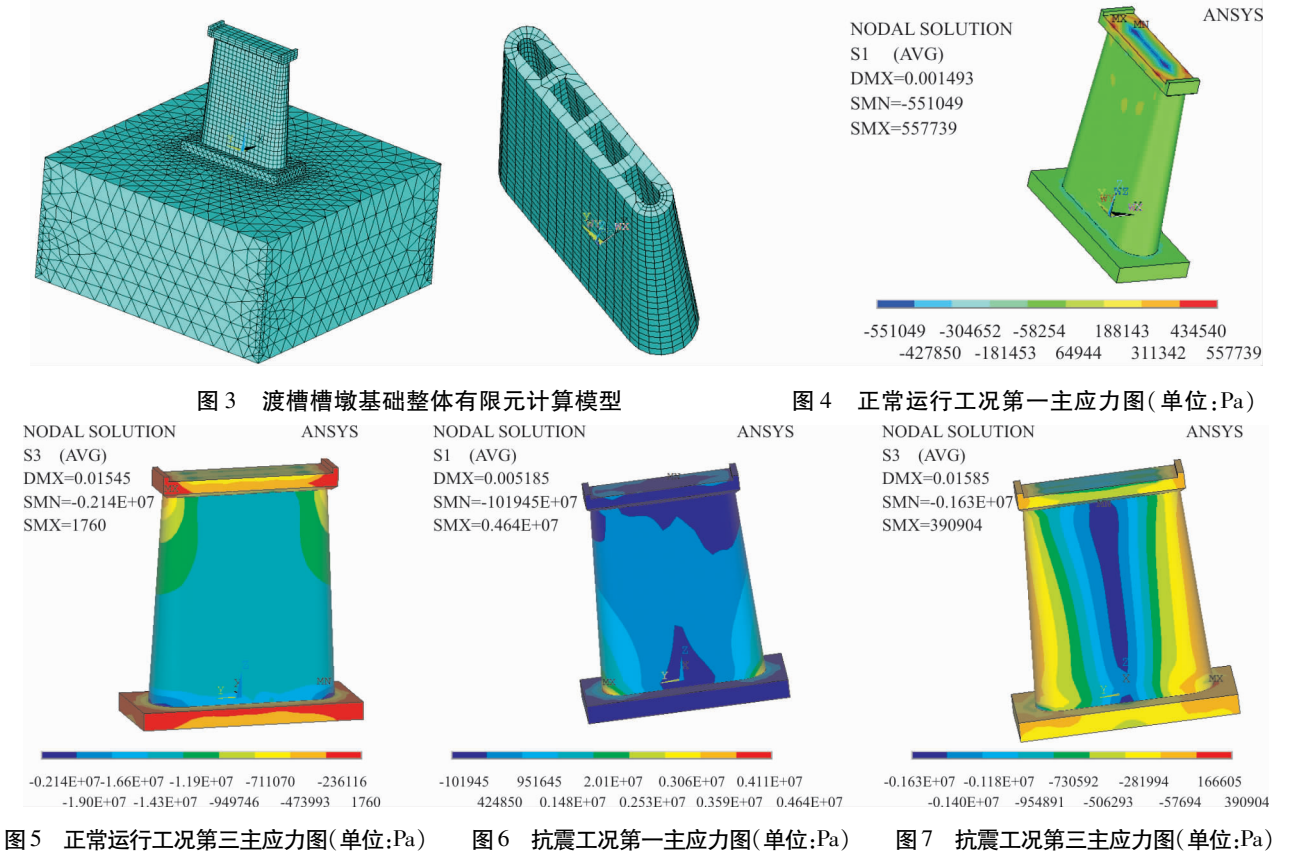


表2 槽墩各部位应力成果表 MPa

工况	部位	最大拉应力	最大压应力	应力部位
正常运行工况	墩帽	0.55	1.45	墩身与墩帽接触部位
	墩身	0.24	2.17	墩身与基础接触部位
	基础	0.04		基础与墩身接触部位
地震工况	墩帽	0.96	1.46	墩身与墩帽接触部位
	墩身	4.64	1.63	墩身与基础接触部位
	基础	2.09		基础与墩身接触部位

根据以上计算成果与分析:

(1)在正常运行工况下,槽墩最大拉应力为0.55 MPa,最大压应力为2.14 MPa,均发生在槽墩底部与基座交接近处。

(2)在地震工况下,槽墩在最不利工况横槽向地震作用下产生的最大拉应力为4.64 MPa,最大压应力为1.63 MPa,最大压应力产生部位也位于槽墩底部与基座接触部位。

5 结 论

(1)考虑减少施工难度和不均匀沉降对槽体结构应力影响,对荷载大、结构断面尺寸大、复杂的沉降变形影响因素等,采用简支结构,同时采用预应力钢筋混凝土结构,改善结构力学性能以减少截面尺寸、减轻自重,跨度可适当加大。

(2)引水工程渡槽槽身结构断面尺寸大、荷载大,参考国内外大型渡槽采用断面型式及经验,渡槽槽身横截面形式宜选择施工工艺相对简单,安全可靠的矩形断面型式。

(3)空心重力墩具有节省材料、充分利用材料强度、刚度较大、墩身重量轻、抗震和抗冲击能力强的优点,并考虑到渡槽上部荷载巨大,且槽墩较高,因此,渡槽墩身型式采用空心重力墩。

参考文献:

[1] 竺慧珠,陈德亮,管枫年. 水输水建筑物丛书渡槽[M].

北京:中国水利水电出版社,2005.

[2] 姚威,黄平,彭辉. 新疆尼勒克沟预应力矩形渡槽结构静力分析[J]. 中国农村水利水电,2010(2):95-98.

[3] 水电水利规划设计总院. 水工设计手册(灌溉、排水)[M]. 北京:中国水利电力出版社,2013.

[4] 洪振国. 云南省某引水工程穿山隧洞间大流量倒虹吸方案选择[J]. 水电能源科学,2016,34(8):120-123.

[5] 洪振国,刘浩,黄立群. 水电站混合式调压井设计研究[J]. 人民黄河,2015,37(12):111-114.

[6] 洪振国. 水电站调压井形式比选研究[J]. 中国农村水利水电,2013(4):113-115.

[7] 洪振国,刘浩林. 阻抗式调压井水力学计算研究[J]. 水力发电,2014,40(12):51-54.

[8] 洪振国,刘浩林. 水电站调压井特征线法水力学计算研究[J]. 中国农村水利水电,2015(4):163-166.

[9] 洪振国. 六郎洞电站溢流式调压井型式比选研究[J]. 中国农村水利水电,2013(2):129-133.

[10] 洪振国,王鹏. 露天上室式调压井在引水式电站中的设计研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(3):194-199.

[11] 洪振国,刘浩林. 水电站阻抗式受力复杂调压井设计[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):148-153.

[12] 熊启钧. 灌区建筑物的水力计算与结构计算与结构计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[13] 中华人民共和国水利部. SL482-2011,灌溉与排水渠系建筑物设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[14] 谢三鸿,尤岭,李世平. 南水北调中线工程矩形渡槽设计与施工方案研究[J]. 人民长江,2010,41(16):32-35.

[15] 陈文义,赵顺波,李树瑶. 南水北调工程大型预应力混凝土渡槽结构选型研究[J]. 华北水利水电学院学报(自然科学版),1996,17(12):9-14.

[16] 季庆辉,张兵,崔金秀,等. 鄂北地区水资源配置工程孟楼渡槽结构形式的比选[J]. 中国农村水利水电,2015(11):161-163.

[17] 洪振国,黄立群. 调压井结构内力计算研究[J]. 水资源与水工程学,2015,26(4):177-182.

[18] 张晓青,于海洋,霍晓峰. 梁式多侧墙渡槽结构地震位移响应分析[J]. 水科学与工程学报,2012(5):8-10.