

大型倒虹吸预应力混凝土 结构设计分析

李晓克 王慧 李长永 裴松伟 著

中国南水北调工程天津倒虹吸



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大型倒虹吸预应力混凝土 结构设计分析

李晓克 王慧 李长永 裴松伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书介绍了南水北调中线工程南沙河倒虹吸工程施工图设计和建造阶段的相关成果。同时,介绍了倒虹吸结构动力特性和地震响应分析成果。倒虹吸预应力混凝土结构采用 2D 有限元方法进行预应力钢筋布设与合理性分析,采用 3D 有限元方法进行结构整体受力性能分析和优化设计,达到了技术先进、安全适用、经济合理、确保质量的总体目标。

本书可作为水利工程学科相关专业技术人员的设计参考书,也可作为在校学生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

大型倒虹吸预应力混凝土结构设计分析 / 李晓克等著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5170-5862-5

I. ①大… II. ①李… III. ①南水北调—倒虹吸管—预应力混凝土结构—结构设计 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第230316号

书 名	大型倒虹吸预应力混凝土结构设计分析 DAXING DAOHONGXI YUYINGLI HUNNINGTU JIEGOU SHEJI FENXI
作 者	李晓克 王慧 李长永 裴松伟 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	虎彩印艺股份有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.75 印张 279 千字
版 次	2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷
定 价	65.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

作者简介

李晓克 工学博士，教授，国家公派澳大利亚 RMIT 大学访问学者，河南省优秀青年科技专家，河南省教育厅学术技术带头人，郑州市优秀青年科技专家。现任华北水利水电大学土木与交通学院副院长，土木工程学科、建筑与土木工程专业领域硕士研究生导师，河南省生态建材工程国际联合实验室副主任，郑州市预应力工程智能新技术研发重点实验室主任。兼任中国土木工程学会混凝土和预应力混凝土分学会纤维混凝土专业委员会委员，河南省土木建筑学会桥梁与结构委员会委员等职。



主要从事现代预应力混凝土材料与结构基本理论、混凝土结构仿真模型试验与结构静动力分析等方面的研究，主持和参与完成 10 余项国家和省部级科技项目，并为多项国家级和省级重点工程建设项目提供技术咨询服务。发表论文 70 余篇，获得国家发明专利 5 项，出版专著《环形高效预应力混凝土技术与工程应用》（科学出版社，2008 年）、《钢筋混凝土结构模型试验与优化设计》（中国水利水电出版社，2011 年）、《V 型墩连续刚构桥》（中国水利水电出版社，2014 年）、《预应力混凝土连续箱梁桥设计实例分析》（中国电力出版社，2014 年）、《独塔部分斜拉桥设计实例分析》（中国电力出版社，2016 年）等，主编高校本科专业教材 2 部。主研科技成果获得省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 4 项、三等奖 2 项，获中国科学技术发展基金会欧维姆预应力技术工程设计一等奖 1 项。



前言

南水北调中线总干渠穿南沙河倒虹吸工程，位于河北省邢台市所辖沙河市西北高店村以西，距沙河市约 10km，是南水北调中线一期工程大型河渠交叉建筑物之一。在初步设计阶段，根据结构断面受力状况极为复杂、工程区地表水存在结晶类硫酸盐型弱~强腐蚀以及倒虹吸地基不均质等技术难题，经过技术方案比选和经济社会效益综合分析，决定采用先进的预应力混凝土技术。为此，河北省水利水电第二勘测设计研究院和华北水利水电大学进行了联合科技攻关。在初步设计阶段的基本参数条件下，开展了南沙河倒虹吸结构预应力混凝土新技术的研发、仿真模型受力性能试验和设计理论研究工作。研究成果结集为《倒虹吸结构预应力混凝土技术》(ISBN 978-7-5084-9257-5)，于 2011 年由中国水利水电出版社出版发行。

在南沙河倒虹吸工程施工图设计阶段，为了确保工程结构与建造达到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量的总体目标，课题组对倒虹吸上游总干渠水位和倒虹吸工程地质详勘后的相关参数指标、河道指标进行了适当调整，增加了环境温度作用影响因素，并进行了倒虹吸河岸斜直段、河床平直段、与中间明渠相接的河堤段全部工程的设计计算。同时，倒虹吸工程作为处于地震区的线状浅埋式水工建筑物，其抗震性能也是关系工程安全运营的关注焦点。总体上取得了以下研究成果：

(1) 优化了大型三箱断面倒虹吸预应力混凝土结构预应力技术体系。沿顶板和底板横向布设单层连续曲线预应力钢筋(采用夹片式群锚、两端张拉)、沿边墙竖向布设单排曲线预应力钢筋(埋入底板区域采用固定端锚具、顶部单端张拉、夹片式群锚)、沿中墙竖向布设双排直线预应力钢筋(埋入底板区域采用固定端锚具、顶部单端张拉、夹片式群锚)，在倒虹吸混凝土中建立起能够抵抗各种荷载作用的有效预压应力，保证了大型倒虹吸结构的正常使用性能。

(2) 确立了大型三箱断面倒虹吸预应力混凝土结构设计与优化方法。采用 2D 有限元分析方法进行结构中预应力钢筋的布设合理性分析，采用 3D 有限元分析方法进行结构正常使用极限状态优化设计，采用弹性地基梁平面刚

架有限元方法进行结构承载力极限状态配筋验算，并修订完善了自主研发的、与有限元通用软件借口配套的曲线预应力钢筋等效载荷自动计算与施加程序。

(3) 对大型箱形断面倒虹吸结构在地震作用下的动力特性和动力响应进行了评价分析，提出了倒虹吸结构抗震设计建议。

为了加强上述新成果的工程设计推广应用，课题组编著了本书。执笔者为华北水利水电大学李晓克教授、王慧副教授、李长永副教授和裴松伟实验师。华北水利水电大学博士研究生导师、科技处处长赵顺波教授审阅书稿并提出许多建设性意见建议，对本书编著工作给予了大力支持。参加工程科研课题工作的还有河北省水利水电第二勘测设计研究院马述江教授级高工、杨锋教授级高工、赵斌高工以及华北水利水电大学陈震副教授和硕士研究生高宇甲、江龙、向士海等，在此一并表示衷心感谢！

由于水平所限，本书存在的不妥和需要进一步改进之处，尚祈业界同仁不吝赐教指正。

作 者

2017年3月



目 录

前言

第 1 章 设计基础资料	1
1.1 概述	1
1.2 基本资料	1
1.3 结构设计计算原则	6
第 2 章 倒虹吸结构预应力钢筋布设与合理性分析	9
2.1 概述	9
2.2 倒虹吸河床平直段结构设计计算	9
2.3 倒虹吸河堤平直段结构设计计算	29
2.4 倒虹吸河堤斜直段结构设计计算	40
2.5 本章小结	53
第 3 章 倒虹吸结构受力性能三维有限元校核分析	54
3.1 概述	54
3.2 计算模型	55
3.3 倒虹吸结构受力性能校核分析	59
3.4 本章小结	88
第 4 章 倒虹吸结构抗震性能分析	89
4.1 概述	89
4.2 计算原理	90
4.3 计算条件	92
4.4 倒虹吸动力特性分析	96
4.5 倒虹吸动力响应分析	102
4.6 本章小结	162
第 5 章 倒虹吸施工技术简介	164
5.1 基坑施工方法	164
5.2 模板施工方法	164
5.3 钢筋制作和安装	166
5.4 混凝土施工	168

5.5	预应力施工	170
5.6	倒虹吸外侧回填土施工	173
5.7	倒虹吸结构预应力监测分析	173
参考文献		176

第1章 设计基础资料

1.1 概述

在南沙河倒虹吸施工图设计阶段，根据上游干渠设计和校核水位的变化调整，选取倒虹吸南汉与北汉平直段、河堤段和出入口倾斜段作为典型控制节段分别进行结构计算分析。

本章介绍了南沙河倒虹吸结构计算分析的施工图设计阶段基础资料。有关荷载（结构自重、土压力、水压力）的计算方法、正常使用极限状态验算表达式，以及预应力技术体系的选择、材料与设备和预应力钢筋的有效预应力计算方法等详见《倒虹吸结构预应力混凝土技术》（中国水利水电出版社，2011 年）。

1.2 基本资料

1.2.1 河道指标

南沙河倒虹吸与河道交叉断面处，河道被江心洲一分为二，分为南、北两汉河道，交叉断面以上流域面积为 1640km²，设计洪水位为 100 年一遇洪水位（洪峰流量 8840m³/s），校核洪水位为 300 年一遇洪水位（洪峰流量 11390m³/s），河道宽度 4150m。南沙河地下水主要为第四系浅层孔隙潜水，主要赋存于第四系上更新统（Q₃）和全新统（Q₄）冲洪积卵石层中，该含水层裸露于广阔河床和埋藏于北岸一级阶地黄土状壤土和砂壤土之下，总厚度 10~12m。地下水位年际及年内变幅较大，丰水年较枯水年变幅达 1.9~7.5m，为安全起见，总干渠南沙河倒虹吸各段地下水位分别取高地下水位和低地下水位进行计算。河道指标见表 1.1。

表 1.1 南沙河倒虹吸工程处河道指标

倒虹吸分段		河床（堤）高程/m		河道无水/m		洪水位/m	
		河道无水、设计洪水位	校核洪水位	高地下水位	低地下水位	设计	校核
南汉	平直段	92.12	87.86	88.80	85.30	92.64	92.87
	河堤段	95.38	—	90.73	86.50	—	—
	斜直段	—	—	90.73	86.50	—	—
北汉	平直段	89.36	86.28	85.20	82.80	91.92	92.26
	河堤段	95.28	—	89.36	82.20	—	—
	斜直段	—	—	89.36	82.20	—	—

南沙河地表水属多年径流型，地表水水质属重碳酸钙钠型。矿化度小于 500mg/L ，为淡水， pH 值为 $6.2\sim 7.1$ ，对混凝土无侵蚀性。在枯水季节，南汉河床有上游选矿场弃水通过，地表径流量约 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 。受南沙河上游建有不少铁矿厂的选矿废弃水的影响，南汉现有地表水化学类型为 $\text{SO}_4 - \text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Mg}$ 型水， SO_4^{2-} 含量 $381.2\sim 525.5\text{mg/L}$ ，对普通混凝土具结晶类硫酸盐型弱~强腐蚀。

1.2.2 渠道指标

南沙河倒虹吸设计流量 $230\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $250\text{m}^3/\text{s}$ 。南汉上游渠道设计水位为 86.783m ，加大水位为 87.099m ；北汉上游渠道设计水位为 86.110m ，加大水位为 86.426m 。

1.2.3 倒虹吸工程布置

南沙河倒虹吸工程由南汉倒虹吸、中间明渠段和北汉倒虹吸三部分组成（图 1.1）。南汉和北汉倒虹吸工程均由进口渐变段、进口闸室段、管身段、出口闸室段和出口渐变段五部分组成，长度分别为 1250m 和 1055m （图 1.2 和图 1.3）。



图 1.1 南沙河倒虹吸平面位置图

进口渐变段长度均为 70m ，其长度按 2 倍水面宽度差计算，该段采用底板与侧墙分离式的钢筋混凝土结构，两侧采用直线扭曲面，边坡系数 $2.5\sim 0$ 。南汉底宽 $21.0\sim 22.1\text{m}$ 、

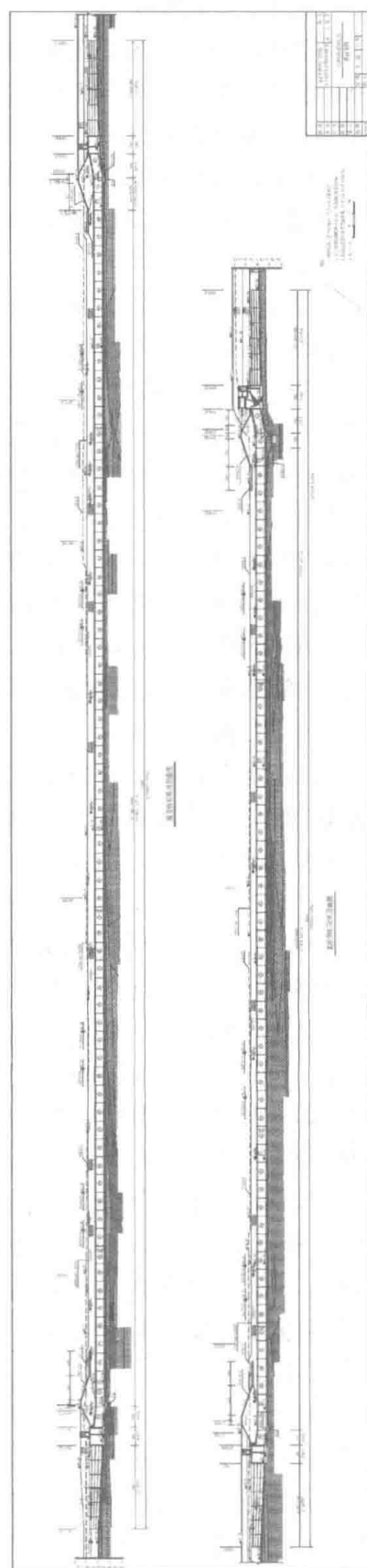
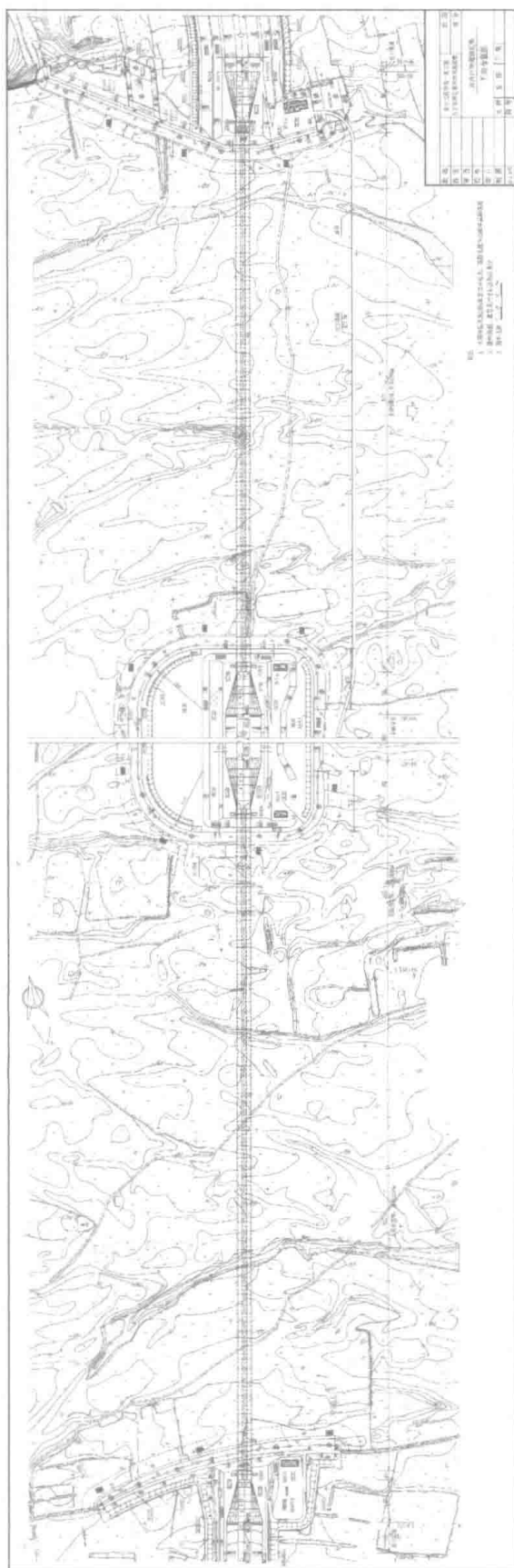


图 1.3 南沙河倒虹吸纵断面布置图

底部高程 80.783~77.433m, 北汉底宽 21.0~20.6m、底部高程 80.11~76.76m, 纵坡 1:20.896, 底板厚 0.8m。渐变段始端为贴坡式挡土墙, 末端为半重力式挡土墙, 墙高 11.7m。一级马道高程 88.133m (南汉) 和 87.46m (北汉), 运行维修主道路设于右岸一级马道, 左右岸堤顶高程为 95.38m (南汉) 和 95.28m (北汉)。地下水排水系统采用透水管+逆止阀+排水管的内排水方式, 底板设置 3 根透水管, 两边墙各设置 3 根, 排水管道间距 3m (顺水流方向)。北汉根据排水需要, 采用砂卵石置换渐变段底板以下的相对不透水层, 换土深度 3m。

进口闸室段长度均为 15m。南汉进口闸为倒虹吸管检修闸, 北汉进口闸主要功能为配合出口节制闸对倒虹吸管身进行事故检修。闸室为开敞式钢筋混凝土整体结构, 分 3 孔布置, 每孔净宽 6m, 南汉底板高程 77.433m、墩顶高程 88.133m, 北汉底板高程 76.76m、墩顶高程 87.46m, 中墩厚 1.3m, 边墩顶厚 1m, 底厚 1.8m, 底板厚 1.8m。闸室上游侧设置交通桥连接左右岸, 桥面净宽 4.75m。南汉降压站布设在右侧堤顶, 北汉降压站布设在右侧二级马道上, 通过斜坡道与闸室相连。检修闸设置 2 扇检修钢闸门, 检修闸门为平面滑动叠梁门, 静水启闭, 闸门总高度 10m, 分 4 节, 采用 $2 \times 100\text{kN}$ 移动式电动葫芦起吊。门库布置在闸室两侧, 为地下结构, 尺寸 $6.0\text{m} \times 2.4\text{m} \times 6.5\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。地下水排水系统采用透水管+逆止阀+排水管的内排水方式, 底板设置 3 根透水管, 两边墩各设置 3 根, 排水管道间距 3m (顺水流方向)。根据排水需要, 采用砂卵石置换渐变段底板以下的相对不透水层, 换土深度 3m。

南汉和北汉管身段长度分别为 1070m 和 870m, 3 孔一联预应力混凝土箱形结构, 底板厚 1m、顶板厚 1m、中墙厚 0.8m、边墙厚 1m, 单孔过水断面尺寸 $6.6\text{m} \times 6.5\text{m}$ 。南汉纵向分缝长度 15.0~17.5m, 缝间设两道止水; 进口斜坡段长 17.5m, 纵坡 1:9.05; 水平段长 1035m, 按 15m 分缝; 出口反坡段长 17.5m, 纵坡 1:4.94; 管身进出口底高程分别为 77.433m 和 79.041m, 水平段管顶高程 83.1m, 管底高程 75.5m; 倒虹吸管最小埋深 5.7m, 最大埋深 9.1m。北汉纵向分缝长度 12.5~17.5m, 缝间设两道止水; 进口斜坡段长 12.5m, 纵坡 1:7.53; 管身水平段长 840m, 按 15m 分缝; 出口反坡段长 17.50m, 纵坡 1:5.24; 管身进出口底高程分别为 76.76m 和 78.441m, 管身水平段管顶高程 82.7m, 管底高程 75.1m; 倒虹吸管最小埋深 4.3m, 最大埋深 6.66m。管身进口上唇设置半径 1m 的圆弧, 以利于进管水流平顺。进出口斜管段与水平管段之间均以圆弧衔接, 底部圆弧半径 20m。在水平管段两端设置集水坑, 尺寸为 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。倒虹吸管身下设 50cm 厚碎石垫层和 10cm 厚素混凝土垫层, 并在素混凝土垫层上涂抹一道沥青。为防止地下水腐蚀预应力锚头, 采用保护罩+混凝土封锚的措施进行保护, 即先采用保护罩封闭锚头, 再在其外侧二期浇筑 0.3m 厚的混凝土保护层, 保护层混凝土强度等级 C40。

南汉出口闸室段长 15m, 为倒虹吸管检修闸。北汉出口闸室段长 20m, 为总干渠节制闸, 用于调节总干渠水位、保证南、北段倒虹吸进口淹没度及北段倒虹吸检修。闸室分 3 孔布置, 每孔净宽 6m。南汉闸室底板高程 79.041m, 墩顶高程 87.741m, 设置 2 扇检修闸门。北汉闸室底板高程 78.441m, 墩顶高程 90.732m, 设置 3 扇工作闸门和 2 扇检修闸门。闸室为开敞式钢筋混凝土整体结构, 中墩厚 1.3m, 边墩顶厚 1m, 底厚 1.8m, 底板

厚 1.8m。检修闸门为平面滑动叠梁门, 闸门总高度 7.8m, 分 3 节, 采用 $2 \times 100\text{kN}$ 移动式电动葫芦起吊。工作闸门为弧形钢闸门, 动水启闭, 采用液压式启闭机。门库布置在闸室两侧, 为地下结构, 尺寸 $6.0\text{m} \times 2.4\text{m} \times 4.0\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。南汉闸室下游侧设置交通桥连接左右岸, 桥面净宽 4.75m。降压站布设在右侧二级马道, 通过斜坡道与一级马道和堤顶相连。地下水排水系统采用透水管+逆止阀+排水管的内排水方式, 底板设置 3 根透水管, 两边墩各设置 3 根, 排水管间距 3m (顺水流方向)。

出口渐变段长度均为 80m, 其长度按水面宽度差的 2.5 倍计算, 该段采用底板与侧墙分离式的钢筋混凝土结构, 两侧采用直线扭曲面, 边坡系数 0~2.5, 南汉底宽 20.6~21.0m、底部高程 79.041~80.191m, 北汉底宽 20.6~20.0m、底部高程 78.441~79.591m, 纵坡 1:69.6, 底板厚 0.8m。渐变段始端为半重力式挡土墙, 墙高 9.7m (南汉) 和 9.5m (北汉), 末端为贴坡式挡土墙。南汉渐变段一级马道高程 87.541m, 运行维修主道路设于右岸一级马道, 左右岸堤顶高程为 95.28m。北汉渐变段一级马道高程 86.941m, 运行维修主道路设于右岸一级马道, 左右岸地面以上各设置 1m 高的防护堤, 堤顶高程分别为 101.6m 和 98.7m。地下水排水系统采用透水管+逆止阀+排水管的内排水方式, 底板设置 3 根透水管, 两边墙各设置 3 根, 排水管间距 3m (顺水流方向)。

1.2.4 地基特性及设计参数

按总体布置纵剖面图, 根据《南水北调中线一期工程总干渠南沙河渠道倒虹吸初步设计阶段工程地质勘察报告》(2009 年 4 月), 南沙河倒虹吸大部地处太行山与河北平原过渡地带, 河床南岸为低丘垅岗区, 北岸为洪积扇上缘倾斜平原地带, 大部分建筑物位于河漫滩和河床。建筑物区在勘探深度范围内揭露地层全部为第四系, 主要由下更新统冰水积湖积 (fgl+IQ₁) 砂土、黏性土, 上更新统冲洪积 (al+plQ₃) 黄土状壤土、卵石, 全新统冲洪积 (al+plQ₄) 卵石组成。

南汉倒虹吸进口渐变段为壤土和黏土层, 进口检修闸为黏土层, 倒虹吸管身为壤土、粉砂、中砂和卵石层, 出口节制闸和渐变段均坐落在卵石层上; 北汉倒虹吸进口渐变段为卵石和壤土层, 进口检修闸为中砂层, 倒虹吸管身为中砂、卵石和粉砂层, 出口节制闸和渐变段均坐落在卵石层上。各段持力土层的主要参数详见表 1.2 所列。

表 1.2 倒虹吸各段持力土层主要参数表

倒虹吸分段		压缩模量 E_s/MPa	饱和快剪		压缩系数 α/MPa^{-1}	天然含水率 $W/\%$	孔隙比 e	承载力标准值 f_k/kPa
			c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$				
南汉	平直段	6.8	16.8	21.4	0.26	24.9	0.756	170
	河堤段	6.0	12.1	20.1	0.30	23.2	0.684	150
	斜直段	11.8	40.3	12.8	0.12	26.2	0.736	260
北汉	平直段	6.0	13.5	17.3	0.30	21.9	0.643	160
	河堤段	6.2	14.2	24.2	0.29	19.5	0.604	220
	斜直段	6.2	14.2	24.2	0.29	19.5	0.604	220

1.2.5 基坑开挖回填料

采用开挖的砂卵石土回填; 湿容重 $20\text{kN}/\text{m}^3$; 饱和容重 $22\text{kN}/\text{m}^3$; 内摩擦角 33° 。河

堤段和出入口倾斜段回填壤土。

1.3 结构设计计算原则

1.3.1 建筑物级别

本倒虹吸管建筑物级别为一级，结构安全等级为Ⅰ级。

1.3.2 倒虹吸结构指标

依据工程布置图，倒虹吸过水断面尺寸为3孔 $\times$ 6.6m（高） $\times$ 6.5m（宽）。采用预应力混凝土结构，底板、顶板及边墙厚度均为1m，中墙厚度为0.8m。

倒虹吸结构采用C40F100W6混凝土， $E_c = 3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$ ， $f_{tk} = 2.39 \text{ MPa}$ ， $f_{ck} = 26.8 \text{ MPa}$ 。选用真空辅助孔道灌浆后张有黏结预应力技术体系，预应力孔道采用聚丙烯塑料波纹管成型，在孔道凹、凸点均设置出气孔。预应力钢筋采用1 $\times$ 7-15.24-1860-GB/T 5224—2003低松弛钢绞线，强度标准值 $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ ，张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75 f_{pk} = 1395 \text{ MPa}$ 。锚具采用夹片式，锚具变形和钢筋内缩设计值 $a = 5 \text{ mm}$ 。预应力钢筋与孔道壁的摩擦系数设计值 $\mu = 0.15$ ，考虑孔道每米长度局部偏差的系数设计值 $\kappa = 0.001$ 。

1.3.3 设计工况

依据国家标准《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》（GB 50199—94）和国家行业标准《水工混凝土结构设计规范》（SL 191—2008），对南沙河倒虹吸拟定如下荷载效应组合，每种工况均考虑温升7℃、无温度变化和温降7℃。

（1）河床平直段。

工况1：渠道设计水位，河道无水（最低地下水位），最小覆土层厚度（取管顶以上0.5m）。

工况2：渠道加大水位，河道设计洪水，最大覆土层厚度。

工况3：渠道设计水位，河道校核洪水，平均覆土层厚度。

工况4：完建期，管内无水，河道无水（最高地下水位），最大覆土层厚度。

工况5：渠道设计水位，河道无水（最高地下水位），两边孔检修，中孔过水，最大覆土层厚度。

工况6：渠道设计水位，河道无水（最高地下水位），中孔检修，两边孔过水，最大覆土层厚度。

（2）河堤平直段。

工况1：渠道设计水位，最低地下水位。

工况4：完建期，管内无水，最高地下水位。

工况5：渠道设计水位，最高地下水位，两边孔检修，中孔过水。

工况6：渠道设计水位，最高地下水位，中孔检修，两边孔过水。

（3）河堤斜直段。

工况1：渠道设计水位，最低地下水位，最大覆土厚度。

工况2：渠道加大水位，最低地下水位，最小覆土厚度。

工况 4: 完建期, 管内无水, 最高地下水位, 最大覆土厚度。

工况 5: 渠道设计水位, 最高地下水位, 两边孔检修, 中孔过水, 最大覆土厚度。

工况 6: 渠道设计水位, 最高地下水位, 中孔检修, 两边孔过水, 最大覆土厚度。

1.3.4 荷载与温度作用

倒虹吸在正常运行过程中须考虑结构自重、土压力、水压力, 按照《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077—1997) 的规定进行计算。

(1) 结构自重。

倒虹吸结构自重, 按体积乘以钢筋混凝土容重可得, 钢筋混凝土容重 25kN/m^3 。本计算采用 ANSYS 软件进行结构计算, 结构自重由软件自动计算。

(2) 土压力。

施工开挖边坡采用留马道分级开挖。管身段回填料采用开挖的砂卵石土回填; 河堤段采用壤土回填。倒虹吸结构上的土压力包括作用于顶板上表面的覆土竖向压力和侧墙外表面的侧向土压力。

(3) 静止水压力 (包括扬压力)。

计算垂直作用于结构表面某点处的静水压强。

(4) 温度作用。

运行期, 使倒虹吸结构产生温差的因素主要有地温、水温 and 气温, 本计算考虑温升和温降两种情况。地温采用邢台地区 1962—1966 年和 1980 年的历年各月平均 3.2m 地温监测成果; 气温采用沙河监测站多年各月平均气温监测成果; 由于邢台地区历年月平均水温资料缺乏, 参照口头水库监测站的水温监测成果, 近似采用。多年月平均地温、水温和气温统计及温升 (温降) 统计分别见表 1.3 和表 1.4。

表 1.3 多年月平均地温、水温及气温统计

单位: $^{\circ}\text{C}$

类别	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
地温	14.9	13.3	12.3	12.3	13.1	14.6	16.4	17.8	18.6	18.8	18.1	16.7
水温	1.6	2.8	5.5	11.6	18.8	24.1	26.5	26.3	22.2	16.2	9.1	2.6
气温	-2.8	-0.3	6.9	14.5	20.8	26.0	26.7	25.3	20.5	14.5	6.1	-0.8

表 1.4 多年月平均温升 (温降) 统计

单位: $^{\circ}\text{C}$

类别	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
地温-水温	13.3	10.6	6.8	0.8	-5.7	-9.5	-10.1	-8.5	-3.6	2.6	9.0	14.1
地温-气温	17.7	13.6	5.4	-2.2	-7.7	-11.4	-10.3	-7.5	-1.9	4.3	12.0	17.5
水温-气温	4.4	3.1	-1.4	-3.0	-2.0	-1.9	-0.2	1.0	1.7	1.7	3.0	3.4

对运行期的不同工况进行具体分析, 影响倒虹吸结构温差的因素有所差别。

1) 长期运行 (工况 1~工况 3) 时, 主要受地温和水温影响。由表 1.3 和表 1.4 可知, 温升最大发生在 7 月, 温升值为 10.1°C , 相应地温为 16.4°C , 水温为 26.5°C ; 温降

最大发生在12月，温降值为 14.1°C ，相应地温为 16.7°C ，水温为 2.6°C 。

2) 完建情况（工况4）下，管内无水，影响温差的因素为地温和气温。根据施工实际情况分析，一般情况下不安排冬季施工，故可不考虑1月、2月和12月的情况。由表1.3和表1.4中3—11月的地温与气温变化情况可知，温升最大月份为6月，温升值为 11.4°C ，相应地温为 14.6°C ，气温为 26.0°C ；温降最大发生在11月，温降值为 12.0°C ，相应地温为 18.1°C ，气温为 6.1°C 。

3) 检修工况（工况5、工况6）下，考虑全年均可检修，由于检修期间历时非常短暂，被检修的管道受水温的影响远大于受气温的影响，影响温差的主要因素仍为地温和水温，与1)的分析相同。

综合考虑上述资料的局限性和全球变暖气候特征，以及温度在混凝土中的传导过程，本计算考虑温升 7°C 和温降 7°C 两种情况。

1.3.5 结构设计功能限值

本工程倒虹吸处于有侵蚀性地下水的地下环境，属三类环境类别，按严格不出现裂缝的构件控制，即在荷载效应标准组合下，混凝土正截面法向应力应为压应力。

第 2 章 倒虹吸结构预应力钢筋布设与合理性分析

2.1 概述

在倒虹吸设计过程中,采用了 2D 有限元模型进行倒虹吸结构的正常使用极限状态应力分布与数值分析,以实现快速验证预应力钢筋布设的合理性,并进行必要的调整。

倒虹吸的预应力混凝土结构断面确定和预应力钢筋的布设方法及调整步骤请详见《倒虹吸结构预应力混凝土技术》(中国水利水电出版社,2011 年)。

2.2 倒虹吸河床平直段结构设计计算

2.2.1 设计计算条件

倒虹吸南汊和北汊河床平直段横断面结构尺寸如图 2.1 所示。

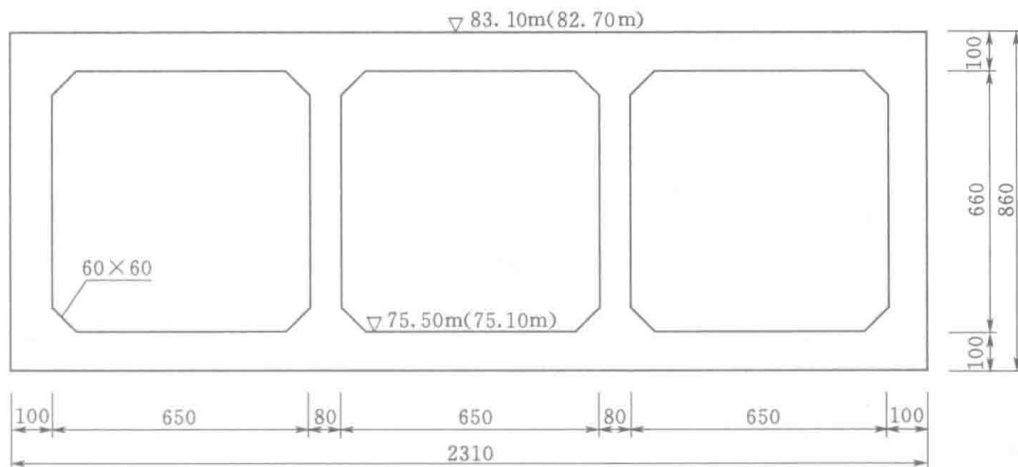


图 2.1 倒虹吸南汊和北汊河床平直段横断面结构尺寸 (单位: mm)

倒虹吸平直段底板、顶板均采用单层曲线预应力钢筋,采用夹片式锚具,两端张拉施工。边竖墙采用曲线预应力钢筋,中竖墙采用直线预应力钢筋,底部采用固定端锚具埋设在墙与底板节点混凝土内,顶部采用夹片式锚具,单端张拉施工。预应力钢筋布置及配置数量如图 2.2 所示。

倒虹吸河床平直段荷载标准值列入表 2.1。