



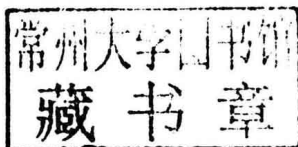
大型水利工程 倒虹吸结构分析

◆ 何 伟 著

地质出版社

大型水利工程倒虹吸 结构分析

何 伟 著



地 质 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

大型水利工程倒虹吸结构分析 / 何伟著. —北京:
地质出版社, 2017. 8

ISBN 978 - 7 - 116 - 10549 - 2

I. ①大… II. ①何… III. ①水利工程-倒虹吸管-
结构分析 VI. ①TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 219916 号

DAXING SHUILI GONGCHENG DAOHONGXI JIEGOU FENXI

责任编辑: 林建 房媛

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 66554577 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554577

印 刷: 北京地大彩印有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm^{1/16}

印 张: 9.75

字 数: 220 千字

版 次: 2017 年 8 月北京第 1 版

印 次: 2017 年 8 月北京第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 10549 - 2

(如对本书有意见或建议, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

倒虹吸作为重要渠道交叉建筑物,是通过山谷、河流、洼地、道路或其它渠道的压力输水管道,在我国古代水利工程与城市建设中就有一定的运用。随着南水北调工程的建设,我国修建了大量倒虹吸管,在结构形式、材料使用、施工方法和制管工艺上取得了突出的进展,所承受的水头越来越高,输水能力越来越大。为保证管身安全,设计时需要进行结构验算。对于倒虹吸管,特别是预应力倒虹吸管来说,影响因素复杂,需要考虑结构自重、土压力、水压力、预应力作用,甚至需要进一步研究预应力钢筋的松弛、混凝土的徐变、开裂、压溃及结构温度应力(年温差、日照温差、混凝土水化热)等因素对倒虹吸结构性能的影响,因此采用常规的方法难以完成。

本书以南水北调中线总干渠渠道倒虹吸工程为背景,介绍了目前国内外大型倒虹吸结构应用的最新研究进展,介绍了有限元法基本理论及其在倒虹吸结构分析中的应用。并基于 ANSYS 软件建立了倒虹吸三维有限元模型,结合倒虹吸工作环境与条件、完建期和运营期典型工况,模拟分析了渠道倒虹吸运营期重力、水与温度等多因素作用下结构变形、内力与应力特点,验算了设计方案的可行性,为工程建设和后期安全运营提供参考。主要内容包括 9 章。

1) 第 1 章:绪论,主要介绍了倒虹吸管的相关应用与发展,并介绍了倒虹吸结构形式与倒虹吸结构计算方法。

2) 第 2 章:结构仿真分析与有限元基本理论,介绍了结构仿真技术发展、结构仿真分析目标与结构仿真分析实现;说明了有限元法的发展、分析过程与基本思想。

3) 第 3 章:倒虹吸工程概况与有限元模型,主要介绍了倒虹吸基本情况,说明了结构分析计算标准与原则,介绍了倒虹吸三维有限元模型的建立与计算荷载标准及河床段倒虹吸 9 种典型工况。

4) 第 4 章:河床段管身结构分析,主要介绍了倒虹吸河床段管身计算结果,说明了各工况下管身横向应力、竖向应力的特点。

5) 第5章:河床段倒虹吸结构温度影响分析,主要介绍了管身与水体温差对河床段倒虹吸结构的影响,计算了管内水体不同温度时对管身顶板、底板横向应力与竖墙竖向应力的影响,给出了管身受重力、水压力、温度荷载作用下河床段倒虹吸管身应力的分布特征。

6) 第6章:河堤段倒虹吸三维有限元模型,主要介绍了倒虹吸河堤段有限元模型的建立及河堤段倒虹吸9种典型计算工况。

7) 第7章:河堤段倒虹吸结构分析,主要介绍了河堤段倒虹吸9种典型计算工况下结构分析,给出了顶板、底板等的横向应力和竖墙外侧与内侧竖向应力的分布特征。

8) 第8章:河堤段倒虹吸结构温度影响分析,主要介绍了管身与水体温差对河堤段倒虹吸的结构影响,计算了管内水体不同温度时对管身顶板、底板横向应力与竖墙竖向应力的影响,给出了管身受重力、水压力、温度荷载作用下河堤段倒虹吸管身应力的分布特征。

9) 第9章:结论,根据计算结果,给出了倒虹吸结构验算结论。

本书作者为华北水利水电大学何伟。在项目研究与书稿完成过程中,何容、郭术义、邓建绵等也参加了有关部分研究工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,本书恐存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

何 伟

2016年5月于郑州

目 录

前 言

1 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 倒虹吸	2
1.3 倒虹吸的应用与发展	2
1.3.1 国内倒虹吸应用实例	2
1.3.2 国外倒虹吸应用实例	3
1.4 倒虹吸结构形式	4
1.4.1 倒虹吸管横断面形式	4
1.4.2 材料选择	5
1.5 倒虹吸管结构计算方法	6
2 结构仿真分析与有限元基本理论	8
2.1 结构仿真技术	8
2.1.1 结构仿真技术的发展	8
2.1.2 结构仿真分析的目标	9
2.1.3 结构仿真分析的实现	9
2.2 有限元法	11
2.2.1 有限元法的发展	11
2.2.2 有限元法分析计算的过程	12
2.2.3 有限元法的基本思想	13
2.2.4 ANSYS 软件介绍	13
3 倒虹吸工程概况与有限元模型	15
3.1 工程概况	15
3.2 计算标准与原则	15
3.2.1 承载能力极限状态设计验算	15
3.2.2 正常使用极限状态验算	16
3.3 倒虹吸三维有限元模型	16
3.4 荷载标准	18
3.5 河床段倒虹吸计算工况	20
3.5.1 工况一	20
3.5.2 工况二	21
3.5.3 工况三	22

3.5.4	工况四	22
3.5.5	工况五	23
3.5.6	工况六	24
3.5.7	工况七	24
3.5.8	工况八	25
3.5.9	工况九	26
4	河床段管身结构分析	28
4.1	工况一	28
4.1.1	横向应力 S_x	28
4.1.2	竖向应力 S_y	30
4.2	工况二	31
4.2.1	横向应力 S_x	31
4.2.2	竖向应力 S_y	34
4.3	工况三	35
4.3.1	横向应力 S_x	35
4.3.2	竖向应力 S_y	37
4.4	工况四	38
4.4.1	横向应力 S_x	38
4.4.2	竖向应力 S_y	40
4.5	工况五	41
4.5.1	横向应力 S_x	41
4.5.2	竖向应力 S_y	43
4.6	工况六	45
4.6.1	横向应力 S_x	45
4.6.2	竖向应力 S_y	47
4.7	工况七	48
4.7.1	横向应力 S_x	48
4.7.2	竖向应力 S_y	50
4.8	工况八	52
4.8.1	横向应力 S_x	52
4.8.2	竖向应力 S_y	54
4.9	工况九	55
4.9.1	横向应力 S_x	55
4.9.2	竖向应力 S_y	58
4.10	小结	59
5	河床段倒虹吸结构温度影响分析	60
5.1	横向应力 S_x	60
5.1.1	顶板	60

5.1.2	底板	67
5.2	竖向应力 S_y	73
5.2.1	竖墙外侧	73
5.2.2	竖墙内侧	77
6	河堤段倒虹吸三维有限元模型	81
6.1	河堤段倒虹吸计算模型	81
6.2	河堤段倒虹吸计算工况	83
6.2.1	工况一	83
6.2.2	工况二	84
6.2.3	工况三	84
6.2.4	工况四	85
6.2.5	工况五	86
6.2.6	工况六	87
6.2.7	工况七	88
6.2.8	工况八	89
6.2.9	工况九	89
7	河堤段倒虹吸结构分析	91
7.1	工况一	91
7.1.1	横向应力 S_x	91
7.1.2	竖向应力 S_y	93
7.2	工况二	94
7.2.1	横向应力 S_x	94
7.2.2	竖向应力 S_y	97
7.3	工况三	98
7.3.1	横向应力 S_x	98
7.3.2	竖向应力 S_y	100
7.4	工况四	101
7.4.1	横向应力 S_x	101
7.4.2	竖向应力 S_y	104
7.5	工况五	105
7.5.1	横向应力 S_x	105
7.5.2	竖向应力 S_y	107
7.6	工况六	108
7.6.1	横向应力 S_x	108
7.6.2	竖向应力 S_y	110
7.7	工况七	112
7.7.1	横向应力 S_x	112
7.7.2	竖向应力 S_y	114

7.8 工况八	115
7.8.1 横向应力 S_x	115
7.8.2 竖向应力 S_y	118
7.9 工况九	119
7.9.1 横向应力 S_x	119
7.9.2 竖向应力 S_y	121
7.10 小结	122
8 河堤段倒虹吸结构温度影响分析	123
8.1 横向应力 S_x	123
8.1.1 顶板	123
8.1.2 底板	130
8.2 竖向应力 S_y	136
8.2.1 竖墙外侧	136
8.2.2 竖墙内侧	140
9 结论	144
参考文献	145

1 绪 论

1.1 前言

“南水北调工程”是我国为缓解北方水资源严重短缺局面而实施的重大战略性工程。我国南涝北旱，南水北调工程通过跨流域的水资源合理配置，可大大缓解我国北方水资源严重短缺问题，促进南北方经济、社会与人口、资源、环境的协调发展。南水北调分东线、中线、西线三条调水线（图 1.1），东线工程起点位于江苏扬州江都水利枢纽；中线工程起点位于汉江中上游的丹江口水库，供水区域为河南、河北、北京、天津四省（市）；西线工程在最高一级的青藏高原上，地形上可以控制整个西北和华北，因长江上游水量有限，只能为黄河上中游的西北地区和华北部分地区补水。东、中、西线干线总长度达 4350km。其中东、中线一期工程干线总长为 2899km，沿线六省市一级配套支渠约 2700km。

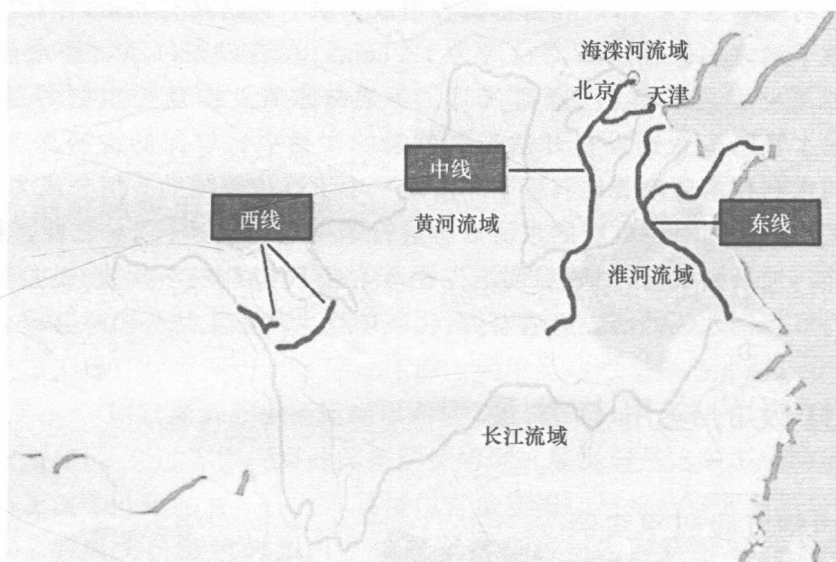


图 1.1 南水北调工程调水线路示意图

中线工程是南水北调工程中移民最多、投资最大、工程施工难度最大的一项工程。工程从湖北丹江口市的丹江大坝加坝扩容后的丹江口水库淅川陶岔渠首闸引水，沿唐白河流域西侧过长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口后，经黄淮海平原西部边缘，在郑州以西孤柏嘴处穿过黄河，继续沿京广铁路西侧北上，可基本自流到北京、天津。中线工程总干渠沟通长江、淮河、黄河、海河四大流域，需穿过黄河干流及其他集流面积 10km^2 以上河流 219 条，跨越铁路 44 处，建设跨总干渠的公路桥 571 座。此外，还有节制闸、分水

闸、退水建筑物和隧洞、暗渠等。总干渠上各类建筑物共 936 座，其中最大的是穿黄河工程。天津干渠穿越大小河流 48 条，有建筑物 119 座。

1.2 倒虹吸

倒虹吸管（又称反虹管、地龙或地涵）是输送渠水通过山谷、河流、洼地、道路或其它渠道的压力输水管道，是一种渠道交叉建筑物，是灌区配套工程中的重要建筑物之一。

倒虹吸管有悠久的历史。早在 2000 多年前，中国已有成功的运用。与虹吸管一样，它在立面上也呈弓形；不同的是，其弓弯向下。而且虽然倒虹吸管和虹吸管的输水原理相同，即都借助于上下游的水位差，但倒虹吸在开始工作时不需人为地制造管中的真空，因而更为普及。

倒虹吸主要用于农田水利工程中。渠道与道路、河流等发生交叉时，既可采用渡槽，如北宋时曾在引用泾水的郑白渠上使用过；也可采用倒虹吸，如南宋时曾在引用褒水的山河堰上使用过。这种大型倒虹吸多采用浆砌块石构筑，也可用竹筒连接而成。在唐朝诗人杜甫的诗歌和元代科学家王祯所著的《农书》中都可见到对输水渠道上使用倒虹吸的描述和记载。

除输水外，倒虹吸还用于中国古代的城市建设中。考古发现，在战国时期，今河南省登封市的城市供水系统中已经采用了倒虹吸。整个供水设施由输水管、控制流量的控制坑、沉淀泥沙的澄水池、贮水坑和蓄水瓮等组成。供水管路共有 8 条，沿地形由高到低布设，总长有数千米之多。输水管内径约为 12.3cm，在淹没条件下，输水流量可达 $20 \sim 30 \text{ m}^3/\text{s}$ 。输水管路由直通管、三通排气管、三通分水管、四通控水管等部件衔接组成，均为陶制。输水管路多数铺设在开凿于红砂岩的沟槽中，较深的沟槽深达 1.2~2.0m。在现存最早的水利技术理论著作《管子·度地》中，这位曾辅助齐桓公成为春秋第一霸的作者管子曾满怀兴趣地对倒虹吸的水流形态进行了生动的描述，“水之性，行至曲，必留退，满则推前，地下则平行，地高即控。”由于在商代遗址中多次发现过地下输水系统，因而有人认为可将倒虹吸的历史追溯至商代。

1.3 倒虹吸的应用与发展

1.3.1 国内倒虹吸应用实例

在国内很多工程中倒虹吸都有着广泛的应用。渠道与山谷等障碍物或其它渠道相交时，可用倒虹吸管、渡槽、填方渠道下的涵洞等交叉建筑物。这些建筑物各有其使用条件，选用时必须因地制宜，全面考虑。一般在以下情况可考虑采用倒虹吸管。当输水渠道与河流、山谷、洼地、道路等障碍物或其它渠道交叉时，高差很小，只有 3~5m，做渡槽或填方渠道及涵洞均不能满足洪水宣泄，或有碍船只、车辆通行时，应修建倒虹吸管从障碍物底部通过。如广西达开水库四面倒虹吸管，河床高程 58.8~59.5m，渠底高程 60.4m，渠水面高程 62.8m，所跨越的河道设计洪水位 61.3m，如建渡槽，设计洪水位已达槽身高的一半，槽身受洪水冲击，很不安全，要从结构上解决此安全问题，所需工程量

很大；如建涵洞，渠底以下的净空仅 1m 多，排水涵洞不能满足洪水宣泄。经考虑后选用 232m 长的倒虹吸管从河底穿过。倒虹吸具有工程量少、施工方便、节省劳动力及材料、造价低、可以工厂化生产等优点，中华人民共和国成立以来，在我国农田水利建设中，修建了大量倒虹吸管，对建设旱涝保收、高产稳产农田及供应城市工业和生活用水都起到一定的作用。在山区由于水头充裕，倒虹吸管特别受欢迎。广西壮族自治区已建成倒虹吸管 430km，湖南省芷江县梨溪水库灌区的交叉建筑物中，倒虹吸管占 30%。

随着经济的发展，特别是随着南水北调工程的建设，我国修建了大量倒虹吸管，在结构形式、用材、施工方法和制管工艺上有不少发展。预应力钢筋混凝土管由于其承压较高，具有较高的抗裂性、抗渗性，故得到了推广。

如南水北调中线工程金河渠段。金河渠道倒虹吸工程是南水北调中线总干渠邢石段的一座大型河渠交叉建筑物，位于石家庄鹿泉市南铜冶镇东约 2.5km 处的石铜公路附近，全长 498m。倒虹吸工程同时穿越金河、石铜公路和石家庄市通山工程地下人防洞，交叉断面以上流域面积 36.5km^2 。

又如南水北调中线工程滹沱河段。滹沱河倒虹吸工程位于河北省正定县西柏棠乡新村村北，由倒虹吸进口渐变段、进口闸室段、管身段、出口闸室段、出口渐变段 5 部分组成。渐变段为直线扭曲面；倒虹吸进口检修闸为三孔一联的开敞式整体结构；管身为钢筋混凝土箱涵断面。过水断面 3（孔） $\times 6.0\text{m}$ （宽） $\times 6.2\text{m}$ （高）；出口节制闸为开敞式整体结构，布置有弧形工作门和检修门。

此外，还有南水北调中线总干渠白河段、南水北调中线新乡段倒虹吸、南水北调中线漳河段、四川省刘家坝、四川省眉山市东风支渠李子湾段等。

因为倒虹吸结构在水工建设上面的优越性，现如今国内外众多水工项目都在用到了倒虹吸。

1.3.2 国外倒虹吸应用实例

国外对于倒虹吸的研究达到了很高的水平。如穿越苏伊士运河的萨拉姆倒虹吸隧洞项目。埃及阿拉伯共和国公共工程及水资源部所属的西奈北部开发委员会修建了一项跨流域引水工程，这项工程从尼罗河引水，穿过苏伊士运河到达西奈半岛北部，它每年从尼罗河引水 $44.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，用以灌溉苏伊士运河以西的 $8.4 \times 10^4 \text{hm}^2$ 和运河以东西奈地区北部的 $16.8 \times 10^4 \text{hm}^2$ 农田，穿过苏伊运河的四条萨拉姆倒虹吸隧洞是这项工程的最重要建筑物。

大约在公元前 180 年左右，在土耳其境内古希腊帕加马城建有大型城市输水管沟，水从海拔约 360m 的源头，跨越两条山谷输送至这座城堡，而城堡制高点只比源头低约 40m。其中建有跨越百余米山谷的倒虹吸。古罗马著名建筑师维特鲁威在写于 2000 年前的不朽名著《建筑十书》中，详细地记述了当时输水管网的建设要点。对于倒虹吸，维特鲁威还特别指出，为了倒虹吸的安全运行，需要修建镇墩和排气竖管。

美国加利福尼亚州调水工程项目倒虹吸。加州有沙漠也有多雨丛林，气候属亚热带—高山型。年降雨量 50~2500mm，有足够的水源供其所需，但主要的水源在北加州，70% 的河流流量来自萨克拉门托之北，而 80% 的需求却来自萨克拉门托之南。在这项庞大的工程中，倒虹吸扮演着重要的角色。

由此可见，在世界范围内，倒虹吸同样有着广泛的应用。

1.4 倒虹吸结构形式

倒虹吸结构由钢筋混凝土将倒虹吸管身及土层耦合构成，倒虹吸的管身常用钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土材料制成。倒虹吸管较渡槽造价低，施工简单；但水头损失较大，清淤较困难。倒虹吸结构整体布置由三部分组成：进口段、管身段和出口段。①进口段：包括渐变段、铺盖和护底等防渗防冲设施、拦污栅、闸门、进水口等。当含沙量大时还设有沉沙池。②管身：断面形式有矩形、圆形或直墙圆拱形。③出口段：根据需要设消力池等，并与下游平顺连接。

倒虹吸管的建造形式主要有：穿越式和横跨式。穿越式倒虹吸管：从河流、渠道或公路下面穿过，埋于地下（图 1.2），一般水头不大，主要荷载是管上部的土压力。横跨式倒虹吸管：在河道或山谷比较宽阔，位置较低时采用，当管道跨越深谷和山洪沟时，可在深槽部分建桥，在其上铺设管道过河。管道在桥头两端山坡转弯处设镇墩以加强稳定性，并于其上开设放水冲沙孔。两岸管道仍沿地面敷设。这类倒虹吸管又称桥式倒虹吸管。图 1.3 是横跨河谷裸露的倒虹吸管，这种形式一般适用于水头高、流量大的引水工程。

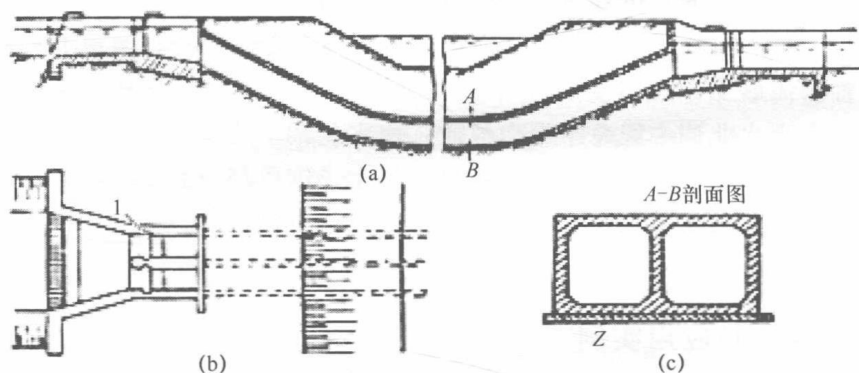


图 1.2 穿越式地下倒虹吸管结构图

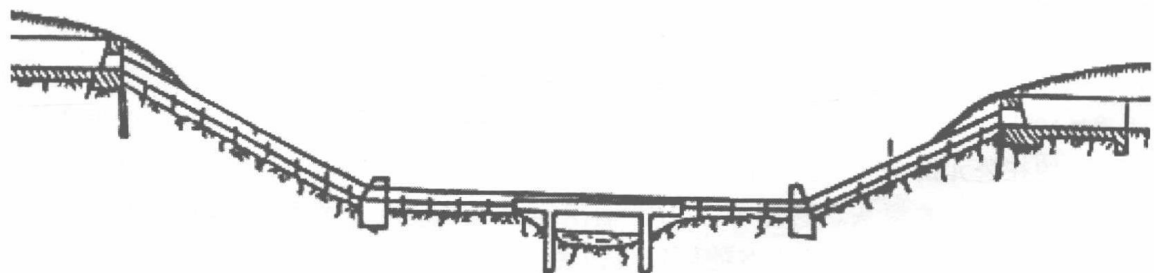


图 1.3 桥式裸露倒虹吸管结构图

1.4.1 倒虹吸管横断面形式

倒虹吸管的过水断面由水力计算确定，根据设计流量和给定的水头通过试算确定，采用的具体形式主要有：矩形、圆形和拱形。

矩形：又称箱形，如图 1.2c，一般用于低水头、大流量的引水工程中。根据流量大

小可以布置单孔、双孔或多孔。箱型倒虹吸管的结构相对简单，容易施工，在南水北调中线工程中占主导地位。

圆形：包括圆环形和内圆外城门洞形，如图 1.4 圆形管道湿周小，与相同大小过水面积的箱形、拱形管道相比，水流条件好，过流能力大。管壁所受的内水压力均匀。与同样流量的箱型钢筋混凝土管相比，可节约 10%~15% 钢材，能承受高水头的压力，且小型的管道适宜于成批生产，缺点是施工复杂。

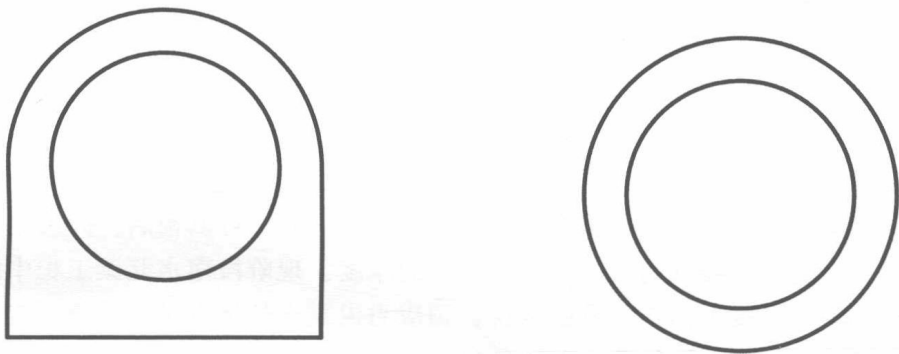


图 1.4 圆形倒虹吸管断面形式

直墙连接的正反拱形管道：过水能力居中，适用于平原河网地区的低水头、大流量和外水压力大、地基软弱的条件。缺点是施工比较麻烦，结构计算还不成熟。

1.4.2 材料选择

倒虹吸管不仅要满足过水能力，还要承担自重、内水压力、外部荷载（垂直土压力和外水压力）、侧向土压力、地震荷载和温度应力等各种因素作用。所以倒虹吸管的材料选择也就非常重要，常用的有以下几种：

(1) 现浇钢筋混凝土

现浇混凝土倒虹吸结构是当前一种比较经济、适用、合理的管型。适用于水头不太高（ $H \leq 25\text{m}$ ），流量较大的输水管道。布置比较灵活，耐久性较好，造价比较低廉。缺点是当流量过大的时候会造成自重过大而不再经济，裂缝的出现也是一个比较严重的问题。

(2) 球墨铸铁管

在中小型引水工程中，国内外也经常采用球墨铸铁管，强度很高，施工简单，一般口径不超过 2600mm。另外，铸态球墨铸铁管（未经过退火处理的球墨铸铁管）的性能除延伸率低于球墨铸铁外，其他性能均与球墨铸铁类似，而价格却低廉得多。

(3) 钢管

我国使用钢管的历史比较长，使用的范围也比较广：水利、水电工程、给排水工程等。可以埋置也可以露天架设。通过焊接来加长，适用于中小型工程，施工比较方便，管径过大后焊缝的可靠度会降低。特别要注意防腐处理。

(4) 玻璃钢管

常用的玻璃钢管有玻璃钢夹砂管，近年来还有离心浇注增强树脂夹砂复合管和玻璃纤维缠绕加砂复合管等。其优点是力学性能优越、水力特性好、强度高、重量轻，便于运输

和施工,耐腐蚀、耐磨,寿命较长。缺点是对地基与回填土要求较高,造价高。

(5) 聚乙烯管和聚氯乙烯管

聚乙烯常用的有两种:高密度聚乙烯缠绕增强管和高密度聚乙烯双壁波纹管。特点是耐外压、耐腐蚀、无毒、无污染,内壁光滑,适用于东部沿海软土、沼泽地基。聚氯乙烯性能与聚乙烯相似,内径一般在 800mm 以内,适用于小型输水工程。

(6) 预应力钢管混凝土

预应力钢管混凝土是钢管和混凝土的复合体,兼备二者的优点,因而能承受较高的内外力。管径小于 4500mm 的采用内衬型式,即指把钢管作内衬外包混凝土,用离心法和径向压实法制作;较大的管径采用嵌埋型,即把钢管嵌埋在混凝土管芯靠近 $1/3$ 处,立式浇注法制作。耐久性好,维护费用低。

(7) 预应力钢筋混凝土

预应力混凝土结构对一些小型来说造价低廉,自重轻,可以预制。大尺寸现浇的预应力结构可以有效地控制裂缝的开展,减小结构的厚度。现阶段南水北调工程中的大型工程多采用预应力钢筋混凝土结构。总的来说,预应力混凝土的优点是:改善和提高结构的力学性能;提高结构的耐久性、耐疲劳性和抗震性能;节约钢材,减轻结构自重;增强结构的抗裂性和抗渗性;提高构件的刚度,减小变形等。

1.5 倒虹吸管结构计算方法

(1) 结构力学法

对于箱型和圆形的混凝土倒虹吸结构,无论是单孔还是多孔,他们都属于高次超静定结构。对中小型等截面箱型倒虹吸管,沿水流方向取单宽,计算模型为闭合框架,用结构力学中解决超静定问题的力法或位移法等来计算,或者直接查成熟的计算表;对于变截面和孔径的箱型倒虹吸结构,一般采用力矩分配法或迭代法来计算,计算过程比较复杂,可以通过编程来实现。对圆形管道,由于混凝土管属于脆性破坏不能考虑塑性变形,而且钢筋混凝土压力管道设计时不允许裂缝出现,因而也不考虑塑性变形,故可以按照均质弹性体计算,模型为三次超静定圆环,用弹性中心法计算内力。对不规则的几种管型,可以查美国垦务局编的应力分析表。

(2) 弹性力学法

对预应力混凝土倒虹吸结构,在使用阶段,预应力混凝土管道管壁混凝土不出现拉应力或仅出现有限拉应力,因此可以假定所有材料均处于弹性工作状态,将其简化为线弹性双层圆筒轴对称平面变形计算模型。预应力筋束内侧为一层,外侧为一层,中间的接触应力通过变形协调条件求得。该方法可以验算预应力压力管道正常使用阶段的内力。

(3) 有限元法

混凝土和钢筋是两种不同的材料,其物理参数相差很大,无法用合适的数学和物理公式求得精确的解析解,为了克服数学上的困难,专家学者们提出了多种近似求解方法,例如有限差分法、变分法、有限单元法等。其中最有效的方法为有限单元法(简称有限元法)。有限元法是针对物理或工程问题建立起来微分方程,包括控制方程和边界条件;典型步骤包括结构或区域离散、单元分析、整体分析和数值求解。把模型赋予一定的物理特

性，然后划分单元，相互之间的作用也通过一定的手段来实现，从而进行大量的计算来求解。随着计算机技术的发展，有限元法因其适用性而得到了广泛应用。对大型的箱形和圆形的倒虹吸管都可以用有限元法进行分析计算。南水北调工程的设计大纲就要求所有的倒虹吸结构进行结构仿真计算与有限元分析。

近几年来，我国在倒虹吸管的建设中，积累了丰富的经验，在结构形式、材料应用、施工方法和制管工艺上都有所发展，所承受的水头越来越高，输水能力越来越大。倒虹吸管中的水头损失对于工程的运行有着很大的影响，如设计时损失考虑过大，则会在运行时前池水位降低，影响其进口流态，若考虑过小，则会在运行时前池水位抬高，且对有预应力筋的倒虹吸管来说，其影响因素相当复杂。采用常规的方法难以计算。这就迫切需要功能齐全、性能可靠的综合分析方法以求解倒虹吸管在各种因素作用下的力学特性，计算中可以模拟管中预应力钢筋的松弛、混凝土的徐变、开裂、压溃及结构温度应力（年温差、日照温差、混凝土水化热）等因素对受力的影响，并可以很好地模拟周围环境对倒虹吸管的影响。

2 结构仿真分析与有限元基本理论

2.1 结构仿真技术

2.1.1 结构仿真技术的发展

20 世纪 60 年代以来, 计算机仿真技术 (又称计算机模拟技术) 已由最初的数值模拟及数值模拟结果的图形显示, 发展成为今天的与信息论、控制论、模拟论、人工智能、多媒体技术等现代科学技术相关的一门高新技术学科。应用计算机仿真技术可进行试验模拟、灾害预测、事故再现、方案优化、结构性能评估等多项人们难以进行, 甚至由于当时条件的限制而不可能进行的一些工作。目前, 计算机仿真技术已广泛应用于军事、工业、农业、交通运输和医学等各领域。近年来, 计算机仿真技术在结构工程中的应用日益普遍。国内外很多学者已在这方面做了大量的工作, 如美国康奈尔大学的 Cundall, P. A. 1971 用离散元技术模拟了岩石边坡的渐进过程; 日本东京大学的学者用离散单元法对钢筋混凝土框架结构在遭遇强烈地震作用时的倒塌过程进行了计算机仿真分析; 国内清华大学江见鲸 (1996) 等对混凝土构件的破坏过程进行过模拟; 同济大学顾祥林 (2002) 曾对混凝土结构基本构件、钢筋混凝土杆系结构在不同外界干扰作用下的破坏过程及钢筋混凝土框架结构在单调荷载作用下的倒塌反应进行过计算机仿真分析。

计算机仿真技术的历史不长, 混凝土结构计算机仿真技术的历史更短。但随着计算机的不断更新换代、结构工程领域新成果的不断涌现, 混凝土结构仿真技术一诞生就显示出勃勃生机, 并有很多成果投入工程应用, 为人类认识自然提供了一个有力的工具。未来如能在下面一些研究方向上取得突破, 计算机仿真技术在结构工程中的应用前景还会更加美好。

1) 不同环境下 (老化、腐蚀、高温、多维荷载作用等) 材料的本构关系。目前, 已有一些成果, 但综合应用还有一定的困难。

2) 适合于大变形、不连续位移场的结构分析 (数值计算) 方法。离散单元法在这方面有很好的应用前景, 但还需要作更加深入的研究工作。

3) 结构的倒塌机制。模拟结构在一定环境下是否倒塌会在结构方案比较、事故过程的反演、旧建筑的维修改造及小区设施的综合防灾规划等方面给决策者提供有力的理论依据。但结构的倒塌过程非常复杂, 有很多理论问题需要继续研究, 如分离混凝土块体运动轨迹、钢筋断裂释放的能量对分离混凝土块体后续运动的影响、结构倒塌过程中运动块体的阻尼、分离混凝土块体之间及分离块体和母体结构之间的碰撞等。

4) 结构生命全过程多种因素作用下结构反应的仿真。结构的生命全过程可分为建造、使用 and 老化三个阶段。进行结构生命全过程多种因素作用下结构反应的仿真, 可为结构的