

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.06.037

厦门市北溪引水主干渠结构断面设计分析

王璐璐

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 北溪引水主干渠为厦门市的供水主动脉,考虑到土地规划的需求以及供水升级的必要性,现对其马銮湾段进行升级改造。主干渠供水规模为 $16\text{ m}^3/\text{s}$,断面形式采用双孔钢筋混凝土箱涵。遵循断面设计需与地基适应性强,与原旧箱涵衔接方便等原则,将主干渠分为4种断面规格;并对其进行有限元计算分析,计算得出相应箱涵内力与抗浮成果。

关键词: 引水主干渠;断面设计;钢筋混凝土箱涵

中图分类号: TV91

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)06-0135-05

1 工程概况

1.1 工程必要性

北溪引水主干渠1980年5月1日正式通水运行,主干渠工程作为跨流域调水工程,最大引水流量为 $12\text{ m}^3/\text{s}$,每年可由九龙江北溪引水 3.784 亿 m^3 ,为厦门市主要水源工程,是厦门市的主动脉,目前承担着厦门市岛内外85%以上城市生活和工业用水的需求。

改造北溪左干渠是更好的建设马銮湾新城的前提必要条件,改造北溪主干渠具有以下必要性。

(1)与区域土地利用规划相适应,优化地区产业用地布置。

根据原市政专项规划,现状主干渠布置与规划两条东西向主干路之间,沿线地块宽度在200~300 m之间。本着从可持续发展的战略角度出发,经济建设应与环境保护建设同步,将原左干渠进行改线,截弯取直,可腾挪出更多的产业用地,达到优化片区规划的目。

(2)与九龙江北溪水闸改造工程相适应,满足远期 $16\text{ m}^3/\text{s}$ 供水能力。

福建省九龙江北溪水资源调配中心近期开始推进九龙江北溪水闸改造工程的前期工作,增加向厦门的供水能力(不低于 $16\text{ m}^3/\text{s}$)。为提高厦门市供水保障和远期用水需求,本次北溪引水主干渠(马銮湾新城段)改造工程将同步扩容改造,满足远期 $16\text{ m}^3/\text{s}$

供水能力要求,一次实施到位。

(3)与区域水系规划相适应,满足区域防洪排涝要求。

根据最新区域水系规划,主干渠沿线的过芸溪、后浦溪、贞岱渠、深青溪等河道规划蓝线均与现状河道岸线有较大变化,规划河底标高0.0~0.5 m,而现状主干渠箱涵顶标高约为2.70 m,高于规划河底标高,因此,为使规划水系按照规划河道断面实施到位,满足区域防洪排涝要求,须对现状主干渠进行改造,新建倒虹吸结构与规划河道相适应。

因此,进行北溪引水主干渠改造工程(马銮湾新城段)的建设势在必行,是非常迫切的、必要的。

1.2 工程建设内容

北溪引水主干渠改造工程属于主干渠厦门段(全长22.084 km),由霞尾村至陈井村,沿途经过后头村、贞岱村等村庄,现状箱涵全程采用暗涵形式。

本次改造主干渠沿孚莲东二路和环湾大道北侧布置,起于过芸溪公园西侧,止于深青溪东侧,长度约5.746 km,供水规模为 $16\text{ m}^3/\text{s}$ 。箱涵、虹吸管为主干渠的主体部分,是主要建筑物,建筑物等级为1级。

2 主干渠断面设计

本次设计采用双孔钢筋混凝土箱涵断面。该断面运行安全可靠,对地基不均与沉陷适应性强,与原箱涵衔接方便。暗渠箱涵和原暗涵隧洞相接时,均采用原有暗涵隧洞实际测量的进出口高程,比降结果,不再变动,孔口底高程为-2.387~-2.110 m。主干渠断面型式及断面尺寸设计对主干渠改造工程投资影响较大,根据主干渠纵断面布置原则,遵循安全、经济、

收稿日期: 2022-10-19

作者简介: 王璐璐(1988—),女,硕士,工程师,从事水利水电设计工作。

实用的要求,结合现场施工条件,提出适当结构形式和断面尺寸。

2.1 断面型式选择

本次设计采用双孔钢筋混凝土箱涵结构型式。钢筋混凝土结构型式有着如下特点:

- (1)现浇钢筋混凝土结构,对地基不均与沉陷适用性强;
- (2)混凝土结构施工工艺比较成熟,施工较易,施工材料可就地取材,施工质量易于保证,运营期管理维修方便;
- (3)运行安全可靠,结构坚固,性能较好;
- (4)与两侧主干渠采用相同断面型式,通过植筋等工艺可较好的使新老结构衔接起来,保证新老结构的统一性;
- (5)混凝土结构具有良好的品质一致性,具有成熟的工艺与管理系统,以及相应的可靠标准及规范可用于标准化建设,方便施工过程监督与检测,以及相应部门检查验收。

根据对于暗渠箱涵的现状结构型式的调查,推荐采用相同结构尺寸大小的钢筋混凝土箱涵与老结构衔接。根据输水能力 16 m³/s 的要求及纵向设计中各段类型划分,遵循断面结构简易、通用性强、安全可靠的设计原则,共设计了 4 种断面尺寸规格^[1]:

- (1)A 型—A 型为主干渠工程的标准型断面,总长度约 3 670.3 m;
- (2)B 型—B 型为主干渠工程的倒虹吸断面,总长度约 226.8 m;
- (3)渐变型—渐变型为主干渠 A 型与 B 型之间的连接断面,总长度约 264.8 m;
- (4)衔接型—衔接型为主干渠工程与原左干渠相连接的断面,总长度约 362.3 m。

具体的断面类型和分布长度如图 1 所示,断面结构类型划和分布长度见表 1。由于渐变型和衔接型的断面首尾为 A 型和 B 型,在结构分析及配筋计算时可采用 A 型和 B 型的计算结果,进行渐变和衔接,因此,这里不对渐变型和衔接型进行专项计算。

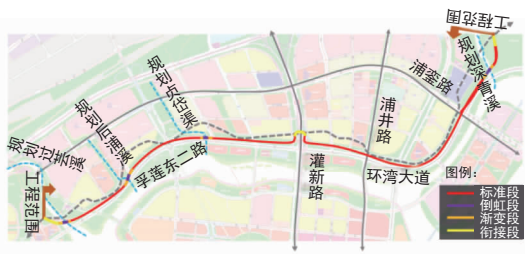


图 1 断面设计平面布置

表 1 断面结构类型划和分布长度

断面形式	平面桩号分布	长度 /m
A	K0+257~K0+952.80、 K1+039~K1+882.8	4 943.96
	K1+971~K2+869.866、 K3+026~K5+408 K5+560~K5+683.5	
B	K0+118.2~K0+232、 K0+994~K1+014	241.6
	K1+924~K1+946、 K5+449.2~K5+535	
渐变段	K0+077~K0+118.2、 K0+232~K0+257 K0+952.80~K0+994、 K1+014~K1+039	264.8
	K1+882.8~K1+924、 K1+946~K1+971 K5+408~K5+449.2、 K5+535~K5+560	
衔接段	K0+000~K0+077、 K2+869.866~K3+026	289.1
	K5+683.5~K5+739.470	
合计		5 739.47

2.2 A 型断面

A 型为主干渠工程的标准型断面,如图 2 所示,总长度约 4 943.9 m。为满足设计流量 16 m³/s 的要求。A 型断面尺寸为双孔,单孔宽 4.30 m,高 4.50 m,壁厚 0.5 m,腋角 0.3 m×0.3 m,设计过水水深 3.891 m,设计输水流量 16 m³/s,箱涵下方由上至下分别为 0.1 m 厚素混凝土垫层及 0.3 m 厚砂石垫层。

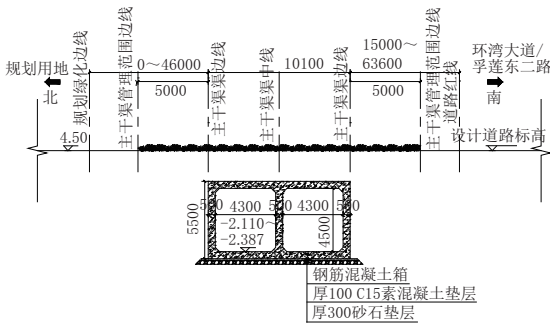


图 2 A 型断面结构(单位:mm)

2.3 B 型断面

B 型为主干渠工程的倒虹吸断面,如图 3 所示,总长度约 241.6 m。B 型断面尺寸为双孔,单孔宽 4.30 m,高 4.50 m,壁厚 0.5 m,腋角 0.3 m×0.3 m,设计过水水深 4.50 m,设计输水流量 16 m³/s,箱涵下方由上至下分别为 0.1 m 厚素混凝土垫层及 0.3 m 厚砂石垫层。为防止河道对箱涵顶板的冲刷,在倒虹段上铺设 500 mm 厚雷诺护垫和 500 mm 厚中粗砂垫层,并向箱涵两侧各延伸 5 000 mm 宽。

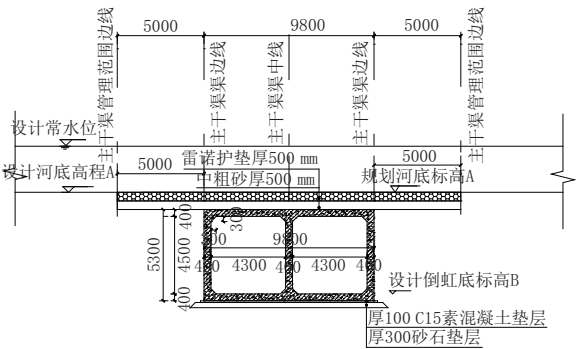


图 3 B 型断面结构(单位:mm)

3 箱涵设计参数及条件

3.1 设计参数

- (1)永久荷载:结构自重。
 - (2)可变荷载:
 - a. 人群活荷载:5 kN/m²。
 - b. 施工活荷载:活荷载 10 kPa 设计。
 - (3)设计水位
 - a. 地下水水位:3.15 m。
 - b. 箱涵设计水深:3.12~3.27 m。
 - (4)设计主要材料
- 箱涵采用 C35 混凝土,受力钢筋及构造钢筋采

用Ⅲ级钢筋。

(5)填土高度

涵顶填土高程计算为 4.50 m。

3.2 软件介绍

各个断面结构采用 Autodesk Robot Structural Analysis 进行内力计算。Autodesk Robot Structural Analysis(以下简称 Robot)支持多国设计规范。

Robot 进行结构分析的对象为结构模型,区别于传统的有限元分析软件:结构模型用类似结构力学的计算简图方式来表示构件。Robot^[2-3]的计算分析主要对“点”、“线”进行分析,比较类似于人为校验。

3.3 计算条件

3.3.1 作用在箱涵上的荷载

箱涵上作用的各种荷载主要有:

- (1)箱涵自重及填土重;
- (2)土压力;
- (3)静水压力;
- (4)扬压力;
- (5)人群及施工机械的外荷载。

3.3.2 箱涵设计计算工况

本工程选用以下三种工况进行计算,见表 2。

表 2 工况荷载组合表

序号	工况	极限状态	作用力									
			自重	分项系数	土压力	分项系数	静水压力	分项系数	人行荷载	分项系数	活荷载	分项系数
1	施工工况	承载	●	1.10	●	1.20				1.20	●	1.20
2		正常	●	1.00	●	1.00				1.00	●	1.00
3	运行期 1	承载	●	1.10	●	1.20	●	1.20	●	1.20	●	1.20
4		正常	●	1.00	●	1.00	●	1.00	●	1.00	●	1.00
5	运行期 2	承载	●	1.10	●	1.20	●	1.20	●	1.20	●	1.20
6		正常	●	1.00	●	1.00	●	1.00	●	1.00	●	1.00

注:●表示考虑此计算项。

工况一:施工期。作用在箱涵上的荷载主要有箱涵自重、墙上填土重、土压力。

工况二:稳定运行期 1。作用在箱涵上的荷载主要有箱涵自重、墙上填土重、土压力、静水压力(计算按最不利情况,箱涵无水)、基底扬压力。

工况三:稳定运行期 2。作用在箱涵上的荷载主要有箱涵自重、墙上填土重、土压力、静水压力(计算按最不利情况,箱涵充满水)、基底扬压力。

3.3.3 极限状态设计

根据规范《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)^[4]的要求,采用极限状态设计法以安全系数表达的方式进行设计。水工混凝土结构构件的极限状

态分为正常使用极限状态和承载能力极限状态两类。结构构件按极限状态设计时,应根这两类极限状态的要求,分别按规定进行计算和验算。

混凝土箱涵根据可能出现的各类作用,按正常使用极限状态和承载能力极限状态,并且结合相应的设计状况进行符合实际情况的作用效应组合,并按规范规定选取相应的分项系数。计算中,考虑永久荷载(自重、设备等)、土压力(淤泥、淤沙、围岩等)、一般可变荷载以及不超出规定限值的可变荷载的荷载效应,各受力均采用标准值。

3.3.4 工况组合

工况组合见表2。

3 内力计算

3.1 模型建立

如图4所示,选用 Robot 软件分别对 2 种不同尺寸的箱涵结构进行建模计算,根据箱涵分缝长度,取 10 m 为一个结构段分别进行内力计算,计算模型网格图如图 5 所示。

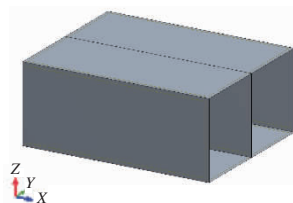


图4 计算模型结构图

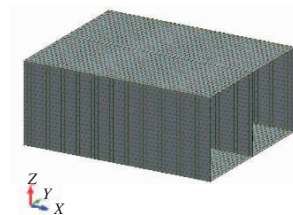


图5 计算模型网格图

3.2 结构内力计算

每种类型分段结构共对 6 种工况进行计算,各工况设计参数见表 2,各工况结构板内力计算结果见表 3,Robot 建模计算结果这里由于篇幅限制,本文不做赘述,模型计算典型受力分布图如图 6 所示,提取计算结果时分为顶板、底板、侧墙、中隔墙分别查看 x 、 y 方向的正负弯矩,并提取大值。

表 3 各工况结构板内力计算结果表

板名	极限状态	属性	受力			
			Mx+max	Mx-max	My+max	My-max
顶板	承载能力	弯矩/(kN·m)	28.36	-15.05	145.45	-78.42
		剪力/kN	56.30	-56.30	195.03	-183.19
		轴力/kN	16.35	-32.27	30.47	-126.28
底板	承载能力	弯矩/(kN·m)	14.02	-26.82	70.29	-136.75
		剪力/kN	24.75	-24.75	221.91	-216.68
		轴力/kN	25.27	-20.06	44.59	-157.60
侧墙	承载能力	弯矩/(kN·m)	2.62	-20.53	0.00	-105.48
		剪力/kN	59.17	-59.17	60.82	-83.93
		轴力/kN	18.81	-47.0	/	-234.04
中隔墙	承载能力	弯矩/(kN·m)	7.49	-9.72	38.32	-49.77
		剪力/kN	10.41	-10.41	90.13	-50.82
		轴力/kN	40.41	-63.23	/	-433.93

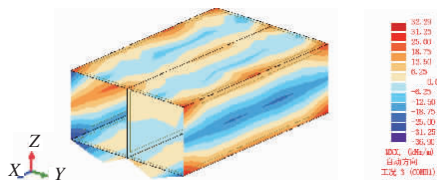


图6 模型计算典型受力分布图

由内力计算结果汇总表可见,各工况中顶板最大弯矩值为 112.9 kN·m(运行期 1),最大剪力值为 274.7 kN(运行期 1),最大轴力值为 371.9 kN(运行期 1)。

各工况中底板最大弯矩值为 45.4 kN·m(运行期 1),最大剪力值为 294.9 kN(运行期 1),最大轴力值为 446.9 kN(运行期 1)。

各工况中侧墙最大弯矩值为 218.5 kN·m(运行期 1),最大剪力值为 360.3 kN(运行期 1),最大轴力值为 404.9 kN(运行期 1)。

各工况中中隔墙最大弯矩值为 0.82 kN·m(运行期 1),最大剪力值为 2.02 kN(运行期 1),最大轴力值为 465.9 kN(运行期 1)。

侧墙承受最大弯矩为 218.5 kN·m 及剪力 360.3 kN,中隔墙承受的轴力最大为 465.9 kN,后期配筋要着重注意最大受力点。

4 抗浮验算

4.1 计算条件

主干渠箱涵结构埋深较大,主干渠标准段设计内底标高为 -2.387~ -2.110 m,倒虹段埋深更大,内底标高为 -5.9~-4.6 m,箱涵壁厚 0.5 m。根据《北溪引水主干渠改造工程(马銮湾新城段)工程地质》(大连市勘察测绘研究院有限公司,2020 年 4 月)可知,最高地下水位按设计地面标高以下 0.5 m 考虑,因此整个结构长期处于地下水中,根据《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)^[5] 中 5.2.3 条,对于存在浮力的情况下应进行抗浮稳定性验算,对于简单的浮力作用的情况,箱涵的抗浮稳定性应符合下式:

$$\frac{G_k}{N_{wk}} \geq K_w \quad (1)$$

式中: G_k 为抗浮力,建筑物自重及压重之和,kN; N_{wk} 为浮力作用值,kN; K_w 为抗浮稳定安全系数,一般情况下可取 1.05,本工程取 1.10。

主干渠结构抗浮力主要包括箱涵结构自重、上部覆土重、上部水重及单孔箱涵水重(为保证箱涵安全运行,本次设计不考虑双孔箱涵检修工况,仅考虑单孔无水检修工况),其中箱涵结构自重包含:侧墙、中墩、底板顶板^[6]。

本工程根据箱涵设计埋深,将结构分为 6 种,具体计算工况见表 4。

4.2 计算成果

具体计算结果见表 5。由上表可见,主干渠各个

表 4 各分段抗浮计算工况表

结构段	竣工期	稳定运行期	检修期
标准断(底高程 -2.61 m)	/	考虑	考虑
标准断(底高程 -2.787 m)	/	考虑	考虑
过芸溪倒虹	/	考虑	考虑
后浦溪倒虹	/	考虑	考虑
贞岱渠倒虹	/	考虑	考虑
深青溪倒虹	/	考虑	考虑

结构段抗浮稳定安全系数均大于 1.10, 均满足抗浮设计要求。

5 结 论

本文对厦门市北溪引水主干渠结构断面进行了分段设计, 并采用 Robot 有限元进行分析计算, 为类似工程提供相关参考。

表 5 各分段抗浮计算成果表

结构段	稳定运行期	检修期
标准(底高程 -2.61 m)	1.56	1.33
标准断(底高程 -2.887 m)	1.58	1.31
过芸溪倒虹	1.38	1.18
后浦溪倒虹	1.35	1.17
贞岱渠倒虹	1.34	1.16
深青溪倒虹	1.41	1.2

参考文献:

[1] 曹光辉.小断面长距离引水隧洞施工与技术分析 [J].低碳世界,2021, 11(6):127-128.
[2] 建筑结构静力计算手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
[3] 张吕伟.ROBOT 软件在特种结构计算中的应用[J].特种结构,2006, 23(2):65-66.
[4] SL 191—2008,水工混凝土结构设计规范[S].
[5] GB 50069—2002,给水排水工程构筑物结构设计规范[S].
[6] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].

(上接第 124 页)

设计时应控制实际应变水平低于该临界值。

(4)通过斜剪、拉拔试验分析了黏结层性能,发现存在最佳黏结材料用量使层间黏结强度达到最大;且拉拔试验和斜剪试验得到的最佳用量一致,2 种试验结果具有一致性。

参考文献:

[1] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007(9):65-77.
[2] 王民,周启伟,胡德勇,等.三种不同钢桥面铺装材料的疲劳特性分

析[J].公路工程,2016,41(3):40-42.
[3] 王民,方明山,张革军,等.港珠澳大桥钢桥面沥青铺装结构设计[J].桥梁建设,2019,49(4):69-74.
[4] 郭娟,王峰.Sasobit-LM 对 SBS 改性沥青桥面性能的影响[J].科技通报,2017,33(12):233-236.
[5] 陈志一.大跨径正交异性钢桥面铺装防水粘结层研究[D].西安:长安大学,2008.
[6] 张洁.钢箱梁桥面铺装新型材料的研究[D].广州:华南理工大学,2006.
[7] 彭广银.基于复合梁的水泥混凝土桥面铺装疲劳试验研究[D].南京:东南大学,2010.