

引调水工程软基箱涵沉降对工程结构影响

刘运才¹, 朱卫², 郭佳², 张玉华³

1. 中国南水北调集团中线有限公司天津分公司, 天津 300393

2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222

3. 天津市水务规划勘测设计有限公司, 天津 300204

DOI:10.61369/ERA.2025100007

摘 要 : 某长距离引调水工程基于地形和水文条件, 采用浅埋箱涵的自流输水方式。自工程建成投运以来, 为保障输水系统安全稳定运行, 持续运用水准观测、三角高程测量、InSAR 卫星等多种先进手段, 对工程开展系统性、长期性的沉降监测工作。观测数据表明, 工程沿线存在两处覆盖范围广、沉降程度较为显著的区域。大范围地基沉降导致输水箱涵结构发生沉降变形, 改变了箱涵内部的水力条件, 造成箱涵内水压力明显增大。为此, 需对箱涵结构的安全性进行全面复核, 深入分析沉降对箱涵整体结构受力及变形缝密封性能、结构稳定性的影响。

关 键 词 : 长距离引调水; 沉降; 箱涵结构

Analysis of Influence of Soft Foundation Box Culvert Settlement on Engineering Structures in Water Diversion Projects

Liu Yuncai¹, Zhu Wei², Guo Jia², Zhang Yuhua³

1.Tianjin Branch of China South-to-North Water Diversion Group Middle Route Co., Ltd., Tianjin 300393

2.Bei Fang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222

3.Tianjin Water Planning Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

Abstract : A long-distance water diversion project adopts the gravity water delivery method with shallow-buried box culverts based on topographic and hydrological conditions. Since the project was completed and put into operation, in order to ensure the safe and stable operation of the water delivery system, systematic and long-term settlement monitoring work has been carried out on the project by continuously using various advanced means such as leveling observation, trigonometric leveling measurement, and InSAR satellite. The observation data shows that there are two areas with a wide coverage and relatively significant settlement along the project. The large-scale foundation settlement has caused the settlement deformation of the water delivery box culvert structure, changed the hydraulic conditions inside the box culvert, and resulted in a significant increase in the water pressure inside the box culvert. Therefore, it is necessary to comprehensively review the safety of the box culvert structure, and deeply analyze the impact of settlement on the overall structural stress of the box culvert, the sealing performance of the deformation joints, and the structural stability.

Keywords : long-distance water diversion; settlement; box culvert structure

引言

在长距离引调水工程中, 输水结构的安全稳定至关重要^[1]。某引调水工程依地形水文条件, 采用浅埋箱涵自流输水。工程投运后, 借助持续运用水准观测、三角高程测量、InSAR 卫星技术等^[2], 持续开展沉降监测。结果显示, 沿线存在两处显著沉降区域, 致使箱涵结构变形, 内部水力条件改变、水压力增大。因此, 亟需全面复核箱涵结构安全性, 深入剖析沉降对其受力、变形缝密封及稳定性的影响。

一、工程概况

某长距离引调水工程起于保定徐水区西黑山村, 止于天津西青区, 全长约 155km, 途经十一个县区。工程以钢筋混凝土箱涵

为主要建筑, 调节池以上为无压输水, 以下为有压输水, 设计流量 18–50m³/s, 加大流量 28–60m³/s, 箱涵浅埋, 采用复合型遇水膨胀橡胶止水带止水。

作者简介: 刘运才 (1990.3–), 男, 汉, 天津宁河人, 本科, 工程师, 从事水利水电工程安全监测技术、引调水工程安全监测技术研究。

二、天津干线沉降区段基本情况

（一）建筑物高程实测成果

2023年10月，采用水准仪按二等水准对出露建筑物顶高程进

行观测，通气孔及保水堰等较高建筑物的顶部，采用全站仪按三角高程法进行观测。通过出露建筑物实测顶高程与设计顶高程对比，计算工程现状沉降量。根据沉降幅度，将工程分成9个段落，沉降情况如表2.1-1所示。

表2.1-1 沉降情况分段表

序号	段落		区段范围	桩号	备注
1	徐水段	小幅抬升 (-0.20 ~ 0.00m) 调节池至12# 通气孔	西黑山进口闸至调节池（无压段）	XW0+000 ~ XW10+660	抬升0.1m 左右
			XW10+660 ~ XW28+000		
2	容城段	小幅沉降 (0.00 ~ 0.20m)	12# 通气孔至大清河	XW28+000 ~ XW57+075	大部分沉降0.1m 左右 其中，18# 通气孔沉降较大，为0.48m
3	高碑店段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	大清河至29# 通气孔	XW57+075 ~ XW62+000	沉降0.25m 左右 其中，27# 通气孔沉降较小，为0.04m
4	雄县段	大沉降 (> 0.40m)	30# 通气孔至郑村排干5# 分水口	XW62+000 ~ XW78+949	其中，33#、34# 通气孔沉降1.0m 左右
5	固安霸州段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	郑村排干至牯牛河41# 通气孔	XW78+949 ~ XW92+000	其中，40# 通气孔沉降较大，为0.64m
6	霸州市段	小幅沉降 (0.00 ~ 0.20m)	42# 通气孔至44# 通气孔	XW92+000 ~ XW98+000	沉降0.15m 左右
7	永清霸州段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	44# 保水堰至王泊排干倒虹吸	XW98+000 ~ XW108+772.5	其中，7# 保水堰沉降较小，为0.18m
8	霸州市安次天津子牙河以北段	大沉降 (> 0.40m)	王泊排干倒虹吸至子牙河分流井	XW108+772.5 ~ XW148+731	其中，57# 通气孔沉降1.04m，为最大沉降值
9	天津子牙河以南段	中幅沉降 (0.20 ~ 0.40m)	子牙河分流井至外环河口闸	XW148+731 ~ XW155+232	沉降0.35m 左右 其中，出口闸沉降较小，为0.12m

（二）沿线地面沉降实测成果

2016-2022年卫星 InSAR 监测地面沉降成果显示，西侧沉降区域最大沉降速率为98mm/ 年，东侧沉降区域最大沉降速率为90mm/ 年，其他段落基本平稳。根据卫星 InSAR 选取的5个典型点位2016年至2022年监测成果显示见图2.2-1。

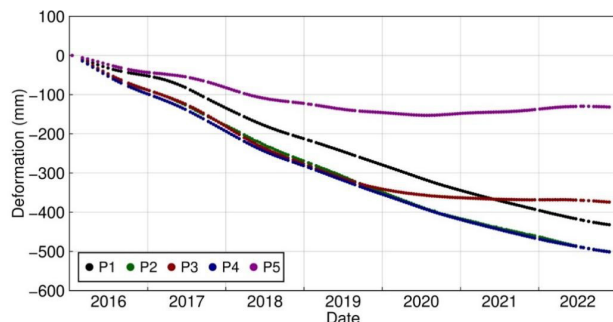


图2.2-1 2016-2022年卫星 InSAR 监测典型点位的沉降过程线

P1位于西侧沉降区域内36号通气孔附近；P2位于西侧沉降区域内33号通气孔附近；P3位于东侧沉降区域内62号通气孔附近；P4位于东侧沉降区域内；P5位于东侧沉降区域附近。

由图可知，天津干线两处区域最大沉降量达500mm，沉降速率有减缓趋势，典型点位具体分析如下：（1）P1和P2在西侧沉降漏斗区，2016 - 2020年快速沉降，2021 - 2022年速率减缓，与区域趋势一致。（2）P3在东侧沉降漏斗区，2016 - 2019年沉降速率减缓，2020 - 2022年稳定；P4与P2趋势同；P5近东侧漏斗区，2016 - 2020年沉降，2021 - 2022年抬升。

（三）工程沉降综合结论

实测建筑物顶高程沉降和地面沉降成果表明，两者沉降趋势基本一致，部分建筑物沉降量大于原地地面沉降量。工程存在两处大沉降（含中幅沉降）区段：一是高碑店至霸州城区段（桩号XW57+705 ~ XW92+000），雄固霸沟33# 通气孔（XW70+000）沉降1.00m、34# 通气孔（XW71+950）沉降0.97m；二是霸州以东至天津段（桩号XW100+000 ~ XW155+232），57# 通气孔（XW126+000）沉降1.04m。此外，容城段18# 通气孔沉降0.48m，存在个别建筑物沉降较大情况。

三、沉降对工程结构的影响研究

针对大范围沉降导致输水箱涵沉降、内水压力增大的情况，分析沉降对箱涵结构及变形缝的影响，复核结构安全性^[3]。

（一）原设计条件及箱涵配筋情况

工程水工混凝土结构初设依SDJ 20-78规范设计，后按SL 191-2008规范复核，采用结构力学法，经多因素考量选定36种典型断面计算，明确有压段16个断面需复核及配筋情况，确定不同区段箱涵最大裂缝宽度限值^[4]。根据设计成果、资料及规范复核，确定牯牛河倒虹吸以上段箱涵最大裂缝宽度限值0.25mm，以下段0.20mm。

（二）结构复核断面选取

根据表3.2-1统计，工程有压段16个断面需结构复核，其中

仅正常运行工况超设计值的有7个，正常运行与单孔检修工况均超 的有7个，三种工况均超的有2个。

表3.2-1 箱涵内水压力变化对比分析表

序号	断面 代号	计算埋 深 (m)	原设计内水压力 (m)			运行内水压力 (m)			内水压力超出设计值 (m)		
			正常运 行工况	检修 工况	事故 工况	正常运 行工况	检修 工况	事故 工况	正常运 行工况	检修 工况	事故 工况
1	A	2.6	10	7	11	10.32	6.62	11.02	0.32	-0.38	0.02
2	B	2.2	10	6	11	10.74	7.04	10.82	0.74	1.04	-0.18
3	C	2.45	10	6	10	10.14	6.41	9.32	0.14	0.41	-0.68
4	E1	2	10	7	11	10.33	6.63	10.58	0.33	-0.37	-0.42
5	E3	2	9	7	10	9.99	6.05	9.55	0.99	-0.95	-0.45
6	E33	2	9	7	10	9.23	7.28	9.42	0.23	0.28	-0.58
7	G	2	12	8	13	12.44	7.49	13.02	0.44	-0.51	0.02
8	J	3	12	8	13	12.38	7.45	12.94	0.38	-0.55	-0.06
9	J1	3	11	6	12	11.27	6.09	11.58	0.27	0.09	-0.42
10	I33	3	9	7	10	9.98	7.97	9.66	0.98	0.97	-0.34
11	F1	3	8	5	9	8.42	4.88	8.55	0.42	-0.12	-0.45
12	H	3	7	7	8	8.46	7.27	8.22	1.46	0.27	0.22
13	H2	3	7	7	7	7.55	7.47	7.25	0.55	0.47	0.25
14	K3	4	5	5	6	5.84	5.83	5.69	0.84	0.83	-0.31
15	L4	6	8	6	9	9.04	7.05	8.81	1.04	1.05	-0.19
16	L5	7	8	7	9	9.37	7.38	9.14	1.37	0.38	0.14

（三）箱涵结构复核计算

（1）计算模型

将箱涵视为弹性地基上的闭合框架，输水箱涵结构计算采用结构力学方法^[9]，地基反力按直线分布进行简化。

（2）计算工况及荷载组合

根据规范 SL 191-2008 中的有关规定^[9]，结合工程实际运行

情况，经综合考虑，确定箱涵的计算工况及荷载组合。本次复核中，7个仅正常运行工况超原设计的断面，只复核该工况，为单工况复核断面见表3.3-1；7个正常运行与单孔检修工况均超设计值的断面，复核这两种工况，为双工况复核断面见表3.3-2；2个三种工况均超设计值的断面，复核全部三种工况，为三工况复核断面见表3.3-3。

表3.3-1 单工况复核断面计算工况及荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷 载							备 注
		结构自重	土压力	外水压力	内水压力	浮托力	活荷载	地震荷载	
基本组合	1、正常运行	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用

表3.3-2 双工况复核断面计算工况及荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷 载							备 注
		结构自重	土压力	外水压力	内水压力	浮托力	活荷载	地震荷载	
基本组合	1、正常运行	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用
	2、单孔检修	√	√	√	√	√	√	×	一边孔检修，其余两孔输水

表3.3-3 三工况复核断面计算工况及荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷 载							备 注
		结构自重	土压力	外水压力	内水压力	浮托力	活荷载	地震荷载	
基本组合	1、正常运行	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用
	2、单孔检修	√	√	√	√	√	√	×	一边孔检修，其余两孔输水
偶然组合	3、事故工况	√	√	√	√	√	×	×	三孔输水，有压，计入地下水作用

（3）内力计算

依据 SL191-2008，荷载效应组合设计值在承载能力极限状态下的计算，内力计算采用了《SAP84微机结构分析程序》（版本6.5）及《水工结构工具箱 SGTools》（V2.9）结构计算软件，只需复核16个断面控制工况下的内力（M，Q，N）计算结果^[7]。

（四）配筋及裂缝开展宽度计算

依据 SL191-2008，钢筋混凝土箱涵需进行强度计算与裂缝宽度验算^[8]。箱涵各荷载组合工况按承载能力极限状态计算配筋面积，单工况下中墙轴上受力、弯矩可略则不配筋。按正常使用极限状态，以荷载标准值验算裂缝宽度，采用实际配筋。复核显

示, 16个断面承载力和裂缝基本达标。

四、沉降对变形缝的影响研究

地下箱涵管节长15m, 变形缝设橡胶止水带, 原设计允许沉降差30mm。因区域沉降连续, 无突变因素, 变形缝不考虑错台。沉降使箱涵纵轴线变曲、拉长, 变形缝变宽。从安全考虑, 以最大沉降梯度假设, 分析沉降偏转对变形缝的影响。

按区域最大沉降梯度 -1.21mm/m 计算, 箱涵两端相对沉降18.2mm, 变形缝上宽下窄。15m 单节箱涵伸长 0.011mm, 止水带变形率 0.04%, 结构缝长度增加及伸长率可忽略。

五、结论与建议

针对沉降对结构影响分析, 主要结论如下: XW30+000以上位于徐水小幅抬升段, 对结构受力基本无影响。部分受沉降

影响断面箱涵受力超出原设计, 经承载能力极限状态复核^[9], 如XW35+811 ~ XW36+303等区间, 虽实际配筋略小于计算值, 但仍满足承载要求^[10], 其余断面实际配筋均大于计算值, 沉降区整体承载能力达标, 目前无需工程措施。按正常使用极限状态复核, 现状配筋均满足要求, 也无需工程措施。不过, 部分断面配筋和裂缝宽度接近限值, 表明箱涵承受沉降影响空间有限。建议: 箱涵受力与内水压力关联大, 应论证通过运行调度降低末端水位, 以抵消沉降引发的内水压力增加的可行性。

参考文献

- [1] 余宣兴, 陆日壮, 辛守哲. 沉降监测在保障南水北调工程安全方面的作用 [J]. 水利水电工程设计, 2007, 26(1): 42-50.
- [2] 石菊, 葛坤, 褚峰. 浅谈混凝土输水箱涵施工——以南水北调中线一期工程天津干线为例 [J]. 中国水利, 2019, (4): 37-40.
- [3] 周景峰, 刘扬, 黄运玉. 南水北调中线天津干线工程输水箱涵结构计算分析 [J]. 海河水利, 2009, (5): 87-89.
- [4] 何利华, 李善岩, 刘卫其, 董立红. 南水北调中线天津干线工程充水期安全监测分析 [J]. 海河水利, 2019, (2): 37-39.
- [5] 董丹丹, 李成, 毕京龙, 赵海超. 南水北调天津干线有压输水箱涵实际糙率研究 [J]. 水利水电工程设计, 2022, 41(3): 14-17.
- [6] 王宁, 王伟, 湛东海. 典型水利工程配套智慧管理系统设计研究 [J]. 水电站机电技术, 2022, 45(12): 28-31.
- [7] 路红敏, 高恒岭. 现代水利工程施工质量监测中的图像识别与模式识别技术研究 [C]// 中国水利学会. 2023中国水利学术大会论文集 (第六分册). 聊城黄河河务局东阿黄河河务局; 东阿县职业教育中心学校; , 2023: 111-113.
- [8] 邸国辉, 李冬平, 陈翠婵. 水利监测总体解决方案的研究 [J]. 地理空间信息, 2015(2): 4-5, 8.
- [9] 李琳琳. 长距离引调水工程的质量管理对策 [C]// 辽宁省水利学会2023学术年会论文集. 2023: 98-101.
- [10] 秦朋, 谭勇, 牛广利, 等. 某长距离引调水工程安全预警管理体系 [J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(11): 1-4, 11.