

文章编号: 1672-3031(2007) 01-0039-04

大型泵站输水管线钢岔管应力分析及结构形式

郑瑾莹¹, 王雷², 史文彪², 欧阳建²

(1. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 针对南水北调工程惠南庄泵站输水管线中的卜型钢岔管进行三维有限元计算分析, 在设计水头 110m 和校核水头 130m 作用下, 考虑有无外包混凝土、计入不计入钢管及混凝土自重、外包混凝土与钢管之间垫层弹性模量的不同取值以及采用设计肋板和加强肋等各种不同工况, 对卜型钢岔管应力进行计算分析, 以确定岔管在设计水压力和校核水压力作用下的安全性。结果表明, 岔管的最大主拉应力一般发生在支管与主管相交处, 考虑外包混凝土与钢管的联合作用将显著减小最大拉应力值; 同时, 增长肋板长度或者增加肋板刚度都有利于降低拉应力峰值。根据计算结果, 对惠南庄泵站输水管线的钢岔管设计提出了建议。

关键词: 卜型岔管; 外包混凝土; 垫层弹模; 加强肋; 结构分析

中图分类号: TV675 文献标识码: A

岔管是输水管道中常见的结构形式, 其内力计算过程比较复杂^[1]。由于承受较高内水压力作用, 钢岔管连接部位往往出现较大的拉应力, 是岔管设计的关键部位。此外, 镇墩形式、分叉角度、主副管径等都对连接部位的应力有一定影响。为了减小钢管及连接处的拉应力, 可采取设加强肋、外包混凝土等措施, 而钢管和外包混凝土的连接形式、加强肋的结构和尺寸都直接影响着钢管和连接处的应力。为了全面考虑结构形式和不同受力状态对岔管工作性态的影响, 本文用三维实体有限元法^[2]对惠南庄泵站输水管线中不同结构形式的卜型岔管进行计算, 分析岔管的最大拉应力位置, 以及考虑外包混凝土与钢管联合受力及增长肋板或增加肋板刚度对最大拉应力的影响, 为设计提供参考。

1 工程概况

惠南庄大型泵站是南水北调中线工程的标志性建筑, 属一等工程, 主要建筑物为 I 级, 泵站设计流量 60m³/s。输水管线拟采用主管内径 ϕ 4.0m、支管 ϕ 3.0m 和主管 ϕ 3.0m、支管 ϕ 2.2m 两个尺寸的卜型钢岔管。由于两种管径相近, 本文主要给出后者的计算结果。其主要几何参数及几何特征见图 1 和表 1。

表 1 卜型钢岔管几何特征

岔管形式	主管参数	支管参数	加强结构
60° 夹角卜型	内径 3.0m, 管壁厚 22mm	内径 2.2m, 管壁厚 18mm	沿外相贯线焊接 60mm 厚钢板腰梁

2 计算模型及参数说明

本文主要分析内水压力、钢管和外包混凝土的连接形式、加强肋的形式和尺寸等对钢管和连接部分受力的影响, 以确定在设计水压力和校核水压力作用下的安全性, 并对设计方案提出评价和建议。

计算采用三维有限元法, 有限元模型采用实体单元, 考虑模拟不同工况的需要, 共形成 3 种计算模型: (1) 计算模型 1。选取计算段总长 60.0m, 主管外包混凝土厚 1.0m, 支管外包混凝土厚 0.7m, 垫层厚度均为 0.01m, 垫层和外包混凝土沿径向分别分为 1 层和 6 层单元, 钢管沿壁厚方向分为 3 层单元, 形成

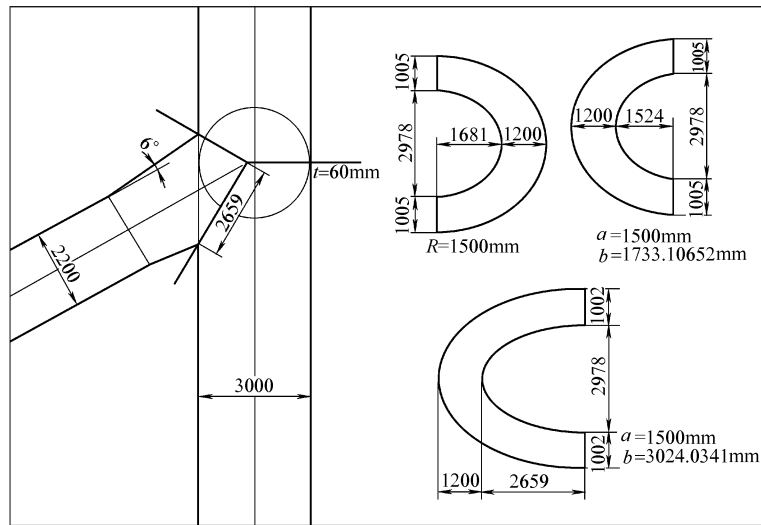


图 1 卜型钢岔管几何参数(单位: mm)

单元 99 120 个, 节点 110 759 个; (2) 计算模型 2。在原有模型加强肋的两侧增加厚 40mm、长 100mm 的 L 型肋板(如图 2 所示), 形成单元 114 920 个, 节点 128 139 个; (3) 计算模型 3。去掉钢岔管外包混凝土和垫层, 单独对钢管进行计算分析, 选取计算模型长 23.0m, 形成单元 14 067 个, 节点 19 724 个。

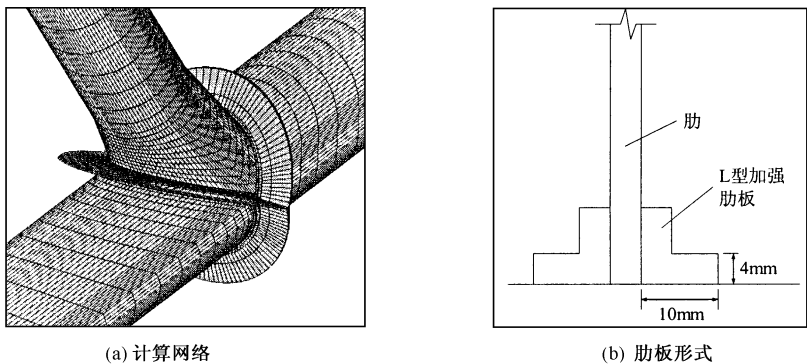


图 2 岔管肋加强局部示意(无外包混凝土层)

计算分析中所采用的钢管、垫层及外包混凝土材料的物理力学参数见表 2。
钢管及其加强结构采用压力容器钢板 20R 钢及 16MnR 钢。水电站压力钢管设计规范(SL 281-2003)^[3] 规定: 对于钢岔管, 膜应力区的容许拉应力在基本荷载组合下为抗拉强度的 0.5 倍, 特殊组合下为抗拉强度的 0.7 倍; 局部应力区的取值倍数分别为 0.8 和 1.0 倍。由此可以得到上述钢材在不同应力区域的容许拉应力值, 如表 3 所示。

表 2 材料参数

材料	ρ (kg/m ³)	E /MPa	μ
钢管	7 800	2.1×10^5	0.30
垫层	100	1; 20; 200°	0.30
混凝土	2 400	2.1×10^4	0.17

* 根据不同工况选取垫层弹性模量

表 3 钢材容许拉应力取值(单位: MPa)

应力区域	20R 钢 $[\sigma_s] = 235\text{MPa}$		16MnR 钢 $[\sigma_s] = 325\text{MPa}$	
	基本组合	特殊组合	基本组合	特殊组合
膜应力区 $[\sigma]_1$	117.5	164.5	162.5	227.5
局部应力区 $[\sigma]_2$	188.0	235.0	260.0	325.0

远离岔管部位的主管和支管的应力按简单圆管在同值内水压力作用下的膜应力来校核。简单圆管的膜应力计算表达式为

$$\sigma = P_0 r / t \tag{1}$$

式中: σ 为简单圆管的膜应力; P_0 为内水压力; r 为圆管内径; t 为管壁厚度。

由式(1)求得与主管和支管尺寸相同的简单圆管的膜应力校核值如表4。

表4 简单圆管的膜应力

内径/m	壁厚/mm	水头/m	膜应力/MPa	内径/m	壁厚/mm	水头/m	膜应力/MPa
3.0	22	110	75.00	2.2	18	110	67.22
		130	88.64			130	79.44

3 各种因素对岔管应力的影响研究

3.1 外包混凝土对岔管应力的影响 采用计算模型1和计算模型3,就岔管分别承受110m和130m水头作用情况下的应力进行计算,计算所得最大主应力均发生在支管与主管相交处交角较小的一侧。表5为最大拉应力和远离岔管段的远端直管的应力计算结果,其中各工况均未计入自重作用。

由表5可知:(1)当无外包混凝土及有外包混凝土但垫层弹性模量取较小值(如1MPa)时,在远离岔管段的直管远端,计算所得应力值基本上与表4中相应的简单圆管的膜应力一致,误差在5%以内,说明有限元的计算结果是合理的;(2)无外包混凝土时,岔管在设计水头作用下,在支管与主管相交处的局部点的最大主应力值达248MPa,远远超过了20R钢在局部应力区的容许应力值,但仍然小于16MnR钢在局部应力区的容许应力值,而膜应力区的应力均小于20R钢在膜应力区的容许抗拉强度。由此可以得出,在岔管设计时,可以考虑在不同部位采用不同的材质;(3)当考虑外包混凝土作用时,主支岔管相交处的最大主应力值显著下降,降幅达到30%左右;(4)就外包混凝土与钢管的联合作用对钢岔管应力的影响而言,远离岔管的直管段所受影响远小于支管与主管相交处。

表5 有无外包混凝土情况下岔管的σ₁值(单位:MPa)

计算工况	最大拉应力	主管远端应力	支管远端应力
110m水头,无外包混凝土	248	77	68
110m水头,外包混凝土,垫层弹模1MPa	148	70	64
130m水头,无外包混凝土	300	86	81
130m水头,外包混凝土,垫层弹模1MPa	175	83	75

表6 有无自重作用下岔管的σ₁值(单位:MPa)

计算工况	最大拉应力
110m水头,无自重	148
110m水头,有自重	152
130m水头,无自重	175
130m水头,有自重	179

3.2 混凝土及岔管自重对岔管应力的影响 对于有外包混凝土的岔管,考虑计入和不计入自重对岔管应力的影响,作用水头分别为110m和130m时进行计算,结果表明,最大拉应力均发生在支管与主管相交部位,最大拉应力值如表6所示。表6表明,计算时计入或不计入自重作用对岔管段的最大拉应力的影响有限,计入自重作用时岔管的最大拉应力比不考虑自重作用时略有增大,增幅小于3%。

3.3 垫层弹性模量对岔管应力的影响 钢岔管和外包混凝土之间通常设有柔性垫层,以避免二者的直接刚性接触。为分析垫层弹性模量的取值对岔管应力的影响,针对垫层弹性模量取1、20和200MPa,作用水头为110m和130m时的组合工况进行了计算,结果如表7所示,各工况中不计入自重。由表7可见,垫层弹性模量越大,则垫层限制钢岔管变形的能力越强,岔管应力越低。当垫层弹性模量增大至20MPa,最大主应力较垫层弹性模量为1MPa时下降40%左右;当垫层弹性模量增至200MPa时,最大主应力降幅达63%左右。

表7 垫层弹性模量取值不同时岔管的σ₁值(单位:MPa)

水头/m	垫层弹性模量/MPa		
	1	20	200
110	148	88	54
130	175	104	64

3.4 加强肋板对岔管应力的影响 本文采用2种方式加强肋板的作用:一是增加肋板的长度;二是在原有肋板两侧加上L型肋条(计算模型2)。2种加强方式得出的结果如表8和表9,表中各工况均不计入自重作用,表8无外包混凝土,表9中垫层弹性模量取1MPa。表8表明,适当增加肋板的长度能有效减小最大拉应力,将岔管肋板由0.8m增至1.0m后,最大拉应力下降17%以上。表9表明,有肋的翼两

侧贴上 L 型肋板可降低最大拉应力作用, 最大拉应力下降约 21 % 左右。

表 8 不同肋长岔管的 σ_1 值(单位: MPa)

计算工况	最大拉应力
110m 水头作用, 肋长 0.8m	248
110m 水头作用, 肋长 1.0m	204
130m 水头作用, 肋长 0.8m	300
130m 水头作用, 肋长 1.0m	236

表 9 肋加强前后岔管的 σ_1 值(单位: MPa)

计算工况	最大拉应力
110m 水头作用	148
110m 水头作用, L 型肋板加强肋	116
130m 水头作用	175
130m 水头作用, L 型肋板加强肋	138

4 结论与建议

根据上述计算分析, 可以得出如下结论: (1) 计入或不计入岔管和混凝土自重对拉应力计算结果影响不大; (2) 考虑外包混凝土与钢管的联合作用将显著减小钢岔管的最大拉应力, 垫层的弹性模量取值对岔管的应力也有较大影响。因此, 以不考虑外包混凝土的钢岔管的最大应力为控制进行设计, 有利于保证结构的安全裕度; (3) 岔管的最大主应力一般发生在支管与主管相交处, 增加肋板长度或者增加肋板刚度都有利于降低拉应力峰值; (4) 惠南庄泵站输水管线的钢岔管在膜应力区可采用普通压力容器用钢 20R 钢, 而岔管部位及腰梁应选用 16MnR 钢或强度相当的钢材, 亦可考虑采用适当措施加强肋的作用, 以保证结构的安全运行。

参 考 文 献:

[1] 张浩, 王国安, 邓海. 压力钢管有限元分析[J]. 四川水力发电, 2004, 23(1): 103– 105.
[2] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
[3] SL281-2003, 水电站压力钢管设计规范[S].

Analytical study on stress of bifurcated pipes in a pumping station of South-to-North Water Transfer Project

ZHENG Cu+ying¹, WANG Lei², SHI Wen-biao², OUYANG Jian²

(1. Dept. of Structures & Materials, IWHR, Beijing 100038, China;

2. Beijing Municipal Institute of Hydraulic Engineering Planning Design & Research, Beijing 100044, China)

Abstract: A 3-D Finite Element analysis is carried out to study stress distribution of branch-type bifurcated pipes under a group of working regimes. The pipes are located in the Huinanzhuang pumping station, which belongs to South-to North Water Transfer Project. The regimes involve different internal water pressure, with and without coated concrete, considering and not considering gravity of the structures, choosing different elastic modulus of bedding material between the pipes and coated concrete, and adopting different structural style of reinforcing rib. The security of the pipes is ensured in all the regimes under the design water head (110m) and the check water head (130m). The analysis results are mainly the peak values of tensile stress and their variation under different regimes, which is the dominant factor of the structure. According to the results, some useful suggestions are put forward to improve design of the structures.

Key words: branch-type bifurcated pipes; coated concrete; elastic modulus of bedding; reinforcing rib
(责任编辑: 王冰伟)