

# 漫湾发电压力钢管设置 弹性垫层的计算<sup>①</sup>

王忠勇

李立年

(能源部、水电部昆明水利水电勘测设计院)

**摘 要:** 本文采用线弹性结构计算程序对漫湾水电站所用垫层不同的弹性模量和厚度进行了大量计算,并分析了弹性垫层对结构的影响规律。计算结果表明,垫层对结构的影响主要与其厚度弹模比有关。厚度弹模比大于一定数值后,对结构的影响基本上不再随之变化。这一结果已应用于漫湾水电站发电引水压力钢管的设计,对其它类似工程也有一定的参考价值。

**关键词:** 弹性垫层,厚度弹模比,综合效益系数

**中国图书分类号:** TV732

漫湾水电站为坝后式厂房,引水钢管为坝内埋管,其布置见图1。钢管内径7.5米,最大设计水头127米。

由于内径较大,水头较高,且坝体应力较大(略大于内水压力),而钢管下弯段处副厂房下部混凝土覆盖较薄,仅有2.95米,钢管与管周混凝土直接接触时,钢管应力很低,仅约29MPa,钢材的高强性能没有得到充分发挥,而混凝土内却产生极大的拉应力,管顶混凝土无疑要裂穿,试图通过配筋来解决强度问题和混凝土的裂缝问题都非常困难。

为此,我们考虑在混凝土薄弱部位设置弹性垫层,减小内水压力的外传,让钢管承担较多的内水压力,以此来改善管周混凝土的应力状态,从而提高混凝土的抗裂安全度。

本文就上覆盖混凝土最薄弱断面(厚度为2.95米)的计算分析情况作一简介。

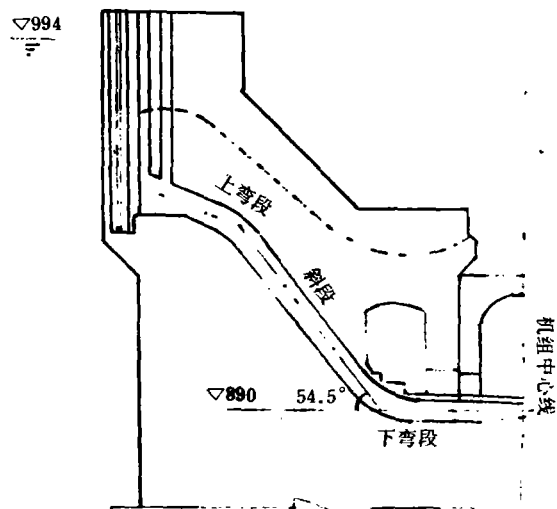


图1 管轴线剖面

## 1 计算模型及假定

<sup>①</sup> 本文承黄伟、李世强二位高工的诸多指教,不胜感谢。

计算剖面的管顶混凝土厚度 2.95 米, 管底取二倍管径 15 米; 坝段宽度 26 米, 由于对称, 只取对称的一半 (13 米) 作为计算宽度。

计算由 SAP84 线弹性结构计算程序完成。网格剖分时, 钢管和垫层均按真实厚度模拟。管单元和垫层单元长宽比较大, 形态不是很理想, 但除局部位置外, 均可获得满足工程需要的精度。

计算中假定各种材料均处于弹性工作阶段, 忽略钢管、垫层及混凝土相互之间可能产生的相对滑移, 不考虑坝段间坝缝灌浆后相互的约束影响, 即侧面变形是自由的。

荷载计入了自重、内水压力 (包括均匀内水压力和水体自重产生的压力) 和坝体应力荷载的作用。坝体应力荷载是把管轴线位置坝体应力作为均匀外压力施加在计算剖面上部的。

参考一些研究资料的结论 ([1]、[2]、[3]), 并考虑到施工方面的原因, 垫层只设置在钢管的上部  $180^\circ$  范围。参考其它电站的资料 ([2]、[4]、[5]), 垫层弹模以  $1 \sim 2 \text{ MPa}$  为宜, 此时垫层应变小于 10% 时可近似认为处于弹性工作阶段, 计算中分  $0.98 \text{ MPa}$  ( $10 \text{ kg/cm}^2$ ) 和  $1.96 \text{ MPa}$  ( $20 \text{ kg/cm}^2$ ) 两种情况进行分析。

## 2 成果分析

计算组合情况共有 24 种。各计算组合及其结果见表 1。总的来说, 设置弹性垫层后, 内水压力相当大部分转由钢衬承担, 钢衬应力大幅度升高, 管顶混凝土拉应力区域明显减小, 弹性垫层的作用是明显的。

### 2.1 内水压力作用下弹性垫层的影响

这一影响可用内水外传比  $\delta_H$  和综合效益系数  $\lambda_s$  表达。内水外传比  $\delta_H$  为混凝土内水平拉应力合力 (包括管顶和管底) 与水平向外力之比; 综合效益系数  $\lambda_s$  为设置垫层时管顶混凝土水平拉应力合力与不设垫层时的水平拉应力合力之比, 可作为反映设置垫层的综合效益的参数。 $\delta_H$  及  $\lambda_s$  与垫层厚度弹模比  $\delta/E$  的关系见图 2。 $\delta/E$  小于 0.2 时,  $\delta/E$  的变化对  $\delta_H$  和  $\lambda_s$  的影响非常大; 而  $\delta/E$  超过 0.2 后,  $\delta_H$  的变化已甚微, 并趋近于 50%, 表明此时钢管已承担了一半的内水压力。 $\delta/E$  对  $\lambda_s$  的影响也趋于平缓, 最终  $\lambda_s$  降低至 33%, 效益是非常显著的。

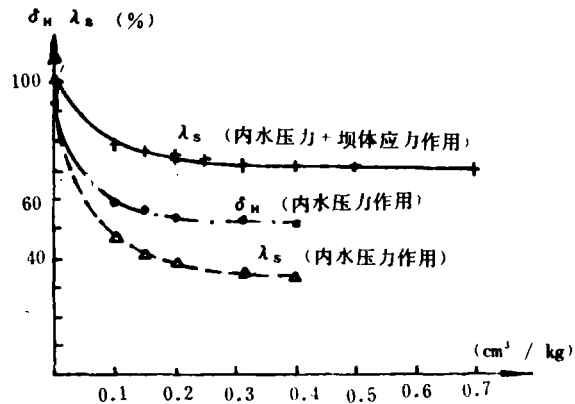


图 2 内水外传比综合效益系数与  $\delta/E$  关系曲线

### 2.2 坝体应力作用下弹性垫层的影响

坝体应力作用下, 管顶混凝土水平拉应力合力与  $\delta/E$  的关系见图 3。设置垫层后, 水平拉应力合力有很大的升高, 升高幅度约为 85%, 但垫层材料及厚度的变化对此几乎没有影响。

计算组合情况及计算结果

表 1

编号	荷载	垫层材料			0° 钢衬 环向应力 MPa	0° 混凝土 内缘应力 MPa	0° 混凝土 合拉应力 KN	内水外 传 比 $\delta_h$ %	综合效 益系数 %	垫层最 大应变 $\epsilon_m$
		EKg/cm <sup>2</sup>	$\delta$ cm	$\delta/E$						
1	内水压力	—	—		13.43	1.37	43.66	92.52	100	
2		20	3	0.15	117.05	0.96	18.21	56.78	41.71	
3		10	3	0.3	129.59	0.92	15.41	52.81	35.30	
4		20	2	0.1	107.14	0.98	20.64	59.20	47.28	
5		10	4	0.4	133.12	0.91	14.45	51.48	33.09	
6		20	4	0.2	122.82	0.94	16.97	54.67	38.87	
7	内水压力 + 坝体应力	—	—		28.82	3.07	30.06		100	
8		10	2	0.2	120.10	3.64	22.16		73.73	0.144
9		20	2	0.1	102.66	3.69	23.79		79.13	0.120
10		10	3	0.3	129.72	3.64	21.57		71.74	0.114
11		20	3	0.15	113.52	3.70	22.99		76.48	0.090
12		10	4	0.4	131.34	3.65	21.40		71.19	0.081
13		20	4	0.2	119.97	3.69	22.39		74.48	0.072
14		10	5	0.5	132.73	3.67	21.42		71.27	0.062
15		20	5	0.25	122.07	3.71	22.22		73.92	0.056
16		10	7	0.7	134.54	3.71	21.07		70.00	0.040
17		20	7	0.35	125.27	3.74	21.88		72.79	0.036
18	坝体应力	—	—			1.70	7.05			
19		20	3	0.15		2.74	12.69			
20		10	4	0.4		2.75	12.59			
21		20	2	0.2		2.75	12.64			
22		20	5	0.1		2.71	12.82			
23		20	5	0.25		2.76	12.78			
24		10	10	10	0.5		2.77	12.72		

### 2.3 内水压力和坝体应力联合作用下弹性垫层的影响

管顶混凝土的水平拉应力合力是配筋设计的主要依据, 是设计中关注的首要问题之一。在内水压力和坝体应力联合作用下, 管顶混凝土水平拉应力合力及综合效益系数  $\lambda_s$  与  $\delta/E$  的关系见图3、图2。 $\delta/E$  小于0.2时, 合拉力及  $\lambda_s$  都对  $\delta/E$  的变化非常敏感, 且其值均较大, 说明效果不够理想。 $\delta/E$  大于0.2后, 二者都基本上不再受  $\delta/E$  变化的影响。最终  $\lambda_s$  趋近于70%, 即直接效益是管顶配筋量减少30%。

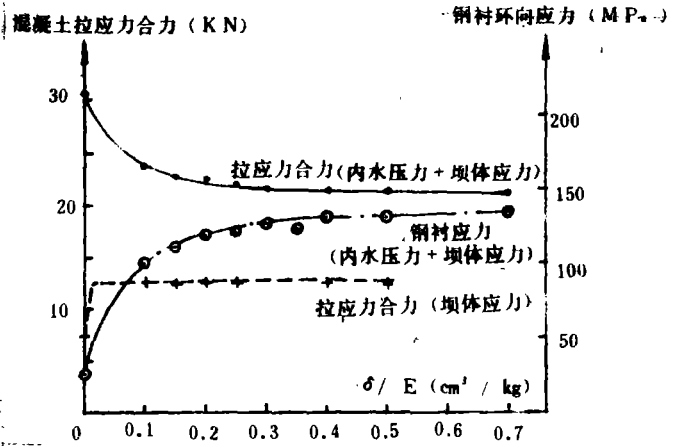


图3 管顶混凝土水平拉应力合力及钢衬

环向应力与  $\delta/E$  关系曲线

在内水压力和坝体应力联合作用下, 不设弹性垫层和设置弹性垫层的混凝土应力图形成见图4。设置弹性垫层后, 管顶混凝土最大拉应力(内缘)有所升高, 但应力状态大为改善, 拉应力区域明显减小, 水平拉应力合力也就随之大大降低。

### 2.4 钢衬应力

为说明垫层对钢衬应力的影响, 作钢衬  $0^\circ$  方向环向应力与  $\delta/E$  的关系曲线见图3。图中表明,  $0^\circ$  向环向应力随  $\delta/E$  的增大而升高, 由不设垫层的 29MPa 升高至 130MPa, 钢材的强度得到充分发挥。当  $\delta/E$  小于0.2时, 环向应力受  $\delta/E$  的影响较大, 而  $\delta/E$  大于0.2时, 就基本上不再受  $\delta/E$  的影响。

在垫层的末端, 钢材、混凝土及垫层材料差异很大, 钢衬在此处附近有一定的应力集中。但由于钢衬和垫层单元形态不够理想, 且三种材料弹模相差太大, 计算的应力集中数值是不确切的。图5示出了垫层厚度  $\delta=3\text{cm}$ , 弹模  $E=0.98\text{MPa}$  时内水压力和坝体应力联合作用下的钢衬环向应力分布图。钢衬在  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围内分布较均匀, 处于较高的应力水平, 在  $77.5^\circ$  附近出现最大集中值, 这与变形的协调性是一致的, 到  $90^\circ$  位置又急剧降低至较低水平, 至  $110^\circ$  附近更转变为压应力。

### 2.5 垫层材料应变

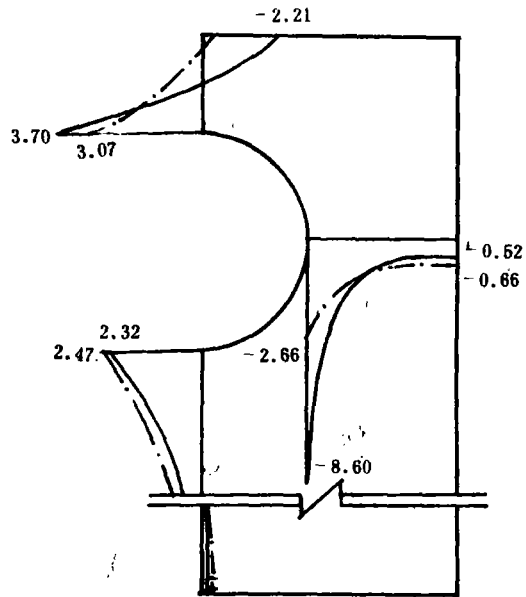


图4 设与不设垫层混凝土应力状态比较图

——设垫层( $\delta=3\text{cm}$ ,  $E=1.96\text{MPa}$ )

—·—·—不设垫层

实验证明 ([1]), 垫层材料的应变较小时 (小于 0.1), 可近似认为在弹性范围工作。为保证这一假定的成立, 垫层的最大应变值应不超过 0.1。垫层最大径向应变  $\epsilon_m$  与厚度和弹模的关系见图 6。最大径向应变  $\epsilon_m$  随厚度  $\delta$  的增加而降低, 也随弹模  $E$  的增加而降低。当厚度  $\delta$  较大时 (大于 5cm), 弹模的影响已不大。适当地选择  $\delta$  和  $E$  可保证  $\epsilon_m < 0.1$ , 即使垫层在弹性范围内工作。

钢衬应力 (MPa)

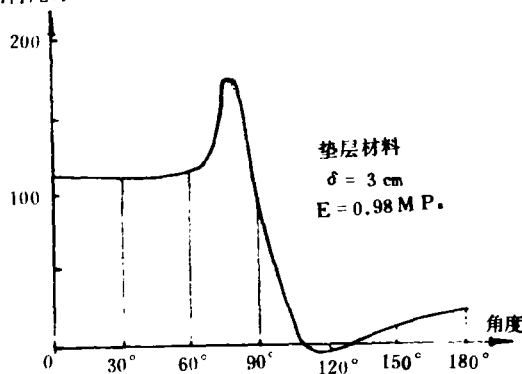


图 5 钢衬环向应力沿管周分布

(工况: 内水压力+坝体应力)

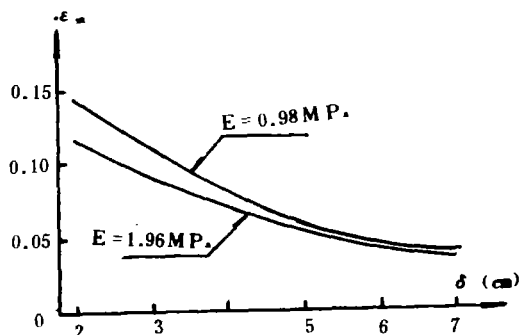


图 6 垫层最大应变与  $\epsilon$ 、 $E$  关系图

### 3 结论

3.1 垫层对结构的影响程度只与垫层材料的厚度弹模比  $\delta/E$  有关。当  $\delta/E$  处于较大值时, 影响的程度趋于稳定;

3.2 设置弹性垫层后, 混凝土内的应力状态得到很大的改善。对漫湾工程而言, 管顶  $0^\circ$  方向混凝土的拉应力合力降低 20~30%, 使得通过配置钢筋来解决强度问题和裂缝限制开展问题变得容易得多。在高坝体应力区域内, 弹性垫层的效果有所减弱;

3.3 设置弹性垫层后, 钢管上半管的环向应力从 29MPa 上升至 130MPa, 处于较高水平, 钢材强度可得到较充分的发挥, 但在垫层末端也产生一定的应力集中;

3.4 垫层材料和厚度的适当选择可保持垫层近似在弹性范围内工作;

3.5 计算中把坝体应力施加在计算剖面之上, 这一假设成立的前提是外边界距孔口无限远, 在此夸大了坝体应力的作用, 但计算结果反映了一种趋势;

3.6 垫层末端三种材料接合部位, 混凝土也产生压应力集中 (见图 4), 混凝土凸体极有可能产生压碎破坏, 从而形成垫层—压碎混凝土—完整混凝土过渡段, 使钢衬内的应力集中得以缓和。此外, 垫层末端作成由厚到薄的渐变过渡也可缓和应力集中现象。

### 参 考 文 献

[1] 文洪. 坝内钢管周边压缩垫层的设计研究. 人民长江. 1987.7

[2] 陈祥云等. 坝内钢管周边压缩垫层的设计研究 (补充研究). 人民长江. 1987.11

(下转 52 页)

## The Applies of Polymer-Concrete Materials in Underwater Structures

Chen Yiyan

(Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research)

**Abstract:** In many cases, it is impossible to construct hydraulic structure under dry circumstances. The normal concrete is incompetent to use underwater, it's also inefficient to use polymer materials merely. In this paper, we introduced the main property and its advantages of a prospective new type material-Polymer-Concrete. Combine with our research work on underwater epoxy mortar and nondispersible underwater concrete, we provided some property data, explained the effects of polymers, analysed the mechanism of these concrete and described the applies of polymer-concrete materials in underwater structures. These materials can be used in concrete placing of underwater structures, repairing of the crack and damaged part of the underwater structures.

**Keyword:** Polymer concrete, Underwater structure, Underwater concrete

---

(上接 38 页)

[3] 傅金筑. 垫层钢管. 全国第二届钢管学术讨论会材料, 1987.7

[4] 西北科研所. 垫层材料. 全国第二届钢管学术讨论会材料

[5] 李志能 王秋玲. 不同垫层材料对压力管道联合作用的影响

## Calculation on Elastic Cushion for Penstock of Manwan Water Power Project

Wang Zhongyong

Li Linian

(Kunming Hydroelectric Investigation and Design Institute)

**Abstract:** A large number of calculations are performed using structure's line-elastic finite program, with varied elastic module and thickness of the cushion which is used in Manwan project in this paper, and the regularity of effect of elastic cushion on the structure is summarized. It is illuminated that the effect of cushion on the structure depend on the ratio of thickness and module of cushion. If the ratio exceed a special value, the effect keep unvaried approximately. It is applied to the design of the embedded penstock of Manwan project, and is referencable to similar project

**Keywords:** elastic cushion, ratio of thickness and module, synthetical benefit coefficient.