

引黄工程高压出水岔管钢筋混凝土衬砌计算

陈卫忠¹ 朱维申¹ 杨海燕² 邱祥波¹

(¹中国科学院武汉岩土力学研究所 LRSM 开放实验室 武汉 430071) (²水利部天津水利水电勘测设计研究院 天津 300222)

摘要 为验证和分析山西省万家寨引黄入晋工程总干一、二级泵站高压出水岔管钢筋混凝土衬砌的合理性,应用三维有限元数值方法,得到了钢筋混凝土衬砌内的应力分布规律。在此基础上,提出了对现有的钢筋混凝土衬砌体型优化的方案及相应的配筋率参数,以满足岔管对钢筋混凝土衬砌裂缝限裂宽度及工程长期稳定运行的需要。

关键词 有限元, 钢筋混凝土, 衬砌, 裂缝宽度, 配筋率

分类号 O 242.21, TV 332, TV 554⁺.14

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)02-0242-05

1 引言

高压出水岔管是大型抽水蓄能电站和引水工程的重要组成部分。在挪威、英、美等国,有许多计算钢筋混凝土衬砌适应性的经验公式,如挪威经验公式、澳大利亚的雪山公式等。其理论依据是:对于地质条件好或较好的情况,当岩体中存在足够大的初始地应力时,可以防止围岩在内水压力作用下发生水力劈裂破坏而产生大的渗漏现象。经验理论笼统地认为:在内水压力作用下,钢筋混凝土衬砌一旦开裂后,衬砌就成为完全的透水结构,并丧失承载能力,仅起减糙作用。工程实践表明,当钢筋混凝土衬砌裂缝的宽度控制在 0.2 mm 以下时,微裂缝并不影响钢筋混凝土结构的正常使用。因此,不能将钢筋混凝土衬砌开裂等同于无衬砌隧洞。另外,从工程设计和施工的角度来看,若将岔管衬砌设计成钢板,将会带来一系列的问题,特别是地下洞室中安装钢板衬砌需要开挖比洞室自身体型大得多的断面,以满足设备安装对净空的要求。而且钢板衬砌的加工、运输、焊接以及衬砌背后混凝土的回填不仅使工程投资大,施工期长,而且存在钢板在内水放空外水压力作用下其自身的稳定性问题。而钢筋混凝土衬砌可以充分利用围岩承担一部分内水压力,使得工程设计既经济又合理。

山西省万家寨引黄入晋工程位于山西省的西北部,由万家寨水库引水,线路由三部分组成,总长

约为 452 km,总干线西起黄河万家寨水库,东至偏关县下土寨,长为 44.4 km。总干线一、二级地下泵站各装机 10 台,单机容量为 1.2×10^4 kW,设计扬程均为 140 m,高压出水岔管采用钢筋混凝土衬砌。该地区分布有寒武纪张夏组至奥陶系亮甲山组共有 15 个岩组,其岩性为灰岩、鲕状灰岩、泥灰岩、白云岩、白云质灰岩和页岩,按岩层厚度划分为厚层、中厚层及薄层、地层产状平缓、走向北东,倾向北西,倾角 $2^\circ \sim 5^\circ$ 。地层中有二组构造裂隙,一组走向 $NW280^\circ \sim 290^\circ$,另一组走向 $NE5^\circ \sim 10^\circ$,倾角均大于 75° ,按岩体结构分类,多属完整层状岩体。一级泵站埋深为 150 m,主要位于寒武纪张夏组 $\epsilon_2 Z^5$,顶部有寒武纪张夏组 $\epsilon_2 Z^6$;二级泵站埋深为 140 m,主要位于寒武纪风山组 $\epsilon_3 f^1$, $\epsilon_3 f^2$, $\epsilon_3 f^3$ 组灰岩及薄层灰岩中,区域性地下水低于岔管底板高程。

为进一步论证引黄工程总干一、二级泵站高压出水岔管钢筋混凝土衬砌的可行性,根据岔管试验洞内现场岩体静弹模和地应力的试验结果,对钢筋混凝土衬砌和围岩共同作用进行三维有限元计算^[1~4],以判断岔管衬砌的稳定程度,优化衬砌的体型及钢筋混凝土配筋率,从而满足工程长期安全、经济运行的需要。

2 力学模型和计算方法

在分析衬砌和围岩的共同作用时,假定岔管开

2000年2月29日收到初稿,2000年4月27日收到修改稿。

作者 陈卫忠 简介:男,34岁,博士,1990年毕业于山东矿业学院采矿系采矿工程专业,现为副研究员,主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。

个单元, 钢筋混凝土分成三层, 岔管部位全断面一次开挖, 材料力学参数如表 1 所示, 钢筋混凝土的配筋率为 1.42%。

3.2 初始地应力

1998 年在总干一、二级泵站岔管部位试验洞内空心包体测量成果如下:

总干一级泵站

$\sigma_1 = 4.97$ MPa, 方位角为 345.7° , 倾角为 -3.4° ;
 $\sigma_2 = 3.76$ MPa, 方位角为 270.5° , 倾角为 76.8° ;
 $\sigma_3 = 2.99$ MPa, 方位角为 75.0° , 倾角为 12.9° 。

总干二级泵站

$\sigma_1 = 3.88$ MPa, 方位角为 356.9° , 倾角为 6.5° ;
 $\sigma_2 = 3.11$ MPa, 方位角为 81.9° , 倾角为 2.17° ;
 $\sigma_3 = 2.17$ MPa, 方位角为 87.4° , 倾角为 4.7° 。

表 1 岩体材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

材料名称	弹性模量 / GPa	泊松比	内摩擦角 / ($^\circ$)	粘聚力 / MPa
张夏组 $\epsilon_2 Z^3$	12.0	0.27	50	2.0
张夏组 $\epsilon_2 Z^6$	9.0	0.30	45	1.0
风山组 $\epsilon_3 f^1$	9.0	0.26	50	2.0
风山组 $\epsilon_3 f^2$	10.5	0.27	50	2.0
风山组 $\epsilon_3 f^3$	11.4	0.28	50	2.0
混凝土	30.0	0.167	58	2.0

3.3 计算方案

衬砌和岔管围岩共同作用是针对岔管开挖衬砌开挖完成而言的, 计算时最大内水压力取 190 m 水头, 外水压力取 95 m 水头, 计算过程中假定围岩和混凝土之间粘结完好。计算方案如下:

(1) 内水压力作用下, 钢筋混凝土结构线弹性分析;

(2) 内水压力作用下, 钢筋混凝土结构非线性弹塑性分析;

(3) 外水压力作用下, 钢筋混凝土结构线弹性分析。

4 计算结果

在内水压力作用下, 衬砌的位移指向洞外, 最大拉应力位于支管和总管相连接的地方。按线弹性理论计算时, 一级泵站衬砌内层最大拉应力为 2.26 MPa, 衬砌外层最大拉应力为 1.80 MPa, 二级泵站

衬砌内层最大拉应力为 1.98 MPa, 衬砌外层最大拉应力为 0.99 MPa; 按非线性弹塑性理论计算时, 一级泵站衬砌内层最大拉应力为 1.97 MPa, 衬砌外层最大拉应力为 1.71 MPa, 二级泵站衬砌内层最大拉应力为 2.60 MPa, 衬砌外层最大拉应力为 1.33 MPa。

在外水压力作用下, 衬砌的位移指向洞内, 按线弹性计算时, 一级泵站衬砌内层最大拉应力为 0.99 MPa, 衬砌外层最大拉应力为 0.56 MPa; 二级泵站衬砌内层最大拉应力为 0.91 MPa, 衬砌外层最大拉应力为 0.58 MPa。

总干二级泵站高压岔管钢筋混凝土弹塑性计算时, 衬砌层主剖面的主应力分布如图 3 和图 4 所示 (单位: MPa)。根据数值计算结果, 为减少岔管部位的应力集中现象和尽可能减少、控制裂缝的宽度, 建议在浇筑钢筋混凝土衬砌时, 将原有衬砌体型的尖岔角修改为倒角半径为 $R = 0.5$ m 的圆岔角, 以改善钢筋混凝土衬砌内的拉应力水平。再以同样的计算范围, 将模型离散成 8 036 个节点, 6 974 个单元, 钢筋混凝土分成三层单元, 先按照素混凝土进行三维有限元弹性计算, 参照美国哈札公司的设计经

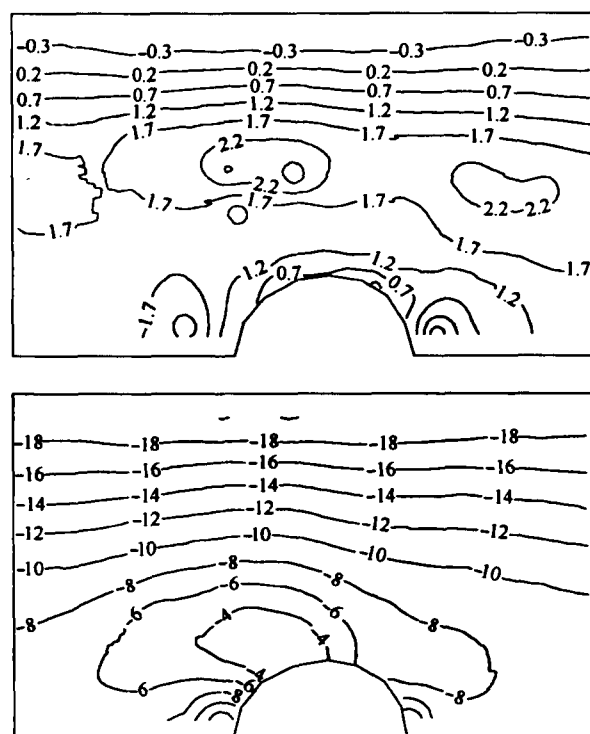


图 3 主剖面衬砌内层主应力分布(优化前)

Fig.3 Principal stress distribution of section 1-1 before optimization

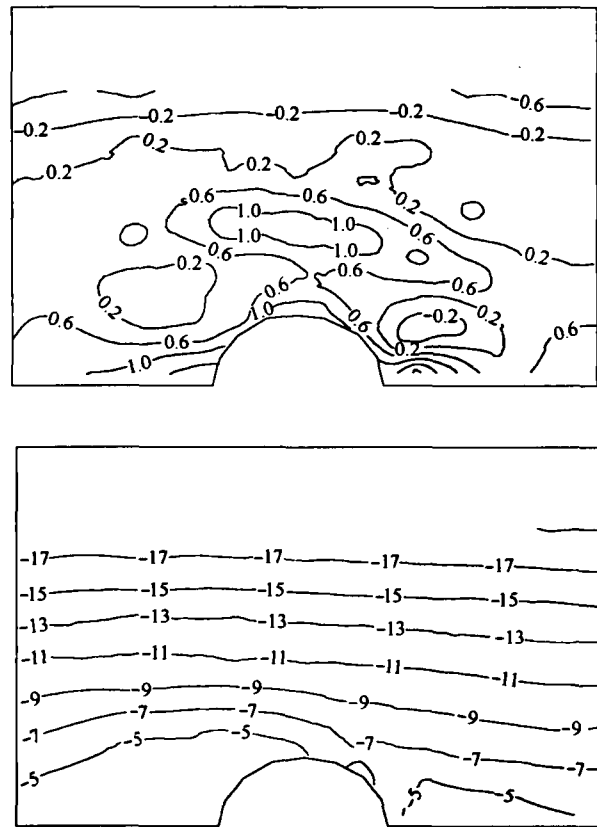


图 4 主剖面衬砌外层主应力分布(优化前)

Fig.4 Principal stress distribution of section 2-2 before optimization

验,按衬砌内的主拉应力水平进行配筋率设计。岔角修圆后衬砌层应力的计算结果如表 3 和表 4 所示,总干一级站岩体弹模取低值并进行线弹性计算,内水压力作用下衬砌层主剖面主应力分布如图 5 和图 6 所示(单位:MPa)。

按照钢筋混凝土限裂设计的要求,极限状态下,混凝土完全开裂,全部荷载由钢筋承担,根据 Lutz 理论,钢筋混凝土所需的最小配筋率 ρ 可由下式计算:

$$\rho = \frac{1}{1 - n + \frac{68965[W_{\max}]}{\sigma_t^3 \sqrt{2D_s^2 D_c}}}$$

式中: n 为钢筋与混凝土弹模比,即 $n = 200 \times 10^3 / 30 \times 10^3 = 6.67$; $[W_{\max}]$ 为混凝土限裂宽度, $W_{\max} = 0.2$ mm; D_s 为钢筋间距,计算时考虑 $D_s = 100, 150, 200$ mm; D_c 为混凝土保护层厚度, $D_c = 50$ mm; σ_t 为衬砌内的拉应力。

根据素混凝土三维弹性有限元的计算结果,总干一、二级泵站出水岔管钢筋混凝土衬砌在不同钢

筋间距时所需的配筋率如表 5 所示。

表 3 总干一级泵站出水岔管岔角衬砌层主应力计算结果
Table 3 Calculation results of principal stress of manifold lining of the first pump station MPa

计算方案	衬砌内层		衬砌外层	
	最大主应力	最小主应力	最大主应力	最小主应力
内水压力(素混凝土)弹性	2.14	-14.35	1.05	-10.02
内水压力(钢筋混凝土)弹性	2.20	-11.08	1.20	-10.64
内水压力(钢筋混凝土)弹塑性	0.85	-13.73	0.21	-10.51
外水压力(钢筋混凝土)弹性	0.19	-8.53	-0.32	-6.75

表 4 总干二级泵站出水岔管岔角衬砌层主应力计算结果
Table 4 Calculation results of principal stress of manifold lining of the second pump station MPa

计算方案	衬砌内层		衬砌外层	
	最大主应力	最小主应力	最大主应力	最小主应力
内水压力(素混凝土)弹性	2.35	-11.95	1.20	-8.77
内水压力(钢筋混凝土)弹性	2.41	-9.12	1.44	-9.32
内水压力(钢筋混凝土)弹塑性	1.26	-8.58	0.80	-9.54
外水压力(钢筋混凝土)弹性	0.17	-5.23	-0.11	-5.20

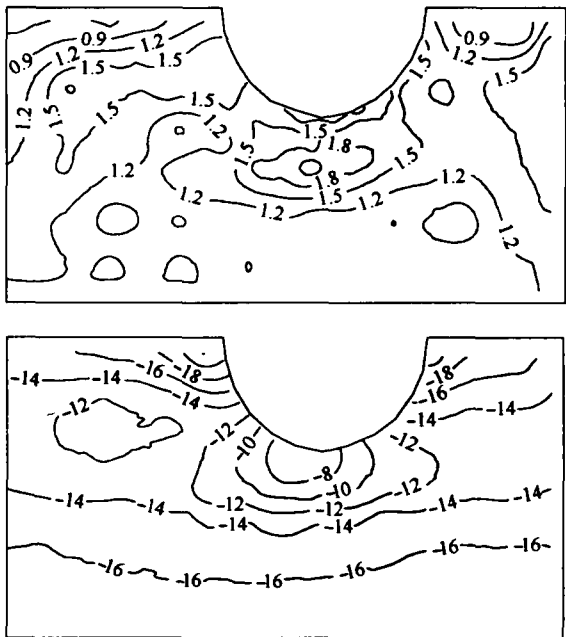


图 5 主剖面衬砌内层主应力分布(优化后)

Fig.5 Principal stress distribution of section 1-1 after optimization

5 结 论

(1) 引黄工程总干一、二级泵站高压出水岔管

采用钢筋混凝土衬砌,在设计内水压力作用下,只要局部增加配筋量和修圆岔角部位衬砌体型,则可以满足水工隧洞钢筋混凝土限裂为 0.2 mm 的要求。

(2) 外水压力作用下,50 cm 厚的衬砌足以抵抗 90 m 外水压力,因此,衬砌和围岩之间设置的锚杆十分有效地提高了岔管抵抗外压的能力。

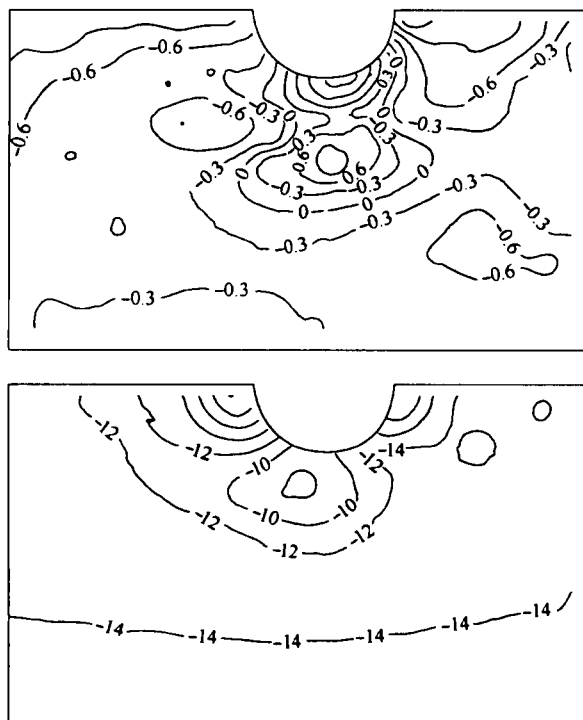


图 6 主剖面衬砌外层主应力分布(优化后)

Fig.6 Principal stress distribution of section 2-2 after optimization

表 5 总干一、二级泵站岔管钢筋混凝土配筋率
Table 5 Reinforcement ratio of reinforced concrete for the first and second pump stations

泵站名称	钢筋间距 / mm	钢筋混凝土配筋率 / %
一级泵站	100	1.33
	150	1.53
	200	1.70
二级泵站	100	1.47
	150	1.70
	200	1.88

(3) 岔管在主干管与支干管相交叉部位应力集中系数较高,需在原有的基础上进行补强设计。

(4) 为更有效地减少渗漏量,还应积极做好防渗工作。

参考文献

- 1 陈卫忠,朱维申. 万家寨引黄工程总干一、二级泵站厂房及岔管计算报告[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999
- 2 Boot J C. Elastic buckling of cylindrical pipe linings with small imperfections subject to external pressure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1997, 12(Supp): 3~14
- 3 张强勇,朱维申,陈卫忠. 三峡船闸高边坡开挖卸荷弹性损伤分析[J]. 水利学报, 1998, (8): 19~22
- 4 李育麒,何其诚. 压力隧洞衬砌计算方法[J]. 水力发电学报, 1998, (3): 24~32

NUMERICAL ANALYSIS ON REINFORCED CONCRETE LINING FOR OUTLET MANIFOLD OF YELLOW RIVER DIVERSION PROJECT

Chen Weizhong¹, Zhu Weishen¹, Yang Haiyan², Qiu Xiangbo¹

(¹LRSM Lab, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

(²Tianjin Investigation and Design Institute of Water Resources and Electric Power, Tianjin 300222 China)

Abstract In order to verify the feasibility and reasonableness of design for the reinforced concrete lining of outlet manifold of general pump stations of Shanxi Yellow River Diversion Project, 3-D numerical analysis is made based on field investigations. The stress distribution and width of cracks of reinforced concrete lining are obtained. Furthermore, the shape of reinforced concrete and reinforcement ratio of the manifold are suggested to control the width of cracks in concrete and keep stability of the engineering.

Key words finite element, reinforced concrete, lining, crack width, reinforcement ratio