

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220605

# 某高水头低地应力压力隧洞支护设计与分析

陈晓年, 邢建营, 吕小龙

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 高水头低地应力条件下压力隧洞的安全经济支护一直是水利水电工程中的设计难题, 依托厄瓜多尔辛克雷水电站发电引水洞, 在挪威准则的框架内, 采用钢衬+钢筋混凝土透水衬砌的组合支护型式, 构建了考虑地应力影响的钢衬与钢筋混凝土透水衬砌耦合理论模型, 以此确定钢衬起点, 基于三维渗流场分析, 确定高压隧洞钢筋混凝土透水衬砌最佳灌浆深度和压力。通过运行期监测资料分析, 工程运行状况良好, 表明压力隧洞组合支护各项指标选择是合适的。该研究有效解决了高水头低地应力隧洞安全经济支护难题, 保证了压力隧洞结构的安全与稳定。

**关键词:** 高水头; 低地应力; 压力隧洞; 支护理论; 耦合模型

**中图分类号:** TV732.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0104-04

## 1 引言

有压隧洞作为引水发电工程的主要建筑物, 其工程布置和支护型式不仅直接影响电站的运行安全, 还与工程进度、安全、投资等密切相关。对于有压隧洞, 岩体作为承担内水压力的结构主体, 需同时满足覆盖岩体不上抬、不发生水力劈裂和渗透失稳破坏等要求<sup>[1]</sup>, 最小岩体覆盖层厚度一般应满足挪威准则<sup>[2]</sup>要求, 但满足挪威准则前提下并不能保证不发生水力劈裂和渗透失稳, 因为在深埋岩体中一般存在不同程度的地质构造, 出现某点地应力低于自重应力的最小值<sup>[3]</sup>, 此时隧洞内地应力可能小于隧洞内水压力, 将发生水力劈裂和渗透失稳, 危及工程安全, 因此对于高水头有压隧洞, 除了要满足挪威准则外, 还应考虑地应力的大小, 以便合理选择隧洞衬砌支护形式, 同时兼顾安全性和经济性。为此, 本文以厄瓜多尔辛克雷水电站引水发电压力隧洞为例, 在综合分析大量的地勘资料和试验数据上, 基于挪威准则的框架, 采用钢衬+钢筋混凝土透水衬砌的组合支护型式, 构建钢衬与钢筋混凝土透水衬砌耦合理论模型, 以此确定钢衬起点, 并基于三维渗流场特征, 确定高压隧洞钢筋混凝土透水衬砌最佳灌浆深度和压力, 进一步探讨高水头低地应力压力隧洞设计难题。

## 2 钢衬与透水衬砌耦合模型的构建

### 2.1 高压隧洞经济性评价

为节省投资和降低施工难度, 高压隧洞上一般采用钢衬和钢筋混凝土透水衬砌<sup>[4]</sup>组合方式, 同时为保证钢筋混凝土衬砌的结构安全, 钢筋混凝土透水衬砌段需进行固结灌浆, 由于辛克雷水电站引水发电压力隧洞水头高、洞线长, 因此透水衬砌起点位置的选择不仅直接关系着工程的运行安全, 且对工程的投资影响巨大<sup>[5]</sup>, 基于此, 构建高压隧洞衬砌经济性评价  $S(x)$  模型为:

$$S(x) = M_{\text{透水衬}}(L-x) + M_{\text{钢衬}}(x) \quad (1)$$

式中,  $M_{\text{透水衬}}(L-x)$  为钢筋混凝土衬砌费用, 主要由钢筋混凝土衬砌和固结灌浆费用组成;  $M_{\text{钢衬}}(x)$  为钢衬费用;  $L$  为隧洞总长;  $x$  为钢衬段长度。

### 2.2 高压隧洞安全性评价

为同时满足覆盖岩体不上抬、不发生水力劈裂和渗透失稳破坏等要求, 针对有压隧洞, 在挪威准则的框架下, 引入地应力安全性评价指标  $F_s(h)$ :

$$\begin{cases} F_s(h) = \sigma(h) / P_w(h) \\ h = x \tan \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma(h)$  为隧洞内某点的最小主应力;  $P_w(h)$  为洞内静水压力;  $h$  为隧洞内某点埋深;  $\alpha$  为地表岩体坡角, 当  $\alpha > 60^\circ$  时, 取  $\alpha = 60^\circ$ 。

收稿日期: 2022-03-29, 修回日期: 2022-04-20

作者简介: 陈晓年(1983-), 男, 高级工程师, 研究方向为水工结构, E-mail: chenxn@yrec.cn

### 2.3 钢衬与透水衬砌耦合模型

对于高压隧洞,一般钢衬段长度越长,压力隧洞投资越多,工程安全性越高,反之,钢衬段长度越短,高压隧洞越经济,而工程安全性则大幅降低。因此,高压隧洞组合衬砌经济和安全的耦合模型为:

$$\begin{cases} \min S(x) = M_{\text{透水衬}}(L-x) + M_{\text{钢衬}}(x) \\ \max F_S(h) = \sigma(h)/P_w(h) \end{cases} \quad (3)$$

为综合考虑工程的经济性和安全性,寻求经济性和安全性的最佳平衡。首先根据地应力测试和地应力分布规律,确定满足高内水压力要求的隧洞埋深和位置,以此确定钢衬段位置。

根据李新平等<sup>[6]</sup>研究成果,深部岩体内地应力随埋深呈线性关系变化,实测应力散点分布在一个倾斜的平行带内,即:

$$\sigma(h) = kh + t \quad (4)$$

式中, $k$ 为线性回归相关系数; $t$ 为常量。

地应力安全性评价指标  $F_S(h)$  可根据工程规模和围岩情况确定,参照水工隧洞设计规范中挪威准则的经验系数  $F$  值<sup>[7]</sup>,  $F_S(h)$  可取值 1.3~1.5。

表 1 压力隧洞下平段 PSK01、PSK02 水压劈裂地应力测量结果

Tab.1 Ground stress measurement results of hydro-fracturing in lower flat section of the pressure tunnel PSK01 and PSK02

											MPa
测孔	序号	测量段深度/m	$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$
PSK01	1	8.6~9.2	11.58	9.58	6.08	0.08	0.08	2.00	8.58	6.08	12.97
	2	12.0~12.6	7.62	6.32	4.12	0.12	0.12	1.30	7.92	4.12	13.05
	3	16.6~17.2	13.66	7.66	6.36	0.16	0.16	6.00	11.26	6.36	13.17
	4	25.0~25.6	13.94	8.74	6.74	0.24	0.24	5.20	11.24	6.74	13.38
	5	30.5~31.1	/	8.59	5.79	0.29	0.29	/	9.49	5.79	13.51
	6	34.0~34.6	/	12.83	8.33	0.33	0.33	/	12.83	8.33	13.60
PSK02	1	13.0~13.6	9.83	7.43	5.13	0.13	0.13	2.40	7.83	5.13	12.83
	2	18.0~18.6	13.18	10.18	7.68	0.18	0.18	3.00	12.68	7.68	12.95
	3	23.0~23.6	21.23	13.53	9.93	0.23	0.23	7.70	14.03	9.93	13.08
	4	30.0~30.6	12.08	4.74	5.74	0.30	0.24	3.20	11.24	6.74	13.25
	5	38.0~38.6	/	12.37	11.37	0.37	0.37	/	16.37	10.37	13.45
	6	42.0~42.6	/	8.41	4.91	0.41	0.41	/	5.91	4.91	13.55

注: $P_b$ 为岩石原地破裂压力; $P_r$ 为破裂面重张压力; $P_s$ 为破裂面瞬时闭合压力; $P_H$ 为静水柱压力; $P_0$ 为孔隙压力; $T$ 为岩石抗拉强度; $S_h$ 为水平最小主应力; $S_H$ 为水平最大主应力; $S_v$ (垂直应力)计算的上覆岩石容重为 2.60 g/cm<sup>3</sup>。

由表 1 可知,PSK01 测孔最小水平主应力  $S_h$  为 6.0~8.0 MPa,最大水平主应力  $S_H$  为 8.0~12.0 MPa,计算自重应力为 12.0~13.0 MPa; PSK02 测孔最小水平主应力  $S_h$  为 7.0~10.0 MPa,最大水平主应力  $S_H$  为 8.0~14.0 MPa,计算自重应力为 12.0~13.0 MPa。PSK01、PSK02 测孔均出现最小地应力值低于自重应力的情况,表明压力隧洞下平段为低地应力,应重点考虑。

#### 3.1.2 确定钢衬起点

针对<sup>#</sup>1 压力隧洞,根据地应力测试结果,按

## 3 某压力隧洞支护设计

厄瓜多尔辛克雷水电站引水发电系统由高压引水洞、机组流道及尾水洞组成,其中高压引水管道系统采用 2 洞 8 机的布置方式,两条压力隧洞均由进水塔、上平段、上弯段、竖井段、下弯段、下平段和岔支管段组成。

### 3.1 基于高压隧洞衬砌耦合模型确定钢衬起点

#### 3.1.1 地应力测试

开展压力隧洞地应力测试,在<sup>#</sup>1、<sup>#</sup>2 压力隧洞选取 PSK01、PSK02 共 2 个测孔开展水压致裂测试。测孔 PSK01 位于<sup>#</sup>1 压力隧洞下平段,孔深 50 m,孔径 75 mm,垂直向下,孔内满水,且有较强的承压水,钻孔岩层主要为凝灰岩;测孔 PSK02 位于<sup>#</sup>2 压力隧洞下平段,孔深 50 m,孔径 75 mm,垂直向下,孔内满水,根据钻孔岩芯编录,钻孔岩层较为完整,主要为微风化的凝灰岩,岩芯呈长柱状,局部有少量的裂隙。表 1 分别为压力隧洞下平段测孔 PSK01、PSK02 的水压劈裂地应力测量结果。

表 1 压力隧洞下平段 PSK01、PSK02 水压劈裂地应力测量结果

Tab.1 Ground stress measurement results of hydro-fracturing in lower flat section of the pressure tunnel PSK01 and PSK02

											MPa
测孔	序号	测量段深度/m	$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$
PSK01	1	8.6~9.2	11.58	9.58	6.08	0.08	0.08	2.00	8.58	6.08	12.97
	2	12.0~12.6	7.62	6.32	4.12	0.12	0.12	1.30	7.92	4.12	13.05
	3	16.6~17.2	13.66	7.66	6.36	0.16	0.16	6.00	11.26	6.36	13.17
	4	25.0~25.6	13.94	8.74	6.74	0.24	0.24	5.20	11.24	6.74	13.38
	5	30.5~31.1	/	8.59	5.79	0.29	0.29	/	9.49	5.79	13.51
	6	34.0~34.6	/	12.83	8.33	0.33	0.33	/	12.83	8.33	13.60
PSK02	1	13.0~13.6	9.83	7.43	5.13	0.13	0.13	2.40	7.83	5.13	12.83
	2	18.0~18.6	13.18	10.18	7.68	0.18	0.18	3.00	12.68	7.68	12.95
	3	23.0~23.6	21.23	13.53	9.93	0.23	0.23	7.70	14.03	9.93	13.08
	4	30.0~30.6	12.08	4.74	5.74	0.30	0.24	3.20	11.24	6.74	13.25
	5	38.0~38.6	/	12.37	11.37	0.37	0.37	/	16.37	10.37	13.45
	6	42.0~42.6	/	8.41	4.91	0.41	0.41	/	5.91	4.91	13.55

注: $P_b$ 为岩石原地破裂压力; $P_r$ 为破裂面重张压力; $P_s$ 为破裂面瞬时闭合压力; $P_H$ 为静水柱压力; $P_0$ 为孔隙压力; $T$ 为岩石抗拉强度; $S_h$ 为水平最小主应力; $S_H$ 为水平最大主应力; $S_v$ (垂直应力)计算的上覆岩石容重为 2.60 g/cm<sup>3</sup>。

照式(4)对地应力进行拟合,即  $\sigma(h) = 0.032h - 3.54$ ,根据隧洞安全性评价式(2),考虑工程规模及围岩情况,取  $F_S(h) = 1.5$ ,即  $F_S(h) = (0.032h - 3.54)/6.0 > 1.5$ ,计算满足安全要求的隧洞最小埋深为 392 m。根据<sup>#</sup>1 隧洞地表岩体坡角  $\alpha = 48.25^\circ$ ,得出钢衬长度 350 m,同样计算可得<sup>#</sup>2 压力隧洞钢衬长度 430 m。

根据式(3),按照工程造价,透水衬砌(包含固结灌浆)每米概算投资约 16 万元,每米钢衬概算投资约 26 万元,可建立投资与安全性对比曲线,

见图 1。由图 1 可知,随着钢衬长度增加,高压管道总投资增加,安全性增加。同样,在安全裕度许可范围内,安全系数越低,投资越省。

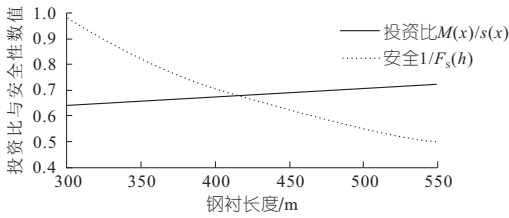


图 1 经济性与安全性对比曲线

Fig. 1 Comparison curve of economy and safety

### 3.2 高压隧洞透水衬砌结构设计

#### 3.2.1 透水衬砌结构设计

钢衬长度确定后,剩余洞段采用钢筋混凝土透水衬砌。对于透水衬砌,在高内水压力作用下,衬砌混凝土开裂,内水进行外渗,此时高压隧洞的内水压力和水锤产生的压力全部由主筋来承担<sup>[8]</sup>,根据钢筋的强度允许值设计结构配筋,根据各个断面的水锤压力计算对应需要的钢筋面积。

#### 3.2.2 灌浆深度确定

高压引水隧洞钢筋混凝土透水衬砌结构安全的关键措施为固结灌浆,在正常工况下,下平段内水压力较大,衬砌开裂程度较为严重,内水外渗现象较为明显,确定该区域的固结灌浆最佳深度尤为重要,选取 #2 压力隧洞下平段典型截面附近区域分析固结灌浆深度的敏感性。

采用 FLAC<sup>3D</sup> 进行三维渗流场分析,模型考虑流体与岩土体之间的相互作用,并根据正常蓄水条件下对应区域的渗流场及孔压分布情况确定边界条件,衬砌充分考虑开裂,取渗透系数为  $8 \times 10^{-7}$ ;围岩渗透系数取  $3 \times 10^{-7}$  m/s;固灌圈渗透系数取  $5 \times 10^{-8}$  m/s。

固结灌浆深度的敏感性分析是将衬砌内表单位长度渗漏量作为因变量,通过控制边界条件的变化,调整固结灌浆深度,分析渗漏量变化。通过渗流量的变化情况确定最优固结灌浆深度。通过 7 组固灌深度的计算方案,计算得到了衬砌内表单位长度渗漏量。

表 2 为固结灌浆深度对渗漏量的敏感性分析结果。由表 2 可知,随着固结灌浆深度的增加,衬砌内表单位长度渗漏量不断降低,但降幅越来越小。当固结灌浆达到一定的深度(约 4 m)时,进一步增加固结灌浆深度,对于减小衬砌内表单位长度的渗漏量,作用非常有限(灌浆深度从 4 m 增加到 5 m 时,渗流量减小百分比仅 11.3%)。因此,综合考虑衬砌结构的防渗要求及工程造价,固结灌浆深度设计选取为 4 m。

表 2 固结灌浆深度对渗漏量的敏感性分析结果

Tab. 2 Sensitivity analysis results of consolidation grouting depth to leakage

编号	固灌深度/m	渗漏量 /[L · (s · m) <sup>-1</sup> ]	灌浆深度增加 1 m 时的渗流量	
			减少量 /[L · (s · m) <sup>-1</sup> ]	减少百 分比/%
1	0	0.276		
2	1	0.184	0.092	33.3
3	2	0.146	0.038	20.7
4	3	0.124	0.022	15.1
5	4	0.110	0.014	11.3
6	5	0.100	0.010	9.1
7	6	0.092	0.008	8.0

## 4 压力隧洞监测分析验证

### 4.1 围岩变形监测

为验证压力隧洞组合支护各项指标选择是否满足设计要求<sup>[9]</sup>,压力隧洞运行是否平稳,在压力隧洞上、下平段共安装 50 套多点位移计,布置情况见图 2,监测结果见图 3。由图 3 可知,压力隧洞上、下平段各监测部位围岩深层变形稳定,累积最大围岩变形量为 -34.7 mm,围岩月变形增量在 -0.3~0.4 mm 之间,未发现异常变形。

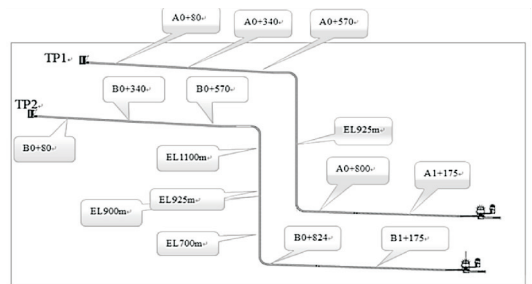


图 2 上平段(#1 洞和 #2 洞)监测图

Fig. 2 Monitoring drawings of #1 and #2 tunnel in upper flat section

### 4.2 渗透水压力监测

压力隧洞下平段共安装 12 支渗压计,监测结果见图 4。由图 4 可知,监测时间范围内 #2 压力隧洞下平段桩号 0+824.41 最大水位变化为 8.3 m;换算水头为 917.6~1 063.6 m; #1 压力隧洞下平段渗透压力水位较上月上升 3.2 m,混凝土浇筑完成的部位承压水头大约在 560 m。#1、#2 压力隧洞钢衬段桩号 1+174 断面监测水压力基本稳定,水头约为 63 m。综上监测结果表明,压力隧洞的组合衬砌设计合理。

## 5 结论

a. 本文在挪威准则的框架内,针对钢衬+钢筋混凝土透水衬砌的组合支护型式,构建了考虑

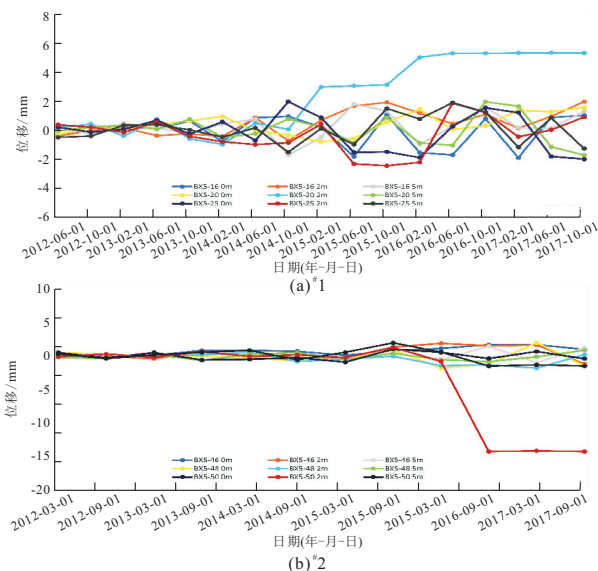


图 3 #1、#2 压力隧洞下平段围岩变形监测结果过程线  
Fig. 3 Process curves of surrounding rock deformation monitoring results of #1 and #2 pressure tunnel in lower flat section

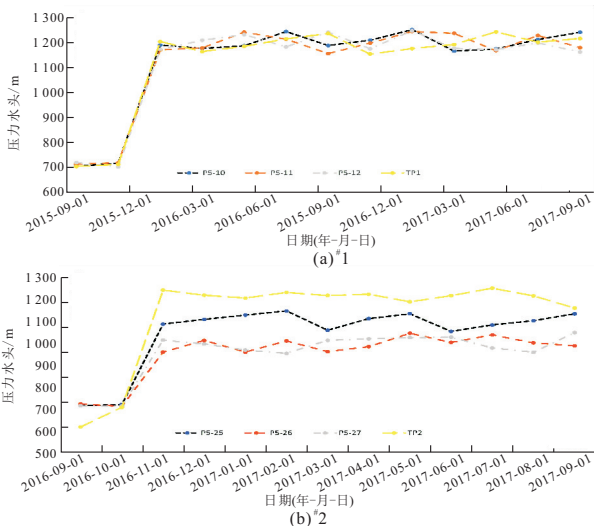


图 4 #1、#2 压力隧洞下平段 0+824.41 渗透水压力监测成果过程线

Fig. 4 Process curve of hydraulic seepage pressure monitoring results of #1 and #2 pressure tunnel in the lower flat section at 0+824.41

## Design and Analysis of Pressure Tunnel Supporting with High Head and Low Crustal Stress

CHEN Xiao-nian, XING Jian-ying, LV Xiao-long

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The safe and economic support of pressure tunnel under the condition of high head and low crustal stress has always been a difficult design problem in water conservancy and hydropower projects. Based on the diversion and power generation pressure tunnel of Coca Codo Sinclair hydropower station in Ecuador, the combined support type of steel lining and reinforced concrete permeable lining was adopted within the framework of the Norwegian guidelines. The coupling theoretical model of steel lining and reinforced concrete permeable lining considering the influence of crustal stress was constructed to determine the starting point of steel lining. Based on the three-dimensional seepage field analysis, the optimal grouting depth and pressure of reinforced concrete permeable lining of high-pressure tunnel were determined. The analysis of monitoring data during operation shows that the selection of various indexes of the combined support of the pressure tunnel is appropriate. This study effectively solves the problem of safe and economic support of high head and low crustal stress tunnel, and ensures the safety and stability of pressure tunnel structure.

**Key words:** high head; low crustal stress; pressure tunnel; support theory; coupling model

地应力影响钢衬与钢筋混凝土透水衬砌耦合理论模型,以此确定钢衬起点,有效解决了钢衬与钢筋混凝土衬砌安全与经济最优点问题。

b. 针对钢筋混凝土透水衬砌,基于三维渗流场特征,通过控制边界条件的变化,将衬砌内表单位长度渗漏量作为因变量,根据固灌深度反演渗漏量的变化,以此确定高压隧洞钢筋混凝土透水衬砌最佳灌浆深度和压力。

c. 通过运行期监测资料分析,工程运行状况良好,表明压力隧洞组合支护各项指标选择是合适的。

d. 本文研究成果有效解决了辛克雷水电站高水头低地应力隧洞安全经济支护难题,目前电站已安全运行近 6 年,该研究的相关成果可对实际工程提供一定的借鉴及指导作用。

### 参考文献:

- [1] 王玉杰,陈晨,曹瑞琅,等.高内水压力隧洞钢筋混凝土衬砌裂缝控制标准[J].水力发电学报,2020,39(9):111-120.
- [2] 胡云进,方镜平,黄东军,等.压力隧洞设计与结构计算研究进展[J].水力发电,2011,37(7):15-18,49.
- [3] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.
- [4] 郭宇.透水理论在新疆某高压隧洞混凝土衬砌结构设计中的应用[J].水电能源科学,2018,36(4):113-115,64.
- [5] 张金良,谢遵党,邢建营.CCS水电站若干设计难点研究与突破[J].人民黄河,2019,41(5):96-100,105.
- [6] 李新平,汪斌,周桂龙.我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2875-2880.
- [7] 中华人民共和国水利部.水工隧洞设计规范:SL 279-2016[S].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [8] 张巍,刘镇,戴北冰,等.压力隧洞钢筋混凝土衬砌开裂数值模拟研究[J].水电能源科学,2017,35(4):130-134.
- [9] 徐干成,郑颖人,乔春生,等.地下工程支护结构与[M].北京:中国水利水电出版社,2013.