

有压引水隧洞间岩体厚度的确定

万里飘

(上海勘测设计研究院,上海 200434)

摘要:结合 3 个已建的抽水蓄能电站工程(天荒坪、广蓄、沙河)的具体经验,介绍了目前国内确定有压隧洞间岩体厚度的一般做法。探讨了洞间岩体厚度与渗透稳定性的关系。介绍了响水涧抽水蓄能电站有压隧洞间岩体厚度确定的过程以及岩体厚度不足时的防渗工程补充措施,认为隧洞间水力梯度在 16 以下是安全的。

关键词:有压隧洞;岩体厚度;渗透稳定性;水力梯度

中图分类号:TV223.4 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2006)03-0056-03

Determination of rock mass thickness between diversion pressure tunnels //WAN Li-piao(Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: In combination with some experiences from construction of three pumped storage power stations, i. e. the Tianhuangping power station, the Guangxu power station, and the Shahe power station, the method currently used for determination of the rock mass thickness between pressure tunnels at home was introduced. The relationship between the rock mass thickness and the seepage stability was discussed. Finally, the process for determination of the rock mass thickness at the Xiangshuijian Pumped Storage Power Station was presented, and some remedy measures for the seepage control under the condition of insufficient rock mass thickness were proposed. It is concluded that the hydraulic gradient between pressure tunnels below 16 is safe.

Key words: pressure tunnel; rock mass thickness; seepage stability; hydraulic gradient

1 有压隧洞间岩体厚度的一般要求

相邻水工隧洞之间的岩体厚度,应根据布置需要、地质条件、衬砌形式、开挖方式及运行条件等因素综合考虑确定。

a. 隧洞间岩体厚度尽可能不小于 2~3 倍的开挖洞径(或洞宽)。如岩柱厚度小于 2 倍隧洞开挖直径,应作专门论证。这是个经验值,以前对多数常规电站而言因水头不高,只要围岩条件可以则洞间岩体厚度一般满足该条规定即可。

b. 以洞间岩柱应力不超过该处岩石的允许应力为条件。在洞室开挖后,由于岩体应力重分布的结果,在洞室围岩一定范围内会因应力松弛和裂隙扩展而呈塑性状态,形成一个塑性区。如洞间岩体厚度不足,应力区叠加和邻洞高压作用将增加岩体的不稳定因素。洞间岩柱应力可用弹塑性理论分析,用有限单元法计算,或作若干假设以经验对比估计。

c. 运行中,可能有一条隧洞放空,而邻洞有最大的内水压力,此时应充分考虑岩壁的稳定性和渗水导致抗力有所降低的影响。随着高水头抽水蓄能

电站的出现,保证洞间岩体厚度来控制洞间水力梯度过大显得尤为重要。

2 洞间岩体厚度与渗透稳定性的关系

洞间岩体稳定性主要包括岩体的应力应变和渗透两部分。前者与岩体的初始应力场、卸荷、加荷、边界形状及范围有关;后者为渗透水流主要沿各种结构面(如层面、断层、节理、裂隙等)的运移、渗透,在这一过程中,由于渗流的多种复杂作用(如软化、裂隙冲蚀、劈裂等)而使围岩强度降低,导致变形破坏^[1]。另外,即使围岩自身安全,但渗水量过大导致电站运行成本加大,故也可列入渗透不稳定范围。此外还应该考虑放空洞室结构对外水压力作为外荷载的承受能力。

洞间岩体厚度是否满足渗透稳定性要求与两个指标有关:一个是水力梯度,一般水压力值在总体布置时已确定,研究洞间岩体厚度大小也就是寻找一个合适的水力梯度值;另一个是内水压力,要求不超过最小地应力,以防止水力劈裂。

2.1 相关规程规范

SL279—2002《水工隧洞设计规范》第3.1.8条对相邻隧洞的间距有“应保证运行期围岩不发生渗透失稳和水力劈裂”的规定,但未具体指出允许的水力梯度。DL/T5016—1999《混凝土面板堆石坝设计规范》第7.2.1条对趾板下基岩的允许水力梯度 p 有如下规定(仅供隧洞围岩的允许水力梯度参考):风化程度为新鲜、微风化时 $p > 20$,弱风化时 $p = 10 \sim 20$,强风化时 $p = 5 \sim 10$,全风化时 $p = 3 \sim 5$ 。

2.2 水力梯度与渗流压力的关系

根据广蓄二期水道围岩中埋设渗压计监测内水外渗的资料,整理分析得出渗流水力梯度 I 与渗压损失系数 β 的关系如图1所示。渗流势场仅存在于渗流水力梯度 I 大于4的范围,当 I 小于或等于4时,渗流压力几乎损失殆尽。

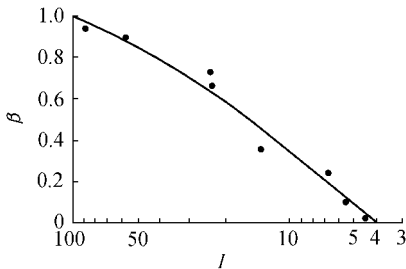


图1 I 与 β 关系曲线

高压隧洞运行中,相邻的放空隧洞、排水廊道或地下厂房的洞周围岩承受着邻洞内水外渗作用的渗流压力,因此,洞室间岩体厚度越大则渗流水力梯度越小,相邻洞室外水荷载也越小,并且更安全。一般而言,圆形、小尺寸结构所承受外水荷载的能力比方形、大尺寸结构的强。

2.3 水力梯度与渗水量的关系

为了揭示围岩在高水压作用下的稳定性和抗渗性,获得围岩允许的水力梯度,在天荒坪工程中曾进行了国内首次高压渗透试验,结果表明岩体渗流是裂隙流,当围岩最小地应力高于内水压力时,渗水量 Q 随水压力 P 增高(即水力梯度增加),且基本上遵循幂函数关系 $Q = AP^n$ (A 为系数, n 值不大于4),围岩仍处于弹性阶段或稳定阶段。当水压力超过裂隙面上的法向地应力时,裂隙或节理被劈开,渗水量迅速增大,渗水量和压力关系曲线上表现出明显的临界压力^[2-3]。

3 工程类比

3.1 工程实例

3.1.1 天荒坪抽水蓄能电站

天荒坪抽水蓄能电站有两条高压输水主隧洞,洞距59.54m,每条主洞通过岔管段分为3条支管,岔管

最大静水头680.2m。引水主洞和岔管均采用钢筋混凝土衬砌,仅在支管段设钢衬。两条主洞间岩体厚度51.44m,存在着高压水从一条洞向另一条洞渗透的问题,水力梯度为 $680.2\text{m}/51.44\text{m} = 13.22$,渗水的同时对放空的压力钢管带来外水压力威胁。为了降低作用在钢管和岔管上的外水压力,位于岔管上方处布置排水廊道,作用是降低岩体中的水压力,岔管与排水廊道间岩体厚度为35m,两者间水力梯度为 $680.2\text{m}/35\text{m} = 19.43$ 。该区域的最小地应力大于内水压力,隧洞排水廊道间水力梯度适宜,竣工后未出现异常,而平行高压隧洞间岩体厚度未经历过考验。

3.1.2 广蓄抽水蓄能电站

广蓄抽水蓄能电站为一洞四机布置,主洞及高压岔管为钢筋混凝土衬砌,承受最大静水头610m。

广蓄一期投产1年后,发现厂房上游边墙出现渗水现象,湿润面积逐渐扩大并爬升,经反复分析并放水检查,发现是内水从封堵不良的灌浆孔外渗,经外填混凝土裂缝窜至围岩爆破松动圈裂隙,在厂房上游边墙上出露,此时渗流水力梯度增大到约20以上,渗压力非常大,对厂房高边墙这样的大尺寸洞室的稳定形成巨大威胁,但得到了及时处理。

广蓄二期由于原地质探洞是利用一期厂房上层排水廊道延伸挖掘的,至下面的岔、支管岩体距离仅30m,渗流水力梯度较大, $I \approx 20$ 。当时认为围岩质量相当完整,用作排水不会有问题,但出乎意料的是在水道第一次充水至5MPa压力时洞内出现两处围岩劈裂,劈裂处围岩完整到肉眼见不到裂隙,但劈裂出露水流呈北西向片膜状喷射,渗漏量达30L/s,甚为罕见。区域内北西向构造属张扭性结构面,水道放空后在劈裂处仍未见裂缝痕迹,显然是内部隐蔽节理在梯度劈裂下扩展所致,事后处理是将探洞回填封堵,并在岔管内衬砌裂缝较多的洞段进行高分子化学灌浆,处理后渗漏量稳定在2.5L/s,效果比较理想。

总之,排水设计应谨慎选择控制渗流水力梯度^[4],以此控制排水边界。

3.1.3 沙河抽水蓄能电站

沙河抽水蓄能电站净水头144m,引水隧洞下平段在北侧与施工支洞大致平行。引水隧洞洞径为6.5m,采用钢筋混凝土衬砌,施工支洞断面尺寸为7m×7.5m城门洞,洞周采用喷锚临时支护措施。两条洞平行段之间岩体厚约18m,渗流水力梯度 $I \approx 8$ 。为了解该洞段运行期的围岩稳定情况,选取地质条件比较差的断面,采用平面弹性有限元方法对该段围岩进行分析计算。计算结果表明:①两洞洞周及洞间的压应力最大为6.1MPa,均未超过岩体

的饱和抗压强度(60 MPa);②两洞在自重作用下的大部分位移已在开挖过程中完成,运行后最大位移增量引水隧洞为 0.25 mm,施工支洞为 0.08 mm,并不危及洞室围岩安全;③引水隧洞洞周最大拉应力为 2.02 MPa,因已作 50 cm 厚钢筋混凝土永久衬砌,故不影响安全,施工支洞最大拉应力出现在洞底临引水洞侧,为 1.32 MPa,虽小于允许抗拉强度(2 ~ 6 MPa),但局部岩性差的洞段尚需采取衬护等措施,以确保洞室安全运行。

为防止钢筋混凝土衬砌段高压水外渗,有效降低钢衬外水压力,在钢衬首端设 3 道防渗帷幕,并且保留距洞顶 15 m 处的一条与钢衬平行走向的地质探洞作排水廊道。隧洞和排水廊道间渗流水力梯度 $I \approx 9.6$,运行后未见异常。

3.2 工程实例分析

表 1 列举了一些工程实例资料,从表 1 可以看出,确定一个水力梯度允许值很难,如天荒坪一期和广蓄二期的洞顶排水廊道,水力梯度值均接近 20,地质情况很好,但两者的安全程度不一样。又如一些工程平行隧洞虽然采用了较大的水力梯度值,但实际电站运行中有许多限制,像天荒坪一期虽然已投产多年,但至今电站放空检修期邻洞未运行。

4 响水涧洞室间岩体厚度的确定

响水涧抽水蓄能电站工程装机 100 万 kW,一洞一机布置,见图 2。电站 4 条引水隧洞平行布置,并与 4 台发电机相连,故隧洞间距与厂房内的机组间距相同,为减小厂房尺寸,工程选用了较小的机组间距。引水隧洞内径 6.4 m,洞轴线间距 24.3 m,下平段静水头 279 m。竖井段围岩为微风化 ~ 新鲜花岗岩,裂隙平均密度 0.9 ~ 1.1 条/m,倾角以中 ~ 陡倾角为主,裂隙面多为钙质薄膜充填或闭合状;围岩类别竖井段低水压的上段为Ⅲ类,竖井高水压的下段为Ⅱ类;水压致裂法地应力测试结果反映最小主应力平均为 3.86 MPa,最小值 3.50 MPa。

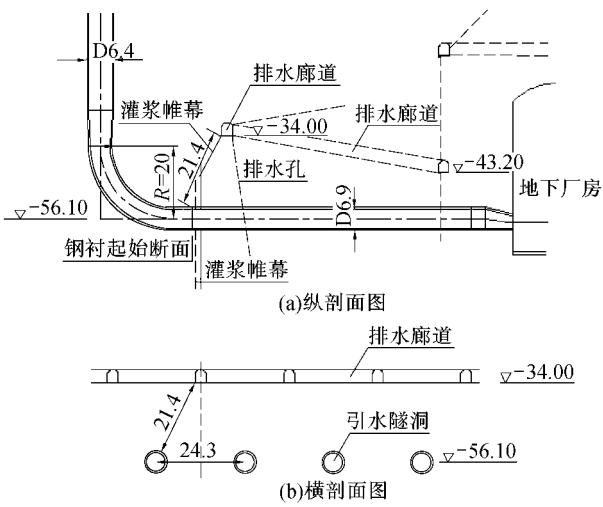


图 2 引水隧洞、排水廊道布置(单位:m)

4.1 平行引水隧洞间的岩体厚度

隧洞之间岩体厚度 16.85 m,约 2.3 倍开挖洞径,满足不小于 2 ~ 3 倍的开挖洞径(或洞宽)这个常规要求。为定量评价洞间岩体厚度是否满足应力条件,应进行有限元分析计算。本工程可行性研究阶段仅参考沙河抽水蓄能电站有限元计算分析成果,围岩在内水压力作用下应力区、应变区范围较小,大部分由钢筋混凝土衬砌承担,故认为对相邻放空隧洞无影响。

运行中,可能有一条隧洞放空,而邻洞有最大的内水压力,隧洞间水力梯度约为 15.5,从表 1 中工程类比可看出本工程隧洞间的水力梯度属中等,也满足相近规范对岩石允许水力梯度的要求。根据前述水力劈裂试验的结果,隧洞内水压力为 2.80 MPa,未超过围岩的破裂压力及重张压力,裂隙或节理不会被劈开而大量渗水。另外,放空隧洞衬砌特别是钢管衬砌段承受着邻洞内水外渗作用的渗流压力,按水力梯度 15.5 查图 1,得渗压损失系数 β 约为 0.5,即增加约 140 m 的外水压力钢衬难以承受,必须增设外排水设施。

表 1 工程实例资料

电站工程简称	岩 石	隧洞间水力梯度	隧洞与廊道间水力梯度	运行情况
响 水 涧	花 岗 岩	15.5	13.0	待检验
天荒坪一期	凝 灰 岩	13.2/43.7(主洞间/支洞间)	19.4	隧洞放空时邻洞未运行
天荒坪二期	凝 灰 岩	13.6		
广蓄一期	花 岗 岩		6	内水经灌浆孔外渗
广蓄二期	花 岗 岩		20	渗漏量达 30 L/s,后化学灌浆处理
棉 花 滩	黑云母花岗岩	8.6	6.2	未见异常
沙 河	安山玢岩	8	9.6	未见异常
法国 Montezic		9.6/22.0(主洞间/支洞间)		未见异常
桐 柏		19.0(支洞间)		未见异常
宝 泉		16.6/36.5(主洞间/支洞间)		未见异常

(下转第 66 页)

汇流口的水力特性进行分析研究,并在此基础上考虑主管面积相对大小 R_A 、汇流口几何角 θ 及主流流量相对大小 R_Q 的影响,分别提出了汇流口下游附近最大收缩断面的收缩系数综合表达式、主流流经汇流口和支流汇入主流的局部能量损失系数 ζ_{ud} 和 ζ_{bd} 的普遍表达式。与有机玻璃汇流管道试验资料进行了比较,结果表明两者吻合较好。计算与试验结果均表明,收缩系数 μ 随 R_Q 的增大而减小,随 R_A 的增大而增大,随 θ 的增大而减小;局部能量损失随 R_Q 的增大而增大,随 R_A 的增大而减小,随 θ 的增大而增大。

本文研究成果主要是针对主管道汇流口上、下游断面相等的情况。作为进一步研究,有必要就汇流口上、下游主管道断面不等及主、支管两者断面高度不等等情况进行实验,以便对本文提出的理论表达式进行更为广泛的验证。

参考文献:

[1] MILLER D S. Internal flow systems[M]. 2nd ed. Houston: Gulf Publishing, 1990.

[2] SERRE M L. A study of energy loss at combining pipe junction in fish bypass systems[D]. Iowa: The University of Iowa, 1992.
[3] MAO Ze-yu. Partially filled unsteady flow analysis in the region of pipe junctions[D]. Scotland, UK: Heriot-Watt University, 1993.
[4] ZHU W. Characteristics of dividing and combining flows[D]. Montreal, Canada: Concordia University, 1995.
[5] HSU C C, WU F S, LEE W J. Flow at 90° equal-width open-channel junction[J]. J Hyd Eng, 1998, 124(2): 186-191.
[6] 茅泽育, 罗昂, 赵升伟, 等. 等宽明渠交汇口水流一维数学模型[J]. 水利学报, 2004(8): 26-32.
[7] 茅泽育, 赵升伟, 罗昂, 等. 明渠交汇口水流分离区研究[J]. 水科学进展, 2005(1): 7-12.
[8] 茅泽育, 赵升伟, 张磊, 等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究[J]. 水利学报, 2004(2): 1-7.
[9] HAGER W H. Discussion: separation zone at open-channel junctions[J]. J Hyd Eng, 1987, 113(4): 539-543.
[10] HAGER W H. Transitional flow in channel junctions[J]. J Hyd Eng, 1989, 115(2): 243-259.
[11] BAINBRIDGE K P. The confluence of rectangular-pipe flow[D]. Scotland, UK: Heriot-Watt University, 1986.

(收稿日期: 2005-07-18 编辑: 高建群)

(上接第 58 页)

4.2 引水隧洞与排水廊道的岩体厚度

排水廊道设在钢衬起始处,距两边钢管 22 m,并与厂房排水廊道相通,断面为 2.5 m×3.0 m,主要作用是降低钢衬段的外水压力。排水廊道与引水隧洞之间的水力梯度有 2 组,分别为相互垂直和相互平行,两者之间岩体最小厚度均为 21.4 m,水力梯度 13.0。

如何判定排水廊道与引水隧洞之间的岩体厚度是否满足要求?从图 1 可知,排水廊道距钢筋混凝土钢衬越近则降低外水压力越有效,但同时水力梯度越大,将越削弱其承受内水压力的能力。但实际上很难确定统一的允许水力梯度。参照表 1 中工程实例统计,本工程采用较小距离,认为排水廊道出现稍大的渗流量不用担心,但渗水必须是干净的。当然,渗流量过大时需要进行工程处理,但可较大规模地降低钢衬承受的外水压力,总体而言利大于弊。

考虑到排水廊道与引水隧洞间水力梯度不算太大,同时排水廊道尺寸小,故认为排水廊道洞周围岩在外水作用下的稳定性较好。

4.3 相关的工程措施

因总体布置需要,本工程洞间岩体厚度无太多富余,为进一步防治渗漏,可采取一些工程措施来进一步保证。如要求全部洞室开挖必须采用光面爆破,短进尺多循环施工,把对围岩的扰动降低到最小

程度。又如在水力梯度较大的隧洞段加强固结灌浆,待隧洞开挖后根据实际地质情况对少数特别差的地质部位补充化学灌浆。

参考文献:

[1] 向林. 不良围岩渗透稳定性初探[J]. 长江水利教育, 1994(1): 65-67.
[2] 水利水电规划设计总院, 水利水电地下建筑物情报网. 水利水电工程地下建筑物设计手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1993.
[3] 张秀丽. 天荒坪抽水蓄能电站钢筋混凝土岔管结构设计[J]. 水力发电, 2001(6): 41-43.
[4] 叶冀升. 广蓄电站钢筋混凝土衬砌岔管建设的几点经验[J]. 水力发电学报, 2001(2): 93-105.
[5] 刘世明, 胡宏磊, 陈鼎. 天荒坪抽水蓄能电站岔管区域高压渗透试验[J]. 岩土工程学报, 1996(6): 31-38.

(收稿日期: 2005-03-24 编辑: 高建群)

