

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.05.042

高压隧洞内水外渗三维有限元分析与渗透稳定性研究

张巍^{1,2}, 陈云长³, 黄立财³, 刘林军³

(1. 中山大学 工学院, 广东 中山 510275; 2. 中山大学 岩土工程与信息技术研究中心, 广东 中山 510275;
3. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635)

摘要: 阳江抽水蓄能电站高压岔管拟采用钢筋混凝土衬砌,其静水压力 799 m 为国内之最。为保证在高水头作用下围岩的渗透稳定,采用三维有限元方法,针对阳江抽水蓄能电站高压水道防渗排水系统进行渗流及渗透稳定研究。研究结果表明,高压隧洞渗流量在合理范围,高压固结灌浆、防渗帷幕和排水系统等防渗排水措施设计合理,效果显著。渗透稳定性方面,断层 f 708 与排水廊道相交处渗透坡降较大,发生渗透破坏的可能性较大,需重点处理。通过高压隧洞内水外渗三维有限元分析与渗透稳定性的研究,使得处理措施更具针对性。

关键词: 高压隧洞;内水外渗;渗流;渗透稳定

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2015)05—0212—06

3D Finite Element Analysis of Seepage from A High Pressure Tunnel and Study on Its Permeation Stability

ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Yunchang³, HUANG Licai³, LIU Linjun³

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Zhongshan, Guangdong 510275, China; 2. Research Center for Geotechnical Engineering & Information Technology, Sun Yat-sen University, Zhongshan, Guangdong 510275, China;
3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510635, China)

Abstract: For the high pressure bifurcated pipes of Yangjiang pumped storage power station, reinforced concrete lining scheme is to be adopted. The static water pressure is 799 m, which is the highest in China. In order to maintain the stability of the surrounding rock under high water pressure, 3D finite element method was adopted to investigate seepage and infiltration stability of the high pressure drainage pipe system of this power station. Firstly the seepage prevention and drainage system layout scheme of this power station was introduced, followed by the introduction of the seepage 3D finite element calculation theory, based on which the study was carried out. The study results indicate that the seepage discharge is within a rational range, and the layout scheme of seepage prevention and drainage system of the high pressure tunnels is suitable and obviously effective. For the aspect of seepage and infiltration stability, the seepage gradient value in the intersection region of f708 and the drainage gallery is relatively big. The possibility of hydraulic failure in this region is imminent, and it is necessary to take prevention measures. With the help of the 3D finite element analysis and the study on seepage stability of the high pressure tunnels of this power station, the handling actions will be more targeted.

Keywords: high pressure tunnel; seepage from inside to outside; seepage flow; seepage stability

随着越来越多的大型水电站尤其是抽水蓄能电站的建设,出现了越来越多的高水头水工隧洞,隧洞

的水头也越来越高。在高水头作用下,混凝土衬砌难免开裂,衬砌开裂后成为透水介质,隧洞发生内水

外渗,围岩成为承载主体。目前,该理念已受到人们的普遍认可^[1-6]。

高压隧洞设计应遵循三大基本准则:最小覆盖厚度准则、最小地应力准则和渗透稳定准则。工程实践表明,在满足前两大准则的前提下,高压隧洞的整体稳定是有保障的,应重点关注渗漏和渗透稳定问题。针对高压隧洞内水外渗渗透稳定问题,人们做了许多工作^[7-16],研究重点主要集中在渗流应力耦合方面。

阳江抽水蓄能电站位于广东省阳春市与电白县交界处的八甲山区,地理位置处于广州—湛江粤西片的中部,直线距广州市 230 km。电站装机 2 400 MW,分两期建设,一期装机 1 200 MW。电站采用 1 管 3 机供水,引水隧洞主管管径 7.4 m,支管管径 3.0 m。高压引水岔管及引水隧洞拟采用钢筋混凝土衬砌,引水支管采用钢衬砌。高压混凝土岔管静水压力 799 m,水头超过了国内所有已建和在建的混凝土岔管。本文采用三维有限元方法,针对阳江抽水蓄能电站高压水道防渗排水系统进行渗流及渗透稳定研究。

1 防渗排水系统布置

1.1 总体方案

工程采用先防渗和后排水方案。防渗包括高压隧洞洞内灌浆和防渗帷幕,阻止高压内水渗向引水支管区域。在帷幕后设置排水廊道及排水孔,排去这一区域的外水;同时在钢支管表面设置排水系统,直接排放渗向钢管表面的水。

1.2 防渗布置

高压隧洞拟采用高压固结灌浆,灌浆孔参数:每排 12 孔、孔深 6 m,排距 2.5 m,灌浆压力 10 MPa。固结灌浆包括水泥灌浆和化学灌浆。针对断层带适当加密灌浆孔距。

拟在钢支管钢衬起始端下游平距约 6 m 处设置一条长 230 m、底板高程约为 118 m、与钢支管交角为 65°的帷幕灌浆廊道,廊道断面为城门洞型,尺寸 3.0 m×3.6 m(宽×高)。廊道与探洞相连,组成“V”字形帷幕灌浆廊道。廊道下设孔径 76 mm、间距 2.0 m、孔深约 141 m 的帷幕灌浆孔,从灌浆廊道向下的垂直帷幕灌浆与钢管表面的高压固结灌浆相接,连成一个防渗整体。

1.3 排水布置

在帷幕灌浆廊道下游约 36 m 处平行布置一条长为 100 m、高程为约 117 m 的排水廊道,排水廊道底部布置一排孔径 76 mm、间距 2.5 m 的竖直排水孔,排水孔底部高程为 -8.0 m,排水廊道与探洞相连。

帷幕灌浆廊道及灌浆孔在灌浆完成后全部封堵,探洞在灌浆廊道上游部分全部封堵,在灌浆廊道下游部分作为永久排水廊道。

2 渗流三维有限元计算理论

2.1 控制方程

区域 Ω 上的渗流实际上仅在自由面 Γ_f 以下的湿区 Ω_w 中运动。当自由面 Γ_f 确定时,湿区 Ω_w 也就随之确定。然而,自由面 Γ_f 在实际工程问题中一般是未知的。通过将 Darcy 定律重新定义为如下形式,变分不等式方法将湿区 Ω_w 上的渗流问题转化为全域 Ω 上的一个新的边值问题。

$$v = -k \nabla \phi + v_0 \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度, v_0 为初流速, k 为二阶渗透张量, ∇ 为梯度算子, $\phi = z + p/\gamma_w$ 为总水头, z 为垂直坐标分量, p 为孔隙水压力, γ_w 为水的密度。初流速 v_0 的引入是为了消除干区 Ω_d 上的虚假渗流场。

全域 Ω 上的渗流应满足连续性方程和边界条件。

2.2 有限元格式

在有限单元法中,上述渗流问题通常采用剩余流量法、初流量法或渗透系数调整法等直觉化方法求解,其共同特点是力图通过自由面迭代确保干区内的渗流量低于湿区内的渗流量。这些方法的不足之处是理论不够严密,难以对渗流出渗点和自由面进行准确定位,计算结果具有显著的网格依赖性。

本文采用理论上严密的 Signorini 型变分不等式方法求解,所建立的方法称为 SVA 法(子结构、变分不等式和自适应罚 Heaviside 函数相结合的方法),该方法在理论上消除了出渗点的奇异性和由此引起的网格依赖性,能够对强非线性渗流问题的渗流出渗点和自由面进行精确定位,且具有计算速度快、计算精度高、算法稳定性强等突出优点,特别适合对含排水孔、洞、幕等复杂渗控结构的渗流问题进行分析 and 优化^[17]。

3 有限元计算与分析

3.1 模型范围

计算区域以高压岔管第一个分叉点为坐标原点,沿管轴线方向且指向下游为 x 轴正方向,垂直于岔管轴线方向为 y 轴正向,垂直向上为 z 轴正向。三维有限元模型计算范围为: x 向,从高压隧洞下平段起始点至下游钢支管厂房边墙(长度约为 460 m); y 向沿 2# 引支钢管中心线向两侧各 180 m; z 向,底部计算边界为海拔高程 -125 m,上部取至坡表,坡表最高高程为 656.16 m,最低高程为 354.43 m。

3.2 关键断层的选取和模拟

依据对高压隧洞工程地质及水文地质条件的勘探资料,在三维有限元计算模型中,对关键断层进行模拟,模型中考虑的关键断层性质见表 1。

考虑到断层相对围岩具有强透水的特性,可能会在高压隧洞裂隙岩体中形成集中渗漏通道,所以本次计算以断层是否与高压隧洞相交并相互切割形成潜在渗漏通道为标准,结合探洞揭露的断层性质,选取关键断层。在模型中,考虑到断层存在影响带,将断层宽度适当取大,断层位置及模型有限元网格如图 1 和图 2 所示。

表 1 计算模型中的关键断层信息

编号	产状	宽度/m	性质	断层特征
f 721	N70—75W/ SW \angle 85°	0.50~2.00	压扭性	硅化碎裂岩、碎粉岩、糜棱岩,局部充填 0.5 cm~1.0 cm 石英脉,胶结一般—较好,弱—中等硅化,线状漏水, $Q = 2.0$ L/min~3.0 L/min。
f 717	N75W/ SW \angle 80°	0.15~0.25	张性	硅化碎裂岩,胶结一般—较好,影响带 0.5 m~1.0 m,线状漏水—股状涌水 $Q = 4.0$ L/min~5.0 L/min。
f 715	N85E/ SE \angle 85°	0.10~0.15	张性	硅化碎裂岩,裂隙性断层,轻度蚀变带 0.2 m~0.3 m,线状漏水, $Q = 1.0$ L/min。
f 708	N10W/NE \angle 70°~75°	0.20~0.60	张性	碎裂岩、角砾岩、糜棱岩夹断层泥,胶结一般,石英脉侵入,见多处线状、股状涌水, $Q = 15.0$ L/min~20.0 L/min。
f 745	N5—15E/ SE \angle 70°~80°	0.20~1.20	压性	碎裂岩、硅化岩,胶结一般,断带渗滴—线状流水, $Q = 0.4$ L/min~0.5 L/min。

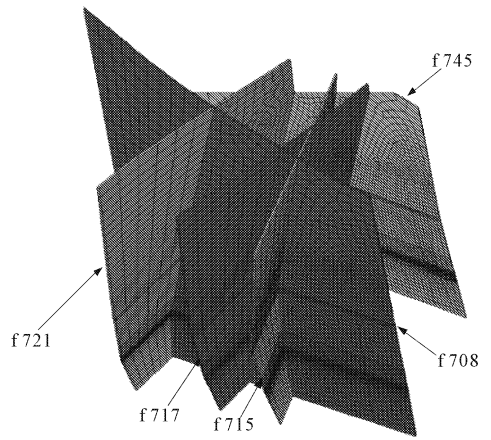


图 1 关键断层位置及网格剖分图

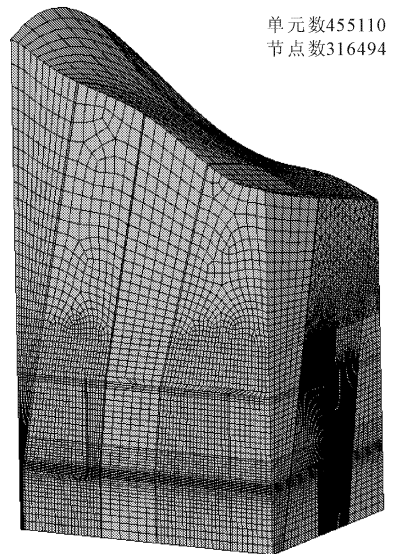


图 2 有限元模型网格剖分图

3.3 计算边界和计算参数

模型底部及侧边界为隔水边界,模型上下游为已知水头边界,上游水位根据长观孔水位观测值取 300 m,下游边界取值 -10 m,高压引水道钢筋混凝土衬砌段为定水头边界,水头值为上水库正常蓄水位时 773.7 m,钢衬段为隔水边界;排水廊道以及各洞室壁面均视为潜在溢出型边界,排水孔为定水头边界,其水头值为排水廊道高程 115 m。

模型参数主要是指各种介质的渗透系数,包括各类围岩(I类、II类、III类)、主要的断层和围岩灌浆圈等的渗透系数。各岩类及断层的渗透系数根据现场钻孔水压试验成果综合取值,如表 2 所示。

3.4 计算工况选择

本文选取工程运行期三个计算工况,针对高压隧洞不同防渗排水措施进行内水外渗渗流规律分

析,具体工况说明见表 3。

表 2 三维渗流计算参数 单位:cm/s

部位	层面法向渗透系数	层面切向渗透系数
I 类围岩(完整岩体)	1.26×10^{-6}	1.26×10^{-6}
II 类围岩(较完整岩体)	3.68×10^{-6}	3.68×10^{-6}
III 类围岩(裂隙岩体)	3.84×10^{-5}	3.84×10^{-5}
f 721、f 745 及其影响带	3.68×10^{-6}	2.00×10^{-4}
f 708、f 715、f 717 及其影响带	3.68×10^{-6}	5.00×10^{-4}
混凝土衬砌	8.60×10^{-6}	8.60×10^{-6}
高压固结灌浆圈 0~2 m	3.84×10^{-5}	3.84×10^{-5}
高压固结灌浆圈 2 m~6 m	3.68×10^{-6}	3.68×10^{-6}
防渗帷幕	5.00×10^{-6}	5.00×10^{-6}

表 3 运行期计算工况选择

工况编号	方案描述
工况 A	高压隧洞充水,高压隧洞不设固结灌浆,断层 f 721 不进行任何处理。
工况 B	高压隧洞充水,高压隧洞不设固结灌浆,断层 f 721 在穿过高压隧洞处进行 6 m 固结灌浆。
工况 C	高压隧洞充水,高压隧洞设 6 m 固结灌浆,断层 f 721 在穿过高压隧洞设深度为 6 m 固结灌浆。

3.5 计算结果及分析

为了便于比较,各工况均选取相同的断面进行渗流场分析,根据高压岔管的结构,选取三个典型断面分析高压岔管区内水外渗渗流场的规律,断面示意图见图 3。

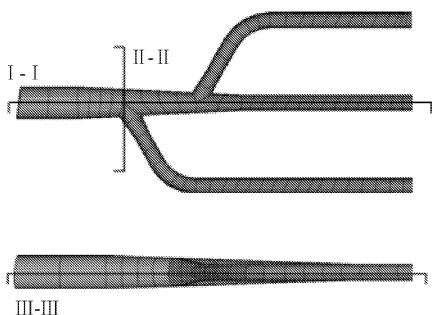


图 3 高压隧洞断面示意图

(1) 内水外渗渗流场分布规律分析

运行期工况 C I - I 断面压力水头等值线图如图 4 所示。工况 A、工况 B 规律与工况 C 总体相似,差别主要在局部。从图 4 中可以看出,高压隧洞周围压力水头等值线分布成密集的封闭圆环,越向内,水头越高,这都反映出隧洞内的高压水向围岩中渗透。各工况下,渗流自由面由上游向下游逐渐降低,自由面和压力水头等值线在排水廊道及排水孔

处急剧下降,上游排水廊道为渗流溢出点,表明排水廊道及排水孔排水降压效果显著。

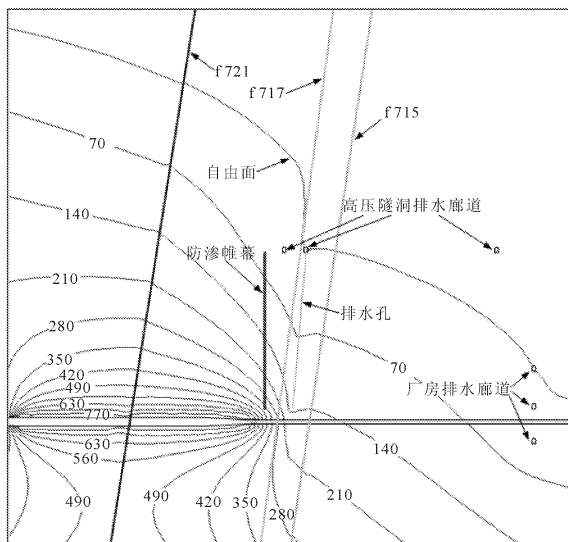


图 4 运行期工况 C I - I 断面压力水头等值线图

穿过高压隧洞的断层 f 721 在进行灌浆处理和不进行灌浆处理情况下压力水头分布规律差异显著,断层及其影响带渗透性强,在断层不进行灌浆处理情况下(工况 A),等水头线在断层部位向外凸,断层水压力值较周围岩体高,且压力水头线分布较为稀疏,表明断层是高压内水外渗的优势通道,会导致高压内水大量外渗。断层经过深度为 6 m 高压固结灌浆处理后(工况 B、工况 C),压力水头等值线在断层固结灌浆处分布密集,压力水头在断层内呈现向内凹的规律,表明固结灌浆起到了显著的防渗作用。

隧洞设置深度为 6 m 的高压固结灌浆后,灌浆圈外边缘水压力下降到 615 m 左右,比没有设置固结灌浆时略小,表明固结灌浆圈起到了一定的防渗降压作用,但高压隧洞区多为 I 类、II 类围岩,渗透性较低,固结灌浆对 I 类、II 类围岩提高防渗性能作用不显著。

(2) 内水外渗渗透坡降分布规律分析

运行期工况 C III - III 断面渗透坡降分布规律如图 5 所示。在各工况下,由于高压内水外渗的作用,渗透坡降从隧洞内壁向外逐渐降低,高压隧洞围岩及衬砌承受渗透坡降均较大。高压隧洞不设固结灌浆时,高压隧洞钢筋混凝土衬砌渗透坡降最大值为 52 左右,围岩最大渗透坡降达到 30.6。设置固结灌浆后钢筋混凝土衬砌渗透坡降下降到 46.7,围岩最大渗透坡降上升到 42.8,出现在洞周开挖损伤区。计算结果表明,高压固结灌浆对提高开挖损伤区防渗性能效果显著,衬砌和固结灌浆圈作为高压

隧洞防渗体系,能有效减小高压隧洞的内水外渗量。

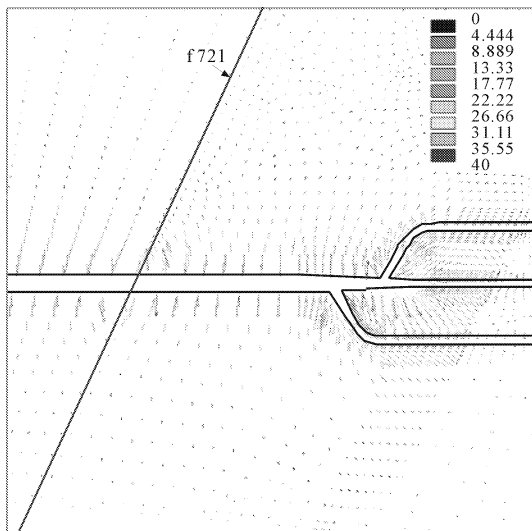


图 5 运行期工况 C III - III 断面渗透坡降矢量图

(3) 运行期各洞室渗漏流量分析

不同工况下各洞段的渗漏量见表 4(负值代表流出,正值代表流入)。高压隧洞与断层 f 721 不设高压固结灌浆时隧洞内水外渗量较大,达到了 40.47 L/s;只对断层设置 6 m 固结灌浆情况下,高压隧洞内水外渗量仍高达 37.41 L/s;在断层 f 721 和高压隧洞均设置固结灌浆的情况下,高压隧洞渗漏量显著减至 22.22 L/s。高压隧洞排水廊道及厂房排水廊道渗漏量均较小。

渗漏量计算结果表明,高压隧洞充水后内水外渗,高压隧洞不设置固结灌浆时,整个隧洞内水外渗量较大。断层是高压隧洞内水外渗的主要通道,仅对 f 721 断层设置固结灌浆后,高压隧洞内水外渗量减小了 7.5%。在断层和高压隧洞设置高压固结灌浆情况下,内水外渗量得到有效控制,因此隧洞和断层设置高压固结灌浆是十分必要的。

表 4 运行期不同工况下各洞室渗流量

计算 工况	渗流流量/(L·s ⁻¹)		
	高压隧洞 岔管段	高压隧洞 排水廊道	厂房排水 廊道
工况 A	-40.47	17.17	4.02
工况 B	-37.41	15.19	3.84
工况 C	-22.22	10.44	3.73

4 主要结构面稳定性研究

依据高压隧洞工程地质及水文地质条件勘探资料,高压隧洞区断层对渗流场的影响不可忽略,尤其是穿过高压隧洞钢筋混凝土衬砌段的断层 f 721 宽

度大,探洞开挖时发生线状涌水;与断层 f 721 相交并延伸至下游厂房的断层 f 708 出水量大,为张性断层,这些复杂的地质构造,对高压隧洞和地下厂房的正常运行可能会产生较大影响。根据计算结果,对高压隧洞区关键断层进行稳定性评价,为隧洞与厂房安全施工和正常运行提供理论依据。

(1) f 721 断层

f 721 是穿过高压隧洞钢筋混凝土衬砌段的 II 级结构面,为压扭性断层。受高压隧洞内水外渗的影响,穿过高压隧洞的断层 f 721 渗透坡降沿洞周向外逐渐减小,渗透坡降较大的地方集中在洞周围岩,其余位置渗透坡降均较小。

工况 C 断层面水力梯度分布如图 6 所示。不进行固结灌浆时,断层 f 721 渗透坡降最大达到了 22,方向沿断层面切向,出现在洞壁围岩,在高压水内水外渗长期作用下极有可能发生渗透破坏而形成集中渗漏通道,导致高压隧洞内水大量外渗。设置固结灌浆后,最大渗透坡降降到 11 左右,出现在固结灌浆圈外边缘,其余位置均不超过 8,在排水廊道高程,f 721 断层面渗透坡降只有 0.5。因此,在确保固结灌浆质量的情况下,断层在设置 6 m 固结灌浆时,可以满足渗透稳定性要求。

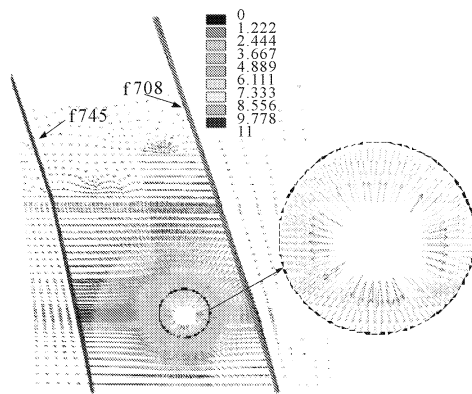


图 6 运行期工况 C f 721 断层面渗透坡降矢量图

(2) f 708 断层

f 708 是与断层 f 721 相交并延伸至下游厂房的 III 级结构面,为张性断层。在各工况下,断层 f 708 渗透坡降变化不大,最大值为 11,出现在断层与帷幕相交处。工况 C 断层面水力梯度分布如图 7 所示。从图 7 可以看到,断层 f 708 与排水廊道相交处渗透坡降较大,达到 8.6,此处作为地下水的排泄位置,发生渗透破坏的可能性较大,需重点进行固结灌浆处理。其余位置渗透坡降均在 3 以下,发生渗透破坏的可能性较小。

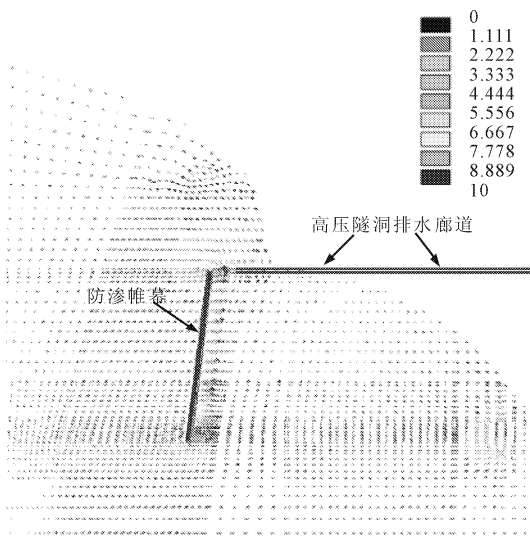


图7 运行期工况 C f 708 断面渗透坡降矢量图

5 结语

(1) 阳江抽水蓄能电站高压混凝土岔管静水压力 799 m, 水头超过了国内所有已建和在建的混凝土岔管。在满足最小覆盖厚度准则和最小地应力准则的前提下, 高压隧洞的整体稳定是有保障的, 应重点关注在高水头作用下内外水外渗引起的渗漏和渗透稳定问题。

(2) 电站充水运行情况下, 高压隧洞不设置固结灌浆时, 内外水外渗量较大, 隧洞及断层设置 6 m 深度固结灌浆时, 内外水外渗量得到有效控制, 钢衬外水压力在排水孔处下降将至 200 m, 避免了钢衬因外水压力过大而发生破坏。高压固结灌浆、防渗帷幕和排水系统等防渗排水措施设计合理, 效果显著。

(3) 断层 f 721 不作处理时, 渗透坡降很大, 此时内外水外渗量也很大, 设置 6 m 固结灌浆后, 渗透坡降大大降低, 只有局部位置达到 11, 因此在保证固结灌浆质量的前提下, f 721 断层进行 6 m 固结灌浆可以满足渗透稳定性要求。

(4) 断层 f 708 在各工况下渗透坡降很小, 发生渗透破坏的可能性较小。但在断层 f 708 与排水廊道相交处渗透坡降较大, 此处作为地下水的排泄位置, 发生渗透破坏的可能性较大, 需重点进行固结灌浆处理, 避免断层泥从排水廊道壁面流失而产生的渗透破坏。

(5) 本文结合阳江抽水蓄能电站工程地质条

件, 通过高压隧洞内水外渗三维有限元分析与渗透稳定性的研究, 得出了一系列有意义的结论和有价值的工程建议, 使得处理措施更具针对性。

参考文献:

- [1] 莫家荣. 挪威上抬理论在桂林天湖水电站中的应用[J]. 广西水利水电, 1992(2): 25-32.
- [2] 叶冀升. 广蓄电站水工高压隧洞设计施工的若干问题[J]. 水力发电学报, 1998, 17(2): 38-49.
- [3] 侯靖. 水工高压隧洞结构设计探讨[J]. 华东水电技术, 2000(4): 24-29.
- [4] 侯靖, 胡敏云. 水工高压隧洞结构设计中若干问题的讨论[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 36-40.
- [5] 侯靖. 天荒坪抽水蓄能电站高压隧洞充水试验实测资料分析[J]. 水利水电科学进展, 2009(29): 27-31.
- [6] Marwa EMM. Geotechnical considerations in an unlined high pressure tunnel at Lower Kihansi in Tanzania[J]. Bull Eng Geol Env, 2004, 63: 51-55.
- [7] 杨林德, 丁文其. 渗水高压引水隧洞衬砌的设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997(16): 112-117.
- [8] 卢兆康. 高压透水衬砌隧洞的边界元与有限元分析[J]. 人民珠江, 1998(3): 23-27.
- [9] 苏凯, 伍鹤皋, 韩前龙. 高压透水隧洞工作机理探讨[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 61-64.
- [10] 张巍, 黄立财. 基于渗流场与应力场耦合的高压隧洞设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(2): 41-44.
- [11] 张巍, 黄立财, 陈世玉. 高压钢筋混凝土隧洞透水衬砌设计理论的进一步研究[J]. 广东水利水电, 2008(9): 1-4.
- [12] 杜小凯, 任青文, 陈伟. 有压引水隧洞内水外渗作用研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(5): 63-68.
- [13] 张春生. 混凝土衬砌高压水道的设计准则与岩体高压渗透试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1305-1311.
- [14] 李新星, 蔡永昌, 庄晓莹, 等. 高压引水隧洞衬砌的透水设计研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1403-1408.
- [15] 苏凯, 伍鹤皋. 水工隧洞内水外渗耦合分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1147-1152.
- [16] 张继勋, 盛亮, 任旭华, 等. 深埋隧洞渗流与应力耦合分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2012, 34(4): 20-23.
- [17] 陈益峰, 周创兵, 郑宏. 含复杂渗控结构渗流问题数值模拟的 SVA 方法[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 89-95.