高压引水隧洞渗流场与应力场的耦合分析

李新星，蔡永昌，朱合华，夏才初

（同济大学地下建筑与工程系，上海 200092）

摘　要：采用等效连续介质模型，按照透水衬砌理论，对瀑布沟水电站高压引水隧洞在不同连续工况下进行了渗流场和应力场的直接耦合分析，探讨了引水隧洞衬砌结构在稳定渗流情况下应力场和位移场的分布情况，并按照限裂设计对衬砌进行了配筋计算。结果表明，对高压管群采用此法进行有限元计算，可大大节省配筋量。

关键词：等效连续介质模型；透水衬砌；高压引水隧洞；耦合分析；限裂设计

作者简介：李新星(1978－)，女，博士研究生，主要从事隧道及地下建筑工程和地下空间数字化工程研究工作。

0　引　　言

瀑布沟水电站工程系大渡河中游的一个大型水电站，装机总容量3300 MW，总库容约53.9亿m^3，水库正常水位850.0 m，机组安装高程661.0 m。该水电站的引水系统是由电站进水口和引水隧洞组成，电站进水口布置于左岸坝肩上游270 m处的岸坡。引水隧洞共6条，洞径为9.5 m，隧洞中心距28.86 m，隧洞中心线方位角为N81°E，长度约398.73～533.69 m，有65%处于Ⅰ、Ⅱ类围岩之中，28%处于Ⅲ围岩之中，7%处于Ⅳ围岩之中。隧洞布置段围岩质量较好，岩体中无大的断层分布。6条引水隧洞上平段、斜井段和下平段部分段采用钢筋混凝土衬砌，下平段末端最大内水压力2.36 MPa。

在对衬砌结构进行配筋计算时，传统的结构力学法是将水压力以面力的形式作用在衬砌上，此时的结构配筋是随着水压力的加大而大幅增加[1-2]。如果按照透水衬砌理论的公式法计算，即考虑变形协调，要求隧洞埋深满足挪威准则，且在地质围岩较差段的外水满足渗流稳定，同时要求对隧洞围岩进行全断面的高压灌浆，并在计算中计入30%的有效预应力作用在混凝土衬砌上。目前采用透水衬砌理论设计的几个工程的高压管道都是独立埋管，而瀑布沟工程为高压管道群，隧洞净间距约为20 m，在《水工隧洞设计规范》(DL/T5195—2004)中要求，对高压隧洞和在平行布置多条隧洞时，宜采用有限元法进行衬砌计算。

因此，本文针对瀑布沟水电站引水隧洞，考虑隧洞开挖过程的影响以及水库蓄水和隧洞充水时渗流场与应力场的耦合作用，建立了平面有限元等效连续介质耦合模型，分析了隧洞衬砌在不同计算条件下应力场和位移场的变化，并对结构进行配筋，其结果对指导设计具有十分重要的意义。

1　耦合分析方法

当分析裂隙岩石的渗流问题时，将岩石中的裂隙水流按流量等效原则抽象为等效连续介质考虑时，实际流速比达西流速要大若干个量级；对于恒定渗流问题，与时间无关，对单一介质或由多种介质组成的非均匀介质，只要各介质渗透系数相对值正确，实际流速与达西流速无论差别有多大，都不会对用水头表示的渗流场计算结果有任何影响，而只对渗流量有影响；因此可以用等效连续介质模型分析恒定渗流问题[1]。

采用等效连续介质模型进行渗流场和应力场的耦合分析时，分为两种情况：①介质的渗透系数为常量，与应力环境无关；②介质的渗透系数是应力环境的函数。孔隙介质在荷载作用下要发生变形，当荷载不是太大，孔隙的变形相对较小，不会对其渗透系数有明显影响时，对于工程问题，可将孔隙介质作为常量处理。随着时间的增长，介质内的水逐渐排走，孔隙压力逐渐消散，有效应力随之变化，表明渗流场与应力场的相互作用。对于平面问题，基本方程如下：

以位移和孔隙压力表示的平衡微分方程为

$$\begin{cases} -G\nabla^2 w_x+\dfrac{G}{1-2\mu}\cdot\dfrac{\partial}{\partial x}\varepsilon_v+\dfrac{\partial u}{\partial x}=0, \\ -G\nabla^2 w_z+\dfrac{G}{1-2\mu}\cdot\dfrac{\partial}{\partial z}\varepsilon_v+\dfrac{\partial u}{\partial z}=-\gamma, \end{cases} \tag{1}$$

式中　G和μ分别为剪切模量和泊松比，u为孔隙压力，γ为容重，w为位移，ε_v为体应变，∇^2为拉普拉斯算子。

根据变形协调条件，体积变形的速率为单位时间流入单位体积的净流量，并引入达西定律，得到连续性方程为

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}+\frac{K}{\gamma_w}\nabla^2 u=0 \quad , \tag{2}$$

式中　K为x和z方向的渗透系数，γ_w为水的容重。

联立（1）和（2），即组成应力场和渗流场耦合分析的基本方程，即著名的比奥（Biot）方程[3-4]，其有限元方程表示为

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K'^{\mathrm{T}} & \tilde{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ S \end{Bmatrix} \quad , \tag{3}$$

其中　$[\bar{K}]$为刚度矩阵，$[K']$为结点孔隙压力对应的结点力，$[\tilde{K}]$为结点孔隙压力差产生的水力坡降引起边界排出

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的水量，$\{\delta\}$和$\{\beta\}$分别为结点位移和超静孔隙压力。

上式右端$\{R\}$是各结点的外荷载，在固结过程中若荷载变化，则只要在相应时刻增加$\{R\}$即可；$\{S\}$为前一时刻各结点的体积压缩量，由式子（4）求得

$$\{S\}=[K']^{\mathrm{T}}\{\delta_{t-\Delta t}\} \quad 。 \tag{4}$$

在求解时，从$t=0$开始，每次增加一个Δt，用（3）式解得$\{\delta\}$和$\{\beta\}$，并求出$\{S\}$，用于解下一时刻。如此反复至任意时刻，同时由$\{\delta\}$又可解出应力和应变的分布。

这种方法将渗流场与应力场直接耦合求解，渗透系数为常量，无需进行渗流场和应力场反复迭代，只要按时间过程连续求解即可得到全部结果，且每一时间步内不存在收敛问题。

本文研究的重点是在稳定渗流情况下的隧洞衬砌，根据上述内容，因此将岩石等效为连续介质来模拟，不考虑介质渗透系数与应力环境的关系，采用渗流场和应力场的直接耦合方式进行隧洞在不同工况下的耦合计算分析。

2 隧洞渗流场与应力场的耦合分析

2.1 计算模型与边界条件

计算剖面取引水隧洞上平段末端的截面，方位为N81°E，X轴恒为0，Y轴为剖面走向，向右为正，范围取为左右边界到隧洞边缘的距离大于5倍的洞径，Z轴铅直向上为正，上边界取至地表面，下边界至开挖洞底的距离约为110 m。网格剖分采用四边形八节点等参单元，共1171个单元，4872个结点。坐标与模型简图如图1所示。

应力分析的边界条件为左右两侧和底面采用法向位移约束，渗流分析的边界条件为左右两侧和底面均为不透水边界。岩体假定为均质各向同性材料，衬砌为C20的混凝土材料，计算参数的取值见表1。

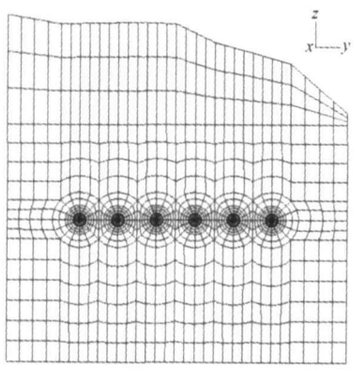

图1 计算模型示意图

2.2 荷载及计算工况

鉴于高压引水隧洞衬砌结构的主要荷载为水荷载，在考虑了隧洞开挖的影响作用时，以Ⅳ类围岩为例，取在隧洞开挖后围岩应力释放70%后施作衬砌，同时考虑0.3 MPa的固结灌浆压力。上平段末端的内水头取为108 m。在隧洞开挖后求得的二次应力场的基础上作渗流计算时，主要荷载包括岩体自重，内水压力和岩体内的孔隙压力。

表1 计算力学参数表

材料名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 ρ/(kg·m^{-3})	渗透系数 k/(m·s^{-1})
Ⅱ类围岩	20	0.22	2840	2.91×10^{-8}
Ⅲ类围岩	12.0	0.25	2750	2.91×10^{-7}
Ⅳ类围岩	3	0.30	2500	2.91×10^{-6}
C20混凝土	25.5	0.167	2400	2.91×10^{-10}

施工工况通常不起控制作用，故分析中重点对高压引水隧洞的满水运营工况、间隔放空工况和全部放空工况这三种情况进行分析，所有计算工况都为一个连续的过程。

(1) 满水运营工况：水库蓄水以及隧洞满水，计算条件为施工完毕后得到的二次应力场＋隧洞内水压＋岩体自重＋孔隙压力。

(2) 间隔放空工况：1、3、5隧洞满水，2、4、6隧洞放空（从左向右排序），计算条件为满水运营工况得到的应力场＋1、3、5隧洞内水压＋岩体自重＋孔隙压力。

(3) 全部放空工况：隧洞全部放空，计算条件为间隔放空工况得到的应力场＋岩体自重＋孔隙压力。

2.3 计算结果与分析

以1号和2号隧洞为研究对象，得到在不同工况下的主应力值，见表2。结果表明，在施工结束后衬砌在拱顶和拱底局部产生了拉应力，其他区域主要是以压应力为主；在满水运营工况下，由于隧洞内承受了很大的内水压，衬砌结构的拉应力值以及出现的区域明显增大，压应力明显减小；在间隔放空状态下，由于间隔隧洞放空，使满水隧洞周边的压力减小，致使满水隧洞（如1洞）所受拉应力继续增大，而放空隧洞（如2洞）所受压应力明显增大，拉应力明显减小，两者与施工结束后的值相当；在全部放空状态下，衬砌由于渗透压力反向作用，所受压应力增大，拉应力减小，所处状态与施工结束后类似。

通过对衬砌结构的内力值和位移值进行分析，其结果与应力的变化规律一致。在整个过程中，有两处出现极值的情况，也是最为危险的部位，一是在间隔放空状态下1号满水隧洞的拱顶出现了最大的拉应力，二是在全部放空状态下2号隧洞左拱腰处出现了最大的压应力，见图2和图3。由此可得出，在满水状态下渗流作用使围岩和衬砌受拉，削弱了部分围岩压力，整体有利于衬砌的稳定；间隔放空状态下，在满水隧洞拱顶与拱底会出现较大的拉力，可能会使混凝土开裂，此状态是极为不利的；在全部放空状态下渗流作用使围岩和衬砌承受了附加的压力，因此也不利于围岩和衬砌的稳定。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 不同工况下的应力结果比较

工况		最大主应力/MPa				最小主应力/MPa			
		最大值		最小值		最大值		最小值	
施工结束	#1	0.45	拱底	-1.62	右拱腰	-1.68	拱顶	-13.39	左拱腰
	#2	0.45	拱底	-1.63	左拱腰	-1.92	拱底	-13.41	左拱腰
隧洞满水	#1	2.52	拱顶	-1.87	左拱腰	0.19	拱底	-8.92	左拱腰
	#2	2.20	拱底	-1.89	左拱腰	0.18	拱底	-8.69	左拱腰
间隔放空	#1(满)	2.67	拱顶	-1.88	左拱腰	0.21	拱底	-9.07	左拱腰
	#2(空)	0.45	拱底	-1.63	左拱腰	-2.20	拱底	-13.16	左拱腰
全部放空	#1	0.45	拱底	-1.62	右拱腰	-1.69	拱顶	-13.46	左拱腰
	#2	0.45	拱底	-1.64	左拱腰	-1.93	拱底	-13.48	左拱腰

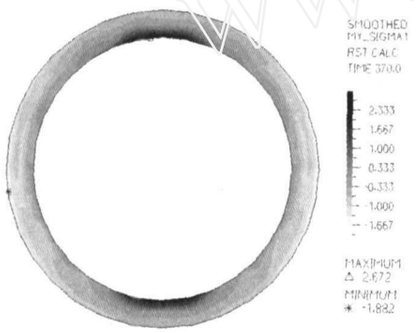

图 2 间隔放空状态下#1 隧洞的最大主应力

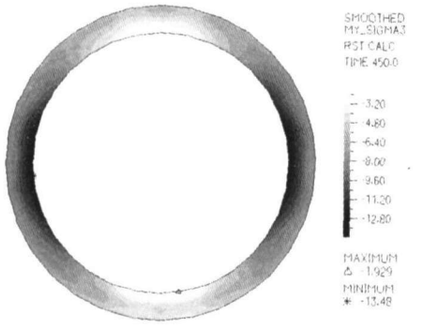

图 3 全部放空状态下#2 隧洞的最小主应力

2.4 配筋量确定

围岩与衬砌之间由于固结灌浆的作用使两者紧贴，在内水压力的作用下，如果衬砌开裂，则裂缝宽度不可能按地面结构构件的规律持续扩展，当结构钢筋处于弹性状态，结构仍可保持稳定[5]。按照限裂设计的原则，裂缝宽度要求在 0.2～0.3 mm，叶冀[6]建议将裂缝宽度放宽到 0.3～0.5 mm，可以大幅度削减限裂配筋数量。对于本文而言，对裂缝宽度进行验算是小于 0.3 mm 的，根据内力值进行配筋计算，得出了Ⅳ类围岩衬砌结构的配筋量为每延米内外层配置单层钢筋 6Φ32。而采用传统的结构力学方法进行计算，并考虑 0.5 倍外水压力的折减系数，在相同内水头作用下得出的配筋结果为内层配置双层钢筋 11Φ32，外层配置单层钢筋 7Φ32。由此得出，利用透水衬砌理论对高压管群的衬砌进行有限元计算，所得出的配筋量明显比用结构力学方法得到的结果减少很多，这将会大大节省钢筋用量。

3 结　　语

本文采用等效连续介质模型，对瀑布沟水电站高压引水隧洞在不同工况下进行了渗流场和应力场的直接耦合分析，探讨了引水隧洞衬砌结构在稳定渗流情况下相应不同计算条件的应力场和位移场的分布情况，并按照限裂设计对衬砌进行了配筋计算。

结果表明，满水状态整体有利于衬砌的稳定，间隔放空和全部放空是比较危险的工况，有可能使混凝土衬砌开裂和使围岩和衬砌承受过大的压力，从而不利于围岩和衬砌的稳定。因此，在充水和放水过程中，为使围岩和衬砌有个渐进缓慢的受力变化过程，应选择合理的速度加以控制。

与相对保守的结构力学计算方法相比，采用透水衬砌理论对高压管群的衬砌进行有限元计算显得更接近实际，由此得出的配筋量也较大程度的减少，不仅会给本工程带来较大的经济效益，而且对今后开展有关工程理论与设计的研究具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[2] 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.

[3] 沈振中，徐志英，雒　翠. 三峡大坝坝基粘弹性应力场与渗流场耦合分析[J]. 工程力学，2002，**17**(1)：105－113.

[4] 钱家欢，殷宗泽. 土工原理与计算（第二版）[M]. 北京：中国水利水电出版社，1996.

[5] 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**(2)：112－117.

[6] 叶　冀. 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(2)：38－49.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net