

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.05-04

水封洞库群围岩水位变化特性研究

喻 麒

(江西省南昌县象湖联圩管理站, 江西 南昌, 330200)

摘 要:以某水封石油洞库群地质条件为例,建立平面有限元数值模型,基于饱和非饱和非恒定流数值理论,研究渗透系数、初始地下水位及降雨补给对洞库群围岩水位影响的变化特性. 研究表明:(1)围岩渗透系数越小,地下水位下降越不明显,对水封条件的形成越有利;对于渗透性较大的岩体,初始水位的提高对水封条件的形成作用不大;(2)围岩渗透系数越小,洞周围岩水力梯度越大,两侧洞库围岩水力梯度整体上比中间洞库更大,初始水位的提高对围岩水力梯度的影响不大;(3)受开挖施工排水影响,洞库围岩水位降低较快,降雨补给并不能对地下水位造成明显影响,但形成的悬挂饱和区对油气的逃逸依然有一定的阻滞作用.

关键词:水封洞库;非恒定渗流;渗透系数;水位变化;数值分析

中图分类号:TU31 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2019)05-0329-06

0 引 言

水封地下储油洞库通过人为地控制洞室周围岩体中的地下水使之稳定地流向洞室,从而阻止洞库中贮存的油气向外迁移流动,其基本原理是利用地下水压力比洞内流体介质压力大,地下水向洞内渗透以实现水封洞内流体介质^[1-4].地下水封洞库能够储油的关键是洞库周围需要有稳定的地下水位,正确认识洞库围岩地下水位存在形态是建设水封洞库重要问题之一^[5-7].国内外学者针对水封石油洞库围岩岩体中的地下水形态进行了重要的探索.T. Kim^[8]等根据实测数据,研究了洞库围岩渗流场的影响因素,认为围岩渗流场的形成与油气压力有很大关系;李术才等^[9]结合现场试验数据,采用数值模拟方法预测了地下水位的变化;王者超等^[10]通过国内首个地下水封洞库石油工程研究了围岩水幕形成的影响因素,认为洞库区的垂直水力梯度是判断洞库水封性的重要参数.目前,由于试验成本较大且工期较长等原因,实测数据仍然较少,而数值分析方

法因能够考虑复杂模型且计算相对简便成为研究地下水封洞库围岩渗流场的重要手段.刘青勇等^[11]采用MODFLOW软件研究了山东某个水封石油洞库涌水引起地下水位下降的影响规律和地下水漏斗变化情况;梁斌等^[12]采用FEFLOW软件基于某地下水封油库地质情况分别建立了无水幕和有水幕条件下的三维数值模型,进而预测渗流场以及评价水封效果.为了简便计算,以上研究在对数值模型洞周边界处理上多采用定水头边界,如固定孔压边界等,实际上在洞库开挖施工中,洞周有可能因长期排水而疏干,围岩可能处于非饱和状态,对于洞周围岩饱和非饱和的相互转化过程在数值计算时应当予以考虑,这对地下水位的确定以及水幕系统的设定更为有利.

鉴于此,本文以某水封石油洞库群地质条件为依据,建立平面有限元数值模型,基于饱和非饱和非恒定流渗流理论,采用Van Genuchten渗透系数与饱和度关系模型将洞周设置为自由排水边界以考虑洞周疏干状态下的饱和非饱和转化过程,在此基础上,进一步研究不同渗透系数、初始地下水位及降雨补给对围岩水位

收稿日期:2019-06-25

作者简介:喻麒(1985-),男,大学本科,工程师.

变化和洞周水力梯度的影响,探讨水封洞库群围岩水位变化特性。研究成果可为水封洞库中水幕系统的设定提供参考。

1 饱和非饱和非恒定流基本理论

1.1 非恒定渗流基本方程

洞库开挖施工打破了围岩渗流场平衡,在洞壁与围岩之间形成水力梯度差,引发围岩孔隙(裂隙)水向洞内渗透,导致围岩水位降低形成“漏斗”形状,洞周疏干。开挖施工完成后,在洞库的后期运营中,为了达到对洞库储油的水封效果,在洞库周围的水幕注水孔进行注水,水位重新上升,洞周围岩水位变化实质为饱和和非饱和相互转换过程。对于围岩水位变化过程,可采用饱和非饱和非恒定流渗流理论^[13]进行分析。饱和非饱和非恒定流渗流本构关系采用达西定律,则非恒定流渗流偏微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + w = u_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: H 为岩体总水头; K_x 和 K_y 分别为在 x 向和 y 向的各向异性渗透系数; w 为汇源项; u_s 为储水率, t 为时间。为了实现饱和非饱和和渗流过程,将式(1)中 K_x 和 K_y 考虑为与饱和度有关的相关变量,以此表征岩体渗透过程饱和度的变化,即饱和非饱和和渗流过程。一般而言,饱和度与基质吸力有关,通过孔隙比的转化可以换算为岩体体积含水率与基质吸力的关系。对于体积含水率与基质吸力的关系存在诸多模型,如Van Genuchten(V-G模型)^[14]、Fredlund^[15]等。V-G模型是目前应用最广泛的数学模型,模型参数相对容易确定,本文在饱和非饱和计算分析中采用Van Genuchten模型对洞周围岩水位变化进行求解。V-G模型拟合公式为

$$h(\theta) = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{1-m} \quad (2)$$

$$K(h) = \frac{[1 - (\alpha h(\theta))^{n-1} [1 + (\alpha h(\theta))^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}} K_s \quad (3)$$

式中: $h(\theta)$ 为基质吸力; θ 为岩体体积含水率; θ_s 和 θ_r 分别为岩体饱和含水率和残余含水率; α 、 m 和 n 为非线性回归拟合系数,其中 $m=1-1/n$; K_s 为饱和渗透系数; $K(h)$ 为非饱和渗透系数。

1.2 饱和非饱和非稳定渗流相互转化的数值实现

本文采用平面有限元软件GeoStudio^[16]中的渗流模块对水封洞库群围岩饱和非饱和非恒定渗流过程进行求解。非恒定渗流有限元方程为

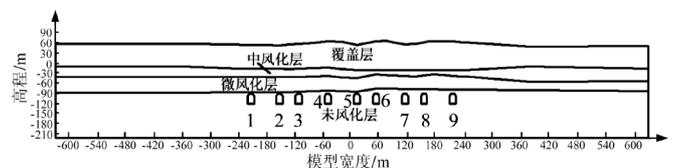
$$[K][H] + [M][H]_t = [Q] \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为单元特征矩阵; $[M]$ 为单元质量矩阵; $[Q]$ 为节点流量向量; t 为时间。为了实现洞库边界岩体饱和非饱和和渗流过程,该软件在求解时通过在洞周边界设置的自由排水边界,并基于V-G模型,根据每个时步岩体单元的含水率计算该时步的渗透系数,然后通过达西定律进而确定渗透量与水位变化。在洞室开挖后,随着洞周围岩含水率的逐渐降低,其渗透系数也逐渐减小,洞周围岩由饱和状态逐渐转化为非饱和状态。V-G模型拟合参数 α 表征介质的持水能力,一般岩土体取值0~1.0, α 越大则持水能力越强,本文洞库位于未风化层,岩体质密且相对完整,因此取值为1.0,其他拟合参数取值 $m=0.5$ 、 $n=2$ 。

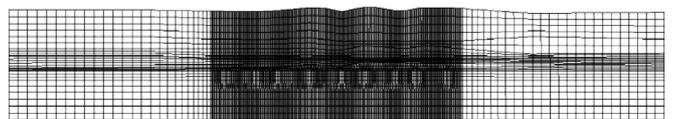
2 数值模型

2.1 计算模型

选取某已建洞库典型地质剖面建立数值模型进行分析,计算模型地层共由覆盖层、中风化层、微风化层及未风化层组成,见图1(a)。洞库群由9条洞库组成,单洞库高3000m,宽度20.00m;计算模型纵向宽度1280.00m,竖向边界距邻近洞库洞壁距离为420.00m,模型底部边界距洞库底板距离为100.00m。计算模型划分网格见图1(b),网格单元总计4536个,节点总计4742个,网格单元最大宽度14.80m,最小宽度0.94m。为了提高计算效率,同时兼顾计算精度,对洞库群区进行细化网格,对远离洞库的两侧边界区进行粗化网格处理。



(a) 计算模型地质剖面



(b) 计算模型网格

图1 计算模型

2.2 边界及初始条件

洞库区围岩开挖施工后,地下水水位可能迅速降低,导致围岩疏干,后期想再恢复到原来水位就比较困难,需要较长工期,影响工程效益,因而施工期水位变化对洞库工程后期的投入使用有着重要影响。由此,本文主要针对施工期洞库开挖条件下水位动态变化情况进行分析。参照国内外工程实践,一般洞室施工期在 2~3 年施工完成,本文计算最大时间取 3 年,重点研究 3 年后水位的变化特性。采用 9 条洞室同时开挖的方式进行渗流分析,以研究施工期最不利渗流工况。

计算模型两侧竖向边界概化为与初始水位等值的定水头边界;模型底部边界为不透水边界,洞库边墙及顶拱边界采用基于 Van Genuchten 非饱和模型的自由排水边界,洞库底板为透水边界,孔压固定为 0。渗流本构律为各项同性的达西定律。计算过程为:第一步,给定初始水位边界条件,进行初始渗流场计算;第二步,对 9 个洞库进行一次性同步开挖施工,同时对洞周边墙及拱顶边界施加基于 V-G 模型的自由排水边界,进行开挖渗流场计算。

2.3 计算方案

对于水封条件的形成,初始地下水水位、围岩渗透系数、降雨入渗补给及地表蒸发等因素对围岩地下水水位有不同程度的影响。本文选取初始地下水水位、围岩渗透系数及降雨入渗补给 3 个关键因素,建立不同计算方案开展数值计算分析。以拱顶到地下水位的距离分别为 50.00、70.00、100.00m 建立初始地下水水位敏感方案;为方便计算成果对比,结合该工程地质勘探成果,将整体围岩渗透系数按单一介质考虑,建立 4 种渗透系数方案,渗透系数分别为 1×10^{-2} 、 1×10^{-3} 、 1×10^{-4} 及 1×10^{-5} m/d,具体计算方案见表 1;另外,以工况 11 为基础,按照该工程所在区域的年平均降雨量 1 800mm 对计算模型地表施加流量边界条件,建立降雨入渗计算方案初步探讨降雨入渗补给对围岩水位动态变化的影响。

表 1 计算方案

初始地下 水位/m	渗透系数/(m/d)			
	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}
50.00	工况 11	工况 12	工况 13	工况 14
70.00	工况 21	工况 22	工况 23	工况 24
100.00	工况 31	工况 32	工况 33	工况 34

3 洞库群围岩水位变化特性

3.1 水位降幅分析

图 2 给出了初始地下水水位一定条件下,围岩不同渗透系数对水位影响的变化情况,图中线条为孔压等值线,其中粗线为地下水水位线。限于篇幅,仅以初始水位距拱顶距离为 50.00m 的工况进行分析。由图 2 可知,围岩渗透系数越小,在开挖施工 3 年以后的地下水水位下降越不明显。当围岩渗透系数为 1×10^{-2} m/d 时,洞库排水较快,围岩水位随距洞库区距离越近而越低,并且地下水水位线全部降落到洞库顶部高程以下,基本与底板持平;当渗透系数为 1×10^{-3} m/d 时,地下水水位线同样有较大的下降,洞库区水位线位于洞室边墙中部高程位置,仍不满足水封条件;当渗透系数为 1×10^{-4} m/d 时,围岩水位有所下降,但是不明显,洞库区仍有较大厚度的饱和区,对水封条件的形成比较有利;当渗透系数为 1×10^{-5} m/d 时,水位基本没有下降,一般而言,由于岩体中破碎层及断层或挤压带的存在,达到此种地质条件的岩体相对较少。由上可知,围岩渗透系数对地下水水位变化影响极大,为了保证洞库在施工期具有较好的水封条件,在工程选址时应尽量避免破碎层及断层等不利地质条件。

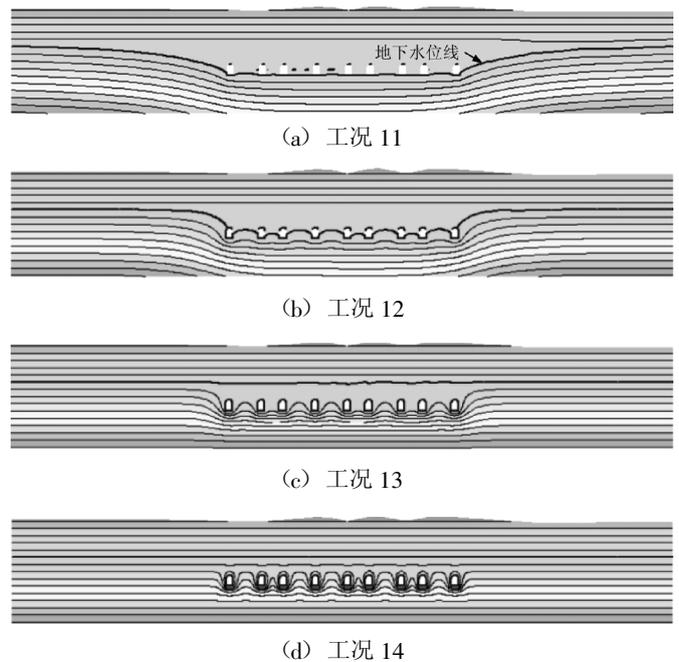


图 2 不同渗透系数影响对比

图3给出了围岩渗透系数在 $1 \times 10^{-3} \text{m/d}$ 时,不同初始地下水位对开挖后围岩地下水水位影响的变化情况。由图3可知,初始水位距拱顶50.00m和70.00m的情况下,洞库区上部岩体基本已被疏干,水位基本与洞室边墙中部位置持平,水封条件丧失。当初始水位与拱顶距离达到100.00m时,洞库区最低水位位于拱顶位置,水位线在各洞室拱顶位置相连,拱顶上部岩体不存在饱和区域。可见,在围岩渗透系数较大情况下,尽管初始水位较高,但仍无法形成有利水封条件。

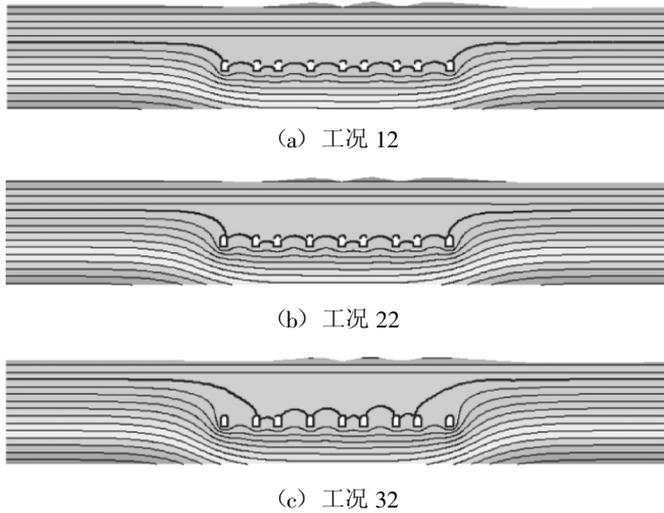


图3 不同初始地下水位对比

3.2 洞周水力梯度分析

图4给出了初始地下水位一定条件下,围岩不同渗透系数对第1号和5号洞库围岩铅直水力梯度影响的变化情况,图中左侧图为1号洞库,右侧图为5号洞库,其他洞库规律类似,不再赘述。由图4可知,当围岩渗透系数等于 $1 \times 10^{-3} \text{m/d}$ 时,洞库围岩水位基本处在洞室顶拱以下位置,造成顶拱水力梯度较小,底板位置较大;当渗透系数等于 $1 \times 10^{-4} \text{m/d}$ 时,水位线在洞库区以上,顶拱以上岩体有足够厚度的饱和区,因而孔压较大,铅直水力梯度也较大;当渗透系数等于 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/d}$ 时,在洞库施工期地下水位变化很小,洞壁与洞周岩体的孔压差异较大,导致水力梯度较大。综上可知,渗透系数越小,施工期地下水位下降越不明显,导致围岩水力梯度较大。值得注意的是:1号洞库围岩水力梯度整体上要比5号洞库大,这是因为1号洞库在库区最左侧,而5号洞库位于中间位置,相比1号洞库,5号洞库围岩水位下降更快。

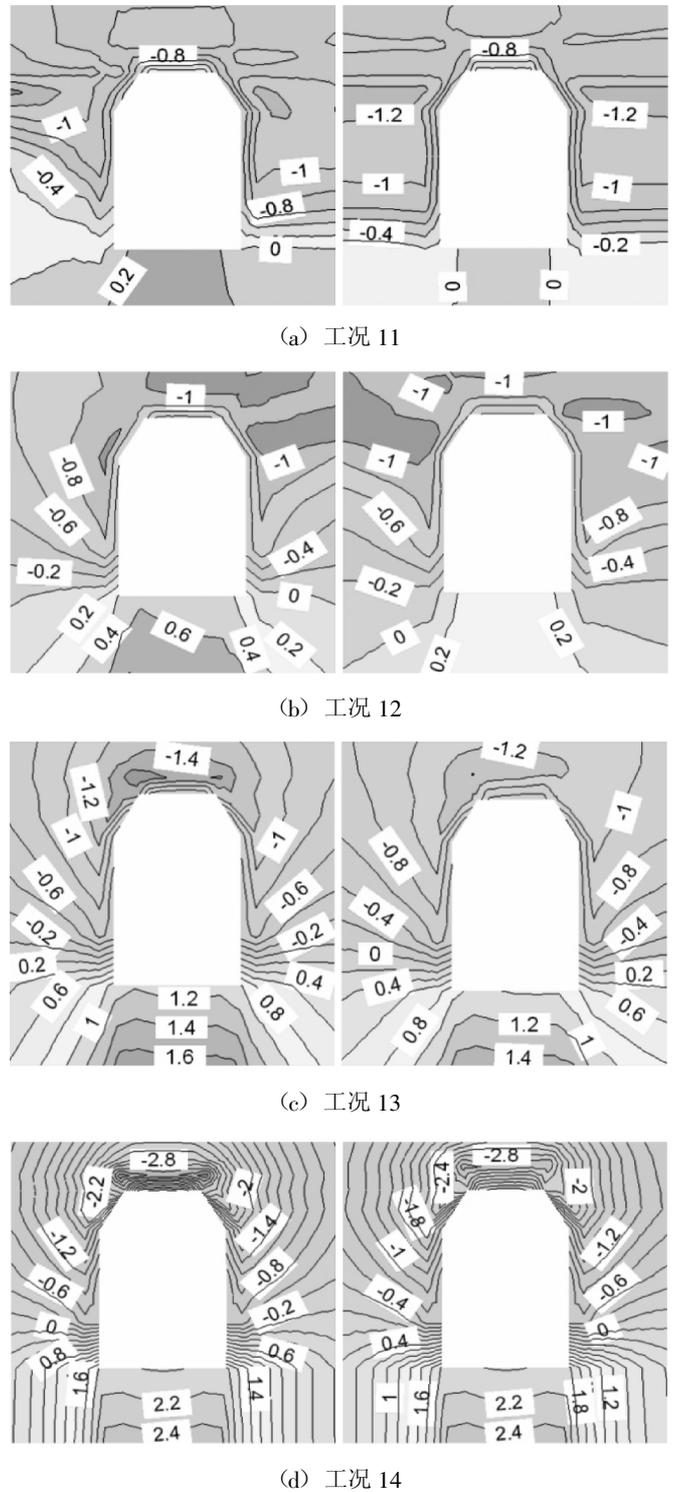


图4 不同渗透系数影响对比

图5给出了围岩渗透系数在 $1 \times 10^{-3} \text{m/d}$ 时,不同初始水位高程对施工期3年后洞库第1号和5号围岩铅直水力梯度影响的变化情况。由图5可知,由于围岩渗透系数相对较大,初始水位高程离顶拱距离从50m上

升到 100.00m 过程中,1 号洞库及 5 号洞库围岩水力梯度变化较小,对水封条件的形成不能达到明显效果。

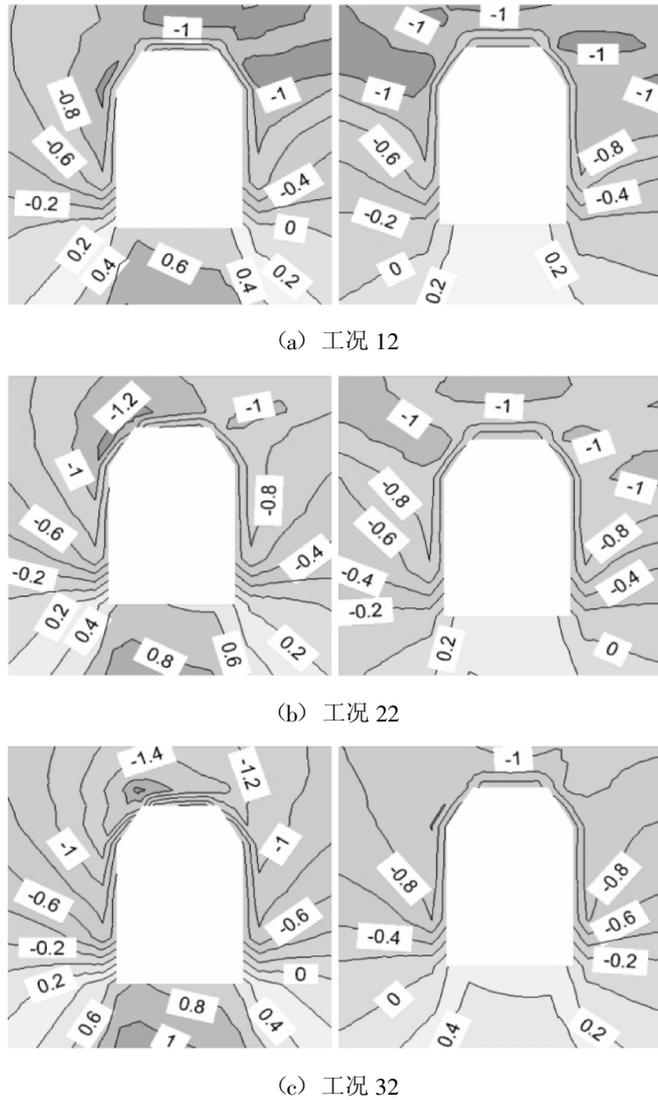


图 5 不同初始地下水位对比

3.3 降雨入渗对地下水位变化的影响

图 6 分别给出了在洞库开挖施工排水条件下,地表降雨入渗补给 150 天和 210 天后地下水位及孔隙水压力的变化情况。由图可知,降雨入渗补给 150 天后,洞库地表表层因降雨出现一定厚度的饱和层,但由于施工排水较快,降雨补给并未对水位线的下降造成明显影响。随着排水时间及降雨补给的增加,洞库区表层岩体逐渐出现一定厚度的悬挂饱和区,但该饱和区水位线并未与洞库区水位线连通,由此可见,降雨入渗补给对施工期地下水位变化的影响并不明显。

图 7 为地表无降雨入渗补给情况下洞库排水 150

天和 210 天的地下水位分布。对比有降雨入渗补给的地下水位(见图 6)可知,降雨入渗补给对洞库区施工期的地下水位分布影响不大,但能够形成悬挂饱和区,对油气的逃逸依然有一定的阻滞作用。

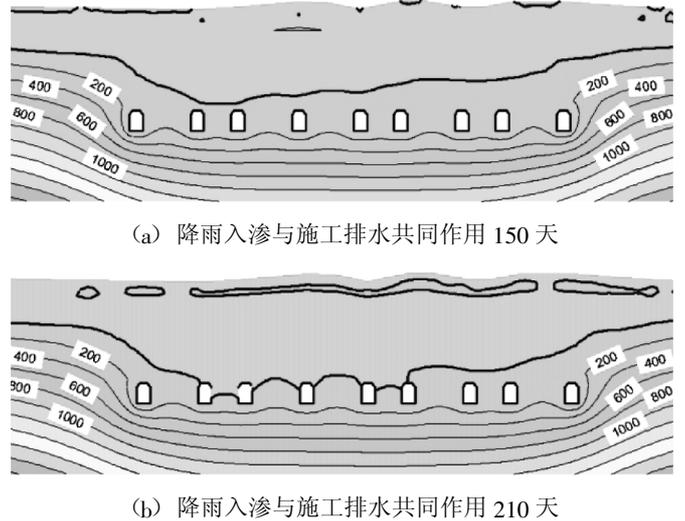


图 6 降雨入渗与施工排水共同作用

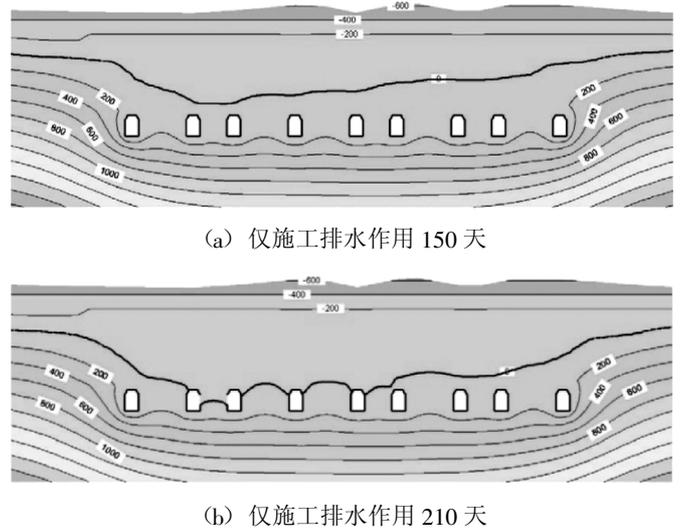


图 7 仅施工排水作用

4 结 论

以某水封石油洞库群地质条件为依据,建立平面有限元数值模型,基于饱和非饱和非恒定流数值理论,研究不同渗透系数、初始地下水位及降雨入渗补给对围岩水位变化和洞周水力梯度的影响,得到以下结论:

- (1) 围岩渗透系数越小,地下水位下降越不明显,

对水封条件的形成越有利。当渗透系数足够小时(小于 $1 \times 10^{-4} \text{m/d}$),围岩水位下降不明显,洞库区存有厚度较大的饱和区,对水封条件的形成比较有利;而对于渗透性较大的岩体,初始水位的提高对水封条件的形成作用不大。为了保证洞库在施工期具有较好的水封条件,在工程选址时应尽量选择岩体渗透系数较小的地质岩体中。

(2) 围岩渗透系数越小,洞周围岩水力梯度越大。两侧洞库洞周水力梯度整体上要比中间洞库更大;当围岩渗透系数较大时(大于 $1 \times 10^{-3} \text{m/d}$),初始水位的提高对围岩水力梯度的影响不大,对水封条件的形成也无法达到明显效果。

(3) 受开挖施工排水影响,洞库围岩水位降低较快,降雨补给并不能对地下水位造成明显影响,但能够形成悬挂饱和区,对油气的逃逸依然有一定的阻滞作用。

参考文献:

- [1] 杨明举,关宝树,钟新樵. 水封式地下储气洞库的应用及研究[J]. 地下空间,2000(03):171~175+237.
- [2] 段亚刚. 地下水封储油库的应用与发展 [J]. 山西建筑,2007(36):92~93.
- [3] 杨明举,关宝树. 地下水封储气洞库原理及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001(03):301~305.
- [4] 谭忠盛,万姜林,张振刚. 地下水封式液化石油气储藏洞库修建技术[J]. 土木工程学报,2006(06):88~93+99.
- [5] 彭振华,李俊彦,孙承志,等. 地下水封洞库的库址选择研究[J]. 油气储运,2008(01):60~63+5.
- [6] 刘琦,卢耀如,张凤娥. 地下水封储油库库址的水文地质工程地质问题[J]. 水文地质工程地质,2008(04):1~5.
- [7] 王梦恕,杨会军. 地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. 中国工程科学,2008(04):11~16+28.
- [8] KIM T,LEE K K,KO K S,et al. Groundwater Flow System Inferred From Hydraulic Stresses and Heads at and Underground LPG Storage Cavern Site [J]. Journal of Hydrology,2000,236(3~4):165~184.
- [9] 李术才,张立,马秀媛,等. 大型地下水封石油洞库渗流场时空演化特征研究[J]. 岩土力学,2013,34(07):1979~1986.
- [10] 王者超,李术才,薛翊国,等. 地下石油洞库水幕设计原则与连通性判断方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(02):276~286.
- [11] 刘青勇,万力,张保祥,等. 地下水封石油洞库对地下水的影响数值模拟分析 [J]. 水利水电科技进展,2009,29(02):61~65.
- [12] 梁斌,陈刚,胡成. 某地下水封石油洞库渗流场模拟研究及水封效果评价 [J]. 世界核地质科学,2018,35(03):180~186.
- [13] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
- [14] 陈卫金,程东会,陶伟. Van Genuchten 模型参数的物理意义[J]. 水文地质工程地质,2017(06):153~159.
- [15] Fredlund,Rahardjo D G / . Soil mechanics for unsaturated soils.[M]. Wiley,1993.
- [16] 陈浩,黄静,林锋. GeoStudio 软件在土坡饱和—非饱和渗流分析中的应用[J]. 四川建筑,2008(6):67~68.

编辑:张绍付

Study on water level variation characteristics of surrounding rock of water seal cavern group

YU Qi

(Nanchang County Xianghu Management Station of Jiangxi Province, Nanchang 330200, China)

Abstract: Taking the geological conditions of a water-sealed petroleum cavern group as an example, a 2D FEM model is established. Based on the saturated unsaturated non-constant flow numerical theory, the effects of permeability coefficient, initial groundwater level and rainfall recharge on the surrounding rock water level of the cavern group are studied. The results show that: (1) The smaller the permeability coefficient of surrounding rock, the less obvious the drop of groundwater level, and the more favorable the formation of water seal conditions; for the rock mass with higher permeability, the initial water level increase has little effect on the formation of water seal conditions. (2) The smaller

(下转第 375 页)