

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0474-07

基于流固耦合的围岩后注浆对大型水封 石油洞库水封性影响分析

张龙云^{1,2}, 张强勇¹, 李术才¹, 薛翊国¹, 王者超¹, 杨尚阳^{1,3}

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 山东大学 后勤保障部, 济南 250100; 3. 山东交通学院 数理系, 济南 250023)

摘 要: 基于多孔弹性连续介质流固耦合理论, 通过合理选取围岩主要物理力学参数, 建立了大型石油储备地下水封洞库全断面开挖后洞室涌水量计算模型, 利用大型商业软件 Comsol 对黄岛国家石油储备地下水封洞库地下水渗流场和位移场进行数值模拟分析。通过不同注浆方案及不同注浆厚度情况下地下水渗流量的比较分析发现, 并不是注浆圈的厚度越大对洞室渗水量的控制效果越好, 而是存在相对经济合理的阈值。研究表明, 最佳的注浆方式是形成全断面闭合注浆圈, 最佳注浆厚度为 5 m。

关 键 词: 水封石油洞库; 后注浆; 渗流场; 流固耦合

中图分类号: TE 822

文献标识码: A

Analysis of impact of surrounding rock post-grouting for large oil cavern on its water seal ability based on fluid-solid coupling

ZHANG Long-yun^{1,2}, ZHANG Qiang-yong¹, LI Shu-cai¹, XUE Yi-guo¹,
WANG Zhe-chao¹, YANG Shang-yang^{1,3}

(1. Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Department of Logistics Security, Shandong University, Jinan 250100, China; 3. Department of Physics and Mathematics, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China)

Abstract: By properly selecting the main physical and mechanical parameters of surrounding rock, a model for calculating water inflow of a large underground water seal oil cavern after the whole section excavation is established based on porous elastic continuum fluid-solid coupling theory. And the groundwater seepage field and displacement field of Huangdao oil storage underground water seal cavern are analyzed with numerical simulation. By the comparative analysis of different grouting mode and different thickness of grouting case, it is found that it is not a fact that the greater the thickness of grouting circle of cavern, the better control effect of the seepage flow. There is a relatively economic and reasonable threshold. The results show that the best way of post-grouting is to form a whole section closing grouting circle, and the best thickness of grouting is 5 meters.

Key words: water seal oil cavern; post-grouting; seepage field; fluid-solid coupling

1 引 言

地下水封石油洞库是在硬质岩中进行石油储备常用的一种方式, 由人工在地下岩体中开挖形成。这种地下水封洞库储存石油应具备密封和具有一定的强度 2 个条件, 以保证油品不渗、不漏、不挥发。油库密封是通过地下水往洞内渗透实现的, 地下洞库必须建在地下水位线以下以保证洞库周围的地下

水压力大于洞内储存介质的压力。Robert 等^[1]以 Zimbabwe 的非衬砌地下储油洞库为例, 总结了洞库设计建造过程中遇到的问题, 重点集中在水文地质和围岩稳定性方面。Lee 等^[2-3]以韩国的不衬砌地下石油储库为例, 详细分析了地下水封储库设计和建设过程中的各种问题, 主要分析了洞室掌子面推进和爆破对围岩应力和变形状态的动态影响。高翔等^[4]以人工水幕在不衬砌地下贮气洞室工程中的应

收稿日期: 2014-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41172268, 51279093); 国家重点基础研究发展计划(973 项目) (No. 2009CB724607)。

第一作者简介: 张龙云, 女, 1981 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程方面的学习与研究工作。E-mail: zhanglongyun@sdu.edu.cn

通讯作者: 张强勇, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: qiangyongz@sdu.edu.cn

用为例,分析了人工水幕的发展、基本原理、设计施工以及运行效果,总结了挪威人工水幕设计施工的经验,并提出了若干条保证水封条件的水幕设计准则。张振刚等^[5-6]介绍了水封式 LPG 地下储存的气密条件,对汕头 LPG 地下储库的丙烷储库做了渗流场三维分析,分析水幕作用及其对储洞周围渗流场的影响,论证了水封式 LPG 储库的有效性,为我国水封式地下 LPG 储库的设计、施工和理论的发展提供了依据。上述研究有力的促进了我国在硬质岩体中进行能源储存的理论和技术水平。

本文以我国首个在建的大型不衬砌地下水封石油储备库建设项目为背景,采用多孔弹性连续介质流固耦合理论,利用大型商业软件 Comsol 对特大型地下水封储油岩洞库全断面开挖后洞室涌水量进行了计算,并对黄岛国家石油储备地下水封洞库围岩地下水渗流场和位移场进行了分析,研究成果对实际工程有借鉴和指导作用。

2 工程背景

2.1 工程概况

国家石油储备黄岛地下水封洞库工程是目前国内首个正在实施的大型地下原油储备库建设项目。工程库址区属低山丘陵地貌。洞库山体近东西走向,山脊标高 280~350 m,地形坡度一般为 35°~55°。地面平均标高 220 m,最高点标高 350.9 m。储库洞室区呈北偏西方向展布,东西宽 600 m,南北长约 838 m。工程包括地下工程和地上辅助设施两部分,设计库容为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$,洞库设计使用年限为 50 年。地下储库由 9 个洞室组成。9 个洞室按南北偏西平行设置,每 3 个主洞室之间通过 4 条支洞相连组成一个罐体,共分为 3 个洞罐组。洞室设计底板面标高为 -50 m,长度为 500~600 m 不等,设计洞跨 20 m,洞高 30 m,截面形状为直墙圆拱形。洞室壁与相邻施工巷道壁之间设计间距为 25 m,两个洞室之间设计间距为 30 m。

2.2 水文地质条件

国家石油储备黄岛地下水封洞库工程建设场地位于青岛市经济技术开发区(黄岛),为华北暖温带季风型大陆气候,受海洋环境影响及调节,具有明显的海洋性气候特点,多年平均降水量介于 711.2~798.6 mm。库址区含水介质为晚元古界花岗岩片麻岩,主要的地下水存在类型为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。地下水以大气降水为主要补给来源,由于花岗岩裂隙发育,地形较陡,地面坡度大,使大气降水多以地表径流形式排泄,渗入量很小,补给

贫乏。

3 研究方法

3.1 网格模型与边界条件

由于洞库洞室长度(500~700 m)远大于洞室截面尺寸(20~30 m),可视为平面应变问题求解。模型分析范围为:洞室居中,水平方向 400 m,竖直方向 400 m,共划分 2 676 个三角形单元,为了更准确地计算洞库围岩周围渗流场和位移场,特在洞室周围进行网格加密,洞库平面应变模型和网格划分见图 1。

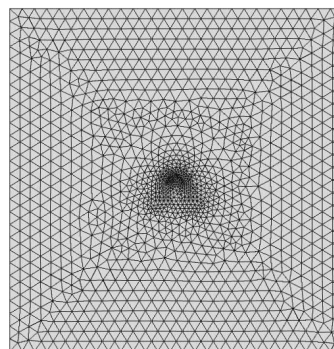


图 1 洞库平面应变模型网格

Fig.1 The mesh of cavern plane-strain model

分析中固体相边界条件:模型左右侧边界横向位移为 0,下方边界横向和纵向位移均为 0,地表为自由位移边界,洞室开挖后洞壁为自由位移边界条件。流体相边界条件:左右侧和下方边界为压力边界条件,允许地下水自由出入边界面;上方为 0 流量边界;洞室开挖完毕后洞壁孔隙水压力为 0。

平面应变分析共开展洞室底板不注浆和注浆两类的分析,具体工况见表 1。

表 1 注浆工况
Table 1 Grouting condition

工况	注浆部位	注浆范围/m
1	拱顶和边墙	0
2	拱顶和边墙	5
3	拱顶和边墙	10
4	拱顶和边墙	15
5	全断面	5
6	全断面	10
7	全断面	15

3.2 围岩主要物理力学参数

洞库围岩主要为完整性较好的花岗岩,故采用弹性本构模型描述洞库岩体的力学性质,弹性通过岩体的弹性模量和泊松比定义。考虑到尺寸效应,

参考相关研究成果, 围岩主要物理力学参数: 岩体弹性模量为 21 GPa, 泊松比为 0.22, 密度为 2 700 kg/m³, 渗透系数为 8.65×10^{-5} m/d, 孔隙率为 0.03, 比奥系数取 0.7。水的黏度取为 1×10^{-3} Pa·s, 密度为 1 000 kg/m³。注浆之后洞库围岩弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.2, 密度为 2 600 kg/m³, 根据相关文献资料^[7-9], 注浆范围内岩体渗透系数取为 8.65×10^{-6} m/d。

3.3 初始条件

在岩体自重作用和初始水压作用下建立模型, 分析初始条件下的孔隙水压力场变化情况, 由图 2 可见, 初始条件下岩体孔隙水压力场随埋深线性增加。

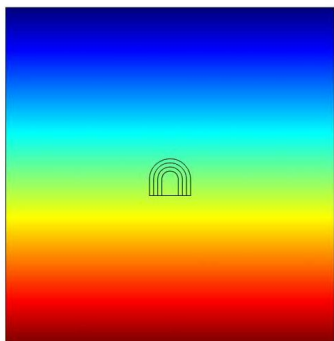


图 2 岩体初始孔隙水压力分布

Fig.2 Pore water pressure of rock in initial condition

3.4 初始条件下涌水量计算结果

通过图 3(a)和图 3(b)的对比发现, 洞室开挖后竖直方向位移等值线出现了明显的漏斗形状, 洞室正上方的位移与处于同一高程其他位置的位移明显偏大, 开挖后拱顶最大位移为 7 mm, 与实际情况相符。根据计算结果可以确定洞室单位长度涌水速率为 0.033 m³/d。

在水动力学中, 地下工程最大涌水量和正常涌水量常采用大岛洋志和佐藤邦明经验公式分别进行估算。大岛洋志公式为

$$q_0 = \frac{2\pi k(H - r_0)m}{\ln(4(H - r_0)/d)} \quad (1)$$

式中: q_0 为洞身通过含水体的单位长度可能最大涌水量; k 为渗透系数; H 为含水层中原始静止水位至地下工程底板距离; r_0 为洞室横截面等效圆半径; m 为转换系数, 一般取 0.86; d 为洞室横断面等效圆直径。该洞库相关参数: k 为 8.65×10^{-5} m/d, H 取平均值, 为 230 m, r_0 为 26.6 m, d 为 53.2 m。将各参数代入大岛洋志公式计算得单位长度最大涌水量为 0.034 m³/d。

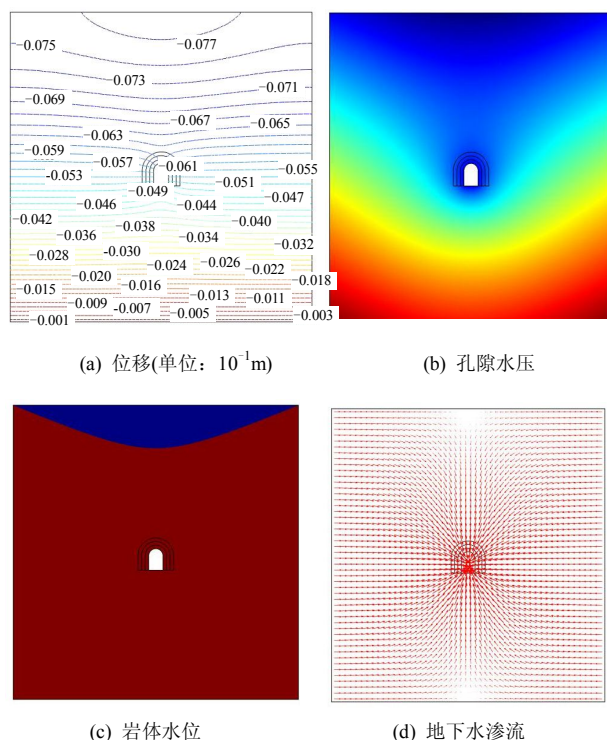


图 3 初始条件下涌水量计算

Fig.3 Calculation of water inflow under initial condition

佐藤邦明公式为

$$q_s = q_0 - 0.584\epsilon kr_0 \quad (2)$$

式中: q_s 为洞室单位长度正常涌水量; ϵ 为系数, 一般取为 12.8, 其他符号同前。将各参数代入佐藤邦明公式计算得单位长度正常涌水量为 0.017 m³/d。

经验公式计算洞室单位长度正常涌水速率为 0.017 m³/d, 最大涌水速率为 0.034 m³/d, 模型计算洞室单位长度涌水速率为 0.033 m³/d。

4 底板不注浆工况不同注浆厚度计算结果分析

4.1 数值模拟计算及分析

根据工程现场实际情况, 初步只考虑立墙和拱顶注浆情况, 确定 3 种注浆方案, 注浆厚度依次为 5、10 m 和 15 m。在前期位移测量及洞室渗流量计算的基础上, 开展施工过程中立墙和拱顶不同注浆方案的数值模拟计算。具体计算结果见图 4~6。

立墙和拱顶注浆厚度对洞室地下水位、地下水渗流速度及拱顶沉降的影响分析:

(1) 对洞室地下水位的影响

洞室围岩后注浆对地下水位有一定的影响, 通过图 3(c)、4(c)、5(c)、6(c)的地下水位线的对比可以看出, 围岩后注浆对地下水位影响较大, 但随着注浆厚度的增大, 注浆效果并不是很明显, 当注浆厚度超过 5 m 时, 地下水位受后注浆影响的程度几

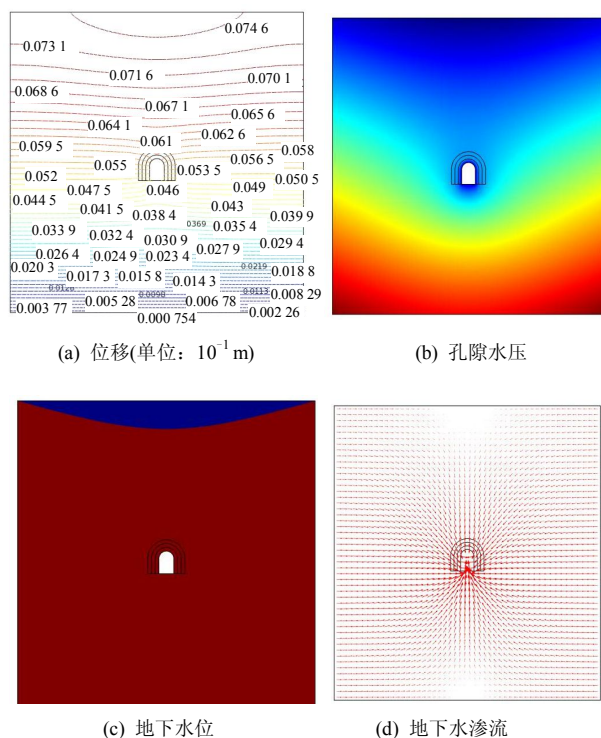


图 4 注浆 5 m 厚度条件下涌水量计算
Fig.4 Calculation of water inflow with 5 meters thickness of the grouting

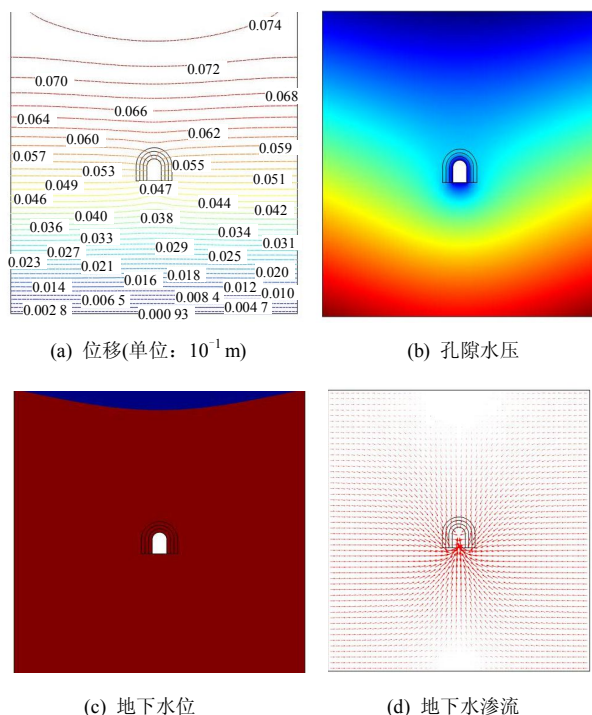


图 5 注浆 10 m 厚度条件下涌水量计算
Fig.5 Calculation of water inflow with 10 meters thicknesses of the grouting

乎可以忽略，并不是注浆厚度越大越好。

(2) 对洞室地下水渗流速度的影响

地下水渗流矢量图中也存在同样的现象，图中箭头方向代表地下水渗流方向，箭头大小表示流速大

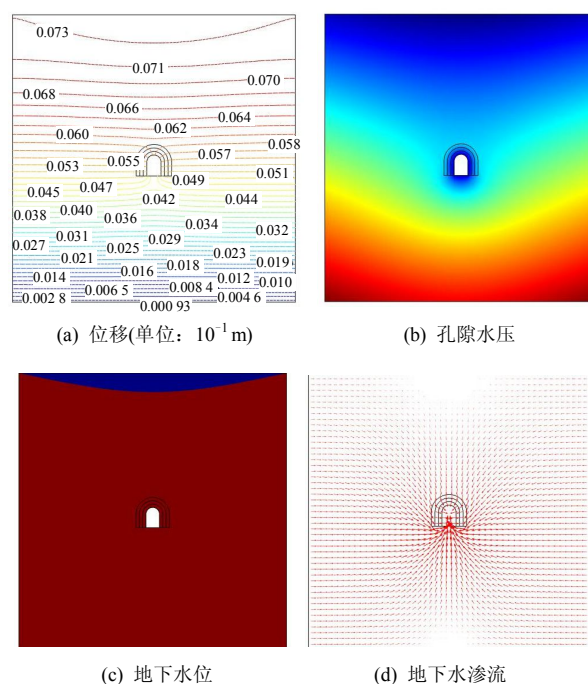


图 6 注浆 15 m 厚度条件下涌水量计算
Fig.6 Calculation of water inflow under grouting thicknesses of 15 m

小，如图 3(d)、4(d)、5(d)、6(d)所示。围岩不注浆时地下水渗流速度明显快于注浆后地下水渗流速度，当注浆厚度超过 5 m 时，随着注浆厚度的增加，地下水渗流速度基本不变。

(3) 对洞室拱顶沉降的影响

图 7 为不同注浆厚度拱顶沉降变化曲线。观察曲线走向不难发现，随着注浆厚度的增加，拱顶沉降曲线斜率逐渐变小，表明注浆厚度对洞室拱顶沉降有一定的控制作用，随着注浆厚度的增大洞室拱顶沉降值逐步降低，当注浆厚度超过 5 m 时，曲线斜率逐渐趋于平缓，说明注浆厚度超过 5 m 后，洞室拱顶沉降值变化并不明显。

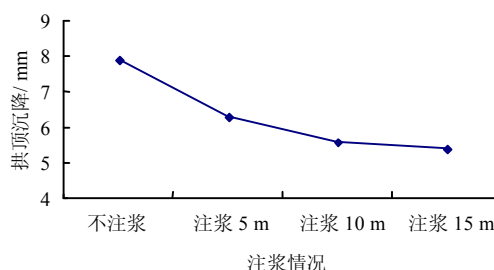


图 7 不同注浆厚度拱顶沉降变化曲线
Fig.7 Curves of vault subsidence with different thicknesses of grouting

4.2 不同注浆方案洞室围岩渗流量计算

保持渗透率为 $9.95 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 不变，将上述计算指标数据后可得不同注浆方案地下水渗流量矩形

图,如图 8 所示。对比发现,随着注浆厚度的增加,底板的渗流量变化先增大后降低,而立墙和拱顶的渗流量持续降低。当采取较薄的注浆厚度时,立墙和拱顶的渗入量明显降低,渗水程度得到了有效的控制,但由于底板并不灌浆,而在洞体周围又存在较大孔隙水压,水就从没有采取注浆措施的底板渗入到油罐洞室内。所以,从图中可以清楚地发现,底板渗入量在采取 5 m 和 10 m 注浆措施下流量是一直增长的。表 1 为岩体各部分在不同注浆情况下渗流量所占的比例。在没有注浆的情况下底板渗水量仅占总渗水量的 25.4%,一旦对洞室围岩注浆,底板渗水量突然增大。当注浆厚度为 5 m 时,底板渗水量就达 59.2%,接近总渗水量的 2/3;当注浆厚度为 10 m 时底板渗水量为 69.6%,增长了 10.4%;当注浆厚度达到 15 m 时,底板渗水量为 70.9%,仅仅增长了 1.3%。通过表 2 可以发现,虽然注浆情况在改变,但是洞室边墙和拱顶的渗水量一直保持大致相等的水平,尤其是在注浆厚度为 5 m 时,2 个部位的渗水量完全一致。

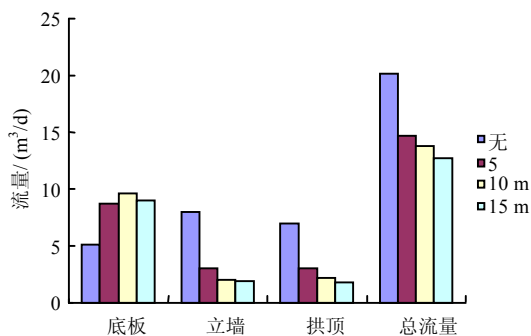


图 8 不同注浆厚度洞室各部位渗流量矩形图

Fig.8 Rectangular figure of seepage of the cavern with different thicknesses of grouting

表 2 不同注浆情况下洞室围岩各部分渗流量比例

Table 2 The proportion of seepage flow under different conditions of grouting

注浆情况	底板流量 所占比例/%	边墙流量 所占比例/%	拱顶流量 所占比例/%
无注浆	25.4	39.8	34.8
5 m 厚度	59.2	20.4	20.4
10 m 厚度	69.6	14.5	15.9
15 m 厚度	70.9	15.0	14.2

4.3 不同注浆方案洞室地下水渗流量计算

立墙和拱顶不同注浆方案地下水渗流量如图 9 所示。由图可以发现,随着立墙和拱顶注浆厚度的增加,只有底板的渗水量有增长的趋势,立墙和拱顶的渗水量随着注浆厚度的增加都是降低的。从不

注浆到注浆厚度 5 m 时,底板渗水量增长最为显著,之后,随着注浆厚度的增加底板渗水量相对来说只有少量的增加,边墙和拱顶的渗水量降低最为显著,随着注浆厚度的增加其渗水量虽有降低但趋势明显减缓。虽然洞室有的部位渗水量是增加的,有的部位是降低的,但总的渗水量随着注浆厚度的增加是逐步降低的,降低趋势与立墙和拱顶降低的趋势吻合,即 5 m 注浆厚度内降低非常显著,随着注浆厚度的增加其降低的趋势渐缓。通过计算发现,注浆 5 m 厚度对渗水影响最为明显,虽然注浆厚度越大渗水量越小,但势必提高了工程成本和增加了工程量,所以建议注浆厚度保持在 5 m 最好。

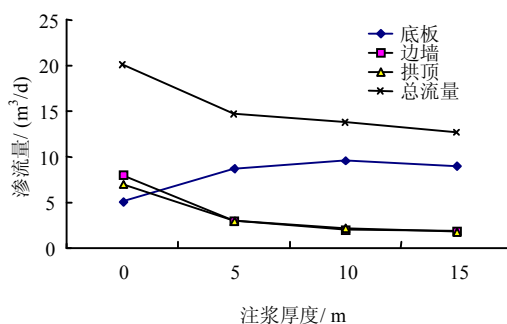


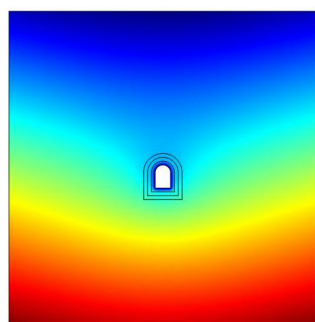
图 9 不同注浆方案地下水渗流量

Fig.9 Groundwater seepage flow with different thicknesses of grouting

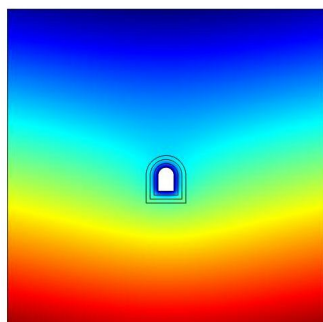
5 底板注浆工况不同注浆厚度计算结果分析

进一步考虑全断面注浆,对洞室形成一个封闭的注浆圈,注浆厚度仍然分别为 5、10、15 m,因洞室形成封闭的注浆圈后,洞室涌水量随注浆圈厚度改变的规律与立墙和拱顶注浆情况相同,限于篇幅,不再赘述,仅列出注浆圈不同厚度时的洞室地下孔隙水压力计算结果,见图 10。

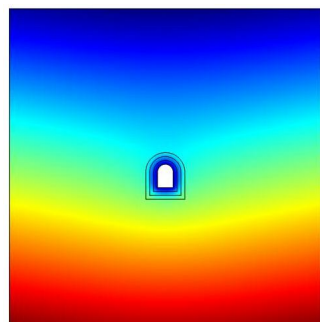
不同厚度注浆圈底板渗水量如图 11 所示。由图可以清楚的发现,底板采取了注浆措施后,底板的渗水量明显降低。表 3 为注浆和不注浆 2 种情况下洞室围岩各部位渗流量情况,由表可以准确地判断出底板注浆对底板渗水量的影响程度。当注浆圈 5 m 厚度、底板不注浆时,底板渗水量占总渗水量的 59.2%,而一旦对底板注浆,底板渗水量占总渗水量的 22.2%,下降了 37%;当注浆圈为 10 m 厚度时、不注浆时,底板渗水量占总渗水量的 69.6%,注浆后该值为 23.9%,下降了 45.7%;当注浆圈为 15 m 厚度、不注浆时,底板渗水量占总渗水量的 70.9%,注浆后该值为 22.8%,下降了 48.1%。对比表 3 数



(a) 注浆厚度 5 m



(b) 注浆厚度 10 m



(c) 注浆厚度 15 m

图 10 不同注浆圈厚度的孔隙水压
Fig.10 Pore water pressure with different thicknesses of the grouting circle

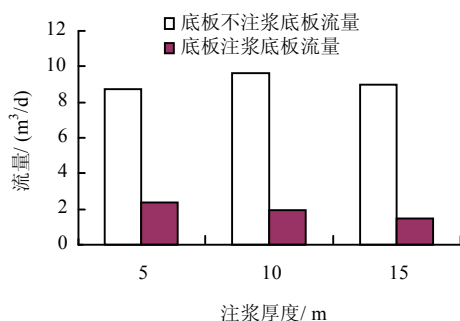


图 11 不同厚度注浆圈底板渗流量矩形图
Fig.11 Rectangular figure of seepage of the cavern floor with different thickness of grouting circle

据不难看出, 当注浆形成一个环形封闭圈时, 注浆圈的厚度改变对底板、边墙和拱顶渗水量所占总渗水量的比例并没有太大影响。

表 3 洞室围岩在注浆和不注浆 2 种情况下各部位渗流量所占比例

Table 3 The proportion of seepage flow under different conditions of grouting and no grouting

厚度 / m	底板不注浆不同部位 流量所占比例 / %			底板注浆不同部位 流量所占比例 / %		
	底板	边墙	拱顶	底板	边墙	拱顶
5	59.2	20.4	20.4	22.2	43.0	34.91
10	69.6	14.5	15.9	23.9	41.5	35.00
15	70.9	15.0	14.2	22.8	40.2	36.41

从图 12 中可以发现, 当底板采取了注浆措施并与立墙和拱顶形成注浆封闭圈时, 洞室渗水量明显低于底板不注浆的情况, 但从图中 2 条线的下降的趋势看, 不管底板是否注浆, 当注浆超过 5 m 时, 洞室总的渗水量同样变化趋势减缓, 可见并不是注浆圈的厚度越大对洞室渗水量的控制效果越好, 而是存在相对经济合理的参数值, 即 5 m 厚度为最佳厚度。

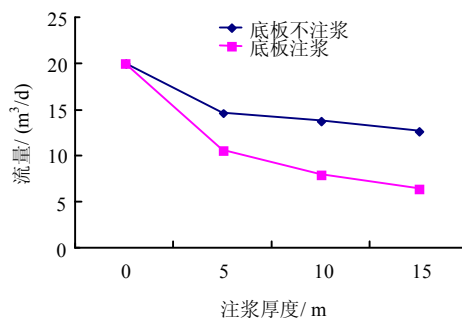


图 12 不同注浆厚度洞室总渗水量
Fig.12 Total seepage of cavern with different thicknesses of grouting circle

6 结 论

(1) 模型计算结果与经验公式及传统方法非常接近, 适用于试验数据和资料匮乏的可行性研究阶段的特大型地下水封石油储备库围岩地下水渗流量或涌水量的计算, 在油库渗水量计算方面, 可为今后我国大型地下石油储备库的建设提供参考。

(2) 围岩后注浆对地下水位、地下水渗流速度和洞室拱顶沉降有一定的控制作用, 但随着注浆厚度的增大, 变化并不是很明显, 计算分析发现, 注浆 5 m 厚度对渗水影响最为明显, 说明注浆圈存在相对经济合理的阈值。

(3) 后注浆对洞室拱顶和边墙渗水有明显的减弱作用, 但底板渗水程度反而因为后注浆而加剧, 为保证整个洞室的渗水量得到有效的控制建议对底板也进行注浆处理。

参 考 文 献

- [1] STURK R, STILLE H. Design and excavation of rock caverns for fuel storage- a case study from Zimbabwe[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1995, 10(2): 193—201.
- [2] LEE Y N, YUN S P, KIM D Y, et al. Design and construction aspects of unlined oil storage caverns in rock[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1996, 11(1): 33—37.
- [3] LEE Y N, SUH Y H, KIM D Y, et al. Stress and deformation behaviour of oil storage caverns during excavation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1997, 34(3—4): 301—305.
- [4] 高翔, 谷兆祺. 人工水幕在不衬砌地下贮气洞室工程中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 1997, 16(2): 178—187.
- GAO Xiang, GU Zhao-qi. The application of artificial water curtain to unlined gas storage caverns[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(2): 178—187.
- [5] 张振刚, 谭忠盛, 万姜林, 等. 水封式 LPG 地下储库渗流场三维分析[J]. **岩土工程学报**, 2003, 25(3): 331—335.
- ZHANG Zhen-gang, TAN Zhong-sheng, WAN Jiang-lin, et al. Three dimensional seepage analysis of underground LPG storage with water curtain[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 331—335.
- [6] 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, 39(6): 88—93.
- TAN Zhong-sheng, WAN Jiang-lin, ZHANG Zhen-gang. Construction technology of underground water-seal liquefied petroleum gas storage[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(6): 88—93.
- [7] 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(12): 2134—2138.
- YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(12): 2134—2138.
- [8] 钱自卫, 姜振泉, 曹丽文, 等. 弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(1): 139—147.
- QIAN Zi-wei, JIANG Zhen-quan, CAO Li-wen, et al. Experiment study of penetration grouting model for weakly cemented porous media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 139—147.
- [9] 张志强, 李化云, 何川. 基于流固耦合的水底隧道全断面注浆力学分析[J]. **铁道学报**, 2011, 33(2): 86—90.
- ZHANG Zhi-qiang, LI Hua-yun, HE Chuan. Study on whole section curtain grouting technique and parameters optimization in subsea NATM tunnel[J]. **Journal of The China Railway Society**, 2011, 33(2): 86—90.