

DOI: 10.11779/CJGE201408015

地下水封石油洞库渗水量预测与统计

王者超¹, 李术才¹, 梁建毅², 乔丽苹¹, 薛翊国¹, 周毅¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 黄岛国家石油储备基地有限责任公司, 山东 青岛 266426)

摘要: 渗水量规模与空间分布特征是地下水封石油洞库建设中的关键问题。以中国首个大型地下水封石油洞库项目为背景, 采用经验公式、有限元法计算和现场实测等方法研究了该洞库渗水量规模和空间分布特征。在大量现场岩体渗透性试验基础上, 获得了可靠的岩体渗透系数, 采用经验公式和数值计算等方法对洞库渗水量规模和空间分布特征进行了预测。根据现场揭露的渗水形态, 统计了洞库渗水量规模, 获得了渗水量空间分布特征, 调查了渗水部位地质特征, 据此提出了渗水量控制标准和有针对性的工程注浆防渗对策。通过对预测与统计结果, 讨论了渗水量规模预测方法适用性和渗水量空间分布特征离散性等问题。研究成果为提高中国地下水封石油洞库建设水平提供了理论支持, 并为复杂条件下地下工程渗流特性研究提供了工程实例。

关键词: 岩石工程; 地下水封石油洞库; 渗水量; 空间分布; 渗透系数; 有限元法; 现场统计; 结构面; 离散性

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)08-1490-08

作者简介: 王者超(1980-), 男, 山东高唐人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩体渗流特性与岩土材料流变性质的研究工作。E-mail: wanz@sdu.edu.cn。

Prediction and measurement of groundwater flow rate of underground crude oil storage caverns

WANG Zhe-chao¹, LI Shu-cai¹, LIANG Jian-yi², QIAO Li-ping¹, XUE Yi-guo¹, ZHOU Yi¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Huangdao Oil Reserve Base Limited Company, Qingdao 266426, China)

Abstract: The magnitude and spatial distribution of groundwater flow rate around cavern periphery are of critical importance to the construction of underground crude oil storage caverns with water curtain system. The groundwater flow rate of a pilot underground storage cavern in China is estimated using empirical equations, finite element modeling and field measurement. The magnitude and spatial distribution of groundwater flow rate are predicted and then measured in this study. The permeability coefficient is obtained using a series of field permeability tests. The prediction is performed using the empirical equations and finite element modeling. The measurement is performed in terms of the forms of groundwater flow at different locations. The geological conditions at the locations of groundwater flow are identified. A critical value for the groundwater flow rate and a method for grout injection are proposed according to the field measurement. The applicability of the numerical modeling and the discrete nature of the spatial distribution of groundwater flow rate of jointed rock mass are discussed by comparing the predicted results with the measured ones. This study may benefit the construction of underground crude oil storage caverns, and provide a case study for groundwater flow through jointed rock mass under complex conditions.

Key words: rock engineering; underground crude oil storage cavern; groundwater flow rate; spatial distribution; permeability coefficient; finite element method; field measurement; joint; discrete characteristic

0 引言

石油是重要的战略物资和化工原料, 同时又是应用最广泛、运输储存最方便的一种能源, 素有“工业血液”之称。2010年中国石油消耗量达到 4.2×10^8 t, 其中进口原油 2.3×10^8 t, 对外依存度达到53.7%, 突破了对外依存度50%的国家石油安全国际警戒线。因此, 建立国家石油储备对保障中国能源安全、社会稳

定和经济发展是紧要的和迫切的。

地下水封石油洞库在国外投入生产使用较多, 但

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036002); 国家自然科学青年基金项目(51309145, 41202205); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2013NJ018); 山东大学自主创新基金项目(2012TS058)

收稿日期: 2013-12-27

目前国内还处于起步阶段, 尚有许多基础科学和工程应用问题需要研究。由于地下水封石油洞库密封性要通过地下水在岩体中渗流得以实现, 因此岩体渗流特性是地下水封石油洞库建设的基础科学问题^[1-2]。在岩体渗流特性中, 洞库渗水量规模与空间分布特征是一个至关重要方面。只有掌握了洞库的渗水量规模和空间分布特征, 才能有效地开展水封系统设计和制定防渗控渗措施。

近些年来, 随着中国隧道等地下工程的大量兴建, 地下工程岩体渗流特性研究取得了显著进展。研究人员采用了经验公式^[3-4]、数值计算^[5-9]和现场实测^[10]等方法获得了地下工程渗(涌)水量规模与空间分布特征。这些研究提高了中国在隧道等地下工程领域的建设水平, 为相关工程设计提供了重要的理论依据。经验公式法是进行地下工程渗(涌)水量初步预测的有效途径, 但这种方法假定了岩体的连续性和均匀性, 因此不能准确预测渗(涌)水量空间分布特征。数值计算法是复杂条件下地下工程渗(涌)水量预测的有力方法。例如, 王媛等^[5]研究了南水北调西线引水工程区隧道涌水量, 并采用随机有限元法实现了非稳定渗流隧道涌水预测^[6]; 任旭华等^[7]采用三维有限元法预测了锦屏二级水电站各引水隧道及辅助洞贯通后的涌水量; 李术才等^[8]采用有限差分法预测了青岛胶州湾海底隧道建设期涌水量; 时洪斌等^[9]采用近似解析法和有限差分法估算了地下水封洞库渗水量。现场实测法能获得准确的渗(涌)水量规模和空间分布特征, 但由于工作量大, 耗时长, 影响因素多等特点, 已有工作多集中于特殊条件下的隧道等地下工程。

本文以中国首个大型地下水封石油洞库项目为背景, 采用经验公式、有限元法计算和现场实测等方法研究了该洞库渗水量规模和空间分布特征。开展了大量现场岩体渗透性试验, 获得了较为可靠的渗透系数, 在此基础上采用了经验公式和数值计算等方法对洞库渗水量规模和空间分布特征进行了预测。根据现场揭露渗水情况, 统计了洞库渗水量规模与空间分布特征, 调查了渗水部位结构面特征, 据此提出了改进的渗水量验收标准和有针对性的工程防渗对策。通过对比预测与统计结果, 讨论了渗水量预测方法适用性和渗水量空间分布离散性等问题。研究为提高中国地下水封石油洞库建设水平提供了理论支持, 并为复杂条件下地下工程渗流特性研究提供了工程实例。

1 工程背景

1.1 工程概况

该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。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 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$, 洞库设计使用年限为 50 a。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 1 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。图 1 为工程地下结构图。

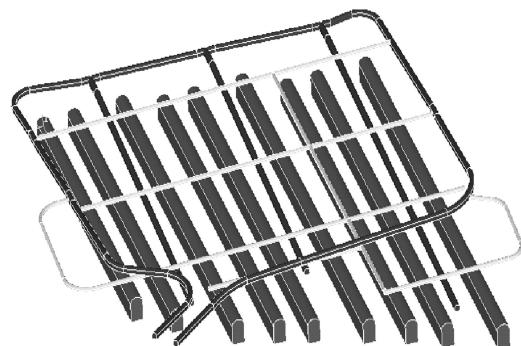


图 1 地下水封石油洞库地下结构图

Fig. 1 Underground structures of crude oil storage cavern

1.2 工程地质条件

该库址区属低山丘陵地貌, 洞库山体近东西走向, 山脊标高为 280~350 m, 山脊北侧为陡崖, 南侧为陡坡, 地形坡度一般为 $35^\circ \sim 55^\circ$, 山脊南北两侧发育近南北向及东北向冲沟。地面平均标高约为 220 m, 最高点标高为 350.9 m, 最高点与最低点相对高差为 253.4 m。

库址区内的地层主要为晚元古界花岗片麻岩, 浅肉红色—浅青灰色, 主要矿物为钾长石、斜长石、石英、角闪石黑云母, 细粒花岗片麻结构, 块状构造, 岩体较破碎—较完整, 占洞库岩体 80%以上, 属坚硬岩。根据相关试验与反分析^[11-12], 岩体弹性模量取为 17.1 GPa, 泊松比取为 0.21, 摩擦角取为 32° , 剪胀角取为 20° , 黏聚力取为 8.3 MPa。

1.3 水文地质条件

根据水文地质调查, 库址区含水介质为晚元古界花岗片麻岩, 主要的地下水存在类型为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水, 基岩裂隙水又可分为浅层的网状裂隙水和深层的脉状裂隙水。松散岩类孔隙水赋存于第四系强风化层中, 为花岗岩风化残积土。浅层的网状裂隙水赋存空间介质为晚元古界花岗片麻岩, 片麻理、节理发育, 在山前第四系发育而地势相对平坦的地区,

埋深在 20~30 m 以下。

地下水以大气降水为主要补给来源, 由于地形较陡, 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。据该地下水封洞库工程水资源论证报告, 该区多年平均降水入渗补给量为 53.8 mm, 年平均降水量为 736.2 mm, 故该区降水入渗系数为 0.073。由上可见, 该区降水主要降水通过地表径流排泄至水塘或水库。

1.4 岩体渗透性现场测试

为了获得洞库工程区岩体渗透性, 采用了 3 种现场试验方法: ①提水及恢复试验; ②注水消散试验; ③压水试验。试验过程及数据分析按照地下水封洞库岩土工程勘察规范要求^[13]。

根据试验结果, 洞库围岩渗透系数一般在 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ m/d 之间, 具有一定不确定性。参见文献[12]分析, 选用 1.0×10^{-4} m/d 作为洞库围岩渗透系数基准值较为适宜。

2 洞库渗水量预测

2.1 经验公式法

地下水动力学中, 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^[14]。大岛洋志公式表示为

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

式中 q_0 为洞身通过含水体的单位长度最大涌水量; k 为渗透系数; H 为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。

佐藤邦明公式表示为

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

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; 其他符号同上。

该洞库岩体性质与几何特征相关参数如下: k 为 1×10^{-4} m/d, H 取平均值, 为 280 m, r_0 为 26.6 m, d 为 53.2 m, 将上述参数代入式(1)计算得单位长度最大渗水量为 $0.046 \text{ m}^3/\text{d}$ 。整个洞库总渗水量为 $261.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 。将各参数代入式(2)计算得单位长度正常渗水量为 $0.027 \text{ m}^3/\text{d}$, 整个洞库总渗水量为 $153.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.2 解析公式法

崔京浩^[15]根据达西定律和多个平行洞室渗流量的分析方法获得了洞室渗流量的解析解。根据解析公式, 洞室渗流量与洞室岩体渗透系数、地下水降深、稳定水位距底边高度、洞室跨度、长度以及降落漏斗半径相关。时洪斌等^[9]根据上述解析公式, 计算得到

黄岛地下水封石油洞库无水幕条件下单个洞罐(即 3 个洞室)渗水量约为 $21.6 \text{ m}^3/\text{d}$, 因此整个洞库为 $64.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.3 有限元法

在有限元法中, 库区岩体被视为等效连续介质。流体在介质中的流动采用考虑饱和度影响的达西定律描述, 采用非饱和介质有效应力原理, 并结合平衡方程、几何方程、物理方程和连续方程即可获得应力-渗流耦合问题的控制方程^[12, 16]。在本研究中, 洞库围岩应力和地下水耦合效应采用大型商业软件 ABAQUS 进行求解。

由于洞库洞室长度(500~600 m)远大于洞室截面尺寸(20~30 m), 视为平面应变问题求解。图 2 为研究范围网格模型。9 个洞室从左向右依次展开, 研究范围选取了左右侧洞室(主洞①和⑨)各外延 1000 m, 上至地表, 下至距洞室底板 400 m 的岩体。网格划分、边界条件、初始条件处理按文献[12]方法。

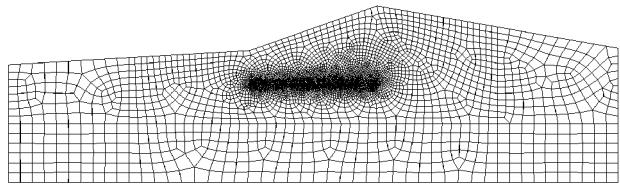


图 2 研究范围网格

Fig. 2 Mesh of study field

考虑洞库围岩渗透系数具有不确定性, 根据现场试验结果, 本研究中工况一~工况五渗透系数分别选取 1×10^{-4} (基准值), 5×10^{-5} , 1×10^{-5} , 5×10^{-4} 和 1×10^{-3} m/d, 用以最大限度反映洞库渗水量变化情况。

考虑到洞库建设实际情况, 分析分为两步进行:

(1) 构造初始地应力场和水压力场。初始地应力场和水压力场采用用户子程序生成。

(2) 施工期洞库开挖。整个过程持续 3 a, 洞库开挖通过去除洞库单元实现, 在此过程中允许地下水通过洞库库壁流入洞库。由于洞库基本不采用支护措施, 故在洞库洞壁节点力和水压力指定为零。

图 3 为工况一(渗透系数取基准值)下各个洞室施工期渗水量直方图。主洞⑨渗水量最大, 为 $20.9 \text{ m}^3/\text{m}$; 主洞③渗水量最小, 为 $7.5 \text{ m}^3/\text{m}$ 。整个洞库渗水量为 $73.1 \text{ m}^3/\text{d}$ 。受相邻洞室影响, 各洞室渗水量并不与埋深成正比。由于主洞①和⑨只有一侧受其他洞室影响, 而其他洞室渗水量受左右两侧洞室影响, 所以主洞①和⑨渗水量比附近洞室大。

图 4 为主洞①、③和⑨及整个洞库施工期渗水量与渗透系数关系图。渗水量随着渗透系数增加而显著增加。在双对数空间, 不同时间内洞室和整个洞库渗

水量与渗透系数大体成线性关系, 这个线性关系的斜率约为 0.67。由此, 根据分形几何理论^[17], 可以判断洞室渗水量与渗透系数之间存在分形关系, 且维数约为 0.67。

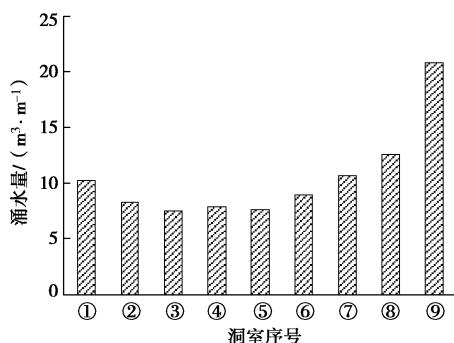


图 3 工况一各洞室施工期渗水量直方图

Fig. 3 Groundwater inflow fluxes of caverns during construction period of a representative case

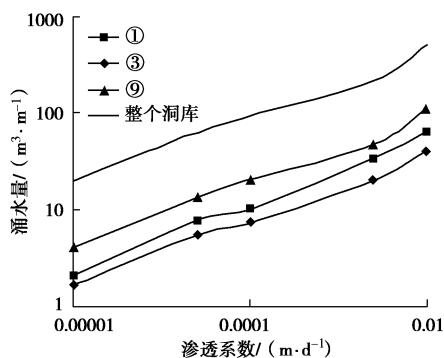


图 4 洞库施工期渗水量 - 渗透系数关系图

Fig. 4 Relationship between groundwater inflow volume and permeability of caverns during construction period

3 洞库渗水量统计

渗水量规模和空间分布特征是地下水封石油洞库设计的关键参数之一。根据水封原理, 水封洞库既要允许地下水通过岩体结构面渗入洞库内, 又不能无限量地渗入。本文前半部分介绍了预测地下水封石油洞库渗水量的方法及结果。本节将介绍洞库渗水量现场实测统计结果。

3.1 统计方法

统计范围为各个洞室以及密封塞位置以下施工巷道和连接巷道。各个部位渗水量通过半小时内渗水体积除以时间计算得到, 渗水采用塑料袋收集, 收集后采用量杯测量。

在统计过程中, 根据现场渗水部位具体情况, 将渗水状态分为点状、线状、面状 3 种类型:

(1) 点状是指离散点处渗水, 如图 5 (a) 所示。

该种情形往往出现在结构面不甚发育且连通性较差的部位。

(2) 线状是指在同一个结构面上有多个渗水点, 如图 5 (b) 所示。线状渗水现象多出现于结构面中等发育且存在一个优势连通结构面的部位。

(3) 面状是指某一区域有多个渗水点, 且不成线状, 如图 5 (c) 所示。面状渗水多出现于结构面较为发育且存在多个优势连通结构面的部位。

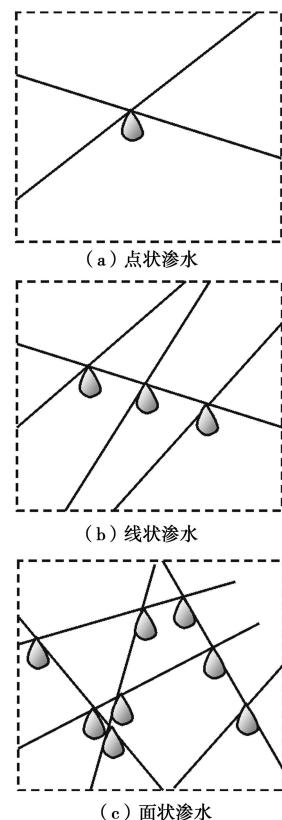


图 5 渗水形态

Fig. 5 Forms of groundwater flow around cavern periphery

3.2 统计结果

表 1 为开挖后揭露渗水量统计表。表中根据渗水形态列出了各个主洞室及施工/连接巷道渗水部位数量与渗水量。主洞③和⑤线状渗水位于边墙, 渗水量微小, 无法测量, 故记为零。图 6 为点状、线状和面状渗水部位数量直方图, 统计范围内点状渗水部位为 76 个、线状 23 个、面状 84 个。图 7 为不同形态渗水部位渗水量对比饼图, 点状渗水部位总渗水量为 25.64 L/min, 线状渗水部位总渗水量为 13.86 L/min, 而面状渗水部位总渗水量为 24.58 L/min。

图 8 为各洞室和施工巷道/连接巷道渗水量分布图。统计数据显示: 主洞①、⑤、⑦、⑨以及施工/连接巷道渗水量较大, 为 7~16 L/min, 而洞室②、③、④、⑥、⑧渗水量<2 L/min。各部分渗水量总和为 92 m^3/d , 其中主洞室渗水量 68 m^3/d 。

表 1 开挖后揭露渗水量统计表

Table 1 Groundwater flow rates at different openings

| 位置 | 点状 | | 线状 | | 面状 | | 渗水量合计 (L·min ⁻¹) |
|------|----|-------------------------------|----|-------------------------------|----|-------------------------------|---------------------------------|
| | 个数 | 渗水量 (L·min ⁻¹) | 个数 | 渗水量 (L·min ⁻¹) | 个数 | 渗水量 (L·min ⁻¹) | |
| 主洞① | 7 | 0.35 | 3 | 5.43 | 3 | 4.5 | 10.28 |
| 主洞② | 4 | 0.72 | 2 | 0.24 | 3 | 0.15 | 1.11 |
| 主洞③ | 3 | 0.06 | 1 | 0 | 7 | 0.73 | 0.79 |
| 主洞④ | 6 | 0.82 | 2 | 0.66 | 5 | 0.21 | 1.69 |
| 主洞⑤ | 4 | 3.79 | 3 | 0 | 5 | 4.08 | 7.87 |
| 主洞⑥ | 9 | 0.70 | 2 | 0.11 | 9 | 0.63 | 1.44 |
| 主洞⑦ | 11 | 8.62 | 1 | 0.10 | 7 | 0.55 | 9.27 |
| 主洞⑧ | 8 | 1.05 | 0 | 0 | 6 | 0.24 | 1.29 |
| 主洞⑨ | 9 | 4.41 | 3 | 4.62 | 7 | 4.83 | 13.86 |
| 施工巷道 | 15 | 5.17 | 6 | 2.70 | 32 | 8.66 | 16.53 |
| 合计 | 76 | 25.64 | 23 | 13.86 | 84 | 24.58 | 64.13 |

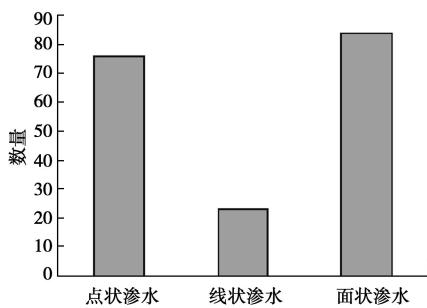


图 6 点状、线状和面状渗水部位数量

Fig. 6 Numbers of groundwater flow locations with different characteristics

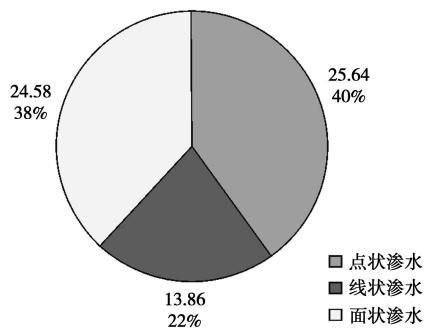


图 7 点状、线状和面状渗水量

Fig. 7 Groundwater flow rates in different forms

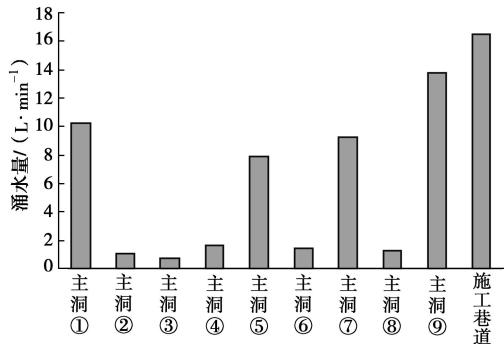


图 8 各洞室及施工/连接巷道渗水量分布图

Fig. 8 Groundwater flow rates at different openings

实测结果显示：

(1) 主洞室总渗水量规模与解析方法和有限元计

算结果吻合，而经验公式过高估计了渗水量规模。

(2) 主洞①和⑨渗水量较大，与有限元计算结果吻合。

(3) 相邻洞室渗水量差异较大，有限元计算结果未能预测这些差异。

图 9 为不同形态渗水量规模分布直方图。图中统计了各洞室渗水量 <0.5 L/min, 0.5 L/min \leq 渗水量 ≤ 2 L/min, 2 L/min \leq 渗水量 ≤ 5 L/min, 渗水量 ≥ 5 L/min 4 种情况下点状、线状和面状渗水部位。从图中看出，渗水量 ≥ 5 L/min 的共有 1 点、1 线、1 面； 5 L/min \geq 渗水量 ≥ 2 L/min 的共有 2 点、1 线、3 面；其余大部分渗水部位渗水量 <2 L/min。图 10 为不同规模渗水部位渗水量分布饼图。从图中看到，渗水量 ≥ 5 L/min 的 1 点、1 线、1 面共 3 个部位总渗水量占整个洞库渗水量的 31%， 5 L/min \geq 渗水量 ≥ 2 L/min 的 2 点、1 线、3 面共 6 个部位渗水量占整个洞库总渗水量 31%，而上述 3 点、2 线、4 面共计 9 个部位渗水量占整个洞库总渗水量 62%。因此，该地下水封石油洞库渗水部位在空间分布上具有高度离散性。

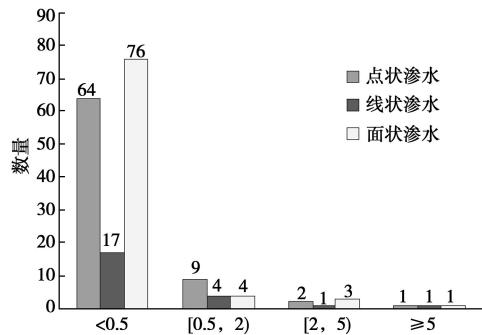


Fig. 9 Distribution of groundwater flow rates with different magnitudes at different openings

3.3 渗水部位现场调查

为详细了解洞库渗水部位地质条件，开展了渗水部位现场调查。表 2 为渗水量 ≥ 2 L/min 的 9 个渗水部位现场地质调查结果表。图 11 为典型部位地质条件图

表 2 渗水量大于等于 2L/min 的 9 个渗水部位现场地质调查表

Table 2 Geological conditions at 9 locations with groundwater flow rates not lower than 2 L/min

| 序号 | 位置 | 形态 | 渗水量 (L·min ⁻¹) | 地质条件 |
|----|--------------------|----|-------------------------------|---|
| 1 | 主洞①0+376 | 线状 | 5.0 | 发育一贯穿节理面, 产状为 $15^\circ \angle 84^\circ$, 节理面平直光滑, 与母岩结合差 |
| 2 | 主洞⑦0+350 | 点状 | 7.0 | 发育一条破碎带, 宽约 1.5 m, 岩体强度低, 节理迹长较短, 岩体切割呈碎裂状, 局部成散状体, 有白色高岭土充填, 结合差。 |
| 3 | ②施工 1+715—1+720 | 面状 | 5.0 | 渗水处为煌斑岩脉与母岩结合处, 岩脉最宽处约有 3 m, 结合处有 30~40 mm 厚蚀变矿物充填。 |
| 4 | 主洞① 0+380—0+400 | 面状 | 3.0 | 节理密度大, 3~4 条/m, 节理面平直光滑, 结合一般—差。 |
| 5 | 主洞⑤0+98 | 点状 | 2.7 | 发育有节理组, 产状为 $60^\circ \angle 70^\circ$, 密度为 6~7 条/m, 节理面平直光滑, 黄色矿物充填, 结合一般—差。 |
| 6 | 主洞⑤ 0+160—0+180 | 面状 | 2.7 | 岩脉宽约 0.05 m, 硬度高, 有黄色物质充填, 与母岩结合差, 岩体破碎。 |
| 7 | 主洞⑨0-43 | 点状 | 4.2 | 岩脉宽约 1.5 m, 强度高, 与母岩结合处无填充, 结合好, 但内部节理较发育, 有白色高岭土填充。 |
| 8 | 主洞⑨ 0+660—0+680 | 面状 | 4.5 | 发育两组高密度节理, 其中一组, 密度为 15~17 条/m, 产状为 $105^\circ \angle 26^\circ$, 节理面平直光滑, 局部有白色高岭土、岩石碎屑及灰色硬质矿物充填, 结合一般—好; 另一组密度未 10~12 条/m, 产状为 $170^\circ \angle 81^\circ$, 局部有软化泥质夹层、白色高岭土充填, 结合一般—差。 |
| 9 | 主洞⑨ 0+566—0+576 | 线状 | 4.3 | 0+566 处: 发育有破碎带, 岩体遇水软化, 手捏即碎, 内部节理发育, 产状为 $132^\circ \angle 48^\circ$, 节理间有白色高岭土充填, 潮湿, 结合差; 0+576 处: 节理组密度 9~10 条/m, 节理面平直光滑, 无充填, 结合一般—差。 |

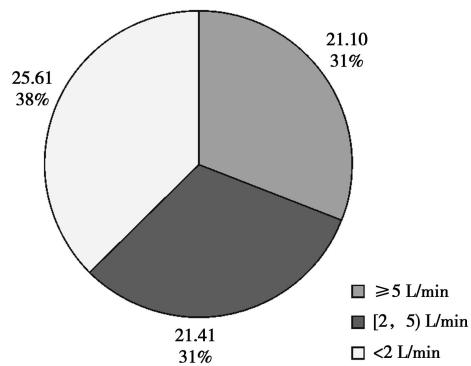


图 10 不同规模渗水部位渗水量分布图

Fig. 10 Distribution of groundwater flow rates with different magnitudes

片。通过调查发现, 9 个部位地质条件具有以下特征:

- (1) 多发育有贯穿结构面、破碎带、岩脉等不良地质构造。
- (2) 部分节理面内充填有蚀变矿物, 矿物遇水易软化。
- (3) 节理面多为剪张型, 与母岩结合较差。

3.4 分析

如上文所述, 洞库过量渗水将会导致洞库运营费用增加, 严重情况下, 洞库渗水量大于洞库排水系统排水量, 将会造成洞库内地下水位不断上升, 储存能力不断下降, 直至报废。同时, 地下水封石油洞库规模大, 在具体施工中需采用台阶法开采, 渗水部位随施工进度逐渐揭露。因此, 施工过程中需制定渗水量控制标准, 渗水量超标部位要进行注浆密封。

根据规范要求^[13], 每个容积为 $100 \times 10^5 \text{ m}^3$ 地下储油洞库, 允许渗水量不超过 $100 \text{ m}^3/\text{d}$, 因此该洞库



(a) 主洞①0+376



(b) 主洞⑤0+98



(c) 主洞⑦0+350

图 11 典型高渗水量地质条件图

Fig. 11 Geological conditions at locations with high groundwater flow rates

总渗水量不应超过 $300 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据上述统计结果, 储油区共有点状渗水部位 76 个、线状 23 个、面状 84 个。假设每个部位渗水量相同, 则允许每个部位渗水量为 $1.63 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为确保渗水量达标和降低运营费用, 将上述标准提高 3 倍, 每个部位渗水不超过 $0.54 \text{ m}^3/\text{d}$ 即可满足要求。

同时, 根据洞库揭露渗水部位渗水量分布特征, 单个渗水部位渗水量 $\geq 2\text{L}/\text{min}$ 的 3 点、2 线、4 面共计 9 个部位的渗水量占整个洞库总渗水量 62%, 因此, 在制定注浆方案时, 应优先处理上述 9 个部位。

4 讨 论

4.1 地下工程渗水量规模预测

经验公式、解析解和数值计算方法预测渗水量规模与实测结果对比发现, 经验公式与实测结果差异较大, 而解析解和数值分析方法均与实测结果较为吻合。由于经验公式是针对单条隧道且没有考虑水位下降影响, 因此其预测值大于实测值。而解析解和数值计算方法均综合考虑了水位下降和周围洞室条件影响, 其预测值与实测值较为吻合。

岩体中结构面的存在, 使得岩体呈现出高度非线性、非均匀性和各向异性^[18]。地下水封石油洞库渗水量现场统计结果证实了上述论断。数值计算中, 往往采用连续性和均匀性假设来进行分析, 因此人们对有限元法计算结果能否预测地下工程渗水量规模存在疑问。从本研究结果看, 由大量现场试验确定的岩体渗透系数具有较好代表性, 能够代表洞库岩体整体渗透特性, 因此计算所得渗水量规模与实测较为吻合。

从上述对比还不难得出, 库区岩体特征体元尺寸要远大于单个洞室规模, 但小于库群整体规模。由于库区岩体特征体元尺寸要远大于单个洞室宽度, 因此单个洞室渗水量分布表现出离散性。而由于特征体元尺寸小于库群规模, 因此采用特征体元渗透系数可以预测整个洞库渗水量规模。

4.2 地下工程渗水量空间分布特征预测

本研究中, 采用了有限元法进行了洞库渗水量预测。预测结果与现场实测统计对比显示: 虽然有限元法可以预测各个洞室之间渗水量分布不均, 但这种不均匀性仍不足以描述现场渗水量空间分布的离散性。进一步预测渗水量空间分布特征无疑具有更大的理论和工程应用价值。离散分析方法在描述岩体性质离散特性上具有较大优势, 但同时, 离散分析方法对岩体结构面分布特征和参数要求较高。只有在取得较为可信的结构面展布和力学参数基础上, 计算结果才能有较高的可靠性。因此, 开展基于岩体精细地质结构模型的地下工程渗流特性离散分析方法研究具有重要的理论和应用价值。

5 结论与展望

(1) 采用经验公式和解析方法预测该地下水封石油洞库渗水量规模, 两种方法预测洞库渗水量分别为 $153.3 \sim 261.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $64.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2) 开展了有限元法分析, 分析结果显示, 洞库渗水量规模为 $73.1 \text{ m}^3/\text{d}$, 并且渗水量与渗透系数存在分形维数为 0.67 的分形关系。

(3) 开展了现场渗水量统计, 统计结果显示: 点状渗水部位为 76 个, 总渗水量为 $25.64 \text{ L}/\text{min}$; 线状 23 个, 总渗水量为 $13.86 \text{ L}/\text{min}$; 面状 84 个, 总渗水量为 $24.58 \text{ L}/\text{min}$ 。各部分渗水量总和为 $92 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中 9 个洞室渗水量 $68 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据渗水部位数量, 提出了改进的渗水量验收标准。

(4) 渗水量表现出了极高的离散性。渗水量 $\geq 5 \text{ L}/\text{min}$ 的共有 1 点、1 线、1 面, 其渗水量占总渗水量的 31%; $2 \text{ L}/\text{min} \leq \text{渗水量} < 5 \text{ L}/\text{min}$ 的共有 2 点、1 线、3 面, 其渗水量占总渗水量 31%; 上述 3 点、2 线、4 面渗水量占总渗水量 62%。根据上述离散性, 提出了集中处理渗水量较大部位的控渗方案。

(5) 现场渗水点调查发现, 渗水部位典型的地质特征为结构面结合较差。

(6) 由于库区岩体特征体元尺寸要远大于单个洞室规模, 但小于库群整体规模, 因此, 由大量现场试验确定的岩体渗透系数具有较好代表性, 能够代表洞库岩体整体渗透特性。

地下水封石油洞库为研究复杂条件下岩体渗流特性提供了典型研究对象。本文通过多种方法研究了地下水封石油洞库渗流量规模与空间分布特征, 研究结果为理解复杂条件下岩体渗流特征提供了新的内容, 为我国地下水封石油洞库建设提供了理论依据。但同时, 为准确预测岩体渗流离散性, 需进一步开展基于精细地质结构模型的岩体渗流离散分析方法研究。

致 谢: 感谢北京东方新星石化工程股份有限公司黄岛工程项目部工程师朱华和张洪等为本研究提供的帮助。

参 考 文 献:

- [1] 李术才, 平 洋, 王者超, 等. 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2161 - 2170. (LI Shu-cai, PING Yang, WANG Zhe-chao, et al. Assessment of storage caverns based on fluid-solid coupling theory for discrete medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2161 - 2170. (in Chinese))
- [2] 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(7): 1979 -

1986. (LI Shu-cai, ZHANG Li, MA Xiu-yuan, et al. Spatial and time dependent behaviour of seepage field around a large underground crude oil storage caverns with groundwater curtaining[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(7): 1979 - 1986. (in Chinese))
- [3] FERNANDEZ G, MOON J. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – Part 1: guideline for estimation of groundwater inflow rate[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, **25**(5): 560 - 566.
- [4] 王建秀, 朱合华, 叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(7): 1150 - 1153. (WANG Jian-xiu, ZHU He-hua, YE Wei-min. Forward and inverse analyses of water flow into tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(7): 1150 - 1153. (in Chinese))
- [5] 王媛, 秦峰, 李冬田. 南水北调西线工程区地下径流模数、岩体透水性及隧洞涌水量预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(20): 3673 - 3678. (WANG Yuan, QIN Feng, LI Dong-tian. Groundwater runoff modulus, rock permeability and prediction of water quantities of tunnel in west route of South-to-North water transfer project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(20): 3673 - 3678. (in Chinese))
- [6] 王媛, 王飞, 倪小东. 基于非稳定渗流随机有限元的隧道涌水量预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **28**(10): 1986 - 1994. (WANG Yuan, WANG Fei, NI Xiao-dong. Prediction of water inflow in tunnel based on stochastic finite element of unsteady seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **28**(10): 1986 - 1994. (in Chinese))
- [7] 任旭华, 束加庆, 单治钢, 等. 锦屏二级水电站隧洞群施工期地下水运移、影响及控制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(增刊 1): 2891 - 2897. (REN Xu-hua, SHU Jia-qing, SHAN Zhi-gang, et al. Research on groundwater transport, influence and control in tunnel group of Jinping II hydropower station during construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(S1): 2891 - 2897. (in Chinese))
- [8] 李术才, 赵岩, 徐帮树, 等. 海底隧道涌水量数值计算的渗透系数确定方法[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(5): 1497 - 1505. (LI Shu-cai, ZHAO Yan, XU Bang-shu, et al. Study of determining permeability coefficient in water inrush numerical calculation of subsea tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(5): 1497 - 1505. (in Chinese))
- [9] 时洪斌, 刘保国. 水封式地下储油洞库人工水幕设计及渗流量分析[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(1): 130 - 137. (SHI Hong-bin, LIU Bao-guo. Design and seepage discharge analysis of artificial water curtain for water sealed underground petroleum storage caverns in rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(1): 130 - 137. (in Chinese))
- [10] 乔伟, 李文平, 赵成喜. 煤矿底板突水评价突水系数-单位涌水量法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(12): 2466 - 2474. (QIAO Wei, LI Wen-ping, ZHAO Cheng-xi. Water inrush coefficient-unit inflow method for water inrush evaluation of coal mine floor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(12): 2466 - 2474. (in Chinese))
- [11] 王者超, 李术才, 吕晓庆, 等. 地下水封石油洞库施工期围岩完整性参数敏感性分析[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(增刊 2): 488 - 495. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, LÜ Xiao-qing, et al. Parameter sensitivity of rock mass integrity for a pilot underground crude oil storage caverns during construction phase[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(S2): 488 - 495. (in Chinese))
- [12] 王者超, 李术才, 乔丽萍, 等. 大型地下石油洞库自然水封性应力-渗流耦合分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(8): 1535 - 1543. (WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, QIAO Li-ping, et al. Assessment of natural containment property of an underground crude oil storage caverns using fluid flow-stress coupling method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(8): 1535 - 1543. (in Chinese))
- [13] SY/T 0610—2008 地下水封洞库岩土工程勘察规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008. (SY/T 0610—2008 Standard for underground water enclosed cavern investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [14] EL TANI M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2003, **18**(1): 49 - 55.
- [15] 崔京浩. 地下工程与城市防灾[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (CUI Jing-hao. *Underground engineering and urban disaster prevention*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [16] ABAQUS Inc. ABAQUS documentation[M]. Providence: Rhode Island, 2006.
- [17] 谢和平, 薛秀谦. 分形应用中的数学基础与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (XIE He-ping, XUE Xiu-qian. *Fractal mathematical foundation and method of application*[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))
- [18] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. (ZHOU Zhi-fang. *Theory on dynamics of fluids in fractured medium*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))