

# 层次分析法在水封洞库注浆设计中的应用研究

韩继欢<sup>1,2</sup>, 闫 丽<sup>1,2</sup>, 秦 哲<sup>1,2</sup>, 付厚利<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**传统注浆设计多以定性分析为主,设计缺乏准确性,极易造成不必要的投资成本及施工工程量。以黄岛地下水封洞库渗水超标部位为工程背景,运用层次分析法建立完整的注浆设计优化方案,对水封洞库两种注浆方案进行定性定量对比分析,评比结果科学、有效。研究结果表明:投资成本、施工工程量和施工进度对注浆方案的影响最大。注浆设计应遵循低成本、高效率、快施工的原则。

**关键词:**水封洞库;注浆减渗;层次分析法;注浆设计优化

中图分类号: TU472.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)05-0090-05

## Analytic Hierarchy Process Applied in the Grouting Design Optimization of Water Sealed Caverns

Han Jihuan<sup>1,2</sup>, Yan Li<sup>1,2</sup>, Qin Zhe<sup>1,2</sup>, Fu Houli<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,  
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The traditional grouting design gives priority to qualitative analysis and lacks accuracy, which easily cause waste in investment cost and construction quantity. Analytic hierarchy process was applied to the qualitative and quantitative analysis of the two kinds of grouting scheme by establishing a complete grouting design optimization in the Huangdao water sealed underground cavern where the seepage site was excessive. The appraisal results are scientific and effective. The results show that the cost of investment, construction and construction schedule of quantity are the three elements that influence grouting scheme most. Therefore, grouting design should follow the principle of low cost, high efficiency and fast construction.

**Key words:** water sealed caverns; grouting for reducing seepage; analytic hierarchy process; grouting design optimization

自 19 世纪初,法国土木工程师查理斯·贝里格尼(Charles Bering)首次运用注浆技术修复被水流侵蚀的挡潮闸砾砂土地基后,注浆技术便以污染小、效果显著的特点在世界各国得到快速发展和广泛应用,成为岩土工程界实用性强、应用领域广的一种特殊施工方法<sup>[1]</sup>。我国对注浆技术的研究和应用起步虽晚,但发展较快,某些方面已达到世界先进水平。注浆技术是一个复杂的工程<sup>[2-4]</sup>,围岩性质、地下水分布规律在施工中难以准确定量把握,施工操作无明确的标准和规程等,都对注浆技术的抉择产生极大的影响,传统方法仍依赖于经验法和类比法<sup>[5]</sup>。

20 世纪 70 年代美国运筹学家 Satty 教授提出层次分析法(analytic hierarchy process, AHP),此后逐渐成为一种实用的多方案或多目标决策方法,如对仓库、油库、矿井、地基处理及岩土工程方面的评价研

收稿日期: 2013-11-28

基金项目: 山东科技大学研究生创新基金项目(YC130312)

作者简介: 韩继欢(1988—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: hanjihuan881210@163.com

究<sup>[6-12]</sup>。层次分析法作为一种将定性问题转化为定量计算的系统分析与决策方法,适用于难以完全定量分析的复杂问题。

在洞库施工过程中,位于主洞室右侧顶拱的集中渗水点渗水量达到 20~30 L/min,造成地下水位急剧下降。需在断层破碎带、集中渗水或面域渗水大的区域开展注浆减渗工作。水封洞库的原理是利用洞室周边岩体裂隙水压力与洞库中的油压力之差封存洞库中的原油<sup>[13]</sup>,如图 1 所示。本研究运用相关理论,建立了完整的层次分析法注浆设计优化方案,将浅孔密布和水幕巷道两种注浆方案分成若干层次和因素,确定影响注浆效果的各主要因素的权重,从而得到方案的优良排序,探讨层次分析法在注浆工程设计中的应用前景。

## 1 工程概况

### 1.1 矿区概况

该矿区地下水封洞库位于山东省青岛市黄岛区,是我国在建的大型战略石油储备库之一,总占地面积约  $57.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,容量达  $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,包括地上辅助设施和地下工程两部分。洞库主洞室群分 3 组,每组 3 个洞室,洞室之间由施工巷道连通。洞室群顶部设水幕系统,由水幕孔和注水巷道组成,注水巷道底板高 4.5 m,宽 5.0 m,高程为 5.0 m,为城门洞型。

### 1.2 水文地质概况

洞库区处于胶南台隆北缘,属低山丘陵地貌。地层岩性主要为第四系残坡积、洪积层,早白垩世二长花岗岩,晚元古界花岗片麻岩及早白垩世中煌斑岩脉、闪长岩脉。

发生大面积线状渗水的区域位于主洞室上层 0+665 m~0+690 m 洞段,围岩为 III<sub>1</sub> 级,岩石整体性好、强度高,但横向节理、节理组较发育,发育密集区高达 15~17 条/m,并被岩石碎屑、灰色硬质矿物、白色高岭土填充。洞库区地下水主要类型为基岩裂隙水,地下水位为 93.07~268.48 m,含水介质为晚元古界花岗片麻岩。主洞室单位最大涌水量( $q_0$ )0.081 8~0.138  $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ,最大涌水量( $Q$ )455.63~768.52  $\text{m}^3/\text{d}$ 。整体来讲,地下水分布较集中,且局部地方与地表水力联系小。

## 2 注浆减渗方案

### 2.1 浅孔密布注浆方案

浅孔密布注浆以封堵表面节理为主。本方案按照孔深 3 m(垂直岩面深度),间距 1 m×1 m,外倾角 45°,布孔总数 480 个,环间分序、环内加密、孔内分段进行后注浆施工,并采用注浆塞封堵孔口和超细水泥材料进行注浆等措施。注浆示意图如图 2 所示。

### 2.2 水幕巷道注浆方案

水幕巷道注浆以封堵水幕孔附近节理裂隙为主,阻断了水的连通通道。本方案从水幕巷道⑤底板打斜孔至主洞室⑨顶拱 0+685 m 左右,采用分段后退式注浆,全面覆盖主洞室⑨顶拱 0+670~0+683 m 段,如图 3 所示。布孔覆盖范围为主洞室⑨中轴线两侧各 15 m,单孔深 68.1 m,间距 2 m,布孔总数 29 个,注浆段高为 25 m,总注浆长度 725 m,如图 3 所示。

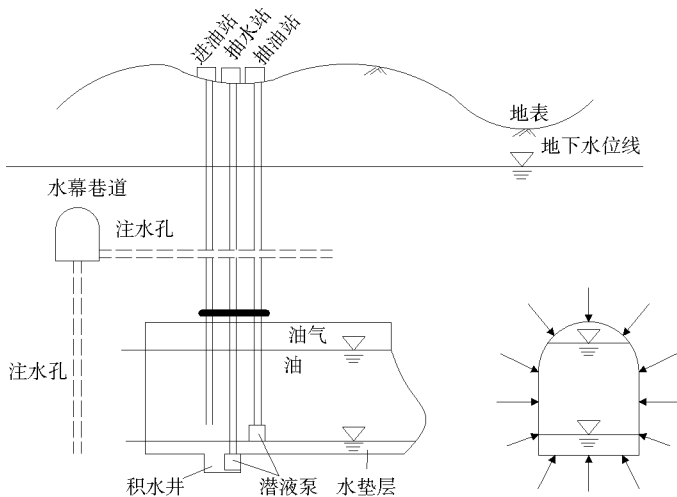


图 1 地下水封洞库储油原理

Fig. 1 The principle of underground rock cavern for oil storage

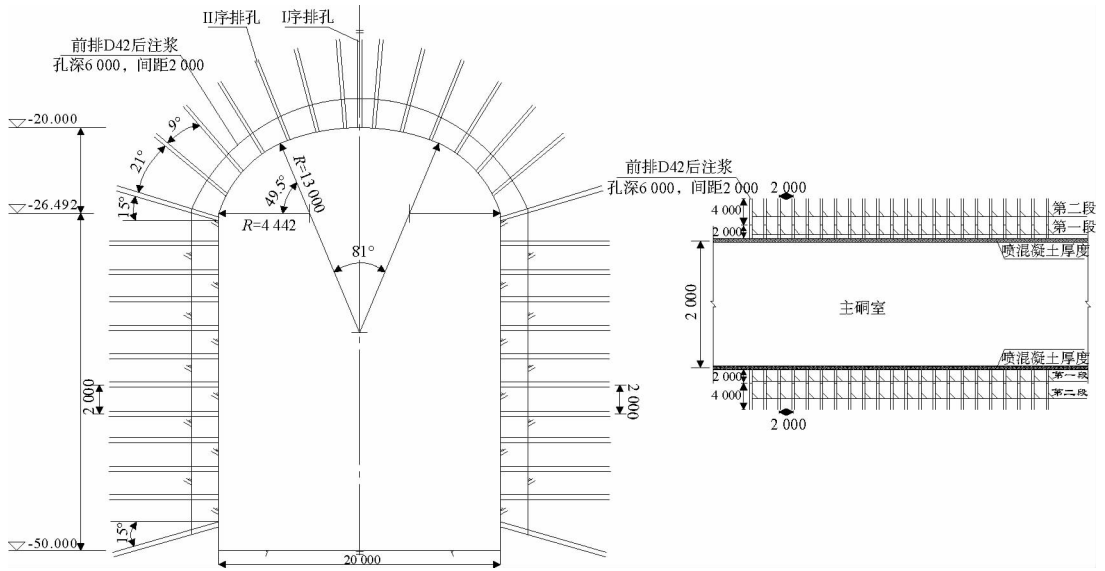


图 2 浅孔密布注浆示意图

Fig. 2 Sketch of hole infested grouting

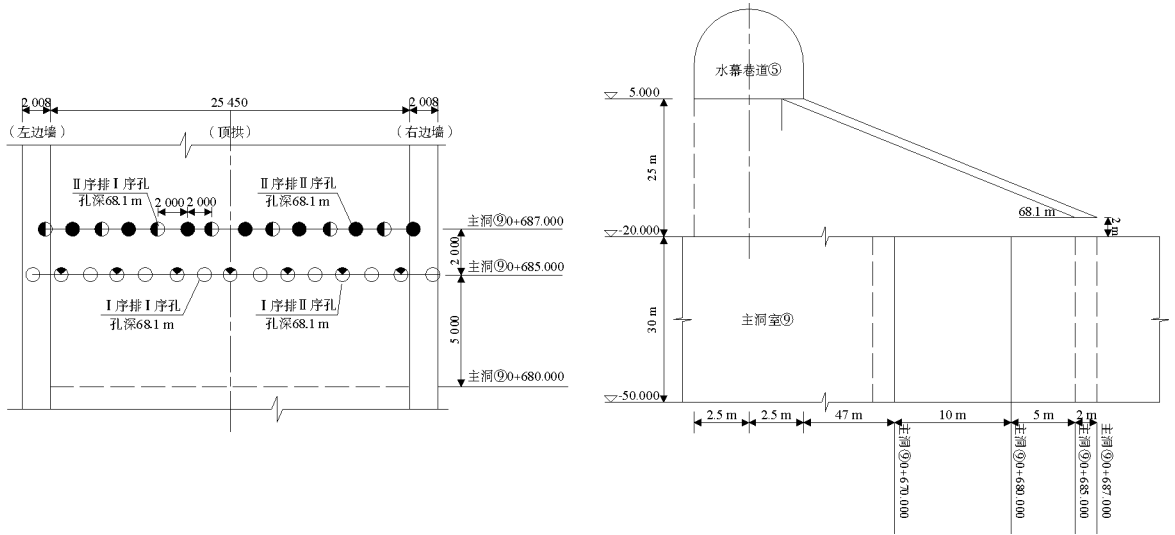


图 3 水幕注浆剖面示意图

Fig. 3 Sketch of water curtain grouting

### 3 层次分析法的应用

#### 3.1 层次分析法原理

层次分析法是确定权向量行之有效的方  
法<sup>[14]</sup>。其原理是将复杂问题分解为若干层次和若  
干因素,通过两两比较判断,确定每一层中因素的  
相对重要性,建立判断矩阵。通过计算矩阵的最大  
特征值及其相应的特征向量,得到各层次要素对上  
层次某要素的重要性次序,从而建立权重向量。

#### 3.2 注浆技术层次结构模型

根据对浅孔密布注浆和水幕巷道注浆的综合  
分析,得出注浆技术优化评价的层次结构模型,如图 4 所示。

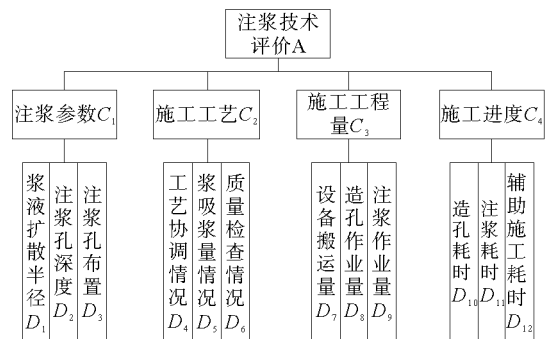


图 4 注浆技术评价层次结构模型

Fig. 4 Hierarchical model of grouting  
technology assessment

### 3.3 各指标相对权重的计算

准则层中的注浆参数、施工工艺、施工工程量和施工进度在目标层(注浆技术评价)中的相对重要程度,利用方根法计算,两两对比求出各因素的重要程度,其判断矩阵  $A$  如表 1 所示:

表 1 判断矩阵  $A$

Tab. 1 Judgment matrix

A	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
C <sub>1</sub>	1	6	4	5
C <sub>2</sub>	1/6	1	1/3	1/4
C <sub>3</sub>	1/4	3	1	1
C <sub>4</sub>	1/5	4	1	1

表 2 方案评分结果

Tab. 2 The result of scheme evaluation

功能 注浆方案	浅孔密布注浆	水幕巷道注浆	权重
D <sub>1</sub> 浆液扩散半径	79.6	78.9	0.126
D <sub>2</sub> 注浆孔深度	81.2	80.6	0.302
D <sub>3</sub> 注浆孔布置	82.6	88.0	0.391
D <sub>4</sub> 工艺协调情况	85.4	88.5	0.138
D <sub>5</sub> 吸浆量情况	91.7	88.3	0.427
D <sub>6</sub> 质量检查情况	92.5	90.2	0.514
D <sub>7</sub> 设备搬运量	80.3	81.9	0.132
D <sub>8</sub> 造孔作业量	91.6	86.1	0.433
D <sub>9</sub> 注浆作业量	90.3	85.4	0.470
D <sub>10</sub> 造孔耗时	92.7	83.8	0.371
D <sub>11</sub> 注浆耗时	93.1	82.3	0.366
D <sub>12</sub> 辅助施工耗时	89.0	87.6	0.217

以方根法求评价因素权重向量近似值  $M_i$ :

$$M_1 = 3.310; M_2 = 0.343; M_3 = 0.931; M_4 = 0.946.$$

将评价因素权重向量近似值  $M_i$  作归一化处理,求

$$W_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}.$$

$$W_1 = 0.599; W_2 = 0.062; W_3 = 0.168; W_4 = 0.171,$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} = 4.133,$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \approx 0.044,$$

$$CR = CI / RI = 0.044 / 1.12 \approx 0.039 < 0.1.$$

结果符合一致性要求。

### 3.4 方案评分

针对工程的实际情况,向高校教授、学者,有多年施工经验的项目管理人员和设计院工作者分别对两种注浆方案进行专家调研评分,对结果统计后取平均值,如表 2 所示。

计算注浆的功能评价系数,功能评价系数 =

$$\frac{\sum (\text{综合评分} \times \text{权重})}{\sum_{\text{总}} (\text{综合评分} \times \text{权重})}.$$

经估算,浅孔密布注浆和水幕巷道注浆两种方案的预计投资成本分别为 168.4 万元和 173.8 万元,即

$$\text{浅孔密布注浆的成本评价系数} = \frac{\text{浅孔密布注浆成本}}{\text{总成本}};$$

$$\text{水幕巷道注浆的成本评价系数} = \frac{\text{水幕巷道注浆成本}}{\text{总成本}}.$$

得出两种注浆方案的价值评价系数如表 3 所示。

$$0.9665 < 1.0345,$$

因此,浅孔密布注浆方案

优于水幕巷道注浆方案。

对于多方案的比较,价值

系数越大,方案越优。

表 3 价值评价系数表

Tab. 3 Value evaluation coefficient

项目	功能评价系数	成本评价系数	价值系数
浅孔密布注浆	0.5091	0.4921	0.5091/0.4921 = 1.0345
水幕巷道注浆	0.4909	0.5079	0.4909/0.5079 = 0.9665

## 4 结论

1) 投资成本、施工工程量和施工进度是选择注浆方案的主要因素。注浆设计方案应遵循成本低、效率高、施工快的原则,采用浅孔密布注浆方案可减少投资、缩短工期,降低工程量。

2) 注浆工程是一个涉及多层次、多变量及变量之间相互影响的复杂系统,选择适宜的注浆方案需多因素综合考虑。层次分析法将问题层次化,对影响注浆效果的各因素进行定量与定性分析,克服了传统注浆设计过于保守、缺乏准确性的缺点,可以节省大量的人力、物力和财力。

参考文献:

- [1]郝哲,王英刚,刘斌.岩体注浆堵水的可靠性设计[J].岩土工程学报,2002,24(5):592-595.  
Hao Zhe, Wang Yinggang, Liu Bin. Reliability design of grouting for stopping up water in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 592-595.
- [2]郝哲,王来贵,刘斌.岩体注浆理论与应用[M].北京:地质出版社,2006:1-2.
- [3]韩立军,张茂林,贺永年,等.岩土加固技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005:130.
- [4]乔卫国,孟庆彬,林登阁,等.唐口煤矿主井筒注浆堵水方案及应用[J].煤炭科学技术,2012,38(2):19-21.  
Qiao Weiguo, Meng Qingbin, Lin Dengge, et al. Grouting and water sealing plan and application to main shaft in Tangkou coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 38(2): 19-21.
- [5]陈兰云,杜宁,贺永年,等.基于模糊决策的立井堵水注浆方案选择及其应用[J].地质与勘探,2009,45(1):99-102.  
Chen Lanyun, Du Ning, He Yongnian, et al. Based on fuzzy decision of shaft plugging grouting scheme selection and its applications[J]. Geology and Exploration, 2009, 45(1): 99-102.
- [6]秦波涛,李增华.改进层次分析法用于矿井安全性综合评价[J].西安科技学院学报,2002,22(2):126-129.  
Qin Botao, Li Zenghua. The improved analytic hierarchy process used in mine safety comprehensive evaluation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2002, 22(2): 126-129.
- [7]高新春,冯洪渊.用模糊层次分析法评价矿井安全状况[J].矿业安全与环保,2003,30(5):6-8.  
Gao Xinchun, Feng Hongyuan. Using fuzzy analytic hierarchy process to evaluate mine safety[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2003, 30(5): 6-8.
- [8]刘亚静,毛善君,姚纪明,等.基于层次分析法的煤矿安全综合评价[J].矿业研究与开发,2007,27(2):82-84.  
Liu Yajing, Mao Shanjun, Yao Jiming, et al. Comprehensive safety evaluation of coal mine based on analytic hierarchy process [J]. Mining Research & Development, 2007, 27(2): 82-84.
- [9]荆全忠,姜秀慧,杨鉴淞,等.基于层次分析法(AHP)的煤矿安全生产能力指标体系研究[J].中国安全科学学报,2006,16(9):74-79.  
Jing Quanzhong, Jiang Xiuhui, Yang Jiansong, et al. Study on index system of capability of production safety in coal mine based on AHP[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 74-79.
- [10]李玉明,张嘉勇,赵礼兵.基于层次分析法建立瓦斯事故评价模型[J].煤炭技术,2006,25(9):66-67.  
Li Yuming, Zhang Jiayong, Zhao Libing. Constituting the assessment model of the methane accident by the method of layered analysis[J]. Coal Technology, 2006, 25(9): 66-67.
- [11]范金志,郭德勇,张建国.层次分析法确定煤与瓦斯突出影响因素的权重[J].矿山安全与环保,2004,31(3):4-5.  
Fan Jinzhi, Guo Deyong, Zhang Jianguo. Analytic hierarchy process to determine weights of affecting factors of coal and gas outburst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2004, 31(3): 4-5.
- [12]张文泉,俞海玲.应用层次分析法确定矿井顶板涌水影响因素的权值[J].矿业安全与环保,2006,33(2):50-52.  
Zhang Wenquan, Yu Hailing. Application of analytic hierarchy process to determine factors affecting mine roof gushing weights[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006, 33(2): 50-52.
- [13]蒋中明,冯树荣,曾铃,等.水封油库地下水位动态变化特性数值研究[J].岩土工程学报,2011,33(11):1780-1785.  
Jiang Zhongming, Feng Shurong, Zeng Ling, et al. Numerical study on variation features of water table in area of underground rock cavern for oil storage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1780-1785.
- [14]苏欣,袁宗明,王维,等.层次分析法在油库安全评价中的应用[J].天然气与石油,2006,24(1):1-4.  
Su Xin, Yuan Zongming, Wang Wei, et al. Application of analytic hierarchy process in the oil depot safety evaluation [J]. Natural Gas and Oil, 2006, 24(1): 1-4.

(责任编辑:吕海亮)