

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222593

基于侧扫声呐的水下混凝土结构缺陷探查与量化分析

江文浩¹, 陆俊^{1,2}, 明攀¹, 刘妙燕¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为保证水下混凝土结构的服役性能,亟需探查与量化分析水下混凝土结构缺陷。针对实际工程中常见的水下混凝土结构崩碎、坑陷等破坏形式,设计制作了包含不同形状、不同尺寸的凹陷缺陷模型板,使用无人船搭载侧扫声呐在试验水池中对缺陷模型板进行定速巡航扫测,提取出不同形状缺陷沿横向断面回波强度波形图,归纳得到缺陷区声学特征,对不同尺寸缺陷原始声呐图像进行图像分割、数学形态学处理和边缘特征提取,得到了清晰完整的缺陷区域轮廓,并通过缺陷区域纵向长度解译,实现了水下混凝土缺陷的量化分析,识别误差比在10%以内,为水下混凝土结构缺陷的探查提供了新方法。

关键词: 水下混凝土结构; 侧扫声呐; 缺陷探查; 图像处理; 量化分析

中图分类号: TV36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0161-05

1 引言

我国北部、西部地区冬季高温差环境下,冻融循环引发局部应力变化使水工混凝土结构出现崩碎破坏。南水北调工程为代表的输调水明渠在低温环境中易受冰塞、冰坝等冰害影响,冰体对水工混凝土结构的静力挤压、冲撞切割可形成坑陷破坏^[1]。随着使用年限增加,局部损伤发展形成结构损伤,对水工建筑物的功能效用将产生严重影响。因此,对存在破坏风险的水下混凝土结构开展探查具有重要意义。传统人工潜水探查法可靠度高,局限于检测效率低且水下存在安全隐患区域实施困难。以AUV、ROV为载具的摄像视觉探查方法能突破检测区域限制,其局限性在于对水体能见度要求高,检测图像受环境因素干扰明显^[2]。侧扫声呐以声波为媒介,水下传播时声波衰减率远低于电磁波,因此利用侧扫声呐开展水下探查工作独具优势。侧扫声呐在水下目标定性识别领域已应用较多^[3,4],但在水下混凝土缺陷识别与定量分析方面研究尚浅。受高水体浑浊度、换能器基阵摇摆、水下散射回波、电子元件及电源噪声等影响,原始声呐图像存在噪声干扰多、边缘区域模糊等问题^[5]。本文通过提取目标区沿

横向断面的回波强度波形图,揭示了缺陷区回波规律,完成了缺陷识别。通过图像处理技术提取得到目标区轮廓,经由纵向长度解译实现了缺陷的量化分析,为利用侧扫声呐开展水下混凝土缺陷定量探查提供了依据。

2 试验方案设计

2.1 缺陷模型设计

为模拟水工混凝土结构常出现的崩碎、坑陷等破坏特征,缺陷设置为凹陷形式。工程中缺陷形状各异,模型板①(图1(a))分别设置三角形、正四边形和圆形缺陷。为进一步开展缺陷定量分析须控制形状变量,模型板②(图1(b))设置三个边长不同的正四边形缺陷。按工程实际需要,两板的几何尺寸见图1。缺陷厚度设计为4 cm^[6]。声波反射结果主要受目标物几何特征影响,由于

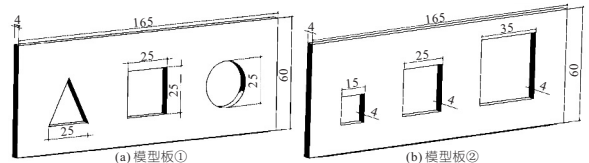


图1 缺陷模型示意图(单位:cm)

Fig. 1 Diagram of defect model

收稿日期: 2022-12-15, 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600700, SQ2020YFF0426367); 国家自然科学基金项目(52171272)

作者简介: 江文浩(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构病害诊断与修复, E-mail: jwhxey@163.com

通讯作者: 陆俊(1981-), 男, 博士, 教授级高级工程师、博导, 研究方向为水工结构病害诊断与修复, E-mail: lujun@nhri. cn

模型长厚比较大,防止模型体水下置放困难,使用表面光滑的硬质高密度(0.7 kg/m³)PVC 板制作模型。

2.2 试验设备

试验使用 Shark-S900P 侧扫声呐,工作频率 900 kHz,水平波束宽度 0.3°,垂直波束开角 50°。载具为 iBoat BS3 无人船,船身尺寸 1.10 m×0.52 m×0.30 m,最高航行速度 6.5 m/s。使用 iBoat 船控软件设置航测区域、路径,自动巡航模式下可设置 0.1~6.5 m/s 定速巡航。

2.3 试验方案

将模型板和无人船置于水池中,其中缺陷模型板采用钢架固定,使用螺栓将模型板固定于钢架斜面,倾角为 45°,沿池边平行方向放置于池底。测线与模型板平行,横向间距为 2.4 m,采用定速巡航方式控制声呐图像速度畸变,单波束侧扫声呐测量最大船速不应超过 6 kn(约为 3.1 m/s)^[7],具体计算公式为:

$$v_{max} = 0.926mLc / (nR) \quad (1)$$

式中, v_{max} 为最大船速, kn; m 为波束或脉冲系数,其中单波束侧扫声呐取 1,多波束侧扫声呐和多脉冲侧扫声呐取值大于 1、小于波束数或脉冲数; L 为需扫测到的最小目标物尺寸, m; c 为声波在海水中的传播速度, m/s; n 为每次通过探测到的目标的最小脉冲数,粗扫取 3,精扫取 5; R 为选用量程, m。

最小目标物尺寸 L 为 4 cm, n 按精扫取 5,声波在水中的传播速度 c 取 1 500 m/s,单侧最大量程 R 为 45 m,单波束侧扫声呐 m 取 1。由式(1)算得 $v_{max} = 0.247 \text{ kn} = 0.127 \text{ m/s}$,试验过程中航速设置为 0.1 m/s。

3 不同形状缺陷探查结果与分析

模型板①声呐扫测结果见图 2(水平向为扫测方向)。数据采集过程为匀速航行,所得图像对应帧数区间存在线性关系,据此对图 2 中不同形状缺陷所处帧数区间进行定位,结果见表 1。



图 2 模型板①声呐图像

Fig. 2 Sonar image of model board ①

表 1 缺陷区所处帧数区间

Tab. 1 Frame number ranges of defect areas 像素

缺陷区	起始帧	终止帧	帧数长	缺陷区	起始帧	终止帧	帧数长
三角形缺陷	395	426	31	圆形缺陷	518	549	31
正方形缺陷	457	487	30	模型板①	370	574	204

3 个缺陷区以 15 帧为间隔提取波形断面图,为进行对照在非缺陷区提取 1 处波形断面,各断面横向距离与回波强度关系见图 3。由图 3 可看出,模型板区回声强度随横向距离增加先增大后减小,回声强度峰值在 200 dB 左右,均处于横向距离 0.24~0.40 m 区间。依据模型板同换能器几何位置关系,凹陷缺陷处回声强度对应波形图横向距离 0~0.16 m 区间(以下用目标区间代替)。对比缺陷区与非缺陷区波形变化,缺陷区在目标区间回声强度均未超过 120 dB,即凹陷缺陷目标区间回声强度峰值显著低于非缺陷区目标区间。比较不同形状缺陷区中间帧数断面,目标区间回声强度峰值均在 60 dB 左右。比较同一缺陷形状中间帧数断面与边缘帧数断面,三角形缺陷两侧边缘帧数断面目标区间峰值达 100~120 dB,均高于中间断面,但仍显著低于非缺陷区强度值;正方形缺陷边缘帧数断面与中间帧数断面目标区间峰值回声强度均未超过 60 dB;圆形缺陷边缘断面目标区间峰值达 90~100 dB,均高于中间断面。三角形、圆形缺陷边缘处横向缺陷长度变短,对应帧数断面表现出回声强度增强,正方形缺陷边缘处则未表现出此特征。

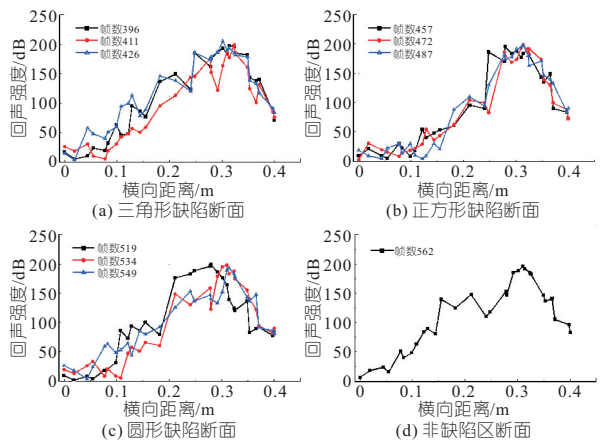


图 3 不同形状缺陷回声强度图

Fig. 3 Echo intensity images of defects with different shapes

4 缺陷尺寸量化分析

受高水体浑浊度、水下散射回波等因素影响,侧扫声呐原始图像存在噪声信号干扰,目标边缘常出现模糊不清、交错混杂的情况,为缺陷目标量化分析带来困难,须利用算法对试验图像进行处理。

4.1 图像分割处理

基于 K-means 算法^[8]开展图像分割,核心概念是给定聚类数 k ,在 i 个对象中随机选取 k 个聚类中心,将 i 个对象依据与聚类中心间距最小

的原则划分为 k 个聚类,依照聚类中对象均值重新计算各聚类中心,通过迭代计算,直至第 $n+1$ 次计算得到的聚类中心与第 n 次完全相同,聚类计算完成。

侧扫声呐原始结果图中主要分为高亮区域、阴影区域和背景区域,据此给定聚类数 $k=3$ 。输入原始图像,经迭代运算将图像分割为 3 个灰度级,处理结果见图 4。由图 4 可知,处理后目标区域噪点得到抑制,边缘轮廓初步显现。

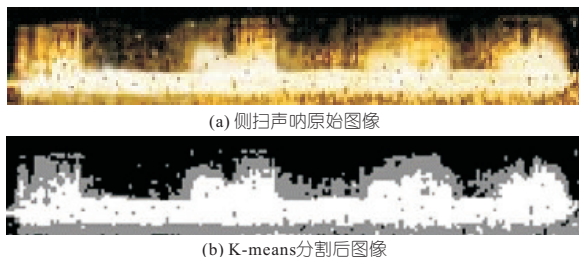


图 4 K-means 图像处理结果

Fig. 4 Results of K-means image processing

4.2 图像边缘光滑处理

采用二值图像数学形态学,其最基本运算为膨胀和腐蚀^[9]。假设 A 、 B 均为二维整数空间 Z^2 中的集合,一般称 A 为图像集合, B 为结构元素。用 B 来膨胀 A 写作 $A \oplus B$,其中 \oplus 为膨胀算符,膨胀运算定义为:

$$A \oplus B = \{x \mid [(\hat{B})_x \cap A] \neq \emptyset\} \quad (2)$$

式中, $(\hat{B})_x$ 为对集合 B 先做关于原点的映射,再将映像平移 x ; \emptyset 为空集。

用 B 来膨胀 A 即得到 B 的映像位移与 A 存在非零交集时 B 原点位置的集合。经过膨胀运算,目标图像区域扩大,边缘狭缝区域缩小或消失,图像区域内空洞部分得到填补。

用 B 来腐蚀 A 写作 $A \ominus B$,其中 \ominus 为腐蚀算符,腐蚀运算定义为:

$$A \ominus B = \{x \mid (B)_x \subseteq A\} \quad (3)$$

式中, $(B)_x$ 为将集合 B 平移 x 。

用 B 来腐蚀 A 即得到 B 完全包含于 A 时 B 原点位置的集合。经过腐蚀运算,目标图像区域缩小,边缘细小突起区域消失,除去小尺寸且无意义的物体。

对 K-means 分割图像进行二值化处理,高亮区域是缺陷目标的特征回响区,与其他两个区域应予区分,二值化后图像分为高亮区与阴影区两个灰度级,所得二值化图像见图 5(a)。对二值化后图像使用数学形态学处理,考虑抑制小尺寸孤立点,采用 4×4 正方形结构元素对图像进行腐蚀运算,处理后(结果见图 5(b))目标边缘大多数细

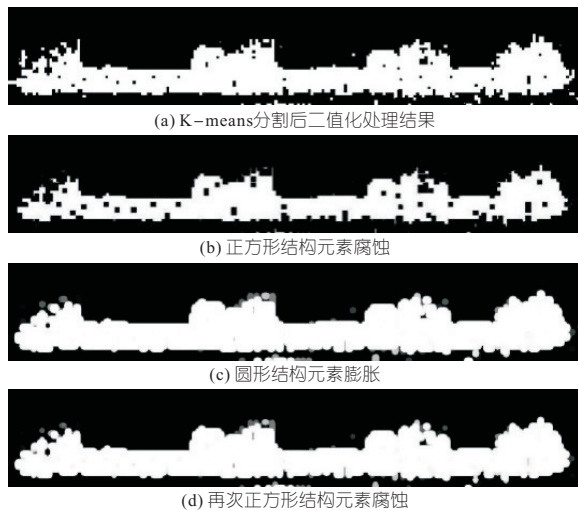


图 5 二值图像数学形态学处理结果

Fig. 5 Results of binary image mathematical morphology processing

小孤立点消失。为处理目标区内部空洞与边缘狭缝,使用半径为 8 的圆形结构元素对图像进行膨胀运算,处理后(结果见图 5(c))目标内部空洞部分得到填充,外缘狭缝部分消失,缺陷目标区轮廓显现。经膨胀运算,目标轮廓扩大,再次使用 4×4 正方形结构元素对图像进行腐蚀运算,处理后(结果见图 5(d))得到边缘光滑的目标区域。

4.3 边缘特征提取

应用 Canny 算法^[10]先用高斯滤波器平滑图像,使用性能最好的 Sobel 算子计算梯度 S_x 、 S_y :

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用 Sobel 算子依次求得 x 、 y 方向梯度 G_x 、 G_y ,代入幅值 G 和方向角 θ 公式求得灰度梯度的大小和方向:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

$$\theta = \arctan(G_y/G_x) \quad (6)$$

取梯度幅值图的小邻域,比较中心像素及其梯度方向上的相邻像素,若中心像素值不大于梯度方向相邻像素值,将其设置为零,反之,将其作为局部最大予以保留。选取高低阈值最终依靠滞后阈值化方法确定边缘点^[9]。所得结果见图 6。由图 6 可知,提取得到的目标轮廓清晰且完整连续。



图 6 目标边缘轮廓提取

Fig. 6 Target edge contour extraction

4.4 缺陷的识别与量化分析

对图 6 进行负片处理,利用像素坐标添加坐标轴,得到图 7(a)。侧扫声呐具有凸起区域回声

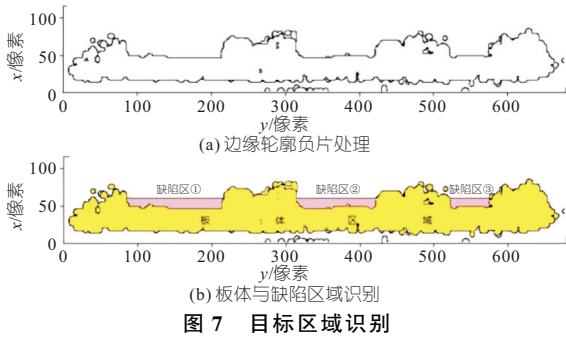


Fig. 7 Target area identification

强、凹陷区域回声弱的特征,从图 7(a)中识别得到板体区域为一沿 y 轴向延伸且存在 3 处明显凹陷的条带区域。3 处凹陷区域分别对应模型板 ②③ 处缺陷,为使目标区域更易辨识,对板体区域及缺陷区①、②、③均着色处理,位置见图 7(b)。

由无人船扫测航向,将缺陷区①~③分别与尺寸为 35、25、15 cm 的凹陷缺陷相对应。为读取目标区域纵向像素长度,须准确选取板体及各缺陷区左、右缘识别点。板体区域左、右缘识别点选取按 y 轴向长度最大原则。凹陷处因存在横向内侧面回声干扰,识别点选取应尽可能远离模型板近声源面。

设任意缺陷区左缘识别点 T 坐标为 (x_T, y_T) ,右缘识别点 B 坐标为 (x_B, y_B) ,为减少回声影响, x_T, x_B 应尽可能小,连接两点的纵向直线为 $x = x_L$,缺陷区纵向长度(像素) L 满足:

$$\begin{cases} L = y_B - y_T & y_B > y_{\min} \text{ 且 } y_T < y_{\max} \\ x_L = \max\{x_T, x_B\} \end{cases} \quad (7)$$

式中, y_{\min}, y_{\max} 分别为缺陷区左右缘最内侧纵坐标。

据此在板体及缺陷区左、右缘分别取得识别点,读取识别点横、纵坐标,可得不同区域的纵向长度,结果见表 2。

表 2 板体及缺陷区域边缘坐标与纵向长度

Tab. 2 Edge coordinate and longitudinal length of plate and defect area

识别点位置	像素			识别点位置	像素		
	横向坐标	纵向坐标	纵向长度		横向坐标	纵向坐标	纵向长度
板体区域左缘	33	8	665	缺陷区②左缘	58	314	107
板体区域右缘	33	673		缺陷区②右缘	58	421	
缺陷区①左缘	57	85	128	缺陷区③左缘	51	521	55
缺陷区①右缘	57	213		缺陷区③右缘	51	576	

数据采集过程中换能器保持匀速直线运动,按纵向线性比例关系,以板体为参照求解各缺陷区纵向长度。式(7)求得缺陷区纵向长度(像素)依次为 $L_i (i=1,2,3)$,板体区域纵向长度(像素)为 L_p 。缺陷区实际长度依次为 $R_i (i=1,2,3)$,板体区域实际长度为 R_p ,设三个缺陷区测得纵向长度依次为 $R'_i (i=1,2,3)$,缺陷测量误差为 δ_i ,

则 R'_i, δ_i 满足:

$$\begin{cases} R'_i = L_i R_p / L_p \\ \delta_i = |R'_i - R_i| \end{cases} \quad (8)$$

已知板体实际纵向长度为 165 cm,由式(8)计算各缺陷区测量长度,并求解测量误差,结果见表 3。由表 3 可知,试验预设的 3 个缺陷区域均得到准确识别,实际测得的缺陷区长度与设计值之间最大误差为 3.24 cm,最大误差比为 9.26%。

表 3 识别区域测量结果统计

Tab. 3 Statistical of measurement results in identified areas

识别区域	测得长度/cm	实际长度/cm	误差/cm	误差比/%
板体区域		165.00		
缺陷区①	31.76	35.00	3.24	9.26
缺陷区②	26.55	25.00	1.55	6.20
缺陷区③	13.65	15.00	1.35	9.00

5 结论

a. 受制于已有水下探查方法的不足,本文探究基于侧扫声纳的水下混凝土结构缺陷探查方法,经水池试验获取不同形状、不同尺寸缺陷原始声纳图像,通过回声强度波形图完成缺陷识别,利用图像分割等算法处理提取出目标缺陷轮廓,实现了缺陷的量化分析。

b. 不同形状缺陷横向断面回声强度波形图显示,凹陷处所处横向距离区间内回声强度显著弱于非缺陷区对应区间,三角形、圆形缺陷区中间断面目标区间回声强度弱于边缘断面,正方形缺陷区无此特征。缺陷区横向长度越短,目标区间回声强度越强。

c. 经 K-means 聚类分割完成图像灰度分级;利用数学形态学运算消除边缘狭缝、细小突起、局部细小空洞与孤立点等瑕疵;通过 Canny 算法提取得到清晰、连续、完整的目标区域轮廓,再由图像纵向长度的线性关系求解得到缺陷区测量长度。对于 15、25、35 cm 的目标缺陷,识别误差比控制在 10% 以内,实现了基于侧扫声纳的水下混凝土缺陷定量探查,为实际工程应用提供了参考。

参考文献:

[1] 段文刚,黄国兵,杨金波,等.长距离调水明渠冬季输水冰情分析与安全调度[J].南水北调与水利科技,2016,14(6):96-104.
 [2] 顾临怡,宋琦,殷宏伟,等.基于 ROV 等载体的水下搜救流程综述[J].中国科学:信息科学,2018,48(9):1137-1151.
 [3] 周兴华,姜小俊,史永忠.侧扫声纳和浅地层剖面

- 仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007(4): 64-67.
- [4] POWERS J, BREWER S K, LONG J M, et al. Evaluating the use of side-scan sonar for detecting freshwater mussel beds in turbid river environments [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 743(1): 127-137.
- [5] 阳凡林, 暴景阳, 胡兴树. 水下地形测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL191-2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 侧扫声呐测量技术要
- 求: JT/T 1362-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [8] CHEN W, HE C, JI C, et al. An improved K-means algorithm for underwater image background segmentation [J]. *Multimedia tools and applications*, 2021, 80(14): 21059-21083.
- [9] 章毓晋. 图像工程(中册)[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [10] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 199-209.

Detection and Quantitative Analysis of Defects of Underwater Concrete Structure Based on Side Scan Sonar

JIANG Wen-hao¹, LU Jun^{1,2}, MING Pan¹, LIU Miao-yan¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to ensure the service performance of underwater concrete structures, it is urgent to carry out the detections and quantitative analyses of underwater concrete structure defects. Aiming at the common failure forms of underwater concrete structures such as collapse and indentation in practical projects, model plates with different shapes and sizes of indentations were designed and made. Using the side scan sonar carried by the unmanned ship, the defect model plates were scanned at a constant speed in a test pool. The acoustic characteristics of the defect areas were summarized by extracting the echo intensity waveforms of different shaped defects along the transverse sections. Image segmentation, mathematical morphology processing, and edge feature extraction were carried out on the original sonar image of different sizes of defects to obtain clear and complete contours of the defect areas. Through the interpretation of the longitudinal length of the defect areas, the quantitative analyses of underwater concrete defects were realized, and the identification error ratios were within 10%. It provides a new method for detecting the defects of underwater concrete structures.

Key words: underwater concrete structure; side scan sonar; defect detection; image processing; quantitative analysis

(上接第 150 页)

Study on Three-dimensional Seepage Mechanism of Underground Powerhouse and Complex Roadways of Pumped Storage Power Station Constructed by Abandoned Coal Mine

MAO Zhong-hua¹, SONG Li-jun², WANG Hui-min³, ZHANG Pei-ding¹, XU Liang²,
HAN Yun², LUO Yu-long³, SHENG Jin-chang³, ZHAN Mei-li³, HE Shu-yuan³

(1. Shanghai Datun Energy Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2. China Electric Power Development Research Institute Co., Ltd., Beijing 100761, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The three-dimensional seepage analysis and control of underground plants and complex tunnels are related to the long-term seepage safety of underground spaces, which is one of the key technical issues facing the construction of pumped storage power stations by abandoned coal mines. Considering the reinforcement schemes for different surrounding rocks of the lower reservoir, the spatial location of the upper reservoir, the main powerhouse and the coal mine extraction area, a refined three-dimensional finite element model for seepage analysis of complex underground space in Longdong coal mine was established. Three-dimensional seepage field analysis was carried out for typical working conditions during the construction and operation periods. Important design parameters such as external water pressure and seepage volume of the underground tunnels during the construction and operation periods were obtained. Refined simulation of the numerous drainage holes in pumped storage power stations was implemented. By calculations of the seepage field under various unfavourable conditions, the optimal spacing of the drainage holes was determined. The research results are of great significance in the evaluation of seepage safety and the design of underground roadway protection schemes for the construction of pumped storage power stations by abandoned coal mines.

Key words: abandoned coal mine; pumped storage power station; three-dimensional seepage analysis; external hydraulic pressure; drainage holes