

# 基于土工膜透声特性的膜下垫层渗透变形声波特征试验研究

田晓丹<sup>1,2</sup>, 姜晓桢<sup>3</sup>, 殷友超<sup>2</sup>, 石泽译<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243071;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 针对土工膜易发生局部破损和渗漏、引发膜下垫层渗透变形的问题, 提出利用土工膜的良好透声特性, 开展膜下垫层渗透变形声学监测研究。通过自制的试验装置开展了土工膜透声特性与膜下垫层渗透变形声波特征的室内试验研究。结果表明: PVC 土工膜与 PE 土工膜均具有一定的透声性, 并且两种土工膜对于低频声波的透声效果均好于高频声波; 膜下垫层渗透变形声波能量主要集中在低(250 Hz 以下)、中(500~750 Hz)、高(1000~1250 Hz) 3 个频段上, 低频段声波能量最大; 膜下垫层渗透变形时最大瞬时声波声压级为 119.29 dB, 稳定后的声波声压级仍能维持在 90 dB 左右, 均大于无较大扰动时相关水域水下背景噪声的观测结果。

**关键词:** 土工膜; 局部破损; 垫层; 渗透变形; 声学监测

中图分类号: TV49

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)02-0031-07

**Experimental study on acoustic characteristics of seepage deformation of geomembrane cushion based on sound transmission characteristics of geomembrane**//TIAN Xiaodan<sup>1,2</sup>, JIANG Xiaozhen<sup>3</sup>, YIN Youchao<sup>2</sup>, SHI Zeyi<sup>2</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243071, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** To address the issues of local damage and leakage in geomembranes, which can lead to seepage deformation in the geomembrane cushion, a study on acoustic monitoring of seepage deformation of geomembrane cushion is proposed to be carried out based on the excellent sound transmission properties of geomembranes. A laboratory experimental study on the sound transmission properties of geomembranes and the acoustic characteristics of seepage deformation of geomembrane cushion was conducted using a self-designed testing apparatus. The results show that both PVC and PE geomembranes exhibit a certain degree of sound transmission, with better sound transmission effect for low-frequency sound waves than that for high-frequency sound waves. The acoustic energy of the seepage deformation of geomembrane cushion is mainly concentrated in three frequency bands: low (below 250 Hz), medium (500 to 750 Hz), and high (1000 to 1250 Hz), with the highest energy in the low-frequency band. The maximum instantaneous sound wave intensity during the seepage deformation of the geomembrane cushion is 119.29 dB, while the stable sound wave intensity can still be maintained at around 90 dB, both of which are greater than the observation results of the underwater background noise in relevant water areas under undisturbed conditions.

**Key words:** geomembrane; local defects; cushion; seepage deformation; acoustic monitoring

土工膜作为一种新型防渗材料, 与传统的混凝土和黏土相比, 具有防渗性能优、适应变形能力强、低碳环保、施工便捷等优点<sup>[1]</sup>, 是目前抽水蓄能电站水库防渗所采用的主要防渗材料之一<sup>[2]</sup>。但土

工膜常在实际工程中产生局部破损, 进而在蓄水后发生渗漏<sup>[3-6]</sup>, 局部渗漏往往会引起膜下垫层的渗透变形, 进而影响结构安全。国内某抽水蓄能电站水库在进行放空检查时发现, 进出水塔周边土工膜存

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51509165, 51709114); 国家重点研发计划项目(2021YFC3000103); 马鞍山市水工程健康诊断与修复技术研究中心建设项目(2023msgc001)

**作者简介:** 田晓丹(1985—), 女, 讲师, 硕士, 主要从事水工渗流研究。E-mail: 375824327@qq.com

**通信作者:** 姜晓桢(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水工结构与土工膜防渗研究。E-mail: xzjiang@nhri.cn

在局部破损情况,破损发生在集中渗漏区,破损长度仅约 1.2 m,而在破损处左右两侧沿塔基座约 41 m 长范围内的垫层均发生了不同程度的渗透变形,并且越靠近破损处渗透变形越严重,在破损处周边 3~7 m 范围内垫层细颗粒已被渗漏水完全掏空<sup>[7]</sup>。掏空后土工膜处于“悬空”状态,其受力条件大大恶化,导致土工膜局部破损进一步扩大,最终影响结构安全。该电站在放空检查前,量水堰流量虽较大,但水质清澈,无明显夹砂现象,因此管理单位无法通过量水堰来判断垫层是否已发生渗透变形,这对抽水蓄能电站安全高效运行是不利的。

1976 年 Koerner 等<sup>[8]</sup>通过试验证实了土坝渗流过程中会产生声波。徐炳锋等<sup>[9-10]</sup>开展了土体管涌和流土等渗透变形声发射现象的试验研究,也证实了渗透变形产生了声波,且声波强度随着坡降和渗流流速的增加而增强。明攀等<sup>[11-12]</sup>开展了堤基管涌破坏过程中的声发射信号特性研究,发现在管涌未发生、管涌发生初期及发生后均能监听到土体有声波发出,是一种伴随渗流作用而产生的连续发声现象。上述研究成果为研发膜下垫层渗透变形监测方法提供了思路,但由于土体为气、固、液三相多孔介质,声波在土体内传播衰减很快<sup>[13]</sup>,仅当监听设备在声源附近有限范围内才能被探测到,而水是声波传播的优良介质,声波在水中传播时衰减很小。频率为 500 Hz 的声波平面波在水中传播 1 km,其衰减仅约 0.025 dB<sup>[14]</sup>,因此在水中监听膜下垫层渗透变形声波可能是更好的选择。而要在水中监听到土工膜下的垫层渗透变形声波,土工膜的透声特性是关键。根据材料透声特性<sup>[15]</sup>可知,声波在两种介质界面的透射效果与两种介质的阻抗匹配程度和结构厚度有关,阻抗匹配程度越高,厚度越小,其透声效果就越好。其中,阻抗匹配指的是两者的特性阻抗相等或相近,反之则称为阻抗失配。特性阻抗一般用介质中声速  $c$  和介质密度  $\rho$  的乘积表示<sup>[16]</sup>,水的特性阻抗为  $(1.4\sim 1.5)\times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。目前工程中常用的土工膜是以聚乙烯和聚氯乙烯为代表的高分子材料为主,这类材料的特性阻抗与水接近,以聚乙烯为例,其特性阻抗约为  $1.8\times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ <sup>[17]</sup>(聚乙烯中声速约为 1900 m/s,聚乙烯密度约为 940 kg/m<sup>3</sup>)。因此以高分子材料为主的土工膜天然具有与水阻抗匹配的特性,透声性能优良。另外,常用的土工膜厚度一般不超过 2 mm,是目前几种防渗结构中厚度最小的,按关淑英<sup>[17]</sup>给出的聚乙烯中声波衰减系数 0.02 dB/mm 计算,厚度 2 mm 的聚乙烯土工膜内声波衰减仅 0.04 dB。因此土工膜极薄的厚度更有助于发挥其优良的透声特性,使膜下声波向膜上水体

传播成为可能。

为进一步探究土工膜局部破损渗漏导致的膜下垫层渗透变形声学监测方法的可行性,本文通过室内试验对工程中常用的两种土工膜的透声性能以及膜下垫层渗透变形的声波特征进行研究。根据实测声波信号,分析了土工膜对不同频率声波的透声特性以及垫层渗透变形发生时的声波特征,以期为后续研发土工膜下垫层渗透变形声学监测技术打下基础。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料选用国内某知名土工合成材料生产厂家生产的一种 PVC 土工膜(以下简称“PVC 膜”)和两种 PE 土工膜(PE-W 膜和 PE-B 膜)。PVC 膜、PE-W 膜和 PE-B 膜的厚度分别为 2.0、1.0、1.0 mm,单位面积质量分别为 0.280、0.096、0.088 g/cm<sup>2</sup>。试验采用的垫层主要由粒径为 10~20 mm 的天然弱风化砾石颗粒和粒径为 0.25~2.00 mm 的中粗砂组成。

### 1.2 试验装置

采用自制的试验装置开展土工膜透声特性及膜下垫层渗透变形声波特征研究。试验装置采用 8 mm 厚的透明亚克力板制作,具体尺寸见图 1。在箱体一侧,采用土工膜专用胶将土工膜粘贴在预留宽度 20 mm 的窄条上,形成土工膜隔层,将试验装置隔成大小两室。大室与小室底部中心均设置有进出水口,方便试验进水与排水。试验采用某国产水听器(自带前置放大功能),可采集频率为 20~100 000 Hz 的声波信号。

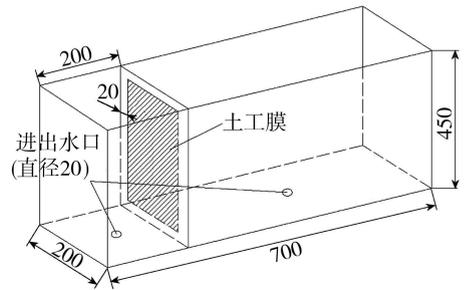


图 1 试验装置(单位:mm)

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 土工膜透声试验

土工膜透声试验布置如图 2 所示,此时试验装置大小两室内均为有水状态,水深为 300 mm。将水听器竖直布放在大室中间,同时在小室内布置一水下扬声器作为声源,扬声器与水听器基本在同一高度,两者相距约 450 mm,通过对有无土工膜隔离状

态下水听器所接收到的声源信号差异来分析土工膜的透声特性,具体操作步骤如下:先进行无土工膜隔离状态下的试验,水下扬声器播放特定频率和幅值的正弦声波,此时水听器测得的声波信号记为  $S_0$ ;然后分别进行有 PVC 膜、PE-W 膜与 PE-B 膜隔离状态下的试验,播放同样的声波信号,此时水听器测得的声波信号分别为  $S_{PVC}$ 、 $S_{PE-W}$  和  $S_{PE-B}$ 。

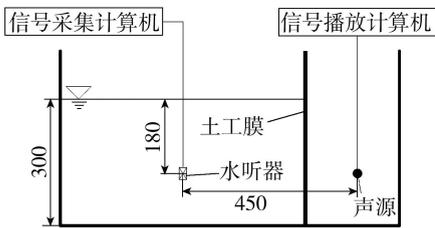


图2 土工膜透声试验示意图(单位:mm)

### 1.3.2 膜下垫层渗透变形声波特征试验

膜下垫层渗透变形声波特征试验布置如图3所示,此时试验装置小室内铺有中粗砂与透水砾石颗粒组成的垫层(厚度各约100mm),大室内装水,水深300mm。两室通过土工膜隔离。试验采用静音水泵(额定功率85W,最大扬程3.4m,最大流量0.97L/s)供水,水流通过小室底部的进出水口冲击垫层,模拟水流从土工膜破损处渗漏引发的垫层渗透变形;水听器布置在大室中,位置与土工膜透声试验相同,用以记录水流冲击垫层以及垫层发生渗透变形过程中透过土工膜传播过来的声波信号。

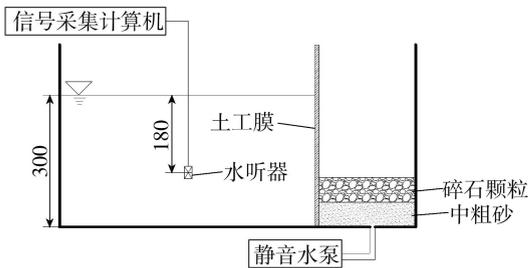


图3 膜下垫层渗透变形声波特征试验示意图(单位:mm)

## 2 试验成果与分析

### 2.1 土工膜透声试验

#### 2.1.1 PVC膜透声试验

图4为PVC膜透声试验的初始声波信号  $S_0$  以及PVC膜隔离后声波信号  $S_{PVC}$  的声压幅值与声压级(SPL)变化过程曲线。两次试验中,扬声器均是从第1秒末开始播放正弦声波,第5秒末结束播放,中间4s时间分别播放了4种不同频率和幅值的正弦声波信号,每种均持续1s。由图4可知,与  $S_0$  相比,经PVC膜隔离后的声波信号  $S_{PVC}$  在每段声波信号下均有不同幅度的减小:第2秒两者较为接近,  $S_0$  和  $S_{PVC}$  声压平均幅值分别为0.566、0.477 Pa,对应

声压级分别为112.3、110.4 dB;第3秒声波信号的降低幅度最大,声压平均幅值从原来的1.330 Pa降至0.009 Pa,对应声压级从119.68 dB降至89.92 dB;第4秒声波信号的声压平均幅值从0.588 Pa降至0.006 Pa,对应声压级从112.28 dB降至85.43 dB,第5秒的声压平均幅值从0.010 Pa降为0.005 Pa,对应声压级从90.63 dB降至84.60 dB。

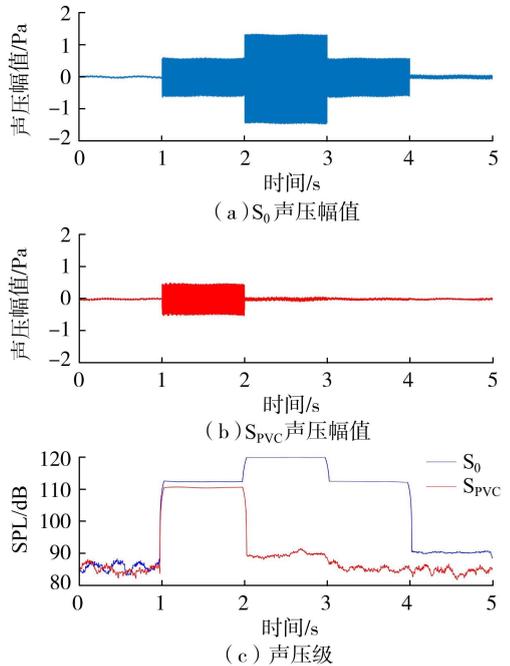


图4 PVC膜透声试验声压幅值与声压级过程线

图5为对收集的声波信号进行频谱分析后所得的PVC膜的  $S_0$  与  $S_{PVC}$  的频谱图。图中的每个点颜色从冷色(蓝)至暖色(黄),代表了每个时刻声波信号在不同频率下的能量大小(蓝色越深,代表能量越低;黄色越深,代表能量越高)。由图5可知,第2秒的初始声波信号  $S_0$  中声波能量主要集中在约250 Hz处,其次在约550 Hz处也有一部分,同样时段下的  $S_{PVC}$  中声波能量也是如此分布,且声波能量的大小也基本未减小,这与图4中该时段两者的声压幅值与声压级较为接近的情况是吻合的。第3秒  $S_0$  中声波能量主要集中在3个频率,最大的在约400 Hz处,其次在约800 Hz处,最小的在约1200 Hz处。上述三处峰值在  $S_{PVC}$  中均有较大幅度的减小,其中800 Hz与1200 Hz处的声波能量几乎被完全消除,400 Hz处的声波能量也发生较大幅度的削减,这也与图4所反映的情况相吻合。第4秒  $S_0$  中的声波能量主要集中在约700 Hz与1400 Hz处,而经PVC膜隔离后,在  $S_{PVC}$  中1400 Hz处声波能量已基本消失,同时700 Hz处的能量也有较大削减。第5秒  $S_0$  中的声波能量主要在约1000 Hz处,经PVC膜

隔离后该处能量也发生较大幅度的削减。

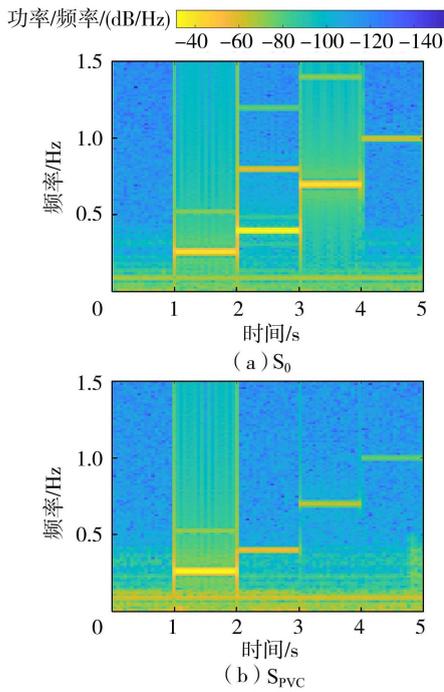


图5 PVC膜透声试验声波信号频谱图

### 2.1.2 PE膜透声试验

图6为两种PE膜透声试验的初始声波信号 $S_0$ 以及土工膜隔离后声波信号 $S_{PE-W}$ 和 $S_{PE-B}$ 的声波信号声压幅值与声压级变化过程曲线。与PVC膜透

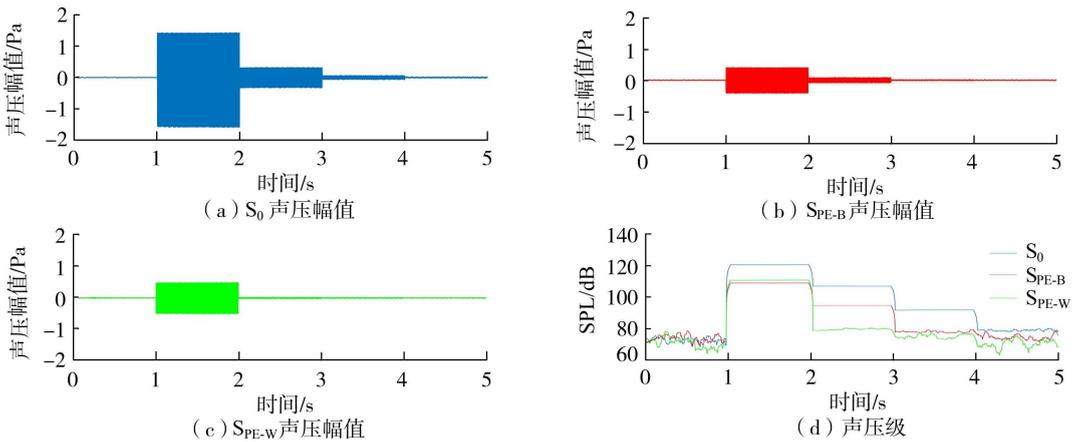


图6 PE膜透声试验声压幅值与声压级过程线

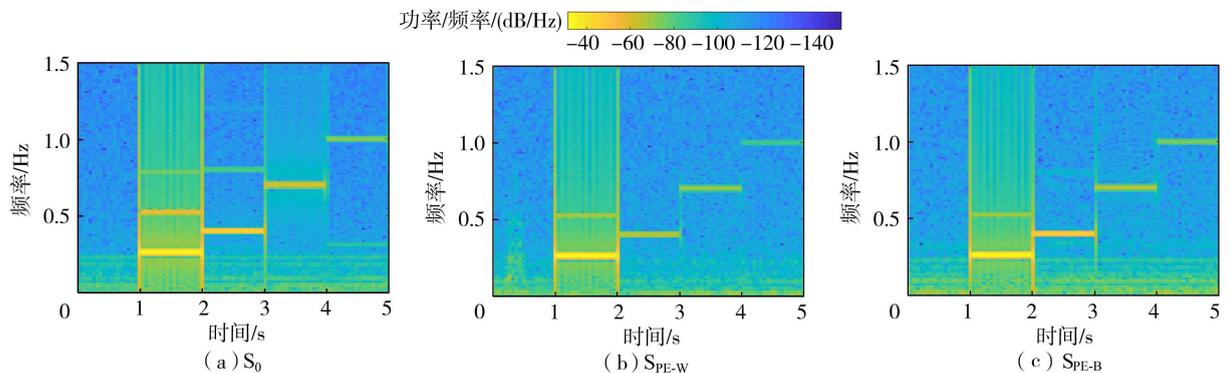


图7 PE膜透声试验声波信号频谱图

声试验相同,扬声器也是从第1秒末开始播放正弦声波,第5秒末结束播放,中间4s时间分别播放了4种不同频率和幅值的正弦声波信号,每种均持续1s。由图6可知,与 $S_0$ 相比,经PE膜隔离后的声波信号 $S_{PE-W}$ 、 $S_{PE-B}$ 在每段声波信号下均有不同幅度的减小:第2秒声压平均幅值从1.434 Pa降至0.488、0.401 Pa,对应声压级从120.51 dB降至110.73、108.93 dB;第3秒声压平均幅值原来的0.330 Pa降至0.023、0.033 Pa,对应声压级从107.15 dB降至80.26、94.85 dB;第4秒声波信号的声压平均幅值从0.072 Pa降至0.016、0.023 Pa,对应声压级从92.09 dB降至75.27、78.33 dB;第5秒声压平均幅值从0.025 Pa降至0.013、0.012 Pa,对应声压级从79.16 dB降至70.59、74.67 dB。

图7为对收集的两种PE膜的声波信号 $S_0$ 、 $S_{PE-W}$ 和 $S_{PE-B}$ 进行频谱分析后所得的频谱图。由图7可知,两种PE膜的透声特性与PVC膜透声特性基本一致,对低频声波的透声效果较好,而对高频声波的透声效果则相对较差。

### 2.2 膜下垫层渗透变形声波特征试验

根据土工膜透声试验的结果,本次试验采用的3种土工膜在透声特性上相差不大,故仅选取PVC膜和PE-B膜进行膜下垫层渗透变形声波特征试

验。两次试验采用不同的水泵阀门开度,其中 PVC 膜试验时阀门开度为全开,PE-B 膜试验时阀门开度为半开。试验前后垫层渗透变形情况如图 8 所示。由图 8 可知,随着水流不断冲击垫层,碎石垫层上部的水开始浑浊,说明下部中粗砂中的细颗粒被水流带出,发生了较为明显的渗透变形。图 9 为 PVC 膜和 PE-B 膜渗透变形时记录的声波信号声压幅值和声压级。



图 8 试验前后膜下垫层渗透变形情况

从图 9 可以看出,在试验过程中的不同阶段声波信号特征明显不同,两次试验刚开始的约前 4 s 内,处于静置阶段,水泵未启动,此时声波信号的声压幅值、声压级和声波能量均很小,声波信号为试验环境的背景噪声。而后,在第 5 秒左右,启动水泵,垫层受到水流的冲击,此时发出的声波信号陡然变强,根据水泵阀门开度的不同,声波信号的声压级也不同,阀门开度为全开时声波信号的最大瞬时声压级可达 119.29 dB,半开时瞬时可达 107.63 dB。随后,随着试验装置小室内水位逐渐升高,水流冲击的作用被削弱,声波信号声压级迅速减弱并维持在 90 dB 左右,但仍大于试验环境的背景噪声声压级。

图 10 为渗透变形声波的频谱图。由图 10 可知,与水泵开启前相比,垫层受到水流冲击后,声波主要在 3 个频段上的能量得到了加强,分别为低频段(250 Hz 以下段),中频段(500~750 Hz 段)以及高频段(1000~1250 Hz 段),其中低频段声波能量增加较为明显,其他两个频段的声波能量增加较少,

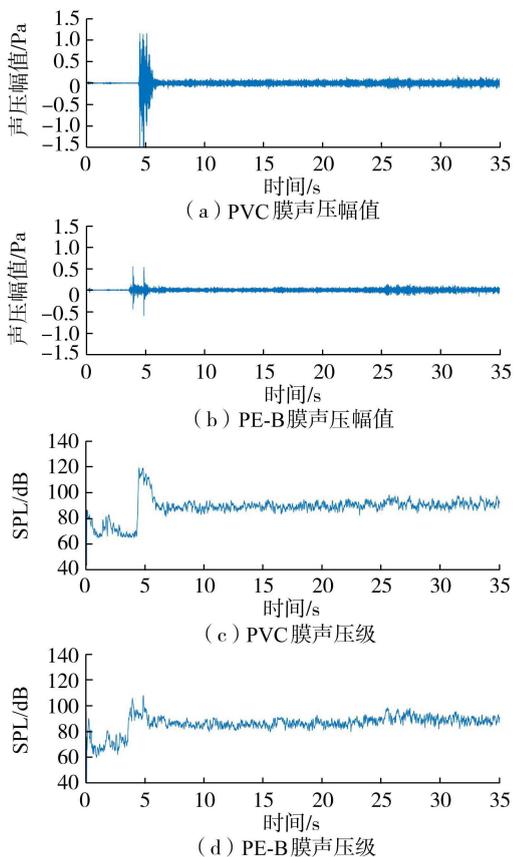


图 9 膜下垫层渗透变形试验声压幅值与声压级过程线

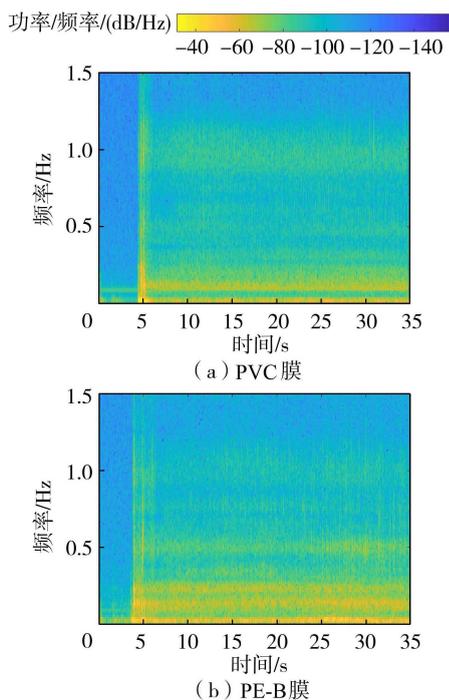


图 10 膜下垫层渗透变形试验声波信号频谱图

这应该与前文中揭示的土工膜对于低频声波具有较好的透声效果有关。

### 3 讨论

通过前文的室内试验可知,膜下垫层渗透变形

产生的声波能够透过土工膜,并被水中的水听器所接收,但该特性能否最终在实际工程中得到应用,还取决于实际工程的水下噪声情况。

目前对于水下噪声的实测结果多为海洋、河道(航道)以及内陆湖泊等天然水域,尚未见有水库水下噪声的相关实测报道。根据已有水域水下噪声研究结果,近海的水下噪声大小与风、雨等水面扰动情况有关,当风速在7级以下时,无降雨海面以下7m处的水下噪声大小基本在50~80dB之间<sup>[18-19]</sup>。另外,水下噪声受人为因素影响很大,如在水面船舶航行和 underwater 施工等情况下,水下噪声量级就较大<sup>[20]</sup>。长江镇江段船舶通航繁忙的润扬大桥下开展的水下噪声实测结果显示,水下噪声声压级可达120~130dB<sup>[21]</sup>,并且船速越快,发动机功率越大,噪声就越大<sup>[22]</sup>。在各类水下环境中,与水库水下环境较为相似的应该是内陆湖泊的水下环境,根据国内某内陆高原湖泊的水下噪声观测结果<sup>[23]</sup>,除了频率小于1Hz的潮汐、地震噪声较大外,其余频率的噪声量级都不大,在常规水听器可采集的频率范围内(一般为几十Hz至几十kHz),该湖泊水下噪声大小为50~70dB,与浅海水下噪声量级基本一致。

本次室内试验中当水流冲击垫层时产生的实测瞬时声波声压级为119.29dB,后期稳定阶段在90dB左右,通过与文献[18-19,21-22]的实测水下环境噪声量级相比,本次试验所得的瞬时声波声压级与船舶航行产生的噪声量级较为接近,即使是后期稳定阶段的声波量级也要大于文献[23]记载的内陆湖泊和浅海的水下噪声量级。另外考虑本次室内试验采用的水泵功率较小,产生的水流冲击力与实际工程中土工膜的挡水水头相比要小得多,因此实际工程中的土工膜发生局部破损和渗漏时产生的声波声压级很可能会大于本次室内试验的实测结果,也就更容易被水听器捕捉到。

另一方面,从水下环境噪声的几个主要来源来看,开展水下声学监测应避免在对水体产生扰动的情况下进行,比如水面行船、水下施工,避免在下雨以及风速较大的环境下进行。从上述要求来说,人工建造的抽水蓄能电站上水库(尤其是没有天然径流补给的)在每日未发电时段,且天气条件较好时,具备开展膜下垫层渗透变形水下声学监测的基本条件。

## 4 结 论

a. 工程中目前最常见的两种土工膜 PVC 膜与

PE 膜均具有一定的透声特性,两种土工膜对于低频声波均表现出良好的透声效果,而对于高频声波的透声效果较差。

b. 膜下垫层渗透变形时的声波信号变化明显,初始水流冲击的瞬时声波声压级陡然增大,最大实测值为119.29dB,而后降低并稳定,稳定后的声波声压级仍能维持在90dB左右。

c. 膜下垫层发生渗透变形后声波信号的主要能量集中在3个频段:低频段(250Hz以下段)、中频段(500~750Hz段)、高频段(1000~1250Hz段),低频段声波能量最大。

受环境和条件所限,本文试验研究成果仅是室内单点试验,后续将开展较大比尺的室内多点试验以获得比较接近现场原型境况的声波数据采集分析的成果。室内试验所测得的声波声压级均大于文献相关水域水下背景噪声的强度,后续将开展不同类型和环境的水库水下噪声的观测工作,并通过实际工程的原型观测结果来进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 束一鸣,吴海民,姜晓桢. 中国水库大坝土工膜防渗技术发展[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊1):1-9. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen. The development of anti-seepage technology with geomembrane on reservoirs and dams in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (Sup1): 1-9. (in Chinese))
- [2] 王樱峻,雷显阳,姜晓桢,等. 抽水蓄能电站进出水口土工膜局部变形适应性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):51-54. (WANG Yingjun, LEI Xianyang, JIANG Xiaozhen, et al. Adaptability analysis of local deformation of geomembrane at inlet and outlet of a pumped storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 51-54. (in Chinese)).
- [3] 张宪雷,刘云锋,顾克,等. 高面膜土石坝防渗结构中土工膜弯折(褶皱)试验研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(8):1555-1561. (ZHANG Xianlei, LIU Yunfeng, GU Ke, et al. Experimental study on geomembrane bending (folding) in anti-seepage structure of membrane-faced rockfill dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1555-1561. (in Chinese)).
- [4] 甘磊,刘静楠,谭海劲,等. 土工膜防渗低水头平原水库渗流场及膜体稳定性[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):45-50. (GAN Lei, LIU Jingnan, TAN Haijin, et al. Seepage field and membrane stability of a low-head plain reservoir with geomembrane anti-seepage measures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,

- 2022,42(4):45-50. (in Chinese))
- [ 5 ] 梁越,马士谦,魏琦,等. 希德拉顿颗粒铺盖防渗性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):31-36. ( LIANG Yue, MA Shiqian, WEI Qi, et al. Experimental study of the anti-seepage characteristics of the Sidraton particles blanket [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2022, 50 ( 2 ): 31-36. ( in Chinese ))
- [ 6 ] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):16-22. ( CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of ( composite ) geomembrane in earth-rock dams [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 ( 1 ): 16-22. ( in Chinese ))
- [ 7 ] 卢力,贾林. 某抽水蓄能电站水库土工膜防渗体系渗漏修复措施探讨[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集2019. 北京:中国电力出版社,2019:421-425.
- [ 8 ] KOERNER R, LOAD A E JR, MCCABE W. Acoustic emission ( microseismic ) monitoring of earth dams [ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13 ( 7 ): 45-49.
- [ 9 ] 徐炳锋,钱家欢,朱正亚. 土体管涌声发射监测试验研究[C]//中国土木工程学会第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海:同济大学出版社,1991:101-105.
- [ 10 ] 徐炳锋,钱家欢,朱正亚,等. 流土声发射监测试验研究[J]. 大坝观测与土工测试,1995,19(1):32-36. ( XU Bingfeng, QIAN Jiahuan, ZHU Zhengya, et al. Laboratory study on acoustic emission monitoring of soil flow [ J ]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1995, 19 ( 1 ): 32-36. ( in Chinese ))
- [ 11 ] 明攀,耿晓明,陆俊,等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):33-38. ( MING Pan, GENG Xiaoming, LU Jun, et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 ( 4 ): 33-38. ( in Chinese ))
- [ 12 ] MING Pan, LU Jun, CAI Xin, et al. Experimental study on monitoring of dike piping process based on acoustic emission technology [ J ]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40 ( 1 ): 23.
- [ 13 ] 孙晶梅. 波在多孔介质中的衰减分析[C]//中国地球物理学会第二十三届年会论文集. 青岛:中国海洋大学出版社,2007:1.
- [ 14 ] 研究发现荷叶等超疏水结构可增强水气间声波透射[EB/OL]. ( 2021-11-08 ) [ 2024-01-01 ]. [https://www.cas.cn/cm/202111/t20211108\\_4812946.shtml](https://www.cas.cn/cm/202111/t20211108_4812946.shtml).
- [ 15 ] 黄春龙,杨秋龙,杨坤德. 水声透声材料的研究现状[J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(11):1231-1235. ( HUANG Chunlong, YANG Qiulong, YANG Kunde. Research progress in underwater acoustically transparent materials [ J ]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2020, 40 ( 11 ): 1231-1235. ( in Chinese ))
- [ 16 ] 张春园,孟庆杰,闻婷婷,等. 水声透声材料发展概述[J]. 材料导报,2018,32(增刊2):140-142. ( ZHANG Chunyuan, MENG Qingjie, WEN Tingting, et al. Overview of the development of underwater acoustic materials [ J ]. Materials Reports, 2018, 32 ( Sup2 ): 140-142. ( in Chinese ))
- [ 17 ] 关淑英. 高分子材料声学特性及其在声纳导流罩上的应用[J]. 材料开发与应用,1986(2):11-20. ( GUAN Shuying. Acoustic properties of polymer materials and their application in sonar fairing [ J ]. Development and Application of Materials, 1986 ( 2 ): 11-20. ( in Chinese ))
- [ 18 ] 车永刚,张宁川,赵宝庆. 几种经典海洋环境噪声谱分析[J]. 海洋测绘,2014,34(5):46-49. ( CHE Yonggang, ZHANG Ningchuan, ZHAO Baoqing. Analysis of several classic ocean ambient noise spectrums [ J ]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34 ( 5 ): 46-49. ( in Chinese ))
- [ 19 ] 柳云峰,李整林,秦继兴,等. 东印度洋海域风和降雨对环境噪声的影响[J]. 物理学报,2022,71(20):204303. ( LIU Yunfeng, LI Zhenglin, QIN Jixing, et al. Effects of wind and rainfall on ambient noise in the East Indian Ocean [ J ]. Acta Physica Sinica, 2022, 71 ( 20 ): 204303. ( in Chinese ))
- [ 20 ] 王煜,石敏,卢晓春. 过水设施水流噪声的形成机理及影响因子研究综述[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):9-14. ( WANG Yu, SHI Min, LU Xiaochun. A review on formation mechanism and influencing factors of water noise of overflow facilities [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 ( 1 ): 9-14. ( in Chinese ))
- [ 21 ] 阎明军,蔺丹清,李栋,等. 润扬大桥水下噪声特征及其对水生生物的潜在影响初探[J]. 海洋湖沼通报,2021(1):123-132. ( YAN Mingjun, LIN Danqing, LI Dong, et al. The characteristics of underwater noise around the Runyang Bridge and its potential impact on aquatic organisms [ J ]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021 ( 1 ): 123-132. ( in Chinese ))
- [ 22 ] 邸凌杰. 长江上游涪陵至丰都河段船舶水下噪声声源特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
- [ 23 ] 李正刚,张向伟. F湖自然环境噪声特性浅析[J]. 声学技术,2008,27(5):46-47. ( LI Zhenggang, ZHANG Xiangwei. Analysis of the noise specialty of F-Lake environment [ J ]. Technical Acoustics, 2008, 27 ( 5 ): 46-47. ( in Chinese ))

( 收稿日期:2024-03-04 编辑:俞云利)