

# 躯体水槽の水中音に起因する固体音低減工法

増田 潔\*1・佐々木 晴夫\*2

Keywords : Underwater Sound, Structure-Borne Sound, Reduction Method

水中音, 固体伝搬音, 低減工法

## 1. はじめに

地下ピットなど躯体をそのまま受水槽や蓄熱槽, ディスポーザー処理槽として使用する場合, 水中ポンプやばっ気エア(気泡)などにより発生する水中音が振動として建物躯体に伝わり, 固体伝搬音として居室に放射される事例がある。その解決方法として水槽部分の躯体に防振材を設置し, その表面をポリウレタン等による防水防食仕上げとする低減工法を開発した。

ここでは, 低減工法の概要と模型水槽における実験結果, および低減効果の予測方法との対応について考察する。

## 2. 低減工法の概要

図-1 に示すように, 機械室にある設備機械の振動やそれら配管の振動に起因する固体伝搬音に対しては, 防振装置や貫通部対策など従来の防振対策で対応できる。しかし, 地下ピットなど躯体をそのまま水槽に使用した場合, ばっ気エアなどにより水中で発生した水中音は振動として建物躯体に効率よく伝わってしまい, 上記対策では不十分となることがある。したがって, 水槽内の液体と躯体を振動絶縁することが重要となる。

今回開発した低減工法の概要を図-2 に示す。水槽内表面に防振材を貼り付けることで, 液体から躯体への振動伝搬を低減する。また, 水槽内の液体が汚水である場合も考慮し, 防振材表面はポリウレタン系の防水防食材を吹きつけて仕上げる。この防水防食材は下水処理施設等で使用されるライニング材で非常に硬く丈夫である。防振材固定用のアンカーがこの防水防食材に接するため, 水中音を躯体に伝えてしまいそうに見えるが, 問題となる周波数領域における水中音の波長の関係から, 影

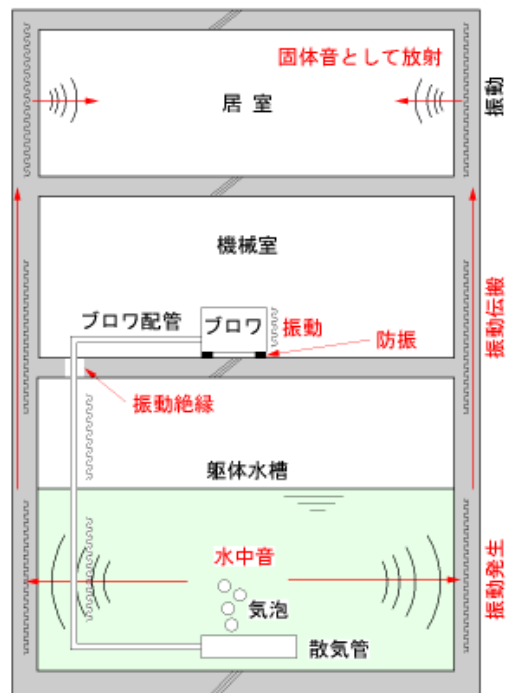


図-1 躯体水槽で発生する水中音に起因する固体伝搬音  
Fig.1 Structure-borne sound caused by underwater sound in concrete pit

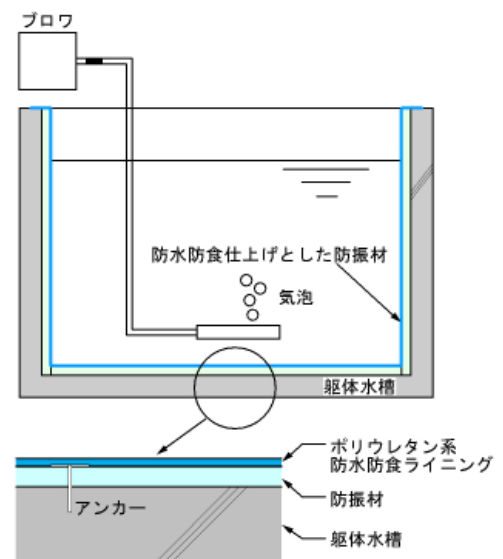


図-2 低減工法の概要  
Fig.2 Concept of the reduction method

\*1 技術センター建築技術研究所環境研究室

\*2 建築本部建築技術部

響はほとんど無い。

防振材には、水深に応じた水圧がかかるため、耐荷重性を考慮しつつ、後述の理論式により、適正な物性の防振材を選定することになる。

### 3. 防振効果の予測式

防振材を取り付ける前と後でどの程度躯体の振動が低減されるか評価する方法の一つとして、挿入損失を使用することが考えられる。

通常防振設計や遮音設計においては、現状の振動や騒音に対し必要低減量を求め、それに見合う防振構造や遮音構造を設計する。それと同様に、水中音に起因する固体音の低減に関しても、必要な低減量、すなわち挿入損失に対し、材料やその厚さが選定できるような予測式が必要である。

ここでは、水、防振材、躯体の境界面での局所作用の仮定、および、空間的に平均された駆動点インピーダンスは無大媒質の駆動点インピーダンスにおおよそ等しいという仮定<sup>1)</sup>のもと、挿入損失レベル予測式を(1)式で定義した。

$$\Delta L = 10 \log_{10} \left[ \frac{1 - \frac{(Z_3/Z_2)^2 - 1}{\{(Z_3/Z_1) + 1\}^2} \{(Z_2/Z_1)^2 - 1\} \sin^2 kl}{\frac{\{(Z_3/Z_1) + 1\}^2}{(Z_3/Z_1) \left( \sqrt{Z_1/Z_3} + \sqrt{Z_3/Z_1} \right)^2}} \right] \quad (1)$$

ここで、 $L$  は防振材の挿入損失レベル、 $Z_1$  は水の固有インピーダンス、 $Z_2$  は防振材の固有インピーダンス、 $Z_3$  は躯体の曲げ振動に対する駆動点インピーダンス、 $k$  は防振材内の波数、 $l$  は防振材の厚さである。それぞれのインピーダンスは、

$$Z_1 = \sqrt{\rho_1 E_1} \quad (2)$$

$$Z_2 = \sqrt{\rho_2 E_2} \quad (3)$$

$$Z_3 = 2.3 \sqrt{\rho_3 E_3} h^2 \quad (4)$$

で計算する。ここで、 $\rho$  は密度、 $E$  は弾性率、 $h$  は躯体厚さである。

本式を使用することで、ある躯体厚さの水槽に対し、どのような密度、弾性率の防振材をどの程度の厚さで施工すれば必要低減量が得られるか、設計時に検討することができる。

### 4. 実験による検証

#### 4.1 実験方法

##### 4.1.1 実験用躯体水槽

実験装置の概要を図-3に示す。実験に使用した鉄筋コンクリート製水槽は、壁面および床面5面で構成され、全ての面の厚さが120mmである。ポリウレタン製防振マット(水位1200mm時、固有周波数12Hz)上に設置し、外来振動の影響を受けないようにした。

##### 4.1.2 水中への空気の吐出方法

ブロウ(定格風量200 L/minの電磁式エアーポンプ)からゴム製のフレキシブルジョイント、VP管(内径20mm)を介し、そのVP管の先にはディフューザー(スリット径2mm、スリット数16,500)を設置して、気泡を微細化しつつ一定量で吐出した。

##### 4.1.3 測定手続き

空気吐出時の水中音と水槽躯体の振動を測定した。水槽躯体の振動については、測定点の駆動点インピーダンスにて基準化した、基準化振動速度レベルを測定した。基準化振動速度レベル $L_{v,z}$ とは、

$$L_{v,z} = L_v + L_z/2 \quad (5)$$

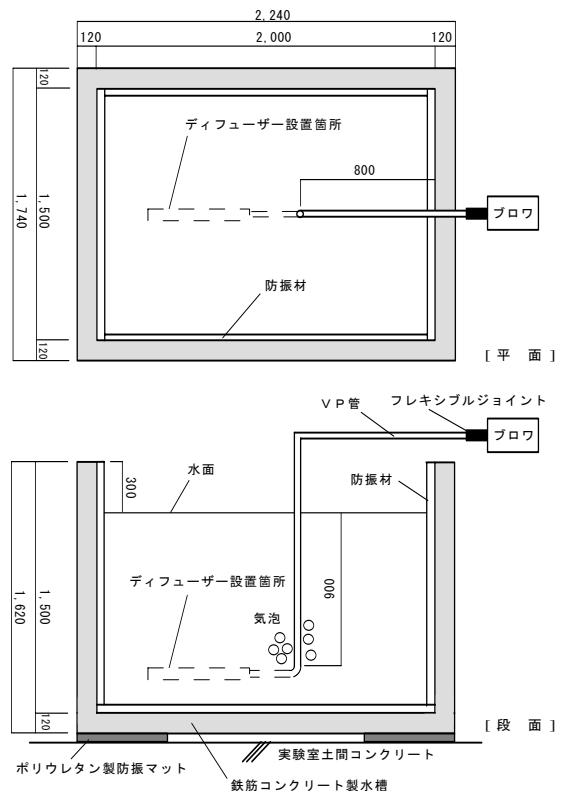


図-3 実験装置  
Fig.3 Experimental equipment

で計算される。ここで、 $L_v$ は振動速度レベル、 $L_z$ は振動速度測定点における駆動点インピーダンスレベルである。水槽駆体の駆動点インピーダンスは、水槽駆体に設置した振動ピックアップセンサの近傍を、力センサが設置されている鉄棒で加振してその力と振動の応答特性を測定し算出した。

水中音は、水中マイクロホンで水中音圧レベルを測定した。水槽駆体振動は、水槽駆体表面の振動速度レベルを測定した。

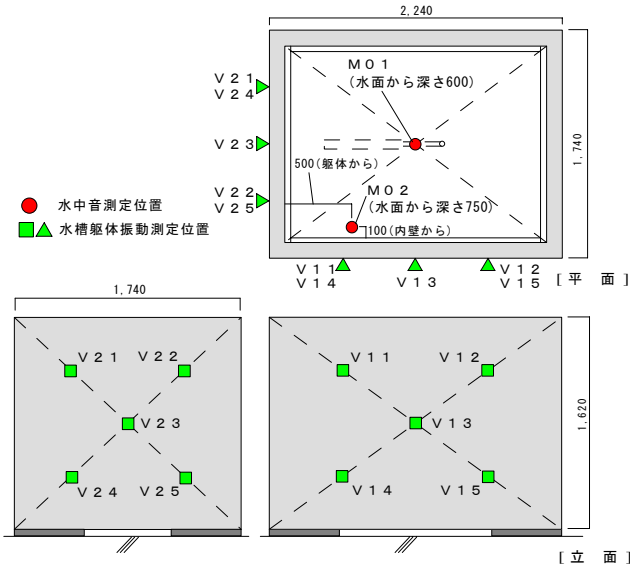
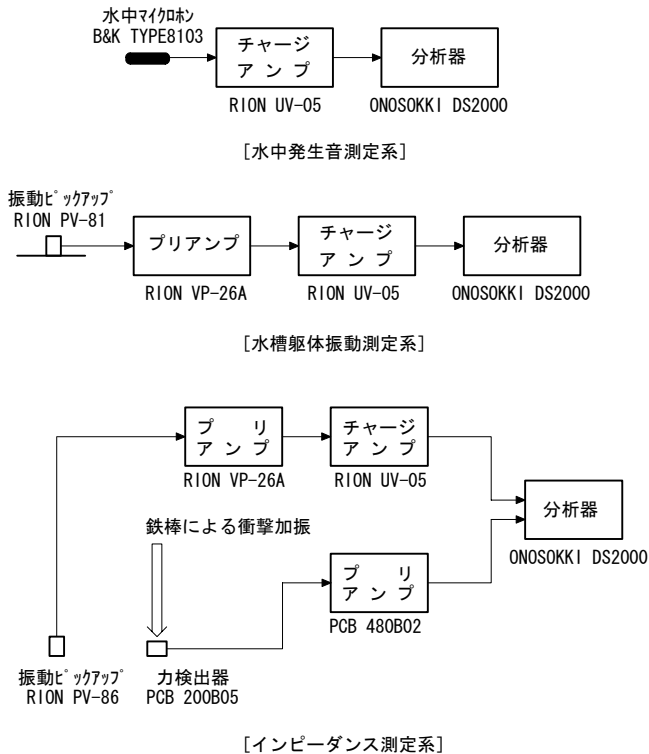


図-4 測定点

Fig.4 Measurement points



[インピーダンス測定系]

図-5 測定ブロック図

Fig.5 Measurement procedures

測定位置略図を図-4に、測定系のブロック図を図-5に示す。

4.1.4 実験条件

駆体水槽に低減工法を施さない状況で測定を行い、その後、低減工法を実施して測定を行った。防振材としては表-1に示す4種類の異なる物性を持った防振材を用意し、それぞれ図-2のように施工して測定を行った。4種類の防振材の厚さは全て50mmとした。

4.2 実験結果

4.2.1 水中音の変化

低減工法（防振材4）を適用する前後の水中音の変化を図-6に示す。水槽中央点（M01）においては駆体のみと防振材内貼りで見立った低減は見られないが、水槽内壁近傍点（M02）においては、63Hz以上の帯域で見立った低減が見られ、特に63Hz～315Hzの帯域では20dB以上の低減が見られる。これは防振材を貼ることで水槽近傍が音響的ソフト境界に近くなり音圧が低下するため

表-1 防振材の仕様と物性

Table 1 Specifications of vibration isolation materials

防振材	仕様	動的弾性率 × 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>	密度 kg/m <sup>3</sup>
防振材1	ポリオレフィンフォーム	2.4	36
防振材2	押出しポリスチレンフォーム	12.0	23
防振材3	発泡ポリスチレン軽量排水材	1.5	14
防振材4	発泡ポリスチレン軽量排水材	2.3	25

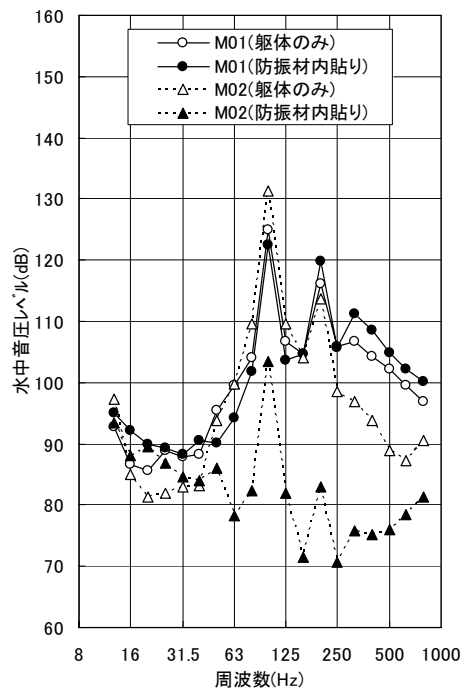


図-6 低減工法による水中音の変化

Fig.6 Comparison of underwater sound levels with and without the reduction method

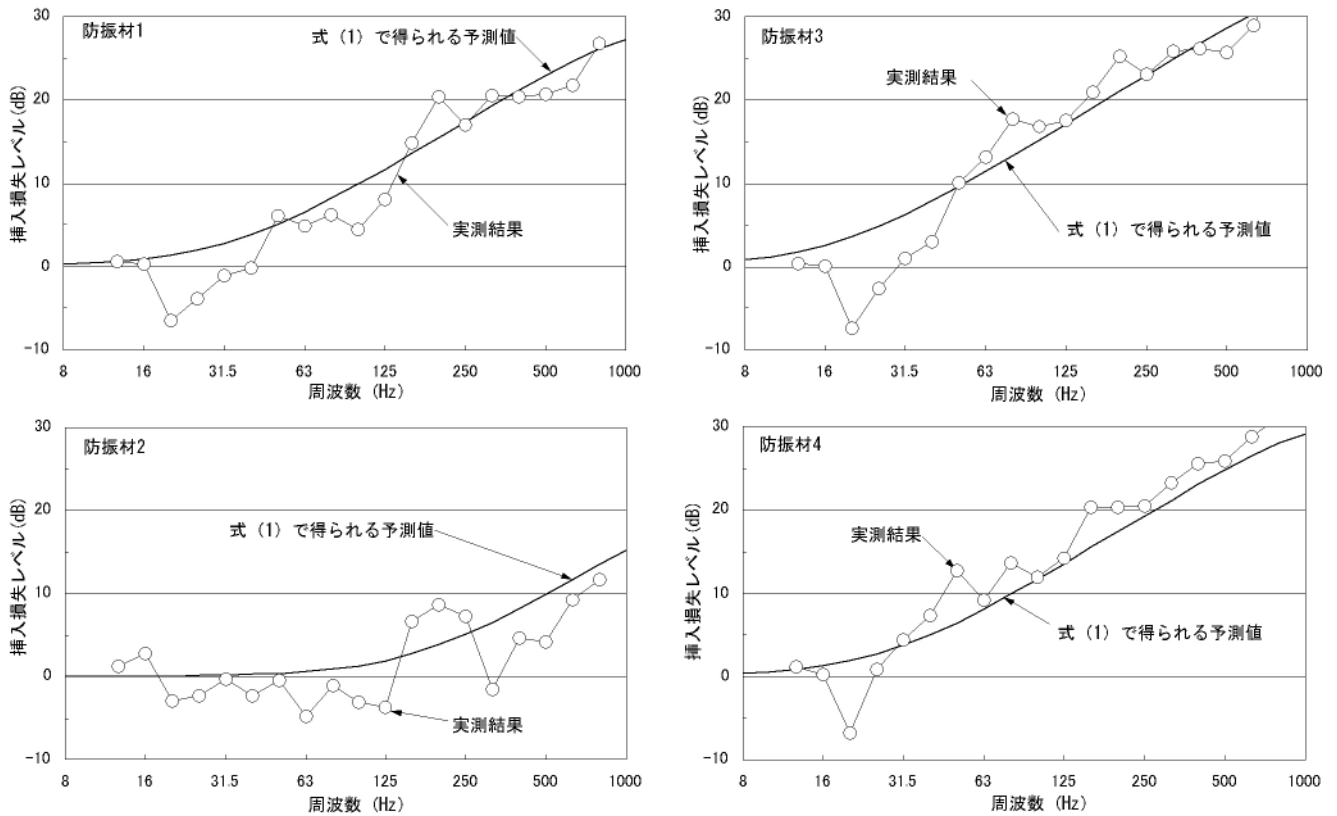


図-7 低減工法の効果と予測値との比較

Fig.7 Effect of reduction method and comparison with prediction results by eqn (1)

(ただし水槽近傍の粒子速度は大きくなっている)と考えられ、水中から躯体水槽に伝わる振動エネルギー自体が大きく低減されるわけではない。

#### 4.2.2 振動の低減効果

低減工法を施工することにより得られる振動の低減効果を挿入損失レベルで表したものが図-7である。挿入損失レベルは、躯体水槽壁面10点の基準化振動速度レベルのエネルギー平均値を低減工法施工前後で求めその差をとることで算出している。図中には式(1)で得られる予測値も示してある。

防振材2を除いた防振材を用いた場合の結果を見ると、特に水中音に起因する固体伝搬音で問題となる100Hz以上の周波数領域において、10dB以上の低減効果が得られている。したがって、防振材を適切に選定すれば、本低減工法は有効な対策になることを示している。

また、どの防振材においても、式(1)で予測される挿入損失と実測値は良い対応を示しており、防振材選定に関する設計手法も同時に確立されたといえる。

#### 5. おわりに

今回開発した低減工法は、同時に開発した予測法によって選定される防振材を適切に用いることで、高い効果が得られることが示された。今後は実建物における効果についても検証していく予定である。

#### 参考文献

1) R.H. LYON: Theory and Application of Statistical Energy Analysis, Butterworth-Heinemann, (1995) pp200