

油圧ハンマによる鋼管杭打設時の水中騒音対策技術に関する基礎的研究

田村 勇一朗¹・板垣 侑理恵²・田中 裕一³

¹ 正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: yuuchirou.tamura@mail.penta-ocean.co.jp

² 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

³ 正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: yuichi.tanaka@mail.penta-ocean.co.jp

本研究は、鋼管杭打設時の水中騒音低減対策技術の開発に向けた基礎的知見の把握を目的とし、室内水槽において模擬的な打設音発生装置を用いた水中音響実験を行った。水槽容積や鋼管仕様等の条件が異なる打撃音の音圧や周波数特性等を計測し、また水槽内の打撃音と現地での油圧ハンマによる打設音(鋼管径φ1.5 m)を比較した。その結果、大型平面水槽(容積 450 m³)の打撃音(φ 250, 800 mm)は、約 1 kHz 以下の帯域で打設音の周波数特性と部分的に類似する傾向がみられた。さらに、小型水槽(1.0 m³, φ 48 mm)と大型平面水槽において対策方式の異なる実験ケースを設定し騒音低減効果の評価を試みた。バブルカーテンやバブルスリーブ、潜堤とバブルカーテンを組み合わせた対策で顕著な音圧レベルの低減効果があり、また、気泡や潜堤等の打撃音に対する対策方式が異なると低減される周波数帯が異なる傾向がみられた。

Key Words : pile-driving, noise mitigation measures, underwater acoustics, test tank, bubble curtain, bubble sleeve, submerged mound

1. はじめに

沿岸域や港湾における工事の騒音に関して、陸上では騒音規制法により規制基準が設定されているが¹⁾、水中騒音に関して国内では具体的な規制基準は設定されていない。堤防や護岸等に用いられる打込み鋼管杭を油圧ハンマ等の打撃工法により打設する場合には水中騒音源の一つとなる。発生する音源音圧が高く、水中音速(約 1500 m/s)で広範囲に伝播することから海洋生物への影響が懸念されている²⁾。例えば、ドイツでは建設現場から発生する水中騒音に関する規制限度を設けている³⁾。また、ISO/TC 43/SC 3(水中音響)の作業部会では、水中音の計測方法の規格化が行われているが、騒音基準の策定には至っていない⁴⁾。

水中騒音の影響評価の対象は、主に魚類や海棲哺乳類であり、魚類は概ね 100~1,000 Hz 以下の比較的の低い周波数、海棲哺乳類は 1,000 Hz 以上の高い周波数の音に敏感である(図-1)。海外では海棲哺乳類を対象に影響評価を行う場合が多い一方で、国内では水産資源である魚類を対象とする場合も多く、水中音と魚類反応との関係について、誘致レベル(110~130 dB)、威嚇レベル(140~160 dB)、損傷レベル(220 dB 以上)等の区別が提案され

ている⁶⁾。また近年、国内での再生可能エネルギーの導入が進められており、モノパイル式支持構造の洋上風力発電施設建設時の水中騒音の影響も懸念されている⁷⁾。

水中騒音の音圧レベルを低減させる方法にはバブルカーテンやパイルスリーブ等⁸⁾がある。こうした対策の効果の直接的な確認や他の対策工法との組み合わせの検討をする上では、実海域での現地試験が最も望ましい。しかし、海域で様々な低減対策を講じた状況を再現することは作業コストが高くなるため⁹⁾、可能な限り小型で計測し易い実験装置や方法が望まれる。例えば、パイルスリーブ型の対策方法の検討において円筒水槽(φ 3.6 m)

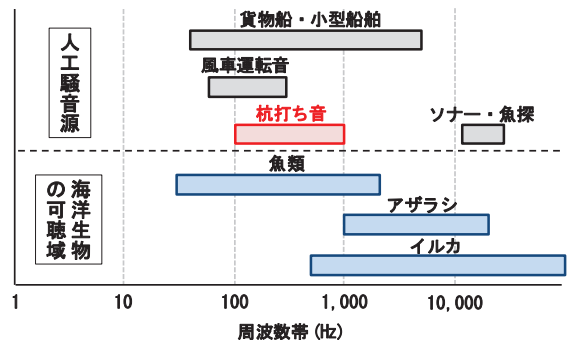


図-1 人工騒音源と海洋生物の可聴域 (赤松ら⁶⁾を参考に作成)

で予備実験を実施した事例¹⁰⁾もある。

本研究は、鋼管杭打設時の水中騒音低減対策の技術開発に向けた基礎的な知見を得ることを目的とした。まず、簡易的に打設音を再現して対策比較が可能な手法を検討するため、室内水槽で模擬的な打撃装置を作成し、各実験条件による打撃音の発生状態や性質の把握を行った。また、様々な低減対策から有効な対策候補を選定するため、低減方式の異なる実験ケースを設定し小型水槽での予備実験を行い、低減効果の高い手法については大型平面水槽において音圧低減効果や詳細な傾向を確認した。

2. 水槽における鋼管打撃音について

(1) 実験方法

油圧ハンマ等による鋼管杭の打撃音は、打撃エネルギーが杭頭に加わり、伝達する過程で半径方向に振動することによって放射される¹¹⁾。そこで、図-2に示すような水槽内に設置した鋼管の杭頭に重錘を自由落下させて放音(以下、打撃音)する方法を試行した。実験水槽は容積で0.3 m³、0.5 m³、1.0 m³級のポリエチレン製の小型水槽およびコンクリート製の大型平面水槽(450 m³)とし、媒質には真水を用いた。また、打撃用の鋼管は一般構造用鋼製のφ46.8 mm(t=1.8 mm)、φ250 mm(t=2.5 mm)、φ800 mm(t=3.6 mm)を使用した。なお、小型水槽においては鋼管打撃による水槽底・壁面への振動と壁面からの振動に

よる音圧発生を除外するため、鋼管を底面に接触させず、管下端にゴム蓋をして底面から100 mmの離隔を取って設置した。また、大型平面水槽では底面との接触を含めた打撃時の発生音を確認するため、発砲スチロール製緩衝板と合板からなる衝撃緩衝層(t=300 mm)を水槽底面に敷設し、その上に鋼管を接地させて打撃した(図-3)。

水中音の計測は水中音響アナライザー(オキシテック社、周波数特性:20 Hz~20k Hz±0.5 dB, 受波感度:-180 dB 以上;0 dB=1 V/μPa ※受音圧(μPa)に対する変換電圧(V))を使用した。収録音は波形処理ソフト AS-70(リオン社)により、暗騒音(対象騒音の発生が無く静穏な自然状態)の内の15秒間、打撃音は連続5波形を抽出し、オーバーオール値(O.A.値:全周波数成分を含んだ音圧値)を用いて、JIS Z8731に従う等価騒音レベル(L_{eq}:分析範囲の騒音レベルの平均値)、最大騒音レベル(L_{max}:最大の騒音レベル)を求めた。また、打撃音に含まれる周波数成分を明らかとするため、JIS C1514に従う1/3オクターブバンド周波数解析(サンプリング周波数25,600 Hz)を行った。

(2) 実験結果

各実験条件と打撃音の計測結果を表-1に示す。水槽内の発生音は、対象周波数や媒質寸法に起因する共鳴等の影響を受け音圧や周波数が変化する。特に、媒質固有の最小共振周波数(f_{min})よりも発生音の周波数帯が低い場合、極端な音圧減衰や周波数特性の歪みが生じる恐れがある。

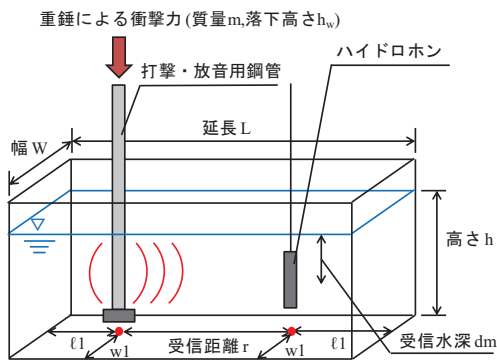


図-2 鋼管打撃による水中音計測実験

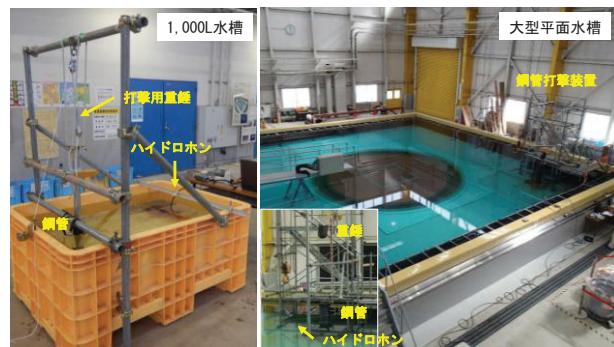


図-3 水槽での放音と計測状況

表-1 実験条件と解析結果

実験条件	① 0.3m ³ 水槽	② 0.5m ³ 水槽	③ 1.0m ³ 水槽	④ 大型平面水槽	⑤ 大型平面水槽	⑥ 大型平面水槽
媒質の寸法	L=1.0m, W=0.65m, h=0.3m	L=1.22m, W=0.75m, h=0.45m	L=1.6m, W=1.1m, h=0.5m	L=15.0m, W=15.0m, h=2.0m		
受信位置	r=0.4m, dm=h/2	r=0.4m, dm=h/2	r=1.0m, dm=h/2	r=1.0m, dm=0.25m(③同様)	r=1.0m, dm=h/2	
鋼管仕様	φ46.8, t=1.8mm, L=1.0m			φ250, t=2.5mm, L=2.0m		φ800, t=3.6mm, L=2.0m
鋼管支持方法・配置	支持点:1点, 支持方法:単管クランプ固定			支持点:2点, 支持方法:キャッチクランプ固定		
	w1=0.325m, l1=0.3m	w1=0.375m, l1=0.41m	w1=0.55m, l1=0.3m	音源と計測位置を図-10に示す		
水中・気中部の杭長	水中:0.2m, 気中:0.8m	水中:0.35m, 気中:0.65m	水中:0.4m, 気中:0.6m	水中:1.7m, 気中:0.3m		
重錘落下条件	m=1.5kg, h _w =25mm			m=40.0kg, h _w =500mm		
L _{eq}	152 dB (130dB)	150 dB (134dB)	140 dB (129dB)	131 dB (122dB)	158 dB (124dB)	164 dB (131dB)
L _{max}	174 dB (118dB)	172 dB (116dB)	155 dB (113dB)	150 dB (116dB)	181 dB (121dB)	181 dB (117dB)
f _{min} /D _{outoff}	2.753Hz/19.9~21.4cm	1.944Hz/28.3~33.0cm	1.648Hz/33.4~42.0cm	378Hz/[100Hz:150.7cm ~ 1kHz:無減衰]		

※1: ()内の音圧レベルは暗騒音

※2: 最小共振周波数および減衰距離¹²⁾による影響を考慮し、条件①~④の異なる媒質寸法を設定した。

一方で受信距離が減衰距離(D_{cutoff})内であれば、影響を最小限とし本来の音源を再現できる計測手法が報告されている¹²⁾。そこで、Akamatsu et al¹²⁾を参考に、各水槽の f_{min} と D_{cutoff} を下記に示す式(1),(2a)を用いて計算した(表-1)。

$$f_{min} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (1)$$

$$D_{cutoff} = \frac{550}{f_{cutoff} \times \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cutoff}}\right)^2}} \quad (2a)$$

$$f_{cutoff} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_z}\right)^2} \quad (2b)$$

ここで、 c は水中音速(1,500 m/s)、 L_x, L_y, L_z は水槽内の媒質の寸法で表-1のL, W, hに相当する。また、 l, m, n は各モードを指定する整数であり、ここはモード(1,1,1)とした。また、 f_{cutoff} は式(2b)で示すカットオフ周波数、 f は対象とする発生音の周波数であり、図-1で示す杭打ち音の周波数帯の上限・下限である100 Hz, 1,000 Hzとした。

各条件で鋼管打撃した結果、図-4に示す音圧レベル(SPL=20log₁₀(P/P_{ref}), P:対象音圧(Pa), P_{ref}:基準音圧(1 μPa))の立ち上がりから減衰まで音圧放射を確認することができた。また、重錘落下高さを変えて杭頭に衝撃力を与えた時に得られたL_{max}とL_{eq}を図-5に示す。衝撃力は重錘の自由落下による位置エネルギー($F=mgh$)とした。ここで、 m は重錘の質量(40 kg)、 g は重力加速度(9.8 m/s²)、 h は落

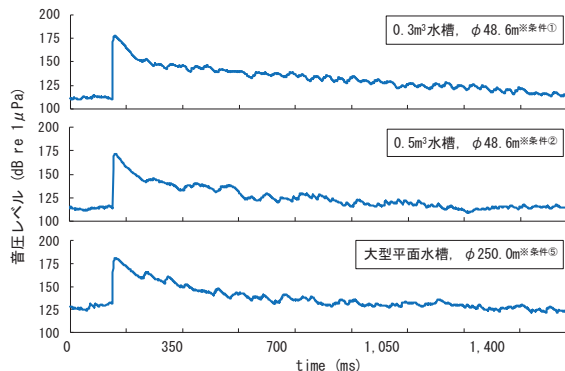


図-4 条件①②⑤での打撃音の波形例

(※[dB re 1μPa] : 水中での基準音圧 1 μPa での dB 値)

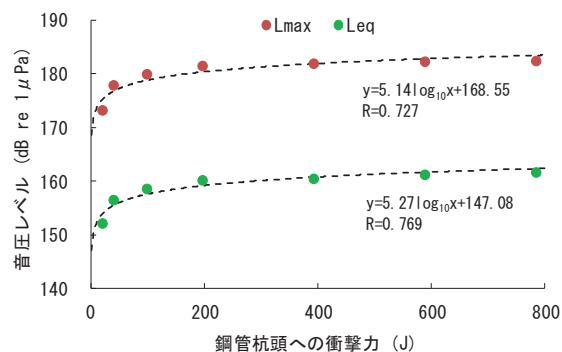


図-5 打撃応力と音圧の関係(実験条件⑤)

下高さ(m)である。落下高さを50~2,000 mm($F=19.6\sim784$ J)で変化させて計測した結果、打撃音の音圧値は衝撃力に対数的に増加し、衝撃力との間に相関が見られた。

次に、各実験条件での打撃音の周波数特性の変化を確認した(図-6)。条件①~③では f_{min} (1,648~2,753 Hz)付近での音圧低下が見られた。一方で、100~1,000 Hz付近の帯域に着目すると、条件①~④の周波数曲線の勾配は比較的ばらつきが少なく類似していた。また、条件⑤⑥は1,000~2,000 Hz付近をピークにした広帯域の打撃音であり、表-1に示す大型平面水槽固有の f_{min} (378 Hz)や D_{cutoff} (100 Hz:150.7 m)を踏まえると、100 Hz以上の帯域では音圧の極端な減衰は少ないものと考えられた。

(3) 施工音と実験音の比較

実験音と施工音を比較するため、ジャケット式本体工の斜杭(口径φ1.5 m, 水深D.L.-15 m, 打設機械S-280;IHC製)の打撃音を水槽実験と同じ機器で計測・解析した。現地の計測水深はD.L.-7.5 m, 受信距離 $r=80$ mであり、O.A.値の算出はばらつきの少ない連続5打撃の平均値とした。その結果、打撃音はL_{max}:182 dB, L_{eq}:167 dBであり、500~800 Hzをピークとする周波数特性を示した(図-6)。受信距離や水深等が異なるため音圧レベルの直接比較は出来ないものの、施工音と大型平面水槽(条件⑤⑥)の実験音は、800 Hz以下で周波数勾配が概ね一致する傾向がみられた。また、条件①~④においても条件⑤⑥ほどではないが、100~1,000 Hz付近で施工音とやや似た勾配傾向がみられた。なお、条件⑤⑥の周波数勾配にばらつきが少ない要因としては、 f_{min} と D_{cutoff} がそれぞれ378 Hz, 150.7cm($f=100$ Hz)であり、他の条件に比べて f_{min} が特に低く、受信距離が D_{cutoff} 内であることが挙げられる。

以上のことより、低減対策実験は施工音の周波数特性に比較的近く、かつ共振の影響が少なく音の再現性の高いと考えられた大型平面水槽(450 m³)で行うものとした。

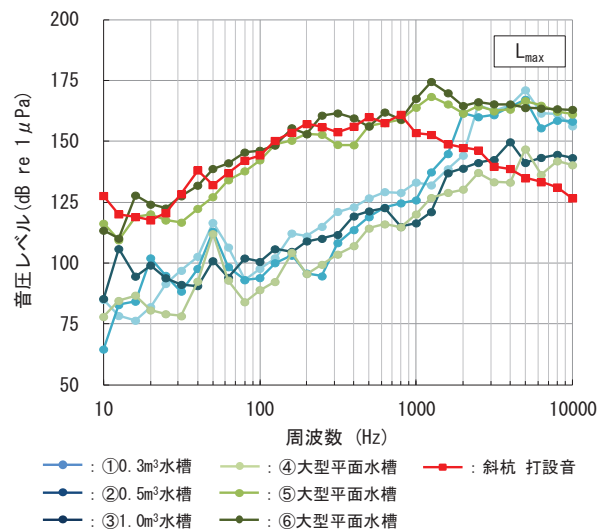


図-6 各条件での発生音の周波数特性

また、多種の低減対策の候補の中から有効な手法を選定するため、より小規模で計測の容易な小型水槽を用いた先行実験を行った。ここで用いた実験条件は、100 Hz以上で大型平面水槽を用いた条件④～⑥の周波数特性に比較的近く、条件①～③のうち最も f_{min} が低い 1.0 m³ 水槽の条件③とした。

3. 小型水槽での水中騒音対策実験

(1) 実験方法

表-1に示す条件③の 1.0 m³ 水槽において各低減対策を設定し計測を行った。実験ケースについて図-7に示す。Aは鋼管に気中用の防振材を塗布する方式であり、B～Dはゴム製吸音板や気泡による鋼管包囲方式、E、Fは打設音の伝播途中に起伏を伴う構造物がある防音方式であり、材質の違いや空隙の有無による低減傾向の違いを比較するため、ここではコンクリート製消波ブロックと川砂を用いた。Gは異なる対策の組み合わせを試みた。なお、本実験は前章と同様の方法により計測と解析を行った。

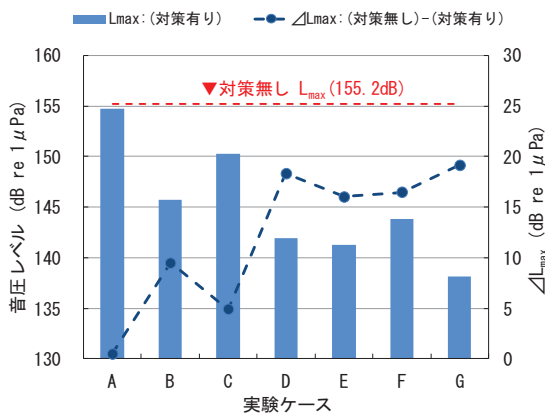


図-8 各実験ケースでの低減効果

(2) 実験結果

1.0 m³ 水槽と大型平面水槽で周波数特性に類似性のみられた L_{max} を対象に、水中騒音の低減効果は対策無しと対策有りの打撃音圧の差分量 (ΔL_{max}) で評価した(図-8)。 ΔL_{max} については、B:エアカーテン(9.5 dB)、D:バブルカーテン(18.3 dB)、E:消波ブロック潜堤(16.0 dB)およびF:砂の潜堤(16.5 dB)、G:組み合わせ(19.1 dB)等が高い値を示した。また、各対策ケースにおける L_{max} の周波数特性を図-9に示す。いずれの実験ケースにおいても媒質固有の f_{min} (1,648 Hz)付近で音圧の低下が確認されたが、D:バブルカーテンやG:組み合わせ、F:砂の潜堤のケースなどは比較的高い周波数帯(>1,000 Hz)の音圧レベルが低下した。一方で、E:消波ブロックでは125 Hz帯から広帯域にかけて減少する傾向が確認された。

以上の結果から、低減効果が比較的高い実験ケースについて、共振の影響が少なく、口径がより大きく施工音の条件に近い大型平面水槽において詳細な計測を行った。

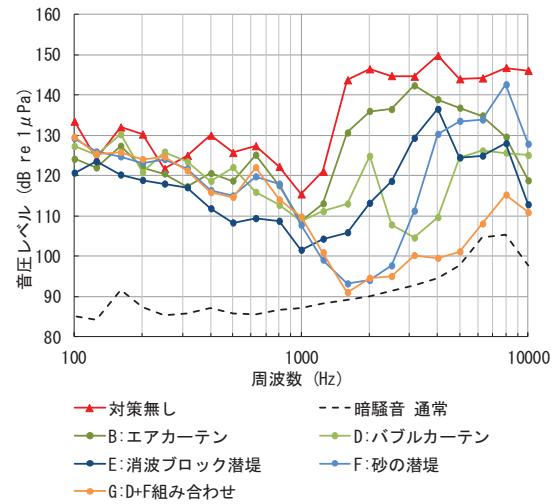


図-9 代表的な実験ケースの周波数特性

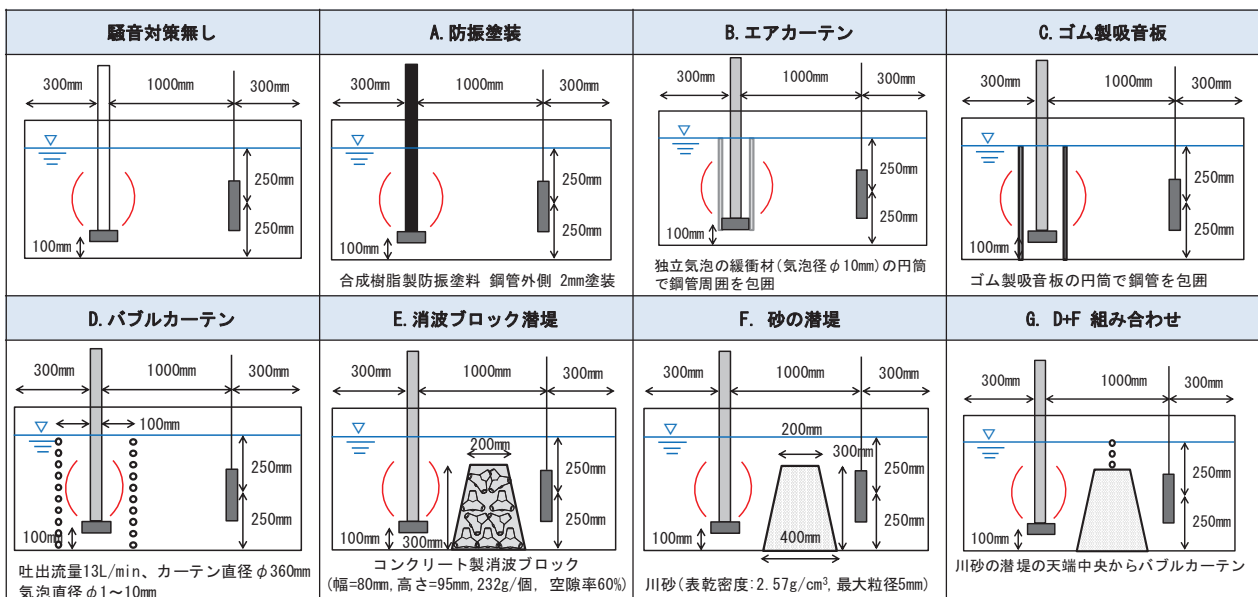


図-7 小型水槽での実験ケース

4. 大型平面水槽での水中騒音対策実験

(1) 実験方法

大型平面水槽での音源と計測位置等の位置関係を図-10に示す。また、打設音は表-1に示す条件⑤を使用した($\phi 250$ mm, $L_{max} 182$ dB, $L_{eq} 158$ dB)。モノパイル打設の場合、鋼管杭の直径と打設音圧との比例関係が報告されており⁷⁾、 $\phi 250$ mmの場合では $L_{max} 172$ dBに近似する。実験の打撃音はこの172 dBを満たし、また $L_{eq} 158$ dBは魚類の威嚇レベルの上限値160 dBに相当する。表-2に示す実験ケースのうち、a,b,d~fは音源から2.0 m円上に対策装置や潜堤を設置した。また、図-11に示すとおりcは $\phi 800$ mm鋼管で二重管状にし、その内部で気泡を放出させた。なお、本計測では打撃音を1打ごとに計測・解析を行い、結果には3打の平均値を用いた。

(2) 実験結果

受信距離 $r=6.0$ m, 受信水深 $dm=1.0$ m(媒質水深 $1/2$) で計測した L_{max} および ΔL_{max} を図-12に示す。まず、a~cの気泡を用いるケースではバブルスリーブが最も効果が高く、また潜堤を用いたd~fでは、潜堤上にバブルカーテンを追加したfで最も高い低減効果が確認された。図-13に示す周波数特性について、最も効果の高いバブルスリーブ(c)では1,000 Hz以上で特に低減傾向がみられた。また、潜堤(d)の場合では魚類の聴覚域を含む200~2,000 Hz付近の帯域、潜堤とバブルカーテンの組み合わせ

せ(f)ではさらに2,000 Hz以上の帯域での低減も確認された。加えて、図-14に示す打撃音の伝播距離に対する音圧減衰(伝播損失 TL)に着目すると、「対策無し」の場合は円筒拡散 $TL=10\text{Log}_{10} r$ (r :伝播距離)¹³⁾に従う傾向がみられた。また、潜堤方式(d,e,f)は「対策無し」と比較し、

表-2 大型平面水槽での実験ケース

ケース	対策装置	内容
a	エアカーテン	独立気泡膜($\phi 30$ mm), 空気量 $V=2.2$ kL/m ² , $L:2.0$ m
b	バブルカーテン	空気流量0.9m ³ /min, 気泡径1~10mm, 空気量 $V=2.1$ kL/m ²
c	バブルスリーブ	一般構造用鋼管, $\phi 800$ mm, 鋼管内にバブルカーテン
d	潜堤	割栗石, 幅1.0m, 高さ1.0m, 音源側勾配(1:1)
e	潜堤 + a	潜堤天端中央にa:エアカーテン($L:1.0$ m)を設置
f	潜堤 + b	潜堤天端中央にb:バブルカーテンを設置

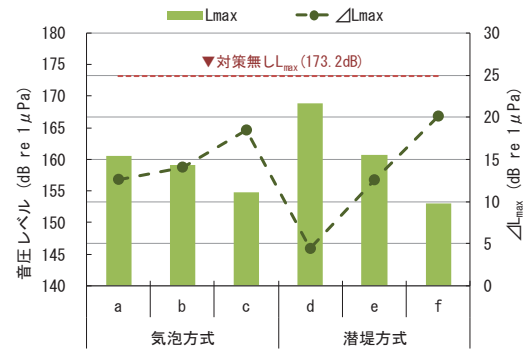


図-12 各実験ケースでの低減効果

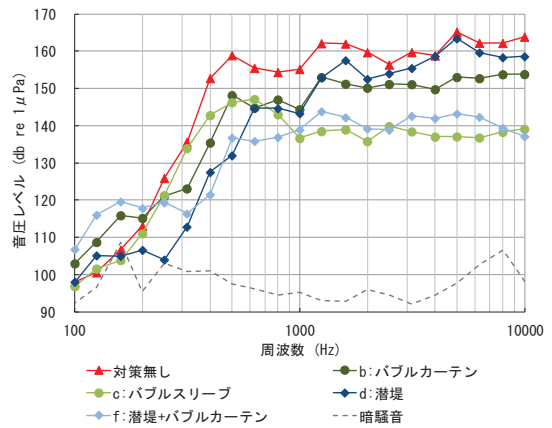


図-13 代表的な実験ケースの周波数特性

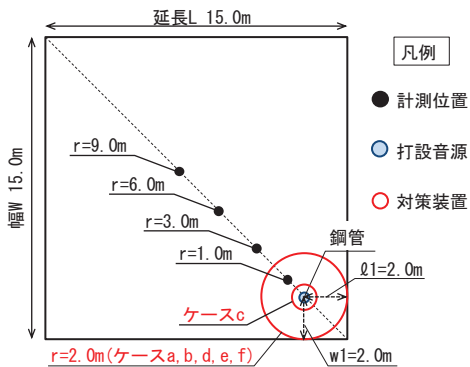


図-10 音源, 対策装置および計測位置の関係



図-11 代表的な実験装置・潜堤の状況

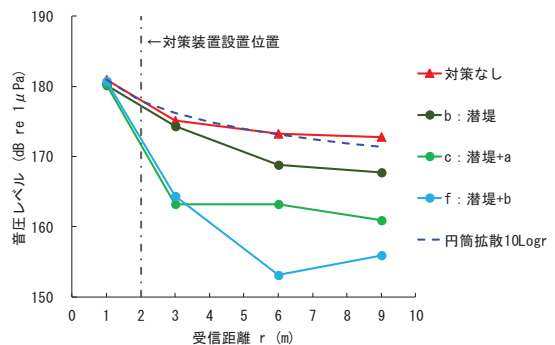


図-14 伝播距離ごとの音圧減衰傾向

対策位置($r=2.0$ m)より後方でも音圧減衰を維持する傾向があり, バブルカーテン等と組み合わせることでより高い低減効果を得られることが明らかとなった(図-14)。

5. 終わりに

本研究では, 油圧ハンマによる鋼管打設時の水中騒音を水槽設備において簡易的に模擬し, 計測された打撃音の性質の把握や各対策方式での低減効果の評価を行った。その結果, 以下のことが明らかとなった。

- ・水槽内での鋼管打撃音の音圧レベルや帯域, 衝撃力に対する音圧放射の応答を確認した。また, 図-6では水槽固有の共振の影響を確認するとともに, 現地の施工音($\phi 1.5$ m)と実験音を比較した。特に, 大型平面水槽(450 m³)の実験音は, 約 1 kHz 以下の帯域において施工音の周波数特性との類似性がみられた。
 - ・小型水槽(1.0 m³)で各種の低減対策の比較を行った結果, バブルカーテン等の気泡を用いた対策はゴム製吸音板や防音塗装に比べて低減効果が高く, 音圧レベルを低減した周波数帯は主に $1,000$ Hz 以上であった。
 - ・大型平面水槽での対策実験では, バブルスリーブ対策や魚礁や人工リーフ等を模した潜堤とバブルカーテンと組み合わせた方式で顕著な低減効果がみられた。また, 潜堤単独の場合では $2,000$ Hz 以下が主な低減範囲であり, バブルカーテン等の気泡方式とは異なる帯域での低減傾向を示した。
- また, 課題や今後の展望を以下に示す。
- ・実海域における鋼管打設による水中騒音は, 塩分や底質等の海洋環境条件の影響や地中部の音圧放射等があり, 低減対策の現地適用性や模型実験としての相似性を確認するため, 今後, 現地実験を行う予定である。
 - ・実施工の打撃音の周波数特性と防音材料や設置空間等のスケールを考慮する場合は, 水中音響シミュレーション等のモデル予測も必要である。

参考文献

- 1) 環境省: 騒音規制法の概要, <https://www.env.go.jp/air/noise/low-gaiyo.html>, (access:2020.5.11).
- 2) Discovery of Sound in the Sea : Webinar Archive: Pile Driving and Wind Turbines, https://dosits.org/wp-content/uploads/2019/05/DOSITS_Webinar_05222019-Miller-final.pdf, (access:2020.3.16).
- 3) Ulrich, S., Marold, M.: 水中騒音の予測, ANSYS Advantage, Vol. V, Issue. 2, pp.15-16, 2011.
- 4) 赤松友成: TC 43/SC 3(水中音響)の規格審議の進展について, 日本音響学会誌, 74 巻, 1 号, pp.44-49, 2018.
- 5) 赤松友成, 木村里子, 市川光太郎: 水中生物音響学, pp.142-146, 2019.
- 6) 島山良己, 井上喜洋, 武井司, 坂口清次, 藤井圭次, 池田昭男, 北川高司: 水中音の魚類に及ぼす影響, pp.12-25, 日本水産資源保護協会, 1997.
- 7) NEDO: 着床式洋上風力発電導入ガイドブック(最終版), pp.288-292, 2018.
- 8) Federal Maritime and Hydrographic Agency, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety: Ecological Research at the offshore Windfarm *alpha ventus*, pp.181-191, Springer Spektrum, 2014.
- 9) Cochard, N., Lacoume, L.J., Arzelies, P. and Gabillet, Y.: Underwater Acoustic Noise Measurement in Test Tanks, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL.25, NO.4, 2000.
- 10) Georg, N., Klaus, B., Stefan, E. and Martin, R.: Assessment and costs of potential engineering solutions for the mitigation of the impacts of underwater noise arising from the construction of offshore windfarms, pp.29-45, COWRIE Ltd, 2007.
- 11) 塩井幸武, 境友昭: 打込み工法による鋼管杭の騒音発生機構(その 2), 八戸工業大学構造工学研究所紀要, 第 6 巻, pp.75-83, 1999.
- 12) Akamatsu, T., Okumura, T., Novarini, N. and Hong, T. Yan: Empirical refinements applicable to the recording of fish sounds in the small tanks, J. Acoust. Soc. Am. 112(6), 2002.
- 13) Rober, J. U.: 水中音響学, pp.65-71, 京都通信社, 2013.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

FUNDAMENTAL STUDY ON UNDERWATER NOISE CONTROL TECHNOLOGY FOR PILE-DRIVING WITH HYDRAULIC HAMMER

Yuichiro TAMURA, Yurie ITAGAKI and Yuichi TANAKA

In this study, underwater acoustic experiments are conducted with water tank to obtain basic knowledge that contributes to the technology for reducing pile-driving noise by hydraulic hammer. In this experiment, prior to testing the applicability in the actual sea area, simulated pile-driving is carried out in two types of test tanks (volume: 1.0 m³, 450 m³). In a small tank, $\phi 46.8$ mm steel pipe is hit with various noise reduction measures in combination, and the noise reduction effect in the water is evaluated. In a large tank, the effects of countermeasures determined from the results of small tank test are measured using $\phi 250$ mm steel pipe. As a result, it is confirmed that the sound pressure level is significantly reduced by the bubble curtain, bubble sleeve, and the combination of submerged mound and bubble curtain. In addition, the frequency band to be reduced tended to be different depending on the countermeasures.