

# 振動制御装置「防振堤」を用いた建設振動の伝播経路対策技術の開発 —防振堤の適用事例と展開について—

Development of Countermeasure using Vibration Control Device “Anti-Vibration Embankment”  
in Propagation Paths  
(Application Examples and Expansion of Anti-Vibration Embankment)

岩 根 康 之<sup>※1</sup>  
Yasuyuki Iwane

小 林 真 人<sup>※2</sup>  
Masahito Kobayashi

松 本 泰 尚<sup>※3</sup>  
Yasunao Matsumoto

## 【要旨】

振動の伝播経路対策技術として「防振堤」を開発した。防振堤には質量体と振動系の2種類がある。質量体は剛性と質量によって接地面の変位を拘束し、約15 Hz以上の振動を低減する。振動系は共振によって生じる二次波が入力波に干渉することで振動を低減し、15 Hz以下の振動に対して適用が可能である。本報では、質量体と振動系を実際の現場に適用して低減効果を検証した事例を紹介し、製品の展開方法について説明する。

【キーワード】 振動 伝播経路対策 防振堤 質量体 振動系

## 1. はじめに

振動規制法施行状況調査<sup>1)</sup>によると、令和4年度の振動に係る苦情の件数は4,449件であり、昭和49年の統計開始以来最大となった。苦情件数の内訳を発生源別にみると、建設作業に起因した苦情が最も多く、全体の71.4%を占めた。このように、建設作業が振動に対する苦情原因の7割程度を占める状況は長年続いており、対策技術の向上は社会的な課題といえる。

建設振動対策は、対策を行う場所によって発生源対策、伝播経路対策、受振部対策に分類される。建設作業においては、発生する振動が小さい工法の選定や低振動型建設機械の活用、また防振マットなどを敷設して振動の地盤への伝達を軽減する発生源対策が基本となる。しかし、発生源対策の効果が十分でなかったり、施工条件によって発生源対策の実施が困難であったりした場合、伝播経路対策が講じられることとなる。開発した防振堤は、この伝播経路対策に該当する技術である。

伝播経路対策技術としては、空溝や防振壁を設けて振動を遮断する方法が代表的であるが、いずれの手法も対策効果はその深度に依存することが知られている<sup>2)</sup>。例えば早川<sup>3)</sup>は、空溝に関する既往の研究成果をまとめ、空溝の効果は空溝の深さ $H$ と波長 $\lambda$ の比に関係し、 $H/\lambda$ が大きいほど効果が大きくなることを示している。一方で空溝の最大深さは通常2 m程度といわれており、それより深くすることは安全面や維持管理に問題が生じて現実的ではない。また神田ら<sup>4)</sup>は、PC柱列壁の防振性能について、壁の長さが1/2波長以下に相当する振動に対して

は目立った効果を得られないが、1/2波長以上であれば効果が現れはじめ、1波長以上あればほぼ最大限の効果が得られることを実大実験の結果から確認している。このため、低い振動数から低減効果を得ようとした場合、対策が大規模化しやすく、費用対効果や工期などの問題で実施に至らない場合が多い。

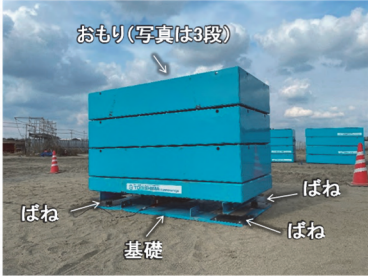
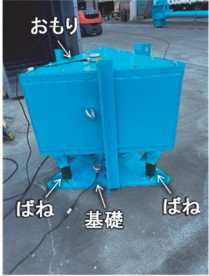
このような現状を受け、地表面に設置するだけで建設振動を低減することができる振動制御装置「防振堤」を開発してきた<sup>5-6)</sup>。防振堤には2つの種類があり、およそ15 Hz以上の幅広い振動数帯域を低減対象とした質量体と、15 Hz以下で共振する建物などを低減対象とする振動系がある。本報では、これらの防振堤を実際の建設現場や実建物へ適用した事例を紹介するとともに、今後の展開方法について説明する。

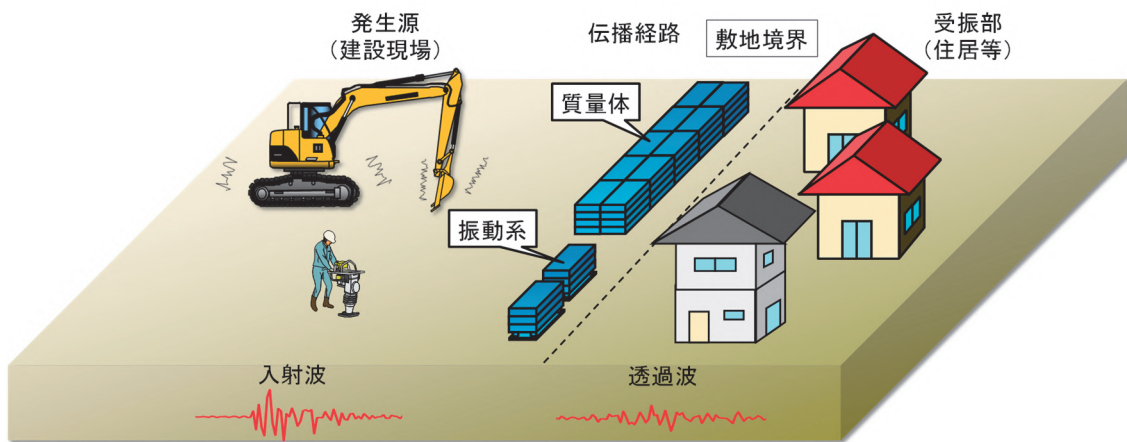
## 2. 防振堤の概要

振動制御装置「防振堤」として、「質量体」と「振動系」の2種類を開発した。表-1に質量体と振動系の概要を示す。

質量体は接地面の剛性と質量によって地表面の変位を拘束し、入力波の一部を反射・散乱させることで背面に伝播する振動を低減する。地盤や設置条件に依存するが、およそ15 Hz以上の幅広い振動数で低減効果を発揮する。 $t 312 \text{ mm} \times w 932 \text{ mm} \times l 1,847 \text{ mm}$ の鋼製の枠内に粒状物を充填した950 kgのおもりを複数積層して並べて構成し、粒状物には再生資源である再生骨材を活用している。積

表－1 質量体と振動系の概要

| 質量体(特許第6785535号)                                                                                                                               | 振動系(特許第6240842号)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>複数のおもりを積み重ねて並べることで構成</li> <li>接地面の剛性と質量により地表面の変位を拘束することで振動を低減</li> <li>約15 Hz以上の幅広い振動数で効果を発揮</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>基礎、ばね、おもりによって構成</li> <li>振動系の共振で発生する二次波が入力波に干渉することで振動を低減</li> <li>振動系の固有振動数付近で効果を発揮し、15 Hz以下に適用可能</li> </ul>                                                                                                                                                                                                         |
|  <p>おもり<br/>(写真は2列×4列×4段)</p>                                 | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>a) 標準タイプ</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b) 小型タイプ</p> </div> </div> |



図－1 防振堤の適用イメージ

層時は上下の質量体の間に  $t=5\text{ mm}$  のゴムシートを設置することで、質量体自体のがたつきを抑制する。既往の研究<sup>7)8)</sup>において、質量体の配置によって低減効果は変動し、面密度を大きく、また伝播経路方向長さを長く設置することで低減量を増加できることを実大実験により確認している。

振動系は基礎、ばね、おもりによって構成される。ばねとおもりの組み合わせによって低減対象とする振動数で共振するよう固有振動数を調整する。入力波によって振動系が共振することで二次波が発生し、二次波が入力波に干渉することで振動を低減する。共振振動数を調整することで15 Hz以下の振動数帯域にも適用が可能である。また、低減効果は共振のピークが鋭いほど大きくなるため、低減効果が得られる振動数帯域は狭くなるが、固有振動数が異なる振動系を複数組み合わせることで低減効果が現れる振動数帯域を広げることが可能である。表－1に示すように、現在のところ振動系は2つのタイプがあり、いずれのタイプも減衰の小さいコイルバネを採用している。a) 標準タイプは長方形の平面形状であり、4個のばねでおもりを支持する。質量体をおもりとして活用できるので質量の増加が比較的容易であり、5 Hz程度の

低振動数まで適用が可能である。b) 小型タイプは平面形状が1辺900 mmの正三角形で、各頂点で50 mm×50 mmの面取りをしてある。おもりの質量は300 kgとし、3個のばねでおもりを支持する構造とした。

図－1に防振堤の適用イメージを示す。質量体と振動系のいずれかまたは両方を、現場条件や求める低減効果に応じて適用することで、敷地境界近傍の家屋等へ伝播する振動を低減する。

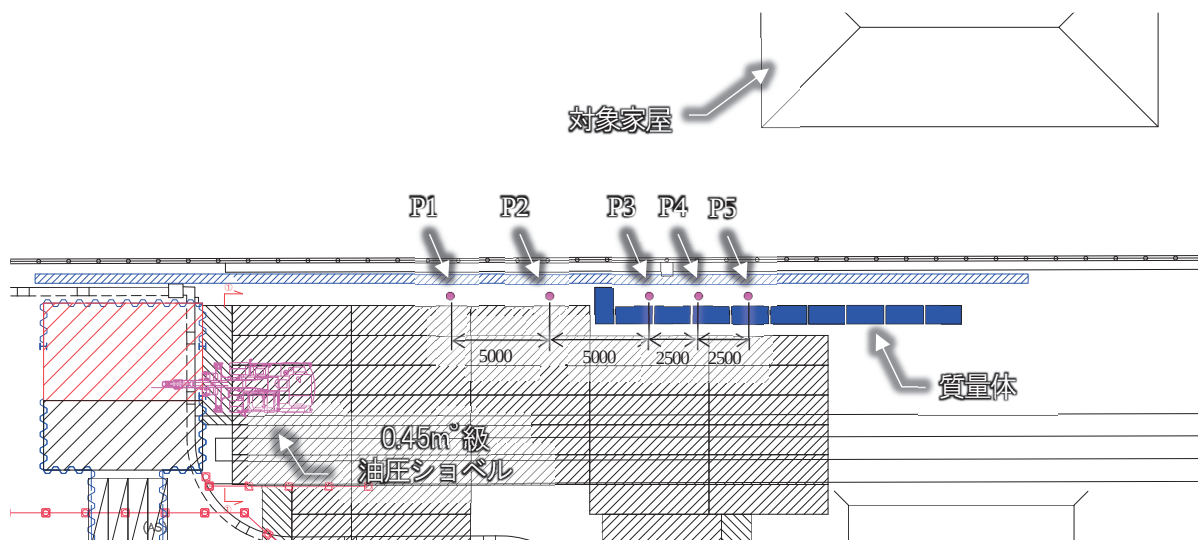
### 3. 質量体の現場適用事例

質量体を北千葉広域水道企業団発注の導水管更新に伴うトンネル築造工事における立坑掘削作業に適用した事例を紹介する。

#### 3.1 測定概要

図－2に質量体の現場適用状況を示す。また図－3に測定配置を示す。質量体は対象家屋近傍の敷地境界に沿って40基（1列×10列×4段）を配置し、設置延長は20 mとした。0.45 m<sup>3</sup>級バックホウにより立坑掘削を行う際の振動を低減対象とし、測定点は敷地境界に沿ったP1からP5の5か所とした。P1とP2は質量体の影響を受けないよう





図－3 測定配置



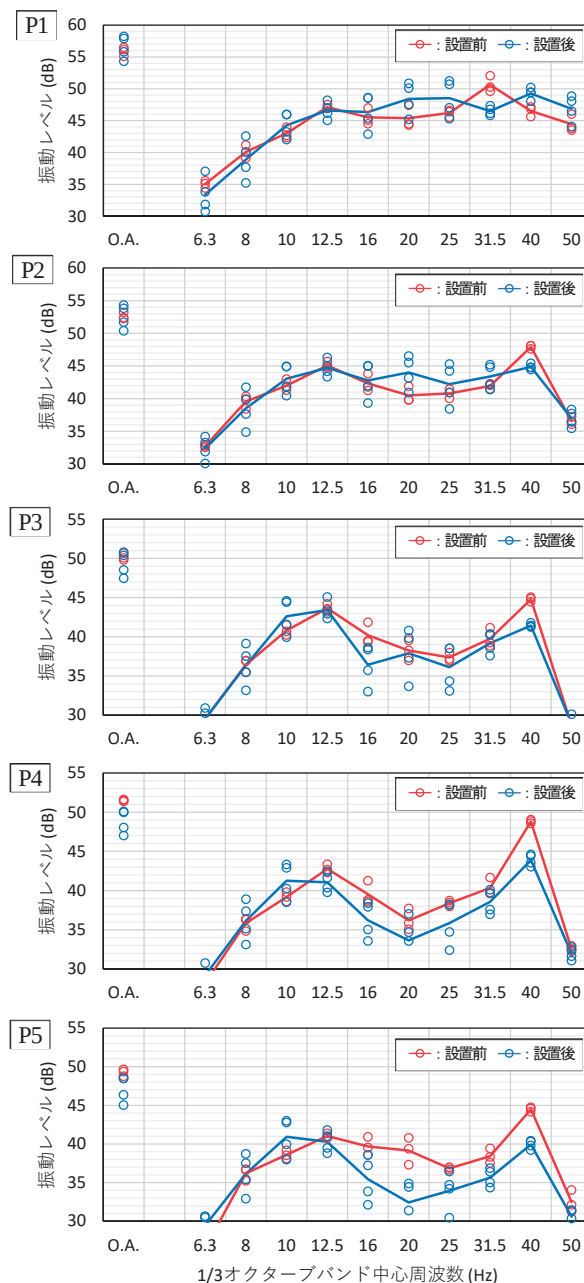
図－2 質量体の現場適用状況

に質量体よりも振動発生源側に配置し、振動発生源に最も近いP1は加振力を比較する基準点とした。低減対象とする家屋に近く、質量体の背面にあるP3からP5は低減効果を検証するための評価点とした。

質量体の設置前後で掘削作業時の振動レベルを測定し、その差を低減効果として評価した。加振力のばらつきを考慮し、質量体設置前は3回、設置後は4回データを採取して平均値から低減効果を評価した。測定時のサンプリング周波数は1,500Hzとし、測定時間70秒間のエネルギー平均から1/3オクターブバンドレベルを算出した。

### 3.2 掘削振動の振動数特性

図－4に掘削振動の振動数特性を示す。ここで、図中の丸は個々の測定結果を意味し、実線はそれらの平均を意味している。質量体よりも振動発生源に位置するP1とP2をみると、16Hz以下の成分は質量体の設置前後で同程度であり、20～25Hz成分は設置後が大きくなった。また、31.5Hz以上の成分はP1とP2で設置前後の大小の傾向が一致なかった。なお、31.5Hzと40Hzのピークは暗振動でも



図－4 掘削振動の振動数特性

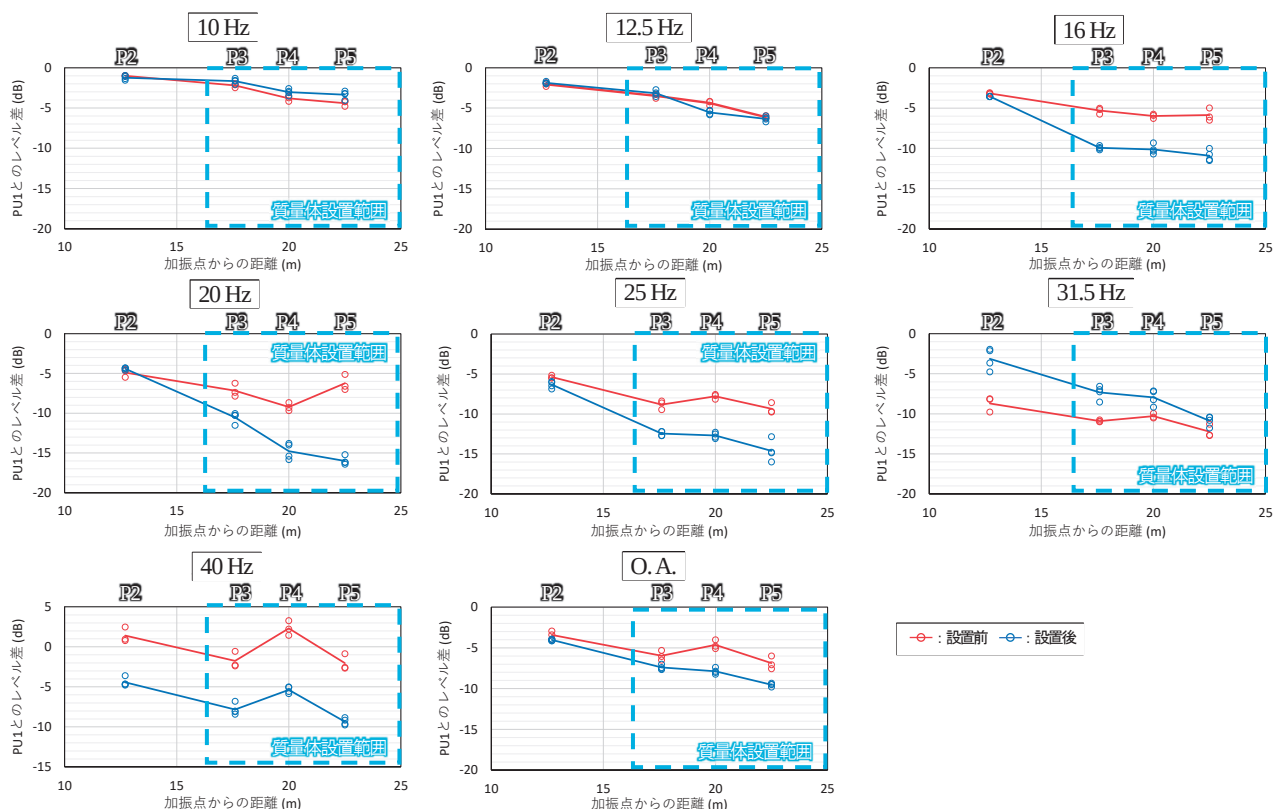


図-5 P2からP5のP1とのレベル差

確認されており、測定箇所の近傍に埋設された送水管から発生する振動の影響と推察された。以上のP1とP2の結果から、振動数成分によって加振力にばらつきがあったことがわかる。一方、質量体の背面に位置するP3、P4、P5をみると、いずれの結果も質量体設置後のほうが16~40 Hzで振動レベルが小さい傾向があり、質量体による低減効果が現れたことが確認できる。また、設置前後の振動レベルの差はP3<P4<P5の順に大きい傾向があり、伝播経路に置いて質量体の影響を受ける経路長が長いほど低減効果が大きくなったことが推察された。

### 3.3 掘削振動の測定点ごとの低減量の比較

前節で示した通り、16~40 Hzにおいて質量体の設置による振動低減効果を確認できたものの、加振力にばらつきがあったために質量体設置前後の振動レベルの差を質量体による低減効果として評価することはできなかった。そこで、振動発生源に最も近いP1の振動レベルを基準とし、P2からP5までの減衰量を比較して質量体による低減効果を評価した。

図-5に10~40 Hz成分およびO.A.のP1とのレベル差を示す。ここで、図の横軸は加振点となるバックハウの中心位置から各測定点（P2からP5）までの直線距離を示している。また、青い点線は質量体の設置範囲を意味している。10 Hzと12.5 Hzでは質量体の設置前後で振動レベルの差がほとんどなく、低減効果が得られていないことがわかる。一方で16~25 Hzをみると、質量体より加振点側

のP2ではレベル差がほとんどないのに対し、質量体背面のP3からP5では質量体設置後に振動レベルが5~9 dB程度低減しており、低減効果が得られたことが確認できる。31.5 Hzと40 Hzは25 Hz以下と傾向が異なり、P2を含めて設置前後でのレベル差が変動していることから、前述の送水管の振動の影響を顕著に受けたと考えられる。O.A.でみると、質量体の設置による低減効果はP3で約2 dB、P4とP5で約3 dBであった。

## 4. 振動系の実建物への適用事例

2基の振動系を実大のユニットハウスに適用した事例を示す。

### 4.1 測定概要

飛鳥建設技術研究所の屋外実験ヤードに設置した4坪のユニットハウス（w5,680 mm×l2,200 mm×t2,710 mm）が9~10 Hzで共振していたため、表-1に示した小型タイプの振動系を2基適用し、低減効果を検証した。

図-6に適用状況を示す。また図-7に測定配置を示す。2台の起振器を同期させて鉛直加振に7~11 Hzの掃引加振（往復6 min,  $2.22 \times 10^2$  Hz/s）を行った。起振器からユニットハウスまでの距離は約12 mであり、ユニットハウスから1 m離れた位置に振動系2基を1.5 mの間隔で配置した。測定位置は2基の振動系の中央の地盤と、ユニットハウス内の床面とした。測定時のサンプリング周波数は1,500 Hzとし、測定時間6分間の振動加速度レベルの最大値を算出して振動系の有無による違いを評価した。

表－2に実験パターン毎の振動系の固有振動数の組合せを示す。低減効果が得られる振動数範囲の拡大を目的として、2基の振動系の固有振動数が一致しないよう質量を調整した。振動系Aの固有振動数は9.7 Hzで一定とし、振動系Bは9.1～9.6 Hzとして低減効果の違いを確認した。

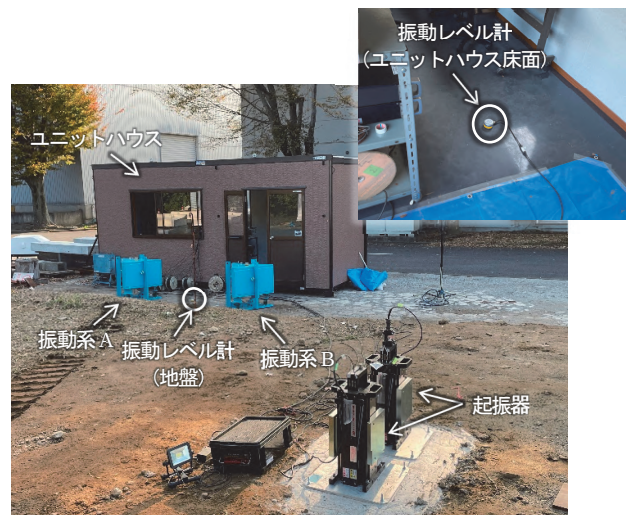
#### 4.2 振動系の有無による振動加速度レベルの比較

図－8に地盤の振動加速度レベルの測定結果を示す。また図－9にユニットハウス床面の振動加速度レベルの測定結果を示す。未設置状態の地盤と床面の測定結果を比較すると、地盤に比べ床面の振動加速度レベルが9.3 Hzをピークとして増幅しており、共振の影響が確認できる。地盤での振動系の有無による振動加速度レベルの変化をみると、振動系の設置により固有振動数近傍にディップが生じ、約3 dBの低減効果が確認できる。しかし、それより0.2 Hz程度低い振動数では1～2 dB程度増加がみられ、逆効果となった。2章で述べたように、振動系は振動系の共振によって生じる二次波が入力波に干渉することで低減効果を発揮する。このため、入力波と二次波の位相が逆位相に近ければ低減効果は大きくなるが、同位相となる振動数では振動を増幅させることになる。固有振動数近傍では二次波の位相が急激に変化するため、入力波と二次波が同位相になる振動数が存在して振動を増幅させたと考えられる。

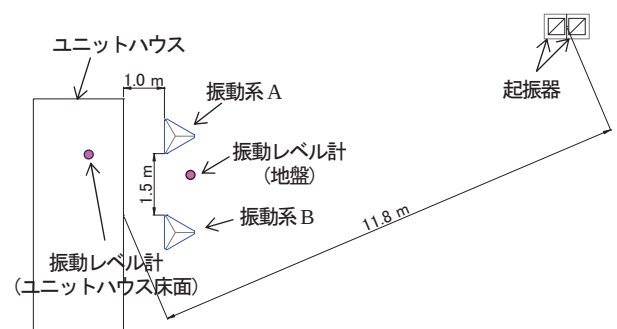
一方で、床面の振動加速度レベルをみると、地盤と同様に振動系の固有振動数近傍でディップが生じ、低減効果が得られていることが確認できる。ディップの振動数の低減量を比較すると、9.7 Hzでは約2 dBであるのに対し、9.3 Hzや9.1 Hz付近では3～4 dB程度と低減量が大きく、建物の共振のピークに振動系の固有振動数が近いほど高い低減効果が得られる傾向が確認できる。また、地盤で振動加速度レベルが増幅した振動数に着目すると、床面でも振動加速度レベルのピークが見られるものの、未設置時と比べると同程度以下の大きさであり、増幅していないことがわかる。この原因は明確ではないが、地盤と床面の測定点では位相条件が異なるためと考えられる。建物の振動特性を事前に調査し、共振のピークに合わせて固有振動数を調整した振動系を適用することで、実建物の床振動に対して低減効果が得られることを確認した。

### 5. 防振堤の展開

防振堤は質量体と振動系のそれぞれについて特許を取得しており、株式会社藤崎商会（広島市中区、代表取締役：藤崎和彦社長）と実施許諾契約を締結し、同社からの販売およびレンタルによる社内外への展開を可能としている。現在はNETIS登録に向けた手続きを進めており、登録完了により活用の促進を図る。



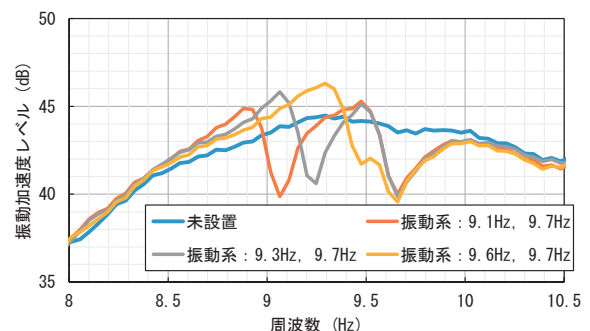
図－6 ユニットハウスへの振動系の適用状況



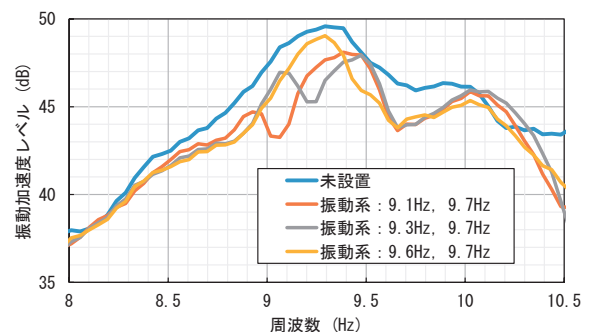
図－7 測定配置

表－2 実験パターン毎の振動系の固有振動数の組合せ

| No.        | 1   | 2   | 3   |
|------------|-----|-----|-----|
| 固有振動数 (Hz) |     |     |     |
| 振動系A       | 9.7 | 9.7 | 9.7 |
| 振動系B       | 9.1 | 9.3 | 9.6 |



図－8 地盤での振動加速度レベル測定結果



図－9 ユニットハウス床面での振動加速度レベル測定結果



## 6. おわりに

振動の伝播経路対策技術として開発した防振堤の概要について説明し、質量体と振動系のそれぞれについて適用事例を紹介した。

油圧ショベルによる掘削振動を低減対象として質量体40基（1列×10列×4段）を適用したところ、敷地境界近傍の地盤における振動レベルを2~3 dB低減し、16~25 Hz成分については5 dB以上の低減効果が得られることを確認した。また、共振するユニットハウスに振動系2基を適用したところ、床面の振動加速度レベルが最大約4 dB低減した。固有振動数が異なる振動系を設置することで低減効果を得られる振動数範囲を拡大し、また建物の共振のピークに振動系の固有振動数を近づけることで低減効果を向上させることができることを確認した。質量体と振動系の配置数量を増やしたり、振動系の固有振動数の組合せを増やしたりすることで、さらなる低減効果の向上が期待できる。

今後は、実際の建設現場等への適用実績を蓄積し、異なる地盤条件や配置方法での低減効果の検証を進めつつ、防振堤のさらなる改良、改善を継続する。さらに、建設工事だけでなく工場や事業場での振動問題にも広く適用し、生活環境の保全に寄与することを目指す。

## 謝辞

本実験の実施に際し、フィールドを提供いただいた北千葉広域水道企業団様と北千葉シールド作業所の皆様に多大なご協力を頂きました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

## 【参考文献】

- 1) 環境省：令和4年度振動規制法施行状況調査について（概要），  
<https://www.env.go.jp/content/000203253.pdf>, (2024. 8. 4).
- 2) 災害科学研究所 地盤環境振動研究会：地盤環境振動の対策技術, pp.109-134, 2016.
- 3) 早川清：地盤振動の伝搬過程における防止対策の背景と動向, 日本音響学会誌, 55 巻 6 号, pp. 449-454, 1999.
- 4) 神田仁, 石井啓稔, 吉岡修, 平川奉行, 川村淳一, 西村忠典：起機実験および数値解析による PC 柱列壁の防振性能, 物理探査, 第 58 巻第 4 号, pp. 377-389, 2005.
- 5) 岩根康之, 小林真人, 佐藤孝浩, 松本泰尚：振動制御装置を用いた建設振動の伝播経路対策技術の開発 — 模型実験による振動制御装置の配置方法の検討 —, とびしま技報, No. 69, pp.43-47, 2021.
- 6) 岩根康之, 小林真人, Dinh Diep Duy, 松本泰尚：振動制御装置を用いた建設振動の伝播経路対策技術の開発 — 模型実験による振動系の寸法と配置の検討 —, とびしま技報, No. 70, pp. 25-30, 2022.
- 7) 岩根康之, 小林真人, 山下祐, Dinh Diep Duy, 松本泰尚：振動制御装置を用いた環境振動の伝播経路対策 — 実大実験による質量体の振動低減効果の検討 —, 土木学会年次学術講演会講演概要集, VII-24, 2023.
- 8) 岩根康之, 小林真人, 松本泰尚：振動制御装置を用いた建設振動の伝播経路対策技術の開発 — 実大実験による低減効果の検証 —, とびしま技報, No. 71, pp. 30-34, 2023.

**Summary** We have developed “anti-vibration embankment” as a technology to counter vibration in propagation paths. There are two types of anti-vibration embankments, mass-object and vibration system. The mass-object constrains the displacement of the ground by the stiffness and mass and reduces vibration at frequencies of about 15 Hz or higher. The vibration system can be applied to vibrations at 15 Hz or lower, as the secondary wave generated by resonance interferes with the input wave. Our paper presents a case study involving the use of both the mass-object and vibration system at actual sites to verify their efficacy and explains the product development process.

**Key Words :** Vibration, Countermeasure in Propagation Paths, Anti-Vibration Embankment, Mass-Object, Vibration system