

# 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 — 模型実験による質量体の地盤振動低減効果の検討 —

Development of Countermeasure Using Vibration Control Equipment for Control of  
Construction Vibration in Propagation Paths  
(Model Experiment to Study Effect of Mass-Object on reduction of Ground Vibration)

岩根 康之<sup>\*1</sup>  
Yasuyuki Iwane

小林 真人<sup>\*1</sup>  
Masahito Kobayashi

内田 季延<sup>\*1</sup>  
Hidenobu Uchida

三浦 太郎<sup>\*1</sup>  
Taro Miura

千葉 泰河<sup>\*2</sup>  
Taiga Chiba

松本 泰尚<sup>\*2</sup>  
Yasunao Matsumoto

## 【要旨】

振動制御装置を用いた建設振動の伝播経路対策について検討している。本稿では、振動制御装置として質量体を選定し、その低減効果を模型実験により検討した。

模型実験の結果、質量体の質量を大きくすることで、低減効果は大きくなり、より低い振動数から低減効果が得られる傾向を確認した。質量体の幅を大きくした場合、低減効果のピークとなる振動数が変化し、質量体の影響範囲が広がった。質量体の設置位置によっても低減効果のピーク振動数は変化し、その傾向は質量体の近傍で顕著であった。質量体による低減効果は、加振点と質量体を結ぶ経路上の質量体の背面において得られることを確認した。質量体による低減効果が現れたとき、加振点と測定点の位相差に変化が生じたことから、質量体の設置によって伝播経路の振動速度が変化したことが示唆された。

【キーワード】 建設振動 伝播経路 振動制御装置 質量体 模型実験

## 1. はじめに

実用性と費用対効果に優れた建設振動の伝播経路対策技術の開発を目的として、振動制御装置を用いた対策手法について検討している<sup>1)</sup>。既報<sup>1)</sup>において、振動制御装置として、おもりのみから構成される質量体と、おもり、バネ、ダンパーおよび基礎から構成される振動系の2種類を検討してきた。振動系は、固有振動数を低減対象とする振動数に調整することで、質量体に比べ高い振動の低減効果を得られることを示した。しかし、固有振動数以外では高い低減効果は期待できず、また実用に際しては、低減対象振動数と固有振動数の調整が課題となる。一方、質量体は振動系に比べて特定の振動数での低減効果は小さいが、質量を大きくすることで幅広い振動数で効果を発揮することを確認した。また、施工に際してはおもりを設置するだけでよいため、実用性において非常に優れた手法といえる。そこで本稿では、振動制御装置として質量体を選定し、低減効果を模型実験により検討した結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

表-1に、実物に対する模型実験の相似比を示す。重力場の実験であるため、加速度の相似比は1となる。長さ

の相似比を0.025とした。模型地盤の材料には比重0.98のシリコーンゴムを使用し、実地盤は密度1.5程度の粘性土を想定したため、密度の相似比は0.667とした。

図-1に実験状況を示す。模型地盤の寸法は、 $H$  570 mm  $\times$   $W$  1200 mm  $\times$   $L$  1400 mmである。模型地盤の中央を加振点とし、加振器にピエゾアクチュエータ (PZ-72, 松定プレジジョン) を使用し、20~140 Hzのswept sine信号を変位振幅が一定となるよう入力して加振した。加振器は、模型地盤の枠の上に設置した梁で支持し、加振時の水平方向のブレを軽減した。質量体の素材は、弾性係数の相似比がコンクリートに近いテフロンを採用した。振動の測定には、3方向加速度ピックアップ (PV-97C, RION) を使用した。

表-1 相似比

諸元	次元	相似比
長さ	L	0.025
加速度	$LT^{-2}$	1
密度	$ML^{-3}$	0.667
時間	T	0.158
振動数	$T^{-1}$	6.325
速度	$LT^{-1}$	0.158
弾性係数	$ML^{-1}T^{-2}$	0.017

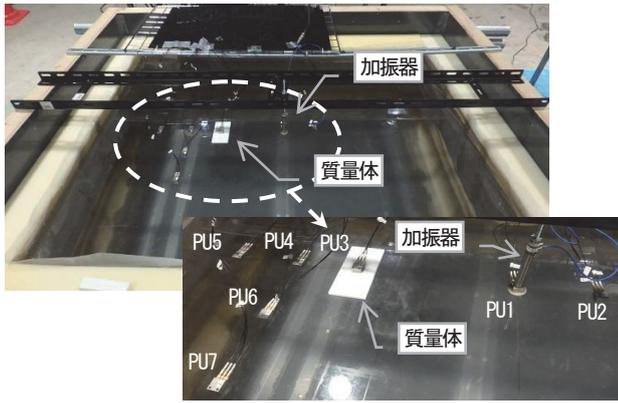


図-1 実験状況

## 2.2 検討項目と実験条件

本実験では、下記の3つを検討項目として、質量体の寸法や設置条件を設定した。

- ① 質量体の質量の影響
- ② 質量体の幅（奥行）の影響
- ③ 質量体の設置位置の影響

表-2に、検討項目ごとの質量体の設置条件を示す。

また図-2に、検討項目ごとの加振点、測定点および質量体の配置を示す。① 質量体の質量の影響では、加振点から200 mmに中心が来るよう質量体を配置した。質量体の寸法は、 $W 25 \text{ mm} \times L 100 \text{ mm}$ とし、厚さを $T=4, 8, 16 \text{ mm}$ に変えて、質量が22, 45, 88 gの3通りとなるよう設定した。② 質量体の幅（奥行）の影響では、質量体の設置位置は検討項目①と同様とし、質量体の長さは $L = 100 \text{ mm}$ とした。厚さは $T = 16 \text{ mm}$ で面密度を一定とし、幅を $W=25, 50, 100 \text{ mm}$ の3通りとした。③ 質量体の設置位置の影響では、 $T 16 \text{ mm} \times W 100 \text{ mm} \times L 100 \text{ mm}$ の質量体を使用し、質量体の設置位置を加振点から162.5 mm, 200 mm, 237.5 mmの3通りに設定した。また、これらの条件に加え、質量体を設置しない場合の測定を行い、質量体の有無による加速動応答の差から、質量体の低減効果を検討した。なお、これらの条件は、実際の建設現場を想定して設定した。例えば、①の条件を実物換算すると、平面寸法が $W 1000 \text{ mm} \times L 4000 \text{ mm}$ 、厚さが $T=200, 400, 800 \text{ mm}$ の鉄筋コンクリート製の質量体を、加振点から8 m に中心が来るよう設置したことに相当する。

測定点は、加振点の直下 (PU1)、加振点から質量体の反対側に100 mm (PU2)、質量体の上部中心 (PU3) (※質量体を設置しない場合は、質量体の中心に相当する模型地盤上)、質量体の背面側に加振点から300 mm (PU4) と400 mm (PU5)、PU4の直角方向に100 mm (PU6) と200 mm (PU7) の計7か所とした。

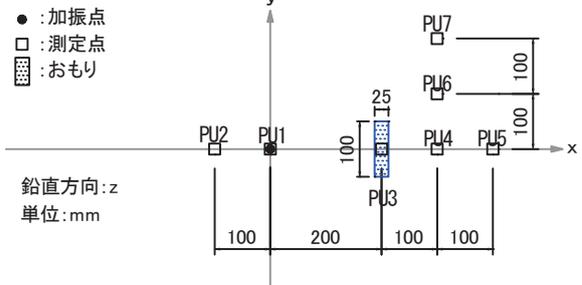
## 2.3 評価方法

各検討項目の実験条件について、質量体を設置した場合と、質量体を設置しない場合の伝達関数を算出し、その

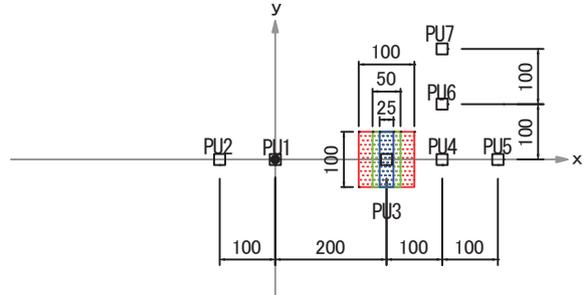
表-2 検討項目ごとの質量体の設置条件

No.	検討項目	$T$ [mm]	$W$ [mm]	$L$ [mm]	加振点と質量体の中心までの距離 [mm]
①	質量の影響	4, 8, 16	25	100	200
②	幅（奥行）の影響	16	25, 50, 100	100	200
③	設置位置の影響	16	100	100	162.5, 200, 237.5

### ① 質量体の質量の影響



### ② 質量体の幅（奥行）の影響



### ③ 質量体の設置位置の影響

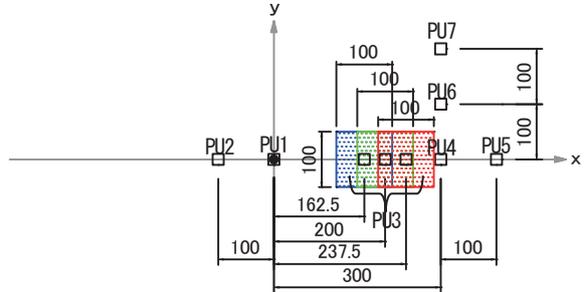


図-2 検討項目ごとの加振点、測定点および質量体の配置

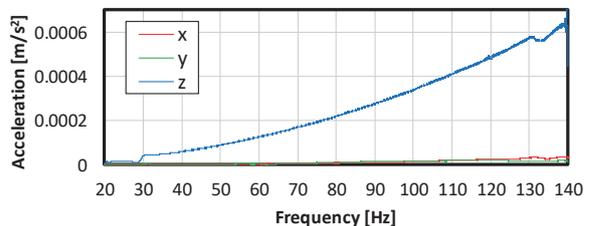


図-3 加振点における3方向の加速度のフーリエスペクトル

伝達関数は、加振点であるPU1の加速度を入力とし、PU2からPU7の加速度を出力として、クロススペクトル法により算出した。実験は、各条件について3回ずつ行い、得られた結果の平均値を評価量として採用した。

図-3にPU1での加振点における3方向の加速度のフーリエスペクトルを示す。図-3より、加振力はx, y

方向に比べ z 方向が卓越していることが分かる。z 方向の加速度について、30 Hz 以下では応答が小さく、ピエゾアクチュエータの特性によるものと考えられる。また 132 Hz 付近でディップが発生しており、後の調査で加振器を固定した梁の共振による影響であることが明らかとなった。以上のことから、40~130 Hz の鉛直方向において、S/N が十分で安定した加振力が得られたと判断する。この鉛直方向の加振により水平方向の応答も生じたが、本稿では、加速度応答が最も大きかった鉛直方向の測定結果に着目し、質量体による低減効果を検討する。

### 3. 実験結果

#### 3.1 検討項目① 質量体の質量の影響

図-4 に、質量体の質量と低減効果の関係を示す。PU2 では、質量体の質量にかかわらず、低減効果はほとんど

現れなかった。PU2 は、加振点から質量体の反対側の測定点であるため、質量体の影響を受けなかったと考えられる。また、加振点と質量体を結ぶ経路から遠い PU7 でも、低減効果はほとんどなく、若干ではあるが 100 Hz 以上で負の効果となった。一方、質量体上の測定点である PU3 では、質量体の設置による低減効果が確認され、約 80 Hz 以上では、88 g、22 g、45 g の順に低減効果が大きかった。地盤上の PU4 と PU5 では、質量が 88 g の低減効果が最大となり、低い振動数から低減効果が現れた。また PU6 でも、微小ではあるが低減効果が確認され、質量が大きいほど低減効果は大きくなった。加振点から質量体の背面側で、加振点と質量体を結ぶ経路の範囲内またはその近傍では、質量が大きいほど低減効果は大きく、また低い振動数から低減効果が現れる傾向を確認した。

図-5 に、加振点 (PU1) と各測定点 (PU2 から PU7)

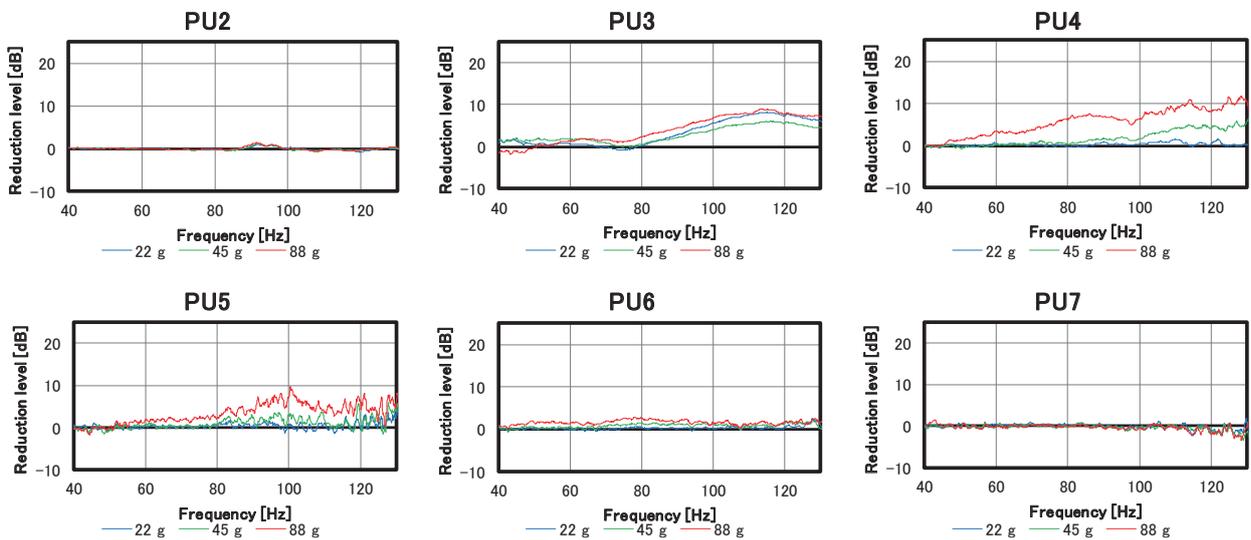


図-4 質量体の質量と低減効果の関係

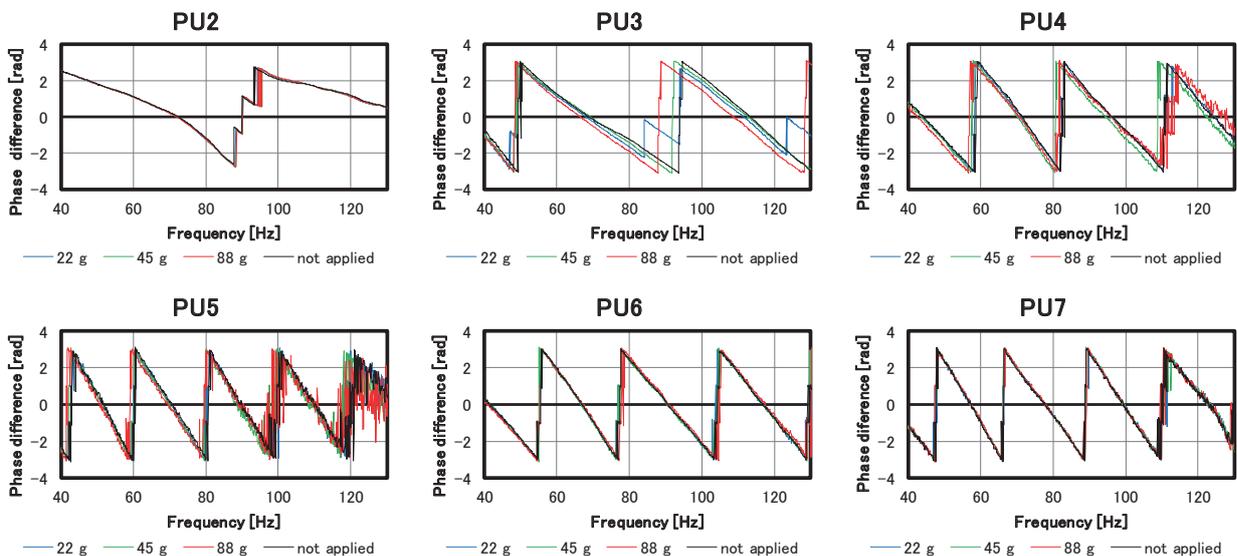


図-5 加振点と各測定点間の位相差 (質量体の質量による比較)

間の位相差（質量体の質量による比較）を示す。ここで、**図-5**の not applied は質量体がない状態の位相差を示しており、以降の**図-7**と**図-9**でも同様である。位相差は、**図-4**で示した低減効果を求める際の伝達関数から求めたものであり、その傾きから任意の振動数範囲の平均的な伝播速度を推定することができる。伝播速度は、位相差の傾きが緩やかなほど早く、急なほど遅いことになる。**図-4**で質量体の低減効果が確認されたPU3からPU6では、質量体を設置しない場合（**図-5**の黒線）に比べ、位相差の傾きに変化が生じていることが分かる。またPU7でも、負の効果が見られた100 Hz以上で微小な変化が確認できる。例えば、PU4の88 gに着目すると、およそ40~80 Hzでは質量体がない場合に比べて傾きが急で、伝播速度は遅くなっているが、100 Hz以上では勾

配は緩やかになり、伝播速度が早くなっていることがわかる。また、PU5の88 gでは、低減効果のピークとなった100 Hz付近や120 Hz付近において、位相差に乱れが生じている。これらのことから、質量体の設置によって地盤内に付加的な応力が発生し、局所的に地盤の剛性が変化したことで伝播速度が変わったと考えられる。

### 3.2 検討項目② 質量体の幅（奥行）の影響

**図-6**に、質量体の幅と低減効果の関係を示す。PU2とPU7では、質量体による低減効果は確認できず、一部の振動数で微小ではあるが負の値となった。これは、検討項目①と同様に、PU2とPU7が質量体の低減効果が現れる範囲の外であったためと考えられる。PU3では、質量体の幅によって低減効果のピーク振動数が変化し、幅

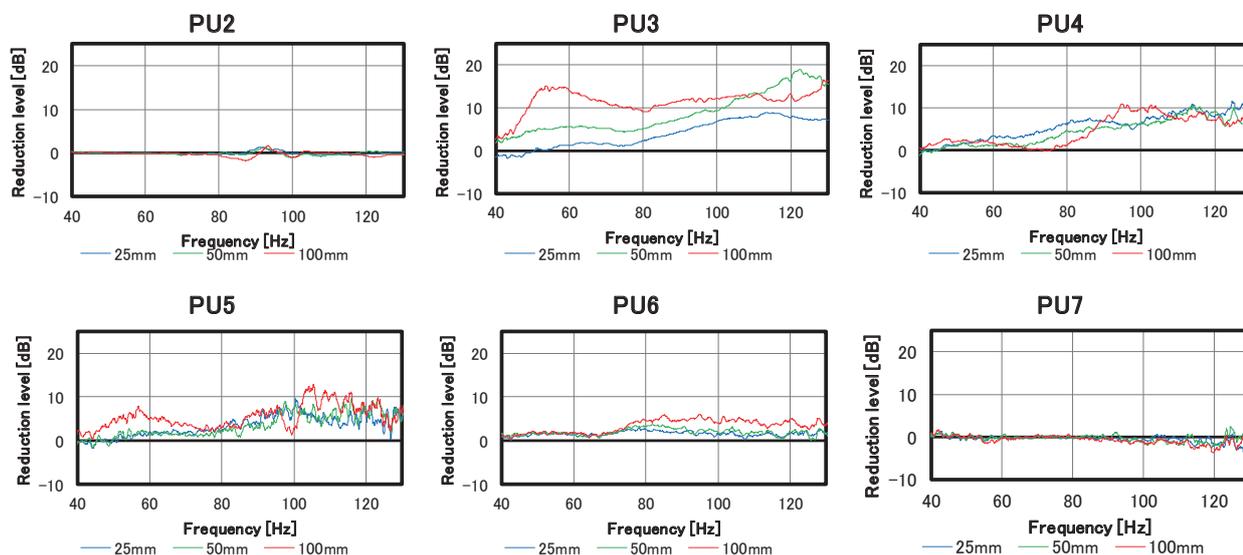


図-6 質量体の幅と低減効果の関係

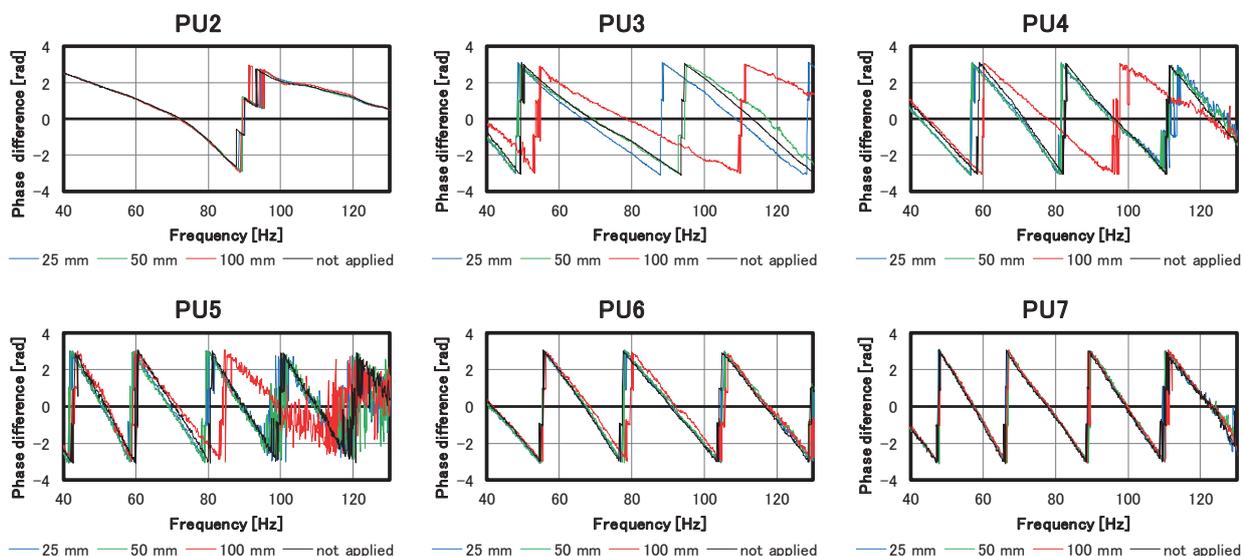


図-7 加振点と各測定点間の位相差（質量体の幅による比較）

が大きいほどピーク振動数が低くなる傾向を確認した。PU3は質量体上の測定点であるため、質量体の幅と波長の関係から、入力損失<sup>2)</sup>のピーク振動数が低くなった可能性がある。また、面密度を一定としているため、質量体の幅が大きいほど質量が大きくなり、質量体の地盤上での固有振動数が低くなったことも考えられる。PU4とPU5についても、質量体の幅によって低減効果のピーク振動数が変化しており、同様の影響が質量体の周辺地盤にも現れたと考えられる。PU6では、質量体の幅が大きいほど低減効果は大きくなる傾向を確認した。これは、質量体の幅が大きくなることで加振点と質量体を結ぶ経路が広がり、PU6への質量体の影響が大きくなったと考えられる。

図-7に、加振点と各測定点間の位相差（質量体の幅

による比較）を示す。図-6で低減効果が確認できなかったPU2とPU7では、質量体の有無による位相差の変化は小さい。一方、明確な低減効果が現れたPU3からPU6では、質量体の設置により位相差が変化していることが分かる。その傾きの変化や乱れは低減効果が大きい振動数ほど顕著な傾向があり、伝播速度の変化が大きいことが示唆される。

### 3.3 検討項目③ 質量体の設置位置の影響

図-8に、質量体の設置位置と低減効果の関係を示す。PU2とPU7では、質量体による低減効果はほとんど現れておらず、検討項目①や②と同様であった。PU6では、質量体と加振点の距離が近いほうが低減量は大きくなった。PU6は加振点と質量体の外縁を結ぶ経路に近い測定

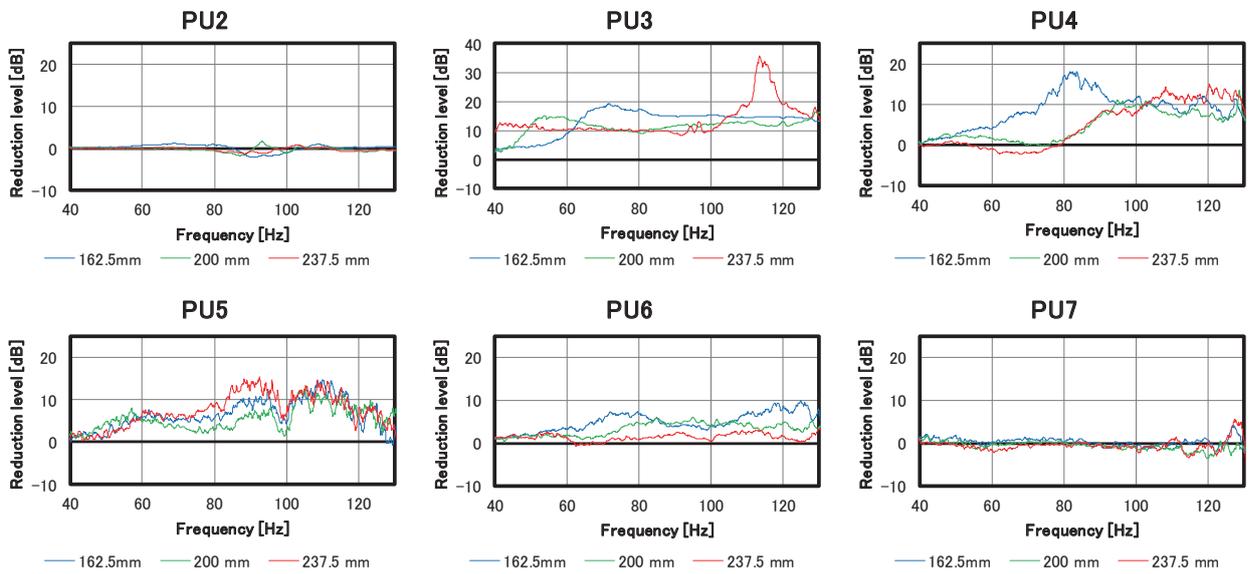


図-8 質量体の設置位置と低減効果の関係

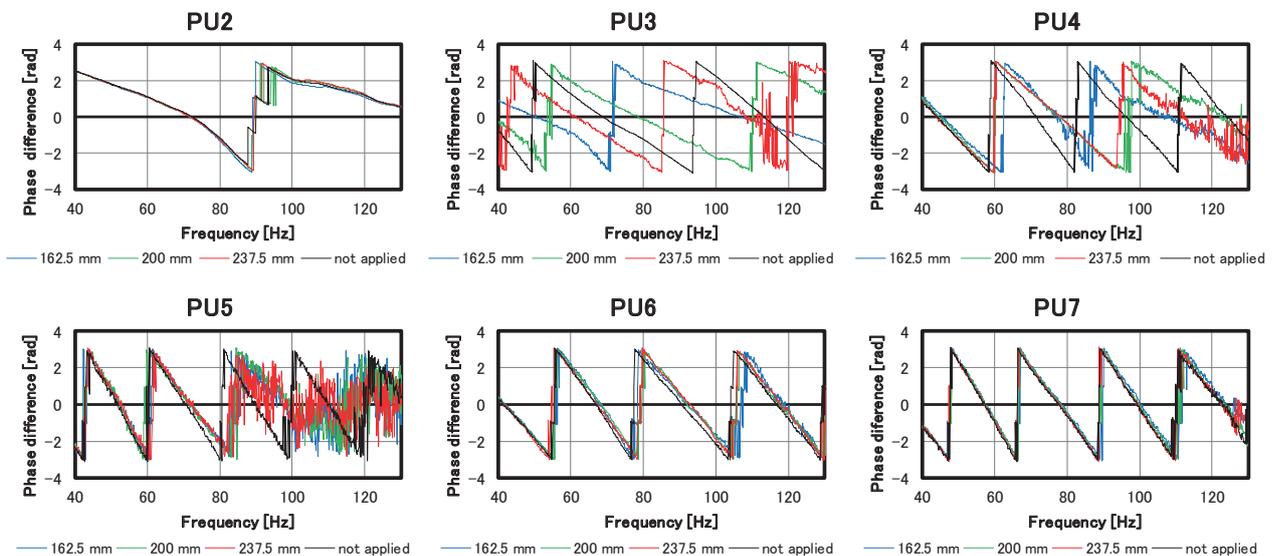


図-9 加振点と各測定点間の位相差（質量体の設置位置による比較）

点であり、振動の伝播経路に質量体の中心が近づくほど、低減効果が大きくなったと考えられる。PU3について、設置位置によって低減量のピーク振動数が変化したことが確認できる。PU3では入力損失の影響が考えられるが、設置位置の変化によって入力損失のピーク振動数が変化することはない。このため、PU3の低減効果のピーク振動数が変化した理由として、加振点から質量体への振動の伝播特性が、質量体の設置位置により変化したことが考えられる。質量体に近いPU4でも、PU3と同様に、低減効果のピーク振動数は質量体の設置位置によって異なる結果となった。一方、その背面のPU5では、設置位置にかかわらず、低減効果のピーク振動数は明確な変化はなかった。特に質量体の近傍では、質量体の設置位置によって振動の伝播特性が変化し、その影響で低減効果のピーク振動数が変化することが示唆された。

図-9に、加振点と各測定点間の位相差（質量体の設置位置による比較）を示す。ここで、PU3のnot appliedは、PU3を加振点から200 mmとしたときの測定結果である。PU3の場合、質量体の設置位置によって加振点との距離が変わるため、位相差には変化が生じる。また、低減効果が現れたPU4からPU6でも、質量体の設置位置による位相差の変化が顕著であった。これにより、質量体の設置位置が伝播経路上の伝播速度の影響することが示唆された。一方、検討項目①および②と同様に、質量体による低減効果が現れなかったPU2とPU7では、位相差の変化は小さかった。

#### 4. おわりに

質量体の振動低減効果について、模型実験により検討した。検討の結果、質量体は質量を大きくすることで、質量体の背面において、低減効果を発揮する振動数域を低くし、低減量を大きくできることを確認した。また、面密度を一定として質量体の幅を大きくした場合、低減

効果のピーク振動数が変化するとともに、質量体の設置による影響範囲が広がることを確認した。質量体の設置による低減効果は、加振点と質量体を結ぶ経路の質量体の背面において有効であり、そこから離れた測定点では低減効果は確認できなかった。また、特に質量体の設置位置によっても低減効果のピーク振動数が変化し、その傾向は質量体の近傍で顕著であることを確認した。

質量体による振動低減効果が現れる振動数では、位相差の傾きに変化や乱れが生じることから、質量体の設置によって振動の伝播速度が変化することが示唆された。

今後、質量体を設置することによる応力分布の変化と、それに伴う周辺地盤の剛性の変化などを定量的に把握することを目的として、数値解析による検討を進める予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 岩根 康之, 小林, 真人, 内田 季延, 三浦 太郎, 千葉 泰河, 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—質量体と振動系の地盤振動低減効果の検討—, とびしま技報 No. 66, pp. 55-60, 2018.
- 2) 山原 浩, 広瀬 道孝, 伊藤 哲次: 地震時の地動と地震波の入力損失, 清水建設研究所報 第14号, pp. 61-70, 1969.
- 3) 千葉 泰河, 岩根 康之, 小林, 真人, 松本 泰尚: おもりのを用いた環境振動の伝播経路対策に関する模型実験—おもりの質量と低減効果の関係—, 土木学会第74回年次学術講演論文集, 2019.
- 4) 岩根 康之, 小林, 真人, 千葉 泰河, 松本 泰尚: おもりのを用いた環境振動の伝播経路対策に関する模型実験—おもりの幅および設置位置と低減効果の関係—, 土木学会第74回年次学術講演論文集, 2019.

**Summary** A study is under way on using vibration control equipment to control construction vibration in propagation paths. This paper reviews a model experiment of the use of a mass-object selected as a vibration control device, and the reduction effect achieved.

The result of a model experiment showed that the reduction effect improves with increased mass of the mass-object, and that the effect tends to initiate in lower frequencies. When the width of the mass-object is increased, the frequency at which the reduction effect reaches a peak changed, and the area affected by the mass-object widened. This peak also changed depending on the location of the mass-object. This tendency was quite remarkable in the neighborhood of the mass-object. The reduction effect of the mass-object was confirmed to be achieved at the backside of the mass-object on the path connecting the excitation point and the mass-object. Variance in the phase difference appearing between the excitation point and the mass-object when the reduction effect appeared due to the mass-object suggests that installation of the mass-object caused a change in the vibration rate of the propagation path.

We are investigating construction vibration control in propagation path using vibration control system. In this paper, a mass-object was selected as a vibration control system, and the reduction effect was examined by the model experiment.

**Key Words :** Construction Vibration, Propagation Path, Vibration Control Equipment, Mass-Object, Model Experiment