

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—

Development of Countermeasure using Vibration Control Device for Control of Construction Vibration in
Propagation Paths
(Study of Dimension and Arrangement of Vibration System by Model Experiment)

岩根 康之^{*1}
Yasuyuki Iwane

小林 真人^{*1}
Masahito Kobayashi

Dinh Diep Duy^{*1}

松本 泰尚^{*2}
Yasunao Matsumoto

【要旨】

振動に係る苦情は、建設作業に起因するものが6~7割を占める状態は長年続いており、対策技術の充実が求められている。そこで筆者らは、新たな振動の伝播経路対策として、振動系を開発している。振動系は基礎、バネ、おもりから構成され、おもりの振動で発生する二次波が入力波に干渉することで、振動系の固有振動数において低減効果を発揮する。本報では、振動系の実用化に向けて、振動系の寸法と配置が低減効果に及ぼす影響について模型実験により検討した結果を報告する。

寸法の検討では、おもりの質量と長さを変えて低減効果を測定し、おもりの質量が大きく、また長さが長いほど低減効果が大きくなる傾向を確認した。しかし、設置条件によって減衰が大きくなると、低減効果が小さくなることを確認した。配置の検討では、振動系の低減効果が得られる範囲を検討し、振動系を伝播経路上に設置した場合だけでなく、伝播経路から一定距離離れた位置に設置した場合でも一定の低減効果が得られることを確認した。また、振動系を2基設置する場合、2基を近距離で設置するよりも実換算で1.0~1.5m程度の間隔をあけて設置したほうが低減効果は大きいことを確認した。

【キーワード】 建設振動 伝播経路対策 模型実験 振動系

1. はじめに

振動規制法施行状況調査¹⁾によると、令和2年度の振動に係る苦情件数は4,061件で、前年度に比べて27.7%増加し、昭和53年以来42年ぶりに4,000件を上回った。このなかで、建設作業に起因した苦情は2,867件で全体の70.6%を占めた。振動に係る苦情で建設作業に起因したものが6~7割を占める状態は長年続いており、対策技術の充実が求められている。

このような背景を受け、筆者らは地表面に設置するだけで低減効果を発揮する振動制御装置として、振動系の開発を行っている^{2) 3) 4)}。振動系は、基礎、バネおよびおもりから構成される。振動系に入力する波によって二次的な波(二次波)が発生し、この二次波が入力波に干渉することで、特に振動系の固有振動数において低減効果を発揮する。既往の研究⁴⁾により、振動系は設置位置を加振点近傍とすることで低減効果を向上できることが明らかになっている。このため、建設現場では作業状況に応じて振動発生源の近くに振動系を配置することが理想的であり、油圧ショベルなどで移動が可能なサイズと重量で

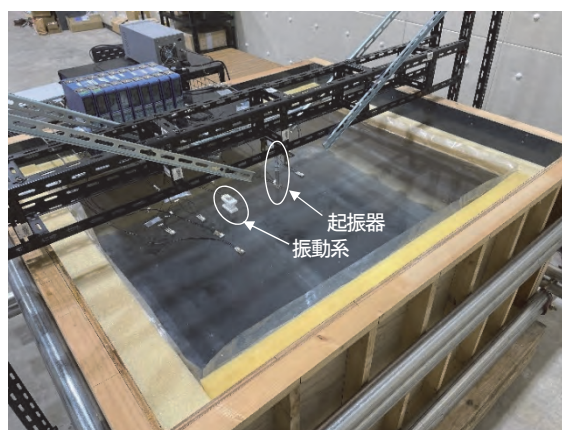


図-1 模型実験状況

構成することが望ましい。そこで、振動系の小型化を目的として、振動系のおもりの質量と振動系全体の長さが低減効果に与える影響を模型実験により検討した。また、現場では限られた数の振動系を効率的に配置することが求められるため、振動系の配置と低減効果の関係についても検討したので結果を報告する。

1. 技術研究所 研究開発G 第三研究室 2. 埼玉大学 大学院理工学研究科

表-1 模型実験における相似比

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

2. 実験概要

実験に供した模型の縮尺は1/40とした。模型地盤には、既往の研究⁹⁾でせん断波速度が約10 m/sとされたシリコンゴムと同等のものを使用した。表-1に模型実験における相似比を示す。地盤振動において支配的な物理法則はNewtonの慣性に関する法則であるため、長さ、加速度および密度を基準として相似比を設定した。重力場の実験であるため加速度の相似比は1となる。模型地盤のシリコンゴムの密度は $0.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ であり、実地盤は密度 $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度の粘土層を想定したため、密度の相似比は2/3とした。

図-2に実験配置を示す。模型地盤は平面寸法が1,200 mm×1,000 mm、厚さが570 mmである。模型地盤の中央に起振器を配置し、起振器からの中心距離が100 mmの位置に振動系を配置した。加速度ピックアップは、起振器の直下 (PU1)、振動系の反対側に100 mm (PU2)、振動系のおもりの上 (PU3)、振動系の背面に100 mm (PU4)、200 mm (PU5)、300 mm (PU6)、PU4の側方に100 mm (PU7) の7か所に設置した。

加振方向は鉛直とし、起振器を用いて変位振幅が一定で20~140 Hzの掃引加振を入力した。掃引速度は0.25 Hz/sとした。

低減効果の評価は、加振点の直下 (PU1) とその他の測定点 (PU2~PU7) の加速度のスペクトル比を H とし、算出し、振動系の有無による比を振動加速度レベルの低減量 RL (dB) とし式(1)より求めた。

$$RL = 20 \log_{10} (H_w / H_{w0})^{-1} \quad (1)$$

H_w : 振動系がある場合の加速度のスペクトル比

H_{w0} : 振動系がない場合の加速度のスペクトル比

3. 振動系の固有振動数と減衰比

おもりを鉄球で打撃した際の加速度応答から固有振動数と減衰比を算出した。図-3に測定状況を示す。このような測定は支持条件を剛に行うことが基本となるが、模型地盤に使用したシリコンゴムは柔らかい素材であり、振動系を設置した際の挙動が剛な地盤に設置した場合と比べて変化することが考えられた。そこで、支

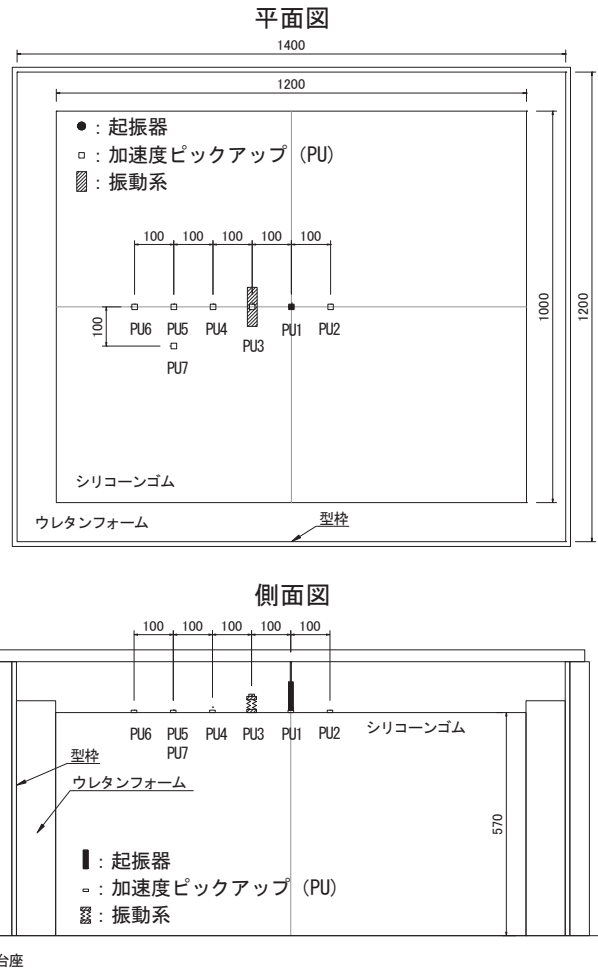
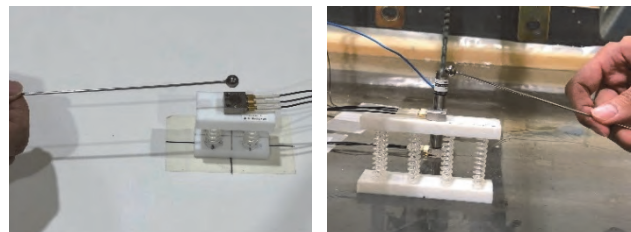


図-2 実験配置



a) 架台上 b) 模型地盤上

図-3 固有振動数と減衰比の測定状況

持条件が剛な架台上と、模型地盤上の2通りで測定を行った。模型の基礎とおもりにはテフロン (PTFE) を用い、ポリカーボネートのバネを挟み込んで接着剤で固定した。バネは振動系の固有振動数が約40 Hzとなるよう種類と数を調整した。模型実験の40 Hzは実換算で約6.3 Hzに相当する。

表-2に振動系の種類ごとの固有振動数と減衰比の測定結果を示す。表中のおもりの質量は、測定で使用した加速度ピックアップを含んだ値である。また、基礎はいずれも平面寸法がおもりと同一とし、厚さはすべて8 mmとした。減衰比について、架台上ではいずれも1%未満と小さいが、模型地盤上ではそれに比べて顕著に大きく、

表-2 振動系の種類ごとの固有振動数と減衰比

No.	模型										実大換算		
	寸法 (mm)			質量 (g)	面密度 (g/mm ²)	架台上		模型地盤上			寸法 (m)		質量 (kg)
	t	l	w			固有振動数 (Hz)	減衰比	固有振動数 (Hz)	減衰比	固有振動数の変化率	l	w	
1	2	100	25	15	0.006	35.8	0.006	35.0	0.044	2%	4.000	1.000	1440
2	4	100	25	26	0.010	38.6	0.003	37.8	0.066	2%	4.000	1.000	2496
3	8	100	25	48	0.019	38.5	0.002	36.3	0.102	6%	4.000	1.000	4608
4	16	100	25	90	0.036	41.3	0.002	38.5	0.195	7%	4.000	1.000	8640
5	8	50	25	26	0.021	40.4	0.004	38.3	0.095	5%	1.000	1.000	2496
6	8	25	25	15	0.024	40.1	0.004	37.8	0.105	6%	2.000	1.000	1440

また固有振動数も低くなったことが確認できる。この原因として、模型地盤に使用したシリコンゴムが持つ減衰の影響が考えられる。模型地盤上ではおもりの面密度が大きいほど減衰比が大きく、模型地盤の設置面積にかかる荷重によって減衰が変化したと考えられる。また、減衰比が大きいほど模型地盤上の固有振動数は架台上に比べて低くなっており、減衰系として挙動したと考えられる。実地盤においても振動系の設置条件によってはこのような挙動を示す可能性があることを留意しておく必要がある。

4. 振動系の寸法の検討

4.1 おもりの質量の影響

表-2のNo.1~4を用いて、振動系のおもりの質量と低減効果の関係について検討した。図-4に測定結果を示す。なお、測定結果は振動系による低減効果が最も明確に確認できたPU4の結果を示す。また振動数範囲について、30Hz以下は加振力が比較的小さく、100Hz以上はピックアップのケーブルの振動などによるノイズの影響を受けやすかったため、十分なS/Nが確保できた30~100Hzの結果を示す。

No.1, 2, 3では、表-2に示した固有振動数付近の近傍にRLのピークが確認でき、おもりの質量が大きいほど低減量が増加する傾向が確認できる。RLのピーク振動数をみると、No.1は35Hz付近、No.2は41Hz付近、No.3は44Hz付近が最大となった。表-2の固有振動数と比較すると、No.2やNo.3ではRLのピーク振動数が固有振動数より若干高い振動数にあり、ピークの幅が広い傾向が確認できる。この原因として、模型地盤に設置することで減衰が大きくなったことや、おもりの厚みが増えたことで回転方向などの鉛直方向以外の振動が発生しやすくなった可能性が考えられる。一方、厚さが最大のNo.4ではRLは他に比べて小さく、固有振動数付近のピークは幅広い形となった。No.4は模型地盤上での減衰比がNo.3の1.91倍と大きく、おもりが十分に振動しなかったために低減効果が小さかった可能性が考えられる。振動系の低減効果を向上させるためには、おもりの質量を大きくするこ

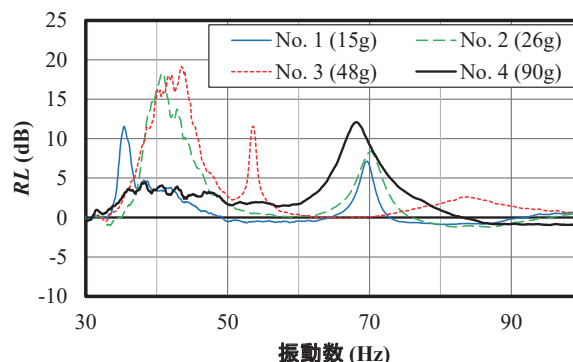


図-4 振動系のおもりの質量と低減効果の関係

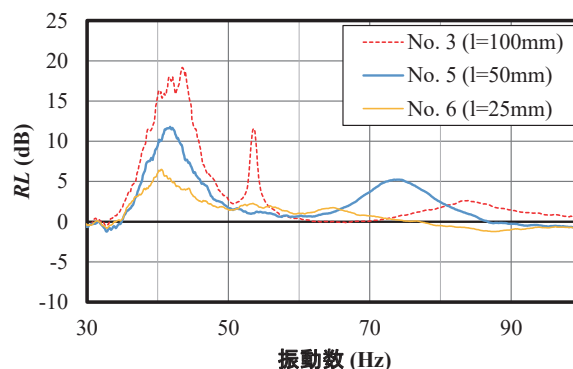
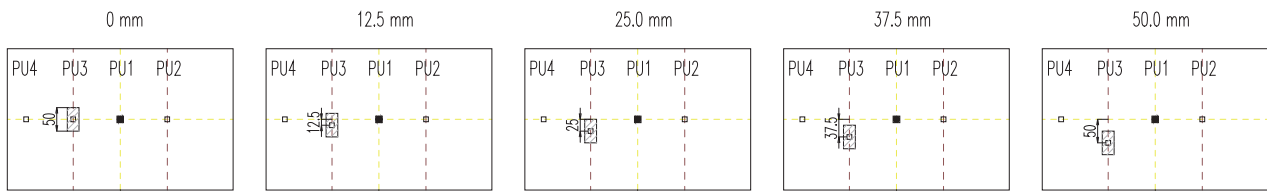


図-5 振動系の長さとの低減効果の関係

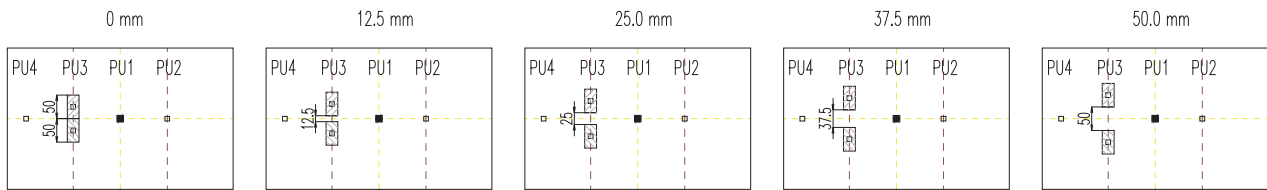
とが有効だが、設置時の減衰を小さく抑えることも重要と考えられる。

4.2 振動系の長さの影響

表-2のNo.3, 5, 6を用いて、振動系の長さとの低減効果の関係について検討した。図-5に測定結果を示す。3つの振動系を比較すると、固有振動数付近のRLは長さが長いほど大きくなったことが確認できる。3つの振動系の減衰比は模型地盤上でも同程度であることから、長さが長くなることによっておもりの含む振動系の質量が増加し、また振動系の側方から回り込む振動の影響が小さくなったことで低減効果が向上したと考えられる。



a) 単体で低減効果が得られる範囲の検討



b) 2基の設置間隔の影響の検討

図-6 振動系の配置

5. 振動系の配置の検討

4章では、振動系はおもりの質量が大きく、長さが長いほうが低減効果は大きくなることを確認した。しかし、振動系を実際の現場に適用するためには、振動系の規模をいわずらに大きくするのではなく、ハンドリングを考慮した大きさのものを効率的に配置することが望ましい。そこで本章では、実物大の平面寸法が2.0m×1.0mで比較的ハンドリングが良い表-2のNo.5の振動系を対象に、単体および2基並べた際の配置と低減効果の関係を検討した結果について述べる。

5.1 単体で低減効果が得られる範囲

図-6の a)に示すように、1つの振動系をPU1とPU4を結ぶ振動伝播経路上に振動系の中心が来る場合を0 mmとし、そこから直交方向に振動系を12.5 mm (実換算で0.5 m) ずつずらして配置し、振動系の低減効果が得られる範囲を検討した。

図-7に測定結果を示す。0~37.5 mmの範囲では、RLのピークは10 dB程度でほとんど差がなく、一定の低減効果を発揮したことが確認できる。37.5 mmでは、加振点と受振点を結ぶ伝播経路と振動系の端部は12.5 mm離れており、振動系を伝播経路上に設置しない場合でも低減効果を発揮したことがわかる。しかし、50 mmでは40 Hz付近のRLは約8 dBまで低下し、低減効果が小さくなったことがわかる。振動系が伝播経路の中心にない場合でも、振動系の端部から約12.5 mm (実大換算で0.5 m) 離れた範囲までは安定して低減効果を発揮し、それ以上離れると低減効果が小さくなったといえる。

5.2 2基の設置間隔の影響

図-6の b)に示すように、振動系2基の離隔距離を0 mmから50 mmまで12.5 mmずつ変化させて配置し、RLを測定した。ここで0 mmについて、実際には2体の振動系が

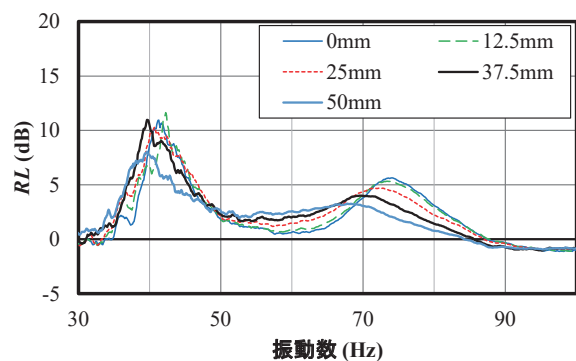


図-7 振動系の配置と低減効果の関係(単体で低減効果が得られる範囲の検討)

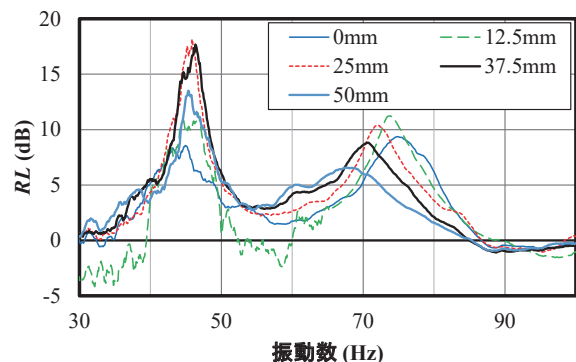


図-8 振動系の配置と低減効果の関係(2基の設置間隔の影響の検討)

接触しないようにわずかなすき間をあけて配置した。

図-8に測定結果を示す。RLは25 mmと37.5 mmが同程度で最も大きく、次に50 mm、12.5 mmと続き、0 mmが最小となった。隣り合う2基の振動系の距離によって、おもりの振動で発生する2次波と入力波の干渉のパターンが変化し、低減効果に変化した可能性が考えられる。5.1節で示したような振動系が一定の低減効果を発揮できる程度の距離をとって隣り合う振動系を配置することで、効率的に振動を低減することができるといえる。

6. まとめ

模型実験により振動系の寸法と配置を変えて低減効果を検討した。振動系の寸法について、おもりの厚さを厚くして質量を大きくしたほうが、低減効果が大きくなる傾向を確認した。しかし、設置条件によって減衰が大きくなると低減量が小さくなる場合があり、低減効果の向上には減衰を小さくすることも重要であることが示唆された。また、長さが長いほど低減効果は大きくなり、長さによって振動系全体の質量と回り込み振動の影響が異なることが原因と考えられた。さらに、振動系の配置を変えて低減効果の得られる範囲を検討した。振動系の低減効果は、振動系を加振点と受振点を結ぶ伝播経路上から一定距離離して設置した場合でも確認され、本実験では平面寸法で 50 mm×25 mm (実換算で 4 m×1 m) の振動系の端部が伝播経路から 12.5 mm (実換算で 0.5 m) 離れた場合でも、伝播経路上に振動系の中心が来るよう設置した場合と同程度の低減効果が得られることを確認した。また、2 基並べて設置する場合は、25~37.5 mm (実換算で 1.0~1.5 m) 程度離して設置したほうが近接して設置するよりも低減効果は大きかった。ただし、これらはシリコンゴムを使用した模型地盤での結果であり、地盤条件によっては低減量や影響範囲が異なることが想定される。今後、実大実験により同様の検証を実施し、振動系の実用化に向けた検討を進めていく。

【参考文献】

- 1) 環境省：令和 2 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/900396305.pdf>, (2022. 2. 25).
- 2) 長沼俊介, 松本泰尚, 小林真人, 西村忠典：建設作業振動に対する地表面上での制御に関する解析的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会論文集, pp. 69-70, (2014 9).
- 3) 岩根康之, 小林真人, 千葉泰河, 松本泰尚：質量体と振動系の振動低減効果に関する研究 — 数値解析による検討一, 土木学会第 73 回年次学術講演会論文集, pp. 37-38, (2018. 8).
- 4) 岩根康之, 小林真人, 佐藤考浩, 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 — 模型実験による振動制御装置の配置に関する検討一, 土木学会第 76 回年次学術講演会論文集, VII-19, (2021. 9).
- 5) 武居泰, 山田聖治, 中井正一：シリコン地盤模型を用いた地盤—杭基礎系の交通振動伝搬に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第 73 巻 第 634 号, pp. 1347-1354, (2008. 12).

Summary Since the state that the complaint related to vibrations from the construction work occupies 60% to 70% has continued for many years, the fulfillment of technology for implementing measures is required. Therefore, we are developing a vibration system as a new countermeasure to the propagation path of vibration. The vibration system consists of the foundation, spring, and weight. The secondary wave generated by the vibration of the weight interferes with the input wave, which exerts a reduction effect on the natural frequency of the vibration system. This paper reports the results of studying the influence of the dimensions and arrangement of the vibration system on the reduction effect by conducting model experiments towards practical application of the vibration system.

In order to study dimension, we measured the reduction effect by changing the mass and length of weights and recognized there is a tendency that the larger the mass of the weight and the longer the length of the mass, the reduction effect becomes large. However, it was found that the larger attenuation due to the installation condition results in a smaller reduction effect. We studied the range of arrangements capable of obtaining the reduction effect of the vibration system and recognized that a certain reduction effect is obtained not only in the case that the vibration system is installed on the propagation path but also that it is installed at a position apart from the propagation path at a certain distance. In addition, we recognized that, in the case of installing two vibration systems, the installation of two vibration systems at intervals of 1.0 to 1.5 m converted to the actual state provides the larger reduction effect than that of two vibration systems at close distance.

Key Words : Construction Vibration, Countermeasure in Propagation Paths, Model Experiment, Vibration System

