

振動制御装置を用いた建設振動の伝搬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—

Development of a Countermeasure for the Propagation Route of Construction
Vibration by Using Vibration Control System
(A Study on Ground Vibration Reduction Effects of Mass-Object and Vibration-System)

岩根 康之^{*1}
Yasuyuki Iwane

小林 真人^{*1}
Masahito Kobayashi

内田 季延^{*1}
Hidenobu Uchida

三浦 太郎^{*1}
Taro Miura

千葉 泰河^{*2}
Taiga Chiba

松本 泰尚^{*2}
Yasunao Matsumoto

【要旨】

建設振動に対する苦情件数は近年増加傾向にあり、対策技術の向上が望まれている。本稿では、建設振動に適用可能な伝搬経路対策技術の開発を目的として、質量体および振動系の2種類の振動制御装置による振動低減効果を数値解析と模型実験により検討した結果について報告する。

質量体の場合、おもりの質量を十分に確保することで、10 Hz 程度以上の振動数で低減効果を発揮できることを確認した。振動系の場合、その固有振動数を対象に、質量体に比べ幅広い振動数で高い低減効果を発揮することを確認した。

【キーワード】 伝搬経路対策 質量体 振動系 数値解析 模型実験

1. はじめに

平成 28 年度振動規制法施行状況調査¹⁾によると、振動に係る苦情件数は近年増加傾向にあり、平成 28 年度は 3,252 件であった。そのうち約 7 割を占める 2,190 件が建設作業によるものであり、建設振動への対策技術の向上は社会的課題のひとつといえる。

建設振動対策は、発生源対策、伝搬経路対策および受振部対策に分類される²⁾。建設工事の場合、特定の物件を対象とした受振部対策はあまり一般的でなく、発生源対策と伝搬経路対策が検討される。発生源対策としては、低振動型機械の選定や、発生振動の小さい工法への変更、防振マットなどを用いた地盤への振動伝達の低減などがある。これらは、最も確実な対策であり建設振動対策の基本となる。しかし、発生源対策のみでは効果が不十分な場合や、現場条件によって発生源対策が実施できない場合などは、伝搬経路対策の採用を検討する。代表的な伝搬経路対策としては防振溝や防振壁などがあげられるが、いずれも対策規模が大きく、安全性や費用対効果の問題からほとんど実用に至らないのが現状である。そこ

で、建設工事に適用可能な簡便かつ効率的な伝搬経路対策手法の構築を目的として、振動制御装置を用いた地盤振動低減技術を開発する。本稿では、振動制御装置の振動低減効果について、数値解析と模型実験により検討した結果を報告する。

2. 振動制御装置の概要

図-1 に振動制御装置の構成を示す。本研究では、質量体と振動系の2種類を振動制御装置として検討する。質量体はおもりのみからなり、おもりの慣性力³⁾や地盤の変位拘束などによって振動を低減すると考えられる。

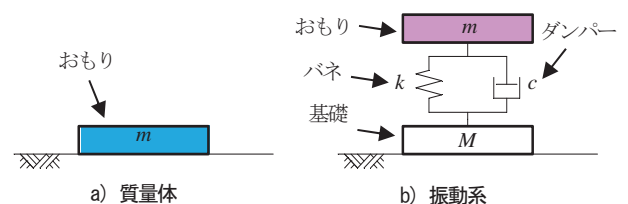


図-1 振動制御装置の構成

振動系はおもり、バネ、ダンパーおよび基礎からなる。振動系の場合、おもりの振動により発生する波が入力波に干渉し、特に振動系の固有振動数において低減効果を発揮すると考えられる。

3. 数値解析による低減効果の確認³⁾

3.1 解析手法

解析には3次元地盤—構造物相互作用解析プログラム「Super FLUSH/3D」を使用した。30.0 m×30.0 mの地表面と振動制御装置を有限要素法でモデル化し、地盤は成層地盤として薄層要素法でモデル化した。

解析に用いた地盤モデルは、表層と支持層の単純な2層構造とした。支持層は地表面から200.0 mまでモデル化し、地盤の半無限性を考慮するため下端は粘性境界とした。表-1に地盤モデルの物性値を示す。表層の物性値は後述の模型実験で使用したシリコンの地盤模型を想定して設定しており、実地盤としてはN値が1程度の粘性土に近い。また支持層の物性値は、N値が50以上の砂礫を想定した。

図-2に解析モデルの平面図を示す。質量体または振動系の平面寸法はいずれも1.0×4.0 mとし、その中心が加振点から6.0 mとなるよう配置した。質量体および振動系のおもりと基礎は鉄筋コンクリートを想定しており、物性値は表-2に示すとおりである。おもりの厚さについて、質量体は $t=0.2, 0.4, 0.8$ mの3通りに設定し、おもりの質量が低減効果に与える影響を検討した。振動系のおもりと基礎はいずれも $t=0.4$ mとし、固有振動数が加振振動数と一致するようバネ定数を調整した。加振力について、振幅が1.0 tfの鉛直方向の正弦波加振とし、加振振動数は4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20 Hzとした。

置がない場合、加速度は加振点を中心に同心円状に分布している。一方で質量体または振動系を設置した場合、振動の伝搬性状はその背面で著しく変化しており、この傾向は他の振動数でも同様であった。これにより、質量体および振動系の背面は振動低減の平面的な対象範囲として有効であることが示唆された。そこで本稿では、質量体または振動系の背面のP1（加振点から8.0 m）の加速度応答から低減効果を評価する。

表-1 地盤モデルの物性値

	層厚 (m)	せん断波速度 (m/s)	単位体積質量 (tf/m ³)	ポアソン比	減衰定数
表層	24.0	45.963	1.47	0.49	0.05
支持層	176.0	400.000	1.90	0.40	0.01

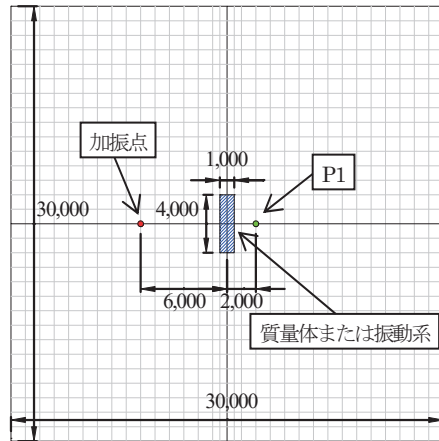


図-2 解析モデルの平面図

3.2 解析結果

(1) 振動制御装置の影響範囲

図-3に加速度最大値の分布の例を示す。振動制御装

表-2 質量体および振動系のおもりと基礎の物性値

単位体積質量 (tf/m ³)	ヤング率 (tf/m ²)	ポアソン比	減衰定数
2.35	2.21E+06	0.20	0.05

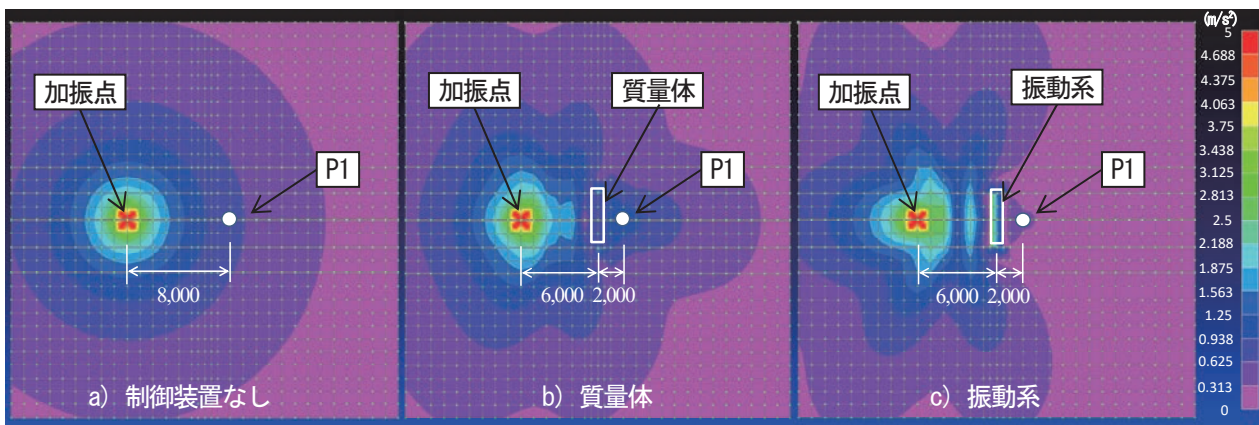


図-3 加速度最大値の分布の例 (10Hz)

(2) 質量体と振動系の低減効果の比較

図-4に、質量体と振動系の振動数ごとの低減効果を示す。以降、質量体または振動系の有無による振動加速度レベルの差を低減量として示す。質量体の低減量は4~10 Hzにかけて減少し、12.5 Hz以上では振動数が高いほど増加する傾向が確認できる。これにより、質量体の場合、振動数が高いほうが低減効果を得られやすい傾向が示唆された。また、6.3~16 Hzにかけて負の値となっており、質量体が振動することで振動加速度が増幅したと考えられる。質量体と振動系を比較すると、振動系のほうが低い振動数から低減効果が現れ、低減量も大きいことがわかる。低減量は8Hzが最大であり、12.5 Hz以上では振動数が高いほど質量体の低減量に近づく傾向が確認できる。この原因として、振動系の固有振動数が高くなることで剛性が大きくなり、振動系の挙動が質量体に近づくことが考えられる。

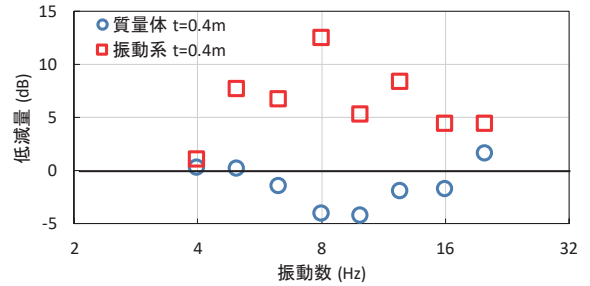


図-4 質量体と振動系の振動数ごとの低減効果 (P1)

(3) 質量体の質量と低減効果の関係

図-5に質量体の質量と低減効果の関係を示す。t = 0.2 mとt = 0.4 mの低減量の差は2 dB以下であり、おもりの質量による明瞭な差は認められなかった。一方、t = 0.8 mの場合、低減量は8 Hz以上で他の質量体より大きく、12.5 Hz以上では正の値となり低減効果が確認された。これにより、質量体はおもりの質量を十分に確保することで、一定以上の振動数で低減効果を得られることが示唆された。しかし、6.3 Hzでは低減量が-8 dB程度と最も小さくなった。これは、質量体のがたつきによる振動の増幅と考えられ、おもりの質量が大きいほうが増幅効果も大きいことが確認された。

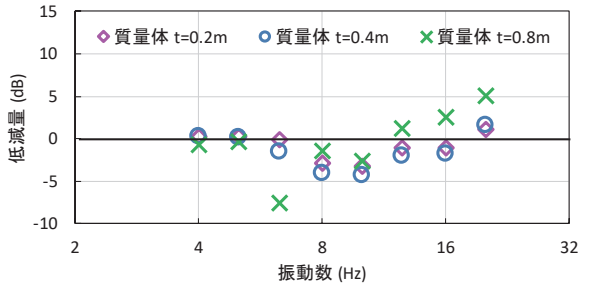


図-5 質量体の質量と低減効果の関係 (P1)

表-3 相似比

諸元	次元	相似比
長さ	L	1/40
加速度	LT ²	1
密度	ML ⁻³	2/3
時間	T	0.158
振動数	T ⁻¹	6.325
速度	LT ⁻¹	0.158
弾性定数	ML ⁻¹ T ⁻²	0.017

4. 模型実験による低減効果の確認⁴⁾

4.1 実験概要

(1) 相似則

縮尺 1/40 の模型実験により、振動制御装置の低減効果を確認した。表-3に本実験における相似比を示す。重力場の実験であるため、加速度の相似比は1となる。振動の伝搬速度を相似比に近づけるため、模型地盤の材料にはシリコン (比重 0.98) を使用した。実地盤には粘性土 (比重 1.5 程度) を想定したため、密度の相似比は 2/3 とした。表-4に模型実験の加振振動数と実換算振動数を示す。模型実験の加振振動数は、実換算振動数が3章の数値解析検討における加振振動数に相当するよう設定した。

(2) 実験条件

図-6に模型実験の平面図を示す。模型地盤の形状は1,200 mm×1,000 mmの長方形とし、深さは570 mmとした。端部からの反射の影響を軽減するため、模型地盤の周囲に厚さ100 mmのウレタンフォームを設置した。模型地盤の中央を加振点とし、鋼球を落下させた際の加速

表-4 模型実験の加振振動数と実換算振動数

模型	振動数 (Hz)						
	25	31.5	40	50	63	80	100
実大	4.0	5.0	6.3	7.9	10.0	12.6	15.8

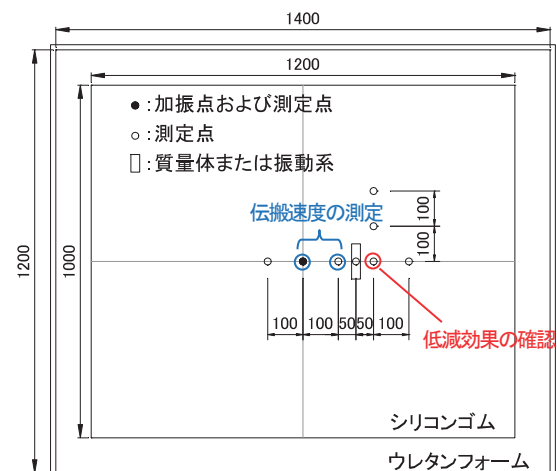


図-6 模型実験の平面図

度波形から表面波の伝搬速度を算出した。また、質量体または振動系を加振点から 150 mm に配置し、加振点から 200 mm 地点の加速度応答から低減効果を確認した。これらの位置関係は、実換算で 3 章の数値解析で示した配置に相当する。

写真-1 に模型実験状況を示す。加振はピエゾアクチュエータ（松定プレジジョン PZ12-72）によって行い、加速度は圧電式加速度ピックアップ（RION PV-97、質量：4.7 g）を用いて測定した。質量体および振動系のおもりと基礎には、相似の弾性定数が鉄筋コンクリートに近いテフロン板を使用し、平面寸法は 25 mm×100 mm とした。おもりの厚さを $t=7\text{ mm}$ とし、質量体と振動系の低減効果を比較した。また質量体は厚さを $t=4, 7, 15\text{ mm}$ の 3 通りとし、おもりの質量が低減効果に与える影響について検討した。振動系について、固有振動数が表-4 の振動数と一致するようバネの種類と数を調整した。振動系を自由振動させて固有振動数を測定し、目標とする加振振動数との間にずれがある場合は固有振動数の測定結果を加振振動数とした。

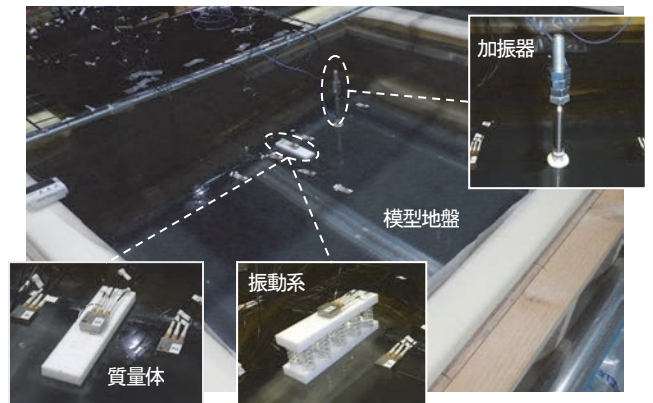


写真-1 模型実験状況

4.2 実験結果

(1) 伝搬速度

図-7 に鋼球落下時の加速度波形の例を示す。12 回の測定値を平均した結果、模型地盤の表面波の伝搬速度は 7.7 m/s となった。せん断波速度は表面波速度の 1/0.96 倍として実物換算すると、実物大のせん断波速度は 50.6 m/s となった。これにより、数値解析で設定した表層地盤のせん断波速度との差は約 5 m/s となった。

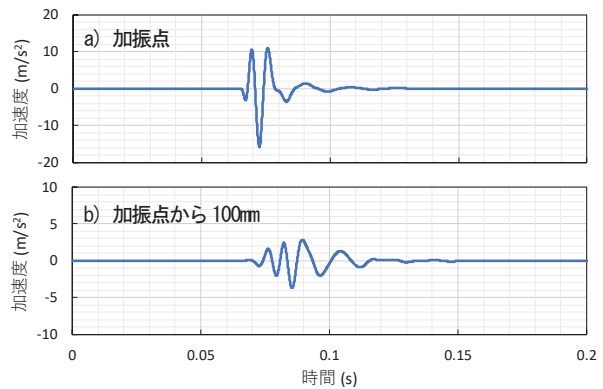


図-7 伝搬速度測定時の加速度波形の例

(2) 質量体と振動系の低減効果

図-8 に質量体と振動系の振動数ごとの低減効果を示す。振動系は質量体よりも低い振動数から低減効果を得やすいことがわかる。この傾向は数値解析の結果と同様であるが、低減量がピーク、ディップとなる振動数は異なる結果となった。この原因として、質量体および振動系の低減効果は地盤が持つ振動特性に影響され、模型実験と数値解析で地盤条件が異なったことが考えられる。

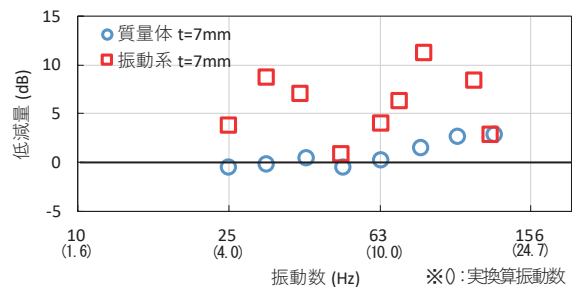


図-8 質量体と振動系の振動数ごとの低減効果

(3) 質量体の質量と低減効果の関係

図-9 に質量体の質量と低減効果の関係を示す。数値解析の結果と同様に、質量が大きいほど低減量が大きい傾向が確認できる。また模型実験では数値解析に比べ低減量が大きく、特に $t=15\text{ mm}$ では、40~125 Hz の幅広い振動数で低減効果が得られた。

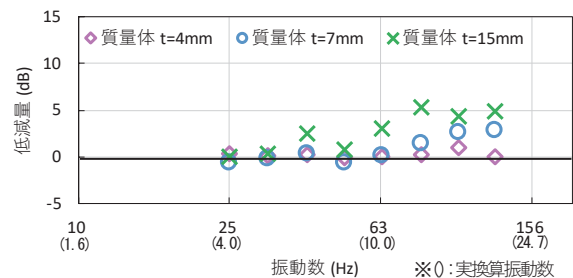


図-9 質量体の質量と低減効果の関係

4. まとめ

数値解析と模型実験により、質量体と振動系の低減効果の評価し、下記の結果を得た。

① 数値解析と模型実験の両方において、固有振動数を加振振動数に調整した振動系は、質量体に比べ低

い振動数から低減効果を発揮し、低減量も大きい傾向を確認した。

② 質量体はおもりの質量が大きいほど低減効果が大きくなる傾向を確認した。例えば、本稿の数値解析や模型実験で使用した地盤において、おもりを $t =$

0.8 m の鉄筋コンクリートとした場合, およそ 10 Hz 以上の振動数で低減効果が期待できる.

- ③ 数値解析と模型実験で低減量のピーク, ディップとなる振動数やその大きさには違いが生じた. これは, 両者の地盤がもつ振動特性が異なることが主な原因と考えられる.

本検討では正弦波加振を対象に質量体と振動系の低減効果を検討したが, 実際の建設工事ではランダムな振動が発生する. 特に振動系の場合, 振動系の固有振動数の前後の振動数で反共振により振動が増幅することが懸念される. このような課題を詳細に検討し, 実用化に向けた開発を進めていく.

【参考文献】

- 1) 環境省水・大気環境局大気生活環境室：平成 28 年度振動規制法施行状況調査の結果について, http://www.env.go.jp/air/H28sindou_gaiyo.pdf, (2018.7.25 引用).
- 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, 森北出版, pp.99~137, 2016.
- 3) 岩根康之, ほかに：質量体と振動系の振動低減効果に関する検討 —数値解析による検討—, 土木学会第 73 回年次学術講演会論文集, 2018.9.
- 4) 小林真人, ほかに：質量体と振動系の振動低減効果に関する検討 —模型実験による検討—, 土木学会第 73 回年次学術講演会論文集, 2018.9.

Summary Recently, the number of complaints about construction vibration is increasing and improvement of countermeasure technique is desired. In this study, in order to develop a countermeasure for propagation route which is applicable to construction vibration, ground vibration reduction effects by mass-object and vibration-system were considered in analytical study and model experimental study.

In the case of mass-object, it was confirmed the mass-object reduces vibration propagation at frequencies higher than about 10Hz if it has enough mass. In the case of vibration-system, it showed clearer vibration reduction effect at its resonance frequency compared with mass-object.

Key Words : Countermeasure for the propagation route, Mass-object, Vibration-system, Analytical study, Model experimental study