

## 地盤振動低減工法に関する基礎研究

Basic Research on Construction Method for Reduction of Ground Vibration



金田 淳\*



池本 宏文\*



高崎 秀明\*



谷口 善則\*

Reduction of ground vibration is a major issue that arises with train speed. In the past, we have studied the effects as well as developed an assessment method for a vibration-isolating wall. A large amount of data is necessary to refine the assessment method, but it is difficult to obtain due to the expense of installing a full-scale model. Therefore, we tried assessing its effects using a model. We have succeeded in evaluating differences in the effect of the vibration-isolating wall by material, using bender elements to evaluate one-dimensional vibration propagation characteristics. We have succeeded in evaluating two-dimensional distribution of the wall's effect using a model.

●キーワード：地盤振動、地中防振壁、振動低減効果

### 1. はじめに

列車の走行に伴い、橋桁から橋脚に振動が伝わり、橋脚を加振源として地盤に振動を伝播する。その結果、付近の家屋の窓や戸が揺れたりすることがある。橋脚から地盤へ伝わる振動は、列車の高速化に伴い大きくなることが想定されることから、高速列車のさらなる速度向上の実現に際して、地盤振動対策は重大な課題のひとつとなっている。

フロンティアサービス研究所では2007年より実効性の高い地盤振動対策工の設計施工法の確立を目的とし、振動対策工の試験施工、地盤振動の現地測定、構造物周辺地盤の地盤振動の予測および対策工を実施した場合の振動低減効果を評価する手法の開発を実施してきた。<sup>1) 2) 3)</sup>

地盤振動低減のために、地中防振壁を設置する場合、壁の厚さ、深さ、延長、材質などの諸元を決定しなければならない。地中防振壁による振動低減の効果はそれぞれの要素により異なることが考えられる。地中防振壁による振動低減効果の予測精度の向上を図るためには防振壁の諸元が振動低減効果に及ぼす影響を適切にモデル化する必要がある。

防振壁諸元の違いが低減効果に及ぼす影響を確認するためには、諸元をさまざまに変化させた地中防振壁を実際に設置し、設置前後の地盤振動を比較することが望ましい。しかし、実物スケールの地中防振壁の設置は多大な労力と費用を要するため、多くの実施は困難である。

そこで、地中防振壁による振動低減効果の評価を実験により実施することを試みた。

実験は、主に防振壁の材質が振動低減効果に及ぼす影響を確認するためのベンダーエレメント素子を用いた要素実験と、地盤内における振動伝達特性に防振壁が及ぼす影響を確認するための土槽を用いた実験の2種類を実施した。次章以降に詳細を示す。

### 2. ベンダーエレメント素子を利用した実験

#### 2.1 実験概要

図1に、ベンダーエレメント素子の概要を示す。ベンダーエレメント素子は、厚み方向に分極された圧電素子を、弾性補強かつ電極の役割を果たすニッケルなどのシム材の両面に張りあわせた構造を有している。圧電素子は分極方向に対し電圧を印加すると伸縮するため、ベンダーエレメント素子に電圧を印加した場合、ベンダーエレメントに曲げ変形が生じる。また、圧電素子は外力により伸縮すると、分極方向の両側の電位差に変化が生じる。このため、ベンダーエレメントに曲げ変形が加えられた場合、ベンダーエレメントの両側に変形量に応じた電位差が生じる。

これらのベンダーエレメントの特性を利用することで、ベンダーエレメントを振動の発信素子、受信素子として利用することが出来る。

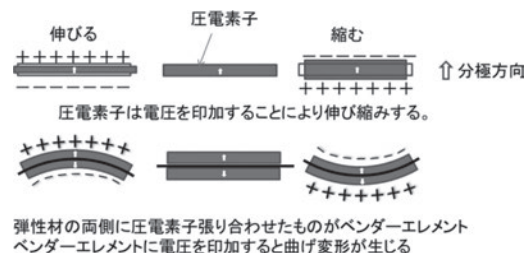


図1 ベンダーエレメント素子概要図

図2は、ベンダーエレメント実験供試体の概要図である。供試体は、地盤材料により直径5cm高さ12cmの円柱状に整形されている。高さ方向の中心部近傍に、防振材として用いる材料が挿入されている。ベンダーエレメントは円柱状の供試体の上端と下端に設置されている。上側のベンダーエレメントを振動発生源として、下側のベンダーエレメントを振動受信素子として利用する。

本実験では図2の供試体を利用し、振動発生源における

振幅に対する、受信点で得られた振動の振幅の比を比較することで、防振壁の有無や、材質の違いによる振動低減効果を確認した。<sup>4)</sup>

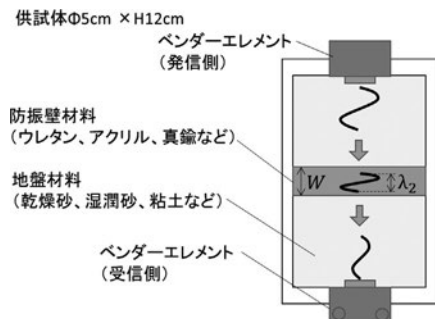


図2 供試体概要図

## 2.2 実験結果

図3に、試験結果の一例を示す。図3は横軸に発信側ベンダーエレメントより発信した振動周波数、縦軸に受信側ベンダーエレメントが受信した振動の振幅を示したものである。この結果を整理すると、防振壁有の振幅を防振壁無の振幅で除した値（以下、振幅比と記す）を算定できる。振幅比は周波数毎に異なるが、ここではその平均値を代表振幅比として取り扱うこととした。

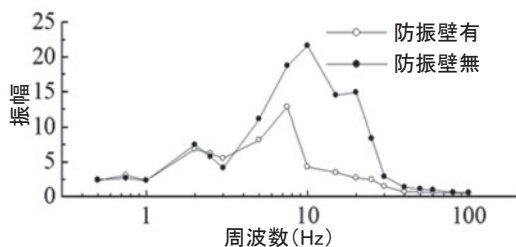


図3 周波数と受信振幅値の関係

図4は、防振壁に用いる材質の違いが振動低減効果に及ぼす影響を整理したものである。縦軸は振幅比、横軸はインピーダンス比を示している。ここでインピーダンスとは、材料の密度と振動伝播速度の積であり、インピーダンス比は地盤材料と防振壁材料のインピーダンスの比を示している。なお、図中の実線、点線、破線は理論曲線で、 $W$ と $\lambda_2$ はそれぞれ防振壁の厚さと防振壁内での波長である。理論曲線はインピー

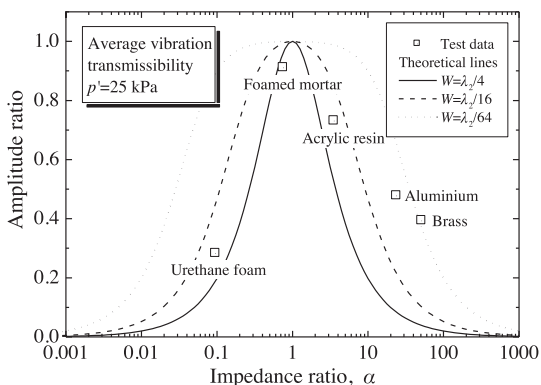


図4 材質・インピーダンス比、振幅比の関係

ダンス比1で極大値1を示している。インピーダンスは材料の硬さとの相関が強いことから、地盤材料と防振壁の硬さの差が大きいほど振動低減効果が大きくなることを示している。

図4には5種類の防振壁材料（ウレタン、モルタル、アクリル、アルミ、真鍮）について実験を行った結果の平均振幅比を示している。インピーダンス比が1に近い材料ほど平均振幅比は大きくなっており、実験結果は理論式と同様の傾向を示すことが明らかになった。

## 3. 土槽を用いた実験

### 3.1 実験概要

前章で紹介したベンダーエレメント素子を用いた実験は橋脚から地盤への振動伝播の一部に着目し、一次元的にモデル化した実験となっている。しかし、実際に橋脚から地盤に伝達される振動は、加振源である橋脚を中心に平面的に伝播することとなる。

そこで、地表面における振動の平面的な振動伝播特性に地中防振壁の諸元が及ぼす影響について、実験により確認を行うこととした。特に本実験では、地中防振壁の諸元のうち長さの影響について確認する。<sup>5)</sup>

実験は図5の概要図に示すとおり、土槽内の模擬地盤の表面上に設置した起振機から地盤に伝播する振動を、平面状に配置した加速度センサーで測定するものである。

図6に起振機および加速度センサーの配置、試験ケースを示す。試験パラメータは防振壁の有無、加振点の位置である。また、防振壁の長さの影響について、加振点の位置を変化させることで再現している。Case B4の場合、加速度センサー

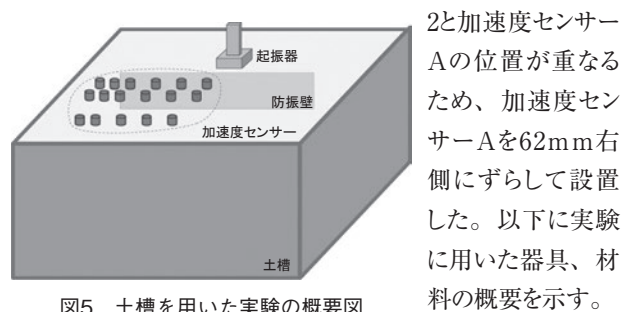


図5 土槽を用いた実験の概要図

2と加速度センサーAの位置が重なるため、加速度センサーAを62mm右側にずらして設置した。以下に実験に用いた器具、材料の概要を示す。

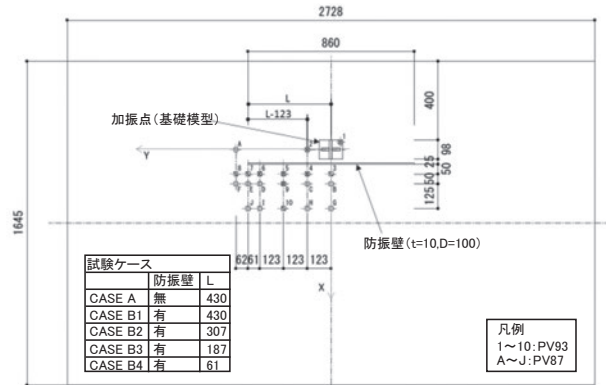


図6 起振機、加速度センサーの配置

(a) 土槽

使用した土槽の底面と側面には外来ノイズや壁面反射波の影響を可能な限り少なくするため、緩衝材としてスタイロフォームを底面および各側面に取り付けた。緩衝材取り付け後の土槽の内法は幅1.645m、長さ2.728m、高さ1.5mである。

(b) 模擬地盤

模擬地盤は、土槽内に高さが1.25mとなるように作成した。材料には気乾状態の小名浜砂を用い、相対密度60%を目標としてホッパーを用いた空中落下法により作成した。

(c) 防振壁

実験による振動低減効果の把握の可能性を検討するためには、振動低減効果の大きい材質の防振壁を用いることが望ましい。バンダーエレメント試験の結果からは、ウレタンが最も振動低減効果が大きいことが判明していたが、地盤内に地盤よりも柔らかい材料を設置する方法に課題が残る。そこで、本実験では、地盤より硬い材料で最も振動低減効果の大きい真鍮を防振壁の材料として用いることとした。

(d) 起振機、入力波形

起振機は模擬地盤上に設置した基礎模型上に固定した。図7にその状況を示す。また、基礎模型上に入力確認用の加速度センサーを取り付けている。加振は、鉛直方向に126Hz(実物で4Hz相当)の正弦波の振動を付与した。

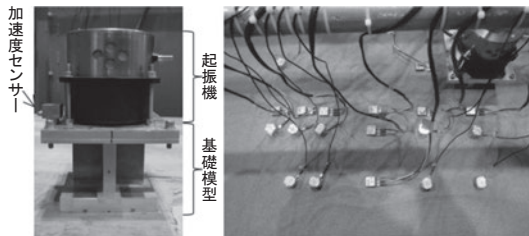


図7 起振機、加速度センサーの設置状況

(e) 加速度センサー

加速度センサーは、リオン(株)製の圧電形加速度ピックアップであるPV93及びPV87を使用した。これらの加速度センサーの下部にスパイクを取り付け、スパイクを地盤内に挿入し設置した。測定方向は鉛直方向加速度である。

(f) データロガー

サンプリング周波数を20kHzとし、0.5秒間(10,000データ)の記録を行った。記録は起振機を起動し、振動が安定したことを確認した後に実施している。

3.2 実験結果

測定結果は測定点における加速度の振幅について、加振点である基礎模型上に設置した加速度の振幅で除した伝達振幅比として整理した。図8~12に結果を示す。図中、防振壁に対し平行方向をY軸、直交方向をX軸とし、CASE Aの加振点(基礎模型の中心位置)を基準とした軸方向の離れで、加振点および受振点の位置を示している。

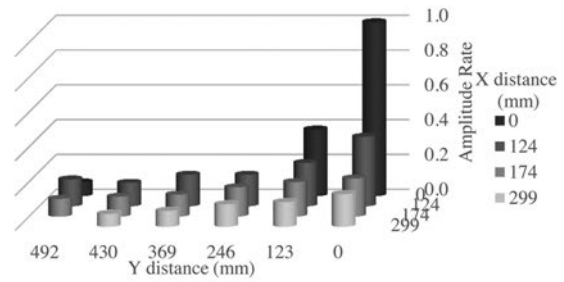


図8 測定結果 (CASE A)

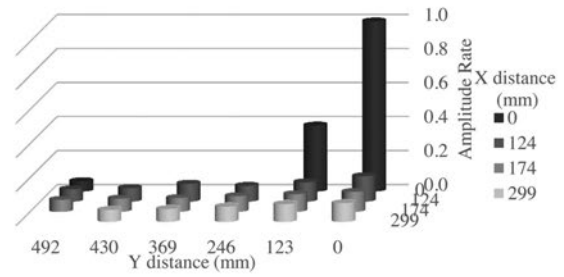


図9 測定結果 (CASE B1)

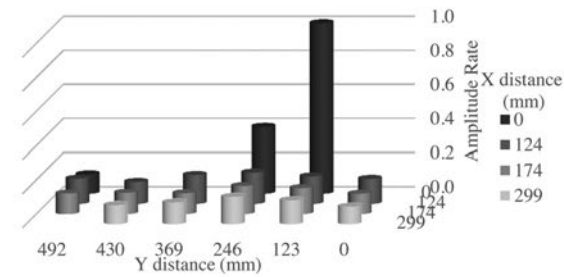


図10 測定結果 (CASE B2)

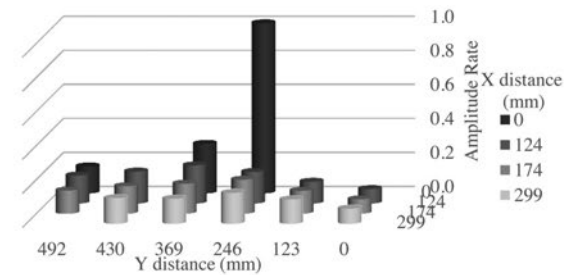


図11 測定結果 (CASE B3)

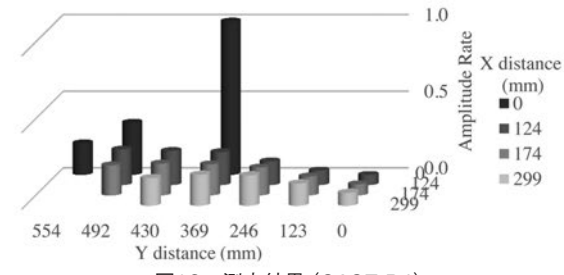


図12 測定結果 (CASE B4)

(a) CASE A (防振壁の設置がない場合)

起振点からの距離に応じて、振動が減衰しながら伝播していきることがわかる。

(b) CASE B1 (防振壁を設置した場合)

CASE B1とCASE Aの違いは防振壁の有無のみとなる。

CASE B1の伝達振幅比はCASE Aに比べると、防振壁を通過した $X \geq 124$ の範囲において大きく減少している。伝達振幅比の値が小さいながらも、加振点からの距離に応じて伝達振幅比が減少する傾向はCASE Aと同様である。

(c) CASE B2~4(防振壁を設置し加振点位置を変えた場合)

CASE B2~4ではCASE AとB1のように、防振壁の有無による伝達振幅比の比較実験はおこなっていない。CASE B1と比較すると $X \geq 124$ の範囲の伝達振幅比は全般的にCASE B1より大きく、防振壁による振動低減効果はCASE B1に比べて小さいことが想定される。特にCASE B3,B4においては加振点からの距離に対する減衰の傾向が振動の伝播方向によって異なり、加振点の防振壁端部までの距離が短い側(図中加振点よりも左側)は防振壁端部までの距離が長い側(図中加振点よりも右側)に比べ減衰が小さいことがわかる。

### 3.3 考察

考察にあたり、図13に示すとおり、着目測線、端部距離、伝播距離を定義する。加振点と着目する受振点を結ぶ線分を着目測線、着目側線と防振壁の交点から防振壁の端部までの最短距離を端部距離、加振点と受信点の距離を伝播距離とし、端部距離が振動低減効果に及ぼす影響を整理した。

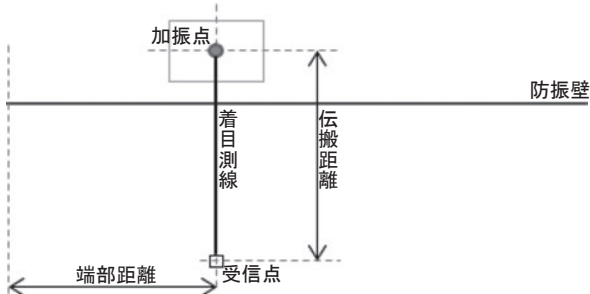


図13 着目測線、端部距離、伝播距離

図14に、着目測線を防振壁と直交する向きとした場合における端部距離と振動低減率の関係を、伝播距離毎に整理した結果を示す。ここで振動低減率とは、CASE Aにおける着目測線上の伝達振幅比(以下、対応振幅比と記す)と他CASEの着目測線上の伝達振幅比の差を対応振幅比で除した値である。値が大きいほど振動低減効果が高いことを示す。

図14より一部の点を除き端部距離が長くなるにつれて振動低減率が増加していることがわかる。逆の見方をすれば、端部距離が短くなるにつれて振動低減率が小さくなっているといえる。

また、伝播距離に着目すると、伝播距離が長いと振動低減率が小さくなるのがわかる。端部距離の減少に伴う振動低減率の低下の割合は伝播距離に応じて異なり、伝播距離がある程度長くなると低下率が大きい。

これらの結果より端部距離の長さは振動低減効果に影響を及ぼし、その影響度合いは伝播距離に応じて異なることが明

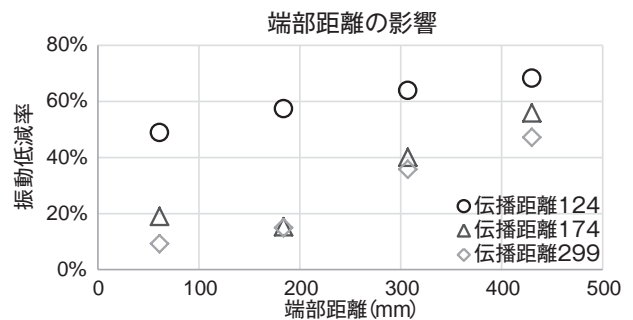


図14 端部距離の影響

らかとなった。したがって、実際の対策工として遮断壁を設計する場合にはこれらの影響を評価し遮断壁の設計に反映させる必要がある。

## 4. おわりに

地中防振壁の振動低減効果を実験により確認することを目的とし、ベンダーエレメント素子を利用した要素実験と土槽を用いた実験を実施した。防振壁の材質の違いの影響や防振壁の長さの違いの影響を定量的に把握することができており、実験による振動低減効果の評価の有効性を確認することができた。

本稿での報告は振動低減効果の評価の可能性を探るための実験であり、振動低減効果が高いと想定される条件で実験を実施している。今後は、並行して研究を進めている列車の高速化に伴う地盤振動の増加箇所の予測に関する研究の成果と合わせて、実施工を考慮した条件における実験を進め、合理的な振動対策工の設計施工方法の確立を目指していきたい。

なお、今回の実験の準備と実施にあたっては、長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学専攻地盤工学研究室の豊田浩史准教授、高田晋技術職員のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 中出千博, 渡邊明之; 実効性の高い地盤振動対策工の設計・施工手法の開発, テクニカルレビューNo27, 2009
- 2) 谷口美佐, 渡邊康夫, 清水満; 地盤振動の解析的検討手法の開発, テクニカルレビューNo37, 2011
- 3) 金田淳, 池本宏文, 高崎秀明, 谷口善則; 地盤振動低減工法開発に向けた取り組み, テクニカルレビューNo44, 2013
- 4) 野本将太, 豊田浩史, 高田晋, 松尾東, 渡邊康夫, 金田淳, 池本宏文; ベンダーエレメント試験による防振材の振動低減効果に関する評価手法, 第49回地盤工学研究発表会, 2014.
- 5) 金田淳, 池本宏文, 高崎秀明, 豊田浩史, 高田晋; 防振壁の長さが地盤振動低減効果に及ぼす影響の実験的検討, 第50回地盤工学研究発表会, 2015.