

新幹線による地盤振動を低減するための振動遮断壁に関する研究

地盤工学研究室 野本将太

指導教員 豊田浩史

1. はじめに

従来、列車が高架橋を走行する際に発生する振動は、列車の車両条件や速度などによって特徴的な周波数特性を有することが知られている。近年、鉄道の高速化により、鉄道沿線に住む住民の振動問題が大きな課題となっている。

振動問題の対策工事は、鉄道事業者のもつ敷地内で行わなければならない。対策場所は橋脚基礎近傍となり、対策工として高架橋沿いに設置できる防振溝や防振壁に限定される。列車振動に対し、防振溝・壁による振動低減効果があることは、理論的な考察や FEM などによる解析的な検討から成果が出てきているが、実際の振動伝播機構の解明や効果の高い防振壁材料の特定にまでは至っていない。

本研究では、地盤振動実験を実施し、新幹線通過時における地盤の伝播特性の把握と、主要な振動を効果的に抑制する材料を解明することを目的とする。本研究では、①現地計測、②要素試験、③模型試験の3つのフィールドにおいて試験を実施する。

2. 現場計測

2.1 測定方法

新幹線通過時に発生する振動を把握するために、現場計測を実施した。本研究では、新幹線通過時における地盤の振動を対象としている。新幹線軌道近傍の地盤の振動を計測することによって、新幹線振動の持つ周波数特性、加速度レベル、減衰傾向を把握することは、振動実験を行う上で非常に重要である。また、本研究では、模型地盤を用いて振動実験を行うが、使用する加速度計を同一のもの

を使用した。

計測地点は、①橋脚の近傍に地盤の露出した領域がある、②多様な新幹線が運行している、という点を考慮し、茨城県古河市にある古河駅周辺の新幹線軌道を選定した。測定時期は、天候が比較的良い 2013/03/28 ~ 2013/03/29 の二日間である。

測定に用いた器具は、圧電型加速度計を用いた。圧電型加速度計は、測定周波数範囲が 0 ~ 8000 Hz であり、電荷感度が $1.33 \text{ pC}/(\text{m}/\text{s}^2) \pm 15\%$ である。

Fig. 1 に、現場計測地点の測定状況を示した。測定地点は、①橋脚、②地盤の2つの領域を設定した。橋脚における計測では、瞬間接着剤を用いて加速度計を直接橋脚に設置した。地盤における計測では、地盤にスパイクのついたベースを打ち込み、ベースに加速度計を設置した。

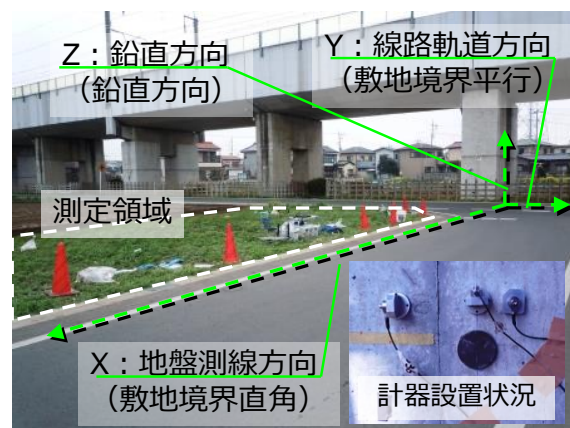


Fig. 1 現場計測の測定状況

計測地点を通過する新幹線車両の一覧を、Table 1 に示す。東北新幹線は、4種類の単体編成からなり、副編成は、JR、UR、UZである。各車両に最高時速が設定されているが、

計測地点は、大宮駅と小山駅の間にあり、十分な距離があるが、最高時速運転は行っていない地点である。

Table 1 計測車両一覧

| 編成 | 車両数 | 定員 | 最高時速 | 愛称 |
|----|-----|------|----------|--------------|
| J | 10 | 816 | 275 km/h | はやて、やまびこ、なすの |
| U | 10 | 713 | 320 km/h | はやぶさ |
| R | 6 | 338 | 275 km/h | こまち |
| Z | 7 | 336 | 300 km/h | スーパーこまち |
| JR | 16 | 1152 | 275 km/h | やまびこ・なすの |
| UR | 16 | 1069 | 275 km/h | はやぶさ・こまち |
| UZ | 16 | 1067 | 300 km/h | はやぶさ・スーパーこまち |

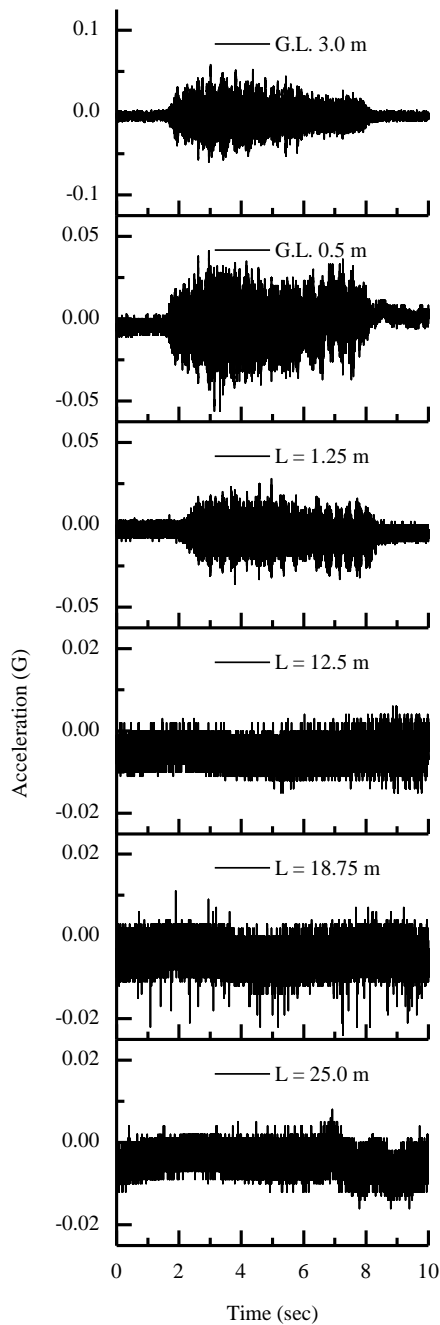


Fig. 2 新幹線振動の加速度計時刻暦

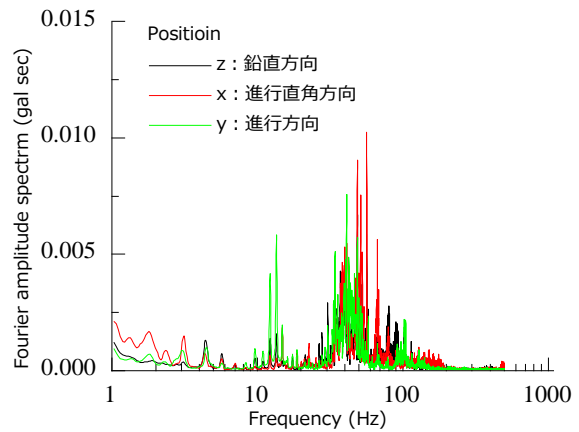


Fig. 3 橋脚のフーリエスペクトル

2.1 測定結果

Fig. 2 に、現地計測より得られた加速度計の時刻暦を示す。加速度計波形は、橋脚に設置したものについて、測定データが判別可能である。しかし、地盤に設置したものについては、ノイズ成分の中に加速度計の波形がまぎれてしまっているために、判別が困難である。受振加速度を測定データより算出しようと試みたが、ノイズの波形が増大している場合があるため、正確な値を得ることができなかった。

測定したデータより、新幹線振動のピーク周波数を算出するために、FFT を利用したフーリエスペクトルを描いた。Fig. 3 に、測定データより得たフーリエスペクトルを示す。1 ~ 100 Hz の周波数帯の中に、いくつかのピークが確認できる。10 Hz 以下の低周波数帯で 3 点、10 ~ 20 Hz の中域、30 Hz 以上の帯域にはっきりとピークが現れた。計測データよりフーリエスペクトルを描くことで、新幹線振動の持つ周波数特性を得ることができる。

既往の研究¹⁾を参考に、計測データより、ピーク周波数帯を分類した。分類した周波数帯は、①超低域：4~5 Hz、②低域：8~20 Hz、③中域：20~30 Hz、④高域：40~80 Hz、⑤超高域：100~200 Hz の 5 分類である。列車振動は、車両（編成）、計測場所（橋脚・地盤）に

よって、ピーク値の卓越する周波数が異なる結果となった。また、編成が同様の場合においても、車種によって、周波数特性は異なる。

3. 要素試験

3.1 試験方法

振動実験に用いる防振材の効果を定量的に評価し、効果的な防振材料を把握するために、三軸圧縮試験装置を利用したせん断波の振動実験を実施した。

せん断波を発生させる装置として、本研究ではバンダーエレメント（以下、BE）を用いた。BEは、せん断波速度 V_s を測定するために用いられ、①せん断波を発生させることが可能、②周波数を任意に設定可能という特徴を持つ。

振動実験における条件は、せん断波において、Sin 波を 100 波入力し、受信した波形のうち最大・最小振幅を受振振幅として計測した。また、周波数は、0.5 ~ 100 kHz のうち、対数軸に等間隔となるよう 18 段階設定した。

要素試験の試料には、豊浦砂を用いた。豊浦砂は、相対密度 $D_r = 60.0\%$ となるよう供試体を作製した。三軸圧縮試験装置の制御方法は、自動制御における等方応力状態を維持し、平均有効主応力 p' を 25 → 50 → 100 → 200 → 400 → 50 kPa（排水排気除荷により、過圧密状態 $OCR=8$ を再現）の 6 段階に変化させ、各応力常態下で振動実験を行った。

実験時には、①防振材の厚さ、②防振材の位置、③防振材の種類について検討を行った。Table 1 に、使用した防振材の緒元を示す。防振材は、供試体とのインピーダンス比の観点から、6 種類の材料を選定した。また、Fig. 4 に、実験状況を示す。防振材は、メンブレンへの影響を考慮し、供試体直径よりも若干小さいものを使用した。

Table 1 使用材料の緒元一覧

| | ρ (g/cm ³) | E (MPa) | V_s (m/s) |
|-----------|-----------------------------|-----------|-------------|
| NRスポンジ | 0.078 | 0.239 | 35.01 |
| ウレタン | 1.202 | 2.826 | 28.00 |
| 超軽量気泡モルタル | 0.677 | — | 385.5 |
| アクリル | 1.196 | 3300 | 1030 |
| アルミ | 2.630 | 70300 | 3153 |
| 真鍮 | 8.519 | 100600 | 2091 |

試験条件は、①防振材設置位置、②防振材厚さ、③防振材の材料、④防振材の組合せ、以上 4 項目について検討した。防振材設置位置は、供試体の上部、中央、下部である。防振材厚さは、5 mm、10 mm、20 mm の 3 種類である。防振材の種類は、Table 2 に示したものである。防振材の組合せは、アクリル、アルミを 5 mm のウレタンで挟んだものである。

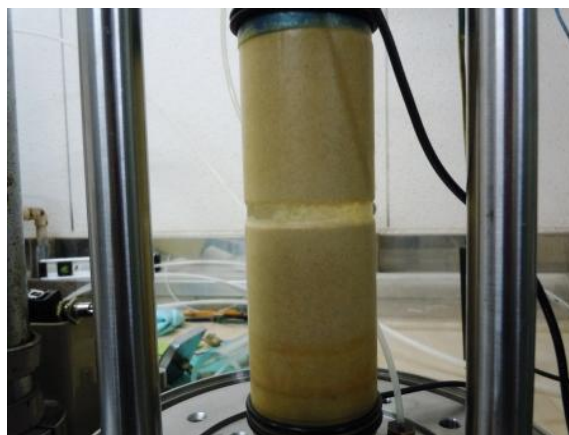


Fig. 4 防振材の挿入状況

3.2 試験結果

Fig. 5 に豊浦砂の試験結果を示す。縦軸は入力振幅で正規化した加速度振幅比である。平均有効主応力 p' の増加にともない、ピーク値を示す周波数帯も高周波数側へ遷移した。高周波側への遷移は、平均有効主応力 p' の増加によって、試料が圧密され、剛性が上昇し、固有周期が高周波へと変化したことが原因であると考えられる。

完全乾燥の豊浦砂においては、過圧密の影響が見られなかった。粘性土のような圧密による密度上昇が顕著な試料においては、過圧

密の影響を受けると考えられる。

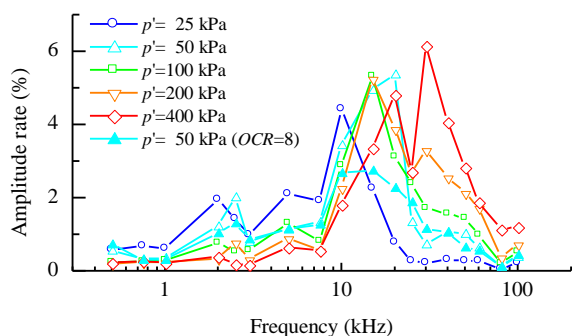


Fig.5 豊浦砂の周波数特性

Fig. 6 に、ウレタン挿入時の振動低減効果を示す。供試体内の防振材の防振材効果を測定するために、以下の計算式を用いた。これは、防振材が振動を低減させた量を、計算したもので、振動低減率が 100%とは、全く振動が伝わらなかったことを意味する。

$$\text{振動低減率} = \left(1 - \frac{\text{③防振材BE値}(V)}{\text{②供試体BE値}(V)} \right) \times 100(\%)$$

ウレタンを挿入したケースでは、送信した周波数のうち、ほぼ全周波数帯で振幅の減少が確認された。特に、10 kHz 以上では、振動低減率が 90 % と非常に高い振動低減効果を示す結果となった。各周波数で計算した振動低減率を全て平均することで、材料の防振効果の代表値とした。

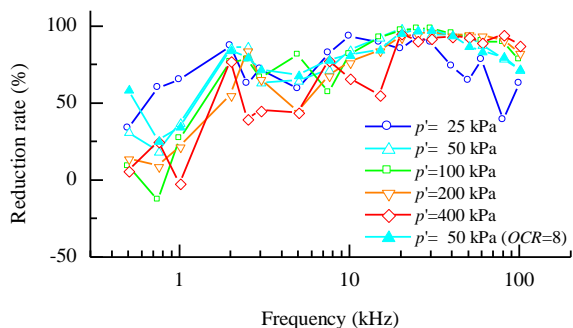
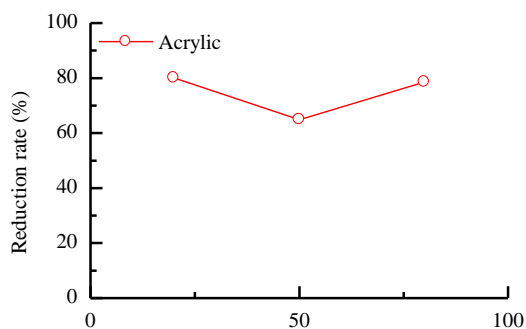


Fig. 6 ウレタン挿入時の振動低減率

3.3 試験結果の検討

Fig. 7 に、防振材の設置位置と振動低減効

果の関係を示す。防振材は、送振点近傍または、受信点近傍に配置することで、中央に配置する場合と比較して、高い防振効果を示した。防振壁による振動の低減を考える上で、発振源よりも受振源近傍に防振壁を設置することで、より周波数の広い範囲で防振効果を高めることが期待できるが、実務上では民家周辺に防振壁を施工することは困難である。



The relative position of acrylics from a transmission point (%)

Fig. 7 防振材の位置と振動低減効果の関係

Fig. 8 に、防振材の厚さと振動低減効果の関係を示す。振材を厚くすると、防振効果が高まる結果となった。ウレタンにおいては、防振材厚が 5mm 程度でも防振効果を十分に発揮する結果となった。防振材を厚くすることで、防振材内での波数が増えるため、エネルギー損失量が増加したと考えられる。

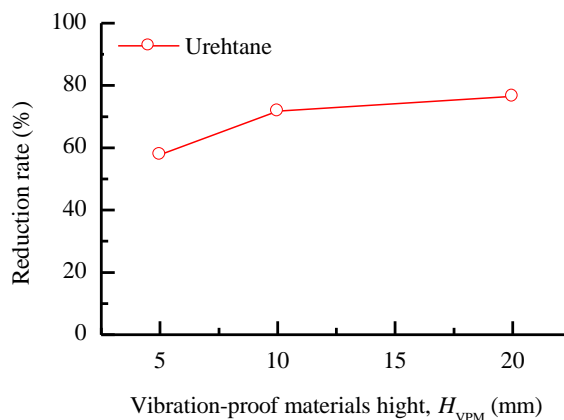


Fig. 8 防振材の厚さと振動低減効果の関係

Fig. 9 に、インピーダンス比と振動低減効

果の関係を示す。波動の透過率と壁厚の関係式(弾性体を伝わる一次元波の理論式)を以下に示す。²⁾

$$\frac{u_2}{u_1} = u_2 = \frac{2\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 - 1)^2 \sin^2 \frac{2\pi}{\lambda_2} W + 4\alpha^2}}$$

$$\alpha = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1} \quad \lambda_2 = \frac{V_2}{f}$$

ここで、 u_1 : 遮断壁通過前の変位振幅 (=1)

u_2 : 遮断壁通過後の変位振幅

α : インピーダンス比
 ρ_1, V_1 : 地盤の密度と伝播速度

ρ_2, V_2 : 遮断壁の密度と伝播速度

W : 遮断壁の厚さ

f : 波の周波数

この式より、防振材の厚さが同じ場合に、波動の透過率は、インピーダンス比に依存することがわかる。Fig. 9 に示した実験結果においても、振動低減効果はインピーダンス比に依存する結果となった。しかし、上記の式は、Fig. 7, Fig. 8 に示した防振材の設置位置や厚さと振動低減効果の関係を表現することができない。実際には振動の1波毎にエネルギー減衰が発生しているため、防振材の防振効果を理論的に計算するには、上記の式にエネルギー減衰を考慮する必要がある。

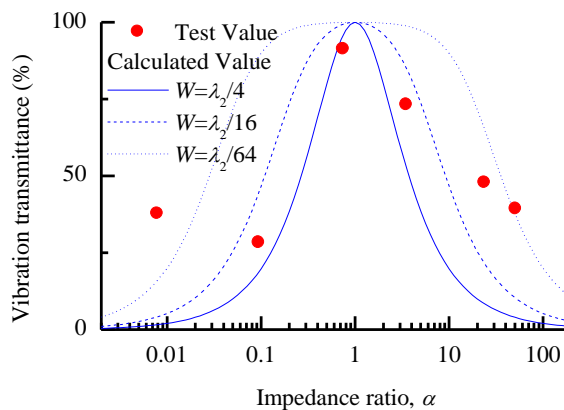


Fig. 9 インピーダンス比と振動低減効果の関係

3. 模型試験

3.1 実験方法

新幹線振動の振動伝達機構を検討するために、現地計測と要素試験の結果を踏まえ、1/100 模型での振動実験を行った。模型地盤には小名浜砂を使用し、相対密度 $D_r = 60$ (%) の地盤を作製した。Fig. 10 に、小名浜砂の粒径加積曲線を示す。試験条件は、①防振壁、②基礎、③受振位置、以上の3項目を検討した。

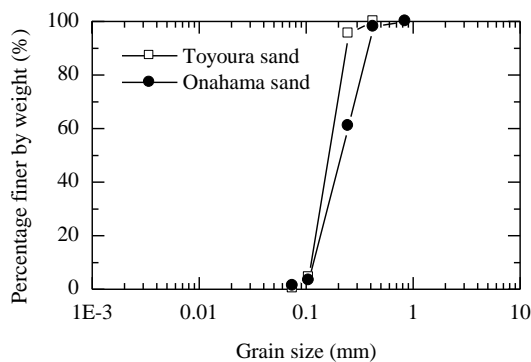


Fig. 10 小名浜砂の粒径加積曲線

振動源には、新幹線の橋脚の模型を用い、上部に起振器を設置することで、振動を入力した。起振方向は、設置した起振器の方向を変更することで調整した。送振周波数は、現実で1~100 Hz に相当する振動を設定した。また、橋脚の基礎は、①直接基礎、②杭基礎

の2種類となっており、杭は、断面積を実物の相似比に合わせたものを取り付けた。

防振壁には、要素試験で振動効果がインピーダンス比に依存することがわかったため、設置性を考慮し、5 mmの真鍮板を設置した。根入れ深さは、①75 mm、②150 mmの2種類である。根入れ150 mmは、杭先端よりも深い条件である。Fig. 11に土槽試験の加速度計配置の外観図を示す。

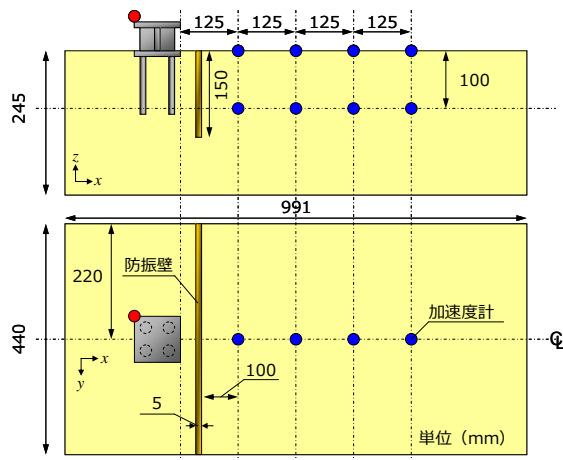


Fig. 11 加速度計配置

3.2 実験結果

Fig. 12に地表面、Fig. 13に地中の実験結果を示す。地表面の計測においては、理想的な距離減衰傾向を示さず、加振点から離れた箇所 ($L = 375$ mm) で増幅傾向を示す場合があった。このような傾向を示すケースでは、鉛直・水平方向の加速度の軌跡において、ループ軌道を描く場合があり、鉛直成分の振動のほかに、レイリー波のような表面波が発生している可能性がある。地中では $L = 125$ mmでの加速度が最も大きく、地表面と比較して加速度が低くなる傾向を示した。

Fig. 14に、模型実験における防振壁設置時の試験結果を示す。縦軸は、実物2~10Hzに相当する周波数において、防振壁挿入後の加速度を防振壁挿入前の受振加速度で割った値の平均である。Fig. 14より、防振壁を挿入す

ることで、振動が低減される結果となった。また、直接基礎では根入れ深さによって振動低減効果は変化しないが、杭基礎においては根入れ深さが振動低減効果に影響を与えることが明らかとなった。根入れ深さ150 mmの防振壁では、杭先端よりも深い位置に防振壁があるため、杭の剛体変位によって発生する振動を遮断できたと考えられる。

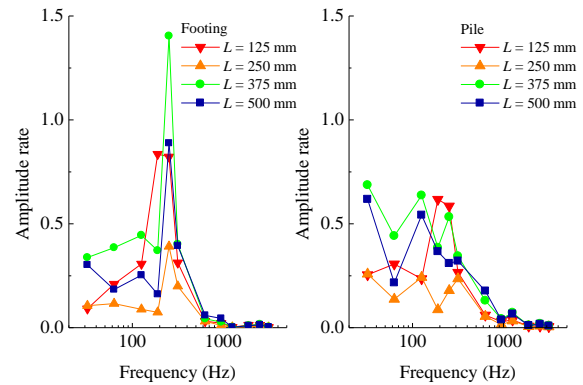


Fig. 12 地表面計測における周波数特性

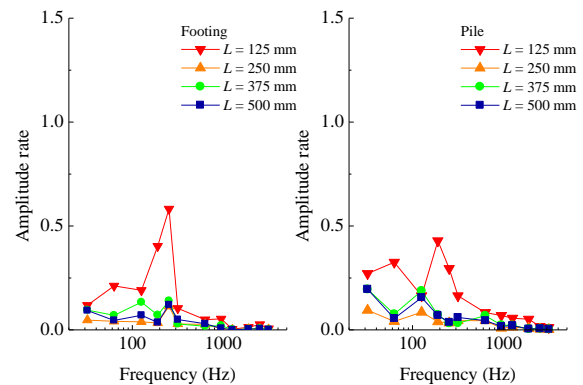


Fig. 13 地中面計測における周波数特性

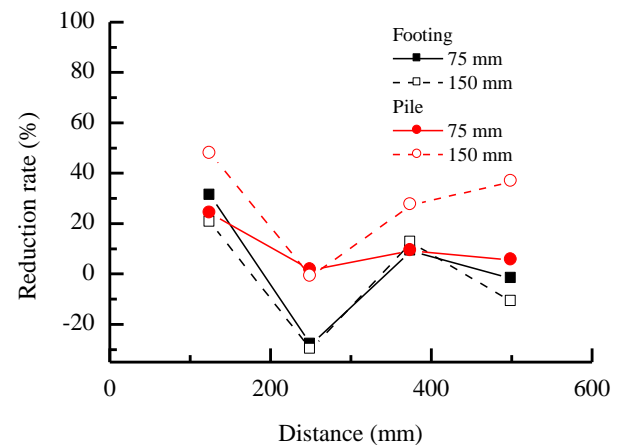


Fig. 14 模型実験での防振壁挿入時の影響

4. まとめ

本研究では、現地計測、要素試験、模型実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 新幹線通過時の振動にピーク周波数帯は、①超低域：4~5 Hz, ②低域：8~20 Hz, ③中域：20~30 Hz, ④高域：40~80 Hz, ⑤超高域：100~200 Hz の5つに分類される。
- 2) 車両（編成）、計測場所（橋脚・地盤）によって、ピーク値の卓越する周波数が異なる。編成が同様の場合には、車種によって周波数特性は異なることが明らかとなった。
- 3) 防振材の防振効果は、インピーダンス比に依存する。防振材は、①ウレタン, ②NR スポンジ, ③真鍮, ④アルミ, ⑤アクリル, ⑥超軽量気泡モルタル, ⑦カオリンの順に防振効果が高い結果となった。
- 4) 防振材の防振効果は、防振材の位置・厚さに依存することが明らかとなった。特に、防振材を厚くすることで、エネルギー減衰量を増加させることができる。
- 5) 理想的な距離減衰傾向を示さず、加振点から離れた箇所で増幅傾向を示す場合があった。このような傾向を示すケースでは、鉛直・水平方向の加速度の軌跡において、ループ軌道を描く場合があり、鉛直成分の振動のほかに、レイリー波のような表面波が発生している可能性がある。
- 6) 防振壁挿入時の模型振動実験では、加振方向によって、限られた周波数で防振効果を示すことが明らかとなった。杭基礎加振においては、防振効果が確認できる周波数帯において、防振壁の根入れ長が深いほど、防振効果が高い結果となった。

5. 参考文献

- 1) 横山秀史, 芦屋公稔, 岩田直泰: 新幹線高速走行時の地盤振動特性と速度依存性評価法, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 1, pp. 23-28, 2006.
- 2) 日本騒音制御工学会: 地域の環境振動, 朝倉書店, p150, 2001.