

模型実験による振動遮断壁を用いた地盤振動低減効果の検証

地盤工学研究室 松尾 東
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、鉄道の高速度化により、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が、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、振動模型実験を実施し、①列車振動が与える地盤への振動伝達機構の検証、②振動低減に効果的な対策工の検討、を行った。

2. 振動模型実験

2.1 相似則

Fig. 1 には、昨年実施した、小型模型 (1/100 スケール) と中型模型 (1/20 スケール) における振動模型試験を、実スケールに換算した結果を示す。図から、模型スケールによって加速度振幅比の距離減衰に違いが見られる。そこで、送信周波数の決定に用いた相似則が妥当であるか検討した。

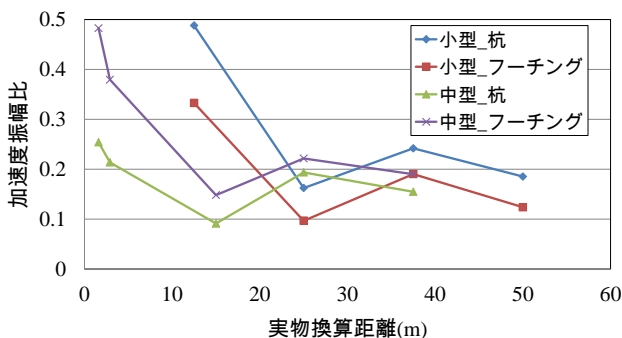
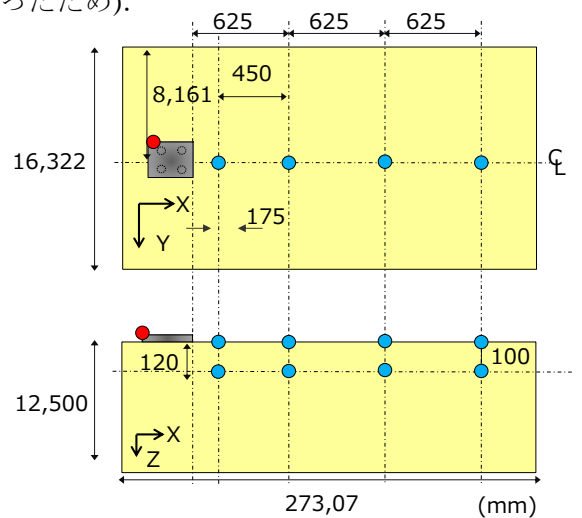


Fig. 1 加速度振幅比と起振点からの距離
(小型・中型模型)

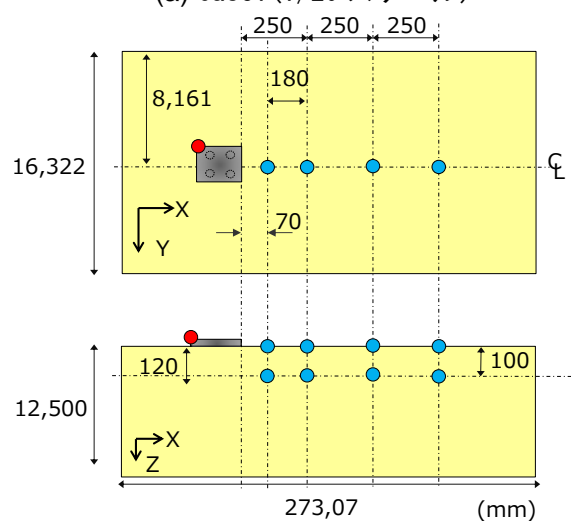
検討方法は、3 スケール(1/20, 1/50, 1/100)の模型で 3 つの相似則について振動模型実験を行い、得られた相似比を検証した。用いた相似則は①構造物から地盤までを 1 つの系として考える、②地盤の動的問題に特化して考える、③実物と同じ材料を用いばせん断剛性 G も同じと考える、これら 3 つを用いた。

2.1.1 実験 Case

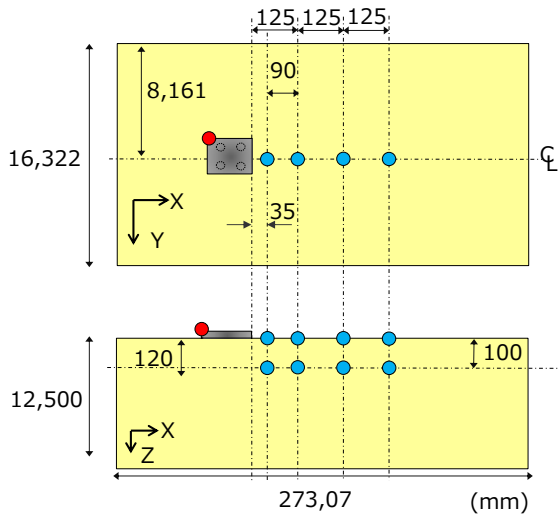
Fig.2 には実施した実験 Case を図示する。加速度計の配置は全て模型の中心を起点とした(極力壁から均等に加速度計を離し、反射の影響を無くしたかったため)。



(a) Case1 (1/20 スケール)



(b) Case2 (1/50 スケール)



(c) Case3 (1/100 スケール)

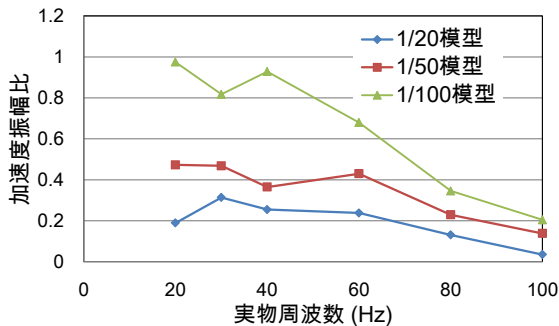
Fig. 2 実験 Case

2.1.2 結果の検討

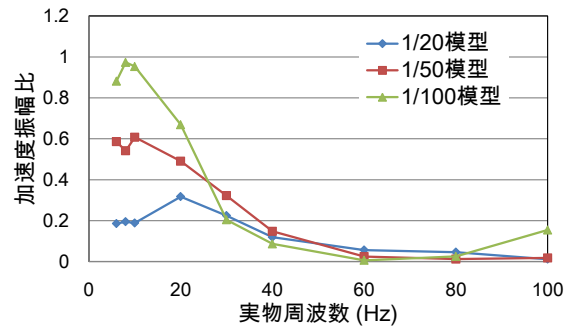
①模型スケール別の加速度振幅比と実物集周波数

Fig.3 には縦軸に加速度振幅比,横軸に実物周波数をとった模型スケール別の結果を示す. 地盤を振動させる起振機は模型スケールを考えずに同じものとしたため, 加速度振幅比の大きさについては議論せず, 卓越周波数について検討することとする.

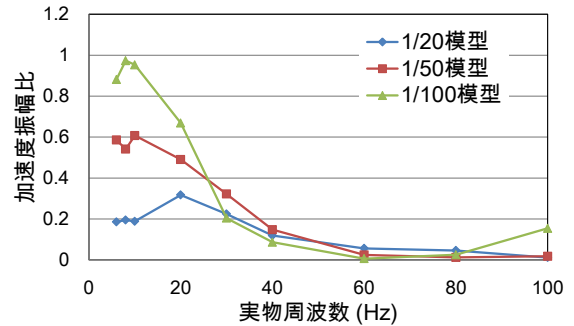
相似則 1 は,模型サイズが小さくなると卓越周波数が大きくなる傾向が把握できる.一方,相似則 2・3 は,模型サイズが小さくなるとともに卓越周波数も小さくなっていることが把握できる.完全に卓越周波数が一致している相似則はないことより, 各模型スケールの卓越周波数を求めて相似則を評価することとする.



(a) 相似則 1



(b) 相似則 2

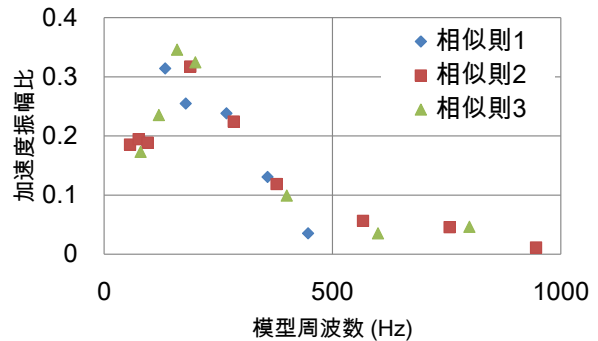


(c) 相似則 3

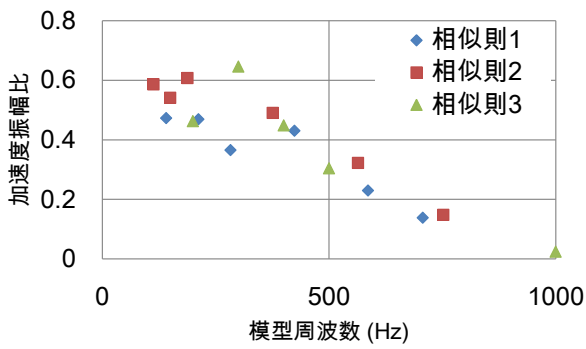
Fig. 3 相似則別の加速度振幅比と実物周波数の関係

②相似則別の加速度振幅比と模型周波数

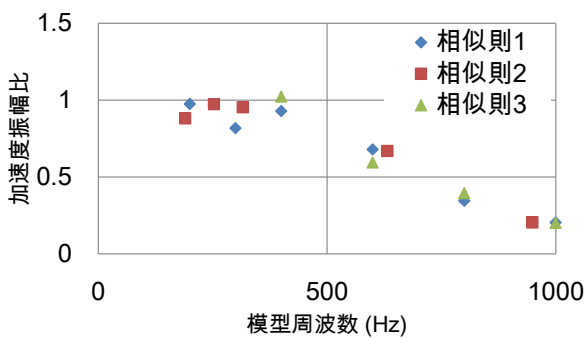
Fig.4 には縦軸に加速度振幅比, 横軸に模型周波数をとった相似則別の結果を示す. ここから, Case1 は 160Hz 付近に卓越周波数が確認できる.しかし, Case2・3 は明確な卓越周波数を確認することができなかった.そこで加速度振幅比がほぼ一定の箇所と, 減少する箇所に線を引き, その交点から, Case2 は 300Hz, Case3 は 450Hz が卓越周波数であると算定した.



(a) Case1 (1/20 スケール)



(b) Case3 (1/50 スケール)



(c) Case3 (1/100 スケール)

Fig.4 相似則別の加速度振幅比と模型周波数の関係

③相似比

Fig.5 には、横軸に模型スケールを示し、縦軸に各模型スケールでの卓越周波数をとった。これに近似曲線を引くことで、本実験から周波数の相似比 $\lambda^{0.65}$ を得た。なお λ は長さに関する相似比である。

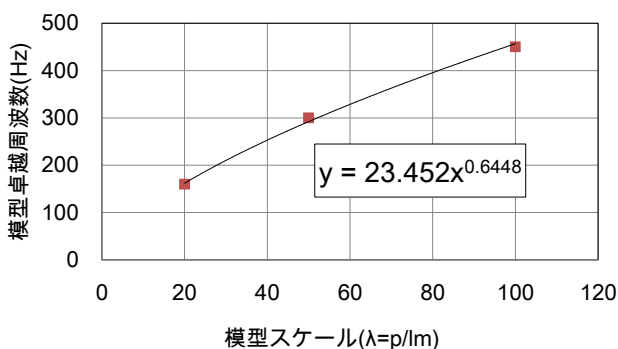


Fig. 5 実験から得られた相似比

今回検討する 3 つの相似則は、周波数に関して① $\lambda^{0.5}$ 、② $\lambda^{0.75}$ 、③ λ^1 、の相似比を持つ。実験から得られた結果は、相似則②に近いので、本研究における相似則には相似則②を用いることとした。

2.2 小型模型実験

2.2.1 使用土槽

Fig.6 に使用した土槽を示す。模型のスケールは 1/100 であり、フレームは鉄製である。また、模型の内部と底部にはそれぞれ反射の防止と外部振動の遮断のためにスタイロフォームを貼り付けてある。さらに、図中の X 方向を軌道直角方向($L=914(\text{mm})$)とし、Y 方向を軌道方向($B=435(\text{mm})$)、Z 方向を直角方向($H=243(\text{mm})$)とした。

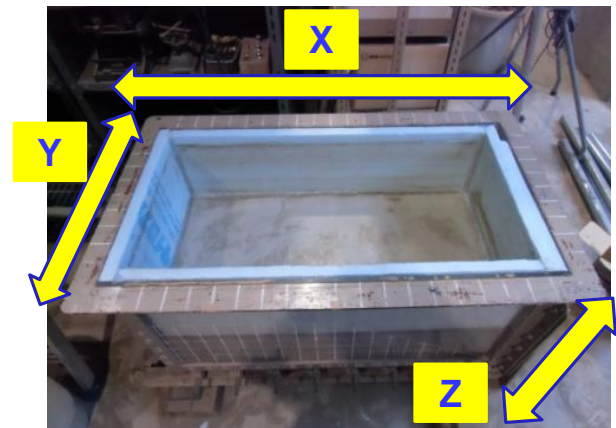


Fig6. 使用土槽

2.2.1 実験ケース

小型模型実験ケースを Table.1 に示す。ここでは、防振壁の材質と厚みに着目して、Case_s6, s7 の結果について検討を行う

Table.1 実験ケース

Case名	地盤材料	起振方法	受信方法	基礎	地盤	防振壁		
						深さ	厚さ	材質
Case_s1	小名浜砂 (Dr)	起振器 (小型)	圧電型 加速度計	フーチング	2層	なし	なし	なし
Case_s2				フーチング	2層	浅い	5mm	真鍮
Case_s3				杭	2層	なし	なし	なし
Case_s4				杭	2層	浅い	5mm	真鍮
Case_s5				杭	2層	深い	5mm	真鍮
Case_s6				杭	1層	深い	10mm	真鍮
Case_s7				杭	1層	深い	5mm	ウレタン

各 Case の加速度計の配置について Fig.7 に示す。また、前節の相似則 2 を用いて、実物スケールで 1Hz ~ 100Hz を 12 段階に分けて送信周波数を決定した。Table.2 にはその一覧を示す。

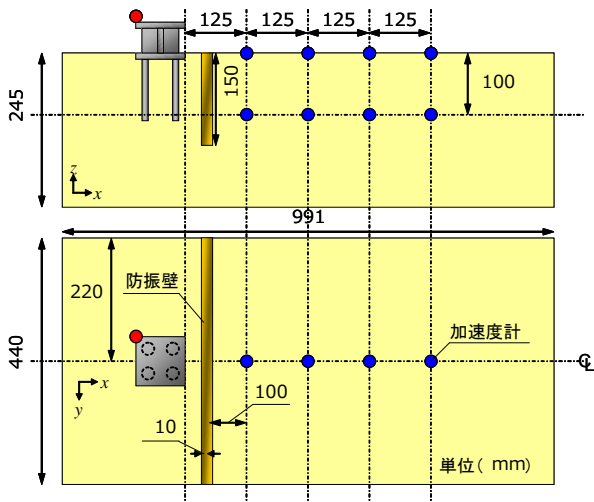


Fig. 7 加速度計配置

Table2. 送信周波数

	実物	模型
	$\lambda=1$	$\lambda=100$
$f(\text{Hz})$	1	32
	2	63
	4	126
	6	190
	8	253
	10	316
	20	632
	30	949
	40	1265
	60	1897
	80	2530
100	3162	

2.1.2 実験結果整理方法

得られたデータは、Fig.8 に示すように縦軸に加速度振幅、横軸に時間を取り正弦波を確認後、5 波を抽出して時間式(1)(2)に基づき求めた。

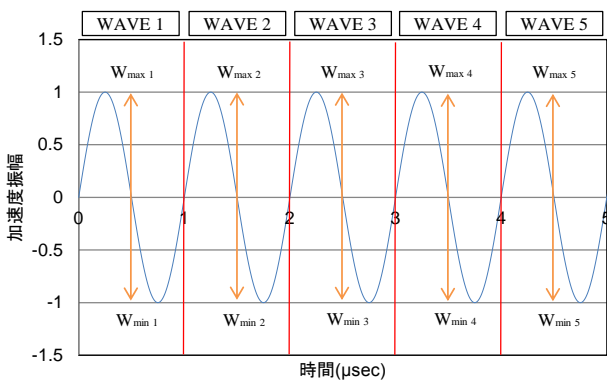


Fig. 8 データ整理方法

$$\text{加速度全振幅} = |W_{\max} - W_{\min}| \quad (1)$$

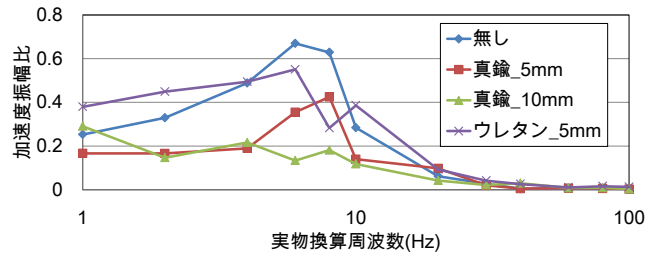
$$\text{加速度振幅比} = \frac{\text{No.2} \sim \text{No.5の加速度全振幅}}{\text{No.1(起振器)の加速度全振幅}} \quad (2)$$

2.1.3 実験結果

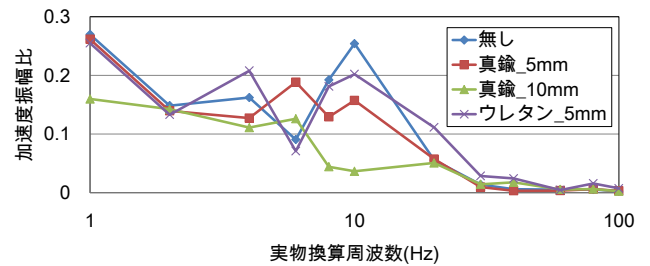
ここでは本実験結果に追加して、昨年実施した防振壁無しと真鍮(厚み 5mm)のケースも比較対象とする。また、以下では①防振壁無し、②真鍮_厚さ:5mm、③真鍮_厚さ:10mm(Case_s6)、④ウレタン_厚さ:5mm(Case_s7)として記述する。

2.1.3.1 加速度振幅比と実物換算周波数の関係

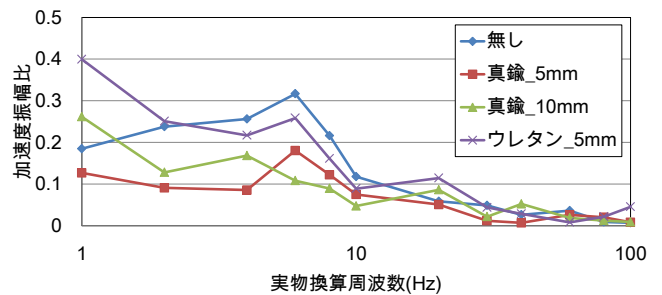
Fig.9 には、縦軸に加速度振幅比、横軸に実物換算周波数を示す。図の(a), (b)より卓越周波数は地表面においてどの防振壁でも 10Hz 付近に確認することができる。また、③の方法が加速度振幅比が最も小さく、振動を低減できていることがわかる。



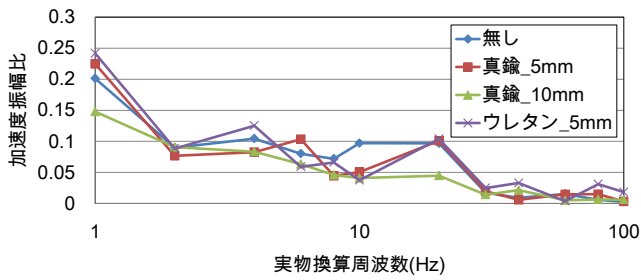
(a) 12.5m 地点, 地表



(b) 25m 地点, 地表

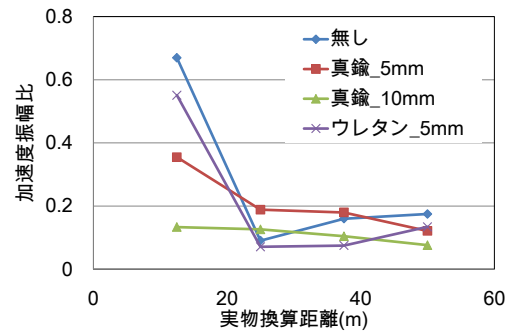


(c) 12.5m 地点, 地中



(d) 25m 地点, 地中

Fig. 9 加速度振幅比と実物換算周波数

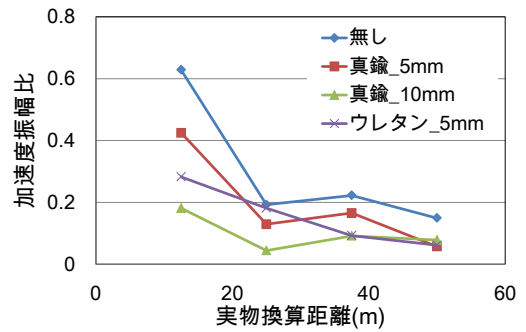


(b) 6Hz

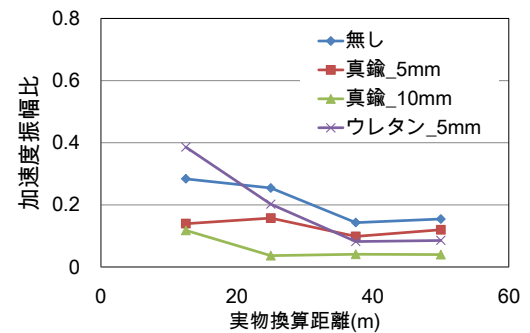
(a) 加速度振幅比と実物換算距離の関係 (地表)

Fig.10 では各送信周波数で、縦軸に地表面の加速度振幅比、横軸に実物換算距離をとった。防振効果は③→②→①となっており、真鍮での防振効果はウレタンより大きいことがわかる。また、20Hz以上の周波数では減衰が大きく、加速度振幅比が小さすぎるため示していない。

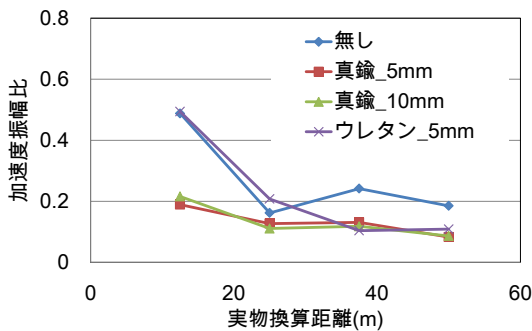
Table.3 には地表加速度計について、防振壁無しの加速度振幅比 100%とした時の、各防振壁の加速度振幅比減少率をまとめたものを示す。表から、③はどの周波数でも 50%を下回り、高い防振効果を発揮することがわかる。②は 8Hz で 68%とやや防振効果の低い結果となっているが、平均的な防振効果は 50%程度であり、防振効果があったと考えられる。しかし、④では 4Hz と 10Hz で加速度振幅比の増幅 (100%以上) が確認できるなど、効果が低いことがわかる。



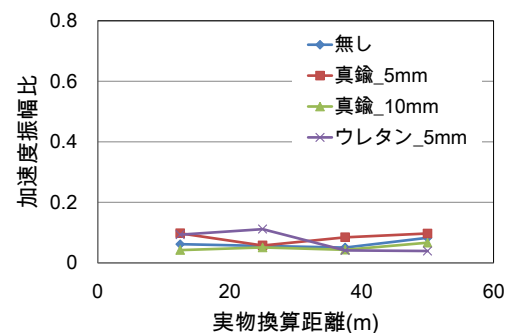
(c) 8Hz



(d) 10Hz



(a) 4Hz



(e) 20Hz

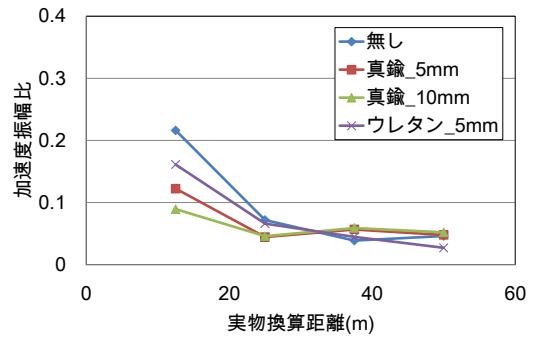
Fig. 10 加速度振幅比と実物換算距離 (地表)

Table.3 加速度振幅比減少率(地表)

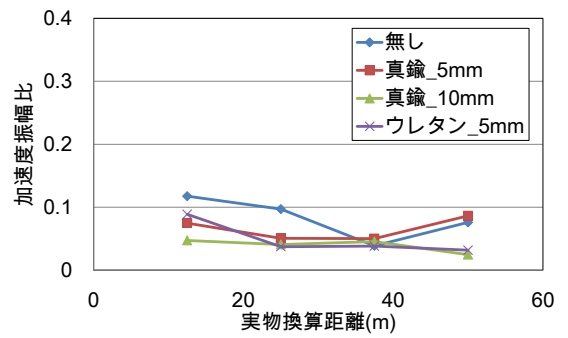
防振壁無しを100%とした時の 各防振壁の加速度振幅比減少率			
単位: %	真鍮_10mm	真鍮_5mm	ウレタン_5mm
4Hz	44	39	101
6Hz	20	53	82
8Hz	29	68	45
10Hz	42	49	136
Average	34	52	91

(b) 加速度振幅比と実物換算距離の関係(地中)

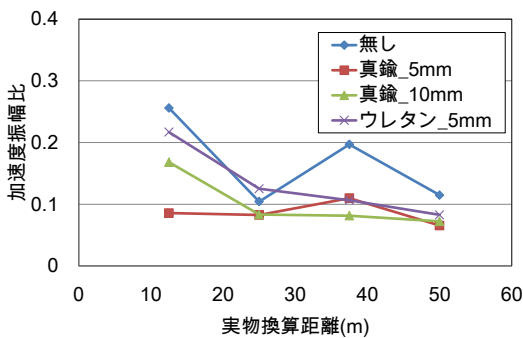
Fig.11 では各送信周波数において、縦軸に地中の加速度振幅比、横軸に実物換算距離をとった。ここから、(bと同様に)12.5m 地点での加速度振幅比が最も大きいことが分かり、防振効果は③→②→①となっており、真鍮での高い防振効果が認められた。また、10Hz 以下では防振効果を確認できたが、20Hz 以上では加速度振幅比が小さすぎるため、結果は示していない。また、Table.4 には、Table.3 の地中における結果について示す。ここでは、④でも加速度振幅比の増幅は見られず全体的に防振効果があったことがわかる。また、地中においても最も防振効果の高いのは③であり、次いで②という結果になった。



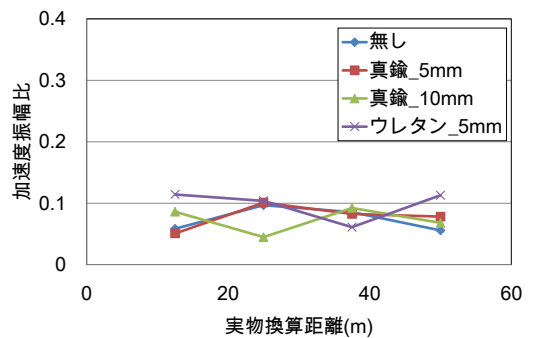
(c) 8Hz



(d) 10Hz

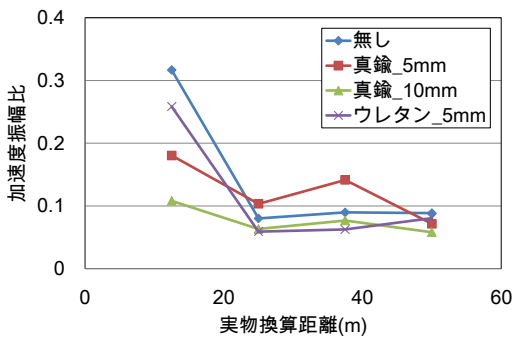


(a) 4Hz



(e) 20Hz

Fig. 11 加速度振幅比と実物換算距離(地中)



(b) 6Hz

Table.4 加速度振幅比減少率(地中)

防振壁無しを100%とした時の 各防振壁の加速度振幅比減少率			
単位: %	真鍮_10mm	真鍮_5mm	ウレタン_5mm
4Hz	66	33	85
6Hz	34	57	82
8Hz	41	57	75
10Hz	40	64	76
Average	45	53	79

3. まとめ

本研究より、今回の振動模型試験で用いる相似則としては、相似則②が最も妥当であることを示した。また、防振材としては真鍮がウレタンより効果的で

あることがわかった。防振壁の厚みに関しては、厚い方が高い防振効果を得ることがわかった。