

防振地中壁の振動低減効果に関する解析的検討

—3次元解析法を用いた感度解析—

田口 典生^{*1}・花里 利一^{*1}・高木 政美^{*1}

Keywords : environmental ground vibration, underground wall barrier, 3D-analysis, sensitivity analysis

地盤環境振動、防振地中壁、三次元解析、感度解析

1. はじめに

精密生産施設工場では、構内道路や敷地外道路で大型車両が走行した際の交通振動や、敷地内に建屋を新築する際の工事振動などによって、製品生産や研究開発に支障をきたすことが懸念され、振動対策が必要とされるケースがある。

通常、振動低減対策としては(a)振動源で防振する方法、(b)波動伝播経路である地盤中に防振壁や空溝を設ける方法、(c)伝播される建物基礎や躯体で除振する方法¹⁾²⁾³⁾がある。しかし上記のような交通・工事振動の場合、(a)の方法は難しく、(c)の方法も建物の計画上での制限や、すでに生産ラインが稼動している既存の機器基礎に対しては適用することが困難であることも考えられ、伝播経路対策(b)が有効なケースも少なくないと考えられる。

伝播経路における対策は、元の地盤と遮蔽材とのインピーダンス比 $\alpha (= \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2)$ を大きくまたは小さくとり、伝播する波動を反射させるのがその原理である。また、その遮蔽物の工法としても、ソイルセメントやコンクリート、空溝や、コンクリートと空溝を合わせた三層構造壁⁴⁾などが提案されている。しかし広帯域の振動数や水平動に対する効果など、まだ不明な点も多く、地盤の層構造や地盤内の三次元的な振動伝播現象も防振効果に影響を及ぼすと考えられる。

一般に、振動対策工法の実施時において、低減効果を事前に評価するために、事前に精度の高い解析を行うことが望ましい。これに対し筆者らは、三次元有限要素法と三次元薄層法を組合せたハイブリッド解析手法⁵⁾を提案し、その妥当性を検証するとともに、道路交通振動における等価加振力を求めた⁶⁾。本報ではその三次元解析手法用い、地表点加振問題における防振地中壁や空溝の

防振効果に対する影響要因（壁厚や深さ、構造等）の感度解析を行い、その防振性能の検討を行った。ここでいう地表点加振問題は、主としてマンホール等の不規則な路面に起因する道路交通振動や建設工事・工場機械振動等を対象としている。上下加振時の上下応答とともに水平加振時の水平応答に対する防振地中壁や空溝の効果についての検討結果をここで示す。

2. 解析モデル

解析モデルを図-1に、解析で用いた地盤の各諸元を表-1に示す。地盤部分を半無限成層地盤とし GL-64mに粘性境界を設けた三次元薄層モデルで、防振地中壁・空溝は三次元有限要素でモデル化している。防振地中壁および空溝の長手方向の長さは、壁側方からの回り込みの影響が無いよう十分な長さを確保するため 32mとした。地盤モデルは代表的な軟弱地盤の例として既報 6)、7)から引用した実在するものを用いた。表-1に示すように、表層 14m までが $V_s=120\sim140\text{m/s}$ の埋土、GL-14m \sim -24m までが $V_s=210\sim270\text{m/s}$ の沖積層、それ以深は $V_s=240\sim450\text{m/s}$ の洪積層となっている。

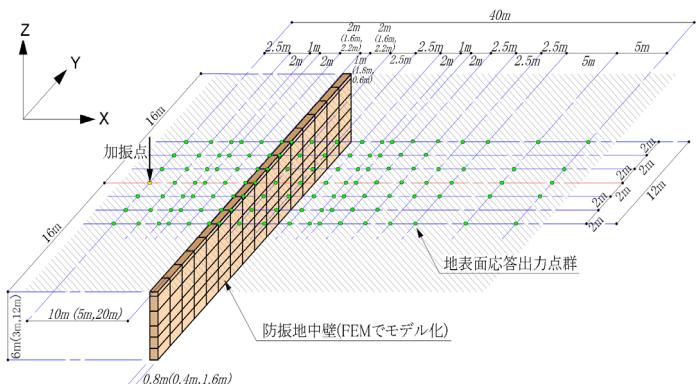


図-1 解析モデル
analysis model

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室

表-1 地盤諸元
soil profile

	層No.	層厚(m)	土質	V _s (m/s)	ρ (t/m ³)	G(KN/m ²)	ν	h(%)	
地中壁深さ	GL-3m	2 @0.35 3 @0.35 4 @1.0x3 5 @1.3x2 6 @1.40	埋土	120	1.61	23190	0.492	2.0	
	GL-6m	7 @0.30 8 @0.30 9 @0.30							
	GL-12m	10 @2.0x2 11 @2.0x2							
	GL-10m	12 @4.0							
	GL-20m	13 @6.0 14 @4.0x2 15 @4.0x2							
	GL-30m	16 @8.0							
	GL-40m	17 @12.0							
	GL-50m	18 @12.0							
	GL-60m								
	GL-64m								

表-2 解析ケース一覧
analysis cases

case		加振位置 (壁からの距離)	加振 方向	壁剛性	壁深さ	壁厚さ	解析周波数範囲	
							X加振	Z加振
A	未対策		X, Z	(未対策)			1.6~25Hz	1.6~25Hz
B	ソイルセメント連続壁 (基本形)	10 m	X, Z	ソイルセメント	6 m	0.8 m	1.6~25Hz	1.6~25Hz
C	ソイルセメント剛性2倍	10 m	X, Z	ソイルセメント剛性2倍	6 m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz
D	コンクリート連続壁	10 m	X, Z	コンクリート	6 m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz
E	空溝	10 m	X, Z	空溝	6 m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz
F	加振位置変化 5 m		X, Z	ソイルセメント	6 m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz
G	加振位置変化 20 m		X, Z	ソイルセメント	6 m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz
H	壁深さ変化	10 m	X, Z	ソイルセメント 3m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz	
I	壁深さ変化	10 m	X, Z	ソイルセメント 12m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz	
J	壁厚さ変化	10 m	X, Z	ソイルセメント 0 m	6 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz	
K	壁厚さ変化	10 m	X, Z	ソイルセメント 2 m	6 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz	
L	三層構造壁1.6m	10 m	X, Z	三層構造壁 6 m	2 m	1.6~25Hz	1.6~25Hz	
M	三層構造壁0.8m	10 m	X, Z	三層構造壁 6 m	0.8 m	1.6~10Hz	1.6~25Hz	

解析周波数: 1.6, 2, 2.5, 3, 15, 4, 5, 6, 3, 8, 10, 12, 5, 16, 20, 25Hz

ソイルセメントの剛性: 表層地盤の10倍の剛性

三層構造壁: 1.6m=コンクリート60cm+空隙40cm+コンクリート60cm
0.8m=コンクリート30cm+空隙20cm+コンクリート30cm

解析ケース一覧を表-2 に示す。感度解析を行うにあたり基本形としたモデルは、加振源からの距離 10m 位置に深さ 6 m、厚さ 80cm のソイルセメント地中壁を設けたものとした。壁の深さ 6 m は $V_s=120\text{m/s}$ の表層地盤で 10Hz の S 波の波長の 1/2 に対応している。また、ソイルセメントの剛性は表層地盤の弾性剛性の 10 倍とされている。

解析パラメータとして、壁の種類（ソイルセメント 2 種類、コンクリート製、三層構造壁 2 種類、空溝）、加振位置（加振源より壁芯までの距離が 5m・10m・20m）、壁の深さ（3m・6m・10m）、壁の厚さ（0.4m・0.8m・1.6m）とした。またこれらと未対策との比較を行った。

実際の地中壁は、円筒状の場所打ち杭やソイルセメントを何割かラップさせて連続壁として施工するが、解析モデルでは等価な断面積の立面体に置換している。三層構造壁は、空溝の孔壁保護との防振効果を兼ねたもので、解析モデルは、コンクリート壁 0.3m+空隙 0.2m+コンクリート壁 0.3m で総厚 0.8m のものと、コンクリート壁 0.6m+空隙 0.4m+コンクリート壁 0.6m で総厚 1.6m のものの 2 種類とした。

薄層法でモデル化した地盤の地表面には、地表面の振動分布状況を把握するために、加振源からの距離 40m、幅 12m について枠目状に応答出力点を設けた。

解析は周波数定常応答解析とし、解析における周波数範囲は、一般的な交通振動や建設振動で問題となるような周波数帯を想定して、1.6Hz から 10Hz または 25Hz までとし、1/3 オクターブ中心周波数とした。加振力は固定点での 1 方向の単位加振力(10kN)の点加振とし、加振方向は上下方向(Z 方向)と水平伝播方向(X 方向)についてそれぞれ行い、加振力方向の応答について考察した。

3. 解析結果

3.1 振幅分布

図-2、図-3 に 3 層構造壁(Case L, 加振点-壁芯間距離 10m, 厚さ 1.6m, 深さ 6m)を対象とした場合の地表面の振幅分布を示す。4Hz, 10Hz を加振振動数とした場合の、単位加振力(10kN)に対する上下加振(Z)に対する上下動を図-2 に、水平(X)加振に対する水平動を図-3 に示す。これらの図は、図-1 に示す 25m×40m の範囲の地表面の応答出力点の加速度を振動加速度レベル(基準値 10^{-5} m/s^2)に変換し、センター図として表示したものである。

図に示すように、3 次元解析とすることにより、防振壁前後における地表面での平面的な振幅分布を把握することができる。振動数で比較すれば 4Hz より 10Hz が、方向成分で比較すれば上下動より水平動が複雑な振幅分布を示している。

3.2 各種工法による振動低減効果の比較

図-4、図-5 に各種工法による振動低減効果を比較するために、それぞれ 5m、10.5m 地点における上下加振、水平加振時の振動低減量(無対策に対する振動低減量)を示す。

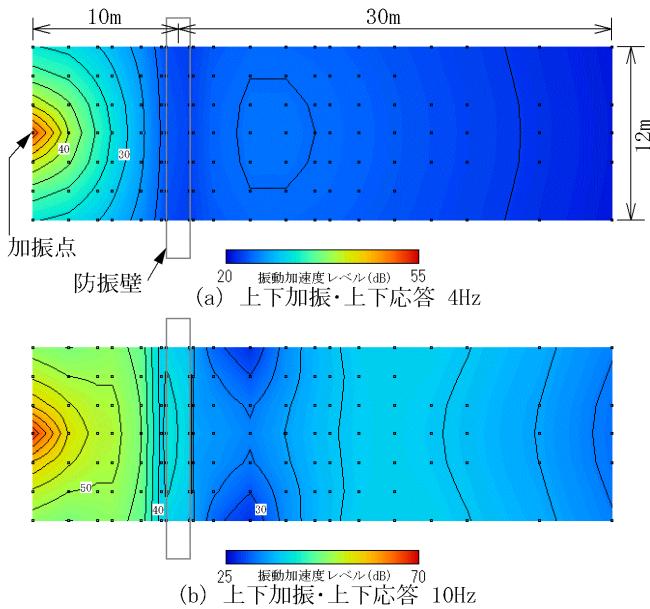


図-2 上下加振時の地表面上下振幅(case-L)
Distribution of vibration acceleration level produced by vertical excitation (case -L)

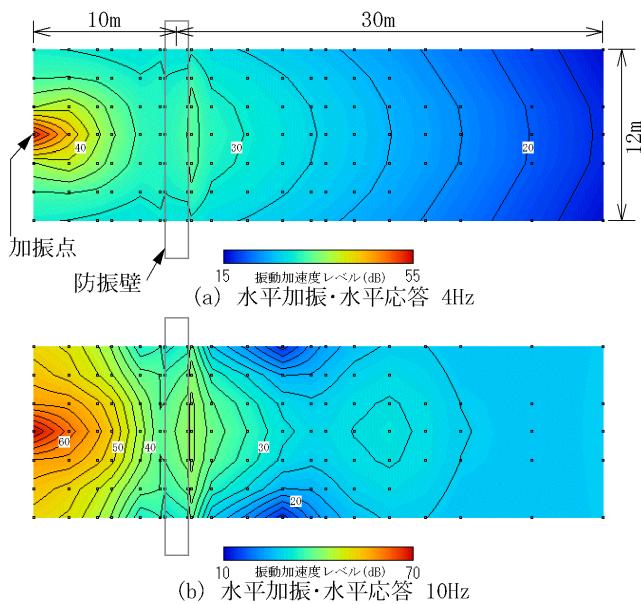
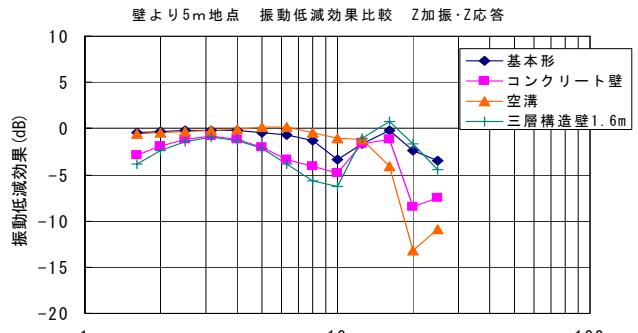
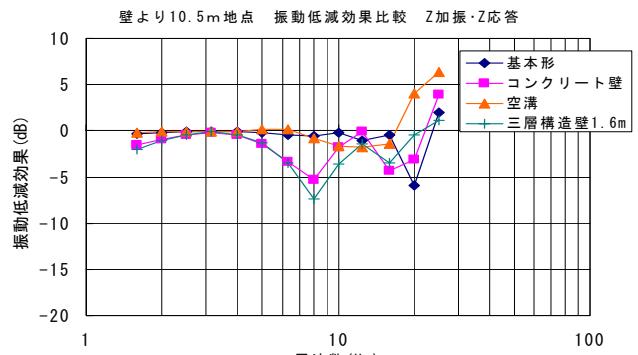


図-3 水平加振時の地表面水平振幅(case-L)
Distribution of vibration acceleration level produced by horizontal excitation (case -L)

図に示すように、上下加振に対しては、5Hz程度までの低振動数域では工法によらず無対策と比較して低減効果は2~3dB以下である。5~10Hzではコンクリート壁や3層構造壁の低減効果が空溝やソイルセメント壁に比べて大きく、4~6dB程度の効果がある。一方、水平加振時には、各種工法ともに効果はみられず、約8Hz以上の高振動数域では、振動数依存性が大きい。水平動に関するこの傾向は、高谷ら⁸⁾の上下加振水平応答に関する解析結果と一致している。

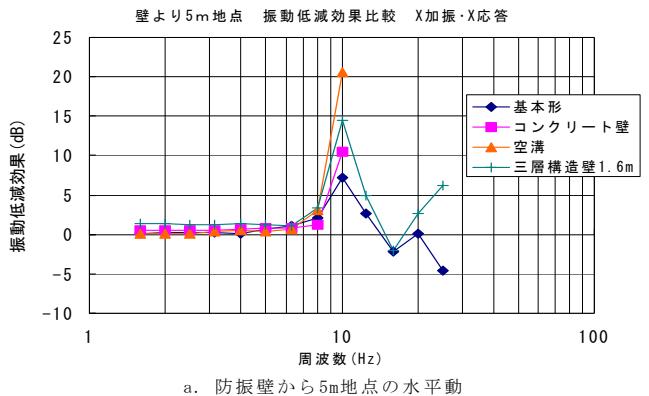


a. 防振壁から5m地点の上下動

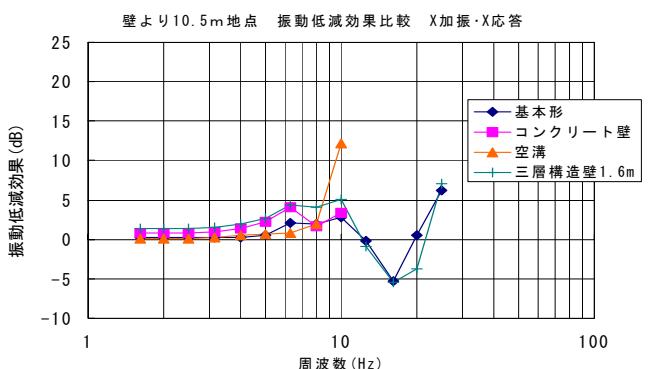


b. 防振壁から10.5m地点の上下動

図-4 上下加振時の振動低減効果の比較
effects on reduction of vibration for the case of vertical excitation



a. 防振壁から5m地点の水平動



b. 防振壁から10.5m地点の水平動

図-5 水平加振時の振動低減効果の比較
effects on reduction of vibration for the case of horizontal excitation

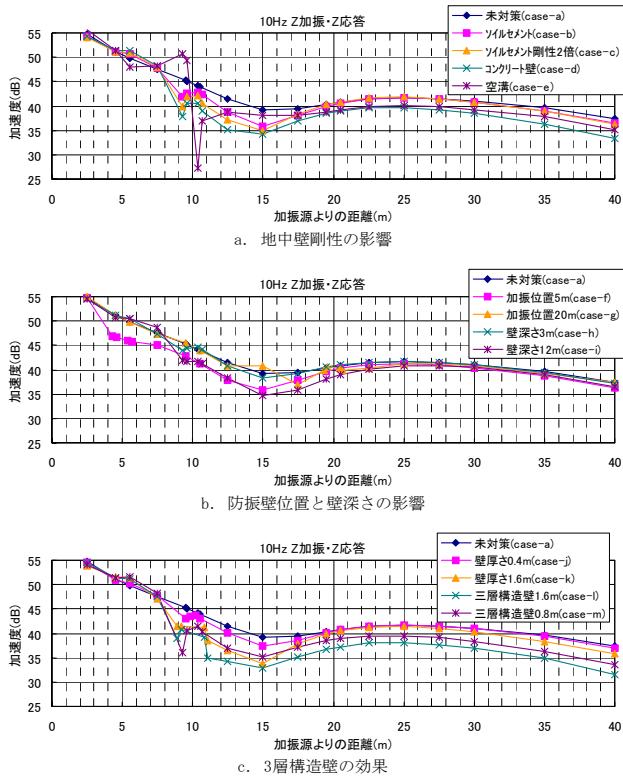


図-6 振動加速度レベルの距離減衰
(上下加振 10Hz, 上下応答)
attenuation with distance of
vibration acceleration level
(vertical excitation, 10Hz, vertical response)

図-6 は、加振点を通り、防振壁に直交する直線上の振動加速度レベルの距離減衰を示したものである(上下加振 10Hz・上下動)。図より、防振壁の背後約 10m 以内では、防振壁の振動低減効果がみられる。それより遠方では、3 層構造壁でやや効果がみられるものの、それ以外の工法の低減効果はほとんどみられない。また、壁深さを波長(レーリー波)の 1/2 程度(6m)とした場合、低減効果がみられるが、1/4 程度(3m)では効果は小さい。防振壁深さが低減効果に及ぼす効果は、既往の研究(例えば文献^{9,10)})と整合している。空溝の場合には、溝前面での反射と、自由端であるためによる増幅が顕著である。

4. まとめ

本検討では実地盤をモデルとして、実用的な範囲での各種防振地中壁の振動低減効果について 3 次元解析により検討した。

上下加振問題の場合、既往の実験研究・解析研究結果と同様の傾向であり、上下動に対しては、壁の直背後では 5~6dB 程度の低減効果がみられるものの、本検討の条件では、5~10m(おおむね 1~2 波長に相当)以上の距離では低減効果は 2~3dB 以下に小さくなる。また、水平加振問題における水平動に対しては、工法によらず、防振地中壁による低減効果は小さい。

各種工法で比較すれば、上下振動の低減効果は、振動数に依存するものの、道路振動で問題とされる 3~10Hz の振動数域では 3 層構造壁が他の工法と比べて有効である。

参考文献

- 1)長瀧, 橋詰 : 地盤内の振動の伝搬とその対策, 報文-2445, 土と基礎, Vol.44, pp.5-8, 1996 年 9 月
- 2)原, 早川他 : 鋼矢板防振壁による地盤振動遮断メカニズム, 地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム, 地盤工学会, 2001 年 2 月
- 3)芦屋, 西村他 : 振動遮断工の防振効果に関する 3 次元動的解析, 地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム, 地盤工学会, 2001 年 2 月
- 4)高谷, 北村 : 地中防振壁を介した地表面振動の伝達特性に関する検討, 地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム, 地盤工学会, 2001 年 2 月
- 5)田口, 花里他 : 3 次元地盤環境振動予測システムの研究開発その 1~2, 第 37 回地盤工学研究発表会, 2002 年 7 月
- 6)田口, 花里他 : 平面交通振動の加振力特性に関する研究その 1~2, 第 38 回地盤工学研究発表会, 2003 年 7 月
- 7)西阪, 福和他 : 軟弱地盤における交通振動の波動伝播性状に関する研究, 第 9 回地震工学シンポジウム, 1994 年
- 8)高谷, 北村 : 地中水平防振壁を有する 3 層防振壁の振動低減効果について, 第 34 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1973-1974, 1999
- 9)竹宮 : 環境振動における地盤内の波動伝播と振動対策, 土と基礎, Vol.44, No.9, pp.1-4, 1996
- 10)建築学会 : 居住性能に関する環境振動評価の現状と規準, 2000