

現場計測と3次元数値解析による ガスクッション製防振壁の防振性能評価

日置和昭¹・櫛原信二²・野津光夫¹・坪井英夫¹・西村忠典³・庄司正弘⁴

¹正会員 工博 不動建設(株) ジオエンジニアリング事業本部(〒103-8543 東京都中央区日本橋小網町6-1)

²正会員 工修 不動建設(株) ジオエンジニアリング事業本部(〒103-8543 東京都中央区日本橋小網町6-1)

³(株)構造計画研究所 防災・環境部(〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)

⁴(株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部(〒164-0012 東京都中野区本町4-38-13)

本論文は、実物大の振動遮断壁(従来のガスクッション遮断壁とそれに鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁)を用いて実施した現場計測結果、現場計測結果の再現性を確認できた3次元モデルを用いた数値実験結果について報告するものである。具体的には、まずダンプトラック走行時の交通振動を対象とした現場計測結果を分析し、従来のガスクッション遮断壁よりもハイブリッド遮断壁の方が振動低減効果を大きく期待できることを明らかにした。次に、起振機実験結果に基づいて、3次元解析におけるハイブリッド遮断壁のモデル化を試み、その妥当性と有効性を示した。さらに、3次元モデルを用いて数値実験を実施し、ハイブリッド遮断壁の剛性が振動低減効果に与える影響について考察を加えた。

キーワード：振動遮断壁，ガスクッション，振動低減効果，現場計測，数値実験

1. はじめに

近年求められている生活環境改善の一つに、地盤環境振動問題がある。地盤環境振動の発生源としては、交通振動、工場振動、建設作業振動などがあり、特に、最近では都市部における高架道路などの沿線住環境に低周波振動問題が発生しているケースがしばしば見られる。

さて、このような地盤環境振動の伝播経路対策としては、従来、地中壁(鋼矢板、コンクリート、ソイルセメントなど)や空溝などが用いられてきた。しかし、地中壁については、高周波振動に対する防振効果は顕著であるものの、公害振動と呼ばれる低周波振動に対する振動低減効果は限定されており、大きくは期待できない。一方、空溝については、対象となる波長の1/2程度以上の深さを確保できれば、低周波振動に対しても振動低減効果は高いと考えられるが、施工後のメンテナンスや地震時を含めた長期的な安全性に問題がある(表-1参照)。

そこで、上記2つの問題を解決するため、「ガスクッション(Gas-Filled Cushions)」と呼ばれる振動遮断材料を用いた空溝志向型の遮断壁がMassarsch¹⁾により提案されている。しかし、高架下などの狭隘地でガスクッションを用いた遮断壁を適用する場合には、高架を含めた隣接する既設構造物の安全性確保が重要となる。そのため、筆者ら²⁾は、従来のガスクッション遮断壁に鋼矢板(当

初は、隣接する重要構造物の施工時安全性や地震時を含めた長期的安全性の確保が一義的な役割であると考えた)を付加したハイブリッド遮断壁を考案し、高架下など空頭制限のある狭隘地においても安全に構築できる施工方法を開発した。

本論文では、まず従来のガスクッション遮断壁に鋼矢板もしくは鉄筋コンクリートパネルを付加したハイブリッド遮断壁の構造および狭隘地での施工方法について紹介するとともに、道路交通振動を対象とした現場計測結果³⁾について報告する。次に、起振機振動を対象とした現場計測結果に基づいて、3次元解析におけるハイブリッド遮断壁のモデル化を試みる。さらに、3次元モデルを用いて数値実験を実施し、ハイブリッド遮断壁の剛性が振動低減効果に与える影響について考察を加えた。

表-1 地中壁および空溝の長所と短所

	地中壁	空溝
長所	・深い深度まで施工が可能 ・メンテナンスフリーである	・低周波域～高周波域で効果が大きい
短所	・低周波域に対する効果があまり期待できない	・深い深度までの施工が困難 ・施工後のメンテナンスや地震時を含めた長期的な安全性に問題がある

2. ハイブリッド遮断壁の概要

ハイブリッド遮断壁は、地中壁と空溝の長所を併せ持つ、すなわち低周波域において空溝とほぼ同等の振動低減効果が期待でき、かつ長期的な安全性も確保できるメンテナンスフリーの振動遮断壁である。ハイブリッド遮断壁は、図-1 に示すように、ガスクッション、ソイルセメント壁、鋼矢板もしくは鉄筋コンクリートパネルから成り、図-2 に示すような構造体である。

以下に個々の部材の役割について簡単に説明する。
 ガスクッション (Gas-Filled Cushions)

地中壁への充填材料としては、地盤に対して波動インピーダンス (波動速度×密度) の大きい剛な材料 (例えば、コンクリートなど) と波動インピーダンスの小さい軟らかい材料 (例えば、発泡スチロールなど) がこれまでに提案されている。ここで、インピーダンスの小さい材料を用いる場合、最大の振動低減効果を得るためには、地中壁内をできるだけ空溝の状態 (地中壁を透過する波動成分がゼロの状態) に近づけなければならない。ガスクッションは、地中壁を透過する波動成分をゼロに近づけるために考案された材料であり、1980 年代に提案され、ヨーロッパにおいて数例の適用実績がある¹⁾。

ソイルセメント壁

ソイルセメント壁の役割は、ガスクッションによる空隙部をセメントベントナイトで保護し、土圧 (常時、地震時) に耐える構造とすることである。したがって、ソイルセメント壁の強度は、振動遮断壁の施工深度や耐震性を考慮したうえで決定する。

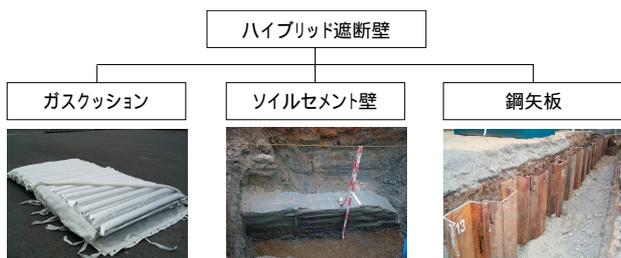


図-1 鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁の構成部材

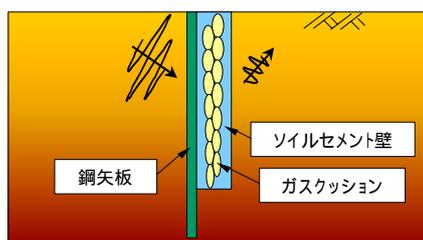


図-2 鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁の構造概念図

鋼矢板もしくは鉄筋コンクリートパネル

鋼矢板もしくは鉄筋コンクリートパネルの役割は、施工時における周辺地盤変位を抑制すること、隣接する構造物の地震時を含めた長期的な安全性を確保すること、ガスクッションの浮上りを防止すること、後述する低空頭型多軸揺動ジェット施工機の重量を支えること (ただし、狭隘地で施工する場合のみ)、などである。したがって、鋼矢板もしくは鉄筋コンクリートパネルの仕様は、施工時安全性の検討、地震時安全性の検討、ガスクッション浮上りの検討 (地震時を含む)、施工機支持力の検討 (狭隘地で施工する場合のみ) などを行ったうえで決定する。

3. 狭隘地での施工方法

我が国において防振対策が必要となるような場所は、そのほとんどが狭隘地であり、施工に関してかなり厳しい制約条件 (施工スペースや空頭制限など) があるものと推察される。そのため、写真-1 に示すような無公害鋼矢板圧入引抜機サイレントパイラーを活用した新しい施工装置を開発し、鋼矢板圧入、多軸揺動ジェットによるソイルセメント壁施工、油圧によるガスクッションの挿入を継続して同じ施工機で行えるようにした。この施工方法の開発により、高架橋の下などの狭隘地においても鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁の施工が可能となった²⁾。

狭隘地におけるハイブリッド遮断壁の施工手順を図-3 に示す。また、多軸揺動ジェットによるソイルセメント壁の施工概念を図-4 に、多軸揺動ジェット噴射状況を写真-2 に示す。ここで、ソイルセメント壁の施工方法として、多軸揺動ジェットを採用した理由としては、以下のことが挙げられる。

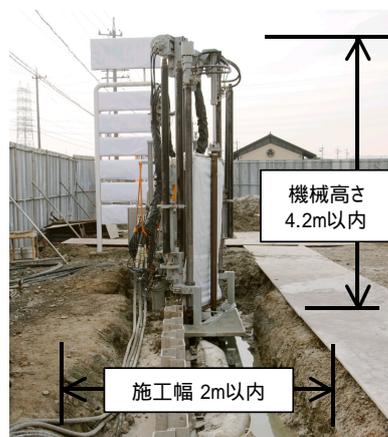


写真-1 サイレントパイラーを活用した新しい施工装置



図-3 狭隘地での施工手順

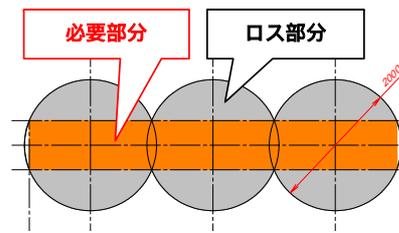


図-5 連続壁の概念図

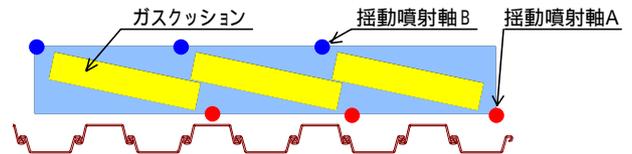


図-6 ガスクッションの配置概念図

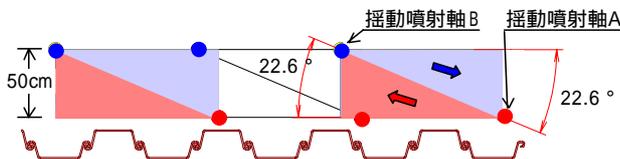


図-4 ソイルセメント壁の施工概念図



写真-2 多軸揺動ジェット噴射状況

- 図-4 に示すように、揺動噴射軸 A および B からジェットを噴射し、これを 23° 程度揺動させることにより、厚さ 50cm 程度のソイルセメント壁が造成できる。
- 図-5 に示すように、円柱状の改良体をラップさせて連続壁を造成する場合と比較して、無駄を省けるため、コスト低減が図れる。また、施工時における周辺地盤の変位も小さい。
- 揺動噴射軸 A および B が、ガスクッションを油圧で挿入するためのガイドフレームの役割を果たす。

次に、ガスクッションの配置概念を図-6に示す。ガスクッションの配置は、隙間ができないように斜めにラップさせて配置する。

深度 (m)	往状図	土質区分	N値		ガスクッション遮断壁仕様		ハイブリッド遮断壁仕様	
			0	10	20	30	遮断壁仕様	鋼矢板仕様
1.7		盛土	0	0	0	0	0	0
2.7		砂質粘土	0	0	0	0	0	0
4.7		シルト無細砂	0	0	0	0	0	0
6.6		礫層のシルト混じり細砂	0	0	0	0	0	0
7.8		シルト混じり細砂	0	0	0	0	0	0
9.2		砂質シルト	0	0	0	0	0	0
12.0		砂質粘土	0	0	0	0	0	0

図-7 地盤概要と各遮断壁の仕様

4. 道路交通振動を対象とした現場計測結果

(1) 現場計測概要

愛知県田原市谷熊町において、道路交通振動に対する防振性能の検証を行った³⁾。現地の地盤概要と遮断壁仕様（ガスクッション遮断壁とそれに鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁）を図-7に示す。ただし、各遮断壁の施工延長は10mである。

次に、振動計測の概念図を図-8に示す。振動計測は、和田ら⁴⁾によって新しく開発された振動情報と画像情報を組み合わせた振動源探査システムを用い、約50km/hで走行中のダンプトラックによる交通振動を対象に行った。交通振動の記録時間は6secとし、ダンプトラックが小型カメラを中心に - 76.3° ～ 76.3°（約80m区間）の範囲を走行中に計測した。また、振動計測位置は、回折波による影響を極力抑えるため、壁裏1.0mとした。なお、ダンプトラックによる交通振動の卓越周波数領域は、10～25Hzであった。

(2) 現場計測結果

ダンプトラック走行時における振動計測の一例を図-9に示す。画像上に示されている円の大きさは振動（速度）の大きさを表しており、各遮断壁による振動低減効果を画像上から知ることができる。

次に、計測された速度レベルを加速度レベルに変換したものを図-10に示す。各々の変動幅の80%レンジ（加速度レベル）を求めると、遮断壁なし：60dB、ガスクッション遮断壁：54dB、ハイブリッド遮断壁：51dBとなっており、各遮断壁による振動低減効果が顕

著に表れている。また、ガスクッション遮断壁とハイブリッド遮断壁による振動低減効果を比較すると、ハイブリッド遮断壁の方が大きくなっているが、これはハイブリッド構造とすることにより遮断壁の剛性が増加したためであると推察される。

ダンプトラック走行時の加速度と1/3オクターブバンド中心周波数の関係を図-11に示す。同図より、卓越周波数領域の加速度が各遮断壁により確実に低減されていることがわかる。次に、卓越周波数領域における加速度振幅比（ a/a_0 ）と遮断壁設置深度（H）を周波数毎にS波の波長（ λ ）で除した値（ H/λ ）の関係を図-12に示す。同図には、空溝による振動低減効果に関する既往の研究成果⁵も併せて示す。同図より、道路交通振動に対するハイブリッド遮断壁の振動低減効果は、空溝と同等以上であるものと推察される。以上より、ハイブリッド遮断壁の構成部材である鋼矢板には振動低減効果を増大させる役割もあることが示された。したがって、鋼矢板仕様の決定には振動低減効果を加味することもできる。

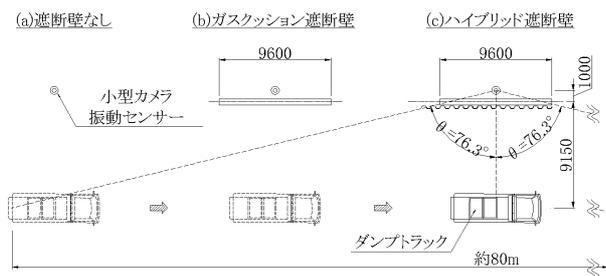


図-8 振動計測の概念図（平面図）



(a) 遮断壁なし

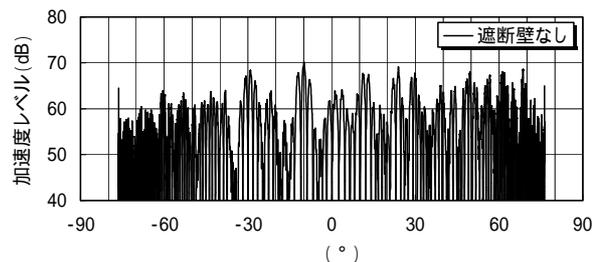


(b) ガスクッション遮断壁

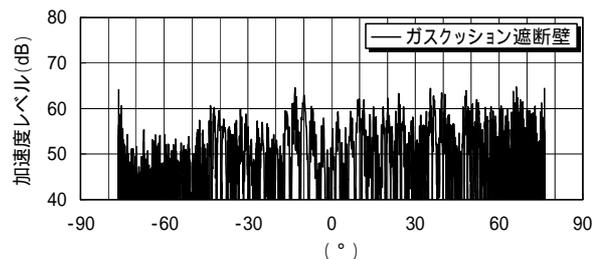


(c) ハイブリッド遮断壁

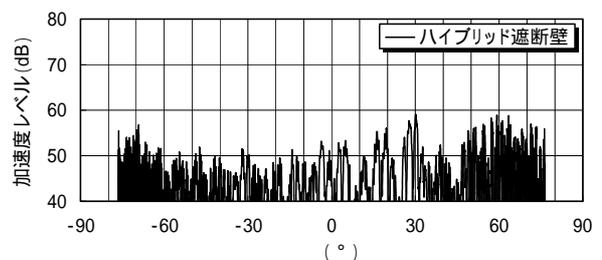
図-9 ダンプトラック走行時における振動計測の一例



(a) 遮断壁なし



(b) ガスクッション遮断壁



(c) ハイブリッド遮断壁

図-10 ダンプトラック走行時の加速度レベル

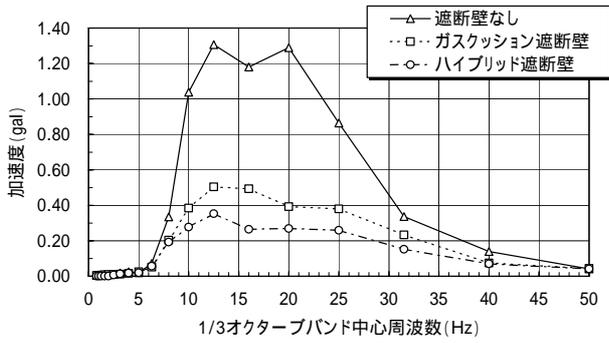


図-11 加速度と1/3オクターブバンド中心周波数の関係

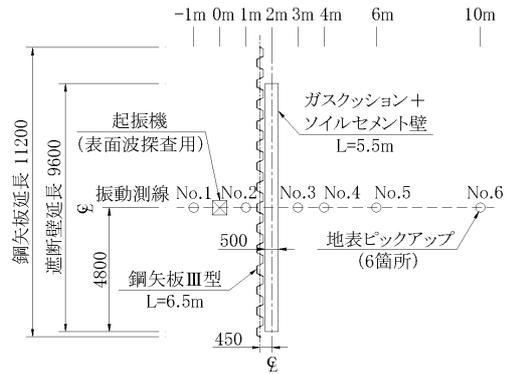


図-13 振動計測の概念図(平面図)

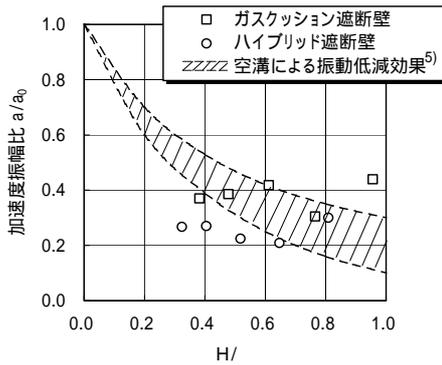


図-12 各遮断壁の振動低減効果

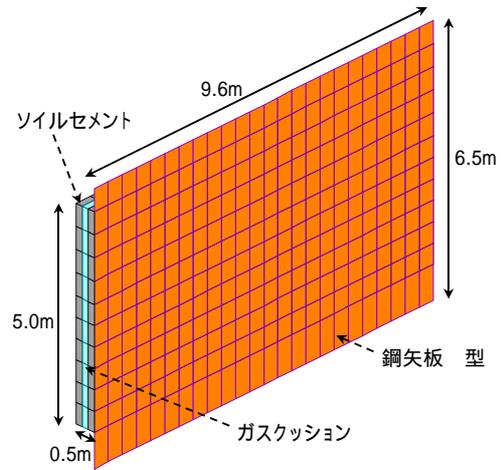


図-14 ハイブリッド遮断壁の3次元FEMモデル図

5. 3次元数値解析による防振性能評価

(1) 3次元解析におけるハイブリッド遮断壁のモデル化
遮断壁の施工延長を設定する際には、遮断壁端部からの回折波による影響を考慮(予測)しなければならない。ここでは、鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁の施工延長や形状などを提案可能とするため、起振機実験結果を再現できるように、3次元解析を活用してハイブリッド遮断壁のモデル化を試みた。また、2次元解析との比較検討を行い、3次元解析の有効性について検証した。

起振機実験による振動計測の概念図を図-13に示す。振動計測には、表面波探査用の起振機(周波数可変型で最大起振力は2.65kN)を用い、起振周波数は5Hz、10Hz、15Hz、20Hz、25Hzとした。なお、起振機実験は図-7に示したハイブリッド遮断壁を対象にして行い、振動計測は、ハイブリッド遮断壁の施工前後に2回実施した。

ハイブリッド遮断壁の3次元FEMモデル図を図-14に示す。また、地盤モデル、ハイブリッド遮断壁の物性値、解析ケース一覧を表-2~4に示す。本検討では、地盤-ハイブリッド遮断壁系を3次的にモデル化し、起振機設置位置を強制加振した際の地盤やハイブリッ

表-2 地盤モデル

深度 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	減衰定数 (%)
0.0 ~ 2.7	690	220	0.443	16.7	2.00
2.7 ~ 5.7	1250	115	0.496	16.7	2.00
5.7 ~ 10.7	1710	320	0.482	16.7	2.00
10.7 ~ 14.0	1680	260	0.488	16.7	2.00
14.0 ~	1680	350	0.477	16.7	2.00

表-3 ハイブリッド遮断壁の物性値

材料名	ヤング係数 (kN/m ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	減衰定数 (%)	断面積 (m ² /m)	断面二次モーメント (m ⁴ /m)
鋼矢板 型	2.05E+08	0.30	77.0	3.00	1.91E-02	1.64E-04
ソイルセメント	1.15E+05	0.20	11.8	3.00	--	--
ガスクッション	1.00E+00	0.49	0.1	0.00	--	--

表-4 解析ケース一覧

解析ケース	加振周波数	加振力	備考
ハイブリッド遮断壁なし ハイブリッド遮断壁あり	5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 25Hz	測定位置No.1の計測結果を再現できる加振力を逆算	参考のため、同条件で2次元解析も実施

ド遮断壁の応答を算定した。すなわち、地盤を薄層要素で成層地盤として層分割し、ハイブリッド遮断壁は3次元 FEM でモデル化した。そして、動的サブストラクチャー法に基づいて、両者の力と変位の連続性や加振力に対する地盤応答を薄層要素法による点加振解を用いて評価した。また、応答解析は、複素応答法を用いた。加振力は、単位振幅の正弦波として起振機位置に規定し、ハイブリッド遮断壁と反対側に設けた計測点（加振位置から 1m 地点）の計測結果と解析結果が同値となるように加振力を逆計算した。地盤は、最大解析振動数 60Hz まで考慮し、波長の 1/6 以下となるように各層を細分化した。また、ハイブリッド遮断壁は、鋼矢板をシェル要素、ソイルセメント部およびガスクッション部をソリッド要素でモデル化した。なお、ガスクッション部については、空隙であると仮定し、剛性と質量を非常に小さいものとした。

壁裏1.0mにおける振動低減効果と起振周波数の関係を図-15に、振動低減効果と距離の関係（起振周波数は5Hz, 15Hz, 25Hz）を図-16~18に示す。ここで、振動低減効果は、施工前から施工後の結果を減じたものであり、プラス側がハイブリッド遮断壁によって減じられた振動ということになる。まず、図-15に着目すると、解析結果は計測結果を $\pm 2 \sim 5$ dB程度の精度で再現していることがわかる。次に、図-16~18に着目すると、3次元解析では計測結果と解析結果が概ね一致していることがわかる。また、ハイブリッド遮断壁の防振性能は、周波数によって異なっているが、これは、地盤と遮断壁の材料との複合的な相互作用によるものであると推察される。一方、参考のため実施した2次元解析ではハイブリッド遮断壁から距離が離れると、計測結果と解析結果の乖離が大きくなり、解析結果が振動低減効果を過大評価していることがわかる。これは、2次元解析では、ハイブリッド遮断壁（有限長であるもの）を無限長としてモデル化していることで、振動の回り込みや壁端と壁中央での壁体の振動モードの相違などが的確に評価できず、ハイブリッド遮断壁端部からの回折波による影響を評価できないためであると考えられる。

(2) 遮断壁の剛性が振動低減効果に与える影響

ダンブトラック走行時の交通振動を対象とした現場計測結果から、従来のガスクッション遮断壁よりもハイブリッド遮断壁の方が振動低減効果を大きく期待できることが明らかとなった。ここでは、3次元解析により起振機実験の再現性がほぼ確認できたことから、従来のガスクッション遮断壁ならびに鋼矢板や鉄筋コンクリートパネルを付加したハイブリッド遮断壁の剛性

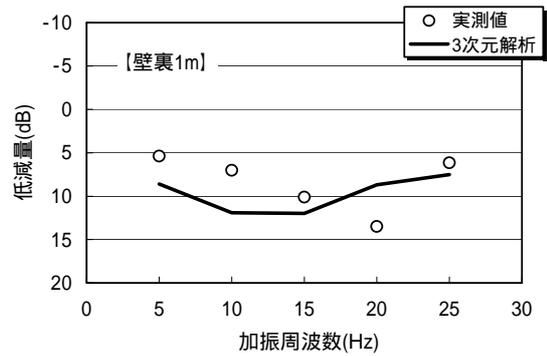


図-15 振動低減効果と周波数の関係（壁裏 1m）

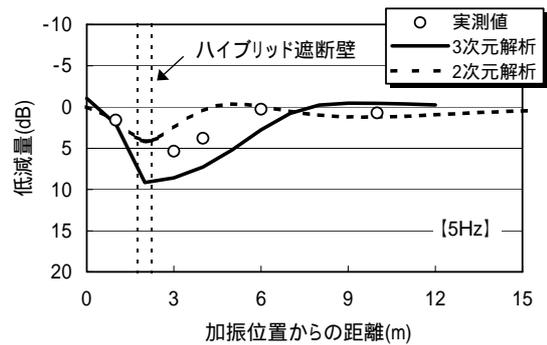


図-16 振動低減効果と距離の関係（5Hz）

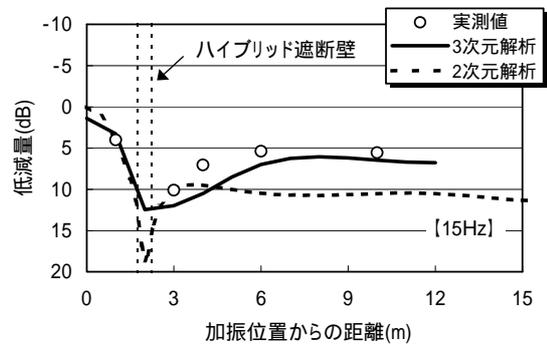


図-17 振動低減効果と距離の関係（15Hz）

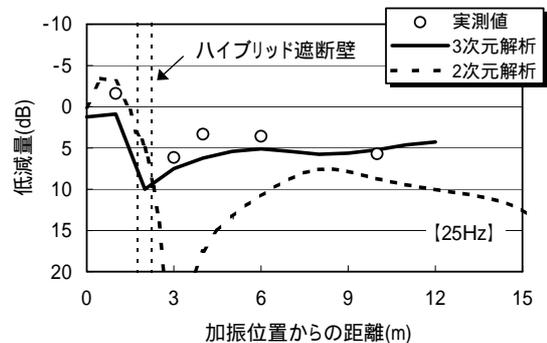


図-18 振動低減効果と距離の関係（25Hz）

が振動低減効果に及ぼす影響について、上述の3次元モデルを用いて数値実験を実施した。

数値実験は、遮断壁設置前と設置後(3タイプ)の3次元モデルを作成し、加振解析を実施して遮断壁体背後での加速度振幅比(遮断壁設置後/遮断壁設置前)を比較した。また、外力としては、単位振幅の正弦波を遮断壁体中心線上の2.0m離れた位置に規定した(図-19参照)。数値実験を実施した3タイプの遮断壁仕様(ただし、施工延長は9.6mとした)を図-20に、遮断壁の物性値を表-5に、実施した解析ケースおよび解析条件一覧を表-6に示す。ただし、地盤モデルは表-2と同様とした。

各々のケースにおける単位力加振時の変位振幅(ただし、壁裏1mの変位振幅)と加振周波数の関係を図-21に、また振幅比(遮断壁設置後/遮断壁設置前)と加振周波数の関係を図-22に示す。まず、変位振幅に着目すると、10Hz付近にピークが認められ、この付近の周波数帯で振動が伝播しやすいことがわかる。次に、振幅比に着目すると、地盤振動の卓越する周波数域での振動低減効果が大きいこと、振動低減効果としては、ガスクッション遮断壁<鋼矢板を付加したハイブリッド遮断壁 鉄筋コンクリートを付加したハイブリッド

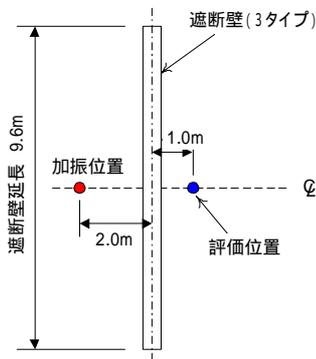


図-19 解析モデルの概要図(平面図)

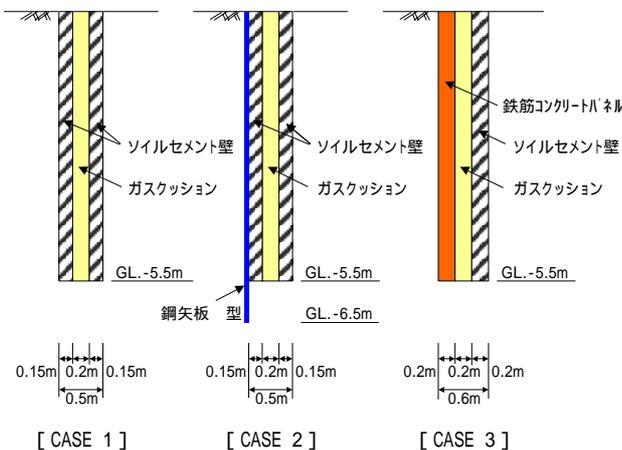


図-20 数値実験を実施した遮断壁仕様

遮断壁となっていることなどがわかる。これは、ガスクッション遮断壁に対してハイブリッド遮断壁では剛性の高いものが付加されるため、その相乗効果で振動低減効果が大きくなっているものと推察される。ただし、遮断壁の防振性能は地盤との相互作用によるものであり、地盤条件などに応じた低減効果の一般性については、さらに検討を深める必要がある。

25Hzにおける地表面・地中最大加速度コンター図を図-23に、また25Hzにおける壁体挙動を図-24に示す。まず地表面・地中最大加速度コンター図に着目すると、遮断壁なしの場合にみられる地中部の振動増幅がガスクッション遮断壁ではそれほど低減されていないが、

表-5 遮断壁の物性値

材料名	ヤング係数 (kN/m ²)	ポアソン 比	単位体積重量 (kN/m ³)	減衰定数 (%)	断面積 (m ² /m)	断面二次モーメント(m ⁴ /m)
鋼矢板 型	2.05E+08	0.30	77.0	3.00	1.91E-02	1.64E-04
鉄筋コンクリートハネル	3.60E+07	0.20	23.5	3.00	--	--
ソイルセメント	1.15E+05	0.20	11.8	3.00	--	--
ガスクッション	1.00E+00	0.49	0.1	0.00	--	--

表-6 解析ケースおよび解析条件一覧

解析ケース	遮断壁延長	加振周波数	加振力
CASE0	遮断壁なし	--	各振動数 単位振幅の 正弦波
CASE1	従来のガスクッション遮断壁	0~30Hz (1Hzピッチ)	
CASE2	鋼矢板を付加した ハイブリッド遮断壁		
CASE3	鉄筋コンクリートハネルを付加した ハイブリッド遮断壁		

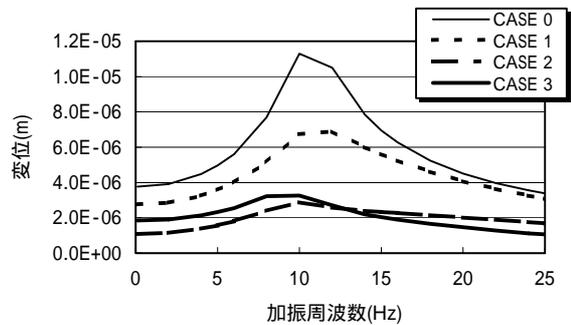


図-21 変位振幅と加振周波数の関係

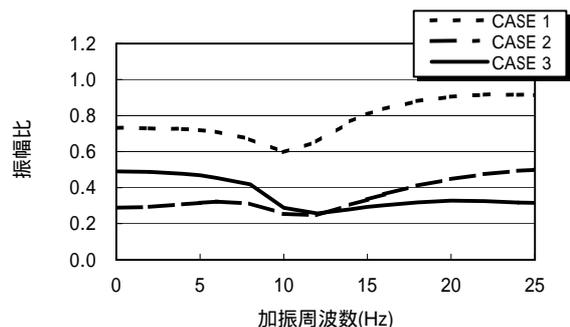


図-22 振幅比と加振周波数の関係

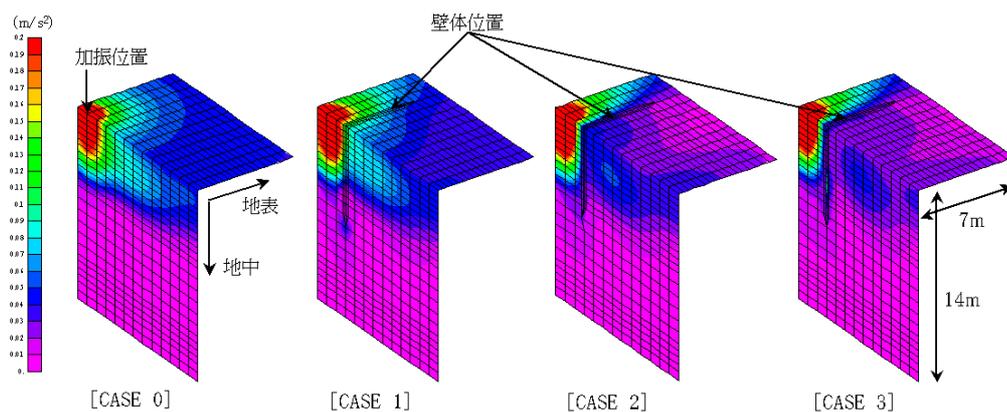


図-23 地表面・地中最大加速度コンター図 (25Hz)

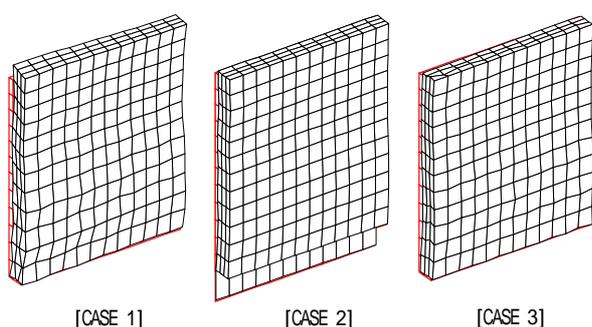


図-24 壁体挙動図 (25Hz)

鋼矢板ならびに鉄筋コンクリートを付加したハイブリッド遮断壁では大きく低減されていることがわかる。次に、壁体挙動に着目すると、鋼矢板や鉄筋コンクリートパネルを付加することで遮断壁の変形が抑制されているのがわかる。このことから、剛性が高い鋼矢板や鉄筋コンクリートパネルと剛性がほとんどないガスクッションの振動低減における相乗効果がみてとれる。

6. まとめ

本論文では、ガスクッション製防振壁の防振性能について、実験的かつ解析的に検討を行った。得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 実物大のガスクッション遮断壁ならびにハイブリッド遮断壁を設置し、ダンプトラック走行時の交通振動を対象に現場計測を行った結果、従来のガスクッション遮断壁よりもハイブリッド遮断壁の方が振動低減効果を大きく期待できることが明らかとなった。
- (2) 起振機実験結果に基づいて、3次元解析におけ

るハイブリッド遮断壁のモデル化を試み、その妥当性と有効性を示した。

- (3) 3次元モデルを用いて数値実験を行った結果、鋼矢板や鉄筋コンクリートパネルを付加させることで遮断壁の変形が抑制され、そのことが振動低減効果に寄与することが明らかとなった。

ガスクッション製防振壁の防振性能は、地盤との相互作用を含むため、地盤条件などに応じた防振メカニズムの一般性について、今後さらに検討を加える必要がある。そのためには、数値解析をより深度化するとともに、振動低減効果の予測精度を向上させなければならない。また、今後はガスクッションの耐久性などについても検討を進め、ガスクッション製防振壁の適用限界深度を明確にするとともに、維持・管理手法を提案していく予定である。

参考文献

- 1) Massarsch, K.R.: Vibration Isolation using Gas-Filled Cushions. Soil Dynamics Symposium to Honor Prof. Richard D. Woods (Invited Paper). Geofrontiers 2005, Austin, Texas, January 24 ~ 26, 2005.
- 2) 大塚誠, 坪井英夫, 磯谷修二, 野津光夫, 日置和昭, 榎原信二: ガスクッションを用いたハイブリッド(三重構造)振動遮断壁の構築技術, 建設機械, 第41巻, 第5号(通巻483号), pp.65~69, 2005.
- 3) 日置和昭, 坪井英夫, 野津光夫, 和田浩之, 鈴木陽, 杉山武: 道路交通振動に対するガスクッション製防振壁の防振性能評価 - 振動情報と画像情報を組み合わせた振動源探査システムによる現場計測 -, 日本建築学会 2005年度大会(近畿) 学術講演梗概集 D-1 環境工学, pp.239~240, 2005.
- 4) 和田浩之, 鈴木陽, 杉山武, 坪井利弘, 稲田修, 財満健史, 大脇雅直, 山下恭弘: 環境振動発生方向の推定に関する研究, 2005年度日本建築学会大会(近畿) 学術講演梗概集 D-1 環境工学, pp.229~230, 2005.
- 5) 早川清: 地盤振動の伝搬過程における防止対策の背景と動向, 日本音響学会誌, 55巻, 6号, pp.449~454, 1999.