

地下鉄軌道に近接した建物の固体伝搬音対策に関する研究  
その1 研究対象とした建物の概要と振動対策

正会員 ○北川 督\*1  
同 大嶋 隆\*1  
同 阿部 隆之\*2

地下鉄振動 固体伝搬音 振動対策

1. はじめに

地下鉄軌道に近接して建物が計画される場合、地下鉄からの固体伝搬音対策が課題となる。こうした地下鉄騒音問題では、31.5~125Hz 帯域の振動が建物内を伝搬するため予測評価が難しい。

今回、地下鉄騒音の大きい建物の建替計画に際し、建物解体前に建物内の振動・騒音調査を行い、新築建物における地下鉄振動の対策を行ったので、その効果について報告する。

本編では、既存建物における地下鉄騒音と、計画建物に対する振動対策の概要について述べる。その2では、実施した振動対策の効果について述べる。

2. 既存建物の概要と地下鉄騒音

当該敷地は地下鉄に近接した敷地である(図1)。地下鉄軌道と既存建物とは、図2に示すように最短で約5mの至近距離に位置している。また、既存建物より約2mの位置に換気塔が位置している。地下鉄軌道は当該敷地周辺において下りに差し掛かり、カーブが最もきつくなる。更にレールの表面状態も良好とは言えず、大きな振動・騒音が発生する場所と考えられている。既存建物はSRC造9階建であり、杭については各柱の下に径がφ350の既成杭が5~7本打ずつ配置されていた。また、既存建物は1階が駐車場で、2階から上が事務所として使用されていた。

既存建物2階で測定した地下鉄騒音の結果を図3に示す。図3は夕方時間帯に走行した列車10本のエネルギー平均をプロットしたものである(Fast, 1/3値)。地下鉄走

行時の2階事務室における騒音評価は図3に示すように暗騒音がNC35程度であるのに対して、地下鉄が走行するとNC65程度となり、執務空間として過大な騒音が発生していた事が分かった。

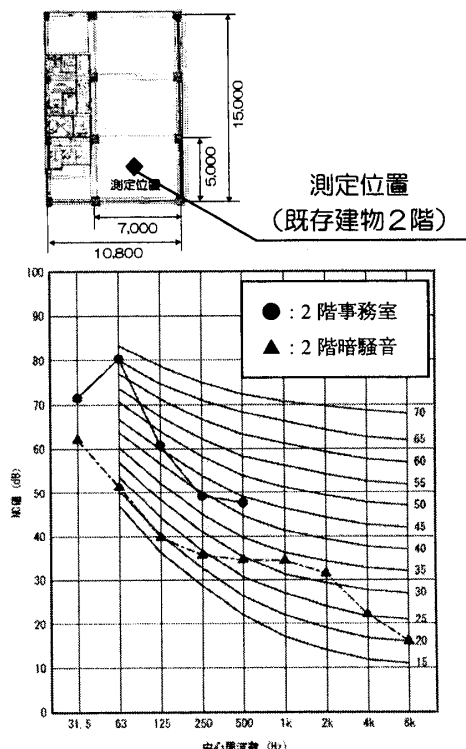


図3 既存建物の地下鉄騒音

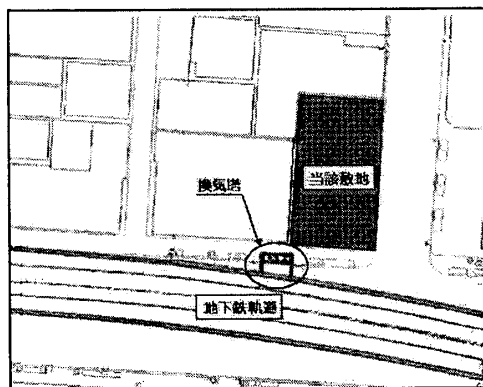


図1 地下鉄と建物との関係 (平面図)

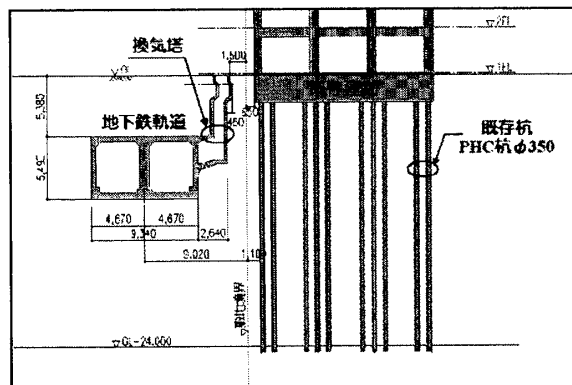


図2 地下鉄と建物との関係 (断面図)

Study on Structure-borne sound Reduction of the Building nearby  
Underground Railroad  
Part1 Building plan and the summary of the measure to reduce vibration

KITAGAWA Osamu, OHSHIMA Takashi, ABE Takayuki

### 3. 既存建物の床振動

既存建物の地下鉄軌道に近い側の2階から上の床スラブは7m×5mのスペンで、スラブ厚さが150mmであり、小梁を有していない。2階床振動については、この床スラブの中央付近に振動加速度計を設置し、地下鉄通過時の振動加速度レベルを測定した(ピックアップ：リオン PV87、チャージアンプ：BK2635)。振動測定についても騒音測定と同じように10本の列車が走行した時のエネルギー平均を求めた。その結果を表1に示す。

床の振動についても騒音の測定結果と同じように63Hz成分が卓越していた。なお、31.5Hz未満の振動は顕著に現われず、体感的にも知覚されなかった。

表1 2階床の振動加速度レベル

周波数	31.5Hz	63Hz	125Hz
振動加速度レベル	66dB	78dB	70dB

### 4. 新築建物における対策と騒音目標値

#### 1) 振動から室内騒音の予測

新築建物の対策に際して、まず、振動対策の効果を見積もる必要がある。建物内に伝搬した地下鉄振動を拡散場と仮定して、以下の計算式で音圧レベルを算出することができる。ここでは、実測した床振動からいくつかの仮定を用いて室内の音圧レベルを計算した。ただし床スラブの振動に関する卓越周波数は63Hz成分であるため、振動対策の効果についても63Hzを主として検討する。計算では安全側の検討を行うため放射面積は室内全面と考え、躯体の放射係数については63Hzで $k=0.1$ 、室内平均吸音率は0.1、として計算した<sup>1)</sup>。

$$SPLs = La + 10 \log_{10}(S/A) - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} k + 36$$

ここで SPLs: 内装各部位からの放射音 (dB)、k: 放射係数、La: 躯体各部位の振動加速度レベル (dB)、f: 周波数 (Hz)、S: 各部位の面積 (m<sup>2</sup>)、A: 室内吸音力 (m<sup>2</sup>)

63Hzでの計算結果は音圧レベルが78dBとなり、実測結果の81dBと概ね対応した。この結果から、地下鉄振動の63Hz成分を低減させる対策を検討すれば、新築建物の室内騒音は低減されると考えられた。

#### 2) 騒音目標値

新築建物はS造であり、2階から上が事務所スペースとして計画されており、地下鉄騒音の問題が懸念された。既存建物では2階事務所において、NC65の騒音が発生しており、新築建物の騒音目標を設定するにあたって、類似建物の騒音調査や建築主との話し合いから、NC45程度を地下鉄騒音の目標とした。したがって、63Hz成分については地下鉄振動を20dB以上低減させることが必要であると考えられた。

### 5. 振動低減対策の検討

地下鉄振動の対策には周辺地盤と建物との間に緩衝材を入れて振動低減を図ることが有効である。こうした地下鉄振動対策の緩衝材には、いくつかの材料が提案されている。今回は、最近多用されつつあり効果も比較的得られている発泡ポリエチレン材を採用した。この材料は比較的大きな荷重にもバネ材として作用する上、他の材料と比較して軽く耐水性もあるため、施工性も良いという利点がある。

地下鉄振動の緩衝材による低減効果の検討方法については一質点系の伝達率や境界面に波が垂直に入射する際の波動インピーダンス比に基づく方法などが提案されている。今回の検討では、計算における与条件が比較的そろっている波動インピーダンス比からの計算法とした。地下鉄軌道から発生した振動は、図4に示すように地盤から緩衝材を介して建物躯体へと到る。波動インピーダンス比の計算方法については文献<sup>2)</sup>に示されており、発泡ポリエチレン材(厚さH50mm)の波動速度 $V_2$ は335m/s、密度 $\rho_2$ は80kg/m<sup>3</sup>として63Hzの振動低減量を求めると約-18dBとなる。今回の緩衝材の施工範囲は、杭を除く土に接する箇所全て(基礎底面及び地中躯体外周部)とした。

また、今回計画される建物はS造であり既存建物がSRC造であったことを考えると、地下鉄振動が柱を伝搬する過程で既存建物より大きくなることも予想される。こうした理由から、鉄骨柱の中にコンクリートを充填して振動を抑える対策<sup>3)</sup>も実施している。なお、既存建物では床スラブについて小梁が配置されていなかったが、今回の計画では、床スラブでの振動増幅を抑えるため効果的な小梁配置を計画し、緩衝材による効果が最大限に発揮できるような構造計画を考えた。

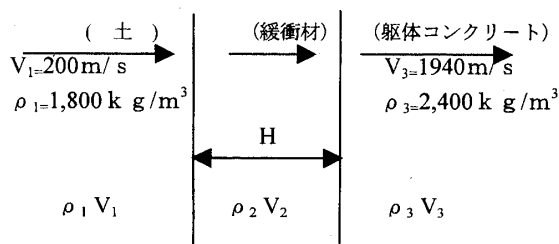


図4 緩衝材による振動絶縁層

#### <参考文献>

- 1) 荘他「吊り免振工法による鉄道高架下建物に関する研究(その5)騒音予測結果と実測結果」日本建築学会学術講演梗概集2004.8
- 2) 山原浩著「環境保全のための防振設計」彰国社 p.359-365
- 3) 吉田宏一他「鋼管柱充填による鉄道振動低減方法に関する研究(その1)実物大単柱試験および解析検討」日本建築学会学術講演梗概集2008.9

\*1 ㈱竹中工務店 東京本店設計部

\*2 ㈱竹中工務店 技術研究所

\*1 Building Design Dept, Takenaka Corporation

\*2 R&D Institute, Takenaka Corporation

地下鉄軌道に近接した建物の固体伝搬音対策に関する研究  
その2 振動低減効果と騒音評価

正会員 ○阿部 隆之\*1  
同 大嶋 隆\*2  
同 北川 督\*2

地下鉄振動 固体伝搬音 振動対策

1. はじめに

地下鉄軌道に近接した建物において良好な居住環境を確保するためには、地下鉄からの固体伝搬音をいかに低減できるかが課題となる。前報では既存建物における振動伝搬状況と新築建物での対策検討について報告した。

本報では、対策を実施した建物についての施工途中における振動の伝搬状況と建物完成時の地下鉄騒音の測定結果について述べる。

2. 敷地における地下鉄振動の伝搬

当該敷地における地下鉄振動の伝搬状況を把握するため既存建物を解体し杭を新設した時点において軌道側山留壁と新設した杭頭における地下鉄振動の測定を実施した(測定部位：↓印)。ピックアップ(リオン:PV87)については図1に示すように山留壁と杭頭に固定し(チャージアンプ: BK2635)、地下鉄走行時の振動を実時間周波数分析器(リオン:SA30)により分析した。測定結果の周波数特性を図2に示すが、これらのデータは通過列車10本のエネルギー平均値(Fast,ピーク値)をプロットしたものである。図2の結果から、地下鉄通過時の振動は杭頭より軌道に近い山留壁の方が概して大きいことがわかる。特に、地下鉄通過時の63Hz帯域については山留壁の方が杭頭より10dB程度大きいため、山留壁を緩衝材で縁を切ることで振動低減効果が期待できると考えられる。

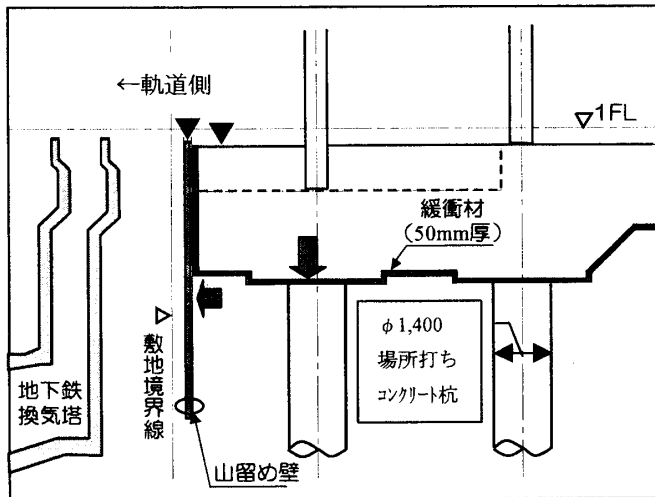


図1 地下部分の建物断面と振動測定部位

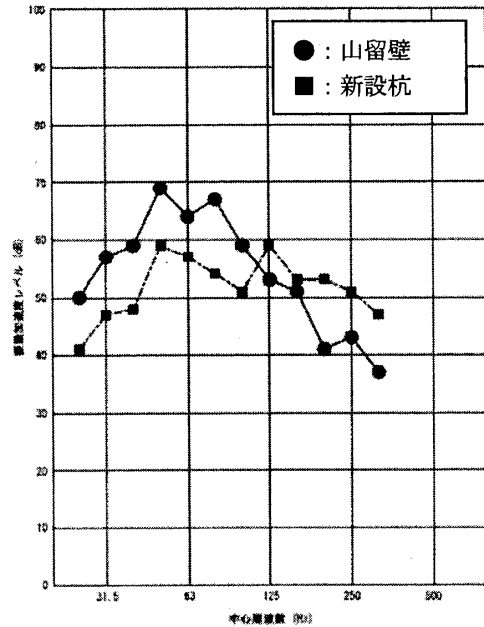


図2 山留壁および杭頭の周波数特性

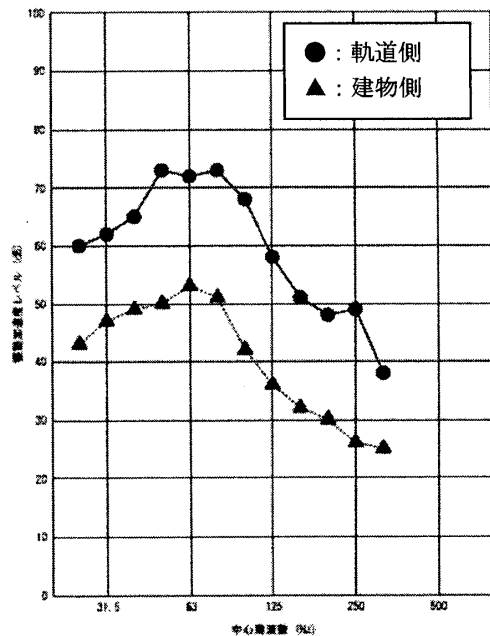


図3 緩衝材の振動低減効果

Study on Structure-borne sound Reduction of the Building nearby Underground Railroad

Part 2 Evaluation of the effect of reduction in vibration and noise

ABE Takayuki, OHSHIMA Takashi, KITAGAWA Osamu

### 3. 緩衝材の効果

建物躯体が完成した時点において緩衝材を挟んでどの程度振動が低減されているかを測定により確認した。測定点は図1に示しているが(測定部位：▼印)、建物外周の施工では山留壁との間の振動ブリッジを回避するため、セパレータは使用していない。地下鉄振動の測定結果では他の測定と同様、通過列車10本のエネルギー平均(個々の列車はFast,  $\beta$ - $\gamma$ 値で測定)で周波数特性を図3に示している。軌道側の測定点は道路に面しており地下鉄振動に加えて自動車振動の影響も受けていると思われるが、63Hz帯域では20dB程度の振動低減効果が認められた。

### 4. 新築建物における測定結果

#### 1) 床振動について

建物竣工時に地下鉄通過時の床振動を測定した。床振動については図4に示すように既存建物および新築建物とも軌道に近い2階床を測定している。測定結果の周波数特性を図5に比較して示すが、測定した場所は既存、新築とも振動が大きくなると想定されるスパン中央であり通過列車10本のエネルギー平均を表示している。図5の結果より、63Hz帯域については床振動において20dB程度低減したことがわかる。

なお、31.5Hz未満の周波数帯域については表示していないが体感振動領域ではほとんど影響が見られず体感的にも知覚されなかった。

#### 2) 騒音について

図6に2階事務室内における騒音測定結果を示す。竣工時の測定では間仕切り壁などはない状況での測定であったが、測定結果はNC40程度となった。

### 5. まとめ

地下鉄に近接した事務所ビルの計画において、その1では既存建物の振動、騒音調査から新築建物における振動低減対策を検討し、その2では新築建物での振動、騒音の低減効果を測定し設計目標を達成したことを報告した。

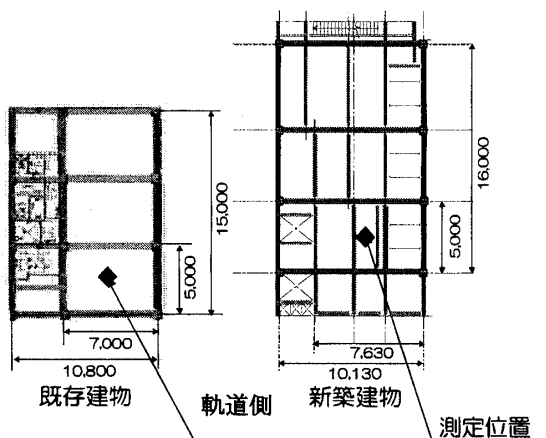


図4 2階床の測定点

こうした地下鉄騒音の対策についてはいまだ計算法も確立されていないため対策法とその実測データの蓄積が重要であると考え。今後も予測法の精度向上が課題であると考え。

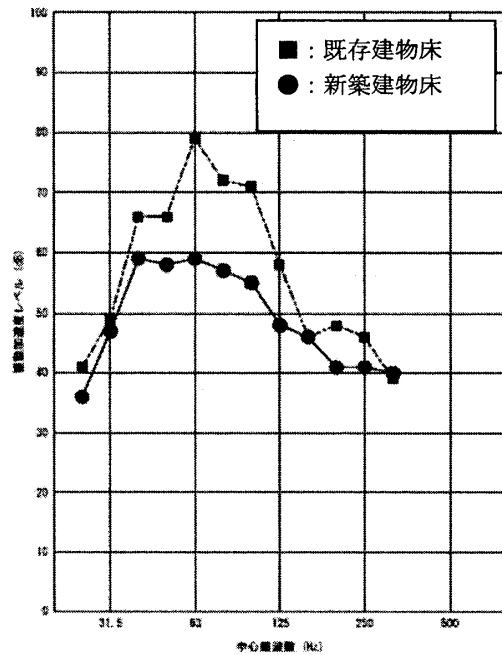


図5 2階事務室内床振動の比較

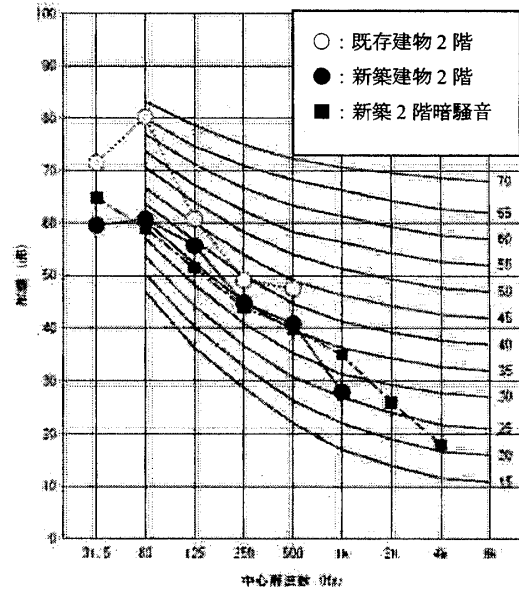


図6 2階事務室内における地下鉄騒音の評価

#### <参考文献>

- 1) 大迫勝彦「鉄道高架下建築物の防振防音構工法に関する研究」学位論文 2001. 11
- 2) 荘他「吊り免振工法による鉄道高架下建物に関する研究(その5)騒音予測結果と実測結果」日本建築学会学術講演梗概集 2004. 8)

\* 1 株式会社竹中工務店 技術研究所

\* 2 株式会社竹中工務店 東京本店設計部

\* 1 R&D Institute, Takenaka Corporation

\* 2 Building Design Dept, Takenaka Corporation

防振タイプ型枠セパレータの振動遮断性能

正会員 ○貝瀬 智昭\*  
正会員 井上 諭\*\*

防振地中壁 型枠セパレータ 防振タイプ型枠セパレータ  
固体伝搬音 振動遮断性能

1.はじめに

鉄道軌道に近接する建物では、鉄道振動低減対策の一例として地中壁に防振材を設置した防振地中壁を施工することがある。防振地中壁の施工にあたり、地下建物躯体壁の型枠と地中壁の間隔を保持するために型枠セパレータ（以後、セパレータと記す）を用いるが、それは地中壁と地下建物躯体間のサウンドブリッジとなり、防振地中壁の振動遮断性能を低下させることが懸念される。そのため、防振タイプの型枠セパレータ（以後、防振セパと記す）を用いる防振対策が講じられる。

しかし、防振セパの振動遮断性能に関する知見<sup>1)2)</sup>は少なく、セパレータおよび防振セパを施工した防振地中壁の振動遮断性能が明らかになっているとは言い難い。

そこで、セパレータおよび防振セパ施工時の防振地中壁の振動遮断性能を明らかにすることを目的とし、防振地中壁の一部を模擬した試験体を作成し、ハンマリング試験を実施した。

本稿では、本実験より得られたセパレータおよび防振機構の異なる防振セパそれぞれの振動遮断性能を比較した結果を報告する。

2.試験体概要・試験体条件

本実験に用いた試験体を図1に示す。本実験では、防振地中壁の一部を模擬し、通常の実現場で使用されるセパレータの施工ピッチを考慮した試験体を作成した。試験体は、縦横900mm、厚さ300mmのコンクリート板とその間に挿入される表1に示す仕様の発泡材で構成される。セパレータ金物には、実験の便宜上<sup>注)</sup>、通常のセパレータと同径（呼び径W5/16）の全ネジボルトを使用した。セパレータの間隔は縦横それぞれ450mmとした。

試験体の条件を表2に示す。本実験では、防振ゴムタイプ（防振セパA、B）およびセパレータに発泡材を巻くタイプ（防振セパC）を評価対象とした。

なお、防振セパBは、防振ゴム部をナットおよび座金で締め込むことにより固定され、防振地中壁に取付けられる。その際に、締め込みにより防振セパの振動遮断性能が低下することが懸念されるため、その影響を確認することを目的に、防振ゴムの締め込み量を0mm、2mm、4mm、6mmとした4条件において性能を評価した。

3.実験方法

測定ブロックダイアグラムを図1に示す。測定は、図1

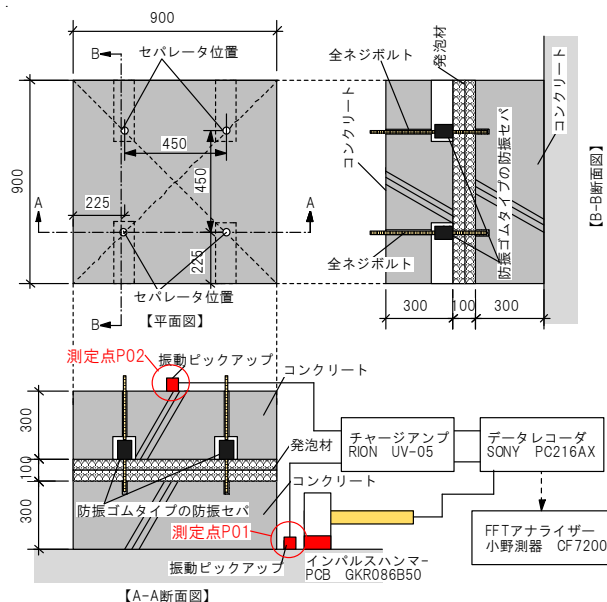


図1 試験体および測定ブロックダイアグラム

表1 発泡材（防振材）の仕様

材質	厚さ (mm)	バネ定数(N/m <sup>2</sup> )	
		静的	動的
ビーズ法架橋 ポリエチレンフォーム	100	7.8×10 <sup>6</sup>	2.4×10 <sup>7</sup>

表2 試験体の条件

条件	発泡材の有無	セパレータ	備考
Case1	無し	無し	-
Case2	有り	無し	-
Case3		型枠セパレータ	セパレータの代用として全ネジボルトを使用
Case4		防振セパA	防振ゴムタイプ (バネ定数非公開)
Case5		防振セパB	防振ゴムタイプ（ゴム硬度90°、静的バネ定数：3.2×10 <sup>6</sup> N/m）
Case6		防振セパC	筒状の発泡ポリエチレンをセパレータに巻くタイプ

に示す各測定点の鉛直方向に圧電型振動ピックアップを設置し、測定点 P01 近傍においてインパクトハンマを用いて衝撃加振を行い、測定点 P01 の加速度応答に対する測定点 P02 の加速度応答の周波数応答関数を求めた。

試験体の振動遮断性能は、衝撃加振 10 回分の周波数応答関数をそれぞれ求め、加算平均した値を評価した。

#### 4.実験結果

##### (1) 型枠セパレータの影響

Case1 (防振材なし+セパレータなし)、Case2 (セパレータなし) および Case3 (セパレータあり) それぞれの振動遮断性能を比較した結果を図 2 に示す。セパレータ有無の振動遮断性能の違いを見ると、図 2 より Case2 (セパレータなし) は、固有振動数が 22Hz であり、26~30Hz 以上から振動遮断効果が見られる。一方、Case3 (セパレータあり) は Case2 と比較して 3 倍以上高い位置に固有振動数 (60Hz) が生じ、80Hz 以上から効果が得られる結果であった。これらの結果より、セパレータがサウンドブリッジとなり、防振地中壁の振動遮断性能が低下することが確認された。

##### (2) 防振タイプ型枠セパレータの振動遮断性能

各防振セパの振動遮断性能を図 3 に示す。図 3 より防振ゴムタイプの防振セパ A,B を見ると Case5 (防振セパ B) は、Case2 (セパレータなし) と比較して若干高い位置に固有振動数 (25Hz) があり、35Hz 以上から振動遮断効果が得られる。一方、Case4 (防振セパ A) は、Case5 と同様に防振ゴムタイプであるが、44Hz に固有振動数が現れ、60Hz 以上から振動遮断効果が得られた。同図より防振ゴムタイプとは異なる防振機構の Case6 (防振セパ C) は固有振動数が Case2 と比較して若干高いが、ほぼ同程度の振動遮断効果であった。

以上の結果から、防振ゴムの仕様 (バネ定数 (硬度)) および防振機構によって固有振動数が異なり、振動遮断効果にも差異が生じることを確認した。

##### (3) 防振ゴム変形時の防振セパ B の振動遮断性能

締め込みによるゴム変形時の防振セパ B の振動遮断性能を図 4 示す。図 4 より、防振セパ B は、ゴムの変形量が大きくなるにつれて、固有振動数が高くなる傾向であり、振動遮断性能が低下することが示唆された。

#### 5.まとめ

本稿では、防振地中壁の一部を模擬した試験体を用い、型枠セパレータおよび各防振セパの振動遮断性能を比較した結果を示した。その結果から、型枠セパレータが防振地中壁の振動遮断性能を低下させる要因となることおよび防振セパの防振ゴム仕様および防振機構により振動遮断性能が異なることを確認した。また、施工時の防振セパ (防振ゴムタイプ) の取付け方次第では、適正な振動遮断性能が得られないことが分かった。

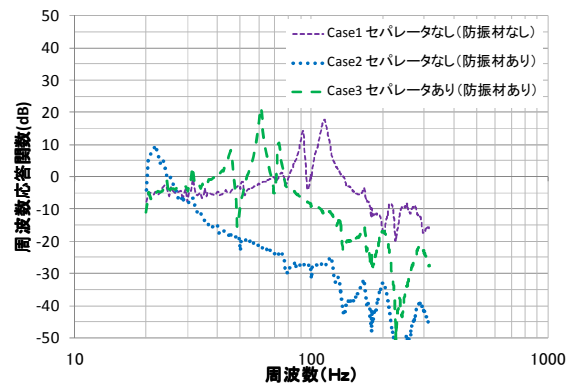


図 2 Case1~3 の振動遮断性能 (セパレータ有無の比較)

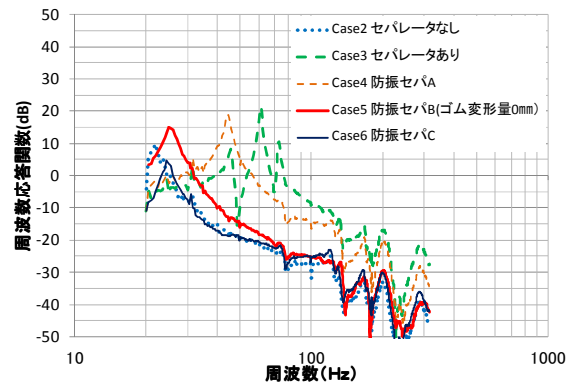


図 3 Case2~6 の振動遮断性能 (防振セパの比較)

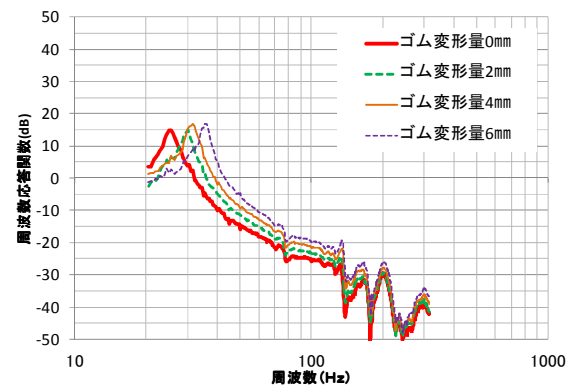


図 4 締め込みによる防振ゴム変形時の防振セパ B の振動遮断性能

注) 図 1 に示す試験体には、セパレータ位置にネジを切ったスリーブが埋め込まれており、条件に応じてセパレータおよび防振セパの取付けおよび取外しを可能にしている。

#### 【参考文献】

- 1) 南ら：鉄道に隣接した複合文化施設における地中防振壁による固体音対策 (その 2) 日本建築学会技術報告集(15), pp221-224, 2002.06
- 2) 鈴木ら：型枠防振セパレータユニットの開発 建築学会大会講演梗概集(東北), pp857-858, 2000.9

【謝辞】 本実験を実施するにあたり、サンプルをご提供いただいた防振セパおよび発泡材メーカー各社に深く感謝の意を表す。

\* 東急建設株式会社 技術研究所  
\*\*東急建設株式会社 技術研究所 博士 (工学)

\* Institute of Technology, Tokyuu Construction Co.,LTD.  
\*\* Institute of Technology, Tokyuu Construction Co., LTD , Dr.Eng

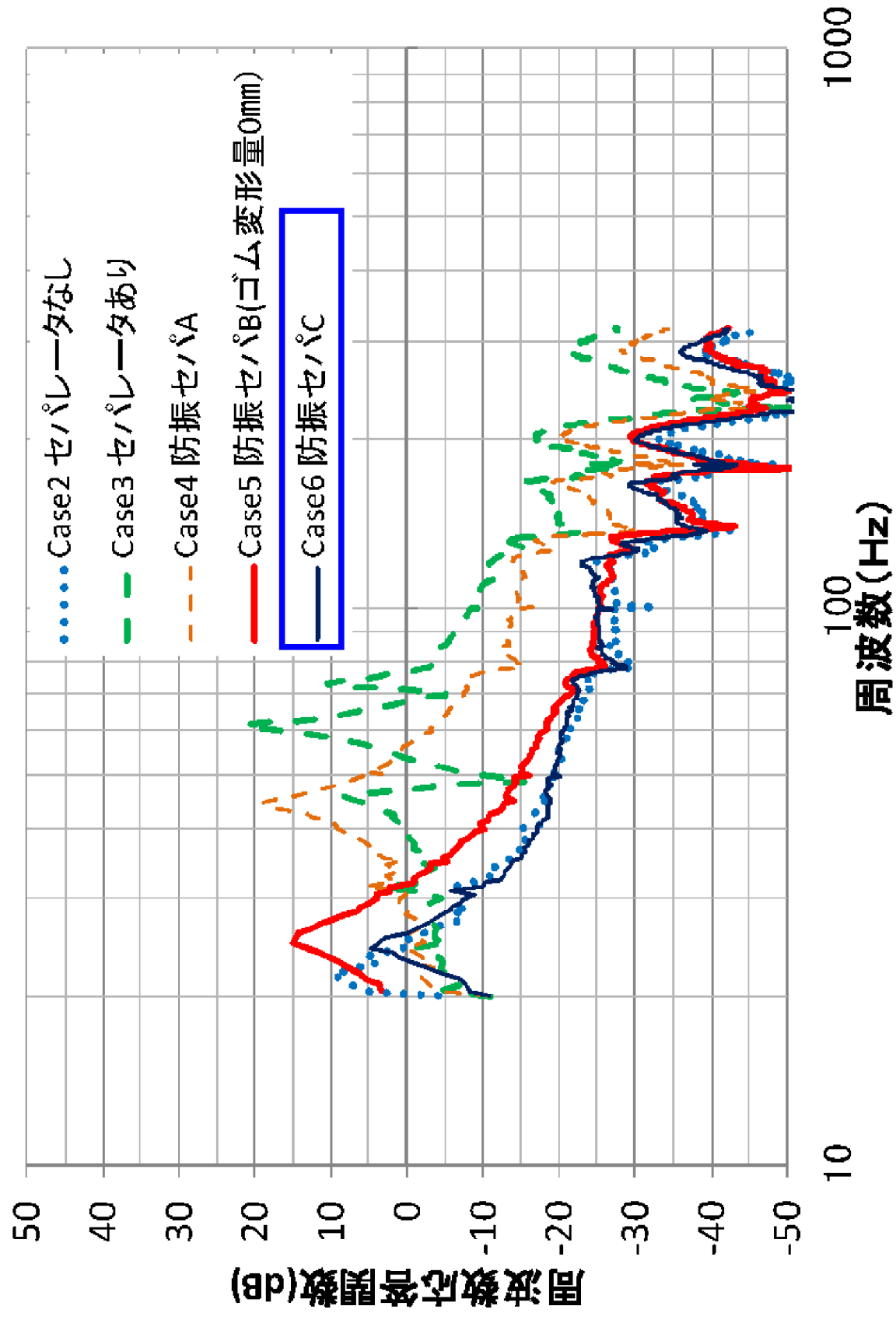


図3 Case2~6の振動遮断性能(防振セパの比較)