

地下鉄開削トンネルから発生する振動の 伝播性状に関する解析的検討

折原 佳帆¹・津野 究²・赤木 寛一³・古田 勝⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科修士課程 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: kaho@toki.waseda.jp

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: tsuno@rtri.or.jp

³フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: akagi@waseda.jp

⁴正会員 日本工営(株) 海外事業本部鉄道事業部 (〒102-8539 東京都千代田区麴町5-4)

E-mail: furuta-ms@n-koei.jp

地下鉄開削トンネルから伝播する列車走行時振動について、二次元FEMによる検討を行った。まず、地下鉄開削トンネルを対象に現場測定および二次元FEMによるシミュレーションを行い、両者が概ね対応することを確認した。そのうえで、均一地盤に設置された開削トンネルを対象に二次元FEMによるパラメトリックスタディを行い、地盤の剛性に相当するせん断波速度、ポアソン比、減衰に関する係数等が振動伝播性状に与える影響について調査するとともに、対数回帰式の係数やBornitzの計算式の内部減衰定数の傾向や範囲について把握した。さらに、トンネル構造に関する検討を行い、構築の部材厚さ、隅角部のハンチ、トンネル上部の埋戻し土の物性が振動伝播性状に及ぼす影響を把握した。

Key Words : ground vibration, subway, cut-and-cover tunnel, attenuation, 2-D FEM

1. はじめに

地下鉄に近接した建物においては、列車走行時の振動が伝播しこれに起因した固体音が知覚されることがある。地下鉄建設時の環境影響評価では、JIS C1510-1995に準じた体感振動の評価指標である振動レベルを予測するのが一般的であり、複数箇所の営業線の振動調査に基づき作成された経験回帰式である「予測式」が用いられている¹⁾²⁾。一方、コンサートホールや音楽スタジオ等の静寂が求められる建物が近接する場合には、建物内の固体音の予測・評価を実施し、対策が検討された事例もある³⁾。

建物内の固体音を予測したり、固体音に対する振動対策の効果を検討する場合は、振動レベルで扱う範囲より高い周波数まで、1/3 オクターブバンド分析による振動加速度レベル等の周波数特性を考慮した予測が必要となる。そこで津野ら⁴⁾⁵⁾は、シールドトンネルや開削トンネルを対象にトンネル内および地表部のデータを蓄積し、1/3 オクターブバンドごとに地盤中の減衰量を予測する手法を提案した。

この研究では、トンネルを線状の振動源と見なし、東京都およびその近郊の複数箇所の測定データから式(1)に示すBornitzの計算式⁶⁾中の内部減衰定数 α を1/3オクターブバンドごとに求め、周波数と α の関係を定式化している。式(1)は、振動源からの伝播距離に対する振動の減衰を内部減衰項と幾何減衰項に区分し、複数の測定箇所がある場合は回帰式により減衰の傾向を分析する方法に用いられ、本論文においてもこの考え方に依っている。

$$L_{VA}(f) - L_{VA0}(f) = -10 \log(R/R_0) - 8.68\alpha(R/R_0) \quad (1)$$

ただし、

$L_{VA}(f)$: 地表部における 1/3 オクターブバンド分析による中心周波数 f (Hz)の振動加速度レベル (Z方向) (dB)

$L_{VA0}(f)$: トンネル内基準点の 1/3 オクターブバンド分析による中心周波数 f (Hz)の振動加速度レベル(dB)

α : 内部減衰定数

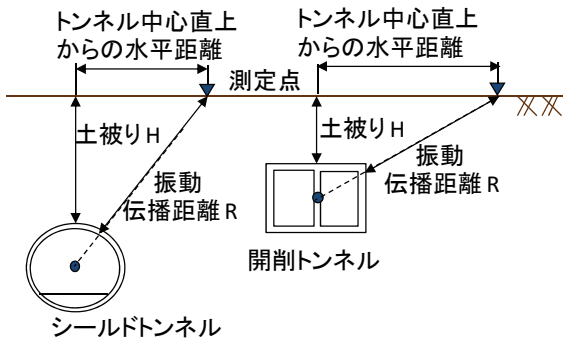


図-1 振動が地盤内を伝播する距離

- R : 振動伝播距離(m)
- R₀ : 振動源から基準点の距離, 1mと仮定

ここでは、シールドトンネルについては、アーチ部半径方向を、開削トンネルについては側壁下部鉛直方向をトンネル内の加速度の基準とし、地表部の振動と比較することで地盤中の減衰量を検討している。また、振動伝播距離Rを図-1のように定義している。これより、シールドトンネルについては式(2)が、開削トンネルについては式(3)が得られ、式(1)に示すBomitzの計算式と併用することにより、1/3オクターブバンドごとに地盤中の減衰を予測することが可能となっている。

$$\alpha = 0.001f - 0.06 \quad (2)$$

$$\alpha = 0.002f - 0.12 \quad (3)$$

ただし、 α : 内部減衰定数

f: 1/3 オクターブバンド中心周波数 (Hz)

また、断面形状が円形であるシールドトンネルについては、複数地点の現場測定データより、周波数が高くなるほど地盤内での振動の減衰が増加する傾向とともに、側壁部からアーチ部にかけて振動加速度レベルはほぼ同レベルであることが確認されている⁴⁾。一方、開削トンネルについては、断面形状が矩形であり下床板、上床板、側壁、中柱等複数の部材で構成されていることから、部位によって振動加速度レベルが異なるとともに、埋戻しの状況や残置された土留め壁が振動伝播に影響する可能性もある。しかしながら、現場測定例^{7)~9)}は見受けられるものの、構造や寸法が振動の伝播性状に及ぼす影響が十分把握されていないのが現状である。

そこで本研究では、既往の検討例^{10)~15)}で用いられている二次元FEMを用いて、開削トンネルの構造や埋戻し等の諸条件が列車走行時振動の伝播性状に及ぼす影響について検討することとした。まず、東京都内の開削トンネルを対象に振動測定を行い、二次元FEMによるシミュレーション結果と比較した。そのうえで、均一地盤に設

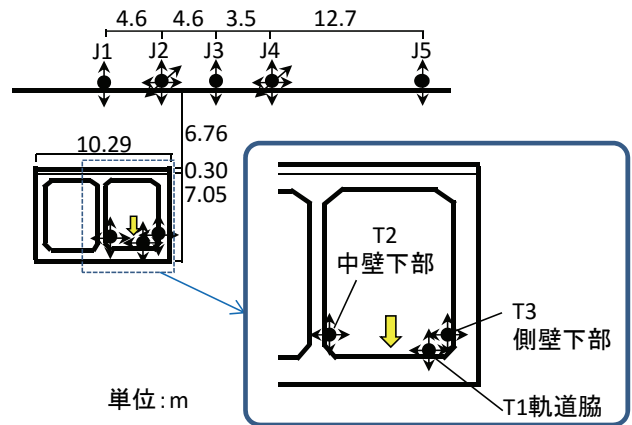


図-2 振動測定の概要

置された開削トンネルを想定して、上記の二次元FEMによるパラメトリックスタディを実施し、地盤条件等が振動伝播性状へ及ぼす影響を調査するとともに、開削トンネルの構造特性の影響についても検討を行った。

2. 現地測定と振動伝播FEMシミュレーション

東京都内の開削トンネルを対象に、トンネル内および地表部の列車走行時の振動加速度を測定した。一方、当該箇所を対象に二次元FEMによるシミュレーションを行い、測定結果と比較した。

(1) 測定概要

測定対象は、下部に洪積地盤が存在する沖積地盤に位置する1層2径間中壁構造の開削トンネルであり、土被りは7.1mである。軌道条件は、防振まくらぎを敷設した振動対策型軌道である。図-2に示すように、トンネル内に3測点(T1, T2, T3)、地表部に5測点(J1, J2, J3, J4, J5)を設け、トンネル内では線路直角水平方向(以下「Y方向」)および鉛直方向(以下「Z方向」)、地表部では主にZ方向の振動加速度を測定した。なお、測定は、幹線道路から離れたトンネルが民地下を通過する区間で実施しており、道路交通振動の影響を受けないよう配慮している。また、測定の際には暗振動の測定・分析も行っており、列車走行時の振動より十分小さいことを確認している。

振動加速度の測定は、圧電型加速度ピックアップにチャージアンプを内蔵した振動計を介してデータレコーダーを接続し、加速度をデータレコーダーに記録した。

測定データの分析は、1/3オクターブバンド分析器を用いて周波数分析を行い、データレコーダーから1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベル(ピークレベル値)を求めた。ここでは、1/3オクターブバンド分析器の時間応答特性を時定数0.63秒に設定し、列車通過中のデータを読みとっている。

(2) 解析概要

図-2に示す測定箇所を対象に、二次元FEMによるシミュレーションを行った。具体的な方法は、地下鉄シールドトンネルの解析事例¹⁵⁾を参考に、時間刻み1/2000秒、車両長20mの車両の2台車が通過に要する継続時間約1秒間の測定した時刻歴の振動加速度を用いて強制運動加振とする時刻歴応答解析とした。

図-3に解析モデルを示す。解析モデルは8節点アイソパラメトリック要素で構成し、節点間隔が25cm程度となるようにした。また、境界の反射の影響を低減させるため、モデルの側方は粘性境界とし、解析モデルの第4層以下の底部は、N値50以上の基盤層と想定し、モデル化の制約から伝播する波動の反射の上層部分への影響を少なくするため、側方と同様に粘性境界とした。なお、列車走行時の振動により発生する地盤のひずみは小さいことから、地盤物性の非線形性を考慮しないものとした。

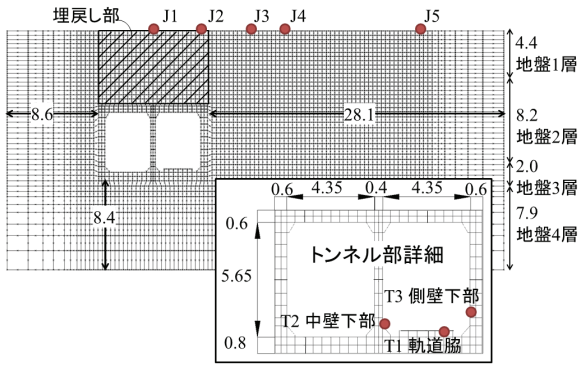


図-3 解析モデル (単位, m)

表-1 入力物性値

	せん断波速度 [m/s]	ポアソン比	単位体積重量 [kN/m ³]
トンネル	2500	0.167	23.4
地盤1層 GL-0~4.4m	121	0.498	18.5
地盤2層 GL-4.4~12.6m	130	0.496	17.3
地盤3層 GL-12.6~14.6m	222	0.488	18.2
地盤4層 GL-14.6~22.5m	350	0.475	20.1

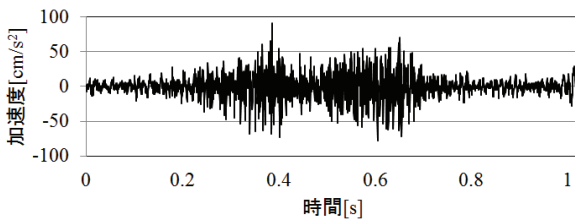


図-4 入力時刻歴加速度

加振点に時刻歴加速度を直接入力して時刻歴応答解析を行い、得られた時刻歴加速度をもとに1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルを求めた。ここでは、図-4に示す連結部を含んだ2台車通過分に相当する軌道脇Z方向の1.024秒間の時刻歴加速度を用いた。

地盤については、ボーリングデータをもとに、地盤を4層に分け、表-1に示す入力物性値を用いた。

解析ではレイリー減衰を用いているが、既往のシールドトンネルの解析例¹⁵⁾や開削トンネルの測定データの分析例⁹⁾をもとに、16~80Hzの範囲で減衰定数が4~5%となるように、レイリー減衰に規定する定数の α および β を $\alpha=8.432$ および $\beta=1.756 \times 10^4$ とした。また、トンネルについては、既往の例⁹⁾をもとに、 $\alpha=0.377$ および $\beta=1.582 \times 10^6$ とした。

解析結果については、5つの地表面測定点を含むトンネル中心直上およびこれより水平距離4.6m, 9.2m, 12.7m, 17.0m, 21.2mおよび25.4mの位置で時刻歴加速度を出力し、1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベルを求めている。

(3) 測定結果と解析結果の比較

トンネル内の中壁下部および側壁下部について、測定および解析より得られたZ方向の1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルを図-5に示す。これより、数dB程度の乖離があるものの、概ね対応していることが確認できる。

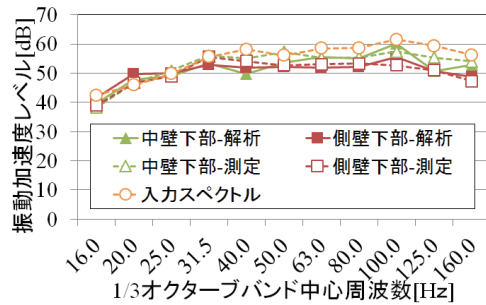


図-5 測定結果と解析結果の比較 (トンネル内, Z方向)

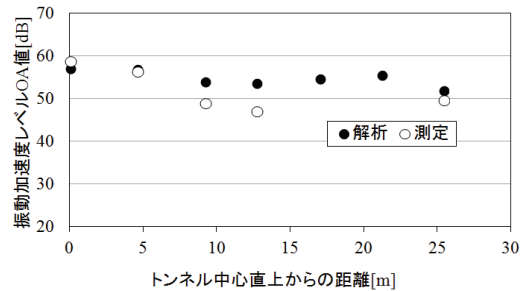


図-6 振動加速度レベルの分布 (Z方向)

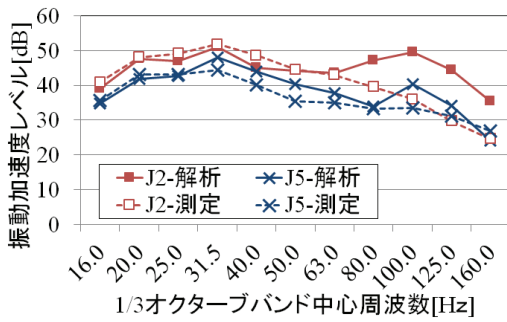


図-7 測定結果と解析結果の比較 (地表部, Z方向)

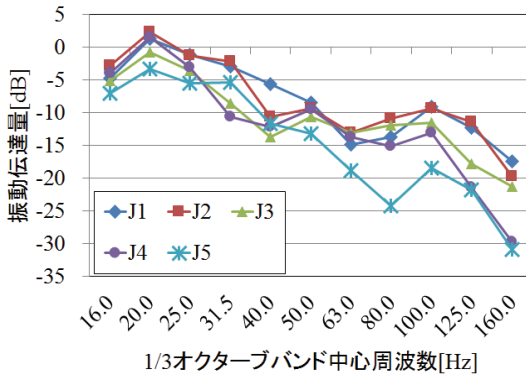


図-8 周波数と振動伝達量の関係

つぎに、解析および測定より得られた地表面測点に該当する地点等での振動加速度レベル（オーバーオール、16Hz～160Hz）を比較した結果を図-6に示す。これより、解析結果と測定結果は概ね対応していることが確認できる。図-7は、地表面測点J2およびJ5に相当する地点において、Z方向の1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルを比較した結果である。トンネルの上部に位置するJ2については、図-5のトンネル中壁下部の解析結果で100Hz付近の加速度レベルがやや大きくなっていることに対応して、80Hz以上の周波数域について解析結果が測定結果より大きくなっているが、63Hz以下では概ね対応している。一方、トンネルから離れたJ5については、解析結果と測定結果が概ね対応していることが確認できる。

以上のように、開削トンネル構造の影響によりトンネル上部等において高い周波数域で乖離が見られるものの、解析結果と測定結果は概ね対応することを確認した。

(4) 解析結果に基づく地盤中の振動減衰に関する検討

解析結果をもとに、地盤内における振動の減衰傾向を調査した。ここでは、トンネル内の加速度を基準とした時の地表部各測点のZ方向の相対的な1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベルを「振動伝達量」と定義し、これを地盤内の減衰と仮定して検討を行った。なお、軌道脇Z方向の1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベルをトンネルの加速度の基準値としている。

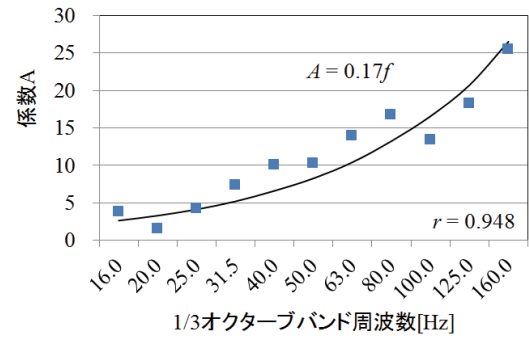


図-9 周波数と係数Aの関係

1/3オクターブバンド周波数ごとの振動伝達量をJ1からJ5の地表面測点に該当する地点について求めた結果を図-8に示す。これより、周波数によって差異があるが、トンネル中心直上から離れるほど振動伝達量が小さくなる傾向が見られる。また、周波数が高くなるほど振動伝達量が小さくなる傾向が確認でき、既往の測定例⁹⁾と対応していることが確認できた。

解析より得られた周波数と振動伝達量の関係をもとに、1/3オクターブバンドごとに最小二乗法を適用し、式(4)中の減衰に関する係数Aを求めた。なお、既存の分析事例⁴⁾では、環境影響評価の振動レベルの予測において振動の距離に対する減衰傾向を対数回帰式で表す事例があることから、周波数ごとに式(4)中の係数Aを算出している。そこで、本節でもこれと比較するために係数Aを算出しており、幾何減衰と内部減衰を含めた減衰係数である。ここでは、地表部の9.2m, 12.7m, 17.0m, 21.2mおよび25.4mの位置で解析結果を出力し、これを用いて係数Aを求めている。

$$L_{VA}(f) - L_{VA0}(f) = -A \log(R/R_0) \quad (4)$$

ただし、

$L_{VA}(f)$: 地表部における1/3オクターブバンド分析による中心周波数 f (Hz)の振動加速度レベル (Z方向) (dB)

$L_{VA0}(f)$: トンネル内基準点の1/3オクターブバンド分析による中心周波数 f (Hz)の振動加速度レベル (dB)

R : 振動伝播距離(m) (図-1)

R_0 : 振動源から基準点の距離 (=1m)

A : 減衰に関する係数

ここで、 R_0 の値は、既往の検討例⁴⁾⁵⁾と同様に1mと仮定した。

周波数と係数Aの関係を図-9に示す。これより、周波数が高くなるほど、Aの値は大きくなり、地盤内の減衰が大きくなる傾向が確認される。周波数 f と係数Aの関係

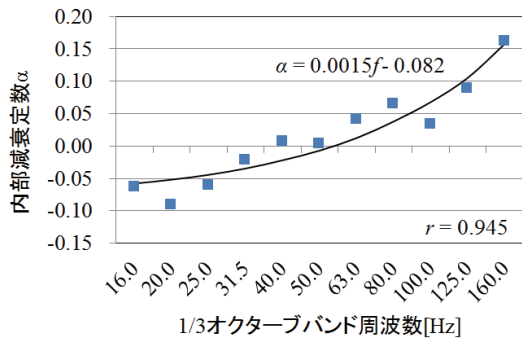


図-10 周波数と内部減衰係数 α の関係

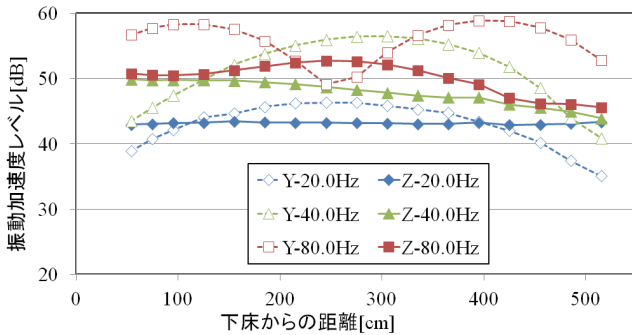


図-11 加振点側側壁の振動加速度レベルの分布

を回帰分析することにより得られた関係式を式(5)に示す。

$$A = 0.17f \quad (5)$$

現場測定をもとにした既往の研究⁹⁾では、式(6)が得られており、概ね対応した結果となっている。

$$A = 0.18f \quad (6)$$

次に、解析結果について、式(1)に示すBornitzの計算式⁹⁾中の内部減衰定数 α を1/3オクターブバンドごとに求め、周波数と α の関係を整理した結果を図-10に示す。これより、周波数が高くなるほど α の値が大きくなる傾向が見られる。

なお、波長が短い16~40Hzでは、 α の値が負となっているが、同様の傾向は現場測定でも確認されており⁹⁾、低い周波数成分が地表付近で増幅していることによるものと考えられる。

この内部減衰定数 α と周波数との関係についても、直線で回帰分析することにより、式(7)のように表すこととした。

$$\alpha = af - b \quad (7)$$

ただし、

a, b : 係数 (>0)

なお、図-9, 10には回帰式(5), (7)による関係曲線をそれぞれの相関係数と合わせて記入している。回帰分析で得られた係数 a および b は、それぞれ0.0015および0.082であり、既往の現地計測に基づく研究⁹⁾で得られた式(3)の0.002および0.12と比べて、若干小さな値となっている。これには、振動測定対象トンネルの地盤条件、構造形態、施工条件などが関係していることが想定される。そこで、以下の章では、均一な物性を有する地盤に設置された開削トンネルを想定し、上記のような諸条件が振動伝播特性に及ぼす影響について二次元FEMによるパラメトリックスタディを実施した。

3. 均一地盤に設置された開削トンネルからの振動伝播に関するFEMシミュレーション

(1) 解析概要

2で述べた開削トンネルと同じ構造および寸法の開削トンネルが均一な物性を有する地盤に設置された場合について、前章で妥当性を確認した二次元FEMプログラムを用いてシミュレーションを行った。なお、解析に用いた減衰に関する定数、入力時刻歴加速度等は2と同じ条件としている。

(2) 振動加速度レベルの分布

まず、開削トンネル構築内部と周辺地盤の振動伝播特性を把握するために、地盤の剛性に相当するせん断波速度を200m/s、ポアソン比を0.49、単位体積重量を18.0kN/m³の均一地盤を想定して解析した場合の振動加速度レベルの分布を整理した。ここで「振動伝播特性」とは、開削トンネル構築内部から周辺地盤を伝播する振動に関し、トンネル構築及び地盤の振動加速度の差異を比較し、その減衰の特性を指している。

a) トンネル側壁における振動分布

開削トンネル構築の側壁における振動加速度レベルの分布を図-11に示す。線路直角水平方向のY方向加速度については、20Hzおよび40Hzでは下床から300cm付近側壁中央の振動加速度レベルが大きく、80Hzでは下床下面から100cmおよび400cm付近の2箇所ピークが見られ、位置による差が見られた。一方、鉛直Z方向加速度については、Y方向と比べて位置による差が小さい結果となっている。シールドトンネルでは、側壁下部およびアーチ部で振動加速度レベルが概ね同じ結果が得られており⁹⁾、開削トンネルでは異なる分布になっていることがわかる。このように振動加速度分布が異なる要因としては、開削トンネルの断面形状が矩形であることから、円形断面のシールドトンネルと比べて構築内での振動伝播が部材の曲げ挙動等の影響を受けやすく、側壁では面外

方向となるY方向で構築内の位置による振動加速度レベルの差が大きくなっていることが考えられる。

b) 地盤中の振動加速度の分布

開削トンネル周辺地盤におけるZ方向の振動加速度レベルの周波数別の分布を表すコンターを図-12(a), (b), (c)に示す。図から振動の減衰傾向はトンネルからの距離に比例して単調減少するのでは無く、レベル分布に濃淡が生じていることがわかる。既往のシールドトンネルの解析例¹⁹⁾では、地中の振動加速度計の測定結果⁹⁾を対象としたシミュレーションを行っているが、同様な傾向を確認している。これより、周波数が高くなるにつれて帯状の縞模様の間隔が短くなり、振動の伝播性状に規則性が現れていることがわかる。また、地表部の振動加速度レベルの最大値はトンネル構築の加振点側の側壁上部付近に見られ、この近傍で振動が増幅している傾向が確認できる。振動は上床板から埋戻し部分に伝わるほか、側壁からY方向に伝わっており、トンネル構築内部の振動加速度の分布が地盤中の振動加速度分布に影響を及ぼしていると考えられる。

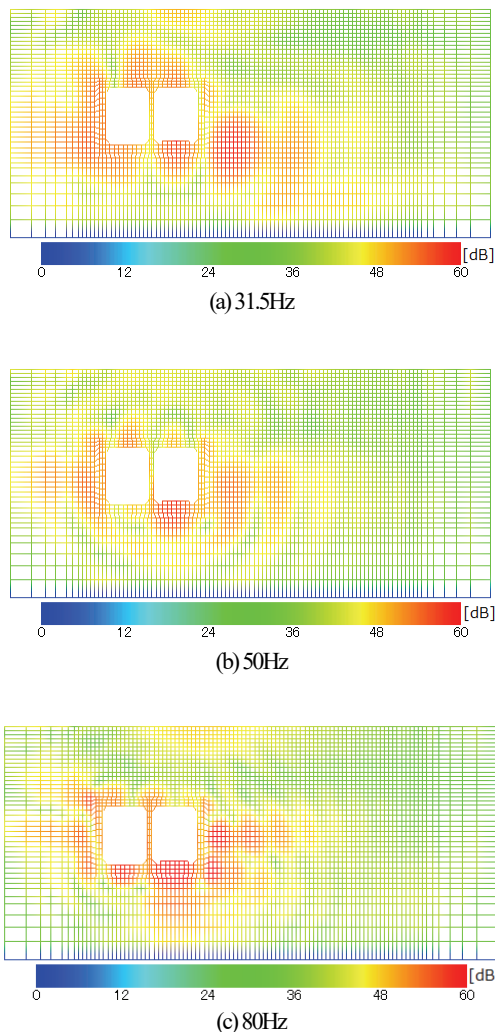


図-12 地盤中の振動加速度レベルの分布 (Z方向)

c) 地盤中の振動減衰

2(4)と同様の方法で求めた地表部の測点(J1~J5)に相当する地点について、1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルを求めた結果を図-13に示す。これより、周波数によって差異があるが、図-8と同様にトンネル中心直上から離れるほど振動加速度レベルが小さくなる傾向が見られる。

(3) 地盤条件を変えたパラメトリックスタディ

a) 地盤剛性の影響

ポアソン比を0.49, 単位体積重量を18.0kN/m³で固定したうえで、地盤剛性に相当するせん断波速度を100m/s~400m/sの範囲で変化させた均一地盤を想定して、シミュレーションを行った。地盤の減衰については、2と同じ条件としている。なお、2では地盤を基盤層を含めた4層でモデル化しているが、ここでは全層が均一地盤としている。トンネル近傍の地表部の測点J3に相当する地点における振動伝達量を図-14に示す。これより、せん断波速度の大きさに対する顕著な差は認められず、周波数が高くなるにつれ振動伝達量が小さくなる傾向が確認できた。また、80Hzの周波数域において、振動伝達量は剛性の増加とともに低下しているが、全体としては地盤剛性と振動伝達量に明確な相関は確認できなかった。

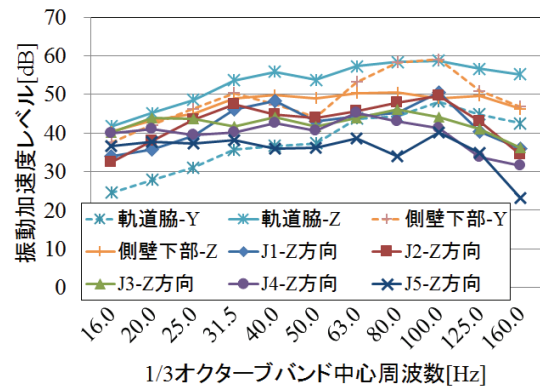


図-13 1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベル

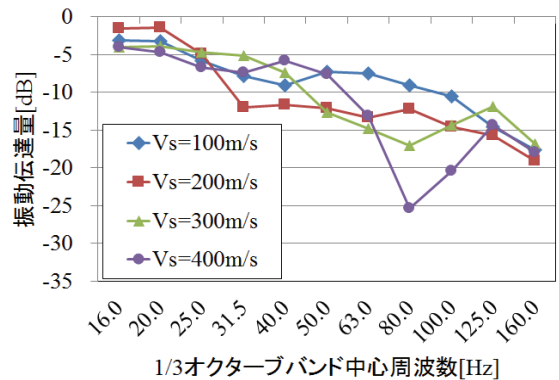


図-14 せん断波速度を変えた場合の減衰性状の比較 (J3)

表-2 係数Aおよび内部減衰定数に関する係数a, b
(せん断波速度を変えた検討)

せん断波速度 [m/s]	周波数と係数Aの 関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
100	$A=0.17f$	0.0012	0.062
200	$A=0.17f$	0.0013	0.055
300	$A=0.16f$	0.0011	0.052
400	$A=0.17f$	0.0014	0.070

表-3 解析ケース (減衰の影響)

	α	β
ケース1	6220	6.382×10^5
ケース2	7490	1.402×10^4
ケース3	8432	1.760×10^4
ケース4	9372	2.150×10^4
ケース5	9360	2.628×10^4

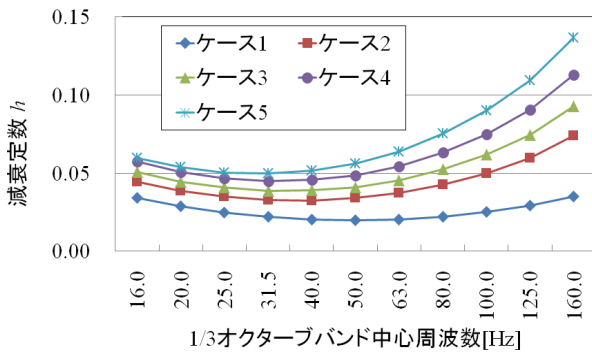


図-15 各ケースの周波数と減衰定数の関係

つぎに、2(4)と同様の方法で求めた係数Aおよび内部減衰定数に関する係数aおよびbを表-2に示す。これより、せん断波速度100~400m/sの範囲では、線形回帰して得られた係数Aは0.16f~0.17fの範囲であり、地盤剛性による大きな差異が見られなかった。この結果は、16~160Hzについて線形回帰を行って得たものであるが、図-14では40~100Hzで振動伝達量に差異が生じている一方、考慮した周波数範囲の両端にあたる16~25Hzおよび125~160Hz付近での差異が小さいことから、線形回帰して得られた係数Aにも差異が生じなかったものと考えられる。また、係数aおよびbについても、同様に地盤剛性による大きな差異が見られない結果となった。

b) 地盤減衰特性の影響

地盤減衰特性の違いが、振動伝播性状に及ぼす影響について検討した。ここでは、地盤のせん断波速度を200m/s、ポアソン比を0.49、単位体積重量を18.0kN/m³で固定し、表-3に示すように減衰特性を変えた5ケースについて解析を行い、結果を比較した。この場合の周波数と減衰定数の関係は図-15に示すとおりであり、ケース1からケース5の順に減衰定数は大きくなっている。前節と同様に、各ケースにおける地表部J3における振動伝達量を図-16に示す。これより、減衰定数が大きくなるほ

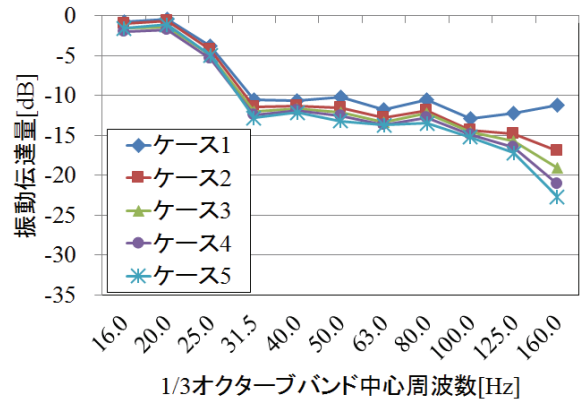


図-16 減衰の条件を変えた場合の減衰性状の比較 (J3)

表-4 係数Aおよび内部減衰定数に関する係数a, b
(減衰定数を変えた検討)

	周波数と係数Aの 関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
ケース1	$A=0.12f$	0.0007	0.052
ケース2	$A=0.16f$	0.0011	0.057
ケース3	$A=0.17f$	0.0013	0.055
ケース4	$A=0.19f$	0.0014	0.054
ケース5	$A=0.20f$	0.0016	0.059

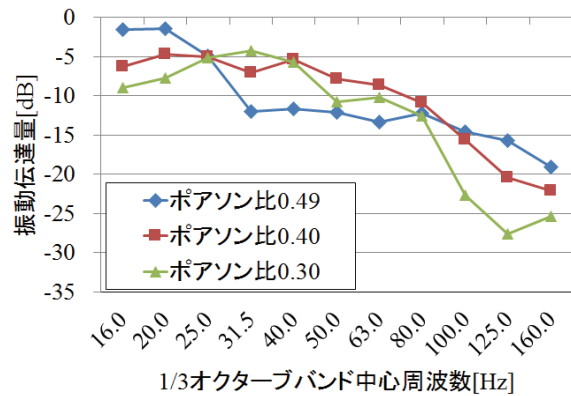


図-17 ポアソン比を変えた場合の減衰性状の比較 (J3)

ど振動伝達量が小さくなり、100Hz以上の高い周波数域でその傾向が顕著であることが確認できる。

つぎに、ケース1からケース5の各ケースについて求めた係数Aおよび内部減衰定数に関する係数aおよびbを表-4に示す。これより、減衰に関する係数が大きくなるほど、係数Aが大きくなるとともに、内部減衰定数に関する係数aが大きくなっていることが確認できる。

c) ポアソン比の影響

地盤材料のポアソン比が、振動伝播性状に及ぼす影響について検討した。ここでは、地盤のせん断波速度を200m/s、単位体積重量を18.0kN/m³で固定し、地盤材料のポアソン比を0.30、0.40および0.49とした場合の3ケースについて解析を行い、測点J3における振動伝達量を比較

した。地盤の減衰については、2と同じ条件としている。地表部J3における振動伝達量を図-17に示すとともに、地盤減衰に関する係数Aおよび内部減衰定数に関する係数aおよびbを表-5に示す。これより、ポアソン比が大きくなるほど係数Aが小さくなり、内部減衰定数に関する係数も小さくなっている。

ポアソン比は振動伝播時の地盤材料の体積変化特性に関係しているため、ポアソン比が0.5に近づいて体積変化量が小さくなるにつれて地盤減衰量も低下するものと考えられる。

d) 土被りの影響

測定箇所の土被りは7.1mであるが、土被りの違いが振動伝播に及ぼす影響を検討するため、これより土被りの小さい2ケースについて解析を行った。入力物性値等は前章2.(2)と同じである。結果を図-18に示すが、トンネル直上に位置するJ2地点では、25-40Hzの周波数域で土被りが小さいほど振動伝達量が大きい結果となっているのに対して、トンネル側方のJ3地点では、全周波数域で振動伝達量が概ね同じとなっている。

これらの振動伝播状況をもとに求めた係数Aおよび内部減衰定数に関する係数aおよびbを表-6に示す。これより、土被りが大きくなるほど係数Aが小さくなり、内部減衰定数に関する係数も小さくなっている。式(1)や式(4)では、土被りの影響を振動伝播距離で考慮しているが、土被りが大きいほど地表面の自由振動境界がトンネル構築から遠くなることにより、距離に応じた地盤減衰量が小さい結果となったものと考えられる。

4. トンネル構造諸元と施工条件が振動伝播特性に及ぼす影響

ここでは、地盤のせん断波速度を200m/s、ポアソン比を0.49、単位体積重量を18.0kN/m³とした均一地盤に設置された開削トンネルを対象に、トンネルの構造諸元や埋戻し材料の条件を変えた場合のシミュレーションを行った。なお、トンネルの土被りや減衰に関する定数、入力時刻歴加速度等は2と同じ条件としている。

(1) トンネルの構造諸元を変えた検討

a) 部材厚さの検討

トンネルの上床板、側壁および下床のすべての部材厚さを同じとし、30～100cmの範囲で変化をさせた場合の振動伝達量を比較した。

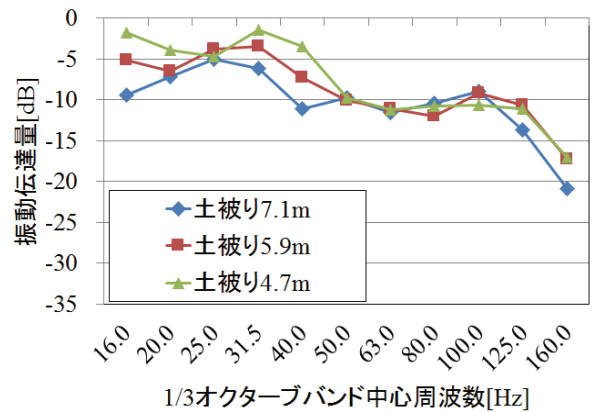
トンネル中心直上からの水平距離が9.2m (J3) および21.2mの地点について、周波数と振動伝達量の関係を図-19に示す。これより、部材が厚くなるにつれて振動伝

表-5 係数Aおよび内部減衰定数に関する係数a, b (ポアソン比を変えた検討)

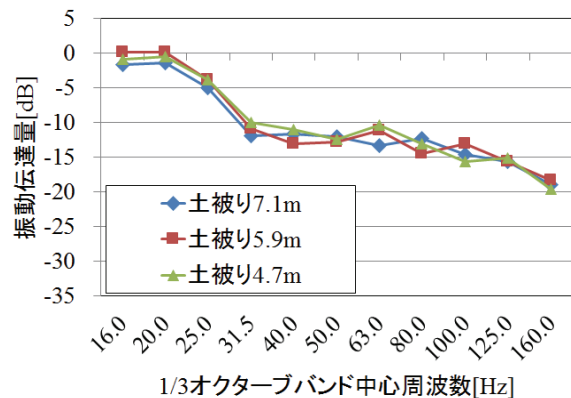
ポアソン比	周波数と係数Aの関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
0.30	A=0.21f	0.0020	0.083
0.40	A=0.19f	0.0016	0.079
0.49	A=0.17f	0.0013	0.055

表-6 係数Aおよび内部減衰定数に関する係数a, b (土被りを変えた検討)

土被り[m]	周波数と係数Aの関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
4.7	A=0.20f	0.0020	0.070
5.9	A=0.18f	0.0016	0.065
7.1	A=0.17f	0.0013	0.055



(a)J2

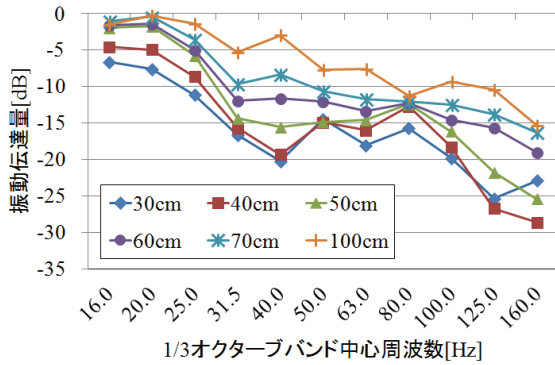


(b)J3

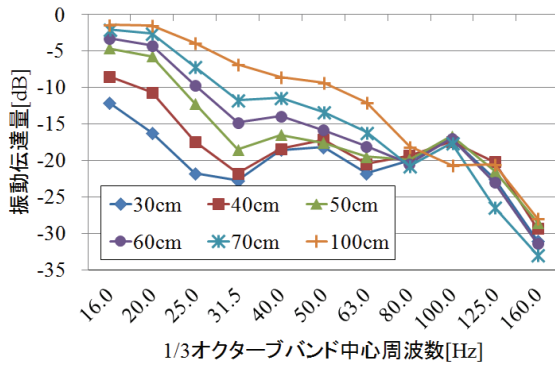
図-18 土被りを変えた場合の減衰性状の比較

達量が大きくなる傾向が見られる。部材が厚くなると、開削トンネルの曲げ剛性が増大することで、トンネル内の鉛直方向の振動が大きくなり、そのまま地盤へと伝わっていることによるものと推測される。また、トンネルとの離隔が大きい21.2m地点では、40Hz以下の周波数域で上記の傾向が顕著であり、80Hz以上の周波数域では部材厚さの影響が小さくなっている。

また、この結果をもとに求めた係数 A および内部減衰定数に関する係数 a および b を表-7 に示す。これより、部材が厚くなるほど、係数 A が小さくなる傾向が確認でき、内部減衰定数に関する係数も小さくなっている。



(a) 水平距離9.2m(J3)

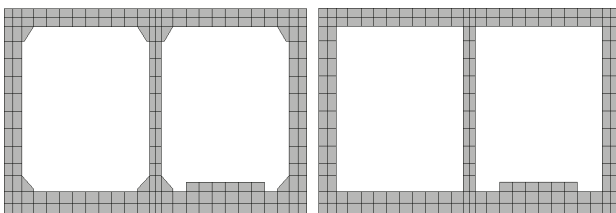


(b) 水平距離21.2m

図-19 部材厚さを変えた場合の減衰性状の比較

表-7 係数 A および内部減衰定数に関する係数 a, b (部材厚さを変えた検討)

部材厚さ[m]	周波数と係数 A の関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
0.3	$A=0.19f$	0.0008	-0.0150
0.4	$A=0.19f$	0.0011	0.0122
0.5	$A=0.18f$	0.0013	0.0428
0.6	$A=0.17f$	0.0013	0.0546
0.7	$A=0.16f$	0.0013	0.0691
1.0	$A=0.13f$	0.0013	0.0944



(a) ハンチあり

(b) ハンチなし

図-20 ハンチのモデル化

b) トンネル隅角部形状の影響

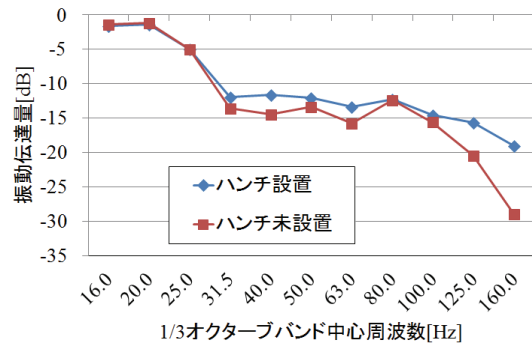
一般的に、開削トンネルでは、隅角部にハンチを設けるが、ハンチの有無が振動伝播に及ぼす影響について検討した。図-20には、ハンチを設置した場合と設置しない場合のトンネル断面モデルを示している。

トンネル中心直上からの水平距離が 9.2m (J3) および 21.2m の地点について、周波数と振動伝達量の関係を図-21 に示す。これより、ハンチを設置した場合のほうが、31.5Hz より高い周波数域で振動伝達量が若干大きくなっており、ハンチの有無が振動伝播特性に影響することがわかる。ハンチの設置により開削トンネルの曲げ剛性が増加し、特に高い周波数域ではその影響が出たものと推測される。

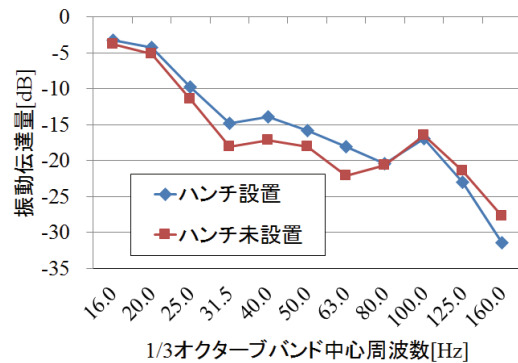
また、この場合の係数 A および内部減衰定数に関する係数 a および b を表-8 に示す。これより、ハンチを設置することにより係数 A や a が若干小さい値となっていることから、振動の内部減衰が小さい結果となっている。

表-8 係数 A および内部減衰定数に関する係数 a, b (隅角部のモデル化に関する比較)

隅角部のモデル化	周波数と係数 A の関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	B
ハンチあり	$A=0.17f$	0.0013	0.0546
ハンチなし	$A=0.19f$	0.0014	0.0527

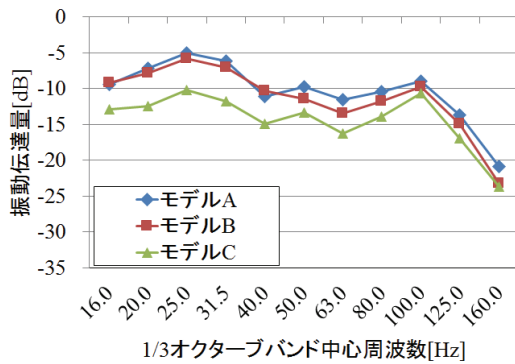


(a) 水平距離9.2m(J3)

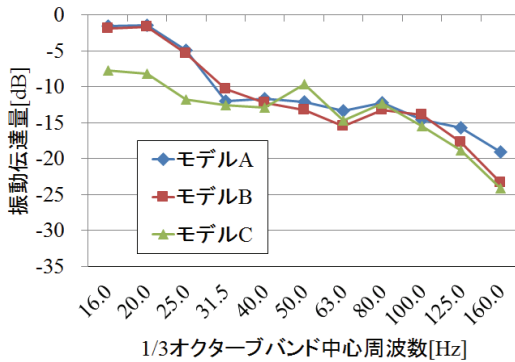


(b) 水平距離21.2m

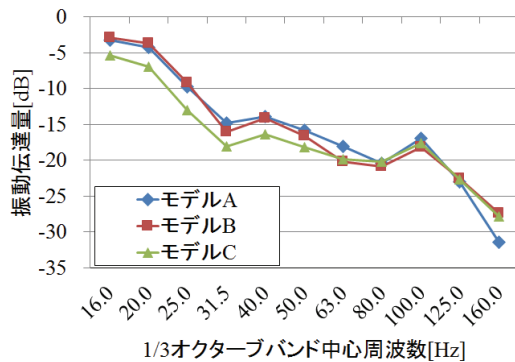
図-21 ハンチのモデル化の違いによる減衰性状の比較



(a) 水平距離4.6m (J2)



(b) 水平距離9.2m (J3)



(c) 水平距離21.2m

図-22 中柱・中壁構造の違いによる減衰性状の比較

c) 中柱・中壁構造に関する検討

1層2径間の開削トンネルでは、測定箇所のような中壁構造のほかにも中柱構造の場合があることから、中壁部分の剛性等が振動伝播性状に及ぼす影響について検討した。ここでは、これまで解析してきた中壁の場合（以下「モデルA」）のほか、中柱構造等で相対的な剛性が小さくなることを想定して中壁の厚さを1/2にしたモデル（以下「モデルB」）および中壁部分の要素を取り除いたモデル（以下「モデルC」）を作成して解析を行い、振動伝達量を比較した。

表-9 係数Aおよび内部減衰定数に関する係数a, b (中壁・中柱の構造に関する比較)

構造のモデル化	周波数と係数Aの関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
モデルA	$A=0.17f$	0.0013	0.0546
モデルB	$A=0.18f$	0.0014	0.0555
モデルC	$A=0.18f$	0.0011	0.0259

トンネル中心直上からの水平距離が4.6m (J2) , 9.2m (J3) および21.2mの地点について、周波数と振動伝達量の関係を図-22に示す。これより、モデルAとモデルBの間には顕著な差異は見られないが、中壁の要素を取り除いたモデルCについては、50-80Hz以下の周波数域でモデルA, B に比べ振動伝達量が小さい結果となっている。中壁の幅が1/2となる程度では振動伝播性状に大きな差異が出ないが、中壁の要素を取り除いた場合はトンネル中心直上付近に伝播する振動が小さくなり、全体的に振動伝達量が小さくなったものと考えられる。

また、この場合の係数Aおよび内部減衰定数に関する係数aおよびbを表-9に示す。これより、係数Aについては大きな差異は見られないが、内部減衰定数に関する係数aおよびbについては、モデルAおよびBは概ね同じ値であるが、モデルCでは値が小さくなっている。

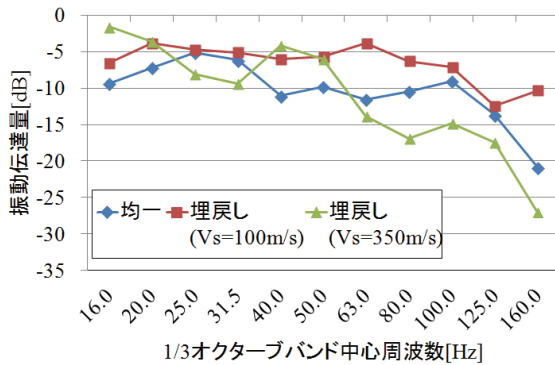
(2) 埋戻しの影響

開削トンネルでは、建設時の構築を施工した後に埋戻しを行うことから、埋戻し部分の物性値が振動伝播性状に及ぼす影響について検討した。ここでは、図-3に示した埋戻し範囲の材料の剛性に相当するせん断波速度を変えた場合の解析を行った。具体的には、埋戻し土の部分のせん断波速度が周辺の地盤より小さい100m/sの場合と、流動化処理土を用いた場合等でせん断波速度が周辺地盤より大きい350m/sの場合の解析を行い、埋戻し土のせん断波速度を地盤と同じ200m/sとした場合（均一地盤）の結果と比較した。なお、地盤の減衰に関する定数は埋戻し範囲の材料によって変わる可能性もあるが、ここでは埋戻し部分のせん断波速度の影響を把握するため、2と同じ値を用いて解析を行った。

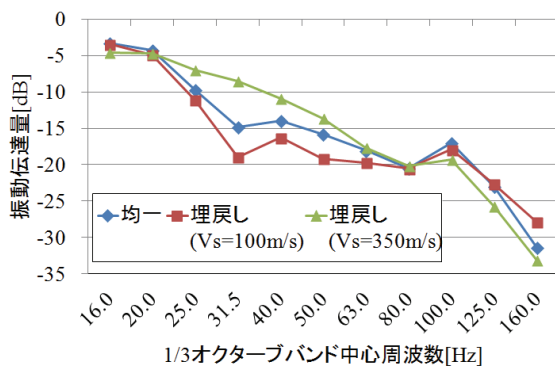
トンネル中心直上からの水平距離が4.6m (J2) および21.2mの地点について、周波数と振動伝達量の関係を図-23に示す。これより、トンネルに近いJ2地点では、埋戻しの範囲のせん断波速度が小さい場合、31.5Hz以上の周波数域で振動伝達量が大きくなり、せん断波速度が大きい場合には振動伝達量が小さくなっている。一方、トンネル中心直上から水平距離21.2mの位置では、25Hz～63Hzの範囲で、埋戻し材料のせん断波速度が大きいほど振動伝達量が大きくなっている。以上のように、埋戻し

し土の剛性に相当するせん断波速度の違いが振動伝播性に影響を及ぼすことがわかる。

また、この場合の係数Aおよび内部減衰定数に関する係数aおよびbを表-10に示す。これより、埋戻し範囲のせん断波速度が大きくなるほど係数Aはやや小さくなるが、内部減衰定数に関する係数は大きくなっており、埋戻し土の剛性に相当するせん断波速度の違いによる周波数依存性が異なる結果となっている。



(a) 水平距離4.6m (J2)



(b) 水平距離21.2m

図-23 埋戻し土のせん断波速度の違いによる減衰性状の比較

表-10 係数Aおよび内部減衰定数に関する係数a, b (埋戻し土の影響に関する比較)

埋戻し範囲のせん断波速度	周波数と係数Aの関係式	内部減衰定数に関する係数	
		a	b
100m/s	$A=0.19f$	0.0012	0.0228
200m/s	$A=0.17f$	0.0013	0.0546
350m/s	$A=0.17f$	0.0016	0.0853

5. まとめ

本論文では、開削トンネルから発生する列車走行時振動を対象として、二次元FEMによるシミュレーションを行い、地盤条件やトンネルの構造等が振動伝播性に及ぼす影響について検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 地下鉄開削トンネルを対象に現場測定および二次元FEMによるシミュレーションを行い、トンネル上部において高い周波数域で乖離が見られるものの、解析結果と測定結果は概ね対応することを確認した。また、解析結果より得られた周波数と対数回帰式の係数Aの関係は現地測定結果より得られた係数と概ね対応することを確認した。また、周波数と内部減衰定数 α を線形回帰した係数aおよびbは、現場測定より得られた値より若干小さい結果となった。
- 2) 均一地盤の解析より、トンネル側壁では、位置による水平線路直角方向の振動加速度レベルの差が見られ、側壁からアーチ部にかけて概ね同じレベルがあるシールドトンネルと異なる傾向を示すことを確認した。また、トンネル構築の振動加速度の分布が地盤中の振動加速度分布に影響を及ぼしていることや、地表部付近で増幅するなど、地盤中の振動伝播性状の特徴を把握した。
- 3) 地盤条件を変えた均一地盤の解析を行い、地盤中の振動伝達量、対数回帰式の係数Aおよび内部減衰定数 α を比較した。せん断波速度が100~400m/sの範囲では、振動伝達量に差異が見られるが、係数Aや内部減衰定数 α に関する係数aおよびbには大きな差異が見られなかった。また、土被り4.7~7.1mの範囲では、大きな差異が見られなかった。一方、減衰に関する定数が大きくなるほど振動伝達量が小さくなり、係数Aや内部減衰定数 α に関する係数のうちaについて、大きくなる傾向が確認できた。
- 4) トンネルの構造諸元を変えた検討を行い、トンネル構築の部材が厚くなるにつれて振動伝達量が大きくなり、係数Aや内部減衰定数 α に関する係数のうちbが小さくなる傾向を確認した。また、隅角部のハンチのモデル化の有無によって、振動伝達量に差異が生じることを確認したが、係数Aや内部減衰定数 α に関する係数には大きな差が出なかった。さらに、中壁の剛性を1/2としても大きな差がでないが、中壁が無い場合は振動伝達量が小さくなる結果となった。
- 5) 開削トンネル直上の埋戻し土の物性を変えた検討を行い、埋戻し土の物性が振動伝達量や内部減衰定数 α に関する係数に影響を及ぼすことを確認した。

参考文献

- 1) 東京都：都市高速鉄道第 12 号線新宿・練馬間建設事業環境影響評価書，資料編，pp.148-172, 1989.
- 2) 市東邦生：環境振動予測手法を用いた適用事例地下鉄振動，日本騒音制御工学会技術レポート，第 20 号，pp.20-26, 1997.
- 3) 池田覚：ホールにおける鉄道，地下鉄からの騒音，振動低減対策の考え方と対策事例，音響技術，Vol.21, No.3, pp.3-11, 1992.
- 4) 津野究，古田勝，藤井光治郎，長嶋文雄，日下部治：地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性，土木学会論文集，No.792/III-71，pp.185-197, 2005.
- 5) 津野究，古田勝，折原佳帆，赤木寛一：地下鉄開削トンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性，土木学会論文集 F1，Vol.70, No.3（特集号），pp.83-91, 2014.
- 6) Bornitz, G.: Über die Ausbreitung der von Grozklolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, *J. Springer*, 1931.
- 7) 田村重四郎，森地重暉，中村豊：地下鉄道の構築の振動測定，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 4 部，Vol.29, pp. 302-303, 1974.
- 8) 渡辺時男，中村繁之：地下鉄の騒音・振動，土木学会誌，Vol.60, No.3, pp.25-31, 1975.
- 9) 及川昭男：地下鉄トンネルの振動・騒音対策例，基礎工，Vol.3, No.6, pp.51-58, 1975.
- 10) 山本正明，池田俊雄，小長井一男：地下鉄道周辺の地盤振動に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 4 部，Vol.39, pp.213-214, 1984.
- 11) 吉原醇一，中村充，安井譲，縄岡好人，平野滋：地下鉄道の伝播性状に関する研究（その 1）地盤の振動伝搬性状について，大林組技術研究所報，No.42, pp.27-36, 1991.
- 12) Chua, K. H., Lo, K. W. and Balendra, T.: Building Response due to subway train traffic, *J. of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.11, pp.747-754, 1995.
- 13) 石崎伸次，矢田雅一，平松友孝：防振地下壁の防振効果予測に関する解析的研究，大成建設技術研究所報，No.31, pp.199-202, 1998.
- 14) 武居泰，藤井光治郎，伊積康彦，中井正一：トンネル近接建物への交通振動の伝搬特性に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 73 巻，第 627 号，pp.559-566, 2008.
- 15) 松本大輔，古田勝，津野究，長嶋文雄：地下鉄走行時振動の FEM 解析における要素寸法と精度に関する検討，鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail), pp. 553-556, 2006.

(2015. 3. 12 受付)

ANALYTICAL STUDY ON ATTENUATION PROPERTIES OF GROUND VIBRATION PROPAGATED FROM CUT-AND-COVER TUNNEL

Kaho ORIHARA, Kiwamu TSUNO, Hirokazu AKAGI and Masaru FURUTA

Attenuation properties of subway-induced ground vibration propagated from cut-and-cover tunnels are investigated based on two-dimensional FE analysis. The numerical calculation was verified by comparing the calculation results with the field measurement data obtained at a subway cut-and-cover tunnel. This paper discusses the influence of ground characteristics, such as soil shear wave velocity, Poisson's ratio and damping constants, on the attenuation properties based on parametric studies with a view from the magnitude range of coefficients in a logarithmic regression expression and Bornitz formula. The effect of the thickness of tunnel member, the structure of tunnel corner and the properties of backfilling material above the tunnel on the ground attenuation is also numerically investigated.