

建設振動の予測システムに関する研究

Study on Predicting Vibration during Construction Works

森田修二* 塚本耕治**
島津裕介*** 山田耕嗣****

要旨

近年、環境への配慮から低振動の建設機械の開発が進められている。一方、市街地の建設工事では周辺建物への振動の影響評価が必須となっており、施工計画の立案段階から振動低減対策を含め建設振動の評価が求められる。本報では、実務設計者が扱えるように入力データの作成から解析、解析結果の図化まで一連の操作で影響評価が行える振動予測システムを構築したので報告する。また、建設機械ごとの振動源データの収集を目的として計測と振動源データの逆解析を実施した結果もあわせて報告する。建設振動の予測精度を向上させるために加振力のデータ収集を目的として鋼矢板打設工事の振動解析を活用して予測精度の検証を行い一定の精度が得られることを確認した。この他、バックホウの自走振動やブレーカ掘削などの計測を行った結果も報告する。

キーワード：建設振動、逆解析、数値解析、薄層要素法

1. まえがき

近年、低振動の建設機械の開発が進められており一般の交通振動より建設振動が下回ることも少なくない。一方、市街地では環境への配慮から周辺建物への振動の影響評価が必須となっており、施工計画の立案段階から振動低減対策を含め建設振動の評価が求められる。現地の施工条件を考慮した振動評価には高度な数値解析が必要であり、実務設計者が実施するには課題があった。本報では、実務設計者が扱えるように入力データの作成から解析、解析結果の図化まで一連の操作で影響評価を行える振動予測システムを構築したので報告する。

また現在、各種の規準や参考文献に建設機械について振動レベルなどの参考値が示されているが、建設機械固有の加振力波形などのデータは示されておらず、現地の地盤条件を考慮した振動評価を行うことはできない。本報では、地盤条件を考慮し建設機械固有の加振力に基づいた振動評価により予測精度の向上を図るために振動計測と振動源データの逆解析を実施した結果を報告する。

2. 予測システム

地盤の振動解析に3次元の薄層要素法を用いて点加振あるいは線加振による地表面の応答変位を求める手法¹⁾を適用した。図-1に示すように、薄層要素法とは地盤を水平な成層地盤と仮定し、任意の層境界面上における2点間の加振力-応答変位を求めるものである。まず、

各層について円筒座標系における3次元波動方程式をガラキン重み付き残差法を用いて解き上下層境界面における応力と変位の関係を求める。次に層境界面での応力と変位の連続性を考慮して深さ方向には線形的に変化すると仮定して全体系に関する運動方程式を定式化する手法である。本手法は振動数領域の解析を行い振動数ごとの重ね合わせを行うものである。

図-2には振動計測のデータから振動源の加振力を逆解析する概念を示したものである。3次元の薄層要素法による地盤の振動解析から加振点と計測点における2点

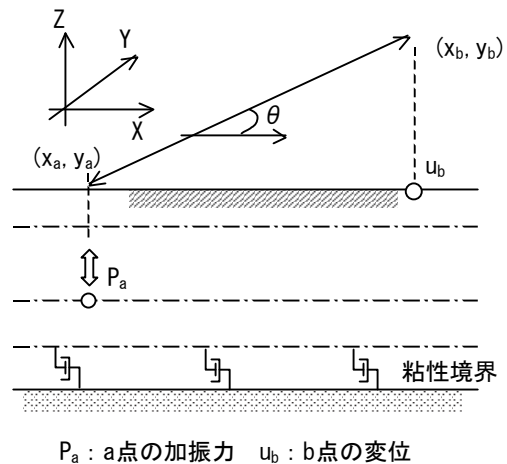


図-1 薄層要素法における地盤振動モデル

*技術本部東京土木技術部 **技術研究所 ***名古屋支店土木部 ****東京支社土木工務部

間の伝達関数を求める。加速度から求めたフーリエスペクトルと伝達関数から振動源のフーリエスペクトルを逆算し、さらに逆フーリエ変換することで加振力の波形を算定するものである²⁾。

図-3には入力データ作成から振動解析、解析結果の図化まで一貫して行える振動予測システムの全体構成を示した。入力データ作成にはCivil3DとNastranが利用できる。Civil3Dでは簡単に地盤条件など解析モデルが作成でき、杭や地中壁などの地中構造物、矩形形状やシェルで表される簡単な構造物のモデル化が行える。

Nastranでは任意形状のモデルが作成できる。メインコントロールWindowを中心に全ての操作を行い、逆解析による振動源の加振力波形の算定も一連の操作で行える。図-4には解析結果の図示の一例として振動レベルのコンターを示した。カラーコンターや3次元表示が可能である。

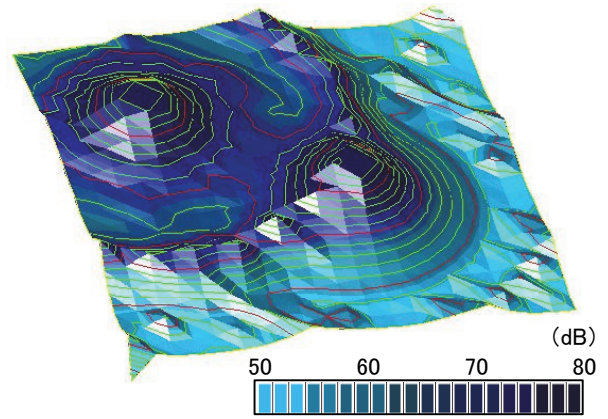


図-4 振動レベルのコンター表示例

3. バイブロハンマーによる鋼矢板打設

埼玉県南埼玉郡菖蒲町において鋼矢板（Ⅱ型 WIDE、L=9.5m）打設工事を行った。使用した建設機械は表-1の通りである。鋼矢板打設の試験工事として、各種の打設機械について振動計測を行った。図-5に示すように、矢板打設位置から離れた全3地点（50m、100m、150m）で地表面にピックアップ（リオン製 VM-53）を直接設置して振動の計測を行った。

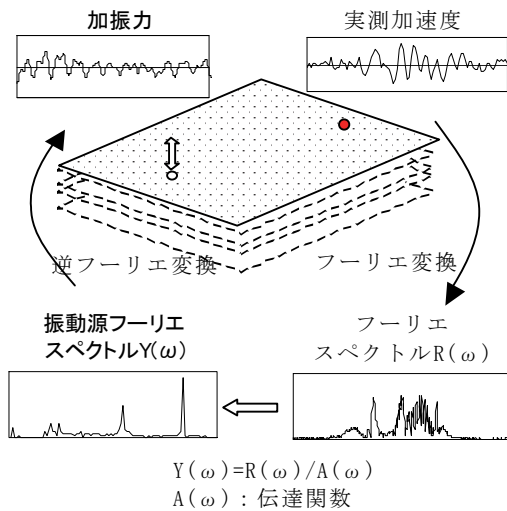


図-2 振動源の逆解析

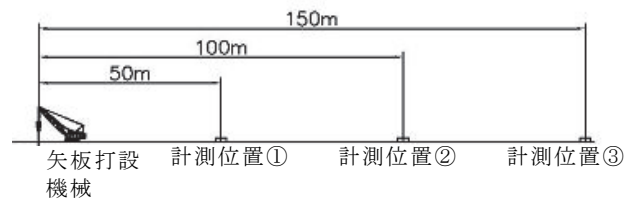


図-5 鋼矢板打設の測定状況

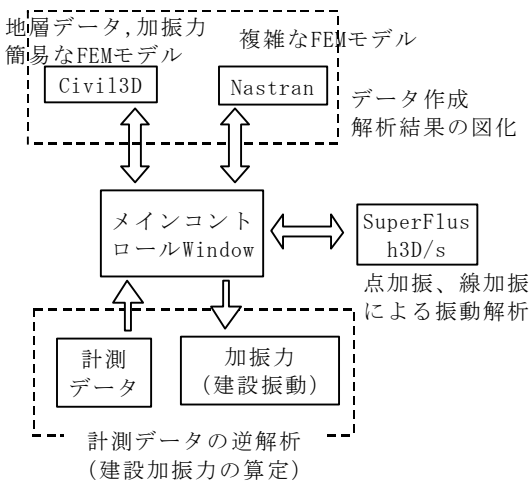


図-3 振動予測システムの全体構成

表-1 使用機械と型式

使用機械	型式
普通バイブロ	FM2-60
高周波型LSV	LSV-60
超高周波型	PALSONIC-20
サイレントパイラ (Sp)	EC100



写真-1 鋼矢板打設工事周辺の概況

写真-1に現地周辺の概況を示したが、平地が広がり振動ノイズの少ない測定に適した環境と考えられる。

図-6と図-7には鋼矢板打設位置から50mと100m地点での振動レベルの計測結果を示す。最大値は普通パイプロで63dB(50m)と57dB(100m)、高周波型LSVで64dB(50m)と56dB(100m)、超高周波型で48dB(50m)と42dB(100m)、サイレントパイラ(Sp)で42dB(50m)と35dB(100m)となった。各打設機械ともに50mから100mで6dB～8dBの距離減衰が見られた。表-2には現地の地質状況を示す。GL-8m近辺ではN値=35の洪積砂層に到達するが、普通パイプロや高周波型で50dB～60dBに振動レベルが上昇している部分がこれに該当する。一方、超高周波型やSpでは土質の違いによる影響はあまり見られない。地盤の振動解析で50m地点の加速度の計測値から振動源の加振力を逆解析することを試みた。なお、弾性波速度はN値と土質から次式で推定した。

$$V_s = 100N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 25) \quad (1)$$

$$V_s = 80N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 50) \quad (2)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (3)$$

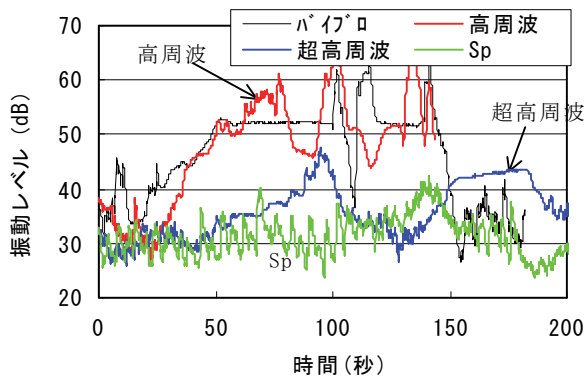


図-6 鋼矢板打設による振動レベル(50m)

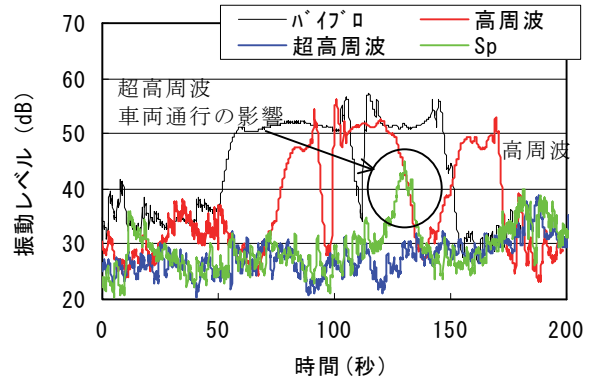


図-7 鋼矢板打設による振動レベル(100m)

図-8～図-15には、使用機械ごとに逆解析によって求められた100m地点の加速度の波形とスペクトルを示した。図-8の普通パイプロの100m地点における振動加速度では加速度振幅が計測では1.0～1.5Galであり、解析の方がやや小さくなっているが、図-9のスペクトルでは振動数ごとの特性はよく一致しており、一定の再現はできている。

図-10の高周波型LSVの結果は、普通パイプロと同様に加速度振幅は解析結果の方がやや小さくなっている。

図-11のスペクトルでは15Hz～25Hzの振幅が大きくなっているなど計測と解析でよく一致している。特に普通パイプロと比較して振動数ごとの特性の違いがよく再現できている。

表-2 地盤物性値(菖蒲)

深度(m)	地層	N値	単位体積重量(kN/m ³)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	減衰係数(%)
0～-1.4	盛土	4	13	159	389	1
～-3.5	沖積粘性土	0	13	100	245	
～-5.0	沖積粘性土	3	16.5	144	353	
～-6.1	沖積砂	18	18	210	416	
～-7.6	洪積粘性土	22	17	280	686	
～-8.4	洪積砂	35	18	262	519	
～-10.7	洪積粘性土	10	17	215	528	
～-25.0	洪積砂	50	20	295	585	

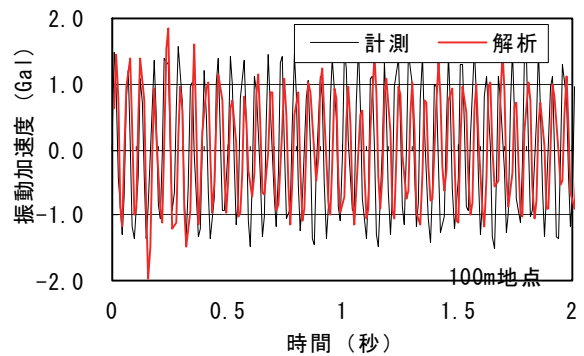


図-8 普通パイプロの振動加速度

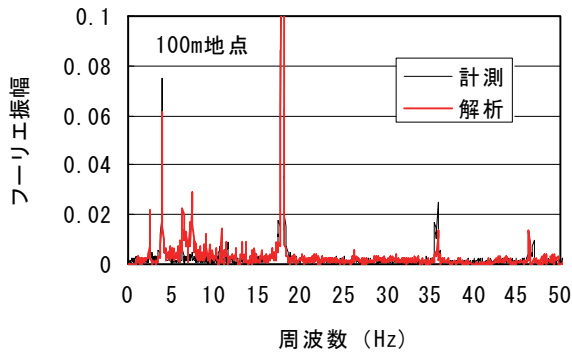


図-9 普通パイプの加速度スペクトル

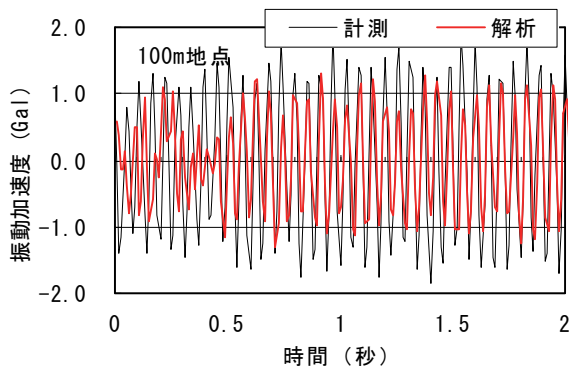


図-10 高周波型LSVの振動加速度

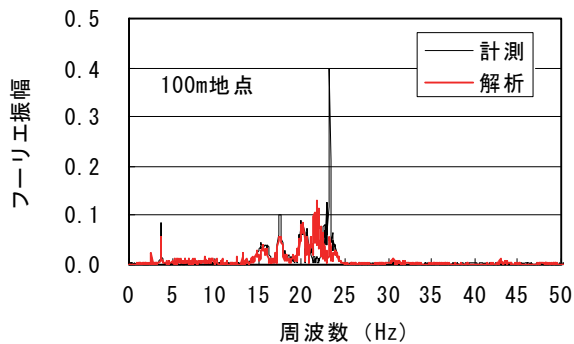


図-11 高周波型LSVの加速度スペクトル

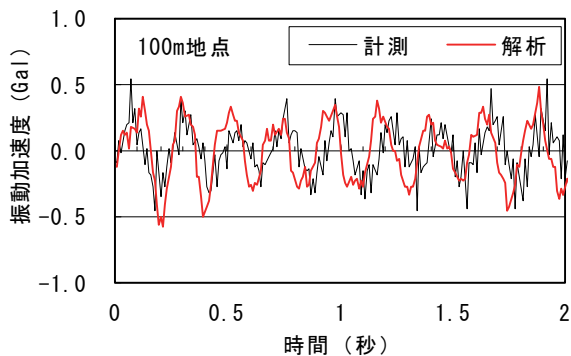


図-12 超高周波型の振動加速度

図-12、図-13の超高周波型の加速度は普通パイプロや高周波型LSVと大きく特徴が異なっており、解析でも特徴の違いがよく再現されている。スペクトルでは5Hz付近にもピークがあるが、41Hzに大きなピークがあり、超高周波型の特徴が現れている。

図-14、図-15のSpの結果では、高い振動数の波は見られないが、4Hz程度の波が超高周波と類似している。スペクトルではその特性が明確に現れている。

図-16には各施工機械の振動加速度レベルの距離減衰を示した。解析結果を実線で計測値をマークで示した。計測値と解析値ともに高周波型LSV、普通パイプロ、

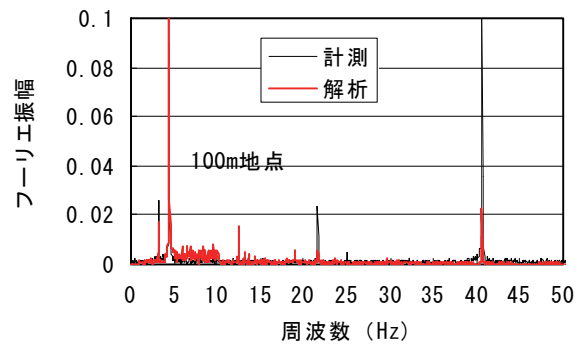


図-13 超高周波型の加速度スペクトル

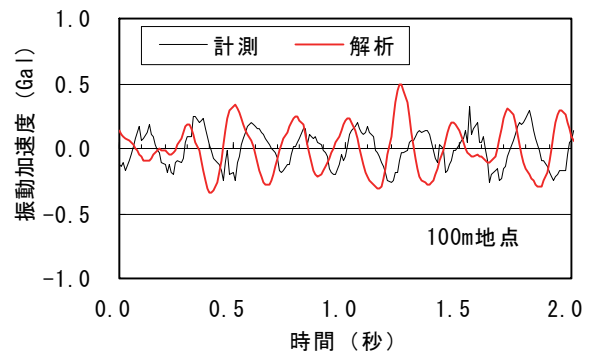


図-14 Spの振動加速度

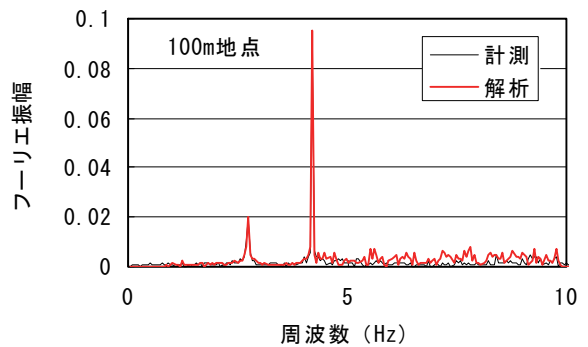


図-15 Spの加速度スペクトル

超高周波型、Sp の順となっている。高周波型 LSV が普通パイプロより大きな振動レベルとなっている。図-6 にも見られるように平均的には高周波型の方が小さいと考えられるが、最大値で整理すると図-16 のような結果となった。50m 地点は逆解析の本データであるので一致するのは自明であるが、100m 地点においてもいずれの打設機械についてもよく一致しているのがわかる。

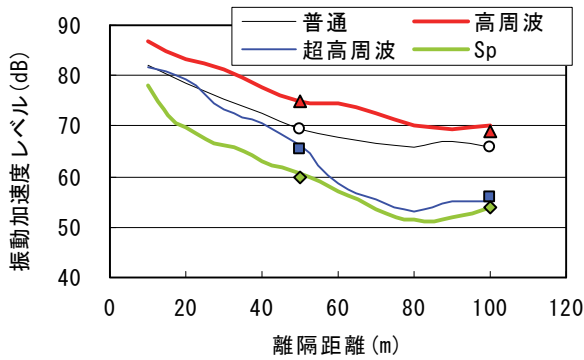


図-16 振動加速度レベルの減衰

4. バックホウ走行時の振動

浦和市における土地造成現場でバックホウ (0.7m³) 走行時の振動測定を行った。図-17 には走行方向と計測点の位置関係を示した。計測点と同一軸方向に10m 区間を片道約 10 秒で走行させた場合の振動測定を行った。表-3 に地盤物性値を示す。

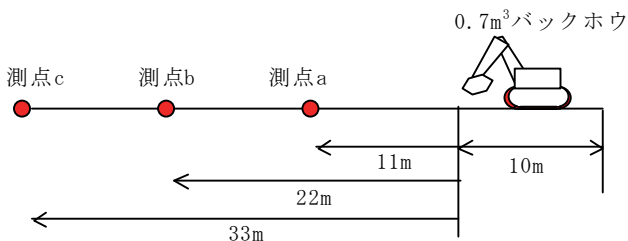


図-17 バックホウ走行時の測定状況

表-3 地盤物性値 (浦和)

深度 (m)	地層	N値	単位体積重量 (kN/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	減衰係数 (%)
0~-1.7	盛土	6	18	145	289	2
~-2.7	シルト質粘土	3	16	144	353	
~-6.7	粘土質シルト	1	16	100	245	
~-7.25	シルト混り細砂	13	16	235	576	
~-14.25	細砂	20	18	217	431	
~-15.46	粘土質シルト	1	16	100	245	

図-18 には振動レベルの測定結果を示した。片道約 10 秒で連続して3往復させた結果を示している。前進と後退の切替え時に振動レベルがやや低下するが、進行方向による振動レベルの差は最大で約 5 dB であり、測点による差は 11m 地点で約 3 dB ほど他の測点に比べて大きい。22m 地点と 33m 地点の差はほとんど見られず、距離減衰の特徴と考えられる。

逆解析では 11m 地点の振動加速度を元に 22m 地点の加速度波形とフーリエスペクトルの結果を比較した。解析では、バックホウの振動源を走行区間の中心における点加振と仮定した。

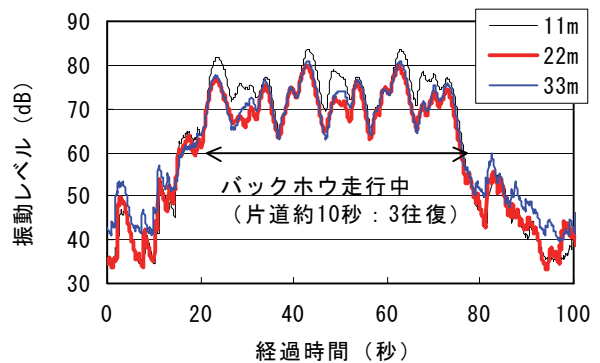


図-18 バックホウ走行時の振動レベル

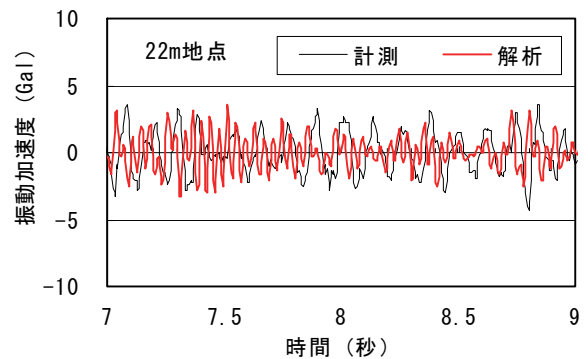


図-19 バックホウの振動加速度

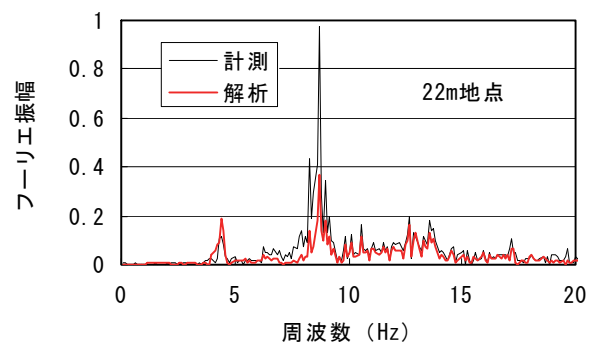


図-20 バックホウの加速度スペクトル

図-19の加速度波形では振幅が増減する推移が一定再現されているが、計測と解析の差異は先のパイプロの結果と比較すると大きいと言える。

図-20のフーリエスペクトルにおいては、8Hz～9Hzの振幅に差異が見られるが、その他の振動数では概ね一定再現されている。以上の結果から、先のパイプロと比較して計測値と一致しない点が多く、振動源の移動を評価した解析が必要と推測される。

5. ブレーカ掘削による振動

トンネル内におけるブレーカ掘削（ベースマシン0.8m³）による振動測定を行った。図-21に示すトンネル下半のブレーカ掘削において、深度33mのトンネル軸方向に30m離れた地表面の2測点（軸直角方向に5m）で振動測定を行った。表-4には岩盤の物性値を示す。

図-21の測点①の加速度を元に逆解析を行い、測点②における振動加速度を図-22に示した。加速度波形では部分的な振幅の差異はあるものの全体的な振幅の強弱はよく再現されていると考えられる。

図-23には測点②のスペクトルを示した。解析結果では20Hz～30Hzにピークがあるが、計測では15Hz～35Hzに広がっている。その他の周波数では比較的良好一致している。測点①と測点②では加振点からの位置関係がほぼ同等であり、解析結果もほぼ同じ結果となっている。一方、計測では測点②は測点①と異なるスペクトルを示している。結果的に測点②では計測と解析に加速

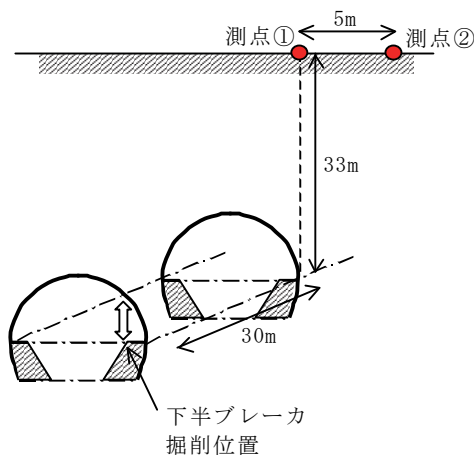


図-21 トンネルのブレーカ掘削と振動測定

表-4 地盤物性値（トンネル）

深度(m)	地層	N値	単位体積重量(kN/m ³)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	減衰係数(%)
0～50	砂岩	50	25	295	551	2

度波形では見られない差異があり、地盤状況などさらに詳細な検討が課題と言える。

6. あとがき

本報では、今回作成した振動予測システムの概要を紹介し、建設振動の予測精度を向上させるために加振力のデータ収集を目的として実施した数種の建設機械による振動計測と予測解析の結果を示した。複数のポイントで計測することで、逆解析の元データ以外に予測解析結果の検証を行い一定の精度が得られることを確認した。今後もデータ収集を継続しデータベース化を図るとともに加振力の予測精度について検証する予定である。

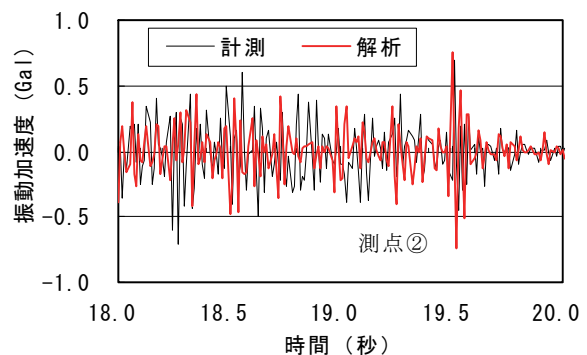


図-22 ブレーカの振動加速度

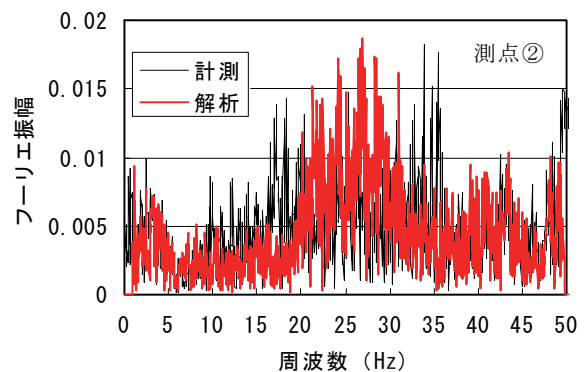


図-23 ブレーカの加速度スペクトル

【参考文献】

- 1) 神田 仁、石井啓稔、吉岡 修、平川泰行、川村淳一、西村忠典、「起機実験および数値解析によるPC 柱列壁の防振性能」物理探査、Vol. 58、No. 4、pp. 377-389、2005
- 2) 早川 清、原文人、植野修昌、西村忠典、庄司正弘、「鋼矢板壁による地盤振動の遮断効果と増幅現象の解明」土木学会論文集F、Vol. 62、No. 3、pp. 492-501、2006