

工事振動対策の検討方法と対応事例

Evaluation of Prevention Effect of Ground Vibration due to Construction Works

小原 隆志 岡本 道孝

要 約

都市部などの建設工事では、重機作業によって発生する地盤振動への対策を検討する必要がある。振動対策工には様々な既往技術が存在しているものの、個別の現場条件に対する対策効果や適用性について判断が難しい場合があり、対策検討に資する知見の蓄積・整理が重要である。本報では、まず地盤振動対策の検討方法について整理するとともに、振動予測に用いる重機作業の起振力の分析結果について述べる。次いで、当該検討手法を実際の建設現場における振動対策工の設計に適用し、各種対策効果を定量的に評価した事例を紹介する。さらに、適用先の一つでは、対策工施工前後の振動計測によって対策効果に関する実測データを取得し、検討手法の妥当性を検証した。

目 次

- I. はじめに
- II. 軟弱地盤における振動伝搬の特徴
- III. 地盤振動対策の種類
- IV. 対策工の検討方法
- V. 重機振動の起振力の評価
- VI. 振動源対策の検討事例
- VII. 伝搬経路対策の検討事例
- VIII. おわりに

I. はじめに

建設工事では周辺環境への配慮から工事振動対策が必要になる場合がある。振動源には種々の要因が挙げられるが、ダンプトラックやバックホウなどの重機作業がその代表例である。走行速度や作業形態の制限によってある程度の振動低減は可能だが、更なる低減が求められた場合、振動源や伝播経路での対策が必要となる。

振動対策には様々な材料や工法が提案されているが、その中には効果や適用範囲が必ずしも明確でないものも多く、適用性の判断が難しい場合がある。地盤振動の性質はサイト毎の地盤構造や地形に依存することに加え、振動源が重機作業の場合、起振力の大きさや周波数が重機種類や作業形態により様々である。このため、振動対策の検討には、地盤や振動源などの現場条件を適確に反映させた振動評価手法が必要である。

一方、条件設定の自由度が高い数値解析は振動対策の検討にも有効と考えられるが、工事振動を対象にした対策の検討例は多くない。このため、数値解析を用いた対策工の検討過程や効果に関する知見を蓄積・整理することは、個別の対策を検討する上での基礎資料と

して有用と考えられる。

本報では、まず工事振動対策の原理や考え方、対策工の効果予測手法について整理した後に、工事振動評価に用いる重機作業の起振力特性の評価実験と、その起振力データに基づいた実際の建設現場における振動対策工の検討事例と対策効果の確認結果を紹介する。

II. 軟弱地盤における振動伝搬の特徴

軟弱地盤における振動伝搬の特徴の確認を目的として、Fig.1 に示す簡易な弾性2層地盤モデルの振動解析を実施した。モデル地表面に一定振幅の起振力を作用させ、周辺地盤の地表面応答を薄層要素法による周波数応答解析で評価した。この解析では比較的硬質な第2層の上位に厚さ5mの軟弱層が分布している地盤とし、軟弱層のS波速度(V_s)が100m/sと200m/sのそれぞれの場合について検討した(Table 1)。Fig.2に各応答点の鉛直変位応答を入力値で除した振動伝搬特性を示す。表層が軟らかい前者の方が、振幅が増幅しやすく、かつ比較的低い周波数の振動が卓越することが分かる。また、地盤振動の低周波化は、軟弱層厚が大きく、軟らかいほど顕著になる。軟弱地盤の卓越周波数は木造家屋の共振周波数(概ね3~7Hzの範囲¹⁾)に近いこともあり、軟弱地盤で振動問題が生じやすい理由と考えられる。低周波振動は減衰性が低いことや、波長が長く地盤深部を伝搬する性質があるため、一般に振動抑制が難しいとされているが、低周波振動の低減が対策選定の着眼点の一つになる。

III. 地盤振動対策の種類

地盤振動対策はFig.3に示すように分類されている²⁾。建設工事の振動対策において、工事敷地外の受信部で対策を施すことは稀なため、以下では振動源対策と伝搬経路対策について概説する。

キーワード: 環境振動, 振動対策, 重機振動, 振動解析, 振動計測

Keywords: environmental vibration, prevention of ground vibration, machinery vibration, vibration analysis, vibration measurement

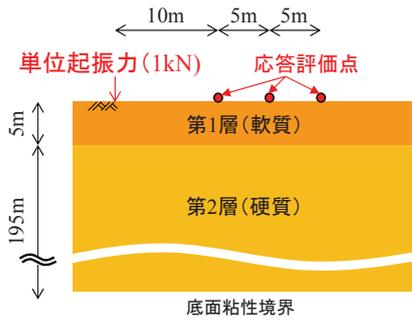


Fig.1 軟弱地盤の簡易振動解析モデル
(Model of Soft Ground for Numerical Analyses)

Table 1 解析地盤物性
(Dynamic Ground Properties)

	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (kg/m^3)	ポアソン比 ν	減衰定数 h
第1層	100 or 200	1500	0.45	0.02
第2層	300	1500	0.45	0.02

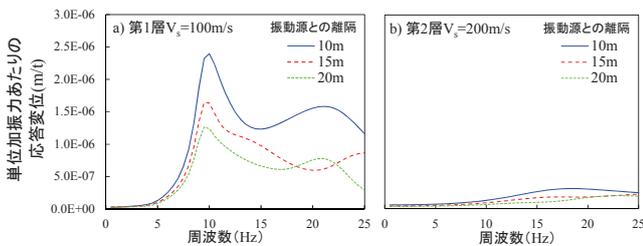


Fig.2 解析結果 (地表面応答変位/入力)
(Response Displacement Spectrum)

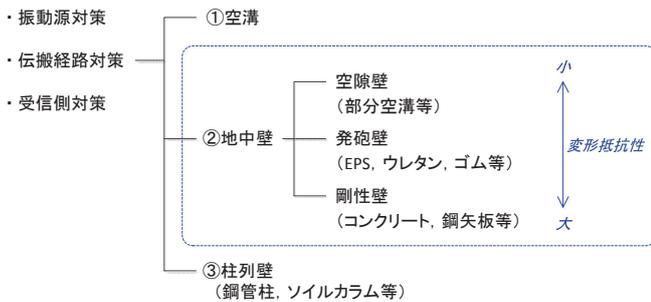


Fig.3 振動対策の分類 (参考文献²⁾ に加筆
(Countermeasures for Ground Vibration)

振動源対策は、振動をその発生源周辺で低減する対策である。重機の出力制限や作業制限などのソフト対策によって起振力そのものを小さくすることが一般的に行われるが、振動源の基礎地盤を堅固に改良し周辺地盤への振動伝搬を低減する方法もある。

伝搬経路対策は、振動源と受振部間の地盤中に構築物を設置し、振動を遮断する対策である。Fig.3 に示すように、遮振壁には多岐にわたる既往技術が存在し、使用材料も多様である。ここで、遮振壁の振動低減性能は、Fig.4 に示す 1 次元多層モデルにおける波動透過理論から次式で概略的に評価できる²⁾。

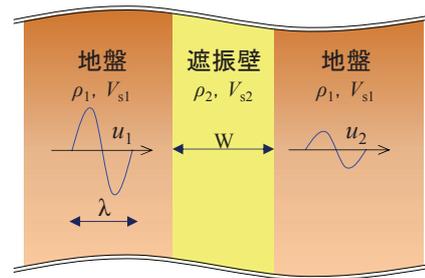


Fig.4 1次元波動透過モデル
(One-Dimensional Model of Wave Transmission)

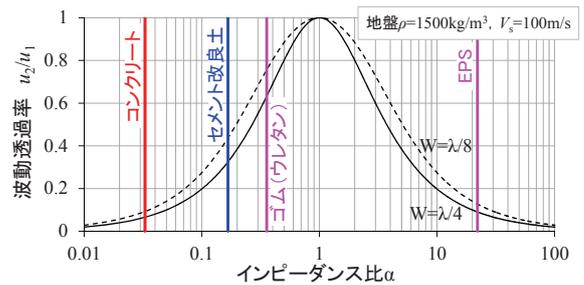


Fig.5 インピーダンス比と振動低減効果の試算例
(Relationships between Amplitude Ratio and Impedance Ratio)

$$u_2/u_1 = \frac{2\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 - 1)^2 \sin^2 \frac{2\pi W}{\lambda} + 4\alpha^2}} \quad (1)$$

$$\alpha = \rho_1 \cdot V_{s1} / \rho_2 \cdot V_{s2} \quad (2)$$

ここに、 u_1 : 入射波振幅、 u_2 : 透過波振幅、 u_2/u_1 : 波動透過率、 W : 壁厚、 λ : 入射波長、 V_s : S 波速度、 ρ : 密度、 α : 地盤と遮振壁のインピーダンス比である。

u_2/u_1 に対する α の効果を Fig.5 に示す。この図では、 $u_2/u_1=1$ が無対策のケースを表し、 u_2/u_1 が小さいほど伝搬する振動が小さいことを表す。同図から、 α を最小化または最大化することで、振動低減効果が大きくなることが分かる。つまり、地盤と異なるインピーダンスの材料を遮振壁として用いることが伝搬経路対策では重要となる。図中に軟弱地盤に対する種々の材料の α を併記したが、コンクリートと EPS はほぼ同等の性能を有しており、遮振壁として硬いものと柔いものの双方の材料が成立することが分かる。なお、空溝は α が無限大 (密度、S 波速度ともにゼロ) の遮振壁と解釈でき、実現できれば最も効果が高いと考えられる。

ただし、遮振壁の設置深度が有限であることによる壁下端からの回折や、地表付近では表面波 (横波と縦波の複合波) が卓越するなど、実際の対策効果は上記評価モデルより複雑となることに留意が必要である。

IV. 対策工の検討方法

振動対策工の効果は地盤の振動伝搬特性と振動源の起振力特性に影響を受けるため、振動対策工の検討では両特性を考慮することが重要である。

筆者らは、地盤および対策地盤の振動伝搬特性の評価に動的サブストラクチャー法³⁾による数値解析手法を適用している。動的サブストラクチャー法とは、Fig.6に示すように弾性論の重ね合わせ原理を用いて、①構造物～地盤系の応答を②地盤系、③構造物系として分けて考え、それぞれの動的剛性を足し合わせて全体での動的相互作用問題を解く手法である。地盤を薄層要素で、地盤内の構造物を有限要素でモデル化することで、計算規模・時間の短縮を図っている。

Fig.7に対策工の検討フローを示す。まず、地盤調査結果から対象地盤のS波速度構造を推定する。地盤と対策工についての3次元モデルを作成し、振動源位置の地表面で点加振した時の着目する多地点での地表面応答を単位起振力あたりの変位振幅(振動伝搬特性)として評価する。次に、後述する別途取得済みの対象振動源の起振力特性を用いて、実作業振動に対する着目点での振動応答を予測する。最後に、応答予測値の変位スペクトルをフーリエ逆変換した変位時刻歴応答から加速度の時刻歴応答を算出し、最大加速度から振動加速度レベルを求める。この値と振動規制値等との比較を通じて対策仕様を選定する。

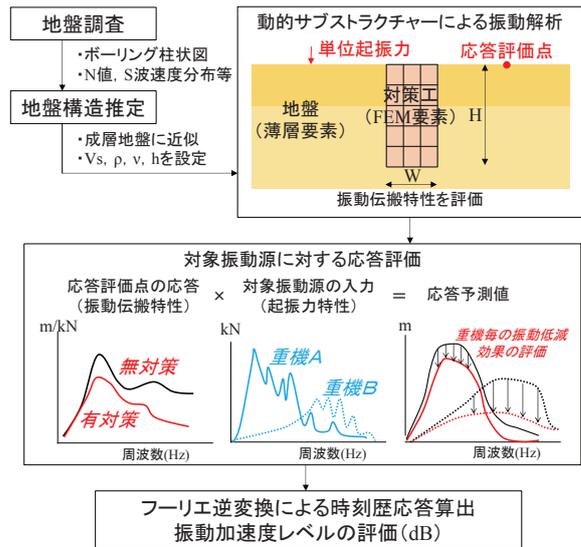


Fig.7 対策工検討フロー

(Framework for Evaluation of Ground Vibration)

V. 重機振動の起振力の評価

前節で述べた応答予測に重要な起振源(重機)の起振力特性に関するデータの取得を目的として、種々の重機作業を対象に振動計測を実施した。計測概要をFig.8に、計測状況をPhoto 1に示す。重機作業中に振動源から1~3m離れた地表面上の加速度応答を計測し、解析で評価した地盤の振動伝搬特性(伝達関数)で計測値を除して、重機の起振力を算出した。

Table 2に計測した重機の種類及び作業条件を示す。ここでは汎用重機の移動やバケット操作などの基本操作に加え、振動規制法における特定建設作業に該当する油圧ブレイカー作業を対象とした。作業中の10~20秒間の振動を複数計測し、平均的なデータを分析対象とした。なお、地盤の振動伝搬特性の評価では、伝達関数の実測値と解析結果の整合性を確認し、地盤モデルの層構造や物性が妥当なことを確認した。(Fig.9)

起振力評価結果の一例として、0.7m³級バックホウとダンプトラックの起振力の時刻歴応答およびスペクトルをFig.10に示す。ダンプトラックの場合、走行速度が振幅に影響することや7Hz以下の低周波振動が卓越することが分かる。一方、バックホウの場合、走行速度の増加に伴い卓越振動数が高周波側に変化した。これは履帯(キャタピラ)上を移動する車輪の移動速度が速まり、履帯と地盤の接触時間が短くなるためと考えられる。また、バケットを振る作業は走行より起振力の振幅が大きく、かつ低周波成分が卓越することが分かった。

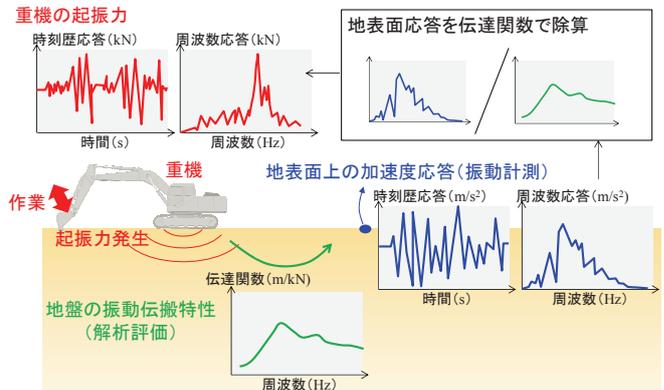


Fig.8 重機作業の起振力評価の概要

(Conceptual Scheme of Evaluation of Vibratory Force)



Photo 1 重機作業時の振動計測実験 (Field Test on Vibration Measurement)

Table 2 起振力評価の対象重機 (Measurement Case)

重機	大きさ	作業条件	計測地点地盤概要
バックホウ	0.7m ³ 級	・走行(低速) ・走行(高速) ・バケット振り	土質:ローム質地盤(Fig.11) 地盤調査内容: ・標準貫入試験 ・各種物理試験
ダンプトラック	10t	・走行(5, 10, 20km/h)	
ブルドーザ	7t級	・走行 ・押土作業	土質:砂礫地盤
バックホウ	0.7m ³ 級 0.4m ³ 級	・走行(低速) ・走行(高速) ・バケット振り	地盤調査内容: ・表面波探査 ・原位置密度試験
油圧ブレイカ	0.4m ³ 級適合機種	コンクリートブロック破砕	



Fig.6 動的サブストラクチャー法の概念図

(Conceptual Scheme of Dynamic Substructure Method)

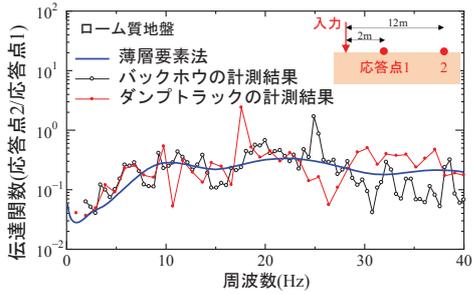


Fig.9 実測と解析の伝達関数
(Comparison of Vibration Transfer Function)

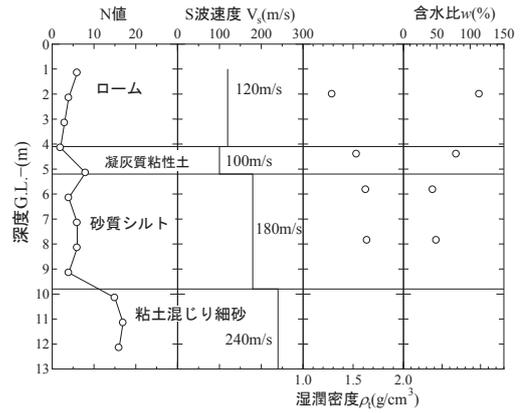


Fig.11 地盤構造
(Ground Profile)

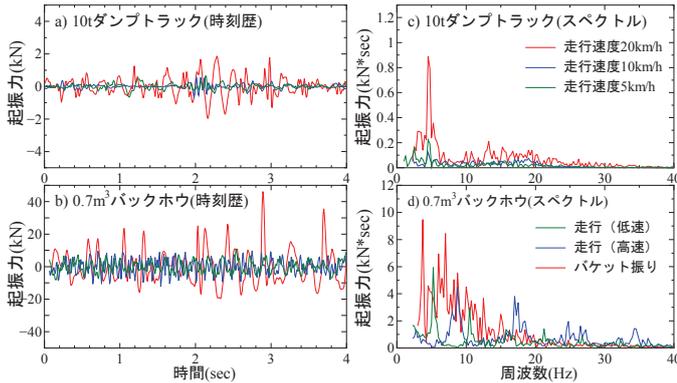


Fig.10 起振力の評価結果の例
(Example for Vibratory Force of Construction Works with Machineries)



Photo 2 作業状況と計測結果
(Field Measurement of Vibration and Results)

Table 3 検討ケース
(Specifications of Countermeasure)

ケース	1	2	3
対策工	砕石置換 (Z=0.95m) Vs=200m/s	砕石置換 (Z=1.95m) Vs=200m/s	コンクリート盤 (t=0.45m) Vs=2400m/s
解析モデル断面 (表層部のみ表示)	砕石置換 (Z=0.95m) FEM要素 6m	砕石置換 (Z=1.95m) 砕石 (H=0.45m) 表土 (H=0.5m) ローム (3.5m) FEM要素 6m	コンクリート盤 (t=0.45m) FEM要素 6m

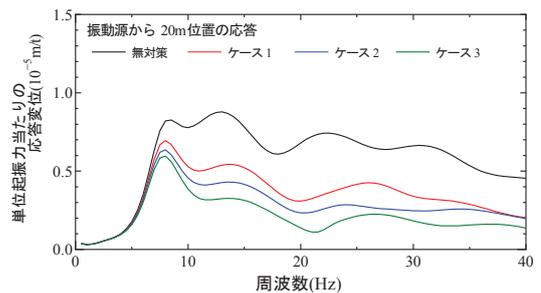


Fig.12 対策地盤の振動伝搬特性
(Vibration Transfer Function of Model Ground)

VI. 振動源対策の検討事例

1. サイト概要

バックホウによる掘削土のふるい分け作業が必要な工事において、作業箇所にて民家が近接しているため工事振動の影響を検討した。当該地点の土層構成を Fig.11 に示す。表土の下層には N 値が比較的小さいロームと凝灰質粘性土が堆積していた。各層の S 波速度は N 値をもとに既往の経験式^{4),5)}から算出した。

事前確認として作業毎の振動を計測した結果 (Photo 2), バックホウ作業時に大きな振動が生ずることが確認された。当工事では重機作業範囲が比較的限定されることから、バックホウ作業エリアの地盤を対象に振動源対策を検討することとした。

2. 対策工の検討

対策工の検討ケースを Table 3 に示す。ケース 1, 2 は、締固めた砕石で表層土を置換した場合で、置換深度をパラメータとした。なお、砕石の S 波速度は試験造成した砕石層の表面波探査結果から設定した。ケース 3 は、厚さ 45cm のコンクリート盤を設置することを想定した。解析モデルでは、対策工は重機が稼働する最小範囲に設置するものとして、振動源直下の 6m×6m の範囲とした。

振動源からの離隔 20m の位置における単位起振力あたりの応答を Fig.12 に示す。対策を施した場合、7Hz 以上の周波数の振動を低減できると評価された。ケース 1 と 2 の結果の比較から、置換深度に応じて低減効果が增大しており、対策工の設置厚が低減効果に寄与すると考えられたが、ケース 3 の低減効果が最も大きく、深度約 2m の砕石置換よりも効果的と予想された。

この結果に Fig.10 の起振力を乗じて求めたバックホウ作業時の

応答予測値を Fig.13 に示す。砕石置換したケース 1, 2 は、走行に対しては一定の低減効果 (7~9dB) を確認できたが、低周波振動が卓越するふるい分け作業に対する効果は限定的であった。一方、コンクリート盤を設置したケース 3 は、走行時 12dB、ふるい分け作業時 10dB 程度の低減効果が予測され、当サイトの基準値を満足したことから、振動源対策としてコンクリート盤を採用することとした。

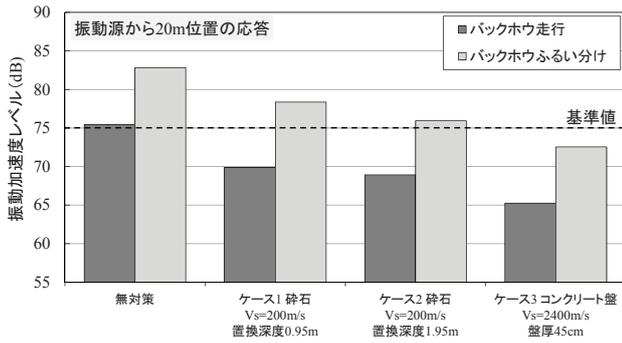


Fig.13 振動加速度レベルの評価結果

(Prediction Results of Vibration Acceleration Level)

Ⅶ. 伝搬経路対策の検討事例

1. サイト概要

民家と近接した盛土工事において、土工重機による作業中に民家内で 70dB を超える振動が確認された。盛土基礎地盤が比較的軟弱であり、作業制限だけでは十分な振動低減効果が得られなかったことから、振動対策工の検討を行った。

Fig.14 に当該地点の地盤構造を示す。層厚約 15m のローム層のうち、表層 7m は S 波速度が 120m/s と比較的軟弱であった。重機の作業範囲は盛土範囲全域で非常に広いことから、振動源対策は困難と判断し、伝搬経路対策として振動伝搬しやすい表層の軟弱層に遮振壁を設置することとした。

2. 対策工の選定

当該地点で施工可能と考えられた Table 4 の対策について効果を検討した。Fig.15 に検討モデルを示す。コンクリート壁はバックホウで地盤を掘削した後に無筋で打設することを想定した。一方、地盤改良壁は高圧噴射攪拌工法によって改良体を造成した後、表層の未改良部をコンクリートで置換するものとした。対策工は敷地境界付近に設置し、振動入力位置は作業範囲の最も近接する位置とした。また、試解析の結果から奥行方向に回折が生じないよう遮振壁延長を 30m に設定し、遮振壁中央断面で振動低減効果を評価した。

Fig.16 に作業ヤードでの地表面点加振に対する民家付近の地表面応答を示す。無対策地盤は 6~10Hz 付近で大きな振動が生ずると予測された。一方、対策工を施工した場合、約 6Hz 以上の周波数範囲の振動低減が可能という予測結果が得られた。Fig.17 は、Fig.10 のバックホウ走行時の起振力データを用いて算出した振動加速度レベルの予測結果である。この結果から遮振壁から 15m の位置（敷地境界～対象民家）において、効果が高いと予測されたコンクリート壁を採用することとした。施工後の対策工の状況を Photo 3 に示す。

3. 振動計測による対策効果の確認

これまで述べてきた振動対策工の効果の予測技術の妥当性や当該対策工による振動低減効果を検証するため、遮振壁施工前後に地盤振動計測を実施した。Fig.18 はバックホウと振動ローラー稼働時の振動加速度レベルを、遮振壁直交方向に距離を変えた各点での測定値と重機直近の測定値の差で示した。

Fig.18(a),(b)に示すバックホウ作業では、遮振壁の設置によって同一地点の振動レベルが低下しており、民家側で 10dB 以上の低減効

果を確認できた。同図に示すバックホウ作業時の解析予測値と実測値は概ね整合しており、振動評価手法の妥当性も確認できた。

Fig.18 (d)~(f)は遮振壁から 9m 位置の加速度スペクトルを対策前後で比較したものである。オペレータ操作による動作のばらつきが少ないバックホウ走行については 7~10Hz 以上の周波数で振動低減効果が明確に得られており、対策工の有効周波数範囲についても Fig.16 の解析結果と整合した。振動ローラーについても広域の周波数範囲で低減効果が認められ、振幅が卓越するローラー内駆動部の回転数 (36.7Hz) 付近も低減することができた。

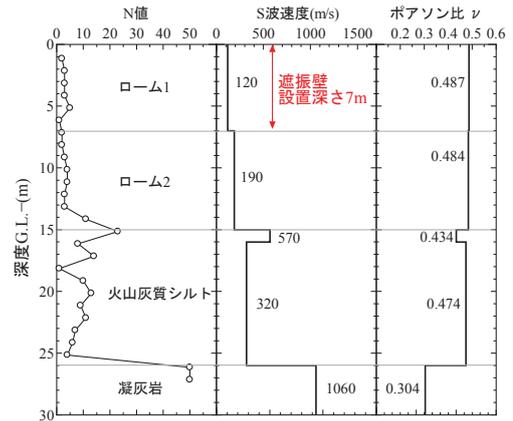


Fig.14 地盤構造

(Ground Profile)

Table 4 検討ケース

(Specifications of Countermeasure)

工法	施工法	寸法	遮振材の物性			
			密度 (kg/m ³)	強度 (N/mm ²)	S波速度 (m/s)	ポアソン比
1	コンクリート壁	掘削→コンクリート打設 深さ7m、幅1m	2400	18	2400	0.16
2	地盤改良壁	高圧噴射攪拌 深さ7m、幅2m (表層部はコンクリートで置換)	1600	1~3	380	0.35



Fig.15 検討モデル

(Countermeasure Models for Numerical Analyses)

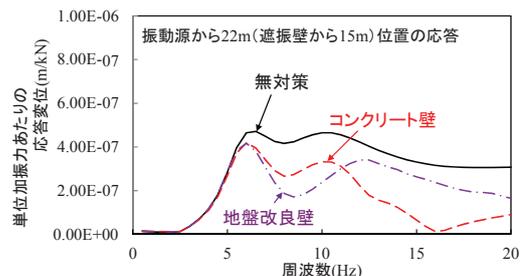


Fig.16 対策地盤の振動伝搬特性

(Vibration Transfer Function of Model Ground)

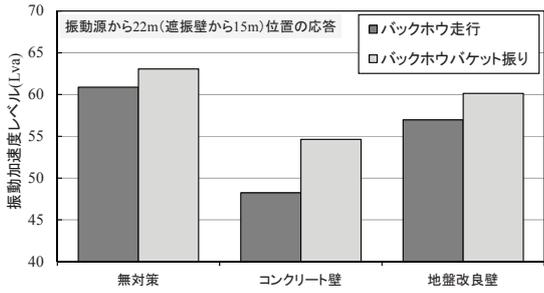


Fig.17 振動加速度レベルの評価結果
(Prediction Results of Vibration Acceleration Level)



Photo 3 コンクリート遮振壁の設置状況

(Underground Concrete Wall for Prevention of Ground Vibration)

Ⅷ. おわりに

本報では、工事振動対策の検討方法を示すとともに、実際の建設現場における振動対策工の設計・施工事例を紹介した。対策工の適用現場では、振動計測の実施により、対策効果の確認と解析精度の検証も実施した。

精度のよい地盤振動予測には、地盤の振動伝搬特性の評価、入力値である振動源の起振力データが必要である。前者は地盤調査結果に基づいた適切なモデル化が重要となる。一方、後者は同じ重機でも作業内容や現場条件、オペレータの技量によって大きく異なることが予想される。今後は、振動源情報のデータベース化を進め、対策工検討の精度向上を図る所存である。

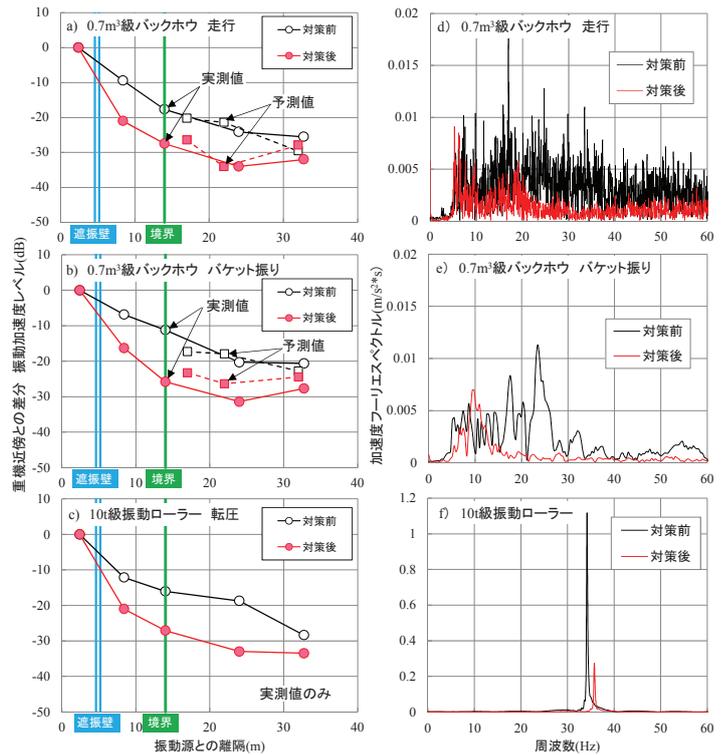


Fig.18 振動計測結果

(Measurement Results of Ground Vibration due to Construction Work)

参考文献

- 1) 例えば、白谷拓也、今岡克也、河合純介；1981年以前に建てられた木造2階建住宅のねじれ振動に関する研究（その3）愛知県美浜町及び南知多町の47棟の水平起振実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，2014，pp.933-934.
- 2) 地盤工学会；地盤環境振動対策工法講習会講演資料，2010.5.
- 3) 岩本賢治、萩原一、藤嶋泰輔、緒方誠二郎；埋め込みを有する基礎の三次元挙動に関する解析的検討，日本建築学会関東支部研究発表会，81（I），2011，pp.361-364.
- 4) 今井常雄、殿内啓司；N値とS波速度の関係およびその利用例，基礎工，Vol.10，No.6，1982，pp.70-76.
- 5) 日本道路協会；道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，2012.6，pp.32-33.

Evaluation of Prevention Effect of Ground Vibration due to Construction Works

Takashi Obara and Michitaka Okamoto

Prevention works of ground vibrations caused by heavy construction machineries are often required at construction sites. In this paper, a prediction and an evaluation technique of the ground vibration and a design method of countermeasures for reducing vibration are presented with two practical cases based on observed vibratory force data of several machineries. Furthermore, in order to validate the effectiveness of the countermeasure, a field measurement was carried out at one of the applied sites. The measured ground vibration level was consistent with the predicted value from the evaluation approach.