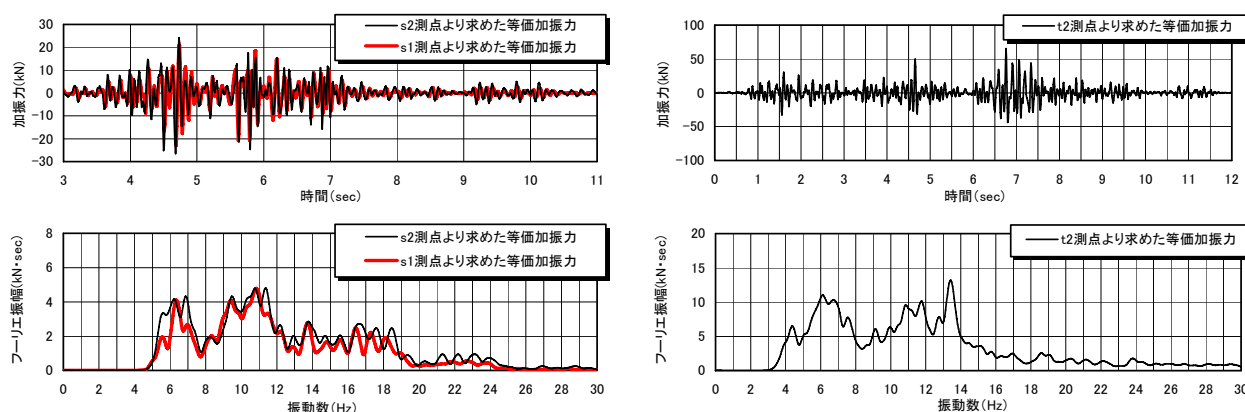


# 道路交通および建設機械の加振源特性について

森下 真行

## A Study on Characteristics in Vibration Source of Traffic and Construction Work

Tadayuki MORISHITA



(a) ダンプトラック段差通過時

(b) ブルドーザ走行時

図1 等価加振力推定結果

## 研究の目的

近年、環境問題に対する意識の高まりから、道路交通や建設工事により発生した地盤振動が周辺建物の居住性等に影響を与え、問題となる場合が多い。この場合、建設工事着手前に道路交通および建設工事による振動発生状況を予測し、必要に応じて適切な振動対策を講じる必要がある。ただし、振動の居住性評価および振動対策の効果を予測するためには、地盤構造および振動対策工法を適切にモデル化するだけでなく、加振力を適切に与える必要がある。本報では、振動計測結果と地盤の振動解析から地盤振動を予測する際に活用可能な等価な加振力（以下、等価加振力）を推定することを目的とする。

## 技術の説明

等価加振力の算定法は、加振源稼働時の地盤での振動計測結果に対して地盤の三次元振動解析より得られる伝達関数を適用する手法とした。さらに、加振力の3成分間の連成効果および加振源の移動効果について検討を実施した。

## 主な結論

- 1) ダンプトラックによる段差通過時の加振力は走行速度に依らず 6Hz 程度および 11Hz 程度の振動成分が卓越する。13Hz 程度以上の比較的高振動数成分は走行速度の上昇に伴い大きくなる傾向を示す。
- 2) 衝撃的な振動源による加振力は3成分（水平2方向および上下方向）の連成効果が小さく、上下方向の振動成分を考慮するのみで実測結果と良い対応を示す。
- 3) ブルドーザの加振力は 7Hz、12Hz および 14Hz 程度の振動成分が卓越し、バックホウの加振力は 4Hz 程度の振動成分が卓越する。
- 4) 移動加振源近傍の地盤応答を用いて加振力および地盤の応答を予測する場合には、加振源の移動効果を考慮する必要がある。

# 道路交通および建設機械の加振源特性について

森 下 真 行

## 要 旨

近年、環境問題に対する意識の高まりから、道路交通や建設工事により発生した地盤振動が周辺建物の居住性等に影響を与え、問題となる場合が多い。この場合、建設工事着手前に道路交通および建設工事による振動発生状況を予測し、必要に応じて適切な振動対策を講じる必要がある。ただし、振動の居住性評価および振動対策の効果を予測するためには、地盤構造および振動対策工法を適切にモデル化するだけでなく、加振力を適切に与える必要がある。本報では、振動計測結果と地盤の振動解析から地盤振動を予測する際に活用可能な等価な加振力を推定することを目的とする。以下に得られた結果を示す。

- (1) ダンプトラックによる段差通過時の加振力は走行速度に依らず6Hz程度および11Hz程度の振動成分が卓越する。13Hz程度以上の比較的高振動数成分は走行速度の上昇に伴い大きくなる傾向を示す。
- (2) 衝撃的な振動源による加振力は3成分（水平2方向および上下方向）の連成効果が小さく、上下方向の振動成分を考慮するのみで実測結果と良い対応を示す。
- (3) ブルドーザの加振力は7Hz、12Hzおよび14Hz程度の振動成分が卓越し、バックホウの加振力は4Hz程度の振動成分が卓越する。
- (4) 移動加振源近傍の地盤応答を用いて加振力および地盤の応答を予測する場合には、加振源の移動効果を考慮する必要がある。

キーワード 環境振動 / 等価加振力 / 道路交通 / 建設機械

## 目 次

- |             |            |
|-------------|------------|
| 1．はじめに      | 5．加振源の移動効果 |
| 2．加振力算定手法   | 6．まとめ      |
| 3．振動実験      | 7．おわりに     |
| 4．等価な加振力の算定 |            |

## A STUDY ON CHARACTERISTICS IN VIBRATION SOURCE OF TRAFFIC AND CONSTRUCTION WORK

Tadayuki MORISHITA

### Synopsis:

Recently, the environmental vibration generated by the road traffic and the construction work becomes a problem. In this case, it is necessary to forecast the ground vibration by the vibration analysis. The aim of this report is to presume the excitation force for the vibration analysis. From these studies, the following results were obtained.

- (1) The excitation force of the dump truck that passes the bump has predominant frequency of about 6Hz and 11Hz.
  - (2) The results of the analysis which consider only vertical vibration correspond to measurements well.
  - (3) The excitation force of the bulldozer has predominant frequency of about 7Hz, 12Hz and 14Hz, and the excitation force of the backhoe has predominant frequency of about 4Hz.
  - (4) It is necessary to consider the movement effect of the excitation source in the case of forecasting excitation force from the response of the ground near the excitation source.
-

## 1. はじめに

近年，環境問題に対する意識の高まりから，道路交通や建設工事により発生した地盤振動が周辺建物の居住性等に影響を与え，問題となる場合が多い．この場合，建設工事着手前に道路交通および建設工事による振動発生状況を予測し，適切な振動対策を講じる必要がある．

著者らは<sup>1-4)</sup>，地盤振動の予測法については三次元薄層要素法を用いた地盤振動解析システムを構築し，振動対策については振動実験により様々な振動対策工法の対策効果について確認している．しかしながら，振動発生状況を予測あるいは適切な振動対策工法を選定するためには，地盤構造および振動対策工法を適切にモデル化するだけでなく，等価な加振力（以下，等価加振力）を適切に与える必要がある．

等価加振力の算定法としては，加振源稼働時の地盤での振動計測結果に対して加振実験あるいは地盤の振動解析より求めた伝達関数を適用して求める方法<sup>5-8)</sup>や直接加振力を計測する方法<sup>例えば 9)</sup>等が提案されている．また，加振力の3成分（水平2成分と上下1成分）間の連成効果については，特に考慮する必要のないこと<sup>6)</sup>が示されている．

本報では，加振力の3成分間の連成効果の必要性について検討するとともに，道路交通および2種類の建設機械について等価加振力を推定し，それぞれの加振力特性について報告する．

## 2. 加振力算定手法

本論で採用した等価加振力の算定法は，加振源稼働時の地盤での振動調査結果に対して地盤の三次元振動解析より得られる伝達関数を適用する手法とした．式〔1〕に等価加振力の算定式を示す．式〔1〕で求めた振動数領域の加振力 $P_x(f)$ ， $P_y(f)$ ， $P_z(f)$ をフーリエ逆変換し，加振力の時刻歴波形を求める．

$$\begin{Bmatrix} P_x(f) \\ P_y(f) \\ P_z(f) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xx}(f) & F_{yx}(f) & F_{zx}(f) \\ F_{xy}(f) & F_{yy}(f) & F_{zy}(f) \\ F_{xz}(f) & F_{yz}(f) & F_{zz}(f) \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} A_x(f) \\ A_y(f) \\ A_z(f) \end{Bmatrix} \quad [1]$$

ここに，

$P_x(f), P_y(f), P_z(f)$  : 各添字方向の振動数領域の加振力  
(複素数)

$A_x(f), A_y(f), A_z(f)$  : 各添字方向の振動数領域の地盤応答  
(複素数)

$F_{ab}(f)$  : a方向加振時のb方向の伝達関数

## 3. 振動実験

### 3.1 対象加振源

振動実験は道路交通（ダンプトラック）および建設機械（ブルドーザーおよびバックホウ）を加振源として行い，振動調査結果から等価加振力を推定するとともに，

加振力特性について考察を行う．一般に加振源の特性は衝撃的な振動と連続的な振動とに分けられる．本報では，衝撃的な振動としてダンプトラックによる段差通過時の振動を，連続的な振動として建設機械（ブルドーザーおよびバックホウ）の移動に伴い発生する振動を採用した．なお，道路交通および建設機械（ブルドーザーおよびバックホウは同一地点で実施）に対する振動実験は異なる地点で実施している．

### 3.2 道路交通振動

衝撃的な振動として，10 トンダンプトラックによる段差通過時の地盤振動を計測した．表-1 に振動実験を行った地点の地盤状況を，図-1 に加振位置および振動計測位置を示す．加振条件は，車両総質量 20 ton のダンプトラックによる，測線直交方向への一定速度での前進走行とした．走行速度は 30km/h（8.3m/s）および 15km/h（4.2m/s）の2ケースとした．振動の測定点は加振位置（測線配置側のダンプ内輪端）よりダンプ走行方向と直角方向に 5m（s1 測点）および 10m（s2 測点）の位置とし，各測点とも3方向（水平2成分および上下1成分）の地盤応答を計測した．写真-1 に調査対象としたダンプトラックを示す．

表-1 地盤状況

| 地質区分 | 地質名      | 深度(m)     | せん断波速度<br>Vs(m/s) | ポアソン比 | 単位重量<br>ρ (kN/m <sup>3</sup> ) | 減衰定数<br>h(%) |
|------|----------|-----------|-------------------|-------|--------------------------------|--------------|
| -    | アスファルト舗装 | 0~0.15    | 228               | 0.35  | 23                             | 1.0          |
| 沖積層  | ローム      | 0.15~2.9  | 155               | 0.40  | 14                             | 1.0          |
|      | 凝灰質粘土    | 2.9~3.5   | 145               | 0.45  | 14                             | 1.0          |
|      | 粘土混り細砂   | 3.5~6.0   | 163               | 0.40  | 19                             | 1.0          |
|      | 粘土混り細砂   | 6~8.10    | 223               | 0.49  | 19                             | 1.0          |
| 洪積層  | レキ混じり粗砂  | 8.1~11.0  | 260               | 0.48  | 19                             | 1.0          |
|      | レキ混じり粗砂  | 11.0~13.5 | 306               | 0.48  | 19                             | 1.0          |
|      | 微細砂      | 13.5~17.7 | 335               | 0.47  | 20                             | 1.0          |
|      | 細砂       | 17.7~     | 346               | 0.47  | 20                             | 1.0          |

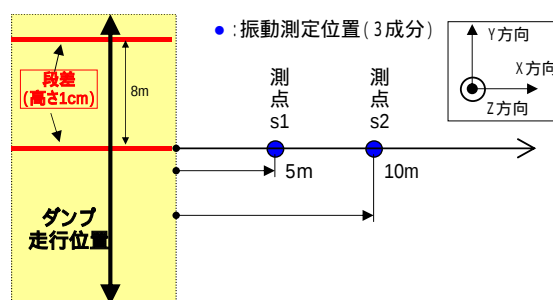


図-1 加振位置および振動計測位置



写真-1 衝撃加振源（ダンプトラック）

### 3.3 建設機械振動

質量ならびに走行特性の異なる2種類の建設機械（ブルドーザ（機械質量：7.61 ton）およびバックホウ（機械質量：12.95 ton））の走行時の地盤振動を計測した。表-2 に振動実験を行った地点の地盤状況を、図-2 に加振位置および振動計測位置を示す。加振方法は、測線直交方向への一定速度での前進後進の繰り返し走行（ブルドーザ：速度約 1.0m/s で前後 4m 移動、バックホウ：速度約 0.5m/s で前後 3m 移動）とし、連続的な振動となる加振を行った。振動の測定点は加振位置（測線配置側の重機履帯端）より重機走行方向と直角方向に 0.5m（t1 測点）、3.0m（t2 測点）、7.0m（t3 測点）および 14.6m（t4 測点）の位置とし、各測点とも上下1方向の地盤応答を計測した。写真-2 および写真-3 に調査対象としたブルドーザおよびバックホウを示す。

表-2 地盤状況

| 地質区分 | 地層名   | 深度(m)     | せん断波速度<br>Vs(m/s) | ポアソン比 | 単位体積重量<br>$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 減衰定数<br>h(%) |
|------|-------|-----------|-------------------|-------|---------------------------------------|--------------|
| -    | 盛土    | 0~2.3     | 165               | 0.45  | 20                                    | 1.0          |
| 沖積層  | 粘性土   | 2.3~3.5   | 129               | 0.45  | 15                                    | 1.0          |
|      | 砂質土   | 3.5~5.2   | 172               | 0.35  | 18                                    | 1.0          |
|      | 粘性土   | 5.2~16.1  | 88                | 0.49  | 16                                    | 1.0          |
| 洪積層  | 砂・砂質土 | 16.1~19.8 | 258               | 0.48  | 19                                    | 1.0          |
|      | 粘性土   | 19.8~31.0 | 203               | 0.49  | 17                                    | 1.0          |
|      | 砂・礫質土 | 31.0~     | 294               | 0.48  | 20                                    | 1.0          |

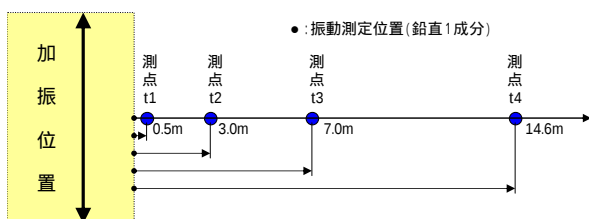


図-2 加振位置および振動計測位置



写真-2 連続加振源（ブルドーザ）



写真-3 連続加振源（バックホウ）

### 4. 等価な加振力の算定

#### 4.1 道路交通

前掲表-1の地盤物性を用い、解析コード Super FLUSH/3D<sup>11)</sup>による点加振解から伝達関数を求めた。

等価加振力の算定は、以下の条件により実施した。

伝達関数算出時の入力点（点加振源）はダンブトラック走行位置と測線との交点とする。

伝達関数算出時の出力点は各測点位置とする。

地盤応答および伝達関数は速度を対象とする。

環境振動で問題となる上下方向の地盤振動を検討対象とする。

100Hz サンプルングでの20.48秒間のデータを使用する。

以上の条件のもと、地盤の各方向の応答は同一方向の加振力のみに起因すると仮定した方法（連成なし）と地盤の応答は3方向の加振力に起因すると仮定した方法（連成あり）の2ケースについて検討を実施した。各ケースとも、加振源より5m(s1 測点)および10m(s2 測点)の振動測定結果から等価加振力を求め、得られた等価加振力を用いて等価加振力推定に用いた測点以外の地盤の応答を予測する。なお、検討範囲とした振動数は暗振動との比較より5Hz以上とした。

図-3にs1 測点から求めたダンブトラック段差通過（速度 30km/h）時の上下方向の等価加振力の時刻歴波形およびその周波数分析結果を示す。s1 測点から求めたダンブトラックの等価加振力波形およびその周波数分析結果は連成の有無による差が小さく、上下方向の振動については連成効果を見逃す可能性がある。図-4に図-3で示した等価加振力の推定値を用いて求めたs2 測点での応答波形およびその周波数分析結果を示す。s1 測点から求めた等価加振力を用いたs2 測点での地盤の応答値を比較した結果、連成の有無に依らず予測結果と実測結果はよく対応する。よって、上下方向の地盤応答を予測する際には上下方向の加振力のみを考慮すれば概ね妥当な結果が得られることを確認した。この傾向は既往の研究<sup>6)</sup>とも整合する結果である。

図-5にs2 測点から求めたダンブトラック段差通過（速度 30km/h）時の上下方向の等価加振力（連成なし）の時刻歴波形およびその周波数分析結果を、s1 測点から求めた等価加振力の結果と併せて示す。各測点から求めた等価加振力は、加振力波形および周波数分析結果ともに概ね対応している。図-6に図-5で示したs2 測点から求めた等価加振力を用いて求めたs1 測点での応答波形およびその周波数分析結果を示す。s1 測点での地盤の応答を比較した結果、予測結果と実測結果はよく対応している。

以上より、加振源より5~10m程度離れた地盤の振動調査結果に対して点加振解を適用して求めた等価加振力は実測結果を良く再現することを確認した。

図-7にs1 測点から求めたダンブトラック段差通過（速度 15km/h）時の上下方向の等価加振力の時刻歴波形およびその周波数分析結果を示す。周波数分析結果について

は通過速度 30km/h 時の結果を併せて示す．6Hz 程度および 11Hz 程度の振動成分が卓越する特性は走行速度によらず同様の傾向を示すが，13Hz 以上の比較的高振動数成分については傾向の違いが見られる．速度 30km/h 時には 14～18Hz の振動成分が比較的多く含まれているが，速度

15km/h 時にはほとんど含まれていない．この違いは走行速度の違いに起因するものと推測できる．図-8 に図-7 で示した速度 15km/h 時の等価加振力を用いて求めた s2 測点での応答波形およびその周波数分析結果を示す．予測結果と実測結果は良く対応していることが分かる．

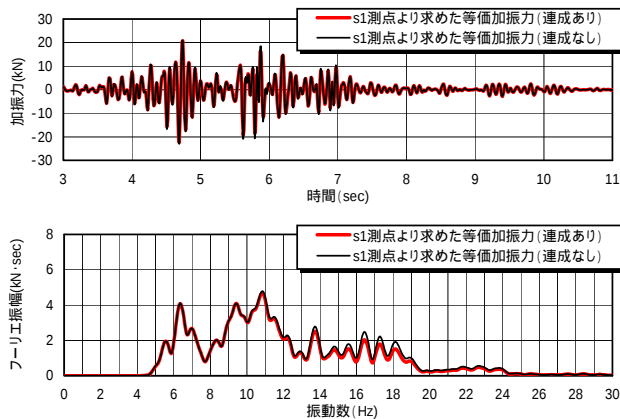


図-3 s1 測点より求めたダンブトラックの等価加振力推定結果（速度 30km/h）

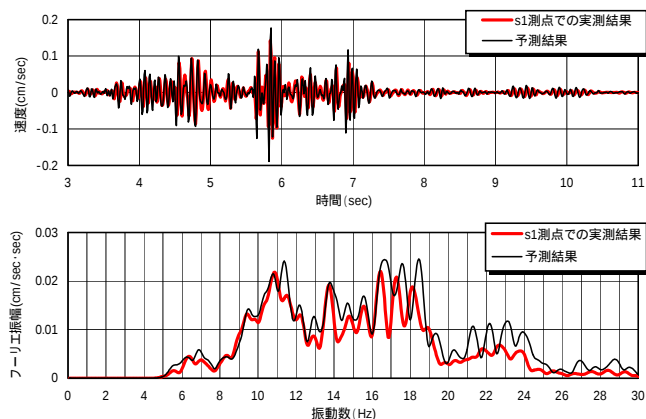


図-6 s1 測点での地盤応答予測結果（連成なし，速度 30km/h）

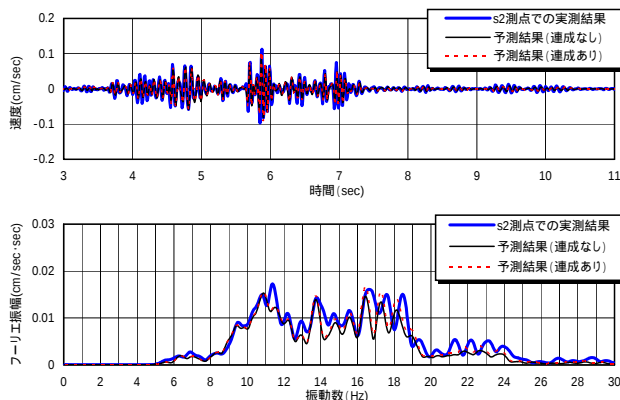


図-4 s1 測点から求めた等価加振力による s2 測点での地盤応答予測結果（速度 30km/h）

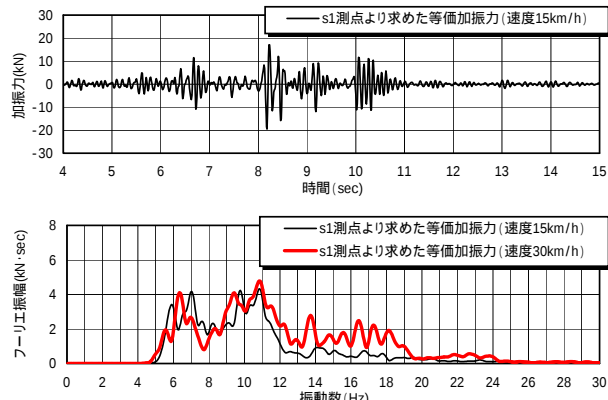


図-7 ダンブトラックの等価加振力（連成なし，速度 15km/h）

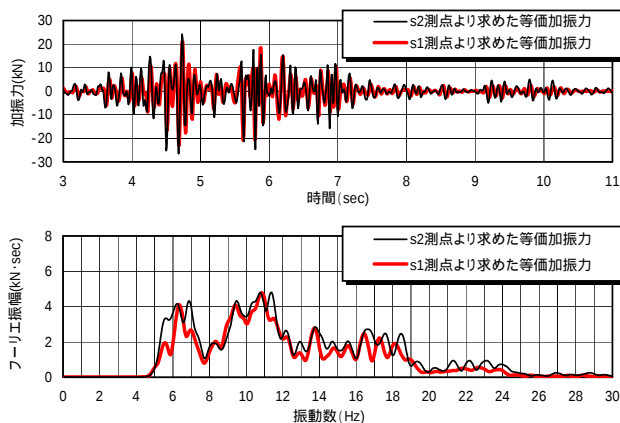


図-5 s2 測点より求めたダンブトラックの等価加振力推定結果（連成なし，速度 30km/h）

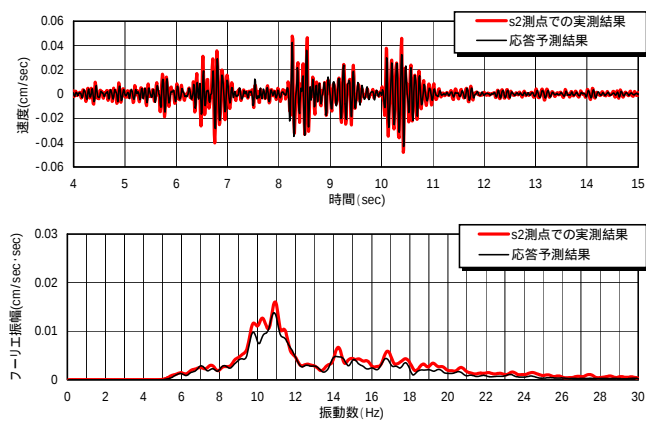


図-8 s1 測点から求めた等価加振力による s2 測点での地盤応答予測結果（連成なし，速度 15km/h）

## 4.2 建設機械

前掲表-2 の地盤物性を用い、前節同様解析コード Super FLUSH/3D<sup>11)</sup> による点加振解から伝達関数を求めた。等価加振力の算定は、以下の条件により実施した。

伝達関数算出時の入力点（点加振源）は建設機械移動位置と測線との交点とする。

伝達関数算出時の出力点は各測点位置とする。

地盤応答および伝達関数は速度を対象とする。

環境振動で問題となる上下方向の地盤振動を検討対象とする。

100Hz サンプルでの 40.96 秒間のデータを使用する。

加振源より 0.5m(t1 測点)、3.0m(t2 測点)および 7.0m(t3 測点)の振動測定結果よりそれぞれに対する等価加振力を求め、得られた等価加振力を用いて加振源より 14.6m(t4 測点)での地盤の応答を予測する。なお、検討範囲とした振動数は暗振動との比較より 3Hz 以上とした。

図-9 に t1、t2 および t3 測点から求めたブルドーザの等価加振力の時刻歴波形およびその周波数分析結果を示す。加振源に近い t1 測点の測定結果から求めた加振力波形およびその周波数分析結果はともに加振源から比較的距離の離れた t2 および t3 測点より求めた加振力に比較して全体的に小さい。周波数分析結果も加振力波形と同様の傾向を示す。ただし、6Hz 付近および 13Hz 付近の振動成分が卓越する点などの周波数特性は加振源からの距離に依らず良く似た傾向を示している。図-10 に図-9 で示したブルドーザの等価加振力の推定値を用いて求めた t4 測点での応答波形およびその周波数分析結果を示す。t4 測点での地盤の応答波形を比較した結果、加振源に近い t1 測点から求めた加振力波形を用いて予測した応答波形およびその周波数分析結果はともに加振源から比較的距離の離れた t2 および t3 測点から求めた加振力波形を用いて予測した応答波形に比較して全体的に小さい。これは、もともと加振力が小さく評価されているため、その加振力から求めた地盤の応答も小さく評価されたためである。加振源から比較的距離の離れた t2 および t3 測点から求めた加振力を用いた予測結果は t3 測線から求めた結果がやや大きめの値を示すものの、両者とも実測値とは比較的良い対応をしている。t2 および t3 測点は加振源から比較的離れているため重機が移動した場合でも加振源との距離がそれほど変化するわけではないが、t1 測点は加振源に近いので、重機の移動に伴い加振源との距離が大きく変動する。その結果、t1 測点から求めた等価加振力には移動加振の影響（加振源が比較的遠方に位置する場合も測点近傍での点加振源に置き換えて評価する）が含まれ、加振源から比較的離れた t4 測点での予測結果と実測結果との差が大きくなったものと考えられる。移動加振源からある程度離れた地盤の応答から求めた等価加振力を用いて比較的加振源から離れた地盤の応答を予測する場合には移動加振を点加振で模擬できる可能性が示された。

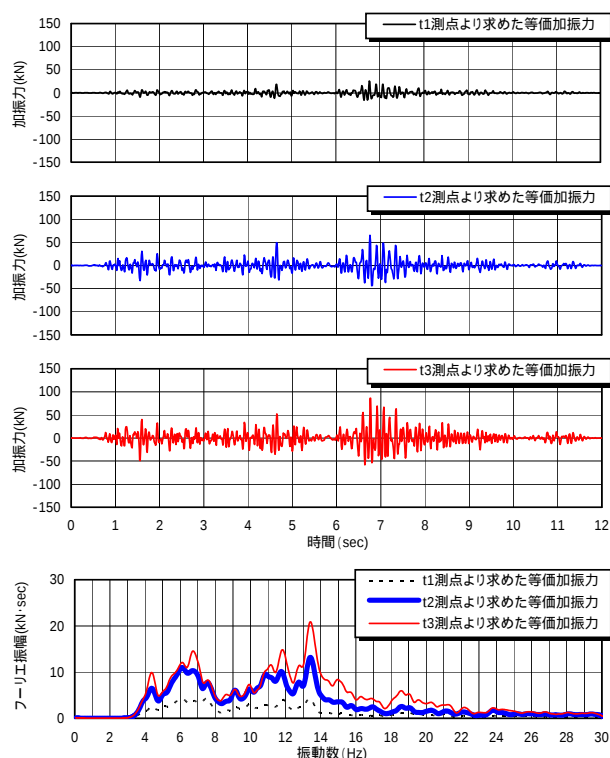


図-9 ブルドーザの等価加振力推定結果

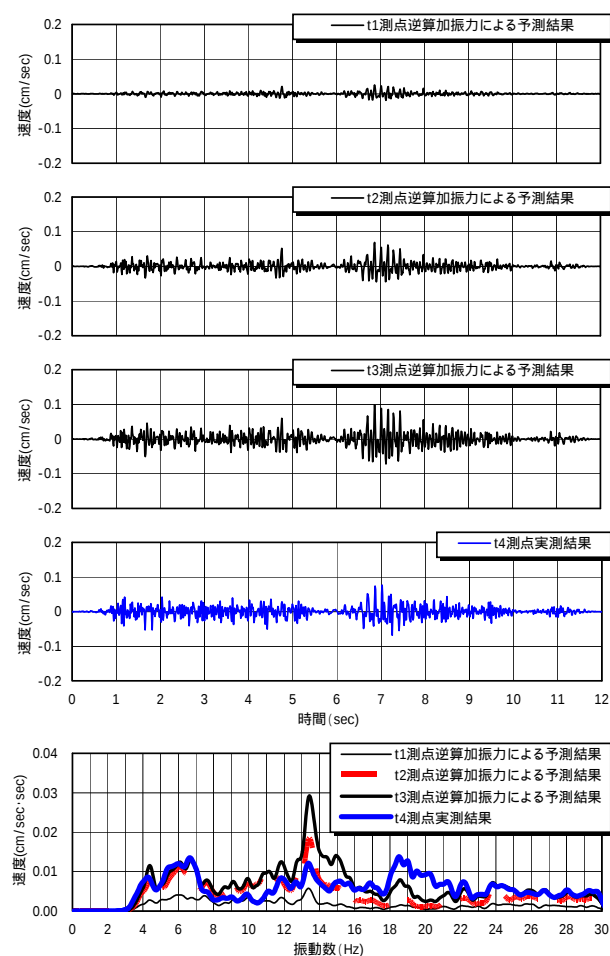


図-10 t4 測点での地盤応答予測結果

図-11 に t3 測点から求めたバックホウの等価加振力の時刻歴波形およびその周波数分析結果を示す。ブルドーザの加振力は 7Hz, 12Hz および 14Hz 程度の振動成分が卓越し、バックホウの加振力は 4Hz 程度の振動成分が卓越する。また、ブルドーザはバックホウに比べ加振力の振動数範囲が広く、高振動数成分も多く含まれていることが分かる。

## 5. 加振源の移動効果

ここでは加振源の移動効果について検討を行う。移動加振源からある程度離れた地盤の応答を予測する場合には移動加振を点加振と仮定することで、地盤の応答が予測可能であることを示したが、その場合加振源から比較的離れた地点での振動調査結果から等価加振力を推定する必要がある。しかしながら加振源から離れるほど、振動調査結果は暗振動の影響を、また伝達関数は地盤のモデル化誤差の影響を受けやすくなるなどの問題点を含んでいる。この問題点を改善する方法の一つとして、加振力を推定する際に用いる地盤の応答実測点を加振点近傍位置に設定する方法が挙げられる。ただし、その場合は加振源近傍の地盤応答に含まれる加振源の移動による影響（加振点と測点との距離の変動等）を無視できないため、加振源の移動効果を適切に考慮する必要がある。ここでは加振源の移動効果を考慮可能となるよう、移動加振源を適度の間隔を設けた点に離散化し、かつ重機の移動に伴い発生する時間遅れを表現した場合の地盤応答予測結果について考察する。

図-12 に移動加振源の離散化状況を示す。移動加振源の離散点は、移動加振源を点加振源と仮定した建設機械移動位置と測線との交点（m2 点）および移動範囲の最外縁（移動方向に測線から  $\pm 2\text{m}$ , m1 および m3 点）の計 3 点とした。図-13 に t1 測点から求めたブルドーザの等価加振力の時刻歴波形および周波数分析結果を示す。t1 測点での応答実測値に対して点加振解を適用して求めた加振力と比較すると大幅に改善されていることがわかる。図-14 に図-13 で示したブルドーザの等価加振力の推定値を用いて求めた t4 測点での時刻歴波形および周波数分析結果を示す。t4 測点での応答予測結果は実測値に比較して小さめの値を示す。周波数分析結果では 8Hz 程度以下の領域では両者は概ね対応しているが、8Hz 程度以上の周波数成分で両者の差が大きくなる。応答波形の差はこの 8Hz 程度以上の比較的高振動数成分に起因したものであると思われる。ただし、t1 測点での実測結果に対して点加振解を適用した場合の応答予測結果と比較すれば、移動効果を考慮した応答予測結果は実測結果と比較的に対応しているといえる。移動加振源近傍の地盤応答を用いて等価加振力および地盤の応答を予測する場合、加振源の移動効果を考慮する必要があることが示された。

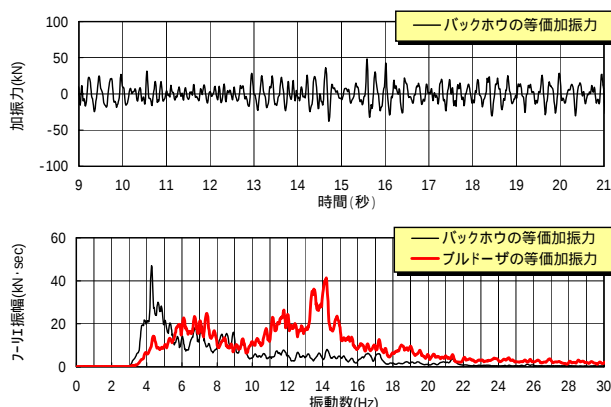


図-11 t3 測点から求めたバックホウの等価加振力推定結果

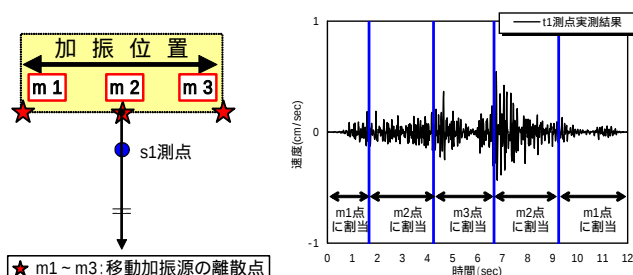


図-12 移動加振源の離散化状況

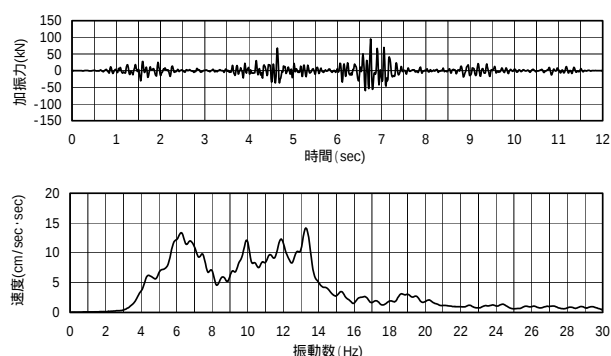


図-13 t1 測点から求めたブルドーザの等価加振力推定結果

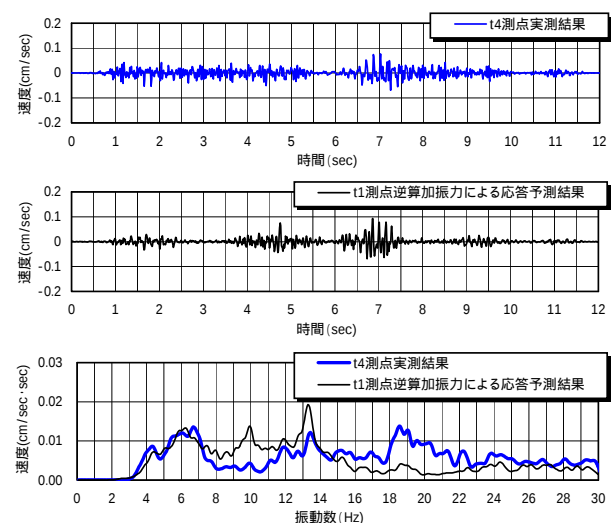


図-14 ブルドーザの移動効果を考慮した等価加振力による t4 測点での地盤応答予測結果

## 6. まとめ

衝撃加振源としてダンブトラック段差通過時の振動を、連続的な加振源として建設機械（バックホウおよびブルドーザ）走行時の等価加振力を推定し、加振力特性の違いを把握した。得られた結果を以下に示す。

- (1)ダンブトラックによる段差通過時の加振力は走行速度に依らず 6Hz 程度および 11Hz 程度の振動成分が卓越する。13Hz 程度以上の比較的高振動数成分は走行速度の上昇に伴い大きくなる傾向を示す。
- (2)衝撃的な振動源による加振力は 3 成分（水平 2 方向および上下方向）の連成効果が小さく、上下方向の振動成分を考慮するのみで実測結果と良い対応を示す。
- (3)ブルドーザの加振力は 7Hz, 12Hz および 14Hz 程度の振動成分が卓越し、バックホウの加振力は 4Hz 程度の振動成分が卓越する。
- (4)移動加振源近傍の地盤応答を用いて加振力および地盤の応答を予測する場合には、加振源の移動効果を考慮する必要がある。

## 7. おわりに

推定された等価加振力は当社の三次元地盤振動解析システムで活用可能な加振力データベースとして蓄積され、実務で活用可能としている。なお、等価加振力の推定精度は地盤のモデル化や加振源と振動実測点間の距離等の影響を受ける。今後は、同種データの蓄積を進め等価加振力の推定精度を上げるとともに、他の建設機械や鉄道振動等への展開を図り、加振力データベースの蓄積に努める予定である。

謝辞：各種加振源に対する振動調査にご協力頂いた関係者に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 森下真行, 吉田隆治, 山下俊英, 藤嶋泰輔, 斉藤芳人：柱列工法による地盤振動の低減に関する研究, 前田建設技術研究所報, VOL.46, pp.4.1-6, 2005 年 7 月.
- 2) 森下真行, 吉田隆治, 斉藤芳人, 藤嶋泰輔, 布引英夫, 黒沢俊也, 庄司正弘, 島袋ホルヘ：柱列の地盤振動低減効果に関する研究 その 1 振動実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.249-250, 2005 年 9 月.
- 3) 藤嶋泰輔, 吉田隆治, 森下真行, 布引英夫, 黒沢俊也：現場振動実験による地中防振壁の振動低減効果, 前田建設技術研究所報, VOL.47, pp.13.1-8, 2006 年 8 月.
- 4) 藤嶋泰輔, 吉田隆治, 森下真行, 小林幹雄, 有泉和美：現場振動実験による地中壁（S MW）の振動低減効果に関する調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, pp.209-211, 2006 年 9 月.
- 5) 吉岡修：等価起振力法による列車走行に伴う地盤振動の予測解析, 物理探査, Vol.49 No.2, pp.136-146, 1996 年.
- 6) 花里利一, 田口典生, 高木政美, 石田理永：交通振動の加振力特性, 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.161-166, 2004 年 5 月.
- 7) 吉田一博, 福喜多輝：構造物解体時の環境地盤振動について（その 1）, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, pp.249-251, 2004 年 8 月.
- 8) 中村真人, 石田理永, 中井正一：平面道路交通振動における加振源の移動の影響に関する検討（その 1）（その 2）, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, pp.213-216, 2005 年 9 月.
- 9) 井上勝夫, 木村翔, 田中大輔：自動車走行時に道路面段差から発生する道床に対する加振力特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 472 号, pp.1-10, 1995 年 6 月.
- 10) 森下真行, 吉田隆治：環境振動における加振源特性について（建設重機の等価加振力評価）, 建築学会大会学術講演梗概集, D1, pp.407-408, 2008 年 7 月.
- 11) SuperFLUSH/3D 使用説明書, 1995 年.