

## 2次元・3次元有限要素解析による最適な振動対策の検討方法と事例

### Optimum Vibration-proofing Method by 2D/3D Finite-element Analysis, and Case Examination

坂崎 友美<sup>※1</sup>  
Tomomi Sakazaki

小林 真人<sup>※1</sup>  
Masahito Kobayashi  
池田 隆明<sup>※1</sup>  
Takaaki Ikeda

内田 季延<sup>※1</sup>  
Hidenobu Uchida  
久保 孝信<sup>※2</sup>  
Takanobu Kubo

#### 【要旨】

建設工事による振動が地盤を伝搬し近接する家屋等を揺らすことで、居住者が不快感や体調不良を訴えることがある。地盤を媒体とした振動伝播対策の検討には、3次元地盤モデルによる振動解析が有効である。

3次元地盤モデルの振動解析には有限要素法が用いられている。しかしながら3次元の有限要素解析は膨大な解析時間を要するので、条件によっては実務的ではない場合がある。そこでまず初めに、成層地盤を想定した2次元解析で防振対策のパラメータスタディを行い、その結果から防振対策を決定する。2次元解析で決定した防振対策に基づき3次元解析で地表面への振動分布を求め評価する。このように2次元と3次元解析を組み合わせた方法を用いることで、解析に必要な時間の削減をはかり防振対策の素早い評価を可能とした。本報では、2次元と3次元解析を組み合わせた最適な振動対策の検討方法について述べるとともに、解析事例を報告する。

【キーワード】 振動 有限要素解析 防振 成層地盤 建設重機

#### 1. はじめに

家屋が近接する建設現場において、重機が作業することにより発生した振動が地盤を伝わり家屋を揺らすことで、居住者が不快感や体調不良を訴えることがある。この対策としてキャタピラをタイヤ式に変更することや、防振マット、防振壁を設置することが行われている。家屋を揺らす振動は、振動源の特性、および地盤を媒体とした振動伝播の特性に影響を受けるため、有効な振動対策を立案するためには、これら2つの特性を考慮する必要がある。特に、振動の伝播特性は、評価地点の地盤特性に支配されることから、地盤の物性値や3次元的な構造特性を考慮することが重要である。

3次元的に複雑な地盤特性を考慮した振動伝播問題に対しては、有限要素法が有効である。この方法では対象地点およびその周辺の地盤構造を2次元もしくは3次元的にモデル化し、振動源を点振動として与え、振動の伝播状況の評価するものである。3次元的に複雑な地盤構造を有する場合は、3次元解析が必要であるが、膨大な解析時間が必要なため、条件によっては実務的ではない。ここで、家屋と重機が近接している場合を想定すると、地盤の3次元的な構造が、家屋の振動におよぼす影響は小さいと考えられるため、単純な成層地盤で評価することが近似的に成立する。そこで、成層地盤を想定した2次元解析で防振対策案のパラメータスタディを行う。そ

の結果から防振対策案の仕様を決定する。その仕様に基づき防振対策効果を3次元解析で検討する。このように2次元と3次元解析を組み合わせた検討方法を用いることで、解析に必要な時間の削減をはかり、防振対策の素早い対応を可能にした。

本報では、2次元と3次元解析を組み合わせた最適な振動対策の検討方法について述べるとともに、解析事例を報告する。

#### 2. 最適な振動対策の検討方法の概要

図-1に2次元と3次元解析を組み合わせた最適な振動対策の検討方法のフローを示す。

はじめに、評価対象現場の地盤調査結果を基に、地層の厚さ、密度、P波速度、S波速度を設定し、地盤モデルを作成する。このデータに基づき地盤のレイリー波の理論値を求め、卓越周波数を確認する。ここで、現地で微動測定が可能な場合は、測定結果からH/Vスペクトルに一致するように、地盤モデルを修正する。

次に、防振対策の仕様を決めるため、2次元解析を用いてパラメータスタディを行う。2次元解析には2次元有限要素解析プログラム「SuperFLUSH/2D」を用いる。加振力データは、現場で測定した重機の振動を2次元解析で引き戻し解析により作成する。そのデータの中から、対象現場で使用される重機に合うデータを選定する。解

析対象とする振動数の範囲は、地盤の卓越周波数と加振力データの卓越周波数、防振対策効果が予測される周波数帯域を考慮して決定する。

2次元解析の結果から選定した防振対策の効果を平面的に評価するために3次元解析を行う。3次元解析には3次元有限要素解析プログラム「SuperFLUSH/3D」を用いる。加振力データは2次元解析と同じデータを使用する。解析対象とする振動数の範囲は、2次元解析の結果を考慮して設定する。

3次元解析結果に基づき、重機から現場内外へ伝播する振動の平面コンター図を出力することで、防振対策による振動低減効果を定量的に提示することができる。

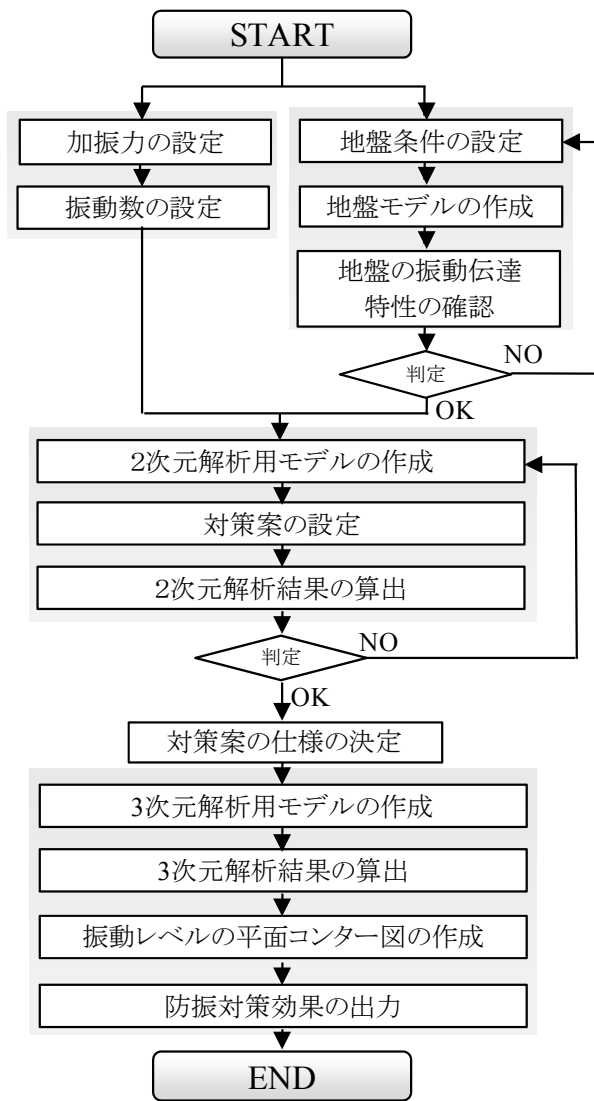


図-1 最適な振動対策の検討方法のフロー

### 3. 防振溝の検討事例

本章では実現現場を対象とした防振溝による最適な対策案の検討事例を示すとともに、実際に現場で行った防振溝の振動低減効果の測定結果と解析結果の整合性を検証した。

### 3.1 地盤条件の設定

対象とした現場は千葉県佐倉市内の造成現場であり、地盤改良前の更地を対象とした。実験場所近辺のボーリング結果を基に地層の厚さ、地層ごとのポアソン比、単位体積重量、P波速度、S波速度を設定し、地盤モデルを作成した。ここで、S波速度 ( $V_s$ ) は平均N値より推定した<sup>1)</sup>。平均N値が0の場合はN値を1と仮定した。P波速度については、地盤調査結果において地下水位が0.57mおよび1.15mと浅いため、全層飽和状態とし水の伝搬速度1,500m/sとした。単位体積重量は道路橋示方書<sup>2)</sup>を基に設定した。表-1に設定した地盤モデルを示す。

対象現場で微動測定を行い、H/Vスペクトルを求めた。図-2に対象現場内で測定した微動のH/Vスペクトルと、表-1に示した地盤モデルから求めた理論H/Vスペクトルを示す。測定値と理論値の卓越周波数(約1.6Hz)はほぼ一致していることから、表-1に示した地盤モデルは妥当であると考えられる。

表-1 地盤モデル

深度(GL) [m]	層厚 [m]	土質区分	平均 N値	$V_s$ [m/s]
0 ~ -1.6	1.6	盛土(粘性土)	3	159
-1.6 ~ -2.8	1.2	粘土質シルト	2	139
-2.8 ~ -3.7	0.9	腐植土	1	110
-3.7 ~ -4.9	1.2	砂混じりシルト	(1)	110
-4.9 ~ -13.45	8.55	粘土混じりシルト	(1)	110
-13.45 ~ -15.6	2.15	砂混じりシルト	(1)	110
-15.6 ~ -16.7	1.1	シルト混じり細砂	1	110
-16.7 ~ -18.45	1.75	細砂	22	308
-18.45 ~		細砂	22	308

平均N値の(1)はボーリング調査ではN値が0であったため、本報ではN値を1と仮定したことを示す。

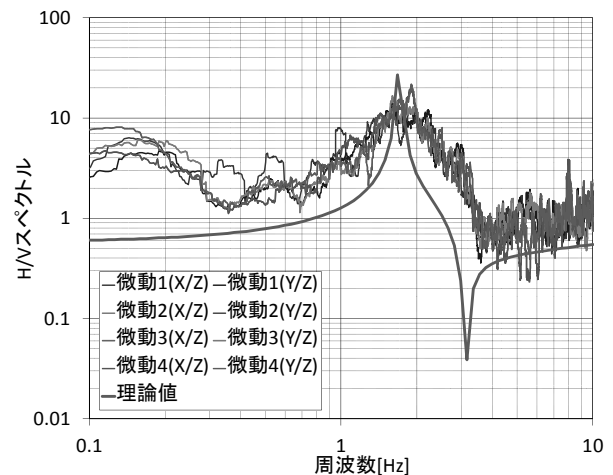


図-2 H/V スペクトル

### 3.2 加振力データの作成

加振力データを作成するために、対象現場でバックホウ走行時の振動を測定し、その結果を基にして以下の条件で加振力の引き戻し解析を行った。加振力の引き戻しは図-3に示す概念で行った。

- ・ 検討重機 : バックホウ 0.8m<sup>3</sup>
- ・ 動作 : 走行
- ・ 解析手法 : 周波数領域における複素数応答法
- ・ 境界条件 : 側方エネルギー伝達境界  
底面粘性境界
- ・ 解析振動数 : 0~20Hz
- ・ 加振力の規定点 : 解析モデルの地盤面中央
- ・ 引き戻しの基準点 : 2m 測定点および4m 測定点
- ・ 波形数 : 512点 (0.01秒ピッチ)
- ・ 解析ソフト : SuperFLUSH/2D
- ・ 2次元有限要素モデル : モデル化深度200m, 幅120m

加振力の引き戻し解析では地盤の減衰を2, 5, および10%, 測定波形を2mと4m測定点に設定し, 測定値を表現できる加振力データを作成した. 図-4に作成した加振力波形を示す.

### 3.3 防振対策の仕様検討

防振対策の仕様を検討するために, 前項で作成した加振力を用いて2次元有限要素解析を行った. 2次元解析モデルは表-1に示した地盤モデルに基づき作成した. 図-5に解析に用いた2次元解析モデルを示す. 本解析事例では防振溝の仕様を検討するため, 解析ケースは対策なし, 防振溝(空溝)深さ1, 2, および3mの4ケースとした. 溝の位置は加振点から5mの位置に設置した. 観測点は加振点から2, 4, 5, 6, 8, 12, および20m地点とした. 図-6に2次元解析で求めた2m観測点の振動加速度レベルを基準とした, 解析ケースごとの距離減衰を示す. 対策なしに比べ防振溝を設置する場合は, 防

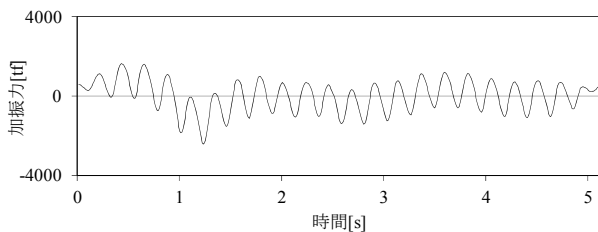
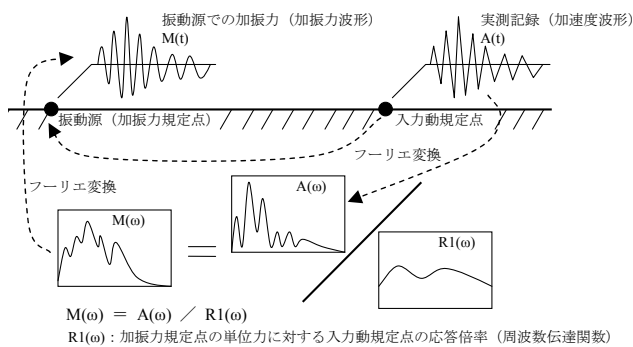


図-4 加振力波形

振溝に近接する4mと6m観測点では, 防振溝の深さが深くなるにつれて振動が2m観測点に比べ大きくなっている. これは, 防振溝が空溝であるため地盤の溝側が拘束されておらず, 揺れやすい状態になったためと考えられる. 一方, 12mと20m観測点では, 防振溝が深くなるにつれて多少であるが減衰が大きくなっており, 防振溝の効果をみることができる.

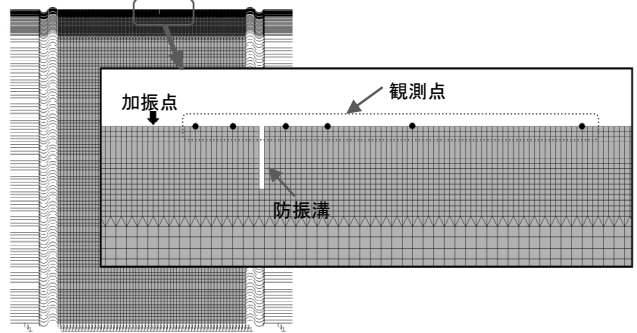


図-5 2次元解析モデル

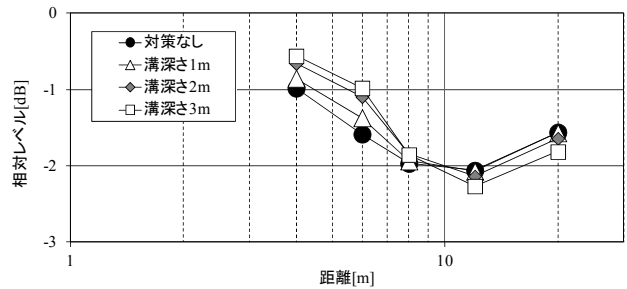


図-6 2次元解析で求めた振動レベルの距離減衰

### 3.4 解析値と実測値の比較

本解析の対象とした現場で防振溝を設置し, 重機から発生する振動に対する低減効果を測定した. 図-7に2m

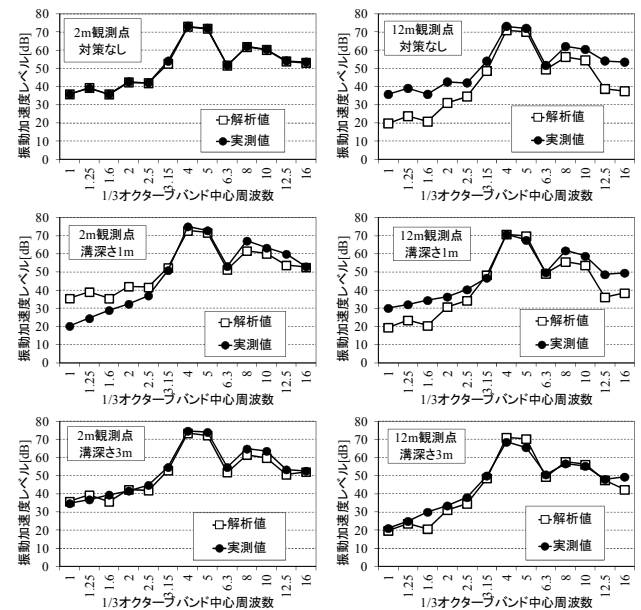


図-7 2mと12m観測点における実測値と解析値の周波数特性 (対策なし, 溝深さ1, 3m)

と 12m 観測点の実測値と解析値の周波数特性 (対策なし、溝深さ 1, 3m の場合) を示す。

全ての解析ケースで実測値の卓越周波数である 4Hz 帯域と 5Hz 帯域において、実測値と解析値の差が 3dB 以内であり、解析により観測点の振動が再現できていることがわかる。他の周波数帯域では、2m 観測点の対策なしと溝深さ 3m は実測値と解析値の差が 3dB 以内であり、解析により観測点の振動を再現できていることがわかる。また、12m 観測点の 8Hz 帯域以上において、2m 観測点と比較すると防振溝の効果を再現できていることがわかる。

### 3.5 地盤面上に伝播する振動の分布状態の確認

2次元有限要素解析の結果に基づいて、防振対策案を防振溝深さ 3m と決定した場合の、地盤面上に伝播する振動分布を 3次元解析により求めた。その結果から振動

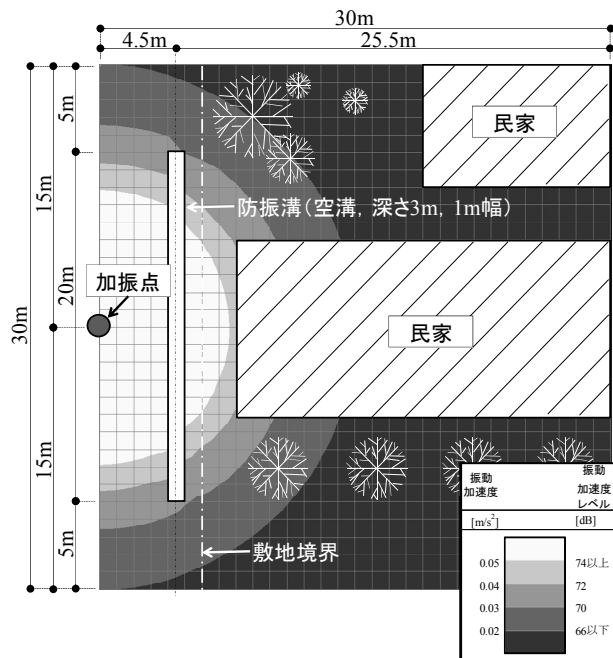


図-8 振動レベルの平面コンター図 (一例)

レベルの平面コンター図を作成した。ここで、地盤面は 30m×30m、防振溝の中心までは加振点から 4.5m 地点とし、幅は 1m、延長は 20m に設定した。なお、民家の基礎および建屋は解析に考慮していない。

図-8 に建設現場に民家が近接する場合の配置図の一例と振動レベルコンターを合わせて示す。振動レベルを平面コンター図で示すことにより、重機から発生する振動が民家に及ぼす影響を定量的かつ明確に提示することが可能となった。

## 4. まとめ

本報では、2次元と3次元有限要素解析を組み合わせた最適な振動対策の検討方法を述べるとともに、解析事例によりその有効性を報告した。以下に振動対策の検討を行う上で重要な点を示す。

- ・評価対象現場の地盤調査結果を基に地盤のレイリー波の理論値を求め、卓越周波数を確認する。また、現地調査が可能な場合は対象地盤上で微動を計測し、地盤のレイリー波の理論値とH/Vスペクトルが一致するように地盤モデルを作成する。
- ・加振力と地盤の卓越周波数を考慮し、防振対策案を設定する。
- ・2次元有限要素解析を用いたパラメータスタディにより、評価対象現場に適した防振対策を定量的に評価し防振対策の仕様を決定する。
- ・3次元有限要素解析結果に基づき、評価対象現場を伝播する振動の平面コンター図を出力し、振動の低減効果を定量的に評価する。

### 【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、p.33,2012.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編、p.47,2012.6.

**Summary** Vibrations caused by the construction propagate through the ground and shake the houses in the vicinity causing the occupants to complain about discomfort and poor physical conditions. In order to develop effective vibration control measures, it is important to examine the characteristics of vibration source, and the characteristics of the propagation of the ground vibration.

The finite element analysis method is used for three-dimensional soil analysis. Three-dimensional finite element analysis, however, requires a large amount of time, so the method may be not practicable under certain conditions. Then first, A parameter study is made of vibration control measures in two-dimensional analysis based on the assumption of layered ground. Based on the results of analysis, specifications for vibration control measures are determined. Based on the specifications, a distribution of vibrations on surface is evaluated by three-dimensional analysis. Combining two- and three-dimensional analyses reduces the time required for analysis and enables quick evaluation.

this paper, while describing the review method of the optimal oscillating measure that combined two dimensions and three-dimensional analysis, an analysis example is reported.

**Key Words :** Vibrations, Vibration control, Finite-element analysis, Horizontally layer, Construction machinery