

地盤改良による環境振動の低減効果

高野 真一郎 小島 宏章

Reduction Effect of Environmental Vibration by Soil Improvement

Shinichiro Takano Hiroaki Kojima

Abstract

The permissible vibration levels and performance requirements for vibration from production machines and construction machines are becoming increasingly stringent. However, these machines have become larger and highly functional in recent years. Traditional vibration reduction methods are therefore unable to satisfy performance requirements. Soil improvement using cement-based material is an attractive alternative to these traditional method, because a soil improvement system reduces vibration effectively, is easy to construct, and inexpensive. However it is difficult to predict and evaluate the vibration reduction effect by using the conventional three-dimensional finite element method (3D-FEM). We have developed numerical analysis software that can predict and evaluate the vibration reduction effect by soil improvement, using FEM that includes hexahedral elements and thin layer method (TLM). This paper roughly outlines the developed software, and demonstrates the vibration reduction effect of soil improvement through a parametric study.

概要

近年、生産機械や工事機械はますます大型化・高機能化し、それにつれて発生する振動も大きくなっているにもかかわらず、振動に対する許容値や要求性能は逆に厳しくなっている。そのため、増杭や基礎の拡幅、防振壁などの従来の振動対策手法だけでは要求を満足できない、あるいはコストが大幅に増加してしまうなどの事例が発生している。そこで、より効果的かつ簡易な振動対策手法としてセメント系の地盤改良が注目されている。しかし、地盤改良による振動低減効果を精度よく評価するためには、周辺地盤を含む広域の振動を三次元有限要素法等で解析する必要があり、計算時間・計算機容量とも多大で、実用的な予測・評価が難しい。

そこで筆者らは、三次元薄層要素法と三次元有限要素法の六面体要素を用いて改良地盤と周辺地盤をモデル化し、地盤改良による振動低減効果を実用的に予測・評価する解析ソフトを開発した。本論文では、解析ソフトの概要と適用事例を示すとともに、パラメータスタディにより地盤改良の強度や厚さが振動低減効果に及ぼす影響について示す。

1. はじめに

プレス、コンプレッサーや振動試験装置などの機械から発生する振動は、基礎から地盤を通して周辺の精密機器や設備機器に影響を与え、製造ラインや検査装置などに振動障害を及ぼす場合がある。このような機械の基礎を建設する場合には、数値解析などの予測ツールによって発生振動を評価し、状況に応じて増杭や基礎拡幅などの振動対策を検討する必要がある。

また、バックホウやクローラークレーン、ダンプトラックなどの工事機械の振動も、地盤を通して周辺の建物に伝播し、不快な体感振動となる場合がある。この場合も、工事機械から発生して地盤を伝播する振動を予測するとともに、地中防振壁や防振溝などの対策の効果の評価し、工事計画に反映することが求められる。

筆者らは、既に地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」を開発しており¹⁾、機械基礎の振動に対する増杭や基礎拡幅などの対策効果の検討や、建設工事振動に対する地中防振壁や防振溝などの対策効果の検討などを実施している²⁾。

近年、機械の大型化や高機能化により発生振動が大きくなっているにもかかわらず、振動に対する許容値や要求性能はますます厳しくなっており、従来の対策手法だけでは要求を満足できない、あるいはコストが大幅に増加してしまう等の事例が発生している。そのため、従来の対策手法に加え、より実用的かつ効果的な振動対策を検討する必要がある。

振動対策の一案として地盤改良が考えられる。セメント系改良地盤は、軟弱な土壌に固化剤を攪拌・混合して強度を増加させた地盤であり、うまく利用すれば、比較的簡便かつ安価に振動を低減できる可能性がある。しかし、地盤改良による振動低減効果を精度よく評価するためには、周辺地盤を含む広域の振動を三次元有限要素法等で解析する必要があり、計算時間・計算機容量とも多大で実用的な予測・評価が難しい。

そこで筆者らは、三次元薄層要素法と三次元有限要素法の六面体要素を用いて改良地盤と周辺地盤をモデル化し、地盤改良による機械基礎振動や工事振動の低減効果を実用的に予測・評価する解析ソフトを開発した。

本論文では、解析ソフトの概要と適用事例を示すと

もに、パラメータスタディにより地盤改良の強度や厚さが振動低減効果に及ぼす影響について示す。

2. 解析ソフトの概要

開発した解析ソフトの概要を示す。以下に解析モデルと解析の手順について述べる (Fig. 1)。このソフトは、対称条件や並列計算などにより、地盤改良による振動低減効果を短時間で精度良く評価することができるものとなっている。解析はすべて周波数領域で行われ、時刻歴へはFFTを用いて変換する。

- 1) 機械基礎や工事機械の位置、振動を観測する位置、および改良する地盤の位置に節点を設け、三次元薄層要素法³⁾を用いて節点間の加振力と応答変位の関係を計算し、成層自由地盤の柔性マトリクスを評価する。
- 2) 柔性マトリクスの逆行列を計算し、成層自由地盤内各節点の剛性マトリクスを評価する。
- 3) 成層自由地盤のうち、改良地盤と入れ替わる地盤の剛性マトリクスを、三次元有限要素法の六面体要素を用いて計算し、2)で計算した剛性マトリクスから差し引く。
- 4) 同様にして、改良地盤の剛性マトリクスを計算し、3)で計算した剛性マトリクスに加える。
- 5) 以上のように構成した剛性マトリクスを用いて、加振点の加振力に対する評価点の応答を算定する。
- 6) あるいは、基礎などを剛体と仮定して、基礎と接する地盤のインピーダンス関数を算定し、基礎と接合して応答を求める。

3. 解析結果の検証

地盤改良による振動対策効果を評価するため、地盤改良を施した路面上をダンプトラックが走行する時の振動測定を実施した。その結果と開発ソフトによるシミュレーション解析の結果を比較し、ソフトの予測精度を確認する。

3.1 振動測定の概要

測定現場は非常に軟弱な地盤であり、ダンプトラックの走行路には地盤改良が施されている場所がある。改良地盤の一軸圧縮強度は $quf=1750\text{kN/m}^2$ であり、改良地盤の厚さが0.3mと0.7mの場所、および地盤改良を施していない場所で振動測定を実施した。

測点は4点とし、ダンプトラックの走行路の中央から、道路に直交する方向へ5m、10m、20m、40mの位置とした (Fig. 2)。測定した加速度波形の中から、ダンプトラックに土砂を積載した場合と積載していない場合それぞれ2ケースを抽出し、1/3オクターブバンド周波数分析を実施した。

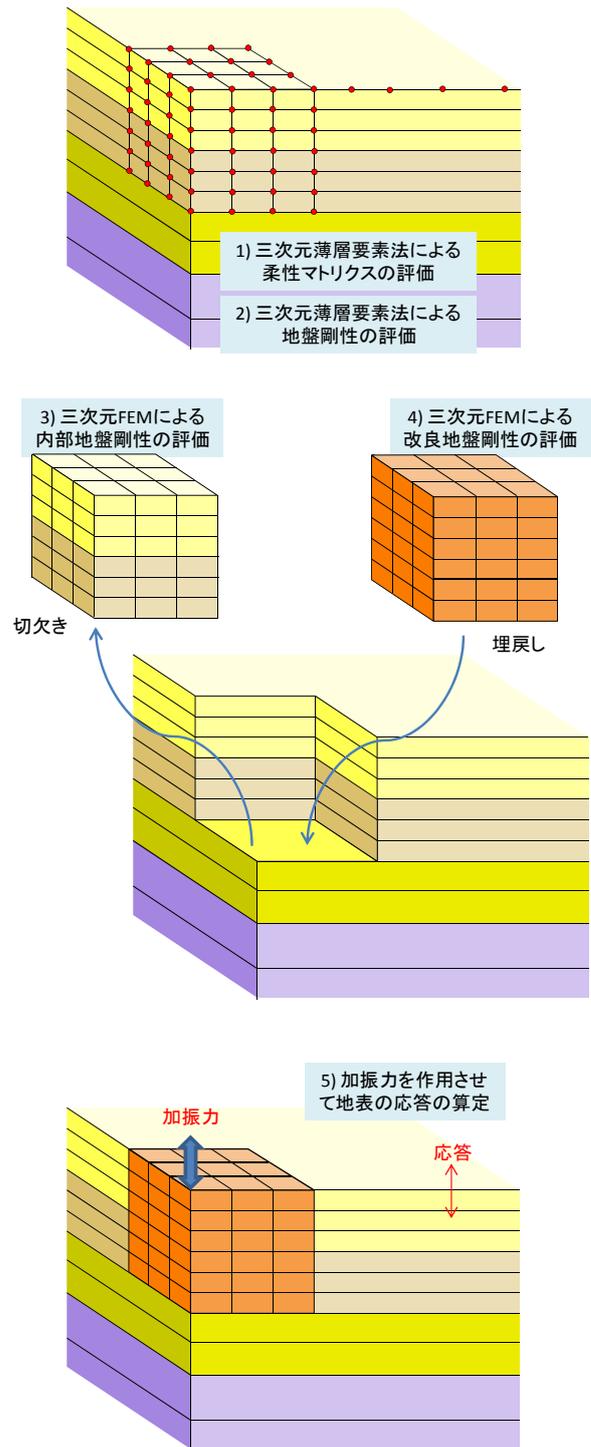


Fig. 1 解析モデルと解析手順
Calculation Model and Calculation Step

3.2 解析シミュレーションの概要

地盤改良を施していない場所での振動測定の結果 (5m地点で測定した加速度波形) から、「ゆれみる[®]」を用いて、ダンプトラックから道路表面に作用する加振力波形を算定する。

さらに、算定した加振力波形を、地盤改良を施した路面に加えた時の、各測点の応答加速度波形を、本開発ソフトを用いて算定する。

いずれの解析も、地盤の動的物性はボーリング柱状図のN値から推定した。また、改良地盤の動的物性は地盤の一軸圧縮強度 quf とS波速度 Vs との関係式⁴⁾を用いて評価し、 $Vs=475m/s$ と仮定した。

3.3 解析シミュレーションの結果

各測点で実測した加速度波形を1/3オクターブバンド周波数分析した結果と、解析シミュレーションで算定した各測点の波形を周波数分析した結果を比較する。いずれの分析も波形の最大値をとるものとする。

Fig. 3とFig. 4は、それぞれ土砂を積載したダンプトラックが改良厚さ0.7mの道路を通過した時の結果と、土砂を積載していないダンプトラックが改良厚さ0.3mの道路を通過した時の結果を表わしている。このグラフは3

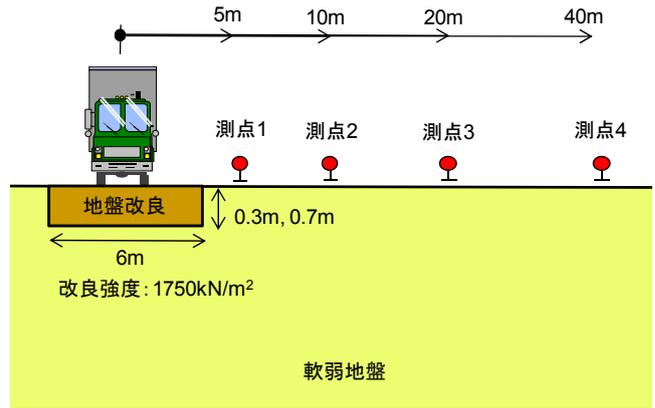


Fig. 2 地盤と測点の概要
Overview of the Ground and Measurement Point

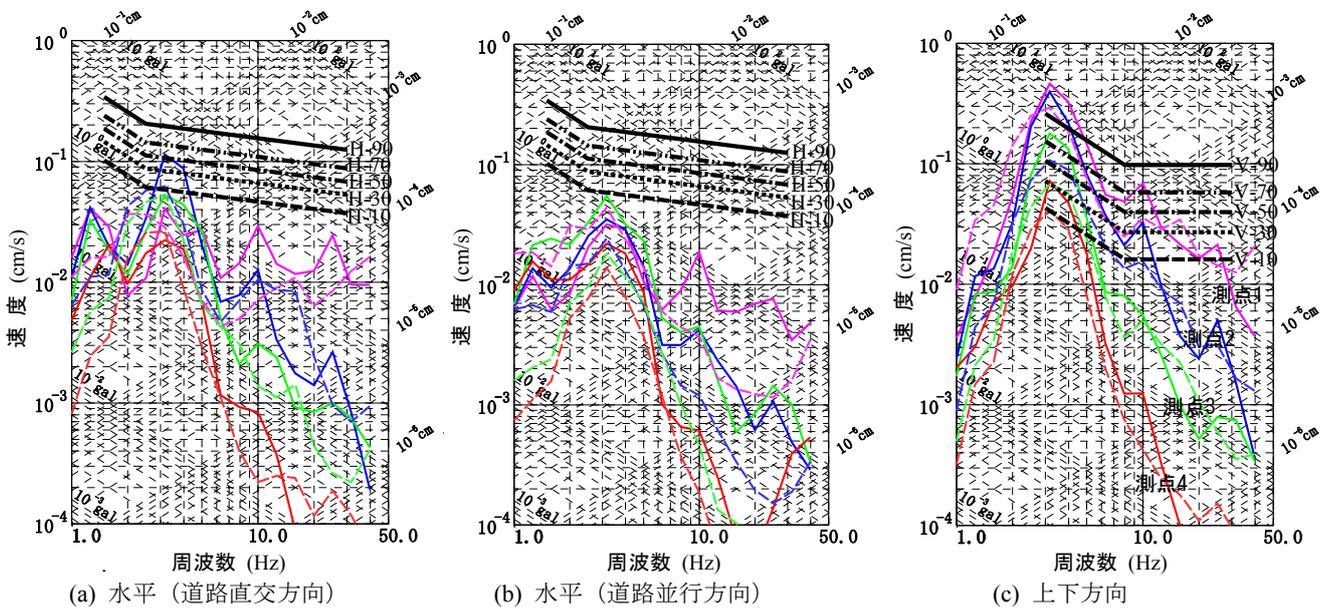


Fig. 3 積載したダンプトラックの走行による地盤の振動 (地盤改良厚さ0.7m)
Ground Vibration by Loaded Dump Truck Driving (Ground Improvement Depth : 0.7m)

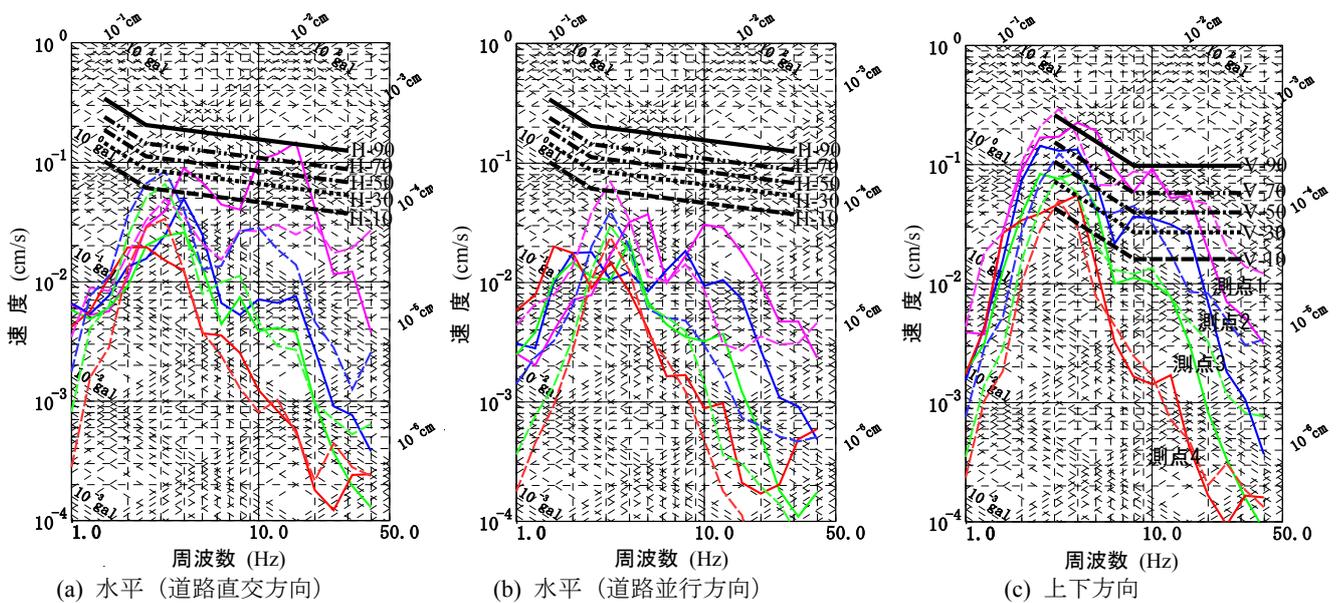


Fig. 4 積載していないダンプトラックの走行による地盤の振動 (地盤改良厚さ0.3m)
Ground Vibration by Unloaded Dump Truck Driving (Ground Improvement Depth : 0.3m)

軸グラフであり、横軸は周波数（単位：Hz）、縦軸は振動速度（単位：cm/s）を表わし、他の斜め2軸に変位（単位：cm）と加速度（単位：cm/s²）を表わしたものである。図中の色のついた実線は実測波形の周波数分析の結果、破線は解析シミュレーションの周波数分析の結果を表わしており、桃色、青色、緑色、赤色はそれぞれダンプの走行路から5m、10m、20m、40mの地点の結果を示している。また、黒い太線で居住性能評価曲線⁵⁾（上からH(V)-90、H(V)-70、H(V)-50、H(V)-30、H(V)-10；それぞれ10%、30%、50%、70%、90%の人がようやく振動を感じるレベルとされている）を併記している。

実測結果（実線）と解析結果（破線）を比較すると、加振力を算定した地点と解析シミュレーションを実施した地点とで路面の状態や車両のスピードが若干異なるために誤差があるものの、両者はある程度の精度で一致しており、特に振動が大きい上下方向の結果は精度良く一致していることが分かる。これより、本開発ソフトによる予測シミュレーションにより、地盤改良による振動低減効果が、実用的な精度で評価できるものと考えられる。

4. 解析による振動低減効果の評価

本開発システムによるパラメータスタディを実施し、地盤改良による振動低減効果について考察する。

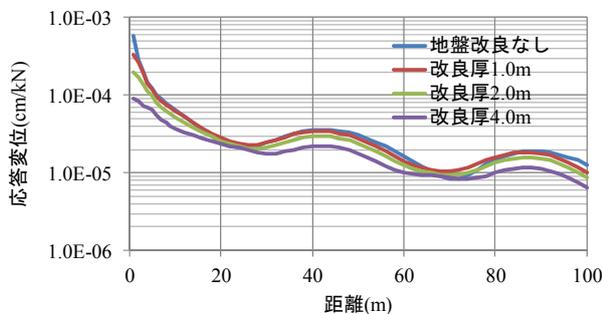
4.1 地盤改良による工事振動の低減効果

工事振動に対する地盤改良の振動低減効果を考察する。地盤改良前の地盤は、S波速度100m/s、P波速度300m/s、密度1.6t/m³の厚さ20mの表層と、S波速度300m/s、P波速度1000m/s、密度1.8t/m³の基盤を持つ2層地盤とする。また、改良地盤の動的物性は基盤と同じものとする。地盤改良は地表の10m×10mの範囲に施工し、この領域の中央に工事機械があるものとして上下方向に加振力を作用させる。また、距離減衰を評価するため、地表に振動評価点を55点設ける。加振点からの距離は1mから100mまでとする。

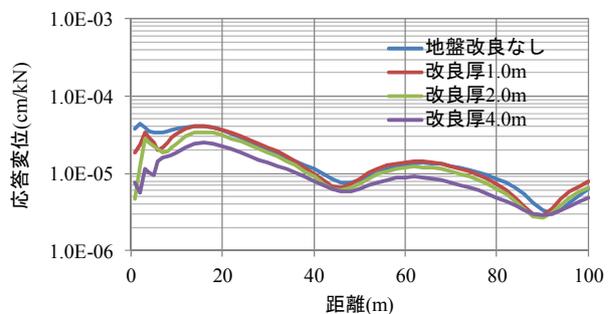
加振力は、振幅1kNの定常加振力とし、加振周波数は1Hzから30Hzまで1Hz刻みとする。また、解析ケースは、地盤改良を施さない場合と地盤改良の厚さを1.0m、2.0m、4.0mとした場合の計4ケースとする。

Fig. 5とFig. 6にそれぞれ加振周波数が5Hzと15Hzの定常加振力に対する応答変位振幅の距離減衰を示す。これより、加振周波数は5Hzよりも15Hzの場合の方が改良地盤による振動低減効果が大きいこと、改良地盤が厚いほど振動の低減も大きいことが分かる。特に改良地盤の厚さが1mの場合は、5Hzでは加振点の直近以外ほとんど振動低減効果が見られないのに対し、15Hzではかなり大きな振動低減が見られる。

Fig. 7は、加振点からの距離が10mの評価点における応答変位振幅と加振周波数の関係を示したものである。これより、加振周波数が高いほど振動低減効果が大きい傾向にあることが分かる。特に、地盤改良が1.0mの場合の



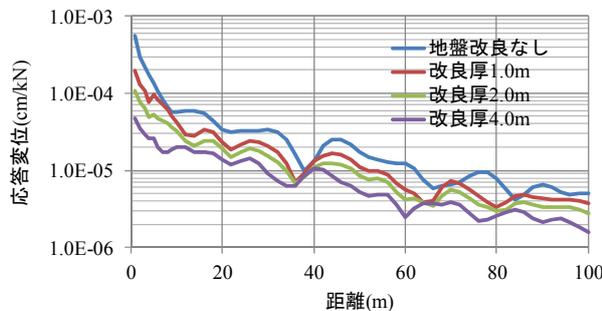
上下方向応答変位



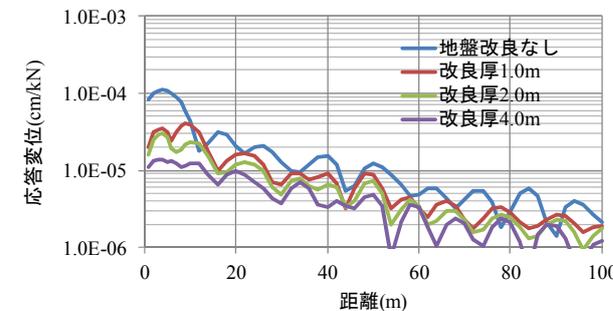
水平方向応答変位

Fig. 5 工事振動に対する距離減衰（地盤改良厚さによる比較、5Hz定常加振）

Attenuation of Vibration by Distance (Comparison by Depth of Ground Improvement, 5Hz Uniform Load)



上下方向応答変位



水平方向応答変位

Fig. 6 工事振動に対する距離減衰（地盤改良厚さによる比較、15Hz定常加振）

Attenuation of Vibration by Distance (Comparison by Depth of Ground Improvement, 15Hz Uniform Load)

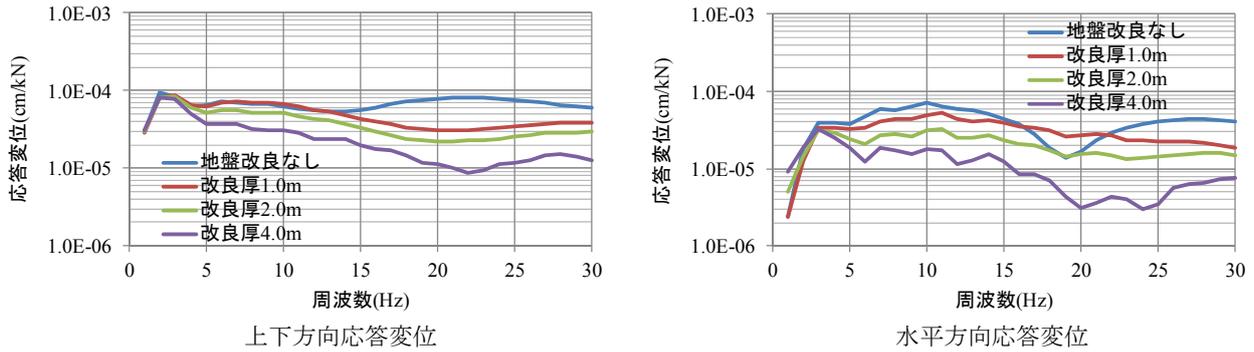


Fig. 7 距離15m地点の周波数特性 (地盤改良厚さによる比較)
Vibration of Distance 15m by Frequency (Comparison by Depth of Ground Improvement)

上下方向は、13Hzまで振動の低減が全く見られない。

4.2 地盤改良による機械基礎振動の低減効果

機械基礎の振動に対する地盤改良の振動低減効果を考察する。地盤改良前の地盤構造は前節の工事振動の場合と同じものとする

基礎は、平面形状が6m×6m、厚さ1mのRC地表面基礎とし、剛体として運動するものと仮定する。

加振力は振幅1kNの定常加振力とし、加振周波数は1Hzから30Hzまで0.2Hz刻みで146ケースとする。これを基礎の上端中央に加える。加振方向は上下と水平の二通りとする。地盤改良は機械基礎の直下に施すものとし、改良を施していない場合と施した場合を比較する。

Fig. 8は、地盤改良の厚さを0.5m、1.0m、2.0m、3.0mとした場合の加速度応答を計算し比較したものである。左側と右側のグラフは、それぞれ上下定常加振力に対する基礎の上下方向応答加速度、水平定常加振力に対する基礎底面の水平方向応答加速度の結果を示している。ここで、改良地盤の物性は基盤と同じものとする。

これらの結果より、いずれの方向の加振力の場合も、地盤改良が厚くなるほど応答加速度は小さくなっており、

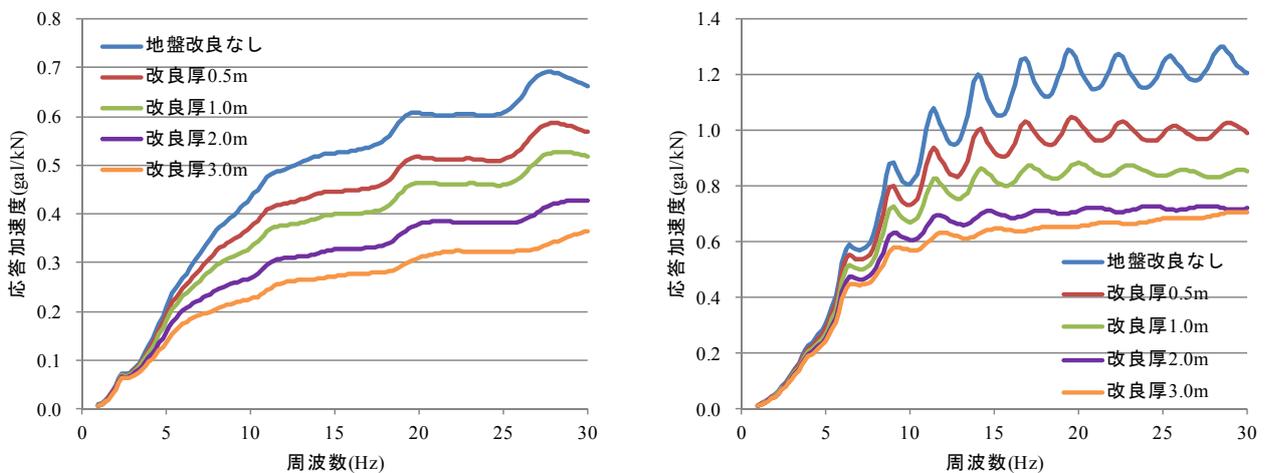
振動低減効果が大きいことが分かる。

Fig. 9は、地盤改良の厚さを2.0mに固定し、地盤改良の強度を変えた場合の加速度応答を計算し比較したものである。ここで、改良地盤の密度とポアソン比は共通とし、強度はS波速度 V_s で比較する。 V_s は、150m/s、200m/s、300m/s、400m/sの4種類とする。

これらの結果より、いずれの方向の加振力の場合も、改良地盤の強度が高くなるほど (V_s が速くなるほど) 応答加速度は小さくなっており、振動低減効果が大きいことが分かる。ただし、 V_s が300m/sと400m/sの場合の結果の差は小さく、これ以上強度をあげても振動低減効果は上がらないものと予想される。

Fig. 10は、地盤の表層の厚さが3mの時に、地盤改良の厚さを0.5m、1.0m、2.0m、3.0mとした場合の加速度応答を計算し比較したものである。すなわち、改良厚3mの場合は改良地盤が基盤まで届いていることになる。

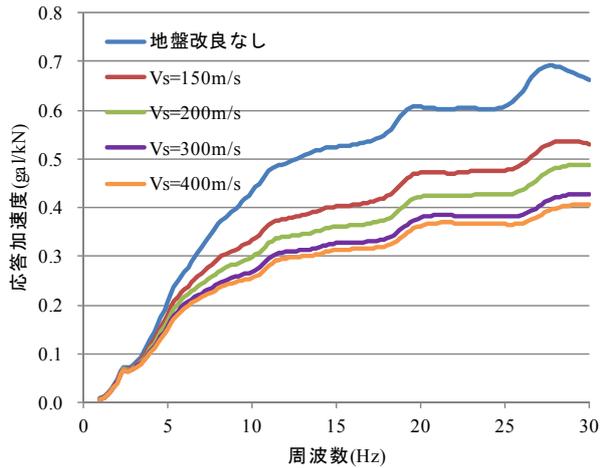
これらの結果より、上下方向の加振力に対する上下応答は、地盤改良がない場合12Hz～13Hzに表層地盤の共振と考えられるピークがあるのに対し、地盤改良を施すとこのピークが小さくなり、改良地盤が基盤に届く厚さ3mの場合はピークがなくなって応答がかなり低減されるこ



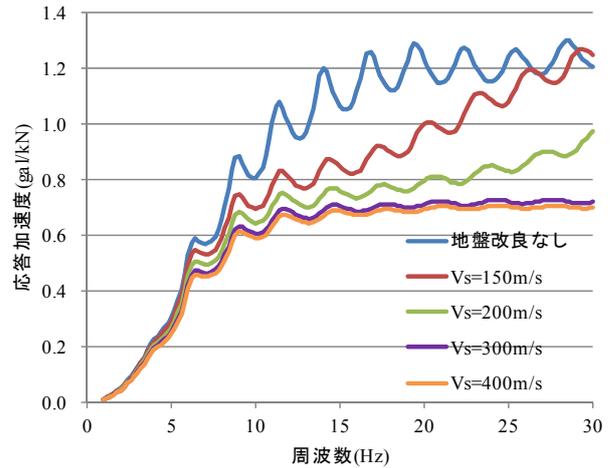
上下定常加振に対する上下応答加速度

水平定常加振に対する水平応答加速度

Fig. 8 基礎の応答加速度 (地盤改良厚さによる比較, 表層厚20m, 地盤改良強度は一定)
Response Acceleration of Foundation (Comparison by Depth of Ground Improvement, Surface Layer 20m)

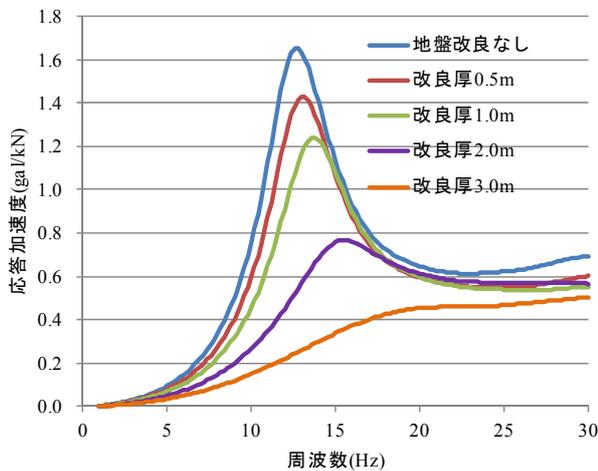


上下定常加振に対する上下応答加速度

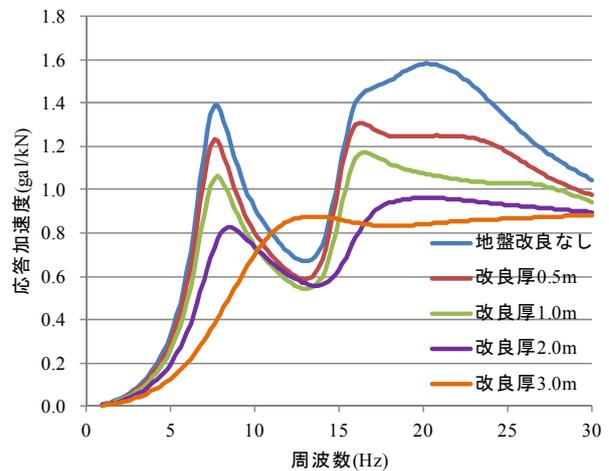


水平定常加振に対する水平応答加速度

Fig. 9 基礎の応答加速度（地盤改良強度による比較，地盤改良厚さは2.0m一定）
Response Acceleration of Foundation (Comparison by Strength of Ground Improvement)



上下定常加振に対する上下応答加速度



水平定常加振に対する水平応答加速度

Fig. 10 基礎の応答加速度（地盤改良厚さによる比較，表層厚3m，地盤改良強度は一定）
Response Acceleration of Foundation (Comparison by Depth of Ground Improvement, Surface Layer 3m)

とが分かる。水平方向の加振力に対する水平応答も，地盤改良を施すことにより8Hz付近のピークが低減される。

5. まとめ

三次元薄層要素法と三次元有限要素法の六面体要素を用いて，地盤改良による振動低減効果を実用的に予測・評価する解析ソフトを開発し，これを工事振動や機械振動の予測に適用した解析事例により，地盤改良の強度が高く，改良厚さが厚いほど振動低減効果は大きくなることを示した。

今後，適用事例を増やし，実測との比較を数多く実施することによりノウハウを積み重ね，予測精度をさらに向上させてゆく予定である。

参考文献

- 1) 高野真一郎，他：地盤を伝わる環境振動技術—地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」，大林組技術研究所報，No.69，(2005)
- 2) 高野真一郎，他：地盤を伝わる環境振動予測システム「ゆれみる[®]」の新機能—防振地中壁による振動抑制効果の検討—，大林組技術研究所報，No.68，(2004)
- 3) 高野真一郎，他：飽和多孔質成層地盤の三次元薄層要素法による点加振解とその応用，日本建築学会構造系論文集，第504号，pp.49～56，(1998)
- 4) 浅香美治，他：室内配合試験によるセメント改良土のせん断波速度と一軸圧縮強さの関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.443～444，(2003)
- 5) 建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説：日本建築学会，(2004)