

ローコストな地盤環境振動対策の基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON A LOW-COST METHOD FOR REDUCTION OF GROUND VIBRATION

成田 修英*, 保井 美敏*, 松本 喜代隆**, 山本 健史*

Nobuhide NARITA, Mitoshi YASUI, Kiyotaka MATSUMOTO and Takeshi YAMAMOTO

In this paper, we propose a low-cost method for reduction of ground vibration by putting down a weight on ground. In this method, vibration source shake the ground and weight. When the weight is shaken, inertial force is generated in the weight. This inertial force acts as a new source of vibration to ground. Thus, in this method, response of the ground is represented as the superposition of 2 waves. The 1st wave is a wave generated by the vibration source, and the 2nd wave is a wave generated by the inertial force of the weight. The principle of this method is that the two waves interfere and are canceled by each other.

We conducted a preliminary test and numerical simulation for this method. And we got the following findings.

1. From the preliminary test, the ground vibration is reduced by weight.
2. From the preliminary test, effect of weight is greater the weight is heavy.
3. Effect of weight may not appear in the low frequency side.
4. In numerical simulation, effect of weight was reproduced qualitatively.
5. In numerical simulation, we confirmed that the two waves interfere and are canceled by each other.

Keywords : *Ground Vibration, Forced Vibration Test, Reduction of Ground Vibration, Wave Interference*
 地盤環境振動, 加振試験, 振動低減, 波の干渉

1. はじめに

建設工事振動に関する苦情件数は、1970年代～90年代にかけて減少傾向にあったが、近年では全国で年 2,000～3,000 件程度¹⁾を維持して推移しており苦情件数は横ばいの状態にある。

苦情件数が減らない理由としては、都市の高密度化に伴って工事現場と近隣との距離が狭まったこと、騒音規制法の制定以降、工場や道路が静かになり相対的に建設工事の振動が目立ちやすくなったこと、などが考えられる。いずれにしても、工事振動対策には一定のニーズが見込まれるという事が言える。

工事振動を抑えるためには、基本的に施工方法や施工機械において低振動のものを選択するのが合理的である。もっと振動を落としたい場合や、施工計画画上振動の大きい工法や機械を選択せざるを得ない場合は、振動の伝播経路上での対策すなわち地盤での振動対策が実施される。

地盤における既往の振動対策工法としては、種々の防振壁工法^{2),3)}などや WIB 工法⁴⁾などがある。これらの工法はいずれも大規模な土工事を必要とし、また一部の防振壁は材料も非常に高価になるため、工事振動低減のための仮設としてこれらを実施できる物件はかなり限られてくるものと思われる。

本報では、工事振動低減のためのローコストな振動対策として、地表に錘を設置する工法（以下、提案工法と呼ぶ）を提案し、その効果について基礎的な検討を行った結果について述べる。

2. 錘による地盤環境振動低減工法の概要

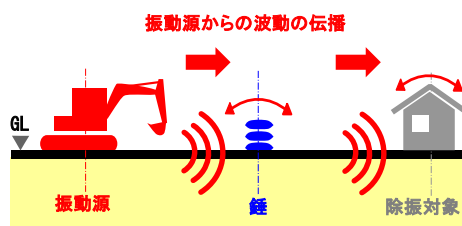


図-1 振動源からの波動の伝播

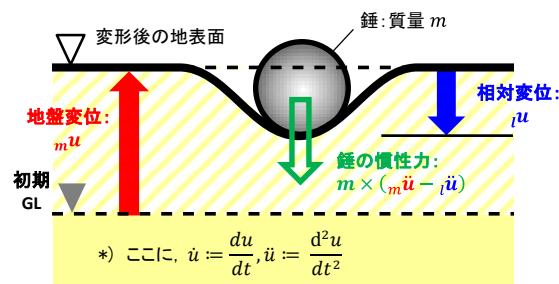


図-2 地盤 - 錘間の相互作用の模式図

提案工法の概要について説明するため、まず図-1に振動源から広がっていく波動（以下、主要波と呼ぶ）の模式図を示す。この波動により、除振対象および錘の振動が励起される。このとき、地盤 - 錘間の相互作用は図-2 のように表される。

図-2 にあるように、錘は基本的には地表面の動きに追従して動くものの、慣性力の効果があるため、完全に（錘の影響がない場合の）地表面と同じ動き

* 戸田建設(株)技術研究所 修士 (工学)

** 戸田建設(株)技術研究所

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

Technical Research Institute, TODA CORPORATION

にはならない。錘は慣性力と地表面から受ける力(図-2 の場合、錘の地表面へのめり込みに対する反力)が釣り合う位置で応答する。

地盤の側から見れば、錘底面の位置に錘の慣性力分の荷重が常に働くことになる。この慣性力の効果は錘の底面(慣性力の載荷点)を中心として地盤全体に波として広がっていく(図-3 参照、以下、この波を連動波と呼ぶ)。

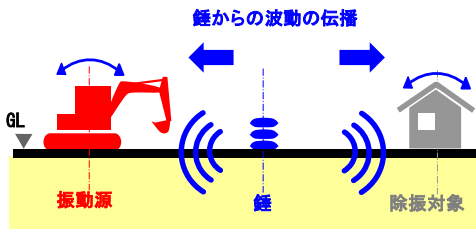


図-3 錘の慣性力による波動の伝播

以上より「錘が有る場合の実際の地盤応答」=「主要波」+「連動波」とし、それぞれ改めて以下のように定義する。

主要波：錘が無い場合に、振動源を中心として地盤に広がっていく変位場。錘が無い場合の地盤応答。

連動波：「錘が有る場合の実際の地盤応答」から「錘が無い場合の実際の地盤応答(主要波)」を引いた差分。錘の効果を表す地盤応答であり、物理的には錘の慣性力による波動、あるいは図-2 における相対変位が錘底面を中心として広がっていく波動として解釈できる。

主要波と連動波を干渉させ、互いの揺れを相殺させるのが提案工法における振動低減の原理である。

この工法は波の干渉を利用するため、地点によって効果にむらができ、また地点によっては振動が大きくなることもあり得る。しかしながら(錘以外の部分の)系全体としては、以下の理由により、錘の効果は基本的に振動を低減させる方向に働くものと考えられる。

- 1) 主要波に対する錘の応答が連動波の発生要因であり、連動波の発生有無(錘の有無)によらず振動源から入力されるエネルギーの総量は変わらない。連動波が発生しても波動のエネルギーが増えるわけではない。
- 2) 錘の有無によらず振動源から全体系へ入力されるエネルギーの総量は一定なので、錘へ分配されるエネルギーの分だけ他の部分へ分配されるエネルギー量は減る。

3. 予備実験

前章で述べた錘の効果はどの程度現れるのか簡易に確認することを目的とし、実大の建設現場で想定されるよりも小さいスケールでの予備実験を行った。

3.1 実験概要

実験概要を図-4 に、実験状況を写真-1 に示す。加振点と錘の中心を結ぶ直線に加速度計を配置し、加振時の鉛直方向の地盤応答加速度が錘の有無に

よってどのように変化するか測定する。図-4 にあるように、加振にはバングマシン、錘には土のうを用いる。土のうは縦3袋×横4袋×高さ4段で約1.2m×1m×0.4mで、総重量882kg(平均18kg/袋)である。なお、土のうは事前に用意したもので、内容物は現地の土ではなく粒径数mm~1cm程度の礫である。

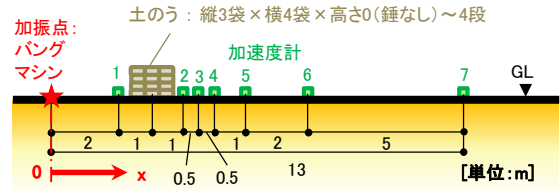


図-4 実験概要



写真-1 実験状況(土のうを2段目まで積んだ状況)

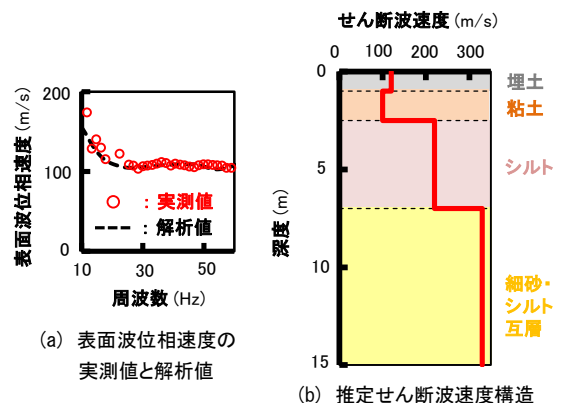


図-5 実験場の地層構成

表-1 実験場の地盤諸元

| 土質 | 下端深度 (m) | 密度 (t/m ³) | Vs (m/s) | ポアソン比 | Q 値 |
|--------|----------|------------------------|----------|-------|-----|
| 埋土 | 1.0 | 1.8 | 120 | 0.30 | 20 |
| 粘土 | 2.5 | 1.8 | 100 | 0.30 | 20 |
| シルト | 7.0 | 1.8 | 220 | 0.30 | 20 |
| 細砂・シルト | - | 1.8 | 330 | 0.30 | 20 |

実験場の地盤諸元を図-5 および表-1 に示す。これらの値は、図-5 (a)の表面波位相速度実測値を元に薄層法を用いて逆解析を行い推定したものである。地層区分は隣の敷地の標準貫入試験結果を元に決定した。また、表面波位相速度の実測値は、錘の無い実験ケースにおける各測点の加速度応答の位相差(時間差)より算出している。

3.2 実験結果

実験における錘の効果を図-6 に示す。同図において、縦軸は「錘が有る実験ケースの地盤の加速度応答振幅」を「錘が無い実験ケースの値」で割った結果であり、錘による地盤振動の低減効果を表す（縦軸の値が小さいほど錘の効果が大きい）。同図より、錘の効果により確かに地盤の振動が低減されること、錘は重いほど効果が大きい傾向のあることが確認できる。

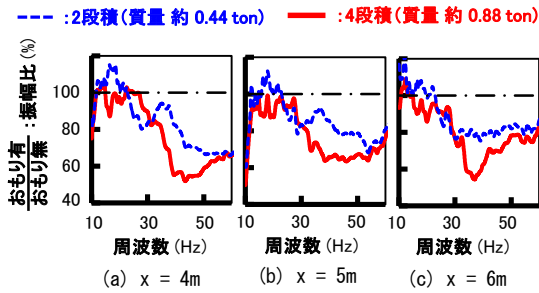


図-6 実験における錘の効果

図-6 において、低周波数側（概ね 30Hz 以下の範囲）で錘の効果が低い傾向が見られるが、これは地盤の動的復元力特性の性質から説明できる。まず簡単のため、錘底面で応力が均質であると仮定すると、図-2 における地盤の復元力は Kelvin-Voigt モデルを用いて置換することができ、このとき地盤 - 錘間の相互作用は図-7 のように表される。実験場における図-7 の地盤ばねを、表-1 の地盤諸元（および、錘の底面積が 1.2m² であるという条件）を用いて薄層法で計算すると図-8 のようになる。

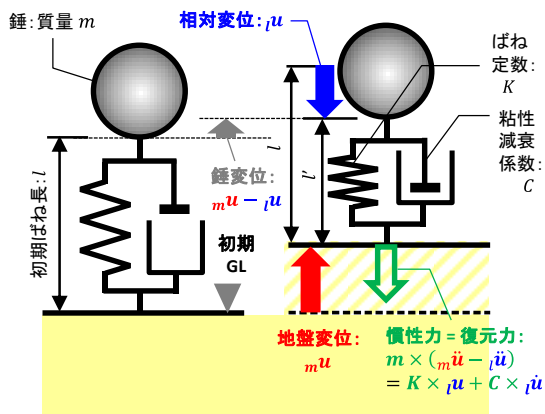


図-7 地盤の復元力を Kelvin-Voigt モデルで置き換えた地盤 - 錘間の相互作用の模式図

図-8(a) において、地盤のばね定数は低周波数側ほど高い傾向を示している。一方、図-7 のモデルにおいて「錘底面での連動波の振幅」＝「ばねの変形量」であるため、錘の慣性力に対してばねが十分に強い場合は連動波の振幅は非常に小さくなる。したがって図-8 より、本実験における連動波の振幅は低周波数側で非常に小さくなる可能性があり、このことは図-6 の結果と整合している。

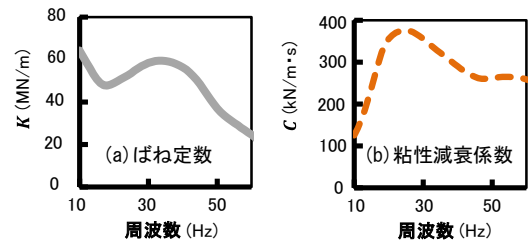


図-8 実験場における土のう底面の推定鉛直地盤ばね

なお、高周波数側でばねが低下する傾向は、本実験の地盤に限らず連続体一般の性質であり、図-6 に現れている周波数特性は、本実験以外のケースでも広く一般に表れることが予測される（もちろん地盤条件によって錘の効果の現れてくる周波数帯がずれたり、局部的に効果に山谷が現れたりすることはあり得る）。

3.3 数値シミュレーション

提案工法の効果予測方法について検討するため、時間領域 3 次元有限差分法⁵⁾による数値シミュレーションを行った。

(1) 数値解析概要

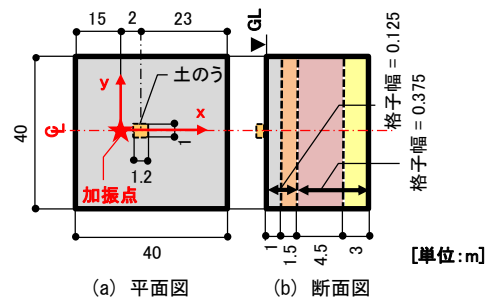


図-9 解析モデル図

解析モデルの概要を図-9 に示す。地盤の諸元は表-1 の値を用いる。減衰は Graves の方法⁵⁾により $f_0 = 30$ (Hz) で評価し、モデルの側面および底面には $\alpha = 0.015$ の吸収領域を幅 7.5m で設定する (α は吸収領域における 1 格子あたりの吸収率を決めるパラメータ)。解析時間は 0.5 秒間で、時間刻みは 2.5×10^{-5} (sec) である（計 20,000 ステップ）。

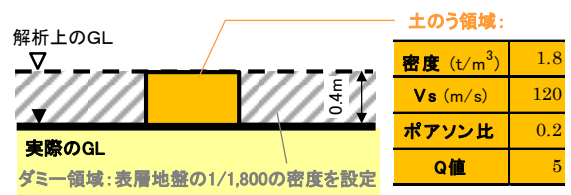


図-10 地表に土のうのある解析モデル

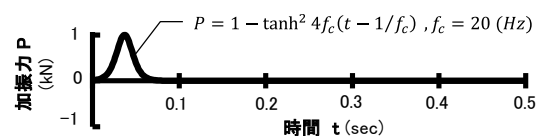


図-11 解析に用いた加振力

今回用いた解析手法では、矩形の領域しか解析の対象にできないため、地表に設置された錘は図-10のような形でモデル化している。錘が無い場合の計算は、表層 0.4m を全てダミー領域として行う。

以上のようなモデルに対し、地表の载荷点に図-11の疑似インパルス荷重を与えた時の地盤の応答を計算する。

(2) 解析値と実測値の比較

錘が無い場合の地表面の加速度応答波形を実測値と比較して図-12に示す。同図より、波の走時および距離減衰の度合いにおいて解析値と実測値は概ね対応している。このことから、解析に用いた地盤モデルである程度実地盤の波動伝播性状が再現できていることが確認できる。

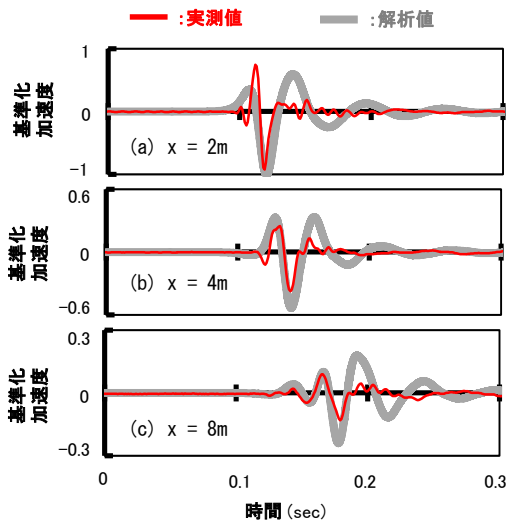


図-12 加速度 (x = 2m 地点最大振幅で基準化) 時刻歴波形における実測値と解析値の比較

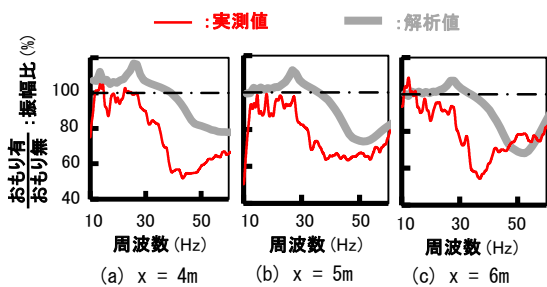


図-13 解析結果と実測値の比較:土のう4段積の場合

解析における錘の効果を実測値と比較して図-13に示す。同図より、低周波数側で錘の効果が小さく高周波数側で効果が顕著になるという点において、定性的には解析値と実測値は対応している。したがって、ある程度のところまでは解析により現象を再現できているものと思われる。

しかしながら、定量的に解析値と実測値を比較すると、解析値の方が効果の出始める周波数が高く、また解析値の方が全般に効果が小さい傾向を示しており、両者はそれほど高い精度で対応しているとは言えない。この定量的な違いについては、解析モデルや手法の不備で再現できていない現象があるのか、

単純に解析に用いた地盤（と土のう）の諸元が不適切だったのか（図-13については、解析モデルの地盤ばねが何割か弱くなれば、解析値と実測値のずれは小さくなるであろうことが予測できる）、現時点では解明できていない。なお、土のうが 2 段の場合についても別途解析を実施し、同様の傾向を示すことを確認している。

地盤の諸元について補足すると、表面波位相速度（図-5(a)）や図-12の波動伝播特性を再現できるような地盤モデルはただ一つには定まらないため、表-1の地盤諸元には修正の余地が残されており、これを修正することで解析値と実測値のずれが小さくなるということは十分考えられる。ただし、差分法による 3 次元的地盤振動の計算には非常に時間がかかるため、闇雲に試行錯誤してそれを確かめるのは現実的ではない。

定量的な部分の検証については、今後、PS 検層等の詳細な地盤調査により地盤条件を明らかにした上で（もしくは、そのような資料が既にある敷地について）行うものとする。

4. 解析における主要波と連動波

錘の効果が主要波と連動波の干渉によるものであることを解析的に確認する。この章の検討では錘の効果を見やすくするため、地盤の諸元は以下の表-2の値を用いて、錘が有る場合と無い場合それぞれ解析を行う。その他の解析条件は 3 章で用いた条件をそのまま用いる。

表-2 連動波の特性検証解析における地盤諸元

| 土質 | 下端深度 (m) | 密度 (t/m ³) | Vs (m/s) | ポアソン比 | Q 値 |
|--------|----------|------------------------|----------|-------|-----|
| おもり | - | 5.0 | 60 | 0.20 | 5 |
| 埋土 | 1.0 | 1.8 | 60 | 0.20 | 20 |
| 粘土 | 2.5 | 1.8 | 60 | 0.25 | 20 |
| シルト | 7.0 | 1.8 | 150 | 0.30 | 20 |
| 細砂・シルト | - | 1.8 | 200 | 0.30 | 20 |

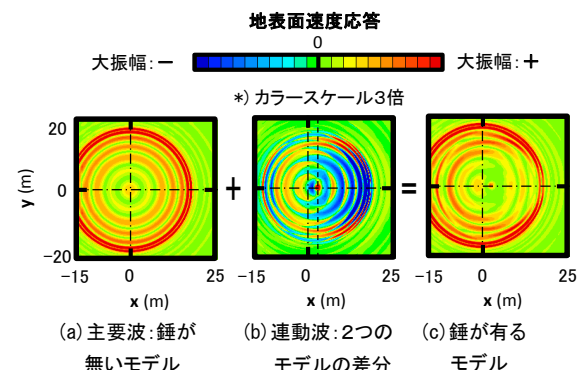


図-14 解析における主要波と連動波のコンター (加振 0.5 秒後)

解析で得られた地表面応答のコンターを図-14に示す。同図(a)より主要波は加振点 (x=0m, y=0m) を中心に同心円状に広がっていることが確認できる。また、(c) より、錘の有るモデルは無いモデル(a)に

比べ、錘の前方部分 $x = 5 \sim 10$ 数 m, $y = \pm 10$ m 程度の範囲において振動が低減していることが確認できる。

図-14(c) のコンターの値から(a) のコンターの値を引いた結果を示したものが、連動波の振幅を表す(b) のコンターである(見やすくするため(b)のみカラスケールを3倍に拡大している)。(b)より、連動波においても同心円状に波が広がっていく傾向が確認できる。ただし、(b)における同心円の中心は加振点ではなく錘の中心位置($x = 2$ m: 図中波線で示す, $y = 0$ m)となっている。また、(b)では最外周の円の半径が(a), (c)に比べて小さいが、これは波動が加振点から錘まで伝播する所要時間と波動が錘底面位置に到達してから錘が振動を始めて地盤に力を加えるまでの時間の分だけ、主要波よりも波動伝播の開始時刻が遅れることによるものだと考えられる。以上より、図-14(b)の連動波が、2章 図-1~3 で当初想定した通りの性質を示していることが確認できる。

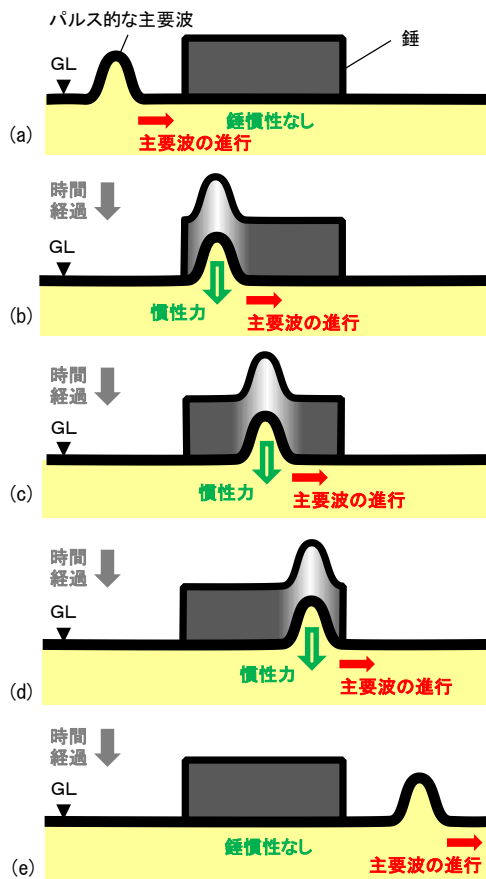


図-15 主要波の進行と錘慣性力発生時の模式図

さらに図-14(a) と(b) を比較すると、(a) の主要波では同一円周上で波の振幅がほぼ均一な傾向を示しているのに対し、(b) の連動波では同一円周上でも位置によって波の振幅が異なる傾向を示しており、錘から見て主要波の進行方向前方側($x > 2$ m)と後方側($x < 2$ m)で顕著な差が見られる。このことについて検討するため、主要波の進行とそれに伴う錘慣性力発生時の模式図を図-15 に示す。同図にあるように、錘

の慣性力はまず加振点に近い側で生じ、加振点から離れるほど遅れて生じる傾向を示す。つまり、連動波の元となる慣性力の作用点は、錘底面の範囲内において加振点に近い側から遠い側に移動し、このことにより連動波にはドップラー効果が生じる。これが図-14(b)において錘の前後で連動波の振幅が異なる原因であると考えられる。

5. まとめ

地表に錘を設置する振動対策工法を提案し、その効果について基礎的な検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 実験より、地表に錘を設置することで確かに振動が低減されることを確認した。
- 2) 実験より、錘を重くするほど効果が大きくなる事を確認した。
- 3) 一般に、低周波数側では錘の効果は現れ難いことを示した。
- 4) 数値解析においても、定性的には錘の効果が再現できることを確認した。
- 5) 錘による振動低減効果は、主要波と連動波の干渉の結果として現れることを解析的に確認した。

今後の検討課題として以下の3項目が挙げられる。

- 1) 地盤の諸元が詳細に明らかになっている条件で、定量的に精度の高い数値シミュレーションが実施できるかどうか確かめること。
- 2) 3次元有限差分法は計算負荷が高く、仮設計の実務レベルでは手間がかかり過ぎるため、実務レベルの簡易な計算手法を開発すること。
- 3) 提案工法の効果予測の精度には対象地盤の地盤ばねの推定精度がクリティカルに効いてくるため、この推定精度を確保する方法について検討すること。

謝辞

独立行政法人 建築研究所、構造研究グループ 主任研究員、平出務氏には予備実験に際し実験フィールドを提供いただいた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 環境省環境管理局大気生活環境室 「よくわかる 建設作業振動防止の手引き」, http://www.env.go.jp/air/sindo/const_guide/index.html
- 2) 榎原、大塚、深田、早川「地盤環境振動対策へのハイブリッド振動遮断壁の適用性に関する考察」, 土木学会論文集 G, Vol.64 No.3, pp.276-288, 2008.9
- 3) 早川、原、植野、西村、庄司「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, 2006.7
- 4) 竹宮「交通振動による小規模建築物の影響予測と対策技術」, 基礎工, pp.33-36, 2011.10
- 5) 青井、早川、藤原「地震動シミュレータ: GMS」, 物理探査, 第 57 巻第 6 号, pp.651-656, 2004.11